



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK GÜÇLÜ LED'LERE YÖNELİK TERMOELEKTRİK
MODÜL VE ISI BORULU HİBRİT SOĞUTMA ÜNİTESİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Emre ÜRÜN

DANIŞMAN

Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

AKSARAY, 2023

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 172318402 numaralı Doktora öğrencisi Emre ÜRÜN tarafından hazırlanan “YÜKSEK GÜÇLÜ LED'LERE YÖNELİK TERMOELEKTRİK MODÜL VE ISI BORULU HİBRİT SOĞUTMA ÜNİTESİNİN GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Unvanı Adı SOYADI

Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Unvanı Adı SOYADI

Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Unvanı Adı SOYADI

Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi:/...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Doktora tezi olarak sunduđum bu çalıřmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı dűőecek bir yol ve yardıma bařvurmaksızın yazdıđımı, yararlandıđım eserlerin kaynakçada gűőterilenlerden olduđuđunu, çalıřmamda kullandıđım verilerin orijinalliđini ve her tűrlű intihalden uzak olduđuđunu beyan ederim.

Enstitű tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tűm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza
Emre őrűN

TEŞEKKÜR

Teknik ve bilimsel anlamda kendimi geliştirmemde büyük katkısı olan ve tez süresince beni yönlendirip bilimsel bakış açımı ve ufkumu genişleten değerli danışman hocam Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN'e, tez süresince değerli katkılar sunan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Yüksel KAPLAN ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammet ÇELİK'e teşekkürlerimi sunuyorum. Tezimin tüm aşamalarında desteğini esirgemeyen mesai arkadaşım Arş. Gör. Dr. Burcu ÇİÇEK'e teşekkür ederim.

Her şart ve durumda sevgi ve desteklerini esirgemeyen, annem Fatma ve babam Süleyman ÜRÜN ile ablam Betül Ekmekçi'ye teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimimle birlikte hayatımın her anında varlığından güç duyduğum, meşakkatli yolda manevi desteklerini hissettiğim sevgili eşim Feride ÜRÜN'e, kıymetli yavrularım Eren, Kayra ve Talha'ya şükranlarımı sunarım.

Emre ÜRÜN
AKSARAY, 2023

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Aydınlatma Teknolojileri	2
1.2 LED Teknolojisi	5
1.3 Çalışmanın Amacı	9
1.4 Literatür Özeti	10
1.4.1 LED’li aydınlatma sistemlerindeki ısı problemlere yönelik çalışmalar.	10
1.4.2 Isı borulu soğutma çalışmaları	16
1.4.3 Termoelektrik soğutma çalışmaları	23
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	26
2.1 Isı Borulu Soğutma.....	26
2.1.1 Isı borusu türleri	29
2.1.1.1 Konvansiyonel ısı borusu	29
2.1.1.2 Titreşimli ısı borusu	30
2.1.1.3 Düz plakalı ısı borusu.....	31
2.1.1.4 Dönen ısı borusu	32
2.1.1.5 Mikro ve minyatür boyutlu ısı borusu.....	32
2.1.1.6 Döngü ısı borusu	33
2.1.2 Isı borusunda kullanılan malzemeler.....	34
2.1.3 Isı borusu çalışma akışkanları	35
2.1.4 Fıtil	37
2.1.5 Isı borusu çalışma limitleri.....	38
2.2 Termoelektrik Soğutma.....	39
2.2.1 Termoelektrik soğutucu yapısı ve yarı iletken malzemeler	42
2.2.2 Termoelektrik etkiler	46
2.2.2.1 Seebeck etkisi.....	46
2.2.2.2 Peltier etkisi.....	47
2.2.2.3 Thomson etkisi	47
2.2.3 Malzeme katsayısı (Figure of Merit= Z)	48
2.2.4 Performans (Başarımlar) katsayısı (COP)	48
2.2.5 Jonksiyon sıcaklığı	49
3. MATERYAL VE YÖNTEM	53
3.1 Deneysel Çalışma	54
3.1.1 Isı borulu soğutucu ünite	54
3.1.2 Termoelektrik soğutucu ünite.....	60
3.1.3 Hibrit soğutma ünitesi	62
3.1.3.1 Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite.....	62
3.1.3.2 Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite	64
3.1.4 Çoklu çipli ışık yayan diyot (COB LED) özellikleri.....	65
3.1.5 Deneysel çalışmada kullanılan ekipmanlar ve özellikleri	68
3.2 Nümerik Analiz	74
3.2.1 Matematiksel model	75

3.2.1.1 Süreklilik denklemi (Kütlenin korunumu).....	75
3.2.1.2 Momentum denklemi (Navier-Stokes eşitliği).....	76
3.2.1.3 Enerji denklemi	76
3.2.2 Geometrik modeller.....	76
3.2.2.1 Mesh (Çözüm ağı) geometrisi.....	78
3.2.2.2 CFD çözümlemede ağdan bağımsızlık	81
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	84
4.1 Termoelektrik Modül Verimi	84
4.2 Isı Borusu Verimi	95
4.2.1 100 Watt LED gücünde ısı borusu çap değişiminin soğutma performansına etkisi.....	103
4.2.2 100 Watt LED gücünde kanatçık boyutunun soğutma performansına etkisi.....	107
4.4.3 100 Watt LED gücü için bakır malzeme kullanımında soğutucu performansı	111
4.3 Hibrit Soğutma Ünitesi Verimi	115
4.3.1 Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu	116
4.3.2 Termoelektrik modül (peltier) öncelikli hibrit soğutucu.....	127
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	139
KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ.....	154

DOKTORA TEZİ

YÜKSEK GÜÇLÜ LED'LERE YÖNELİK TERMoeLEKTRİK MODÜL VE ISI BORULU HİBRİT SOĞUTMA ÜNİTESİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Emre ÜRÜN

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

ÖZET

Birçok avantaja sahip olan LED'ler tükettikleri elektrik enerjisinin yaklaşık %20'sini ışık enerjisine dönüştürebilirken, enerjinin geriye kalan %80'lik kısmı ise ısı enerjisi olarak açığa çıkmaktadır. LED'lerden optimum verim alınması ve LED'in kullanım ömrünün uzun olması, ortamdaki ısıнын uzaklaştırılmasıyla doğru orantılıdır. LED'lerin bilhassa yüksek ışık akısı gereken alanlarda kullanımı söz konusu olduğunda, ortamdan ısıнын uzaklaştırılmasına yönelik sistemlerin kullanımı zorunlu hale gelmektedir.

Yüksek güçte LED'li aydınlatma sistemlerinde ısıl problemlerin çözümü için tek soğutma yönteminin yetersiz kaldığı durumlar için birden fazla soğutma sisteminin entegre edilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu amaçla öncelikle ısı borulu soğutucu ve termoelektrik modüllü soğutucu olmak üzere iki farklı model tasarlanmıştır. Daha sonra bahse konu iki soğutucuyu üzerinde barındıran hibrit soğutma sistemi tasarlanmıştır. Hibrit soğutma sistemi ısı borusu öncelikli ve termoelektrik modül öncelikli olmak üzere iki farklı tasarımdan oluşmaktadır. Tasarlanan modellerin LED soğutma performansları nümerik analiz ve deneysel ölçümlerle incelenmiştir. Çalışmanın nümerik kısmında öncelikle tasarımı yapılan dört farklı soğutucu modelin HAD analizleri yapılmıştır. Elde edilen HAD simülasyon sonuçları deneysel testlerle desteklenerek sistem doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Böylelikle farklı iki soğutma yönteminin birlikte kullanılması durumunda sistemin uyumluluk ve performansı belirlenmiştir. Soğutucu modeller arasında en düşük jonksiyon sıcaklığı, dolayısıyla en iyi soğutma performansı termoelektrik modül öncelikli hibrit soğutma ünitesinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Güçlü LED, Isı Borusu, Termoelektrik Modül, HAD.

Aralık, 2023; 154 sayfa

PhD. THESIS

DEVELOPMENT OF HYBRID COOLING UNIT WITH THERMOELECTRIC MODULE AND HEAT PIPE FOR HIGH POWER LEDs

Emre ÜRÜN

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

ABSTRACT

While LEDs, which have many advantages, can convert about 20% of the electrical energy they consume into light energy, the remaining 80% of the energy is released as heat energy. Optimum efficiency from LEDs and long service life of LEDs are directly proportional to the removal of heat from the environment. When it comes to the use of LEDs, especially in areas where high luminous flux is required, the use of systems for removing heat from the environment becomes mandatory.

It becomes inevitable to integrate more than one cooling system for cases where a single cooling method is insufficient for the solution of thermal problems in high power LED lighting systems. For this purpose, two different models were designed, primarily a heat pipe cooler and a thermoelectric module cooler. Then, a hybrid cooling system was designed, which includes the two coolers in question. The hybrid cooling system consists of two different designs: heat pipe priority and thermoelectric module priority. The LED cooling performances of the designed models were investigated by numerical analysis and experimental measurements. In the numerical part of the study, CFD analyzes of four different cooler models were made. The obtained CFD simulation results were supported by experimental tests and system validation was carried out. Thus, the compatibility and performance of the system were determined when two different cooling methods are used together. Among the cooler models, the lowest junction temperature and therefore the best cooling performance were obtained in the thermoelectric module priority hybrid cooling unit.

Keywords: High Power LED, Heat Pipe, Thermoelectric Module, CFD.

December, 2023; 154 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Aydınlatma teknolojisinin tarihsel gelişimi	4
Şekil 1.2. LED (ışık yayan diyot) iç yapısı	7
Şekil 1.3. LED, hibrit araç, rüzgar ve güneş enerjisi teknolojilerinin pazar payı	8
Şekil 1.4. Aydınlatma ürünlerinin yıllara göre küresel pazar payları	9
Şekil 2.1. Isı borusu yapı elemanları ve çalışma prensibi	28
Şekil 2.2. Geleneksel ısı borusu	29
Şekil 2.3. Titreşimli ısı borusu	30
Şekil 2.4. Düz plakalı ısı borusu	31
Şekil 2.5. Dönen ısı borusu	32
Şekil 2.6. Döngü ısı borusu	33
Şekil 2.7. Isı borusu fitil yapıları	38
Şekil 2.8. Termoelektrik üreticinin genel yapısı	40
Şekil 2.9. Termoelektrik modülü oluşturan bileşenler	42
Şekil 2.10. Akım geçirilen N-tipi ve P-tipi yarı iletkenlerdeki ısı akışı	43
Şekil 2.11. Termoelektrik soğutucu modül (peltier) çalışma prensibi	44
Şekil 2.12. P tipi yarı iletkenlerin malzeme katsayılarının sıcaklığa göre değişimi ..	45
Şekil 2.13. N tipi yarı iletkenlerin malzeme katsayılarının sıcaklığa göre değişimi. 46	
Şekil 2.14. LED'in yapısı ve çipten yayılan ısı yolu	51
Şekil 2.15. LED çipinden çevreye yayılan ısı akış şeması	51
Şekil 3.1. Çalışmanın metodolojisi	54
Şekil 3.2. LED yongasının yerleşeceği ısı emici taban	54
Şekil 3.3. Çalışma için tasarlanan ısı boruları	55
Şekil 3.4. (a) Kanatçık ilaveli ısı borulu soğutma ünitesi (b) Hibrit soğutma ünitesinde kullanılan ısı borulu soğutma ünitesi	56
Şekil 3.5. Prototipi imal edilen ısı borulu soğutucu ünite	57
Şekil 3.6. Isı borulu soğutucu ünite deney düzeneği	59
Şekil 3.7. Isı borulu soğutucu ünite sıcaklık ölçüm noktaları	60
Şekil 3.8. Termoelektrik modül	61
Şekil 3.9. Termoelektrik soğutucu ünite sıcaklık ölçüm noktaları	62
Şekil 3.10. Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite deney düzeneği	63
Şekil 3.11. Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite sıcaklık ölçüm noktaları	64
Şekil 3.12. Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite sıcaklık ölçüm noktaları	65
Şekil 3.13. Lumileds L2C5-27901211E1900 model LED karakteristik özellikleri ..	67
Şekil 3.14. LUXEON L2C5-27901211E1900 LED için mekanik boyutlar	68
Şekil 3.15. LED'lerin elektriksel bağlantısı	68
Şekil 3.16. LED'ler için kullanılan güç kaynağı	69
Şekil 3.17. Termoelektrik modül için kullanılan güç kaynağı	70
Şekil 3.18. Sıcaklık ölçüm cihazı (datalogger)	71
Şekil 3.19. Deneyisel çalışmada kullanılan anemometre	72
Şekil 3.20. Soğutucu fan	72
Şekil 3.21. Termal arayüz malzemesi	73
Şekil 3.22. (a) Bıçak sigorta (b) On/Off Geçiş anahtarı	74
Şekil 3.23. (a) Isı borusu öncelikli (b) Termoelektrik modül öncelikli (c) Termoelektrik modüllü soğutucu tasarımları	77
Şekil 3.24. 2D ve 3D mesh elemanlarına ait geometriler	79

Şekil 3.25. Tasarlanan modellerin mesh (ağ) yapıları; (a) Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite, (b) Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite, (c) Isı borulu soğutucu ünite.....	80
Şekil 3.26. Termoelektrik soğutucu mesh (ağ) yapısı.....	81
Şekil 4.1. 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için termoelektrik modüllü soğutucu üniteadaki sıcaklık dağılımı	85
Şekil 4.2. Farklı LED ve peltier güç girişleri için nümerik çalışmada elde edilen sıcaklık değerleri.....	88
Şekil 4.3. Farklı LED ve peltier güç girişleri için deneysel çalışmada elde edilen sıcaklık değerleri.....	91
Şekil 4.4. Termoelektrik soğutucu ünite de jonksiyon sıcaklık dağılımı (model).....	94
Şekil 4.5. Termoelektrik soğutucu ünite de jonksiyon sıcaklık dağılımı (deney)	95
Şekil 4.6. 40, 60, 80 ve 100 Watt LED giriş güçleri için ısı borulu soğutucu ünite de ki sıcaklık dağılımı	96
Şekil 4.7. Farklı LED giriş güçleri için elde edilen sıcaklık değerleri (model).....	98
Şekil 4.8. Farklı LED giriş güçleri için saatlik ölçüm sonuçları.....	99
Şekil 4.9. Farklı LED giriş güçleri için elde edilen sıcaklık değerleri (deney)	100
Şekil 4.10. Farklı LED giriş güçleri için ısı borulu soğutucu ünite de ki jonksiyon sıcaklık dağılımı (model-deney).....	103
Şekil 4.11. 8, 10, 12 ve 14 mm boru çapları için ısı borulu soğutucu ünite de ki sıcaklık dağılımı	104
Şekil 4.12. Farklı ısı borusu çapları için noktasal sıcaklık değerleri	106
Şekil 4.13. Farklı boru çapları için ısı borulu soğutucudaki jonksiyon sıcaklıkları	107
Şekil 4.14. 48, 56 ve 62 mm kanatçık uzunlukları için ısı borulu soğutucu ünite de ki sıcaklık dağılımı	108
Şekil 4.15. Farklı kanatçık uzunluklarındaki noktasal sıcaklık değerleri	109
Şekil 4.16. Farklı kanatçık uzunlukları için ısı borulu soğutucudaki jonksiyon sıcaklıkları	110
Şekil 4.17. Bakır kanatçık, bakır ısı emici taban ve model için ısı borulu soğutucudaki sıcaklık dağılımı.....	112
Şekil 4.18. Farklı malzeme türlerindeki noktasal sıcaklık değerleri.....	114
Şekil 4.19. Farklı malzeme türleri için ısı borulu soğutucudaki jonksiyon sıcaklıkları	115
Şekil 4.20. 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için hibrit soğutucu ünite de ki sıcaklık dağılımı (ısı borusu öncelikli).....	117
Şekil 4.21. Farklı LED ve peltier güç girişleri için sıcaklık değerleri (model)	120
Şekil 4.22. Farklı LED ve peltier güç girişleri için sıcaklık değerleri (deney).....	123
Şekil 4.23. Hibrit soğutucudaki (ısı borusu öncelikli) jonksiyon sıcaklık dağılımı (model)	125
Şekil 4.24. Hibrit soğutucudaki (ısı borusu öncelikli) jonksiyon sıcaklık dağılımı (deney).....	127
Şekil 4.25. 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için hibrit soğutucu ünite de ki sıcaklık dağılımı (peltier öncelikli)	128
Şekil 4.26. Farklı LED ve peltier güç girişleri için sıcaklık değerleri (model)	131
Şekil 4.27. Farklı LED ve peltier güç girişleri için sıcaklık değerleri (deney).....	134
Şekil 4.28. Hibrit soğutucudaki (peltier öncelikli) jonksiyon sıcaklık dağılımı (model)	136
Şekil 4.29. Hibrit soğutucudaki (peltier öncelikli) jonksiyon sıcaklık dağılımı (deney)	138

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yaygın kullanılan ışık kaynaklarının karşılaştırması	5
Çizelge 1.2. Beyaz ışık kaynaklarındaki enerji dönüşümü	7
Çizelge 1.3. LED termal yönetimi için farklı soğutma yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar	16
Çizelge 1.4. LED termal yönetimi için ısı borusu kullanılan çalışmalar	22
Çizelge 1.5. LED termal yönetimi için termoelektrik modül kullanılan çalışmalar ...	25
Çizelge 2.1. Farklı çalışma akışkanları ve malzemelerin uyumluluğu	35
Çizelge 2.2. Soğutucu akışkanlar	36
Çizelge 2.3. Termoelektrik modüllerin kullanıldığı alanlar ve uygulamalar	42
Çizelge 3.1. Kanatçık özellikleri	56
Çizelge 3.2. Saf suyun termal özellikleri	57
Çizelge 3.3. Isı borusu fiziksel özellikleri	58
Çizelge 3.4. Termoelektrik modül özellikleri	61
Çizelge 3.5. Lumileds L2C5-27901211E1900 model LED yapısal özellikleri	66
Çizelge 3.6. LED'ler için kullanılan güç kaynağı teknik özellikleri	69
Çizelge 3.7. Termoelektrik modül için kullanılan güç kaynağı teknik özellikleri	70
Çizelge 3.8. Sıcaklık ölçüm cihazı teknik özellikleri	71
Çizelge 3.9. Tasarımdaki materyallerin yapısal ve fiziksel özellikleri	78
Çizelge 4.1. Farklı peltier güçlerinde noktasal sıcaklık değerleri (simülasyon)	86
Çizelge 4.2. Farklı peltier güçlerinde noktasal sıcaklık değerleri (deney)	89
Çizelge 4.3. Termoelektrik soğutucuda farklı LED giriş güçleri için hata oranları ..	93
Çizelge 4.4. Isı borulu soğutucuda farklı LED giriş güçleri için hata oranları	102
Çizelge 4.5. Hibrit soğutucu (ısı borusu öncelikli) noktasal sıcaklık değerleri (simülasyon)	118
Çizelge 4.6. Hibrit soğutucu (ısı borusu öncelikli) noktasal sıcaklık değerleri (deney)	121
Çizelge 4.7. Hibrit soğutucuda (ısı borusu öncelikli) farklı LED giriş güçleri için hata oranları	124
Çizelge 4.8. Hibrit soğutucu (peltier öncelikli) noktasal sıcaklık değerleri (simülasyon)	129
Çizelge 4.9. Hibrit soğutucu (peltier öncelikli) noktasal sıcaklık değerleri (deney) ..	132
Çizelge 4.10. Hibrit soğutucuda (peltier öncelikli) farklı LED giriş güçleri için hata oranları	135

SİMGELER VE KISALTMALAR

CFC	Kloroflorokarbon
COB	Çoklu Çip
COP	Performans Katsayısı
DC	Doğru Akım
EL	Elektrolüminans
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
I	Peltiere Verilen Akım
K	Renk Sıcaklığı
k	Isıl İletkenlik Katsayısı
LED	Işık Yayan Diyot
Op	Optimum
PCB	Baskı Devre Kartı
P_{el}	Elektriksel Güç
P_{heat}	Isıl Güç
P_{opt}	Işık Enerjisine Dönüşen Güç
Q_p	Peltierden açığa çıkan ısı
q	Yoğunluk
R_{th}	Termal Direnç
R_{thj-a}	Toplam Termal Direnç
R_{thj-s}	Çipten Lehim Noktası Kadar Olan Termal Direnç
T_a	Dış Ortam Sıcaklığı
T_c	Termoelektrik Model Soğuk Yüzey Sıcaklığı
TE	Termoelektrik
T_h	Termoelektrik Model Sıcak Yüzey Sıcaklığı
T_j	Jonksiyon Sıcaklığı
T_s	Lehim Noktası Sıcaklığı
V	TE soğutucunun uçları arasındaki potansiyel fark
$\vec{V}$	Akışkan Hızı
Z	Malzeme Katsayısı
ZT	Mazeme Katsayısı
α	Seebeck Katsayısı
ΔT	TE soğutucu uçları arasındaki sıcaklık farkı
Π_{ab}	Peltier Katsayısı
τ_{ab}	Thomson Katsayısı
ρ	Elektriksel Direnç
σ	Elektriksel İletkenlik
°C	Santigrat
η	Verim
$\vec{\nabla}$	Gradyan Operatörü
μ	Dinamik Viskozite

1. GİRİŞ

Nüfus artışına paralel olarak artan tüketimle birlikte bu ihtiyacı karşılamak için sanayileşme ve teknolojinin de gelişmesi, enerji ihtiyacında ciddi artışa sebep olmaktadır. Artan ihtiyacı karşılamak için enerji üretiminde kaynak çeşitliliği ve verimliliği üzerine birçok araştırma yapılmaktadır.

Enerji kaynaklarındaki sınırlılıklar ve sürdürülebilirliğin önemi, mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanmayı zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda enerjinin girdi olarak kullanıldığı tüm sistemlerde verim artırmaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

Aydınlatma sistemleri için harcanan elektrik enerjisi miktarı, toplam elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık beşte birini oluşturmaktadır. Bu durum aydınlatma sistemlerinde kullanılan elektrik enerjisinin daha verimli kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmasını tetiklemiştir.

Tarihten günümüze Edison'un ampülü icat etmesinden bu yana aydınlatma teknolojileri gelişim ve değişime uğramıştır. Geleneksel aydınlatma sistemleri ile karşılaştırıldığında ışık yayan diyot (LED)'lar harcanan enerji ile daha yüksek ışık akısı elde etme arayışında ön plana çıkmaktadır.

LED teknolojisinin gelişmesiyle birlikte gün geçtikçe LED'lerin etkinlik faktörü artmaktadır. LED'ler düşük enerji tüketimi, farklı renk seçenekleri, basit yapısı, mikro tasarım boyutları, uzun ömürleri vb. birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar LED'lerin aydınlatma sistemlerinde kullanımının yaygınlaşmasını sağlamaktadır.

Birçok avantaja sahip olan LED'ler tükettikleri elektrik enerjisinin yaklaşık %20'sini ışık enerjisine dönüştürebilirken, enerjinin geriye kalan %80'lik kısmı ise ısı enerjisi olarak açığa çıkmaktadır. LED'lerden optimum verim alınması ve LED'in kullanım ömrünün uzun olması, ortamdaki ısıнын uzaklaştırılmasıyla doğru orantılıdır.

Aydınlatma sistemlerinde kullanılan LED'lerin gücündeki artış, açığa çıkan ısıнын da artmasına yol açmaktadır. LED'lerin bilhassa yüksek ışık akısı gereken alanlarda kullanımı söz konusu olduğunda, ortamdan ısıнын uzaklaştırılmasına yönelik sistemlerin kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Yüksek güçlü LED'lerin

soğutulmasında doğal ve zorlanmış taşınım şartlarından yararlanılarak birçok soğutma yöntemi denenmektedir.

Sonuç olarak yüksek güçte LED'li aydınlatma sistemlerinde ısı problemlerin çözümü için tek soğutma yönteminin yetersiz kaldığı durumlar için birden fazla soğutma sisteminin entegre edilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir.

1.1 Aydınlatma Teknolojileri

Zaman geçtikçe insanoğlunun yaşam şartlarının değişmesiyle birlikte ihtiyaç ve beklentileri de değişim göstermiştir. Bu değişim avcı/toplayıcı toplumlardan örgütsel yapıya gereksinim duyan yerleşik toplumlara kadar yaşamın tüm evrelerinde tarihsel bakış açısıyla değerlendirildiği zaman görülebilmektedir. Karşılanan bir ihtiyaç yeni ihtiyaçların açığa çıkmasına da yol açmıştır. Bir diğer deyişle toplumsal yaşamın ortaya çıkardığı ihtiyaçlar bireylerin yeni arayış ve buna bağlı olarak ürettikleri, icat ettikleri kültür aracı olan aletlerle kendini göstermiştir. Bahse konu gelişmeler arasında insanlığın ihtiyaçlarını gidermek için kullandıkları aydınlatma da yer almaktadır.

Ülkemiz enerji ihtiyacını karşılamada dışa bağımlılık göstermektedir. İhtiyaç duyulan enerjinin %30'u fosil yakıt kaynaklarından dönüştürülerek elde edilirken; ithal edilen enerji %62 seviyesindedir (Gençoğlu, 2005). Bu doğrultuda enerji kaynaklarından optimum düzeyde yararlanma zorunluluğu gün yüzüne çıkmaktadır.

Yapay aydınlatmanın en temel unsuru olan ampul, T. Edison tarafından ticari maksatla ilk olarak 1880 yılında üretilmiştir. İlk ampülün keşfiyle birlikte aydınlatma sistemleri geçmişten günümüze gelişimini devam ettirmektedir. Artan enerji maliyetleri insanoğlunu tasarruf açısından yeni arayışlara itmiştir. Ayrıca yapay aydınlatmada kalite arayışı da söz konusu olmaktadır (Çiçek, 2019). Bu arayış üretim parametrelerinde meydana gelen gelişimin temelini oluşturmaktadır. Böylece aydınlatma sistemlerinde yeni teknikler ortaya çıkmıştır.

Karbondioksit emisyonlarını ve enerji maliyetlerini azaltmaya doğru hareket eden bir dünyada enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik öncelik haline gelmiştir (Gutierrez vd., 2017). Aydınlatma teknolojileri de bahse konu önceliklerden etkilenmektedir. Aydınlatma tekniği birtakım nitelikleri bünyesinde barındırmaktadır. Görsel

algılamanın en iyi koşullarda gerçekleşmesini sağlamanın yanında üretim maliyeti ve kullanım kaynaklı tüketim harcamaları bakımından en ekonomik çözümler getirmelidir. Aynı zamanda tasarım bakımından insan yapısına uygun ve kullanıldığı ortam mimarisine uyumlu olmalıdır. Bahsi geçen aydınlatma tekniği, estetik, psikoloji ve ekonomik kazanımlar elde edilmesini sağlayan bir kavramdır. Başka bir ifadeyle içinde bulunduğumuz dönemde aydınlatma; ilk olarak bireylerin fizyolojik görme ihtiyacını karşılama hedefine sahiptir. Ayrıca görme konforuna, iş verimliliğine ve mimari uyuma dikkat etmektedir (Şahin, 2014).

Yapay aydınlatmanın başlangıcı çok eski tarihlere dayanmaktadır. Yapay aydınlatma tarih öncesi dönemlerde ateşin keşfi ile başlayıp bugünün gözde teknolojisi LED'e kadar birçok evrim geçirmiştir.

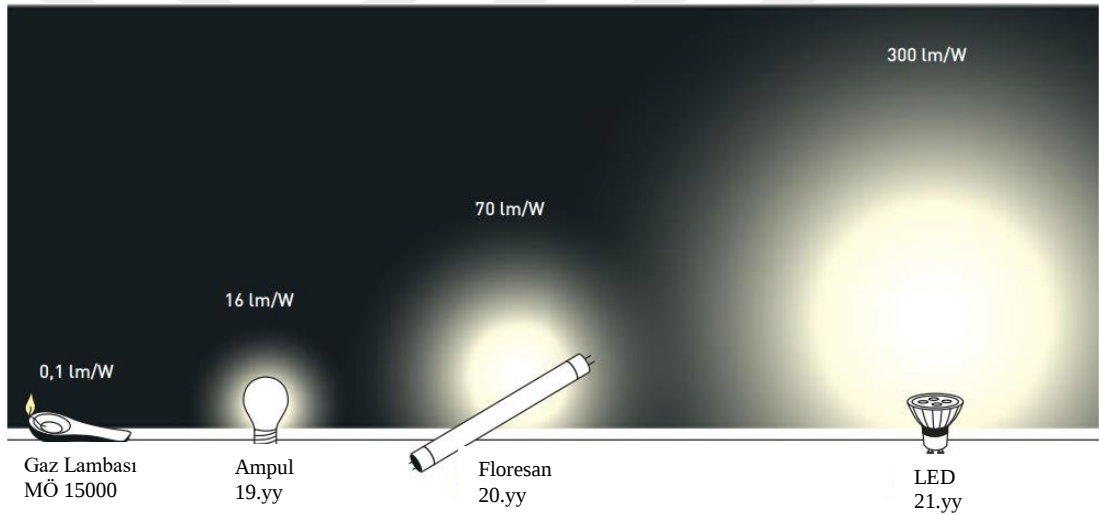
Yapay aydınlatma da en büyük değişikliklerden biri 1700'lü yılların sonlarına doğru tüp veya kanal vasıtasıyla ışık armatürüne yanıcı gaz pompalanması usulüne göre çalışan gaz lambaları ile ortaya çıkmıştır. 1879 yılında Thomas Edison'un akkor lambayı ticari amaçla piyasaya sürmesi üzerine, bir yıl kadar kısa süre sonunda Wabash Indiana dünyada elektrik ile aydınlatılan ilk şehir olarak tarihe adını yazdırmıştır. Bahse konu gelişmelerin ardından elektik ışığı günlük hayatta büyük bir hızla yaygınlaşmıştır. Çalışma prensibi bakımından akkor lambalar, bir direnç devresinin flaman lamba teline akım uygulandığında ışık yayması usulüne dayanır. Akkor lambalar, diğer elektrikli aydınlatma türlerine göre en basit yapıya sahip olan ve dış ortam sıcaklığından en az etkilenen aydınlatma elemanıdır (Cole ve Driscoll, 2014).

Işığın doğal yolla elde edildiği güneş ışığı, ateş, mum ve akkor filaman lambalar uzun yıllar kullanılmıştır. Sonrasında bir önceki aydınlatma teknolojileriyle kıyaslandığında pek çok avantaja sahip olan floresan ve LED teknolojilerine geçilmiştir (Yılmaz vd., 2019).

Temel yapısı, inert (soy gazlar ve azot) gazlar ve düşük miktarda cıva içeren fosfor ile kaplı cam tüpten oluşan floresan lambaların keşfi 1930'lu yıllara dayanmaktadır. Floresan lambaları aktif etmek için başlatma düzeneği ve enerji kontrolü amacıyla akım düzenleyici kullanılması gerekir. Bu gereksinimler floresan lambaların dezavantajı olarak görülebilir (Cole ve Driscoll, 2014).

Floresan lambaların akkor ampullere göre yüksek enerji verimliliği, uzun ömürleri, uygun fiyatları gibi avantajları bulunması nedeniyle 1990’larda floresan lambalar akkor ampullerin yerini almaya başlamıştır (Waide, 2010).

Tarih öncesi dönemlerden bu yana insanoğlu çeşitli aydınlatma gereçlerinden yararlanmıştır (Şekil 1.1). 2000’li yılların başından itibaren LED aydınlatma sistemleri ticari, konut ve dış aydınlatma sektörlerinde artan ivmeyle yer edinmektedir. LED’lerin aydınlatma sistemlerinde tercih edilmesinin en önemli sebeplerinin başında düşük güçte enerji girişi ile yüksek ışık verimi (lm/W) alınabilmesi gelmektedir. Dzombak ve arkadaşlarının (2020) ifadesine göre 2020 yılı itibariyle LED aydınlatma sistemleri genel aydınlatma envanterinin yüzde 8’ini oluşturmuştur.



Şekil 1.1. Aydınlatma teknolojisinin tarihsel gelişimi (Akasaki vd., 2014).

Çizelge 1.1’de görüldüğü üzere LED aydınlatma ürünleri kullanım aşamasında diğer geleneksel aydınlatma ürünlerine kıyasla çok daha iyi performansa sahiptir. Aydınlatma teknolojisindeki hızlı değişim ve gelişimiyle birlikte LED’lerin diğer aydınlatma ürünlerine üstünlüğünün giderek artacağı öngörülmektedir.

Çizelge 1.1. Yaygın kullanılan ışık kaynaklarının karşılaştırması (Cole ve Driscoll, 2014).

IŞIK KAYNAKLARININ KARŞILAŞTIRMASI							
	Akkor	MH (metal halojen)	HPS (yüksek basınçlı sodyum)	Floresan	İndüksiyon	LED	
						Günümüzde	Gelecekte
Ömür	Düşük	Orta	İyi	Orta	Çok İyi	Çok İyi	Mükemmel
Verimlilik	Düşük	Orta	Çok İyi	Orta	Çok İyi	Çok İyi	Mükemmel
CRI	Orta	İyi	Orta	Çok İyi	Mükemmel	Çok İyi	Mükemmel
Gürültü	Düşük	Orta	İyi	Orta	Çok İyi	Mükemmel	Mükemmel
Opsıcaklık aralığı	Çok İyi	İyi	İyi	Düşük	Mükemmel	İyi	İyi
Soğuk çalışma	Çok İyi	İyi	İyi	Düşük	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Başlama süresi	Çok İyi	Orta	Orta	Orta	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Aç/kapa kullanım	Çok İyi	Orta	İyi	Düşük	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Kullanım süresince lümen azalması	Çok İyi	Orta	İyi	Çok İyi	İyi	İyi	Çok İyi

1.2 LED Teknolojisi

Gençoğlu'na göre (2005), refah seviyesinde herhangi bir azalma olmaması kaydı ile verim düşüklüğü ve performans kaybı gözlenmeden mal ya da hizmetlerin elde edilmesi için ihtiyaç duyulan enerji miktarındaki düşüş, enerjinin etkin kullanımıdır.

Işık verimi, teknolojinin gelişmesinde ön planda olan ve bu teknolojilerin kolayca kabul görmesini sağlayan başlıca parametredir. Başka bir ifadeyle, ışık kaynaklarının birim ışığı üretmek için harcaması gereken enerji miktarı gelişen teknoloji sayesinde gün geçtikçe azalmaktadır (Yılmaz vd., 2019).

Edison'un ampülü keşfi elektrikli yapay aydınlatmanın başlangıcı olarak ifade edildiğinde, günümüzde aydınlatmanın ikinci dönüm noktasının LED teknolojisi olduğu söylenebilir. Ampulün icadından bu yana kullanılan hiçbir ışık kaynağı LED kadar uzun süre çalışmamıştır. Buna ek olarak tükettikleri enerji miktarı dikkate alındığında kullanılan ışık kaynaklarının hiçbirisi az enerji tüketiminde LED'e yaklaşmamıştır (Yüce vd., 2016).

Malzemelerin içinden geçirilen güçlü elektriksel alana veya elektrik akımına karşı tepki olarak ışık yayması Elektrolüminesans (EL) olarak tanımlanır. Elektrolüminesans, pozitif yüklü boşlukların (hole) ve elektronların ışımsal

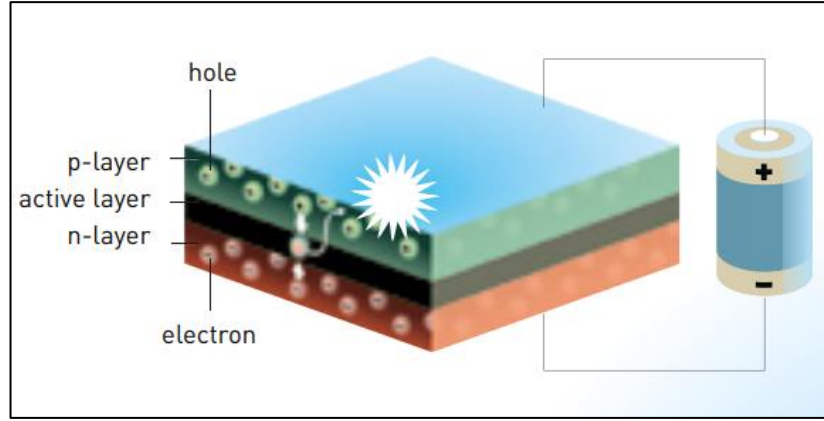
rekombinasyonu sonucu ortaya çıkar. Elektrik enerjisi ile uyarılan elektronların foton yansıtması prensibine göre çalışan malzemelerin geneli yarı iletkenlerden oluşmaktadır (URL-3). Tarihte ilk olarak elektrolüminesans olayı, H.J. Round tarafından 1907 yılında yapılan bir çalışmada silikon karbür (SiC) detektörden akım geçirilerek sarı renkte ışık üretilmesi ile meydana gelmiştir (Baltakesmez, 2011). Elektrolüminesans ışık üretiminin keşfiyle birlikte bu alanda çalışmalar ivme kazanmıştır. Genellikle yarı iletken malzemelerde görülen elektrolüminesans etki, yarı iletken malzemelerin gelişimine de büyük katkı sağlamıştır.

17 yaşından 33 yaşına kadar birkaç Sovyet radyo araştırma laboratuvarında teknisyen olarak çalışan Losev (1903-1942) yapmış olduğu bir dizi çalışmalar neticesinde ışık emisyonunun sıcaklığa bağlı olmadığını belirlemiştir. Losev aynı zamanda LED emisyonunun stoke's benzeri bir hukuka uyduğunu ve Einstein'ın fotoelektrik efektinin ters bir durumunu temsil ettiği sonucuna ulaşmıştır (Loebner, 1976). Çalışmaları neticesinde silisyum karbür dışında farklı malzemelerden üretilen diyotlardan, elektrik bağlantılarında değişiklikler yaparak (pozitif-negatif veya negatif-negatif) ışık elde etmeyi başarmıştır (Yurtseven, 2017).

Çalışma prensibinin temelini elektrolüminesans etkinin oluşturduğu ışık yayan diyot olarak tanımlanan LED, elektrik enerjisini ışığa dönüştürür. LED yarı iletken devre elemanı olarak tanımlanır. LED'in en önemli kısmını oluşturan ve ışığın üretildiği kısım olan LED çipi, yarı iletken malzemeden oluşmaktadır. Noktasal ışık kaynağı olan LED çipi, kılıf içine monte edilmiş yansıtıcı eleman vasıtasıyla ışığın belirlenen bir doğrultuda yayılmasını sağlar (Erol ve Canbolat, 2010).

LED'ler, üzerinden geçirilen akım değerine ve LED'in yapısına göre değişen şiddette ışın yayarlar. LED'in yapısında bulunan yarıiletken malzeme türüne göre üretilen ışının dalga boyu değişmektedir (Musayev, 2002).

LED'lerde ışık temel olarak, indiyum galyum nitrür (InGaN) gibi ana malzemelerin bir birleşiminin oldukça ince bir kristal tabakası (yaklaşık 2 nm) kullanılarak elde edilir. Olabildiğince ince olan InGaN katmanı bir miktar daha kalın galyum nitrür (GaN) katmanları sıkıştırır. InGaN katmanında ışığın üretilebilmesi için GaN katmanlarının birisinin pozitif, diğerinin ise negatif yüklü olması gerekir (Cole ve Driscoll, 2014). LED'in iç yapısı ve çalışma prensibi Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. LED (Işık Yayan Diyot) iç yapısı (Akasaki vd., 2014).

LED'ler ilk kez 1960'lı yıllarda ticari amaçla piyasaya sunulmuştur. Piyasaya sürülen kırmızı LED'lere 1990'ların ortalarına gelindiğinde diğer renkli LED'ler (yeşil, turuncu, sarı, mavi) eşlik etmiştir. 2000'li yıllara kadar üretilen LED'lerin verimi çok düşük olduğu için genel olarak zayıf ışığın yeterli olduğu gösterge aydınlatmalarında kullanılmıştır. 2000'li yıllara gelindiğinde, geleneksel aydınlatma ürünleri ile kıyaslandığında LED teknolojisinin gelişimi büyük bir ivme kazanmıştır. Üretimine başlandığı yıllarda etkinliği (lümen/watt) son derece düşük olan beyaz LED'lerin etkinliği zamanla 140 lm/W'ı geçmiştir (Cole ve Driscoll, 2014).

Çizelge 1.2'de görüldüğü gibi LED'ler enerji girdisinin %20'sini görünür ışığa dönüştürmektedir. Bu nedenle LED'ler Akkor filaman ampuller ile karşılaştırıldığında 2,5 kat görünür ışık üretimi nedeniyle verim açısından büyük üstünlüğe sahiptir. Bu avantaj aydınlatma sistemlerinde LED'lerin diğer aydınlatma elemanlarının yerini almasını ve öncelikli olarak tercih edilmesini beraberinde getirmektedir.

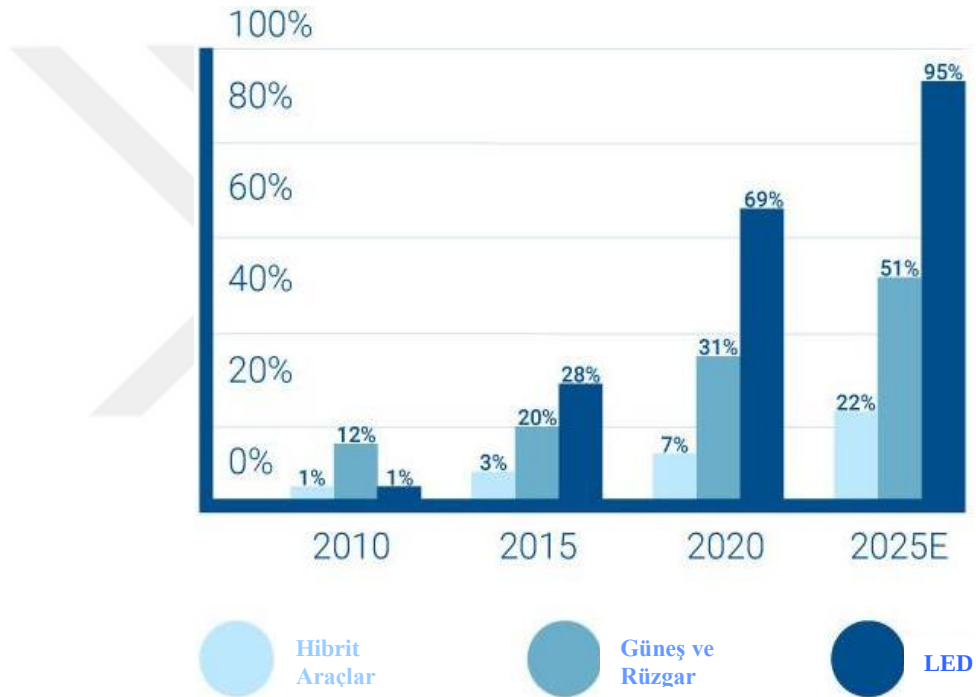
Çizelge 1.2. Beyaz ışık kaynaklarındaki enerji dönüşümü (Erol ve Canbolat, 2011).

	Akkor Flaman (%)	LED (%)
Görünür Işık	8	20
Kızılötesi	73	0
Isı	19	80
Toplam	100	100

Politika desteği, pazar kabulü, teknik gelişmeler ve maliyet düşürme çalışmaları gibi faktörler enerji teknolojilerinin gelişiminde belirleyici rol oynamaktadır. LED

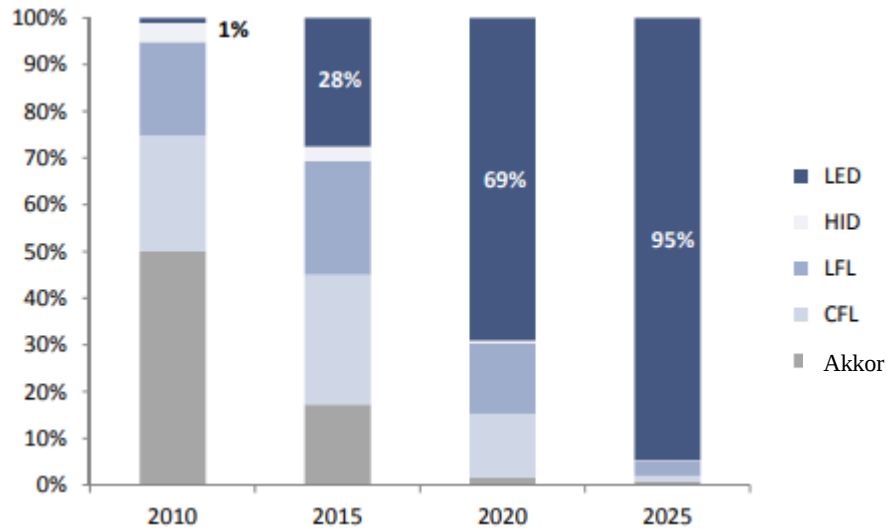
teknolojisi, insanlık tarihi boyunca sürekli gelişen enerji teknolojileri ile kıyaslandığında en hızlı değişim ve gelişim gösteren teknolojiler arasında yer almaktadır.

Şekil 1.3’de görüldüğü gibi LED teknolojisinin gelişimi ve pazar payı, son yılların popüler enerji teknolojileri arasında başı çeken hibrit araç ve güneş enerjisi teknolojilerine büyük üstünlük kurmuştur. 2010 yılında pazar payı % 12 olan LED teknolojisinin 2020 yılında % 69 pazar payına ulaşarak büyük ivme kazandığı görülmektedir. 2025 yılı itibariyle LED teknolojisinin aydınlatma sektöründeki pazar payının % 95 olması beklenmektedir.



Şekil 1.3. LED, Hibrit araç, rüzgar ve güneş enerjisi teknolojilerinin pazar payı (Sachs, 2015).

Aydınlatma ürünlerinin yıllara göre küresel pazar payları Şekil 1.4’de görülmektedir. 2010 yılında akkor ampuller % 50 ile en yüksek küresel pazar payına sahipken yeni nesil aydınlatma ürünü olan LED’ler sadece % 1’lik pazar payına sahiptir. 2015 yılında küresel pazar payı % 28’e çıkan LED’lerin 2025 yılında % 95’lik pazar payı ile aydınlatma sektörünü domine etmesi beklenmektedir. Yüksek verimlilik, uzun ömür ve dayanıklılık gibi avantajlar LED’lerin kısa sürede aydınlatma sektöründe bu denli tercih edilmesine neden olmaktadır.



Şekil 1.4. Aydınlatma ürünlerinin yıllara göre küresel pazar payları (Sachs, 2015).

1.3 Çalışmanın Amacı

LED’ler ışık verimi bakımından avantajlı aydınlatma elemanları olmasına rağmen, kullanıldığı sistem şartlarına göre ışık çıktısında bazı düşüşler meydana gelmektedir. Işık kaybını minimum düzeye indirmek için ürün tasarımı ve malzeme seçimi hayati öneme sahiptir. Doğru bir aydınlatma sistemi tasarımı, minimum düzeyde güç tüketimi ile maksimum seviyede ışık çıktısı sağlayacaktır (Yılmaz vd., 2019).

Yapısının yarı iletkenlerden oluşması LED’i ışığın oluşumu ve çalışma prensibi açısından halojen veya kompakt flüoresan gibi ışık kaynaklarından ayrışmasına sebep olmaktadır. LED’lerden elde edilen ışık çıkış miktarı zamanla azalır. Bu nedenle L70 standardı geliştirilmiştir. Elde edilen ışık miktarı, başlangıç ışığının % 70’ine düştüğünde LED’in kullanım ömrünün bittiği kabul edilmektedir. Lümen miktarındaki bahse konu % 30’luk kayıp için geçen süre ise LED’in kullanım ömrü olarak tanımlanmaktadır (Padmasali ve Kin, 2016).

LED’lerin harcadıkları enerjinin büyük kısmını ısıya dönüştürmesi ve açığa çıkan ısının LED’in ürettiği lümen miktarını baskılaması, kullanım ömrünün azalmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda LED ömrüne etki eden en önemli unsurların başında ısıl problemlerin geldiği görülmektedir. LED teknolojisinin sürekli gelişmesi kullanıcılara küçük yüzey alanına sahip LED yongalarından yüksek ışık akısı elde etme imkânı tanımaktadır. Özellikle mimari tasarım kaygılarının olduğu kullanım

alanlarında, minimum alan – maksimum ışık akısı istenilmektedir. Bu durum yüksek güçlü LED’lerin düşük hacimli ortamlarda kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu zorunluluk LED’lerdeki ısı problemine daha fazla artırmaktadır.

Literatüre bakıldığında LED’lerin ısı problemlerini çözmek adına farklı soğutucu elemanlardan oluşan birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Ancak LED teknolojisindeki hızlı gelişmeler termal yönetimde daha etkin, yüksek kapasiteli kompakt soğutma ünitelerinin tasarımını ve kullanımını gerektirmektedir.

Bu tez çalışmasındaki deneysel ve sayısal çalışmaların amacı; kısıtlı alana sahip küçük boyutlu yüksek güçte aydınlatma ortamlarında ısı borusu ve termoelektrik modül (peltier) teknolojilerini birleştirerek yüksek güçlü LED’lerin termal yönetimine etkisini ölçmektir. Böylelikle farklı iki soğutma yönteminin birlikte kullanılması durumunda sistemin uyumluluk ve performansı belirlenmektedir. Çalışma neticesinde literatüre ve aydınlatma sektörüne, ısı borusu ve termoelektrik modülden oluşan hibrit soğutma ünitesi kazandırılması hedeflenmektedir.

1.4 Literatür Özeti

LED’li aydınlatma sistemlerine yönelik literatür araştırması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm LED’li aydınlatma sistemlerindeki ısı sorunlarının çözümü için farklı yöntemler kullanılan çalışmalardan oluşmaktadır. İkinci ve üçüncü bölümlerde ise tez çalışmasında kullanılan ısı borusu ve termoelektrik modüllü soğutucular ile yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

1.4.1 LED’li aydınlatma sistemlerindeki ısı problemlere yönelik çalışmalar

Mohamad vd., (2013), doğal taşınım koşullarında yüksek güçlü LED dizilerinin soğutma performansı üzerine çalışmışlardır. Soğutucu destekli farklı tipte dizilmiş LED düzenlemeleriyle çeşitli deneyler yapmışlardır. Altı adet yüksek güçlü LED’den oluşan diziler 59 mm × 83 mm boyutlarında MCPCB üzerine dört farklı düzenlemede lehimlenerek birleştirilmiştir. Bu çalışmada termal direnci hesaplamak için analitik bir termal direnç modeli kullanılmışlardır. Yapılan çalışma neticesinde termal direncin ve birleşme sıcaklığının, dizi tipinden etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Farklı düzende altı yüksek güç LED’inden oluşan dört tip dizi göz önüne alındığında, yüksek güçlü LED’in üçgen diziliminde, en yaygın kullanılan kare

diziye kıyasla % 3.86 ile en yüksek ısı transfer katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma neticesinde LED'in dizi düzenindeki değişimin, sistemin ısı performansını etkilediğini belirlemişlerdir.

Kim ve Kang (2014), LED paketinin soğutma performansını artırmak için TIM (Termal Arayüz Malzemeleri) kullanmışlardır. Bu çalışmada, ısı dağılımını arttırmak amacıyla termal yağa CNT (karbon nanotüp) ve grafen eklenerek nano macunlar hazırlanmıştır. Nano macunun ısı iletkenliği ve yüksek güçlü LED'i soğutma performansı ölçülmüştür. LED çip sıcaklığının, kullanılan CNT macunu ile ağırlıkça % 0.75 nano parçacıklarda 7.5 °C ve grafen macunu ile ağırlıkça % 0.75 nano parçacıklarda 5.5 °C azaldığı görülmüştür. Nano macun malzemelerinin sıcak nokta problemini gidermek için ısı yayılımının artırılmasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

Hsieh vd., (2014), yapmış oldukları çalışmada yüksek güçlü LED'lerin termal yönetimi için Mikrosprey tabanlı tekli sprej püskürtmeli kapalı bir soğutma sistemi önerilmiş ve test edilmiştir. Çalışmada test edilen örnekler olarak 3W ve 1W x 4 olmak üzere iki farklı LED'e aynı mikrosprey uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut termal yönetim teknolojileri arasında verimli ve güçlü bir soğutma yöntemi olduğunu belirlemişlerdir. Tek bir LED'e uygulana tek sprejin LED soğutma için katkıda bulunacak bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca tek sprejin, en yüksek ortalama ısı transfer katsayısını ($h = 9375 \text{ W/m}^2\text{C}$) ve termal dağıtıcı ile çevre arasındaki minimum termal direnci (2 °C/W) olarak belirlemişlerdir.

Costa ve Lopes (2014), doğal taşınım koşullarında çalışan bir ışık yayan diyot (LED) lamba için geliştirilmiş soğutucu ile ilgili sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Isı alıcının temel geometrisi, silindirik bir merkez göbek ve bir dizi düzgün dağılmış radyal kanatçıklardan oluşmaktadır. Merkezdeki çekirdeğin minimum çapı sabit kalmakla birlikte incelenecek parametreleri kanat sayısı, kalınlığı, uzunluğu (radyal boyut) ve yüksekliği olarak belirlemişlerdir. Ticari kod ANSYS-CFX ile yapılan analizler neticesinde farklı yönetim parametrelerinin ısı emici performansı üzerindeki önemli olduğunu vurgulamışlardır. Kanatçık sayısı ve yükseklikleri arttırılarak ve kanatçık kalınlığının azaltılmasıyla 65 °C'lik çekirdek öz sıcaklığına ulaşmışlardır. Sonuçta sunmuş oldukları metodolojinin genel olarak tüm

hafif elektronik bileşenli diğer ısı alıcı tiplerini iyileştirmek üzere genişletilebileceğini belirtmişlerdir.

Zhao vd., (2015), yüksek güçlü LED farlarda uygulamak amacıyla geleneksel plaka - fin ısı alıcıları ve iletken plakalarla entegre yeni soğutma cihazının termal performansı üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Analizler, CFD yazılımı FloEFD kullanılarak hesaplamalar ile birleştirilen deneye dayandırılmıştır. Isı kaynağının birleşme sıcaklığını etkileyen faktörleri, termal direnç ağı modeli oluşturularak analiz etmişlerdir. Ayrıca, ısı iletken plakalı soğutma sistemi ile kanatlı bir ısı emiciyi optimize etmek için sayısal araştırmalar yapmışlardır. Isı transfer performansının, özellikle LED modülünün ve lamba kabuğunun sıcaklık dağılımı ile HCPS uzunluğunun sistem termal direnci ve ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Çalışmada simüle edilen ortam sıcaklığı, talaş paketi derinliği, eğim açıları ve fan dönme hızlarının birleşme sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yonga paketi derinliği arttıkça hava akışının zayıfladığını göstermiş, ayrıca uygulanan hava akış hızı sayesinde birleşme sıcaklığının kademeli olarak 116.61 °C'den 78.05 °C'ye düştüğü belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanarak zorunlu hava akımının, bağlantı sıcaklığı üzerinde muazzam etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Barbosa vd., (2017), yüksek güçlü LED'lere yönelik armatür tasarımı belirleyerek sonlu elemanlar yöntemi ile termal dağılım ve aydınlatma analizi yapmışlardır. LED armatür modelini analiz etmek için iki simülatör kullanmışlardır. Birinci simülatör, termal dağılımı analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak yapılmıştır. İkinci simülatör aydınlatma analizi için ışın izleme yöntemini kullanarak yapılmıştır. LED çip sıcaklığının simülasyonda 111.7 °C'ye ve deneyde ortalama 103.9 °C'ye ulaştığı görülmüştür. Isı emici plaka sıcaklığının, simülasyonda ortalama 76.7 °C'ye ve deneyde 76.3 °C'ye ulaştığı gözlenmiştir. 5W gücünde Power LED'lerin kullanıldığı tasarımda 4'lü, 6'lı ve 8'li LED armatürlerdeki LED sıcaklığını kanatçık yardımıyla yaklaşık 100 °C'de tutarak altı ve sekiz adet yüksek güçlü LED armatürleri tasarlayanın mümkün olduğu belirlenmiştir. Ayrıca dairesel armatür tasarımı ve hibrit soğutma ünitesi tasarlanarak daha etkin bir aydınlatma ve termal yönetim elde edilebileceği belirlenmiştir.

Wang vd., (2017), bu çalışmada yüksek güçlü LED modülünü soğutmak için kullanılan doğal bir konveksiyon ısı emicisi, ısı borusu teknolojisini haddeleme alüminyum ısı emici ile birleştirerek geliştirmişlerdir. Düz kanatçıklara sahip saf alüminyum soğutucu ve ısı borulu alüminyum soğutucu ünitenin performansı deney ve sonlu elemanlar sayısal simülasyonu ile araştırılmıştır. Sistemde radyatör yüksekliği, kanat sayısı, kanat yüksekliği, kanat kalınlığı, ısı borusu ve ısı borusu uzunluğunun termal performans üzerine etkileri incelenmiştir. LED bağlantı sıcaklığı ısı borusu kullanıldığında yaklaşık 8 °C azalmıştır. Radyatör yüksekliğinin (100-200 mm), kanatçık sayısının (16-32) ve kanatçık yüksekliğinin artırılması neticesinde LED bileşenlerinin birleşme sıcaklığının etkili bir şekilde azaldığını belirlemişlerdir.

Schmid vd., (2017), yapmış oldukları çalışmada, 150W güce sahip LED sokak lambası için aktif bir hava soğutma sisteminin bir parçası olarak dikey çift borulu tek akışlı bir ısı eşanjörünün kullanımını incelemişlerdir. Oluşturulan sistemde hava dolaşımını sağlayabilmek için lamba direği içinde dahili bir fan kullanılmıştır. Boru uzunluğu, malzeme iletkenliği, akış yönü, boru çapı oranı ve kütle akış hızı gibi çeşitli parametrelerin ısı transfer hızı üzerindeki etkisini incelemek için iki boyutlu eksenel simetrik bir sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Aydınlatma direği uzunluğunun ısı transferine etkisini gözlemleyerek, lamba direğinin 0,014 kg/s'lik yüksek bir kütle akış hızında 3 ila 5 m arasında uzatılması durumunda, ısı kaybının % 34.1 artarak 120.2 W değerine ulaştığı belirlenmiştir. Fakat 0.002 kg/s'lik düşük akış hızında ise sadece ısı kaybının % 8.4 oranında artarak 34.8 W'a çıktığı tespit edilmiştir. Genel olarak, daha uzun boru uzunluklarında düşük termal performans nedeniyle 0.006 kg/s'den daha küçük kütle akış hızlarının verimli olmayacağı tespit edilmiştir. Deney sonuçları ile LED birleşme sıcaklığının yaklaşık 42 °C'ye düşürülebileceğini belirlemişlerdir.

Jang vd., (2018), yapmış oldukları çalışmada SMD tipi LED yongaların termal yönetimi için yenilikçi analitik ve deneysel yöntemler önermişlerdir. Doğal taşınım ısı emicilerinin geometrik optimizasyon algoritması ve LED yüzey sıcaklığının tahmini için yeni bir analitik algoritma önerilmektedir. Belirlenen algoritmayı kullanarak, ısı emicinin optimal kanat konfigürasyonu ve karşılık gelen termal performansı, girilen taban plakası boyutlarına, ortam koşullarına, ısı dağılım hızına ve LED talaş dağılımlarına göre kolayca tahmin edilebildiğini belirtmişlerdir.

Analitik model, deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde doğrulanmış ve çeşitli LED ürünleriyle ilişkili soğutma sisteminin tasarımında yaygın olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Ngo vd., (2018), yapmış oldukları çalışmada, ısı emici plaka üzerine monte edilmiş SMD-LED'lerin termal performansını incelemişlerdir. LED düzenlemesinin, ısı emici plaka boyutunun ve elektrik teli modeli ile ısı yayma etkisini belirlemek amacıyla deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca LED'ler arasındaki termal bağlantı etkileri ANSYS Icepak kodunda uygun bir simülasyon gerçekleştirilerek analiz edilmiştir. Üç farklı boyuta sahip ısı emici plaka (40 mm x 40 mm, 60 mm x 60 mm, 80 mm x 80 mm) test edilmiştir. LED sıcaklığı artan ısı emici plaka boyutu ile azamakta, ancak sıcaklık azalması ısı emici plaka boyutunun daha da artmasıyla kademeli olarak inmektedir. Yapılan deneyler neticesinde elektrik teli modeli PCB'nin sadece LED sıcaklığını değil, aynı zamanda LED'ler arasındaki sıcaklık farkını ve eşit olmayan sıcaklık dağılımını da etkilediği belirlenmiştir. Geniş ve dar elektrik teli modeli PCB düzenleri arasındaki maksimum sıcaklık sapması, 2 x 2 LED dizilimi için yaklaşık 26.3 °C olarak belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, elektrik teli modelinin LED düzenlemesi ve ısı emici plaka boyutunun SMD-LED paketlerinin termal yönetiminde dikkatle tasarlanması gerektiğini göstermektedir.

Wang vd., (2018), yüksek güçlü LED'leri soğutmak amacıyla gelişmiş bir çoklu iğneden ağa elektrostatik sıvı hızlandırıcı (EFA) prototipi üreterek uygulamışlardır. Boşalma boşluğu, iğne ucu eğrilik yarıçapı, bitişik iğneler arasındaki mesafe, güç polaritesi ve korona gücünün iyonik rüzgar akış dağılımı üzerindeki önemli etkilerini göstermiştir. Deneysel çalışma, tasarlanan elektrostatik akışkan hızlandırıcının uygulamadaki yüksek güçlü LED'lerin ısı dağılımı için etkili olduğunu göstermiştir. Işık akısının zayıflama oranının ve bağlantı sıcaklığının yükselme oranının, geleneksel soğutma cihazlarından çok daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.

Seo ve Lee (2018), bu çalışmada araç farları için ferrofluid ile yüksek güçlü bir LED soğutma sisteminin ısı transferi ve aydınlatma performanslarını deneysel olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Bu bağlamda, çeşitli çalışma koşullarında ferrofluid (manyetik sıvı) kullanan yüksek güçlü LED soğutma sisteminin aydınlatma, sıcaklık ve ısıl dirençler de dahil olmak üzere ısı transfer özelliklerini deneysel olarak

incelemişlerdir. Çoklu kanatçıklar, sıcaklık, termal direnç, aydınlık, aydınlık etkinliği, ışık akısı ve yüksek güçlü LED soğutmanın ışık etkinliği ile mikro kanatlı ısı emici kullanarak, önerilen yüksek güçlü LED soğutma sisteminin ısı transferi ve aydınlatma performansı özelliklerini belirlemek için sistem manyetik alan yoğunlukları ve giriş gerilimleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Soğutma sisteminde maksimum 24 W güce sahip yüksek güçlü bir LED çipi kullanılmıştır. Tasarım 80 mm uzunluk, 25 mm çap ve 24 mm kanatçığa sahiptir. LED soğutma sisteminin 19.3 V'daki aydınlatmasının, artan güç tüketimi nedeniyle 18.9 V'dakinden ortalama % 4.1 oranında azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca yüksek güçlü LED soğutma sisteminin ferrofluid ile aydınlatılma oranının, hava ve su ile karşılaştırıldığında sırasıyla % 67.5 ve % 66.1 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ferrofluid ile doldurulmuş mikro kanatlı soğutucu ile yüksek güçlü LED soğutma sisteminin gözlenen ısı transferi ve aydınlık performans özelliklerinin, araçların farlarındaki uygulamalar için uygun olabileceğini belirtmişlerdir.

Huang vd., (2019), AlN seramik alt tabakanın yüksek güçlü LED'lerde ısı dağılımı performansını araştırmışlardır. 193 W/mK termal iletkenliğe ve 380 MPa eğilme mukavemetine sahip AlN alt tabaka, basınçsız sinterleme ile hazırlandıktan sonra bakır kaplama film ile birleştirilmiştir. AlN seramik substrat, sinterleme katkı maddesi olarak Y_2O_3 ile 1850 °C'de bant dökümü ve basınçsız sinterleme ile hazırlanmış, yapılan deneyler neticesinde maksimum birleşme sıcaklığı 78 °C olarak belirlenmiştir. AlN alt tabakanın Al_2O_3 alt tabakası ile kıyaslandığında çok daha iyi bir ısı yayma performansına sahip olduğu ve birleşme sıcaklığının 42 °C düşürüldüğü belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek ısı iletkenliğine sahip AlN seramik substratın, yüksek güçlü LED'lerde ısı dağılımı için umut verici olduğu vurgulanmıştır.

Çizelge 1.3'de LED'li aydınlatma sistemlerinin termal yönetimi için farklı soğutma yöntemlerinin uygulandığı çalışmalar yıllara göre sıralanmıştır. LED'lerdeki ısı problemlerin çözümü için ısı borusu ve termoelektrik modül dışında LED dizilimi, arayüz malzemesi, kanatçık geometrisi, LED yapısı, sıvı soğutma vb. konularda çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Çizelge 1.3. LED'in termal yönetimi için farklı soğutma yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar.

Yazar-Yıl	Çalışma Konusu
Mohamad vd., (2013)	Doğal taşınım koşullarında yüksek güçlü LED dizilerinin soğutma performansı
Kim ve Kang (2014)	LED paketi soğutmada termal arayüz malzemelerinin (TIM) performansı
Hsieh vd., (2014)	LED'lerin termal yönetimi için Mikrosprey tabanlı tekli sprej püskürtmeli kapalı soğutma sistemi analizi
Costa ve Lopes (2014)	Doğal taşınım koşullarında LED lamba için geliştirilmiş soğutucu ile ilgili sayısal bir çalışma
Zhao vd., (2015)	LED farlara yönelik plaka-fin ısı alıcıları ve iletken plakalarla entegre soğutma cihazının termal performansı
Barbosa vd., (2017)	LED'lere yönelik armatür tasarımında sonlu elemanlar yöntemi ile termal dağılım ve aydınlatma analizi
Wang vd., (2017)	LED modülünü soğutmak için kanatçıklı ve ısı borulu alüminyum soğutucu performansı
Schmid vd., (2017)	LED sokak lambası için dikey çift borulu tek akışlı bir ısı eşanjörünün termal performansı
Jang vd., (2018)	SMD tipi LED yongaların termal yönetimi için yenilikçi analitik ve deneysel yöntemler geliştirme
Ngo vd., (2018)	Isı emici plaka üzerine monte edilmiş SMD-LED'lerin termal performansı
Wang vd., (2018)	LED'leri soğutmak amacıyla çoklu iğneden ağa elektrostatik sıvı hızlandırıcı (EFA) performansı
Seo ve Lee (2018)	Araç farları için ferrofluid ile LED soğutma sisteminin ısı transferi ve aydınlatma performansı
Huang vd., (2019)	AlN seramik alt tabakanın yüksek güçlü LED'lerdeki ısı dağılım performansı

1.4.2 Isı borulu soğutma çalışmaları

Kotcioğlu vd, (2009), bilgisayarların soğutulmasında ısı borularının etkin kullanılması ile ilgili teorik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, tasarlanan ısı borulu soğutma sistemi CPU üzerine oturtulan bakır bir blok, blok içinde 6 adet dairesel kanal ve birbirinden bağımsız olarak çalışan ısı borularından oluşmaktadır. Tasarlanan sistemde kullanılan ısı borularının boyu 0.12 m ve kesit alanı $50.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ olarak belirlenmiştir. Soğutucu akışkan olarak NH_3 , R-22 ve R-134a soğutucu akışkanları seçilmiştir. Bu tasarımda aynı koşullar altında, CPU'dan R-22'nin 71 - 115 W, NH_3 'ın 80 - 99 W ve R-134a'nın 58 - 87 W aralıklarında ısı çektiğini belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışma neticesinde ısı borulu soğutma sisteminde kullanılan akışkanlar karşılaştırıldığında en uygun akışkanın R-22 olduğu sonucuna varmışlardır.

Yang vd., (2015), düz bir polimer (FR4) ısı borusundaki ısı transferini incelemişlerdir. Buhar haznesinin üst ve alt plakaları boyunca ısı iletimini geliştirmek için diziler ve polimer yoluyla bakır termal geçiş içeren yeni bir tasarım kullanılmışlardır. Farklı doldurma oranının (% 0 - 41) ve eğim açılarının (0, +90, 90) ısı transferine etkisi de incelenmiştir. Çalışma sıvısı ile doldurulmuş düz ısı borusunun (dizilim yoluyla) ısı direncinin, çalışma sıvısı olmadan kullanılan ısı borusuna kıyasla önemli ölçüde daha düşük bulunmuştur. 6 – 16 W aralığında ısı girişi için, termal geçişli bir ısı borusu ve % 28'lik bir dolun oranının en düşük termal direnci verdiği belirlenmiştir. Düz plaka ısı borusunun ayrıca elektronik bileşen için bir montaj alt tabakası olarak kullanıldığında termal dirençte % 57'lik bir azalma sağladığını belirlemişlerdir.

Mete ve Onaygil (2016), yapmış oldukları çalışmada ısı borusunun yapısı, çalışma prensibi ve çeşitli türde ısı borularının LED soğutmasında kullanımıyla ilgili literatürdeki araştırmalar hakkında bilgi vermişlerdir. Ayrıca, ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak, ısı borulu ve sadece kanatların kullanıldığı ısı borusuz soğutma sistemleri tasarımları karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Belirledikleri tasarım 140 adet LED çipinden oluşmakta ve belirlenen ısı gücü 120 W'tır. LED'ler 300 mm × 220 mm boyutlarında PCB üzerine monte edilmiştir. Isı boruları tarafından çekilen ısıнын çevreye atılmasını sağlamak için 31 adet alüminyum kanat yerleştirilmiştir. Kanatların kalınlığı 1 mm, ısı borularının çapı ise 8 mm seçilmiştir. Kullanılan tasarımda 10 tane ısı borusu beşer adet karşılıklı kaydırılmış şekilde yerleştirilmiştir. Isı borulu tasarımın yapısında oluşan maksimum sıcaklık 65.6 °C olarak belirlenmiş, ısı borusuz tasarımın yapısında oluşan maksimum sıcaklık ise 76.8 °C olarak bulunmuştur. Isı borulu sistemin, yapının maksimum sıcaklığını ısı borusu olmayan sisteme göre 11.2 °C daha düşük tutabildiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ısı borulu pasif soğutma sisteminin, sadece kanatların kullanıldığı pasif soğutma sistemine göre ısı performans açısından daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

Li vd., (2016), bu çalışmada yüksek güç yoğunluklu LED ve diğer elektronik cihazların soğutulması için bir termosifon ısı borusu türü önermişlerdir. Sinterlenmiş bakır tozu ile yeni bir termosifon ısı borusu soğutucusu, ısı borusunun tabanındaki fitil yapısı imal edilerek performansı sistematik olarak incelenmiştir. Termosifon ısı

borusunun uzunluğu 160 mm, çapı 28 mm ve et kalınlığı 1 mm olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada çalışma sıvısı olarak iyonu giderilmiş su seçilmiştir. Tüm testler doğal hava konveksiyon durumunda gerçekleştirilmiştir. 100 Watt gücünde LED entegreli yonganın soğutulmasında termosifon ısı borulu ısı emici kullanıldığında, doğal hava taşınımı altında 0.34 K/W'lık çok düşük bir görünür termal direnç elde etmişlerdir. Sonuç olarak, önerilen hafif ağırlıklı termosifon ısı emicisinin oldukça düşük termal dirençlerle yüksek ısı yüklerini ynetebildiğini belirlemişlerdir.

Athalye (2016), LED armatür tasarımı yaparak patentini almıştır. LED armatürde oluşan ısıyı dağıtmak için ısı borusu içeren bir ışık tertibatı tasarlamıştır. Birisi n yüzeyde, diğer ikisi birbirine simetri pozisyonunda yan yzeeye yerleştirilmiş üç adet ışık yayan diyotların her birinden merkeze uzanan ısı borulu bir soğutma sistemi tasarlanmıştır. Yapılan tasarımda ısı dağıtıcı üzerinde bir ışık yayan LED'in tabanından ısı dağıtıcıya bağlı bir ısı borusu içermektedir. Hazırlanan tasarım, armatrdeki LED sayısına bağlı olarak her LED'den ısı dağıtıcıya uzanan ısı boruları ile soğutma sağlayacak şekilde dizayn edilebilmektedir.

Xiao vd., (2017), yapmış oldukları çalışmada yüksek güçlü LED'lerin ısı yayılımının ihtiyaçlarına yanıt olarak ısı borusu ve fan kombinasyonuna dayalı bir soğutma cihazını tasarlayıp incelemişlerdir. Fanlı, U şeklinde ısı borulu yeni bir soğutma sistemi önerilmiş ve önerilen soğutucu cihazın termal performansı, sonlu elemanlar analizi (FEA) ile birleştirilen deney temelinde incelenmiştir. Isı borusu 6 mm çapında ve karakteristik boyut uzunluğu 128 mm'dir. Sonuçlar, alt tabaka sıcaklığının, ısı borusu ve fan kombinasyonu ile soğutulduğunda sadece 25 C olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda sistem tarafından soğutulan LED gücünün 120 W'a ulaşabileceğini ve soğutma sisteminin toplam g tktinin 1.58 W olduğunu belirtmişlerdir. Isı borusu ve fanlı soğutma sisteminin, yüksek güçlü LED'lerin termal problemini çözmek için kullanılabileceği ve güçlü soğutma kapasitesi, basit yapısı, kolay kurulumu gibi avantajlara sahip olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte soğutma sisteminin yüksek güvenilirliğe, düşük enerji tktimine ve mükemmel soğutma verimliliğine sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Moon vd., (2017), çalışmalarında, 120 x 120 x 170 mm³ küçük hacimli soket tipi elektrik bağlantısı olan 100 W güce sahip COB LED lamba için U şeklinde tek bir ünite yüzgeçli alüminyum yassı ısı borusu (AFHP) geliştirmişlerdir. COB LED

lamba takılı alüminyum yassı ısı borusu (AFHP) modülüyle soğutma performansını incelemişlerdir. Deneyler LED ışığının yerçekimi yönüne doğru dikey yönde ve doğal konveksiyon koşulunda 25 °C ortam sıcaklığı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney ve analiz sonuçları, bağlantı sıcaklığının 100 W güç tüketimi altında 85 °C'den daha düşük bir sıcaklıkta kontrol edilebileceğini ve LED ömrünün 50.000 saat olduğunu göstermiştir.

Lv vd., (2017), bu çalışmada yüksek güçlü LED soğutması için özel boru düzenine sahip bir kapalı döngü titreşimli ısı borusu (CLPHP) kullanmışlardır. İki adet kapalı döngü titreşimli ısı borusu üretilerek sırasıyla su ve metanol ile doldurulmuştur. Yerçekimi kuvveti ve çalışma akışkanının, ısı transfer performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Su - CLPHP'nin 260 W'da 0.49 °C/W'lik en düşük sistem termal direnciyle ve 220 W'da 0.06 °C/W'lik en düşük termal direnciyle Metanol - CLPHP'den daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Sonuç olarak, 100 W'lık bir LED çipinin soğutulması için özel boru düzenine sahip kapalı döngü titreşimli ısı borusunun termal kontrol gereksinimlerini karşılayabileceği belirtilmiştir.

He vd., (2018), çalışmalarında elektronik soğutma için düz evaporatör bölgesine sahip döngü ısı borusu tasarlamışlardır. Düz yüzeyin deforme edici yapısının üstesinden gelmek amacıyla ısıtma yüzeyinin yanında güçlendirilmiş nervürlü bir plakaya sahip yeni bir buharlaştırıcı yapısı önerilmiştir. Evaporatör bölgesi 74 mm × 74 mm boyutlarında olup, buharlaştırıcı malzeme olarak bakır ve çalışma sıvısı olarak R-245fa kullanılmıştır. Isı borusu performansı ısı alıcı sıcaklığı 25 °C ve 35 °C'de kontrol edildiğinde deneysel olarak test edilmiş ve teorik olarak analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, sistemin sorunsuz çalıştığını ve 10 W ila 160 W ısı yükü arasında homojen sıcaklık dağılımı sağladığını göstermiştir. Ayrıca ısıtma bloğu sıcaklığının 80 °C'nin altında tutulduğu belirlenmiştir.

Zhou ve Li (2018), yerçekimi destekli, düz buharlaştırıcılı bir döngü ısı borusu (LHP) içindeki iki fazlı akış karakteristiklerini araştırmışlardır. Döngü ısı borusu esas olarak düz bir buharlaştırıcı, buhar hattı, sıvı hattı, kondansatör ve şarj hattından oluşmaktadır. Düz buharlaştırıcının iç aktif alanı 60 mm x 35 mm x 3 mm boyutlarındadır. Güç kaynağının aktif ısıtma alanı 25 mm x 25 mm boyutlarındadır. Elde edilen deneysel sonuçlar 25 °C soğutma suyu sıcaklığı ile cebri su soğutma

koşulu altında, döngü ısı borusunun maksimum 550 W ısı yükünde elde edilen 91.2 °C buharlaştırıcı sıcaklığı ile verimli bir şekilde dağıtabildiğini göstermiştir. 500 Watt ısı yükünde termal direnç 0.068 °C/W olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, çeşitli iki fazlı akış modellerinin ısı yükü ile ilişkili olduğu bulunmuştur ve 88 W/cm²'lik bir ısı akışına karşılık gelen, 550 W'lık maksimum ısı yükünde evaporatör bölgesinde kısmi kuruma oluşumu gözlenmiştir.

Wang vd., (2019), yüksek güçlü LED yongalarının ısıl yönetimi için düz plaka bir buharlaştırıcı içinde sinterlenmiş bakır parçacıklar içeren bir ısı borusu tasarlamış ve üretmişlerdir. Tasarlanan ısı borusunun ısıl performansı, LED dizisinin sıcaklık dağılımı ve aydınlatma profilleri deneysel olarak test edilmiş ve değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmada evaporatörün eğim açısı, güç girişi ve dolum oranının LED ısı emici performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. LED dizisinin giriş gücü 60 W olduğunda buna karşılık gelen maksimum LED sıcaklığı 70 °C'nin altında kontrol edilebilmiştir. Belirtilen çalışma şartlarında sinterlenmiş bakır parçacıklı ısı borusu ile 0.168 K/W'lık en düşük termal direnç elde edilmiştir. LED dizisi sıcaklığının aydınlatma yoğunluğu ile ters orantılı olduğu ve yüksek bir doldurma oranının LED çiplerinin aydınlatma yoğunluğunun bozulmasına neden olabileceği tespit edilmiştir. Yüksek güçlü LED soğutmasında uygulanan tasarlanmış ısı borusu için % 30'luk düşük doldurma oranı tercih edilmiştir. Ayrıca belirli bir güç girişinde, eğim açısı arttıkça LED sıcaklığının azaldığı ve 90° eğim açısında en düşük değere ulaştığı belirlenmiştir.

Sosoi vd., (2019), zorlu koşullarda yüksek güçlü LED'lerin soğutulması amacıyla ısı borulu soğutma sistemi tasarlamışlardır. Sayısal çalışmayı gerçekleştirmek amacıyla LED soğutma için Autodesk Inventor yazılımında bir 3D model tasarlanmıştır. Analiz ve sayısal simülasyonlarda, LED soğutma performansını belirlemek için Autodesk Simulation CFD yazılımı kullanmışlardır. Bağlantı sıcaklığını nominal değere yakın tutmak, renk kaymasını ve geri kazanılabilir ışık çıkışını azaltmak, voltaj düşüşlerini önlemek için ısı borusuna dayalı soğutma çözeltisinin sınırlarını açıklamışlardır. Yüksek güçlü LED'leri soğutmak için alt tabaka sıcaklığını otomatik olarak kontrol edebilen bir ısı borusu kullanmışlardır. Simülasyonların sonuçları, jonksiyon sıcaklığının sabit bir aralıkta tutulabileceğini göstermiştir. Tasarlanan

model için elde edilen teorik sonuçlar neticesinde, sistemin çok sayıda dış ortam koşuluyla sahada uygulanabileceği vurgulanmıştır.

Huang vd., (2019), bu çalışmada soğutuculara oluklu bir ısı borusu ile kanatçıklar dahil ederek LED'in ısı transfer verimliliğini artırmaya çalışmışlardır. Sayısal simülasyonlar ve deneyler uygulanarak 30 W güce sahip LED otomotiv farlarındaki ısı dağılımını incelemişlerdir. Termal verimliliğin hesaplanması için ısı transfer modeli oluşturmak amacıyla ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Substratın ısı iletkenlik katsayısındaki bir artışın LED birleşme ısısında bir düşüşe yol açtığını belirtmişlerdir. Çalışmada otomotiv farları, konvansiyonel sıcaklığın 80 °C olduğu simüle edilmiş bir motor bölmesine yerleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda yüksekliği 22.5 mm, kalınlığı 2 mm olan kanatçıklar kullanılmıştır. Elde edilen maksimum sıcaklık (431.59 K), çipin çalışma limit sıcaklığının sadece biraz daha üstünde bulunmuş, kanatçık yüksekliği 22.5 mm'den 32 mm'ye yükseltildiğinde maksimum sıcaklık 418.63 K'ye düşmüştür. Yapılan analizler neticesinde, ısı iletken PCB (180 W/(m.K)) ve 76 mm uzunluğunda yivli ısı borusu (6000 W/(m.K)) kullanılarak LED çiplerinin sıcaklığının güvenli çalışma aralığında tutulabileceğini belirlemişlerdir. Sonuç olarak AlN seramik substratlarla birlikte kullanılan ısı borularının, yüksek güçlü LED ışıklarda aşırı ısınmaya karşı etkili bir çözüm olduğunu belirlemişlerdir.

Çiçek (2019), tez çalışmasında, sokak aydınlatmasında kullanılmak üzere yüksek güçlü LED paketlerinin termal yönetimi için ısı borulu soğutucu ünite tasarlamıştır. Termal yönetim için tasarlanan kanatçıklı ısı borusunun termal analizi ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tasarımda kullanılan ısı borusu 8 mm çapında ve U-tipi silindirik yapıya sahiptir. Aydınlatma sisteminde dört adet 25 W'lık yüksek güçlü COB LED paketi kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre 35 °C dış ortam sıcaklığı ve 0.1 m/s rüzgâr hızı için maksimum LED sıcaklığı 78.2 °C olarak belirlenirken jonksiyon sıcaklığı ise 87.68 °C olarak tespit edilmiştir. Kullanılan LED paketi verilerinde belirlenen jonksiyon sıcaklığı baz alındığında tasarlanan ısı borulu soğutucu plakanın, yeterli soğutma sağladığı görülmüştür.

Salem vd., (2019), çalışmada içerisine ısı borusuna gömülü PCB'nin termal performansını belirlemek için teorik ve deneysel araştırmalar yapmışlardır. İlk aşamada, ısı borusunun verimi çeşitli eğim açıları altında deneysel olarak test edilerek teorik ve sayısal hesaplamalarla doğrulanmıştır. Sayısal hesaplamalar Ansys

(Icepack) ticari simülasyon yazılımında modellenmiştir. 6 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda ısı borusu, polimer ve alüminyum malzemeden yapılmış PCB'lere gömülmüş ve benzer deneysel parametreler için test edilmiştir. Deneysel olarak, en yüksek verimli ısı iletkenliği, ısı borusu eğim açısının 90° olduğu konumda 41500 W/m.K olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar standart bir PCB için geleneksel soğutma yöntemine kıyasla toplam termal dirençte % 50 azalma olduğunu göstermiştir. Çizelge 1.4'de LED'li aydınlatma sistemlerinin termal yönetimi için ısı borulu soğutma sistemleri ile yapılan çalışmalar verilmiştir. Aynı zamanda tez çalışmasındaki tasarım karakteristiği ve soğutma performansı belirlemede bu araştırmalardan yararlanılmıştır.

Çizelge 1.4. LED termal yönetimi için ısı borusu kullanılan çalışmalar.

Yazar-Yıl	Çalışma Konusu
Kotcioğlu vd., (2009)	Bilgisayarların soğutulmasında ısı borularının etkin kullanılması ile ilgili teorik bir çalışma
Yang vd., (2015)	Düz bir polimer (FR4) ısı borusundaki ısı transferinin incelenmesi
Mete ve Onaygil (2016)	Isı borularının LED soğutmasında kullanımıyla ilgili literatür araştırması
Li vd., (2016)	Yüksek güçlü LED ve diğer elektronik cihazların soğutulması için termosifon ısı borusu performansı
Athalye (2016)	LED armatürde oluşan ısıyı dağıtmak için ısı borusu içeren bir ışık tertibatı tasarlanarak patent alınması
Xiao vd., (2017)	Yüksek güçlü LED'ler için ısı borusu ve fan kombinasyonlu soğutucu tasarımı ve performansı
Moon vd., (2017)	LED lamba için U şeklinde tek bir ünite yüzgeçli alüminyum yassı ısı borusu (AFHP) geliştirilmesi
Lv vd., (2017)	LED soğutması için kapalı döngü titreşimli ısı borusunun (CLPHP) ısı transfer performansı
He vd., (2018)	Elektronik soğutma için düz evaporatör bölgesine sahip döngü ısı borusu deneysel ve teorik analizi
Zhou ve Li (2018)	Yerçekimi destekli, düz buharlaştırıcı döngü ısı borusu (LHP) içindeki iki fazlı akışın karakteristik araştırması
Wang vd., (2019)	Tasarlanan ısı borusunun ısı performansı, LED dizisinin sıcaklık dağılımının deneysel incelenmesi
Sosoi vd., (2019)	Yüksek Güçlü LED'lerin soğutulması amacıyla tasarlanan ısı borulu soğutma sisteminin sayısal analizi
Huang vd., (2019)	Oluklu bir ısı borusu ile LED'in ısı transfer verimliliğini artırmaya yönelik simülasyon ve deneysel analiz
Çiçek (2019)	Sokak aydınlatması için yüksek güçlü LED'lere yönelik ısı borulu soğutucu plaka tasarımı ve ısı performansı
Salem vd., (2019)	İçerisine ısı borusuna gömülü PCB'nin termal performansını teorik ve deneysel araştırma

1.4.3 Termoelektrik soğutma çalışmaları

Ryan (2005), tiyatro veya mimari aydınlatma armatürlerinde birincil kullanım için bir katı hal termoelektrik soğutma sistemini kullanan yüksek güçlü LED aydınlatma düzeneği tasarlamıştır. Soğutma sistemi olarak, Peltier etkili termoelektrik modüllü aktif kapalı devre soğutma sistemi kullanmıştır. Birleşik devletlerde patenti alınan bu aydınlatma düzeneği muhafaza ile termal temas halinde olan bir ısı emici plaka, ışık yayan bir LED dizisi, dizi sıcaklığının önceden belirlenmiş bir sıcaklıkta kontrol edilebilir şekilde muhafaza edilmesi için gerekli olan kontrol araçları ve termal geri akışın önlenmesi amacıyla kullanılan yalıtım araçlarından oluşmaktadır.

Wang vd., (2015), çok çipli LED modülü için yeni bir TEC soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Farklı cihazların (hava soğutma ve TEC, sıvı soğutma ve TEC) soğutma performansı değerlendirilmiş ve LED jonksiyon sıcaklığı ölçülerek karşılaştırılmıştır. Termoelektrik soğutucunun dış fan hızına veya sıvı hızına diğer sistemlerden (sadece hava soğutması veya sıvı soğutması) daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, jonksiyon sıcaklığının, ısıtma gücündeki veya ortam sıcaklığındaki artışla doğrusal değiştiğini göstermiştir.

Bădălan ve Svasta (2015), Peltier elementi kullanan bir LED aydınlatması ile ısı emici kanatçık tarafından soğutulmuş LED aydınlatması arasında karşılaştırma yapmışlardır. Bu çalışma Peltier elemanın LED'lerin düşük sıcaklıkta en iyi şekilde çalışmasına katkıda bulunabileceğini göstermiştir. Çok küçük bir alanda ($\phi = 18$ mm), çok yüksek bir ısı değerinin (20 W) atılmasını gerektiren yüksek güçlü LED üzerinde ölçümlerle elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Peltier elemanlarının soğutma gücünün LED'lerin soğutulmasında başarıyla uygulanabileceğini, pasif soğutmadan daha verimli olduklarını ve Peltier elemanın LED'in ömrünün artmasına yardımcı olduğunu göstermişlerdir.

Ong vd., (2016), LED'lerin termal yönetimi için buhar odası olarak adlandırılan düz bir ısı borulu ve termoelektrikli soğutma ünitelerinin performansını değerlendirmek için bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmanın birinci aşamasında geleneksel bir ısı dağıtıcı kanatçığın termal performansını belirlemek için deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Isı dağıtıcı kanatçığın toplam ısı yayma direncinin, düşük güç girişinde 1.68 K/W'dan yüksek güçte 1.25 K/W'a düştüğünü belirtmişlerdir. İkinci

aşamada ısı kaynağı ile ısı dağıtıcı kanatçık arasına buhar odası yerleştirilerek deney yapılmıştır. Buhar odalı düzeneğin toplam termal direncinin, güç girişi ile azalarak 2.10 - 1.49 K/W arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Üçüncü aşamada ise ısı kaynağı ile ısı dağıtıcı kanatçık arasına termoelektrik modül yerleştirilerek deneysel çalışma 5 - 10 W arasındaki ısıtıcı güç girişlerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde buhar odasının, düşük ısı girişi ve yüksek en boy oranı için verimli bir soğutma sistemi olmadığı belirlenmiştir. Soğutma için termoelektrik modül kullanılması durumunda verimli bir soğutma için, TE güç girişinin ısı kaynağı gücünden daha düşük seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Seo vd., (2018), bu çalışmada termoelektrik modül sıcaklığının zaman içindeki değişimini simüle etmek amacıyla kare kanal içinde ısı emicili model geliştirmişlerdir. Termoelektrik modül ticari hesaplamalı akışkan dinamiği Fluent ve kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF) kullanılarak geliştirilmiştir. Tasarımı yapılan sistem üzerinde deneysel ve sayısal araştırmalar yapılmıştır. Dört adet termoelektrik modül ve dört adet ısı emici içeren bir montaj modellenmiştir. Isı emiciler, termoelektrik modüllere bağlı yatay kanatçıklar ve dikey tabanlardan oluşur. Termoelektrik modüllerin soğutma kapasitesinin ve ısı üretiminin zamana göre değiştiği belirlenmiştir. TEM1'in soğuk tarafındaki sıcaklık zamanla azalırken, sıcak taraf başlangıç sıcaklığına göre artış göstermiştir. TEM2 ısı emicilerinin soğuk ve sıcak taraflarının sıcaklığı sırasıyla TEM1'inkinden daha düşük ve yüksektir. TEM1'in sıcaklığı akış yönünden dolayı hızlı bir şekilde sabit duruma gelmiştir. Termoelektrik modülün COP değeri soğutma kapasitesiyle arttığından dolayı, TEM1'in COP değeri her zaman TEM2'den daha büyüktür. Sonuç olarak, ısı emicinin çeşitli parametrelerinin termoelektrik modül performansını etkilediği ifade edilmiştir.

Lin vd., (2019), bu çalışmada yüksek güçlü LED farların termal yönetimini geliştirmek için termoelektrik modül (TEC) ve su soğutmalı mikro kanal soğutucu havuzunu (WMHS) entegre eden bir soğutma cihazı önermişlerdir. Önerilen cihazın amacını, LED + TEC + WMHS'li ünitenin performansı değerlendirmek olarak belirlemişlerdir. Ayrıca termoelektrik ve su soğutmalı mikro kanallı soğutucudan oluşan ünite, LED + WMHS, LED + AHS (hava soğutmalı soğutucu) ve LED + TEC + AHS olmak üzere üç farklı sistemle karşılaştırılmıştır. Önerilen LED + TEC +

WMHS cihazının zorlu çalışma koşullarında ($T_a = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_i = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve ılımlı soğutma çıkışında ($\text{ITEC} = 2\text{ A}$, $u = 0.49\text{ m/s}$) T_s sıcaklığı $60.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Termoelektrik akımının soğutma performansı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu belirlenerek, deneysel sonuçlara göre en iyi soğutma performansı LED + TEC + WMHS’li soğutma ünitesinde elde edilmiştir.

Çizelge 1.5’de LED’li aydınlatma sistemlerinin termal yönetimi için termoelektrik soğutma sistemleri ile yapılan literatürdeki çalışmalar verilmiştir. Çizelgede verilen araştırmalardan tez çalışmasındaki tasarım karakteristiği ve termoelektrik modül soğutma performansı belirlemede faydalanılmıştır.

Çizelge 1.5. LED’in termal yönetimi için temoelektrik modül kullanılan çalışmalar.

Yazar-Yıl	Çalışma Konusu
Ryan (2005)	Tiyatro veya mimari aydınlatma için termoelektrik soğutma Sistemini kullanan LED tasarım ve patent
Wang vd., (2015)	Çok çipli LED modülü için yeni bir TEC soğutma sistemi geliştirilmesi
Bădălan ve Svasta (2015)	Peltier elementi kullanan ve ısı emici tarafından soğutulmuş LED aydınlatması arasında karşılaştırma
Ong vd., (2016)	LED’lerin termal yönetimi için düz bir ısı borulu ve termoelektrikli soğutma performansı karşılaştırma
Seo vd., (2018)	Termoelektrik modül sıcaklığının zamanla değişimini incelemek için ısı emicili model geliştirilmesi
Lin vd., (2019)	LED farlar için termoelektrik modül ve su soğutmalı mikro kanallı soğutma cihazı tasarımı ve deneysel analiz

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan soğutma sistemleri genel olarak tanıtılmaktadır. Öncelikle ısı borusunun çalışma prensibi, türleri, kullanılan malzemeler, iş akışkanları, fitil ve çalışma limitleri açıklanmaktadır. Daha sonraki kısımda ise termoelektrik modül çalışma prensibi ve temoelektrik etkiler ifade edilmektedir.

2.1 Isı Borulu Soğutma

Yapılan araştırmalara göre 2035 yılına gelindiğinde dünya enerji tüketiminin hali hazırdaki kullanıma göre % 47 oranında artış olacağı beklenmektedir. Enerji tüketimine bağlı olarak kaynağını fosil yakıtların oluşturduğu karbon emisyon oranları da 1900'lü yılların başından itibaren sürekli artmaktadır (Zhi, 2014). Enerji tüketimi ve çevre kirliliğindeki bu artış, mevcut enerji kaynaklarının optimum verimle kullanımını ihtiyaçtan öte kaçınılmaz bir zorunluluk haline getirmiştir. Bahse konu gelişmeler ısı transfer sistemlerinde de değişimi ve gelişimi tetiklemiştir. Daha etkin ve verimli ısı değiştiricilerine olan ihtiyacın artmasıyla birlikte minimum alandan maksimum ısı transferi konusunda arayışlar hız kazanmıştır.

Tarihte ilk olarak 1831 yılında Angier March Perkins isimli bir mühendis tarafından Perkins tüpü adı verilen hermetik boru kazanı, ısı borusu fikrinin temelini oluşturmuştur (Arslan, 2007). Perkins tüpü, bir faz değişikliği (gizli buharlaşma ısısı) sayesinde ısı transferi sağlayan, yerçekimi destekli termosifondur. Hali hazırdaki ısı borularına en yakın Perkins tüpü 1836 yılında Jacop Perkins tarafından geliştirilerek patenti alındı. Patentli Perkins tüpü, iki faz döngüsü olarak çalışan az miktarda su içeren kapalı bir tüpten oluşmaktaydı (Faghri, 2014).

1942 yılında Gaugler tarafından bir ısı transfer cihazı yapılmıştır. Her ne kadar bu buluşun adı ısı borusu olarak belirlenmemiş olsa da ısı borusunun gelişimine büyük katkı sağlamıştır. Bu çalışmada Gaugler bir ortamdaki ısıyı çalışma sıvısına absorbe ederek, ısıyı daha üst konumda bulunan yoğunlaştırıcı bölgesine ekstra iş uygulamaksızın taşımayı amaçlamıştır (Gaugler, 1942). Fakat daha sonraki yıllarda yapılan çalışmaların temelini oluşturacak bu buluş yapısında birçok cihaz bulundurması nedeniyle kullanıma uygun bulunmayarak otoriteler tarafından çok az ilgi görmüştür. Trefethen 1962 yılında uzay araçları için iç kısmına gözenekli fitil

yerleştirilmiş boş bir borudan oluşan ısı değiştirici fikri sunmuştur. Ancak o dönemde ortaya atılan bu fikri uygulamaya yönelik deneysel çalışma yapılmamıştır (Seven, 2007). Isı borusu terimi literatüre ilk olarak Grover ve arkadaşları tarafından Las Alamos National Laboratories'de yaptıkları araştırma neticesinde yayınlanan çalışmaları ile girmiştir. 1964 yılında yapmış oldukları çalışmada Grover ve arkadaşları, ısı borusunu tanımlarken "büyük miktardaki ısıyı küçük bir sıcaklık düşüşü ile aktarabilen aygıtlar ve çok yüksek termal etkinliğe sahip bir malzemeye eşdeğer sinerjik mühendislik yapısı" ifadelerini kullanmışlardır (Grover, 1966). Bilim adamları, kısa süre sonra Amerika Birleşik Devletleri dışındaki en aktif araştırma merkezi haline gelen İtalya'daki Ortak Nükleer Araştırma Merkezi'nde benzer çalışmalar yapmaya başlamışlardır. Ayrıca Almanya, Fransa ve eski SSCB gibi gelişmiş ülkelerde ısı borusu üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları başlatmışlardır (Faghri, 2014).

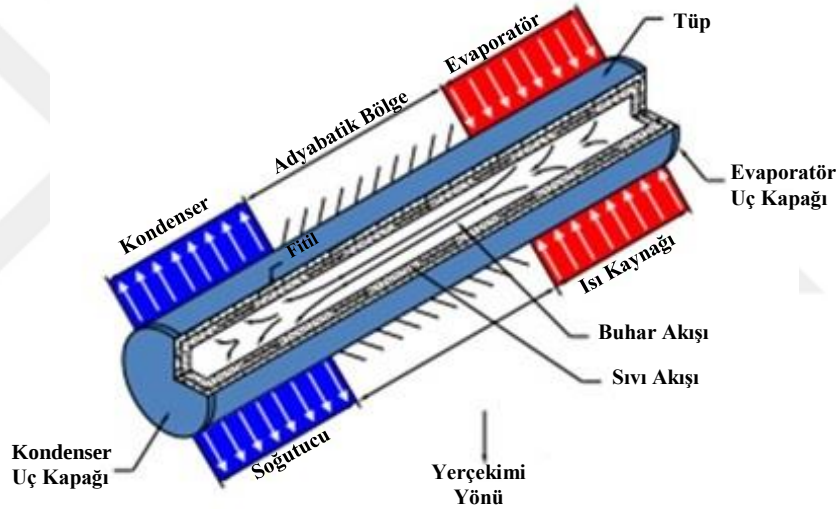
Zamanla teknolojiye paralel olarak ısı borusu, yüksek sıcaklıktaki yüzeylerden aşırı ısıyı uzaklaştırmak için kullanılan sistemler arasında çokça tercih edilen bir cihaz haline gelmiştir. Isı borularının, yüksek ısıl iletkenliği sayesinde diğer ısı transfer yöntemlerine göre birçok üstünlüğü bulunmaktadır.

Kılcal etki sayesinde ısı boruları herhangi bir harici kuvvet veya pompaya ihtiyaç duymadan mikro alanlarda çalışabilir. Bu özellik, ısı boruları ile ilgili çalışmaların uzay uygulamalarına yönelmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, özellikle Japonya ve Avrupa'da yüksek enerji maliyeti nedeniyle, enerji tasarrufu uygulamalarında ısı borularının önemi artmıştır (Faghri, 2014).

Verimlilik ve ısı transfer hızı gibi üstünlükleri başta olmak üzere; katlanılabilir maliyet, farklı şekil ve boyutlarda üretim imkânı, tamir ve bakım gerektirmemesi ısı borusunun tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Genel itibarıyla ısı boruları; vakumlanmış bir boru içerisinde bulunan iş akışkanının sıcaklık etkisiyle faz değiştirmesi (buharlaşma-yoğuşma) prensibine göre çalışan bir aygıttır. Isı borularında genel çalışma prensibi faz değişimine bağlı olduğu için iş akışkanı olarak düşük sıcaklıkta buharlaşma özelliğine sahip iş akışkanları tercih edilmektedir. Ortamdan çektiği ısı nedeniyle sıvı fazdan buhar faza geçen çalışma akışkanı kapalı boru içerisinde doğal taşınım ile depoladığı ısı enerjisini bir uçtan başka bir uca taşır (Çiftçi vd., 2016).

Son yıllarda enerji sistemleri ve elektronik cihazlardaki ısı problemlerin çözümüne yönelik soğutma uygulamalarında ısı borularının geliştirilmesiyle birlikte büyük bir dönüşüm meydana gelmiştir. Özellikle kompakt yapıya sahip dizüstü bilgisayarlarda ortaya çıkan ısıyı uzaklaştırmak için ısı borularının kullanılması, üretim miktarını da arttırmaktadır. Döngü ısı boruları, mikro ısı boruları ve titreşimli ısı boruları gibi yeni nesil ısı boruları için farklı uygulama alanlarında kullanım için araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Isı borular farklı şekil ve boyutlarda kullanılabilir. Bu özellik sayesinde ısı borusu geniş çalışma yelpazesine sahiptir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi ısı boruları genel itibariyle kaplı bir kap (boru), boru iç cidarını kaplayan fitil ve belirli miktarda çalışma akışkanından oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Isı borusu yapı elemanları ve çalışma prensibi (Faghri, 2014).

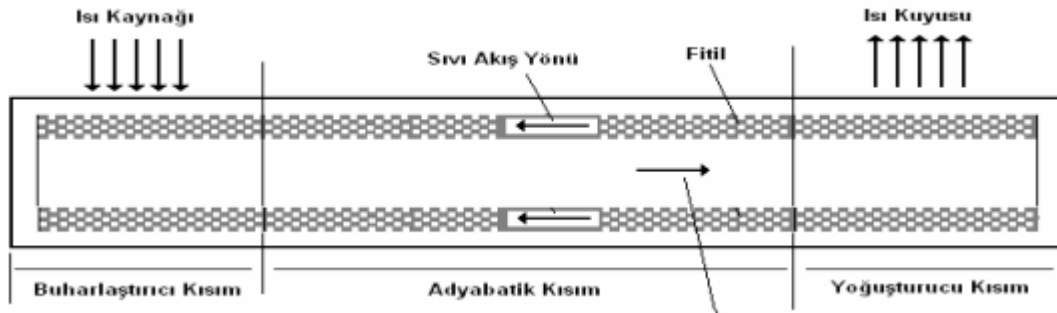
Bir ısı borusu temelde evaporatör (buharlaştırıcı), kondenser (yoğusturucu) ve adyabatik (taşıma) bölümleri olmak üzere üç kısımdan oluşur. Evaporatör bölgesine harici ortamdan ısı geçişi olmasıyla birlikte çalışma akışkanı buharlaşır. Meydana gelen buhar basıncı, buharı adyabatik bölge boyunca ısı borusunun kondenser kısmına geçişine sebep olur. Kondenser bölgesinde harici bir ısı emiciye ısınıp bırakan çalışma akışkanı faz değiştirerek yoğuşur. Boru iç cidarını saran fitil yapısında oluşan kılcal basınç, yoğuşmuş sıvı haldeki çalışma akışkanını evaporatör bölgesine pompalar. Bu döngü kılcal etki devam ettiği sürece tekrar eder.

2.1.1 Isı borusu türleri

Isı boruları soğutucu olarak çok yaygın kullanım alanına sahiptir. Isı borusunun kullanılacağı sektör, alan ve boyut gibi faktörler nedeniyle farklı ısı boruları tercih edilmektedir. Bu kısımda en yaygın kullanılan ısı borusu türleri açıklanmaktadır.

2.1.1.1 Konvansiyonel ısı borusu

Tasarım ve çalışma prensibi bakımından en temel ısı borusu türü olan konvansiyonel (geleneksel) ısı borusu, hem evaporatör (buharlaştırıcı) hem de kondenser (yoğusturucu) bölümlerini üzerinde barındırır. Isı borusu, vakumlanmış ve içerisinde bir miktar çalışma akışkanı bulunan kapalı tüpten oluşur. Çalışma akışkanı evaporatör kısmında çektiği ısı nedeniyle faz değiştirir. Faz değişimi ile birlikte oluşan basınç gradyanı, akışkanın kondenser bölgesine geçiş yapmasını sağlar. Evaporatör bölgesindeki basınç artışı aynı zamanda sıvı-buhar ara yüzeyini fitil sayesinde evaporatöre çeker. Çalışma akışkanındaki yer değiştirmenin oluşturduğu kılcal basınç, ısı borusunun kondansatör bölümünde yoğunlaşarak sıvı faza geçen akışkanı, boru iç çeperinden evaporatör bölgesine geri taşır (Arslan, 2007). Şekil 2.2’de Geleneksel ısı borusunun bölümleri görülmektedir.

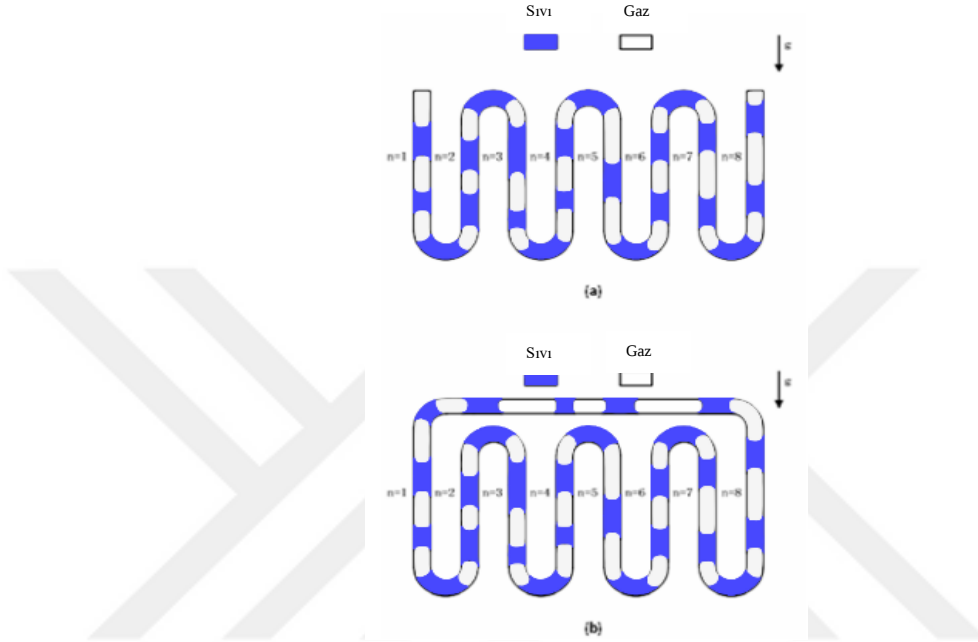


Şekil 2.2. Geleneksel ısı borusu (Silverstein, 1992).

Isı borusunun verimli çalışması evaporatör ve kondanser bölgelerindeki basınç farkına bağlıdır. Kılcal basıncın oluşumu, iç yüzeyi kaplayan fitil yapısının düzgünlüğü ve fitildeki gözeneklerin küçüklüğü ile doğru orantılıdır (Silverstein, 1992).

2.1.1.2 Titreşimli ısı borusu

Titreşimli ısı borusu evaporatör, kondenser ve birçok kıvrıma sahip kılcal borudan oluşur. Isı borusu uç kısımlarının bağlı olup olmamasına göre iki türü vardır. Birincisi uçları körlenmiş kapalı uçlu titreşimli ısı borusu, ikincisi ise boru uçlarının birbirine bağlı olduğu kapalı uçlu döngülü titreşimli ısı borusudur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Titreşimli ısı borusu.

Titreşimli ısı borusunda genel olarak ısı transferi, çalışma akışkanının kanatçıklı kaynaması ve buharlaşmanın ortaya çıkardığı basınç dalgası neticesinde titreşerek yol alması prensibine dayanır (Sakulchangsatjatai vd., 2004).

Titreşimli ısı boruları yaygın olarak % 40 ile % 60 arasında bir yük oranında çalışma akışkanı ile doldurulur. Isı borusunun çapı çok küçük (5 mm'den az) olduğundan, kılcal etkinin bir sonucu olarak buhar ve sıvı kabarcıkları oluşur. Isı girişi, evaporatörde buhar basıncını arttıran buharlaşmaya veya kaynamaya neden olur. Aynı zamanda soğutma bölümündeki basınç, yoğunlaşma etkisiyle azalır. Oluşan basınç farkı sıvı kabarcıkları ve buharı soğutma bölümüne iter. Böylelikle ısı, evaporatörden tüpün eksenel yönünde çalışma sıvısının titreşimi yoluyla kondenser bölgesine taşınır (Faghri, 2014).

Titreşimli ısı borusunu geleneksel ısı borusundan ayıran en temel özellik yapısında fitil olmamasıdır. Bu nedenle sıvı ve buhar arasında zıt yönlü akış söz konusu değildir. Basit bir yapıya sahip olan titreşimli ısı borusu, diğer ısı borusu türlerine göre çok daha hafiftir ve bu özelliği ile uzay uygulamaları için ideal bir ısı transfer cihazıdır. Çapının küçüklüğü sayesinde yüzey geriliminin yerçekimi kuvvetine karşı bariz üstünlüğü vardır. Bu avantaj, mikro yerçekimi ortamında başarılı bir şekilde çalışmasını sağlar. Titreşimli ısı borularının diğer kullanım alanları arasında elektrik - elektronik cihazları ve bileşenlerinin termal kontrolü ile transistörler, diyotlar ve seramik dirençler bulunmaktadır (Zhang ve Faghri, 2008).

2.1.1.3 Düz plakalı ısı borusu

Dikdörtgen levhaların birleştirilmesi neticesinde oluşan düz plakalı ısı borusunun çalışma prensibi konvensiyonel ısı borusu ile benzerdir. Diğer ısı borularından ayıran temel özellik sıvı dağılımını geniş yüzey alanına yaymak için kullanılan fitilin şeklidir. Düz plakalı ısı borusunun en önemli özelliği minimum sıcaklık gradyanlı geniş yüzey alanı elde edilebilmesidir. Bahse konu izotermal yüzey, yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağını soğutmak amacıyla kullanılır (Boukhanouf vd., 2006). Şekil 2.4’de düz plakalı ısı borusu şematik olarak gösterilmiştir.



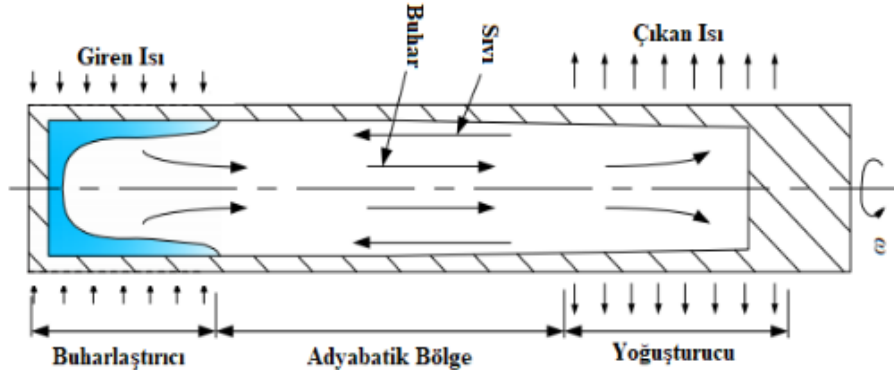
Şekil 2.4. Düz plakalı ısı borusu (Chen vd., 2017).

Düz plakalı ısı borusu, dikdörtgen şeklindeki levhaların birleştirilmesi ile oluşturulur. Çalışma mekanizmaları geleneksel ısı borusundaki gibidir. İkisi arasındaki temel fark, elde edilecek geniş bir yüzey alanı üzerine sıvı dağılmasını sağlamak için fitilin aldığı şekildir. Bu şekildeki ısı borusunun ana özelliği, yüzey boyunca çok küçük sıcaklık gradyanlı bir yüzey üretme kabiliyetidir. Bu izotermal yüzey, ısıtıcı tarafından üretilmiş sıcak bölgeleri üniform hale getirmek ve soğutmak için kullanılabilir.

2.1.1.4 Dönen ısı borusu

Bu tür, kendi simetri eksenini etrafında dönüş kabiliyetine sahip olduğu için dönen ısı borusu ismini almıştır. Dönen ısı borusu ilk olarak Grey tarafından 1969 yılında keşfedilmiştir (Gray, V. H., 1969). Çalışma prensibi temelde konvansiyonel ısı borusu ile benzerlik göstermektedir. Sahip olduğu dönüş kabiliyeti nedeniyle ısı borusunda fitil kullanımına gerek duyulmaz. Isı borusunda çalışma akışkanının bölgeler arasındaki geçişi merkezkaç kuvvetiyle gerçekleşir (Zhang vd., 2013).

Silindirik ve disk şeklinde olmak üzere iki tür döngü ısı borusu vardır. Silindirik dönen ısı boruları, elektrik motorlarının dönen kısımlarını ve matkap uçları gibi metal delme - kesme aletlerini soğutmak için kullanılmaktadır. Disk şeklindeki dönen ısı boruları ise türbin bileşenlerini ve otomobil frenlerini soğutmada tercih edilmektedir (Faghri, 2014). Şekil 2.5’de dönen ısı borusu çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir.



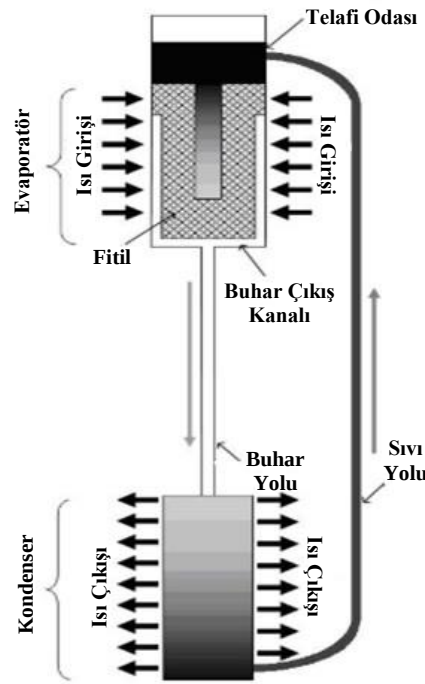
Şekil 2.5. Dönen ısı borusu.

2.1.1.5 Mikro ve minyatür boyutlu ısı borusu

Teknolojinin sürekli gelişmesi beraberinde mümkün olan tüm alanlarda minimal boyutlarda üretim çalışmalarını da desteklemektedir. Isı borusu teknolojisinde mikro boyutlu ısı borusunu ilk gündeme getiren kişi, 1984 yılında Cotter olmuştur. Mikro ısı borusu sıvı buhar arayüz eğriliğinin, ısı borusu akış kanalı hidrolik yarıçapı ile karşılaştırılabilir olduğu ısı borusu şeklinde ifade edilmiştir. Bu bağlamda mikro ısı borusu hidrolik çapı 10 - 500 μm aralığındadır (CAO ve Faghri, 1994). Hidrolik çapı 0,5 - 5 mm arasında olan ısı boruları ise minyatür ısı borusu olarak tanımlanmaktadır (Faghri, 2014).

2.1.1.6 Döngü ısı borusu

Döngü ısı borusu Maydanik ve Gerasimov tarafından 1971 yılında Rusya’da icat edilmiştir. Çalışma prensibi konvansiyonel ısı borusu ile büyük oranda benzemektedir. Döngü ısı borusu temelde dört bileşenden oluşur. Bu kısımlar buharlaştırıcı, yoğunlaştırıcı, telafi odası (rezervuar) ve sıvı - buhar hattıdır. Telafi odası, döngü ısı borusunu diğer ısı borusu türlerinden ayıran önemli bir özelliktir. Fitilli bir yapısı olan telafi odası, ısı borusu çalışırken daha fazla iş akışkanının sistemde bulunmasını sağlar (Faghri, 2014). Aynı zamanda telafi odası fazla çalışma sıvısını depoladığı için sistemin çalışma sıcaklığını kontrol altında tutmayı sağlar. Döngü ısı borusuna ait şematik gösterim ve çalışma prensibi Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6. Döngü ısı borusu.

Döngü ısı boruları yapısı gereği bükülebilir ve esnek hale getirilebilir. Aynı zamanda fitilli yapısından dolayı yerçekimine ihtiyaç duymaz. Sadece evaporatör ve telafi odasında fitil bulunmaktadır. Evaporatör bölgesindeki fitil, çalışma sıvısının sistemde dolaşımını sağlamak için ince gözenekli bir yapıya sahipken, tazminat odasındaki fitil daha büyük gözeneklidir. Bunun en temel sebebi sıvı fazdaki iş akışkanının giriş çıkışını kolaylaştırmaktır (Ku, 1999). Evaporatör ve telafi odası

dışında kalan bileşenler fitilsiz olduğundan dolayı pürüzsüz bir yapıya sahiptir. Bu durum iş akışkanının sistem genelinde dolaşımında basınç düşüşlerini minimize eder. İş akışkanının diğer sistemlerdeki gibi karşı akım akışının aksine, her iki fazının aynı anda fakat farklı yollardan ilerlemesi basınç düşüşünü engellemektedir. Bu özellik, döngü ısı borusunda ısı çekilen kısım (evaporatör) ile ısı atılan kısım (kondenser) arasını daha uzun bir mesafe ile ayırabilme imkânı sunar. Tüm bu avantajları nedeniyle uzay araçlarının soğutulmasında tercih edilen bir ısı borusu türüdür (Faghri, 2014; Markal vd., 2018).

2.1.2 Isı borusunda kullanılan malzemeler

Isı boruları farklı şekil, boyut ve sıcaklıklarda çalışma imkânı vermektedir. Bahsedilen özellikleri sayesinde ısı borularının üretiminde çok çeşitli malzemeler kullanılabilir. Isı borusu malzemesi seçiminde katlanabilir maliyet, mukavemet, esneklik, uzun ömürlülük gibi malzeme özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Isı borusu malzeme seçimini belirleyen en önemli unsur iş akışkanıdır. Çalışma şartları göz önünde bulundurularak belirlenen malzeme iş akışkanı ile uyumlu bir şekilde çalışmalıdır. Isı borusu malzemesi ve iş akışkanının uyumlu seçilmemesi, özellikle yüksek çalışma sıcaklıklarında reaksiyona girerek gaz üretimine neden olur. Böyle bir durumda biriken gazlar evaporatör ve kondenser bölgeleri arasındaki döngüye engel olarak ısı transferini zorlaştırır. Isı borularında sıklıkla tercih edilen malzemeler ve sıklıkla tercih edilen bazı iş akışkanlarının uyumlulukları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı çalışma akışkanları ve malzemelerin uyumluluğu (Güngör, 1995; Özsoy, 2005).

Malzeme	Çalışma Akışkanı			
	Su	Aseton	Amonyak	Metanol
Bakır	ÖG	ÖG	UD	ÖG
Alüminyum	GÜB	ÖL	ÖG	UD
Paslanmaz Çelik	GÜY	UO	ÖG	GÜY
Nikel	UO	UO	ÖG	ÖL
ÖG: Geçmiş uygulamalara göre önerilebilir. GÜB: Bütün sıcaklıklarda gaz üretimi. GÜY: Yüksek sıcaklıklarda gaz üretimi (Oksitleme varsa) UD: Uygun değil. UO: Uygun olabilir. ÖL: Literatüre göre önerilebilir.				

2.1.3 Isı borusu çalışma akışkanları

İhtiyaç duyulan çalışma sıcaklığı ve malzeme uyumu göz önünde bulundurularak farklı çalışma akışkanları ısı borularında kullanılabilir. Isı borusu kullanılan tüm soğutma sistemlerinde ısı borusunun çalışacağı belirli bir sıcaklık aralığı mevcuttur. Bu yüzden ısı borusu tasarlanırken sınır sıcaklık şartları belirlenerek en uygun çalışma akışkanı seçilmelidir. Isı borusu uygulamalarında kullanımı önerilen ve yaygın olarak kullanılan çalışma akışkanlarının bir kısmı atmosferik basınç altında erime, kaynama ve uygun kullanım sıcaklıklarıyla birlikte Çizelge 2.2’de gösterilmiştir (Faghri, 1995). İş akışkanlarını çalışma şartlarına göre kriyojenik, düşük, orta ve yüksek sıcaklık aralıkları şeklinde kategorize etmek mümkündür.

Çizelge 2.2. Soğutucu akışkanlar.

İş Akışkanı	Erime Noktası (K) (1Atm)	Kaynama Noktası (K) (1 Atm)	Uygun Kullanım Aralığı (K)
Helyum	1	4,21	2-4
Hidrojen	13,8	20,38	14-31
Neon	24,4	27,09	27-37
Nitrojen	63,1	77,35	70-103
Argon	83,09	87,29	84-116
Oksijen	54,7	90,18	73-119
Metan	90,6	111,4	91-150
Kripton	115,8	119,7	116-160
Etan	89,9	184,6	150-240
Freon22	113,1	232,2	193-297
Amonyak	195,5	239,9	213-373
Freon21	138,1	282	233-360
Aseton	180	329,4	273-393
Metanol	175,1	337,8	283-403
Etanol	158,7	351,5	273-403
Su	273,1	373,1	303-550
Naftalin	353,4	490	408-623
Sülfür	385,9	717,8	530-947
Rubidyum	312,7	959,2	800-1275
Potasyum	336,4	1032	773-1273
Sodyum	371	1151	873-1473
Lityum	453,7	1615	1273-2073
Kalsiyum	1112	1762	1400-2100
İndiyum	429,7	2353	2000-3000
Gümüş	1234	2485	2073-2573

Uzun ömürlü ve verimli bir ısı borusu için sınır sıcaklık şartları yanı sıra çalışma akışkanının dış kap ve fitil ile uyumu da son derece önemlidir. Dış kap ve fitil malzemesi ile uyumlu olmayan iş akışkanı seçimi kimyasal reaksiyon ve galvanik hücre oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca malzemelerin birbiriyle uyumsuzluğu dış kap malzemesinin iş akışkanında çözünmesine yol açar.

Çalışma akışkanlarında bulunması gereken temel özellikler (Beşe, 1988):

- Yüzey gerilimi yüksek olmalı,
- Sıvı ve buhar viskoziteleri düşük olmalı,
- Termal iletkenliği yüksek olmalı,
- Gizli ısı yüksek olmalı,
- Fıtil malzemesi ve dış kabı ıslatabilmeli,
- Isıl kararlılığı iyi olmalı,
- Dış kap ve fıtil malzemesiyle uyumlu olmalı.

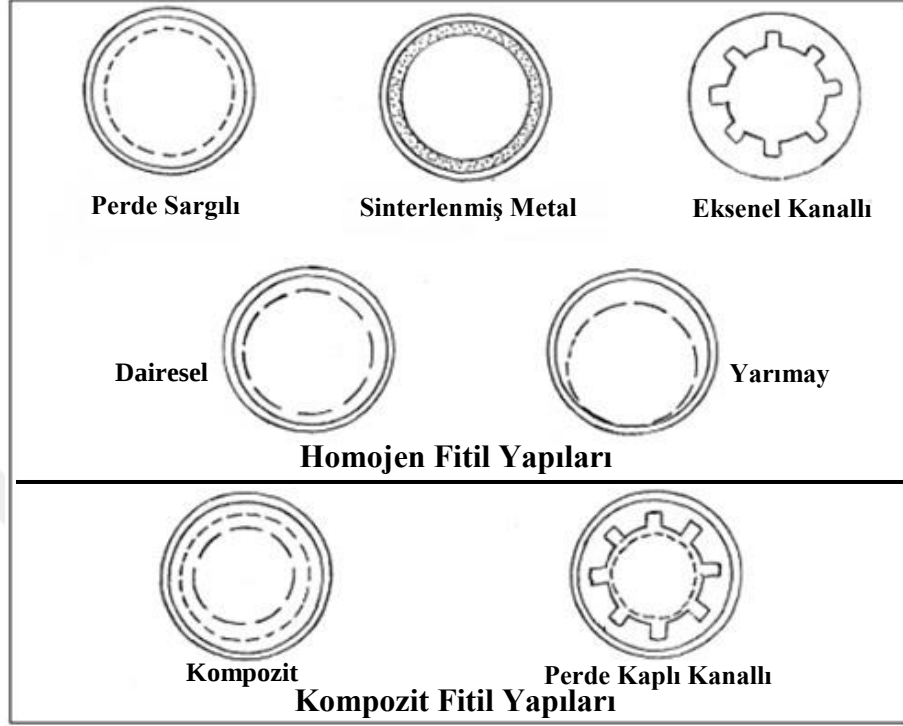
2.1.4 Fıtil

Bazı ısı borusu türlerinde ve termosifonlarda kondenser bölgesinden evaporatör bölgesine çalışma akışkanının taşınması yer çekimi desteğiyle sağlanmaktadır. Genel olarak ısı borusu çalıştığında evaporatör bölgesinden buhar fazında kondenser bölgesine geçiş yapan iş akışkanının, kondenser bölgesinde faz değiştirerek sıvı halde evaporatör bölgesine taşınması boru iç cidarındaki fıtilin kılcallığı ile sağlanır. Fıtilin iç yüzeyinde meydana gelen kılcallık yüzeyde gerilme oluşumunu sağlar. Meydana gelen gerilme fıtilin içi yüzeyindeki sıvı iş akışkanı yüksek hızla evaporatör bölgesine hareket eder (Silverstein, 1992). Kılcallık, boru iç cidarında açılan yivler ile yapılabiliyor olsa da genellikle farklı tellerden (paslanmaz çelik, bakır, pirinç vd.) örülerek elde edilen fitillerle sağlanmaktadır (Dunn ve Reay, 1994).

İdeal fıtil yapısından beklenen başlıca nitelikler şunlardır (Özsoy, 2005; Markal vd., 2018):

- Çalışma akışkanının yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcıya dönüşü için uygun akış kesitini sağlamalı,
- Kılcal pompalama basıncı için gerekli olan sıvı-buhar ara yüzeyinde gözenek oluşumunu sağlamalı
- Isı borusu iç yüzeyi ile sıvı-buhar ara yüzeyi arasında optimum ısı akışı sağlamalı
- Isı borusu malzemesi ve akışkan ile uyumlu olmalı
- Yüksek sıcaklıklara mukavemet sağlamalı,
- Düşük sürtünme katsayısına sahip olmalı,

- Sıcaklık dalgalanmalarında şekil yapısında deformasyon oluşmamalı,
- Minimum absorbe özelliği olmalı,
- Çap ve ölçüsü ısı borusu ile uyumlu seçilmeli.



Şekil 2.7. Isı borusu fitil yapıları (Beşe, 1988).

Isı borularında kullanılan fitil yapıları genel olarak homojen fitil yapıları ve kompozit fitil yapıları olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Şekil 2.7’de fitil yapıları görülmektedir.

2.1.5 Isı borusu çalışma limitleri

Isı borusu ile aktarılacak istenen ısı miktarı, ısı borusu tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli husustur. Bir diğer belirleyici faktör çalışma basıncıdır. Genel olarak literatürde, ısı borusu çalışma basıncının 0.1 Atm – 20 Atm aralığında olması kabul görmüştür. Aşırı basınç düşüşü buhar basıncına yaklaşılmasına sebep olacağından ötürü ısı borusunda faz değişimi için yeterli olmayarak ısı transferini işlevsiz kılacaktır. Çalışma basıncının üst limiti zorlaması durumunda ise ısı borusu dış kabının kalınlığını artırmak gerekecektir. Isı borusu dış kabındaki kalınlık artışı termal direnç sorununu beraberinde getirecek, dolayısıyla ısı transferini zorlaştıracaktır.

Isı boruları tasarım ve boyuta bağılı olarak birkaç W'tan birkaç KW'a kadar geniş yelpazede ısı transferi gerçekleştirebilen cihazlardır. Fakat bazı limitler ısı borularının taşıyabilecekleri ısı miktarını sınırlandırmaktadır. Genel itibariyle ısı borularını sınırlandıran limitler; ses, kılcal pompalama, viskoz, kaynama ve köpürme limitleridir. Bu limitleri belirleyen faktörler ise iş akışkanı, sıcaklık, fitil yapısı, ısı borusu boyutu ve konumu olarak sıralanabilir (Özsoy, 2005).

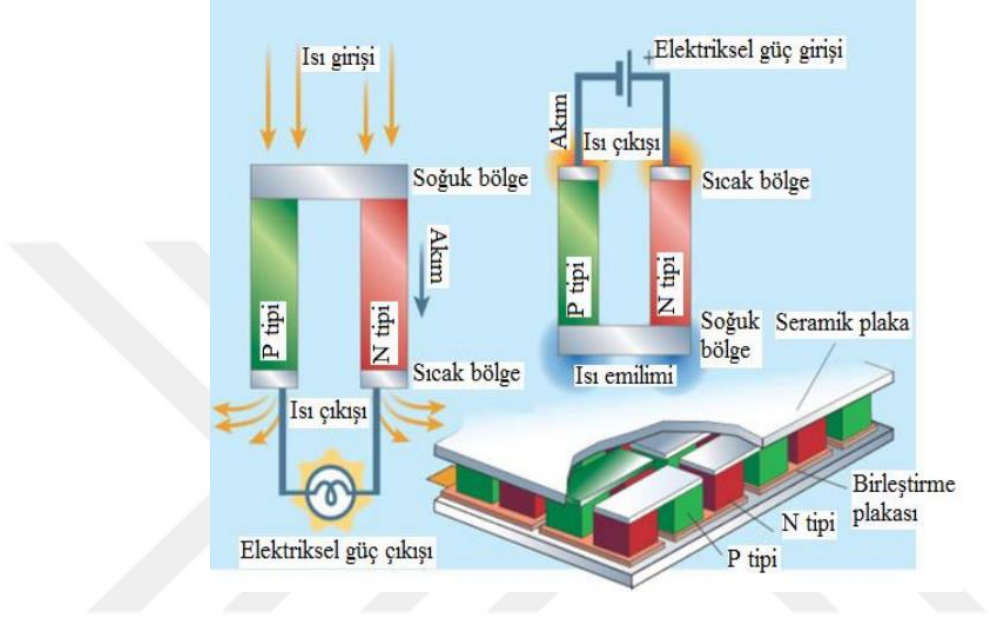
2.2 Termoelektrik Soğutma

Tarih boyunca avcı - toplayıcı toplumlardan teknoloji ve sanayileşmenin sürekli geliştiği günümüze kadar tüm toplumlar, yaşam standartlarını değiştirmek ve geliştirmek adına soğutucu araç ve sistemlere gereksinim duymuşlardır. Konfor arayışı, soğutma sistemlerine ihtiyacı belirleyen önemli bir unsur olarak görülmektedir. Soğutma sistemlerine olan ihtiyacın bir diğer başlıca sebebi ise, teknolojiye bağılı olarak elektrik - elektronik sistemlerin yapısındaki önemli değişikliklerdir. Günümüzdeki teknolojik cihazların karmaşık yapısı, minimum boyut tercihi ve tasarım kısıtları gibi unsurlar elektronik sistemlerde soğutucu kullanımını ihtiyaçtan öte zorunluluk haline getirmiştir. Küçük hacimli sistemlerin soğutulmasında sıkça tercih edilen soğutma sistemlerinin başında termoelektrik (TE) modüllü soğutma sistemleri gelmektedir. TE modülleri geliştirmeye yönelik hali hazırda birçok bilimsel çalışma yapılmaktadır.

Termoelektrik modülün keşfi 1821 yılında Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından gerçekleştirilmiştir. T.J. Seebeck farklı iki iletken ile oluşturduğu düzenekte, metal iletkenlerin bağlantı noktaları sıcaklıklarındaki farkın pusula iğnesini hareket ettirdiğini tespit etmiştir. İlk etapta termomanyetik etki olarak tanımlanan bu durum zamanla “Seebeck etkisi” adını almıştır. Seebeck etkisi sıcaklıkları farklı iki metalin bağlantı noktasında elektrik enerjisi meydana gelmesi şeklinde tanımlanabilir.

Termoelektrik modüllerin temelini oluşturan bir diğer öge olan “Peltier etkisi”, Jean Charles Athanase Peltier isimli Fransız fizikçi tarafından 1834 yılında keşfedilmiştir. Seebeck etkisinin zıttı olarak tanımlanabilen peltier etkisinde Fransız fizikçi, farklı iki metalden yapılan devreye verilen doğru akımın yönüne bağılı olarak bağlantı noktalarından birisi soğurken diğerinin ısındığını tespit etmiştir.

İşkoç fizikçi William Thomson 1851’de TE modüllerde “Thomson etkisi”ni keşfetmiştir. W. Thomson, Seebeck ve Peltier etkileri arasındaki ilişkiyi gösteren teoriyi bir problem üzerinde pratiğe dönüştürme başarısını göstermiştir. Thomson etkisi, üzerinden sıcaklık geçişi olan bir metale akım verilmesiyle birlikte tersinir ısı akısı oluşumunu tanımlamaktadır. Termoelektrik üreticinin genel yapısı Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8. Termoelektrik üreticinin genel yapısı (Dalar, 2019).

Sistemde elektronların soğutma sıvısı olarak çalıştığı termoelektrik soğutma ünitesinin yapısında geleneksel soğutma cihazlarının temel unsuru olan kompresör ve yoğunlaştırıcı bulunmaz. Yalın yapısı ve çalışma prensibi nedeniyle alternatif bir soğutucu sistemdir. Yapısında CFC gazı bulunmayan çevre dostu ve güvenilir bir soğutma sistemi olan termoelektrik modüllerde yapılan ömür testlerinde 100000 saatin üzerinde kararlı çalışma kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir (Riffat ve Ma, 2003).

Termoelektrik modüllerin avantajları şu şekilde sıralanabilir (Riffat ve Ma, 2003):

- Sistemde hareketli parça yoktur ve sessiz çalışır,
- Uzun ömürlüdür,
- Periyodik bakım gerektirmez,
- Çevre dostu ve güvenilirdir,

- Isı pompalama yönü geri dönüşümlüdür. DC güç girişinin polaritesini değiştirmek ısıнын zıt yönde pompalanmasını sağlar,
- Çalışma şartları optimize edildiğinde $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 'lik hassas sıcaklık kontrolü sağlanabilir,
- Sistem çok çabuk kararlı hale gelir ve sürekli rejime ulaşır,
- Geleneksel soğutma sistemlerinin dezavantajlı olduğu çok hassas veya çok küçük ortamlarda çalışabilir,
- Herhangi bir pozisyondan bağımsız çalışabilir.

Bu tür avantajları nedeniyle termoelektrik modüller endüstriyel ürünlerin yanında enstrüman, havacılık, askeri ve sağlık sektörlerinde tercih edilen soğutma sistemlerinin başında gelmektedir.

Termoelektrik modüllerin bahsedilen avantajlarının yanında diğer soğutma yöntemlerine göre dezavantajlı olduğu hususlar bulunmaktadır. Termoelektrik modüllerin dezavantajları (Arıcıoğlu, 2021):

- Yüksek kapasiteli soğutma yüklerinde verimi çok düşüktür,
- COP değeri 2 - 4 arasında olan geleneksel soğutma makinaları ile kıyaslandığında COP değeri (0.3 - 0.7) oldukça düşüktür.
- Doğru akım (DC) ile çalışır,

Termoelektrik modüller özellikle yüksek kapasiteli soğutma uygulamalarında düşük performans katsayısına (COP) sahiptir. Bu durum termoelektrik modüllerle ilgili geliştirme çalışmalarına hız kazandırmıştır. Yarı iletken malzemelerin geliştirilmesi, sistem tasarımı ve optimizasyonu, ısı aktarım verimi gibi alanlarda COP değerini artırmaya yönelik çalışmalar ön plana çıkmaktadır (Derebaşı, 2015).

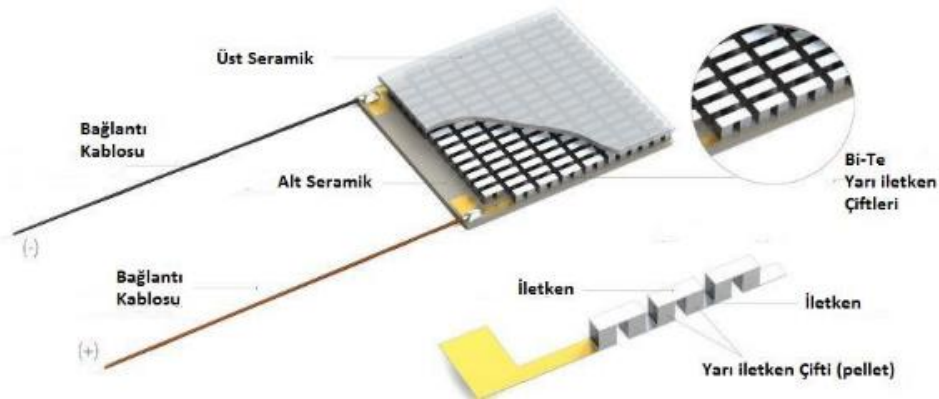
Diğer soğutma sistemleri ile kıyaslandığında yukarıda bahsedilen birçok üstünlüğe sahip olan termoelektrik soğutucular, bu özellikleri dolayısıyla birçok alan ve uygulamada kullanılmaktadır. Termoelektrik modüllerin kullanıldığı alanlar ve uygulamalar Çizelge 2.3'de verilmiştir (Bulut, 2005).

Çizelge 2.3. Termoelektrik modüllerin kullanıldığı alanlar ve uygulamalar.

Kullanım Alanları	Uygulamalar
Askeri ve Uzay Araştırmaları	Elbise soğutma, Elektronik cihazların soğutulması, Taşınabilen soğutucu, Lazer diyot ve kızılötesi sensör soğutma, Uzay teleskobu soğutma, Kabin soğutma.
Laboratuvar cihazları	CCD çip soğutma, Lazer diyot ve kızılötesi sensör soğutma, Entegre devre soğutma, Karıştırıcı soğutma, Vidicon tüpü soğutma, Soğuk oda, Referans banyosu, Mikrotome soğutma, Elektroforesis hücre soğutma.
Endüstriyel cihazların sıcaklık kontrolü	Amerika Elektrik Cihazları Üreticileri Birliği (NEMA) ortam şartları, Kritik elemanları zor dış ortam şartlarından koruma, Mikroişlemcilerin soğutulması, Elektronik cihazların nümerik kontrolleri, Robotikler, Yazıcı ve fotokopi cihazlarında mürekkep sıcaklığının dengede tutulması, CCD kameraların soğutulması.
Gıda sektörü	Tereyağı dağıtıcılar, Krema dağıtıcılar.
Farklı amaçlar	Otel odası soğutma, Mini oto soğutucuları, İlaç soğutma, Araç koltuğu soğutma, Hava, deniz ve kara araçları soğutma, DNA döngüleri, Tıbbi teşhis cihazları, Tedavi ve masaj yataklarında.
Bireysel soğutma	Taşınabilir soğutucular, Araba soğutucusu, İçecek soğutucuları, Motosiklet kaskı soğutma, İnsülin soğutma.

2.2.1 Termoelektrik soğutucu yapısı ve yarı iletken malzemeler

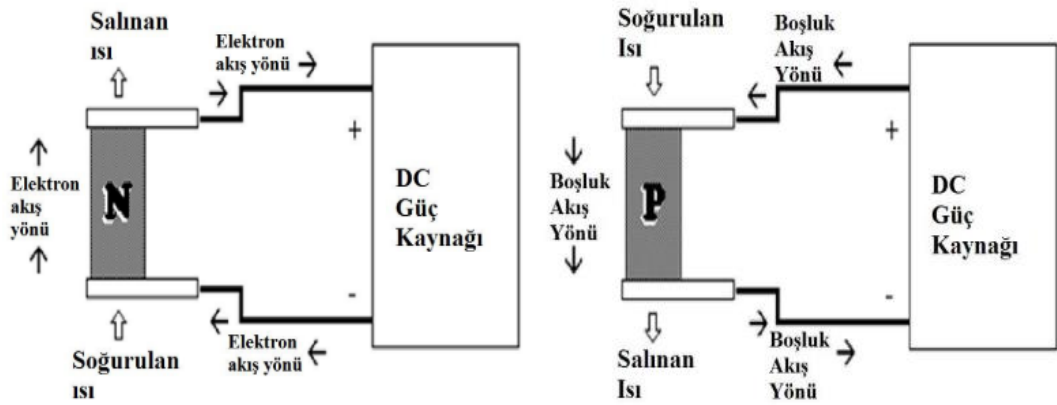
Termoelektrik soğutucular (peltier), iki tarafı seramik malzeme ile kapatılmış elektriksel olarak seri, ısıl olarak paralel bağlı çok sayıda P ve N tipi yarı iletken ısıl çiftten oluşur. Termoelektrik modülün ana elemanları; yarı iletkenler, seramik alt ve üst tabakalar, bağlantı kabloları ve yarı iletkenleri elektriksel olarak birbirine bağlayan iletkenlerdir. Termoelektrik modülü oluşturan elemanlar Şekil 2.9’da görülmektedir.



Şekil 2.9. Termoelektrik modülü oluşturan bileşenler (Öztürk, 2021).

P ve N tipi yarı iletkenler ve bunların elektriksel bağlantısını sağlayan iletkenler birbirine paralel iki seramik arasında sıkıştırılarak termoelektrik modül oluşturulur. Termoelektrik modülün alt ve üst kısmını kapatan seramik tabakalar elektrik iletkenliği çok düşük malzemelerdir. Bu sayede seramik tabakalar peltieri montajı yapılan dış bölgeden elektriksel olarak izole eder. Aynı zamanda seramik tabakalar yüzeyden maksimum ısı transferini sağlamak için minimum termal direnç ve yüksek termal iletkenliğe sahip olmalıdır. Hali hazırda en çok tercih edilen seramik, alüminyum oksittir (Al_2O_3). Yarı iletken ısı çiftler arasındaki seri elektrik bağlantısını sağlayan elemanlar elektrik iletkenleridir. Termoelektrik modülü bir güç kaynağına bağlamak için elektrot kabloları kullanılır (Karri, 2005).

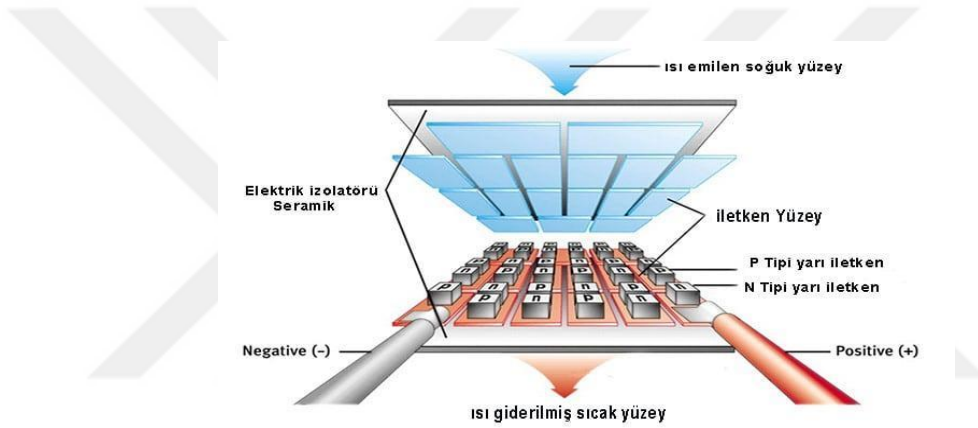
İletken ve yalıtkan malzemeler arasında yar alan, üzerine uygulanan mekanik iş nedeniyle iletken özelliği gösterebilen normalde yalıtkan olan malzemeler yarı iletkenlerdir. Yarı iletkenler yalın halde elektrik uygulamalarında kullanılmazlar. Yarı iletkenlere bazı katkı maddeleri eklenerek enerji seviyeleri yükseltilir ve bu şekilde kullanılabilirler. Katkı maddeleri eklenerek iletkenlik düzeyi azaltılan yarı iletkenler N tipi, değerlik düzeyi yükseltilen yarı iletkenler P tipi olarak adlandırılır (Çakmaz, 2019). Şekil 2.10'da P ve N tipi yarı iletkenlerden geçirilen akımın oluşturduğu ısı enerjisi akışı görülmektedir.



Şekil 2.10. Akım geçirilen N-tipi ve P-tipi yarı iletkenlerdeki ısı akışı (Derebaş, 2015).

Termoelektrik modülün N tipi yarı iletken ucu doğru akımla beslendiğinde yük taşıyan elektronlar eksi kutuptan itilirken artı kutuptan çekilir. Böylelikle tek yönde sürekli elektron akışı meydana gelir. N tipi malzemedeki elektron akışı aşağıdan

yukarıya doğru gerçekleşir. Bu esnada ısı alt birleşme noktasından absorbe edilerek üst birleşme noktasına transfer olur. Isı pompalanması yarı iletkenlerdeki elektronlar sayesinde oluşur. P tipi yarı iletkenler yük taşıyıcılar boşluk olacak şekilde üretilen yarı iletkenlerdir. P tipi yarı iletkenlerdeki boşluklar kristal yapının iletkenlik seviyesini yükselterek elektriksel güç girişinde elektronların serbest dolaşımına izin verir. Böylelikle elektron akımı ile boşluk akımı zıt yönde meydana gelir. Elektronlar vasıtasıyla taşınan ısı, P tipi malzemede yukarıdan aşağıya doğru hareket eder. Isı pompalama özellikleri birbirine tamamen zıt olan P ve N tipi yarı iletkenler termoelektrik soğutma sistemlerinin en önemli parametreleridir (Goldsmid, 2016). DC güç kaynağı ile beslenen bir termoelektrik soğutucu modülün çalışma prensibi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



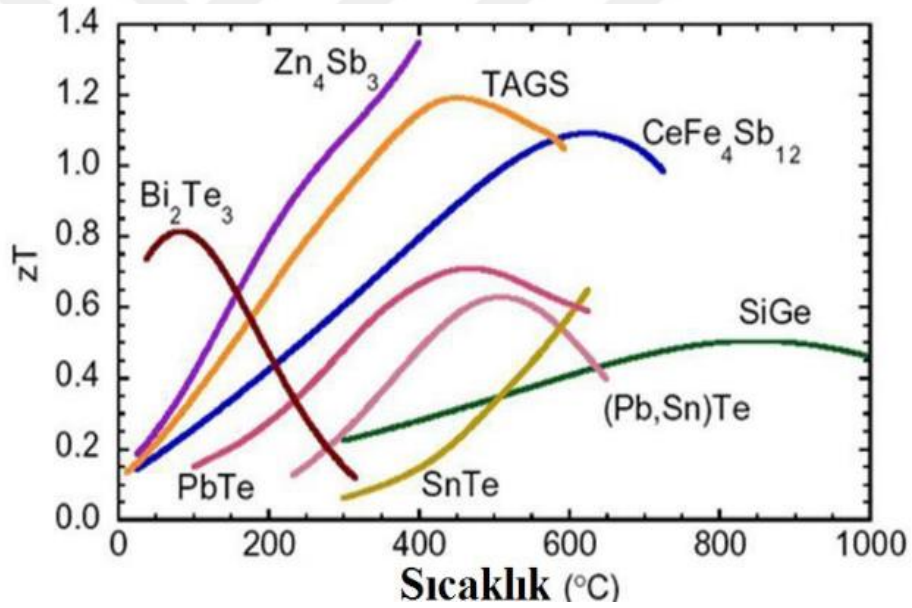
Şekil 2.11. Termoelektrik soğutucu modül (peltier) çalışma prensibi (URL-1).

Termoelektrik modülün en önemli elemanları olan P ve N tipi yarı iletkenlerde BiSb, SiGe, PbTe ve Bi_2Te_3 gibi alaşımlar kullanılmaktadır. Bu alaşım yarı iletkenler arasında Bizmut-Tellür (Bi_2Te_3) oda sıcaklığı şartlarında yüksek termoelektrik özellik göstermektedir. Yüksek sıcaklık çalışma şartlarında Bizmut-Tellür yarı iletkenlerin Seebeck katsayısı düşer. Bu durum termoelektrik modülün düşük verimle çalışmasına neden olur. Şekil 2.12 ve 2.13 de görüldüğü gibi Bi_2Te_3 alaşımlar boyutsuz malzeme katsayısı (ZT) ve çalışma sıcaklığı kıyaslandığında oda sıcaklığındaki uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen yarı iletkenlerdir.

Termoelektrik modüllerde kullanılan bir diğer yarı iletken Kurşun – Tellür (PbTe) 300 ile 700 Kelvin sıcaklıkları arasında iyi başarımla sahiptir. Büyük atom ağırlığına sahip olan Kurşun – Tellür alaşımı 300 Kelvin’in üzerindeki sıcaklıklarda Bizmut – Tellür’e göre daha yüksek Seebeck katsayısına ve malzeme katsayısına

(ZT) sahiptir. Silisyumla zenginleştirilmiş Silisyum – Germanyum (SiGe) alaşımları yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal bir yarı iletkenlerdir. Aynı zamanda Silisyum – Germanyum alaışımının ısı iletkenliği düşüktür (Bulusu ve Walker, 2008). En yaygın kullanılan P ve N tipi yarı iletkenlere ait boyutsuz malzeme katsayısının (ZT), sıcaklıkla değişimi Şekil 2.12 ve 2.13 de verilmiştir.

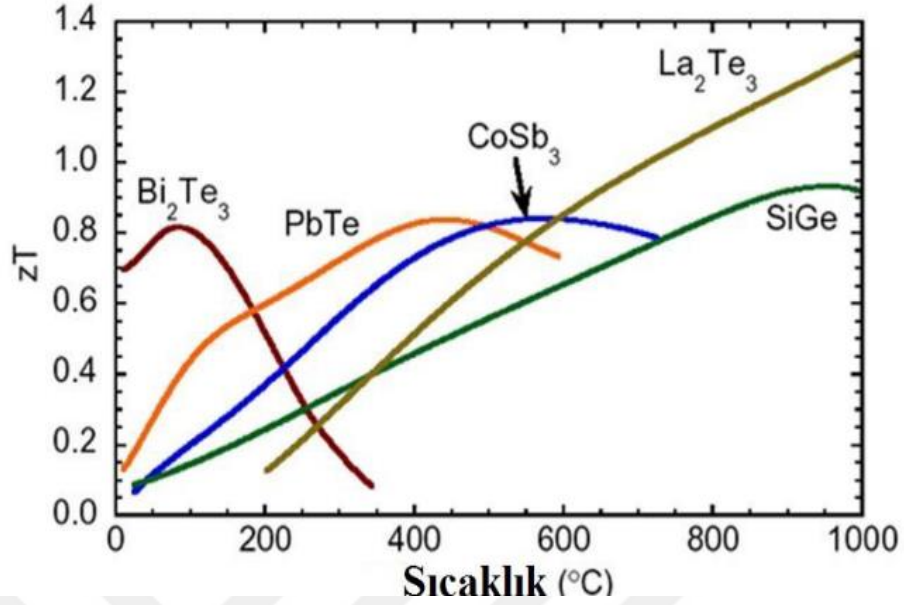
P tipi yarı iletken üretiminde kullanılan malzemeler incelendiğinde düşük ve orta çalışma sıcaklıklarında Bi_2Te_3 'ün diğer yarıiletkenlere göre daha iyi malzeme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla düşük ve orta sıcaklıktaki uygulama alanlarında P tipi yarı iletken olarak Bi_2Te_3 kullanımı uygun olmaktadır. Çalışma sıcaklığının arttığı uygulamalarda verimi düşen Bi_2Te_3 yerine malzeme katsayıları çok daha yüksek olan TAGS ve $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ yarı iletkenler tercih edilmektedir.



Şekil 2.12. P tipi yarı iletkenlerin malzeme katsayılarının sıcaklığa göre değişimi (Derebaşı, 2015).

Termoelektrik modüllerde kullanılan N tipi yarı iletkenler imal edildiği malzemelerin çalışma sıcaklığına göre kıyaslandığında düşük ve orta sıcaklık değerlerinde Bi_2Te_3 'ün malzeme katsayısının daha yüksek olduğu görülmektedir. Çalışma sıcaklığının yüksek olduğu uygulamalarda avantajını yitiren Bi_2Te_3 yerine malzeme katsayısı daha yüksek olan PbTe ve CoSb_3 yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Çok yüksek çalışma sıcaklıklarında ise diğer yarıiletkenlere göre daha yüksek

malzeme katsayısına sahip olan La_2Te_3 ve SiGe malzemelerin kullanımı uygun görülmektedir.



Şekil 2.13. N tipi yarı iletkenlerin malzeme katsayılarının sıcaklığa göre değişimi (Derebaşı, 2015).

2.2.2 Termoelektrik etkiler

Termoelektrik modüller, yarı iletken maddelere farklı atom eklenmesiyle temin edilen P ve N tipi yarı iletken malzemelerden elde edilir. Çalışma prensibi olarak seebeck, peltier ve thomson olmak üzere üç farklı etkiye sahiptir.

2.2.2.1 Seebeck etkisi

Temas halinde iki metal arasındaki sıcaklık farkının doğrudan elektrik enerjisine dönüşümüne Seebeck etkisi denir. Seebeck etkisi, serbest elektron hızları ve yoğunlukları farklı olan iki metalin birleşimi sırasında meydana gelen elektron geçişini araştırır. Birleşme noktalarında potansiyel fark oluşumunu sağlayan unsur ısı farkıdır. Birleşme noktaları arasındaki ısı farkı elektrik alan etkisi oranını belirler. Aynı zamanda metallerin türü de elde edilen elektrik alan etkisini belirlemede önemli rol oynar (Demiröz, 2021).

İki metal arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) ile TE soğutucunun uçları arasında oluşan potansiyel fark (V) doğru orantılı değişmektedir. Denklem 2.1’de görüldüğü üzere

meydana gelen sıcaklık farkı ile potansiyel farkın oranına Seebeck katsayısı denir. Seebeck katsayısı α sembolüyle ifade edilir ve birimi V/K'dir (Rowe, 1995).

$$\alpha_{ab} = \frac{V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Seebeck katsayısının bulunduğu eşitlikte ΔT termoelektrik modülün sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını ($\Delta T = T_h - T_c$), α_{ab} iletken ısı çiftin seebeck katsayı farkını ($\alpha_{ab} = \alpha_a - \alpha_b$) ifade etmektedir.

2.2.2.2 Peltier etkisi

Peltier etkisi, termoelektrik soğutmanın temelini oluşturmaktadır. Seebeck etkisinin zıttı olan peltier etkisinde iki metalin bağlantı noktasından akım geçişinde TE modülün alt ve üst yüzeyinde plakalardan birisi ısınırken diğeri soğur. Sıcak ve soğuk yüzey, TE modüle uygulanan akımın yönüne bağlı olarak değişmektedir. TE modülden geçirilen akım ile sıcaklık arasında ilişki ve peltier etkisiyle ilgili eşitlikler denklem 2.2 ve 2.3'deki gibidir.

$$\dot{Q}_p = \Pi_{ab} \cdot I \quad (2.2)$$

$$\Pi_{ab} = \alpha_{ab} \cdot T \quad (2.3)$$

Peltier'den açığa çıkan veya absorbe edilen ısıнын ($\dot{Q}_p$) birimi Watt olup eşitlikteki Π_{ab} peltier katsayısını, I peltiere verilen akımı ifade etmektedir. Peltier'e verilen akımın a iletkenine giriş yaptığı temas noktasının ısıtılması, a iletkenini terk ettiği temas noktasının soğutulması durumunda peltier katsayısının işareti pozitifdir. Aynı zamanda peltier etkisi, elektrik ve ısı arasında tersinirdir (Lee, 2017). Seebeck katsayısı her malzeme için sabit iken, peltier katsayısı malzemenin sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir.

2.2.2.3 Thomson etkisi

Sıcaklık gradyanına sahip bir iletken üzerinden akım geçirildiğinde Thomson etkisi meydana gelir. Thomson etkisi iletkenindeki sıcaklık gradyanına ve akımın yönüne bağlı olarak değişim gösterir. Malzeme ve akımın yönüne endeksli olarak iletkenin

bir ucu ısıyı emerken diğer ucundan ısı açığa çıkar (Bolatlı, 2019); Öztürk, 2021). Thomson etkisi ($\dot{Q}_{thomson}$) denklem 2.4'deki gibi tanımlanır.

$$\dot{Q}_{thomson} = \tau_{ab} \cdot I \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Elektrik ve ısı arasında tersinir olan Thomson ısısını ifade eden denklemdeki τ_{ab} bir malzemenin thomson katsayısını, I malzeme üzerinden geçen akımı, ΔT sıcaklık farkını ifade etmektedir. Malzeme ısıyı absorbe ediyorsa eşitlikteki thomson katsayısının işareti pozitif, aksi durumda ise negatiftir (Lee, 2010).

2.2.3 Malzeme katsayısı (Figure of Merit=Z)

Bir termoelektrik soğutma sisteminin yüksek verime sahip olması için malzemelerin minimum termal iletkenliğe, maksimum Seebeck katsayısı ve elektrik direncine sahip olması gerekir. Termoelektrik modüllerin soğutma performansı, malzeme katsayısı olan Z değerine bağlıdır ve birimi $1/K$ 'dir. Malzeme katsayısı Z 'nin hesaplanması denklem 2.5'de gösterilmiştir.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{k} \quad (2.5)$$

Denklemdeki α ($\mu V/K$) seebeck katsayısını, ρ (Ωcm) elektriksel direnci, σ ($1/\Omega cm$) elektriksel iletkenliği, k (W/mK) ısı iletkenlik katsayısını ifade etmektedir. Z malzeme katsayısı mutlak sıcaklık (T) ile birlikte kullanıldığında malzeme katsayısını fiziksel biçimde tanımlayan boyutsuz ZT değeri elde edilir. Soğutma uygulamalarında kullanılan termoelektrik modüllerde kullanılan malzemelerin ZT değeri 0.4 ile 1.3 arasındadır. Termoelektrik soğutucuların verimliliği ZT değeri ile doğru orantılı olarak değişmektedir (Lee, 2017).

2.2.4 Performans (Başarım) katsayısı (COP)

Termoelektrik soğutucuların performansını belirlemede COP'nin (performans katsayısı) göz önünde bulundurulması gerekir. COP değeri, en genel tanımıyla bir sistemden kazanılan enerjinin harcanan enerjiye oranıdır. COP değerinin yüksek olması soğutucu sistemin veriminin de yüksek olduğunu belirtir.

Termoelektrik soğutucu modülün maksimum performans katsayısı COP_{max} 'ın hesaplanmasında denklem 2.6'daki eşitlik kullanılmaktadır.

$$COP_{max} = \frac{q}{W} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT} - \frac{T_H}{T_C}}{\sqrt{1+ZT} + 1} \quad (2.6)$$

Formülasyondaki ZT değeri sonsuza doğru yaklaştıkça soğutucu sistemin COP değeri Carnot olacaktır. Termoelektrik modüldeki elektronların çalışma şartları sistemin performansını belirlediği için termoelektrik modüllerin Carnot sıcak motoru olduğu da belirtilmektedir (Rowe, 1995).

2.2.5 Jonksiyon sıcaklığı

LED'in temel bileşeni olan P ve N tipi yarı iletken malzemelerden oluşan diyota akım veya gerilim uygulandığında ışık akısı meydana gelir. Işık akısı, LED'i besleyen akıma bağlı olarak değişir. Işık akısını belirleyen bir diğer önemli unsur diyotlardaki jonksiyon (birleşme noktası) sıcaklığıdır. Jonksiyon sıcaklığının üretici verilerinde belirlenen sınır değeri aşması durumunda LED'ler arızalanarak işlevini kaybeder. Ayrıca yüksek jonksiyon sıcaklığı zamanla LED'in ışık çıkışının bozulmasına ve spektral kaymaya neden olur. Bu yüzden LED'lerin çalışma performansı veya baskın başarısızlık açısından jonksiyon sıcaklığı başlıca belirleyici unsur olarak ön plana çıkmaktadır. LED'ler için jonksiyon sınır sıcaklığını belirleyen unsur reçinenin akma dayanım noktasıdır.

LED jonksiyon sıcaklığının azaltılması için birleşme noktasındaki ısıyı uzaklaştırmak gerekir. Bu sebeple LED çipi alt tabakaya lehim eki ile boşluk olmayacak şekilde bağlanır. Aksi taktirde boşluklar termal kaçak ve dolayısıyla LED çipinin arızalanmasına neden olur. Ayrıca LED bileşenlerini bir arada tutan epoksinin yüksek sıcaklıklara maruz kalması, kablo bağının kopması ve kalıp tutturma dayanımının yitirilmesi gibi arızalara neden olduğu bilinmektedir.

Jonksiyon sıcaklığının doğru tahmin edilmesi LED'in sağlıklı çalışması ve kullanım ömrü için son derece önemlidir. Jonksiyon sıcaklığının doğru tahmini, LED'li aydınlatma sistemlerindeki soğutma uygulamalarının gereklilik ve kapasitesine yön vermektedir.

Doğrudan ölçülemeyen LED jonksiyon sıcaklığını tahmin etmek için öncelikle ısıl gücün (P_{heat}) hesaplanması gerekir. LED'lere verilen elektriksel gücün bir kısmı LED'in çalıştırılma amacı olan ışık enerjisine dönüşürken, enerjinin büyük kısmı dönüştürme güç kaybı olarak ısı enerjisine dönüşür. Yapılan araştırmalar LED elektriksel giriş gücünün yaklaşık % 20'sinin ışık enerjisine (P_{opt}) dönüşürken geriye kalan % 80'lik kısmının ısı enerjisi olarak açığa çıktığını göstermektedir. LED'li aydınlatma sistemlerinde ısıl güç denklem 2.7'deki gibi hesaplanır.

$$P_{\text{heat}} = P_{\text{el}} - P_{\text{opt}} \quad (\text{W}) \quad (2.7)$$

LED'lerin çalıştırılması için harcanan elektriksel güç (P_{el}), LED'leri besleyen ileri akım ile ileri gerilimin çarpımıdır (Denklem 2.8).

$$P_{\text{el}} = V_f \times I_f \quad (\text{W}) \quad (2.8)$$

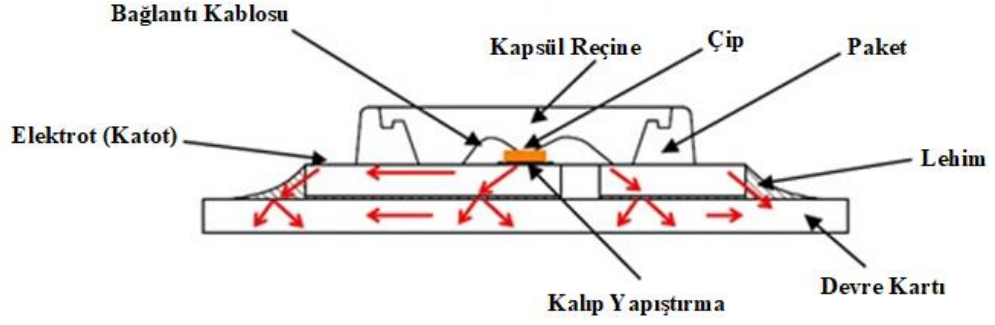
LED'leri besleyen elektriksel gücün ışık enerjisine dönüşen optimum güç, LED'in optik verimine (η_{LED}) bağlı olarak denklem 2.9'daki gibi hesaplanır. LED'ler için optik verim ortalama (η_{LED}) % 20 - % 25 arasındadır.

$$P_{\text{opt}} = \eta_{\text{LED}} \times P_{\text{el}} \quad (\text{W}) \quad (2.9)$$

Jonksiyon sıcaklığının tahmin edilmesinde genel olarak iki yöntem kullanılır. Yöntemlerden birincisi, bir boyutlu ısı transfer analizi temeline dayanan termal direnç ağ modelidir. Bu yöntemle hesaplama yapabilmek için LED bağlantı noktasından dış ortama kadar tüm kısımların termal direnç katsayısının bilinmesi gerekir. Aralarında sıcaklık farkı olan iki nokta arasındaki termal direnç (R_{th}) denklem 2.10'daki gibi hesaplanır.

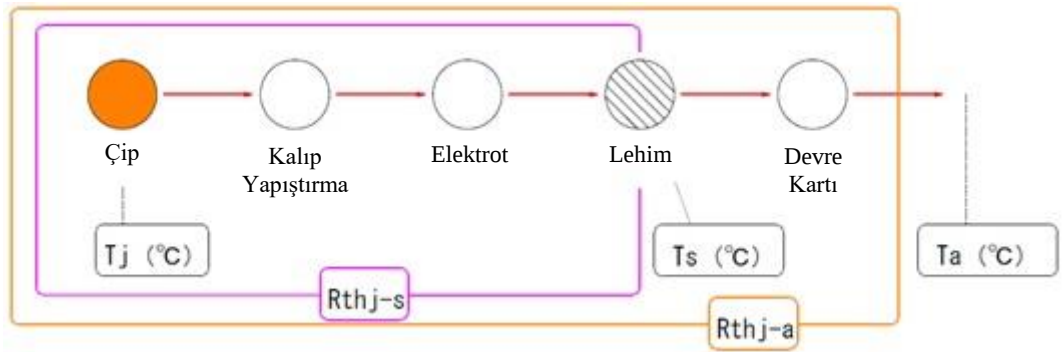
$$R_{\text{th}} = (T_1 - T_2) / \dot{Q} \quad (^\circ\text{C/W}) \quad (2.10)$$

Yapısal özellikleri nedeniyle LED'lerden açığa çıkan ısının tamamına yakını iletim yoluyla LED paketi ve ek soğutucu malzemelere aktarılmaktadır. Birleşme noktasında oluşan ısının iletim yoluyla izlediği yol ve bileşenler Şekil 2.14'de görülmektedir.



Şekil 2.14. LED'in yapısı ve çipten yayılan ısı yolu.

Termal direnç ağ modeliyle Jonksiyon sıcaklığının hesaplanması için birleşme noktasından dış ortama kadar ısının geçiş yaptığı tüm kısımların termal direncinin bilinmesi gerekir. Toplam termal direncin (R_{thj-a}) belirlenebilmesi için her sistemde ısı geçişi olan noktaları belirten akış şeması bilinmelidir. Lehim noktasından termal ara yüzeye kadar olan bölümün termal direnç değeri sistemin geneline bakıldığında göz ardı edilebilecek kadar düşüktür. Bu nedenle toplam termal direnç hesaplanmasında genellikle bu bölgelerin termal direnci ihmal edilir. Bir LED için çipten dış ortama kadar olan ısı akış şeması Şekil 2.15'de gösterilmiştir. Şemadaki T_j jonksiyon sıcaklığını, T_s lehim noktası sıcaklığını, T_a dış ortam sıcaklığını ifade etmektedir.



Şekil 2.15. LED çipinden çevreye yayılan ısı akış şeması.

Dış ortam sıcaklığı ve toplam termal direnç ile jonksiyon sıcaklığı hesaplanmasında denklem 2.11 kullanılır.

$$T_j = T_a + R_{thj-a} \times P_{heat} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.11)$$

Denklemdaki T_a dış ortam sıcaklığını, R_{thj-a} toplam termal direnci, P_{heat} ısı gücü ifade etmektedir.

LED jeksiyon sıcaklığının tahmin edilmesinde kullanılan bir diğer hesaplama yöntemi lehim noktası sıcaklığı (T_s) ve çipten lehim noktasına kadar olan termal direnç (R_{thj-s}) değerleri ile yapılan hesaplama (Denklem 2.12).

$$T_j = T_s + R_{thj-s} \times P_{heat} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.12)$$



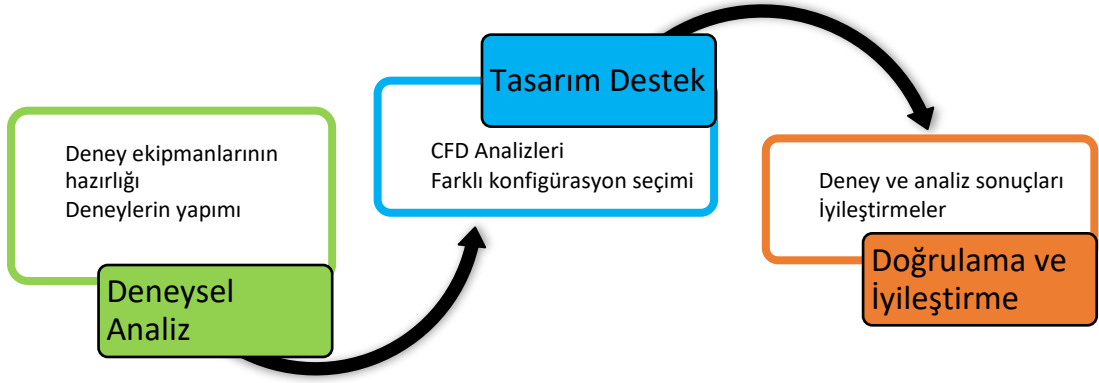
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Teknolojinin değişimi ve gelişimi ile aydınlatma sistemlerinde LED 'ler günden güne daha popöler ve tercih edilir konuma gelmiştir. LED teknolojisindeki gelişmeler küçük hacimlerden yüksek ışık akısına elde etme imkânı sağlamaktadır. Böylelikle küçük boyutlarda yüksek güçlü LED'ler üretilmektedir. Bu avantaj aynı zamanda küçük hacimlerden yüksek ısı transferi gerektiren termal yönetimi zorunlu kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında yüksek güçlü LED'lerin termal yönetiminde ısı borusu ve termoelektrik modülden oluşan hibrit soğutma ünitesinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Farklı birçok sistemin soğutma ihtiyacında kullanılan ısı borusu ve termoelektrik modül ile büyük kapasiteli LED'lerin jonksiyon sıcaklıklarını minimum seviyede tutmak amaçlanmaktadır.

Çalışmamız üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde dörtlü LED yongasının termal yönetimi için uygun boyutlarda ısı borulu soğutucu ünite tasarlanıp üretimi yapılmıştır. Isı borulu soğutma ünitesinin performansı incelenerek soğutma performansına etki eden unsurlar gözlenmiştir. İkinci bölümde dörtlü LED yongasının termal yönetimi için uygun boyut ve kapasitede termoelektrik modül (peltier) kullanılmıştır. Termoelektrik modülün performansı incelenerek soğutma performansını etkileyen unsurlar belirlenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde dörtlü LED yongasının termal yönetiminde hibrit (ısı borusu + peltier) soğutma ünitesinin performansı incelenerek, çalışmanın birinci ve ikinci bölümünde elde edilen soğutma performanslarıyla kıyaslanmıştır.

Mühendislik sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar deneysel ve nümerik olmak üzere iki yöntemle gerçekleşmektedir. Bir problemin çözümü için tasarlanan sistemin deneysel analizi ile elde edilen verilerin sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçlarla doğrulanması sistemin geçerliliği ve kullanılabilirliği için son derece önem ifade etmektedir. Elde edilen sonuçların optimum verime ulaşması için yapılan iyileştirme çalışmaları problemin çözümüne katkı sağladığı gibi gelecek çalışmalara da ışık tutmaktadır. Bu tez çalışmasında izlenen problem çözme metodolojisi genel hatlarıyla Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



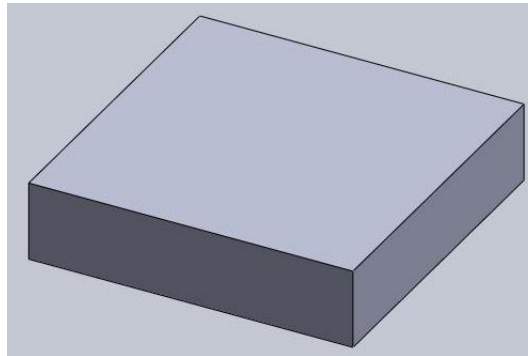
Şekil 3.1. Çalışmanın metodolojisi.

3.1 Deneysel Çalışma

Çalışmanın bu bölümünde deneysel çalışmada kullanılan soğutucu ünite tasarımı ve üretim süreci açıklanmaktadır. Ayrıca deneysel çalışmada kullanılan tüm materyal ve malzemeler detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

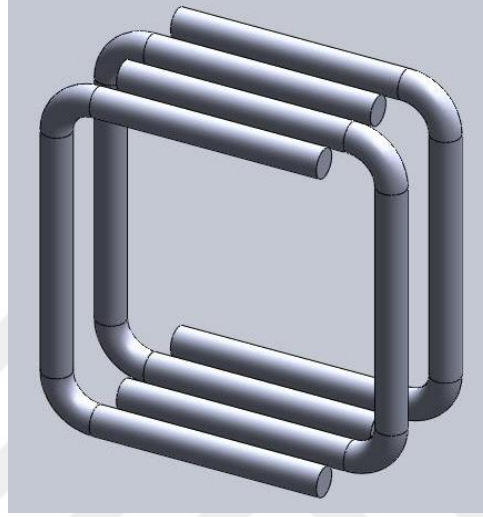
3.1.1 Isı borulu soğutucu ünite

Dörtlü COB LED yongasının yerleştirileceği içerisinden ısı boruları geçen soğutucu plaka, 62 mm x 62 mm genişliğinde 15mm yüksekliğinde alüminyum malzemeden imal edilmiştir (Şekil 3.2). Soğutucu plakanın boyut belirlenmesinde piyasada üretilen standart termoelektrik modül boyutları göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca tasarımı yapılan aydınlatma ünitesinin kompakt bir yapıda olması ve minimum alan kaplaması diğer belirleyici unsurlar olmuştur.



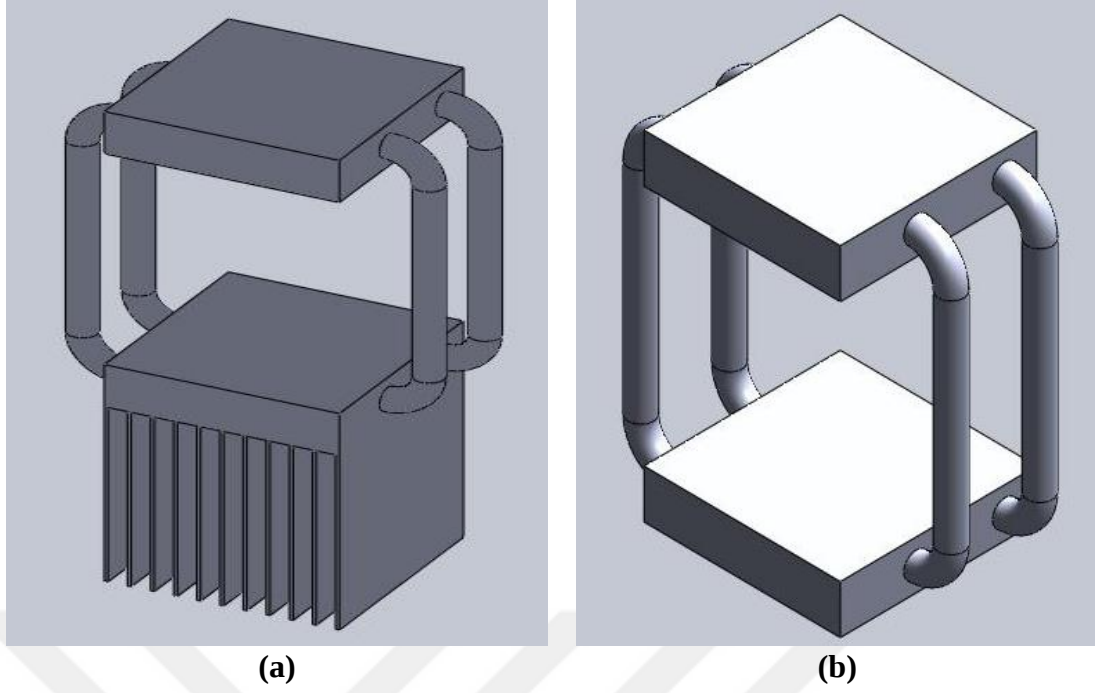
Şekil 3.2. LED yongasının yerleşeceği ısı emici taban.

Tasarımda kullanılacak dört (4) adet U şeklinde ısı borusu, 8 mm dış çap, 6.5 mm iç çap ve 215 mm uzunlukta imal edilmiştir. Her bir ısı borusunun evaporatör bölgesi uzunluğu 62 mm, kondenser bölgesi uzunluğu 62 mm, adyabatik bölgesi uzunluğu 90 mm olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 3.3). Isı borularının iç cidarında kalıplarda preslenerek şekil verilen metal parçacıkların sinterlenmesi ile elde edilen sinterlenmiş metal fitil kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Çalışma için tasarlanan ısı boruları.

Deneysel çalışmada iki ayrı ısı borulu LED soğutma ünitesi tasarlanmıştır. İlk tasarımda LED yongasının üzerine yerleştirildiği alüminyum tabaka içerisine evaporatör bölgesi gömülü olan dört adet ısı borusu demeti yerleştirilmiştir. Isı borularının kondenser kısmı ise ısı transfer yüzey alanını artıracak kanatçık demeti ile desteklenmiştir. İkinci tasarımda LED yongasının üzerine yerleştirildiği alüminyum tabaka içerisine evaporatör bölgesi gömülü olan ısı borularının kondenser bölgesi de evaporatör bölgesinin gömülü olduğu alüminyum tabakanın aynısı ile kapatılmıştır. Kondenser bölgesinin bu şekilde kapatılarak termoelektrik modülün yerleştirileceği yüzey elde edilmiştir. Kanatçık eklenen ısı borulu soğutma ünitesi ve hibrit soğutma ünitesinde kullanılan ısı borulu soğutucu ünitenin üç boyutlu tasarımı Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4. (a) Kanatçık ilaveli ısı borulu soğutma ünitesi (b) Hibrit soğutma ünitesinde kullanılan ısı borulu soğutma ünitesi.

Ayrıca tüm soğutma ünitelerinin aynı ısı transfer yüzey alanındaki soğutma performanslarını analiz etmek amacıyla ikinci tasarımın ve termoelektrik modülün alt kısmına 62 mm x 62 mm boyutlarında ve 1mm kalınlığında ısı emici kanatçık imal edilmiştir. Sistemde kullanılan kanatçığın fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kanatçık özellikleri.

Kanatçık Yüksekliği	62 mm
Kanatçık Genişliği	62 x 62 mm
Kanatçık Kalınlığı	1 mm
Kanatçıklar Arasındaki Mesafe	5,1 mm
Kanatçık Sayısı	11 Adet
Kanatçık Malzemesi	Alüminyum
Isı İletim Katsayısı (k)	200 W/m.K

Isı borulu soğutma ünitesi ve hibrit soğutma ünitesi için tasarlanan kanatçıksız ısı borulu soğutucu ünitenin imal edilen prototipi Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Prototipi imal edilen ısı borulu soğutucu ünite.

Isı borularında çalışma akışkanını belirleyen en önemli unsur çalışma sıcaklığıdır. Zehirleyici olmaması, ucuz olması ve buharlaşma yoğunluğu ile buharlaşma gizli ısısının yüksek olması gibi avantajlarından dolayı orta sıcaklık uygulamalarına en uygun akışkanlardan biri saf sudur. LED’lerden açığa çıkacak ısı ve dış ortam sıcaklığı dikkate alınarak ısı borusunda çalışma akışkanı olarak saf su kullanılmıştır. Isı borusu minimum çalışma sıcaklığı 60 °C olarak tahmin edilmektedir. 60 °C sıcaklık için saf suyun termal özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Saf suyun termal özellikleri.

Özgül Isı (c_p) kJ/kg.°C	4,179 (kJ/kg.°C)
Yoğunluk (ρ)	9,833 E+2 (kg/m ³)
Dinamik Viskozite (μ)	4,71 E-4 (kg/m.s)
Isı İletim Katsayısı (k)	0,654 (W/m.°C)
Özgül Hacim (v)	1,017 E-3 (m ³ /kg)

Isı borularında kullanılan akışkan miktarı önceki bölümde değinildiği üzere farklı çalışma limitleri nedeniyle önemlidir. Yapılan bilimsel çalışmalarda ısı borularında kullanılacak iş akışkanının miktarı ile ilgili, toplam boru hacminin % 15-22’si veya ısı borusu evaporatör bölgesi hacminin % 40-50’si oranında olması gerektiği vurgulanmıştır. Belirtilen iki akışkan miktarı belirleme yönteminin birbirine yakın akışkan miktarını ifade etmektedir (Özsoy, 2005). Bu çalışmada iş akışkanı olarak belirlenen saf su, evaporatör bölgesinin % 45’i oranında kullanılmıştır. Isı borusu malzemesi olarak bakır seçilmiştir. Bakır malzeme kullanımında; iş akışkanı ile uyumlu çalışma, düşük termal direnç ve kolay şekil verilebilme özelliği belirleyici

olmuştur. Çalışmada kullanılan ısı borularının fiziksel özellikleri Çizelge 3.3’de görülmektedir.

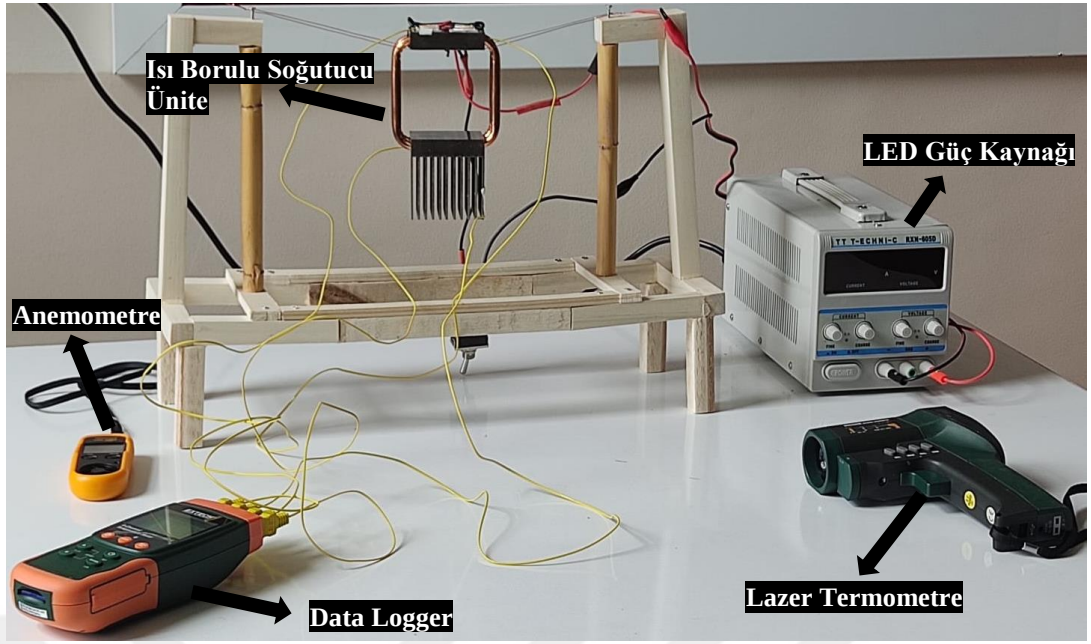
Çizelge 3.3. Isı borusu fiziksel özellikleri.

Dış Çap	$D = 8\text{ mm}$
İç Çap	$D = 6,5\text{ mm}$
Boru Et Kalınlığı	$t = 0,75\text{ mm}$
Evaporatör Bölgesi Uzunluğu	$L_{\text{evp}} = 62\text{ mm}$
Kondenser Bölgesi Uzunluğu	$L_{\text{kon}} = 62\text{ mm}$
Adyabatik Bölge Uzunluğu	$L_{\text{ady}} = 90\text{ mm}$
Çalışma Akışkanı	Saf Su
Boru Malzemesi	Bakır

Deneyisel çalışmada her bir soğutma ünitesi için LED giriş güçleri değiştirilerek farklı güçlerde termal yönetim incelenmiş ve jonksiyon sıcaklıkları hesaplanarak sınır değerle kıyaslanmıştır.

Deney Düzenekinin Hazırlanması ve Ölçüm Noktaları;

Önceki kısımlarda tanıtılan materyal ve malzemeler ile hazırlanan deney düzenek Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Yalnızca ısı borusundan oluşan deney düzenekinde dörtlü LED yongası ısı borusunun evaporatör bölgesi içerisinde geçen alüminyum soğutucu blok üzerine yerleştirilmiştir. LED tabanı ile alüminyum soğutucu blok taban ara yüzeyinde yüksek termal iletkenliğe sahip termal macun kullanılmıştır. Anemometre ile belirli aralıklarla rüzgar hızı ölçülerek tüm deneyler standart çevre şartlarında gerçekleştirilmiştir. LED’leri çalıştırmak için kullanılan güç kaynağı daha önce belirlenen her bir güç girişi için ayarlanarak LED’lere sabit güç girişi sağlanmıştır. Ayrıca ısı borusu kondenser kısmından kanatçıklara ve dış ortama ısı akışında problem yaşanmaması için soğutucu düzenek bir aparat vasıtasıyla asılı pozisyonda iken ölçümler alınmıştır.



Şekil 3.6. Isı borulu soğutucu ünite deney düzeneği.

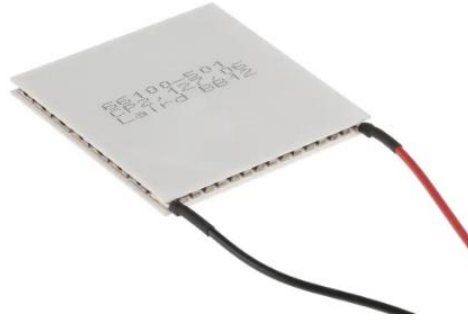
LED jonksiyon sıcaklığının hesaplanması ve soğutucu üniteadaki ısı akışının belirlenmesi için deney düzeneğinde belirlenen noktaların sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Isı borulu soğutucu ünite LED lehim noktası, ısı borusu evaporatör bölgesi, ısı borusu kondenser bölgesi ve kanatçık uç noktası olmak üzere dört noktanın sıcaklıkları ölçülmüştür (Şekil 3.7). Ayrıca ölçümlerin doğrulanması ve kalibrasyon için lazer termometre ile deney düzeneğindeki farklı noktaların anlık sıcaklık değerleri ölçülerek kontrol edilmiştir.



Şekil 3.7. Isı borulu soğutucu ünite sıcaklık ölçüm noktaları.

3.1.2 Termoelektrik soğutucu ünite

Tasarımda kullanılan termoelektrik modül, soğutucu plaka ve kanatçık yüzeyine birebir oturacak ölçülerde standartlara uygun 62 mm x 62 mm x 4,57 mm boyutlarında belirlenmiştir. LED'lerden yayılan ısı yükünü karşılayabilecek güçte peltier seçimi LED'lerin sorunsuz çalışması ve sağlıklı bir soğutma sistemi için çok önemlidir. Bu yüzden termoelektrik modülün seçiminde boyutun yanında göz önünde bulundurulan bir diğer özellik soğutma kapasitesidir. Çalışmada kullanılan termoelektrik modül Şekil 3.8'de görülmektedir.



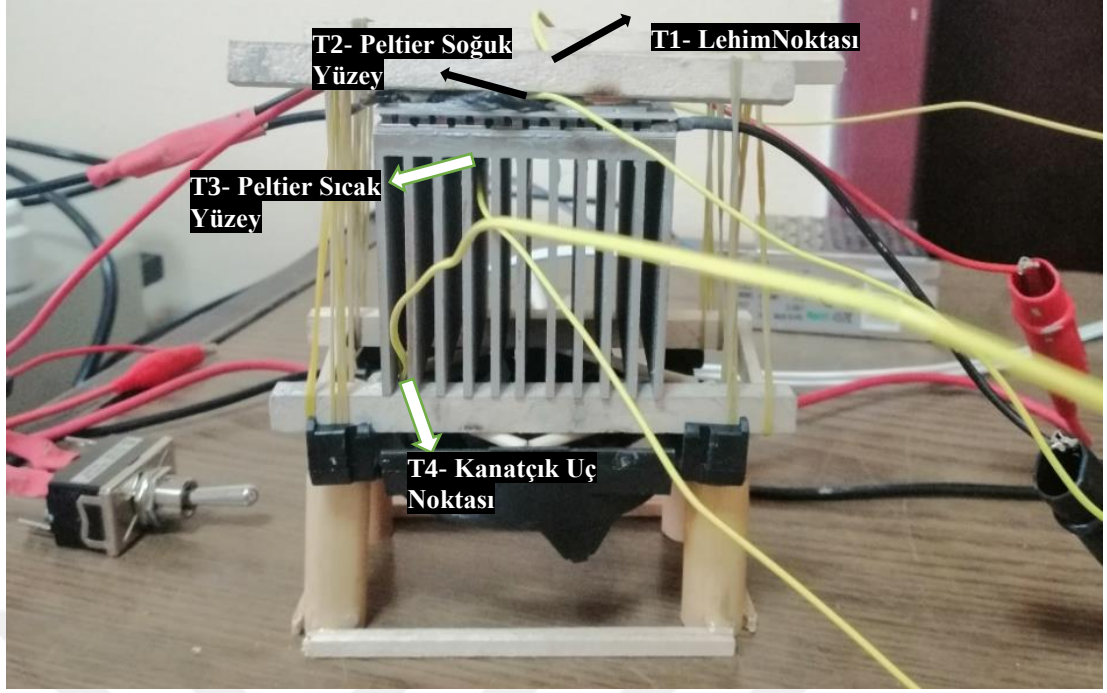
Şekil 3.8. Termoelektrik modül.

Daha önce bahsedilen çalışma şartlarına uygun olarak belirlenen termoelektrik modülün genel özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Termoelektrik modül özellikleri.

Maksimum Sıcaklık Farkı – ΔT (°C)	67
Maksimum Gerilim (V)	16,4
Maksimum Akım (A)	14,3
Maksimum Soğutma Kapasitesi (W)	134,4
Aktif Alan Uzunluğu (mm)	62
Aktif Alan Genişliği (mm)	62
Aktif Alan Kalınlığı (mm)	4,6

Jonksiyon sıcaklığının hesaplanması ve soğutucu üniteye ısı akışının belirlenmesi amacıyla termoelektrik modül ve kanatçıktan oluşan deney düzeneğinde belirlenen noktaların sıcaklıkları ölçülmüştür. Isı borulu soğutucu üniteye LED lehim noktası, ısı borusu evaporatör bölgesi, ısı borusu kondenser bölgesi ve kanatçık uç noktası olmak üzere dört noktanın sıcaklıkları ölçülmüştür (Şekil 3.9). Ayrıca ölçümlerin doğrulanması ve kalibrasyon için lazer termometre ile deney düzeneğindeki farklı noktaların anlık sıcaklık değerleri ölçülerek kontrol edilmiştir.



Şekil 3.9. Termoelektrik soğutucu ünite sıcaklık ölçüm noktaları.

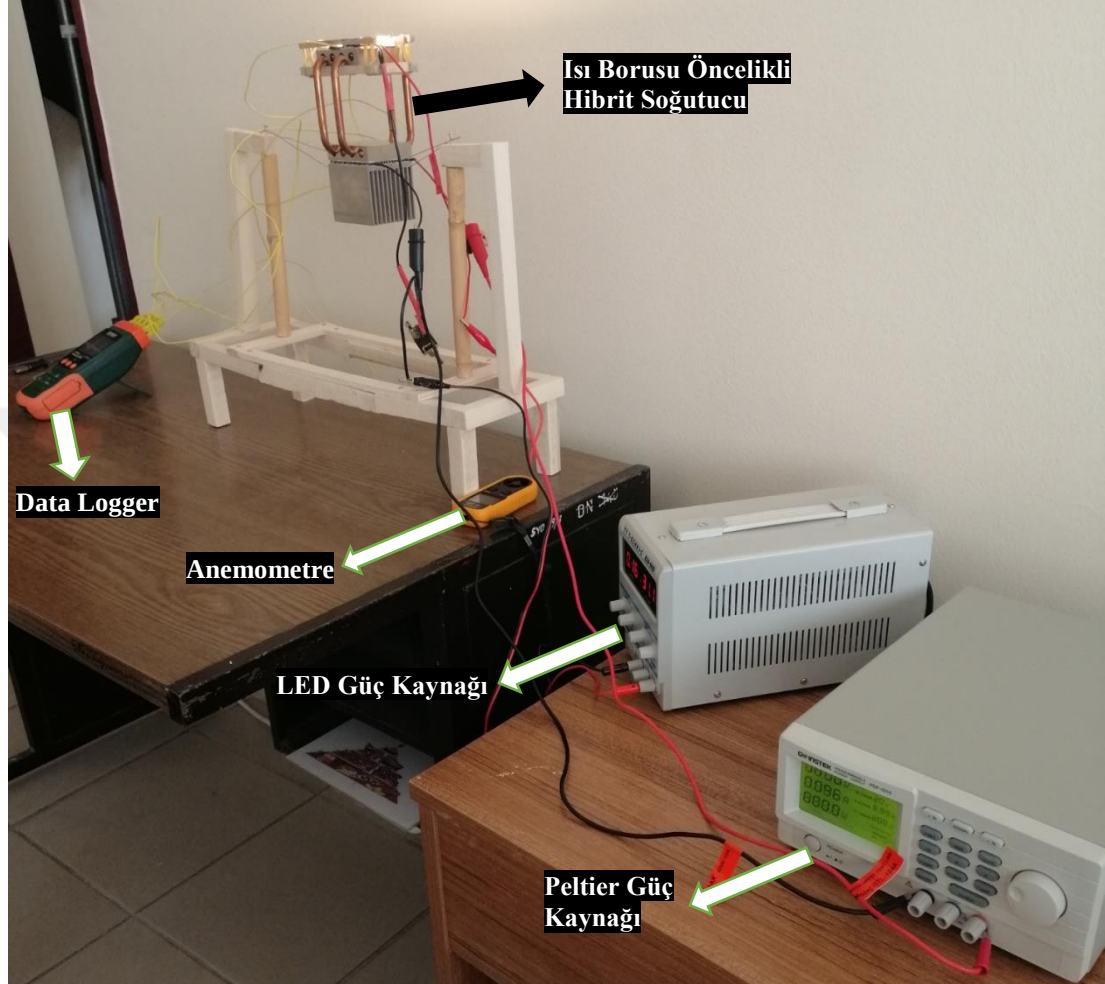
3.1.3 Hibrit soğutma ünitesi

Hibrit soğutma ünitesi ile yapılan deneylerde elde edilen bulgular, sadece ısı borulu ve sadece termoelektrik modüllü soğutma üniteleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca hibrit soğutma ünitesini oluşturan ısı borusu ve termoelektrik modülün LED yongasının altındaki dizilim sıralaması değiştirilmiştir. Böylelikle ısı borusu öncelikli ve termoelektrik modül öncelikli olmak üzere iki farklı soğutucu modül elde edilerek performans kıyaslaması yapılmıştır. Buradaki amaç LED’lerden açığa çıkan ısıya maruz kalan ilk soğutucu eleman değişiminin jonksiyon sıcaklığına etkisini belirlemektir.

3.1.3.1 Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite

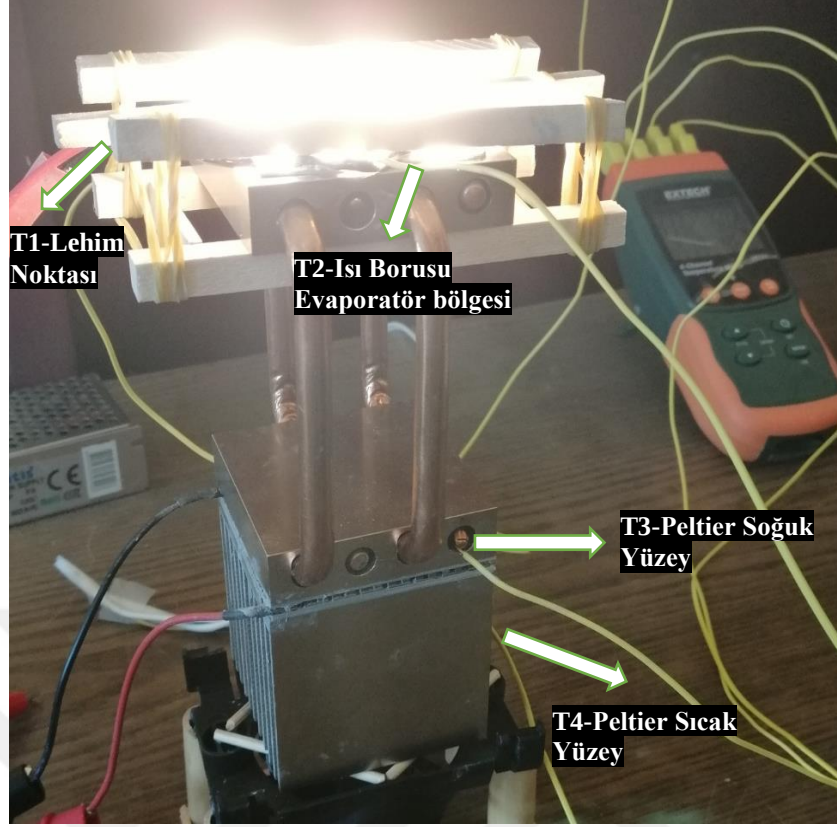
Deney düzeneğinde ilk olarak Şekil 3.10 da görüldüğü gibi LED yongası ısı borusunun evaporatör kısmını kaplayan soğutucu plaka üzerine yerleştirilmiştir. Isı borusunun kondenser kısmını kaplayan plakanın alt kısmına ise termoelektrik modülün soğuk yüzeyi yerleştirilmiştir. Termoelektrik modülün sıcak yüzeyine ise ısıyı dağıtabilmek için uygun boyutlarda kanatçık yerleştirilmiştir. Tüm ara yüzeylerde yüksek ısı iletkenliğine sahip termal macun kullanılmıştır. Termoelektrik modülün sıcak yüzeyindeki ısının dış ortama atılması peltier verimi ve sorunsuz

alışması için son derece önemlidir. Bu nedenle termoelektrik modülün sıcak yüzeyine yerleştirilen kanatçık alt kısmına uygun kapasitede soğutucu fan kullanılmıştır.



şekil 3.10. Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite deney düzeneğı.

Isı borusu öncelikli hibrit soğutma nitesinde LED jonksiyon sıcaklığını hesaplamak ve soğutucu ünitedeki sıcaklık akışını belirlemek için belirlenen bölgelerde noktasal ölçümler yapılmıştır. LED lehim noktası, ısı borusu evaporatör bölgesi, termoelektrik modül soğuk yüzey ve termoelektrik modül sıcak yüzey olmak üzere dört noktanın sıcaklıkları ölçülmüştür. Deney düzeneğindeki ölçüm noktaları şekil 3.11’de gösterilmiştir.



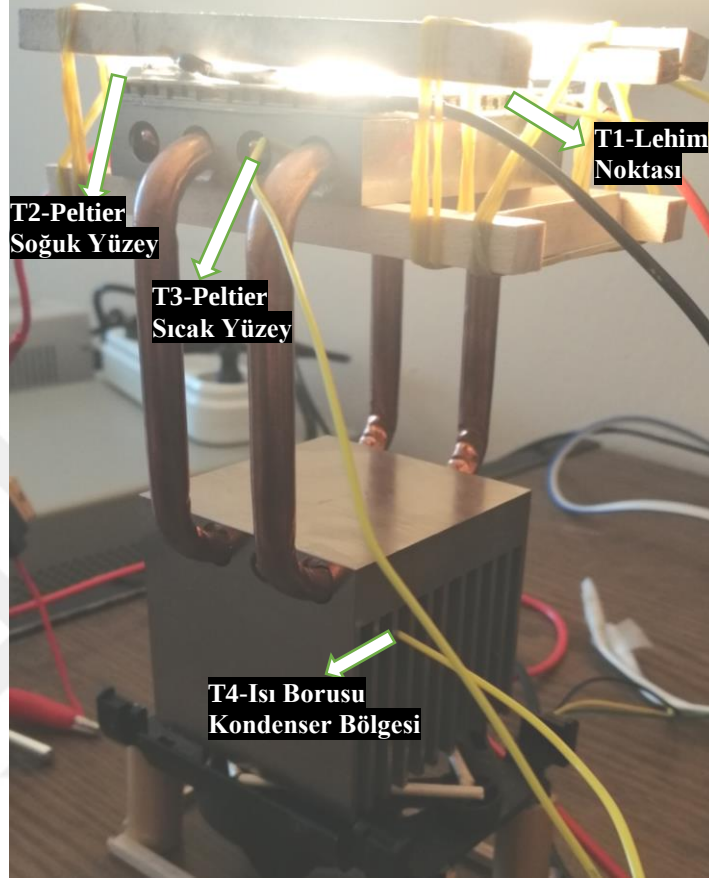
Şekil 3.11. Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite sıcaklık ölçüm noktaları.

3.1.3.2 Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite

Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite LED yongası termoelektrik modülün soğuk yüzeyine yerleştirilmiştir. Termoelektrik modülün sıcak yüzeyi ise ısı borusu evaporatör bölgesini kaplayan alüminyum blok üzerine yerleştirilmiştir. Isı borusunun kondenser bölgesi ile birleşik olan kanatçık da soğutucu fan üzerine yerleştirilmiştir. Deney düzeneğini oluşturan tüm kısımların birleşme noktalarında yüksek ısı iletkenliğe sahip termal macun kullanılmıştır. Termoelektrik modülün sorunsuz çalışabilmesi için sıcak yüzeyindeki ısınn düşürülmesi son derece önemlidir. Bu amaçla soğutucu ünitenin son eleman olan kanatçığın alt kısmında fan kullanılmıştır.

Peltier öncelikli hibrit soğutma ünitesinde belirlenen dört farklı noktadan LED'ler çalıştırıldığı sürece sıcaklık ölçümleri alınmıştır (Şekil 3.12). Dört noktadaki sıcaklık ölçümleri ile sistemin kararlı hale gelme süresi belirlenmiştir. Sistem kararlı hale geldiğindeki noktasal sıcaklık değerlerinden yararlanılarak jonksiyon sıcaklığı hesaplanmıştır. Ayrıca ölçülen sıcaklık değerleri soğutucu ünite üzerindeki ısı akışını

gözlemlemeyi sağlamıştır. Sıcaklık ölçümü yapılan kısımlar LED lehim noktası, peltier soğuk yüzey, peltier sıcak yüzey (ısı borusu evaporatör bölgesi) ve ısı borusu kondenser bölgesi'nden oluşmaktadır.



Şekil 3.12. Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite sıcaklık ölçüm noktaları.

3.1.4 Çoklu çipli ışık yayan diyet (COB LED) özellikleri

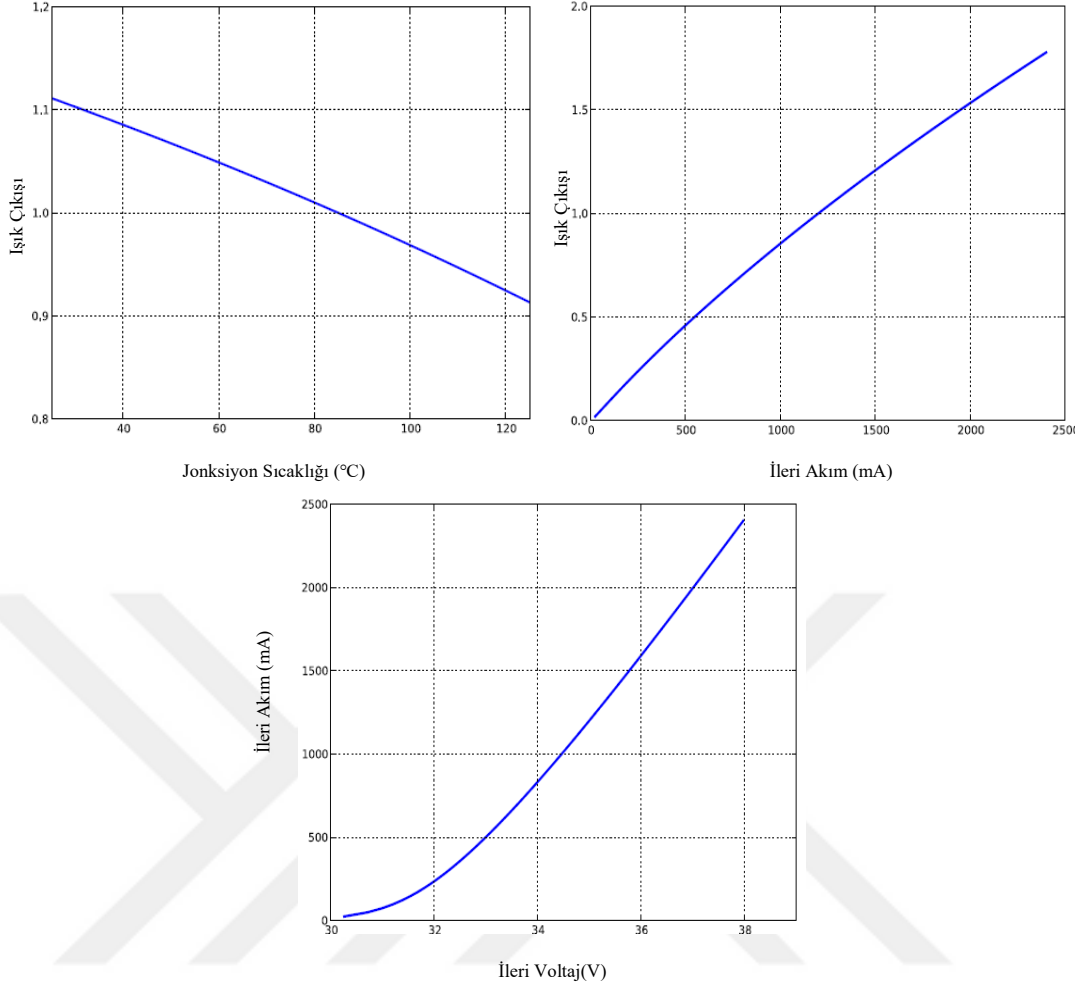
Birden fazla bütünleşmiş yarı iletken diyetin seramik malzemeden oluşan baskı devre kartı (PCB) üzerinde birleştirilerek, fosforlu silikon bloklarla kaplandığı paketleme teknolojisi sonucu elde edilen ışık üreteçleri COB LED olarak adlandırılır. COB LED minimum alandan maksimum güçte homojen ışık yayılmasını sağlayan teknolojiye sahiptir. Bu özelliği nedeniyle yoğun ışık akısına ihtiyaç duyulan aydınlatma sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir.

Deneyisel çalışmada dört adet Lumileds marka Luxeon COB Core serisi ışık yayan diyet kullanılmıştır. COB LED'ler 2700 K renk sıcaklığına sahip olup LED'lere ait bazı özellikler Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Lumileds L2C5-27901211E1900 model LED yapısal özellikleri.

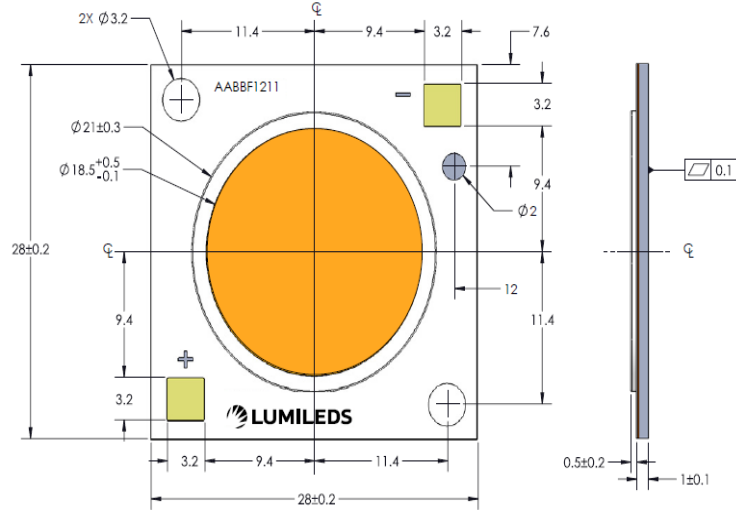
CCT – Renk Sıcaklığı (K)	2700
Min. CRI – Renk Geriverim İndeksi	80
Min. Işık Akısı (lm)	5182
Lümen Verimliliği (lm/W)	138
LES – Fosfor Alanı (mm)	19
Minimum İleri Voltaj (V_f)	32,5
Maksimum İleri Voltaj (V_f)	37,5
Maksimum İleri Akım (A_f)	2,4
Minimum İleri Akım (A_f)	0,06
Termal Direnç ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0,23
Maksimum Kılıf Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	105
Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	125
Işık Akısı Aralığı (lm)	5183-5758
Enerji Verimlilik Sınıfı	E

Üretici firmaya ait katalogda verilen LED karakteristik özellikleri Şekil 3.13’de görülmektedir. Jonksiyon (birleşme) sıcaklığının yükselmesi LED ışık çıkışını olumsuz yönde etkilemekte ve önemli miktarda azaltmaktadır. Özellikle jonksiyon sıcaklığının, LED’in sağlıklı çalışması için sınır sıcaklık değeri olan 125 $^{\circ}\text{C}$ ’ye yaklaştığında ışık akısında büyük düşüş görülmektedir. LED’e verilen ileri akım arttıkça ışık çıkışı da doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan COB LED’in beslendiği ileri voltaja bağlı olarak çektiği ileri akımdaki değişim Şekil 3.13’de görülmektedir. Grafiklere göre maksimum LED ileri akım değeri 2400 mA, maksimum ileri voltaj değeri 38 V olduğu görülmektedir. Ancak LED’in çalışabileceği maksimum akım ve voltaj değerlerini belirleyen en önemli unsur sınır jonksiyon sıcaklığıdır (125 $^{\circ}\text{C}$). Bu durum yüksek güçlü LED kullanımında soğutucu sistem kullanmanın önemini vurgulamaktadır.



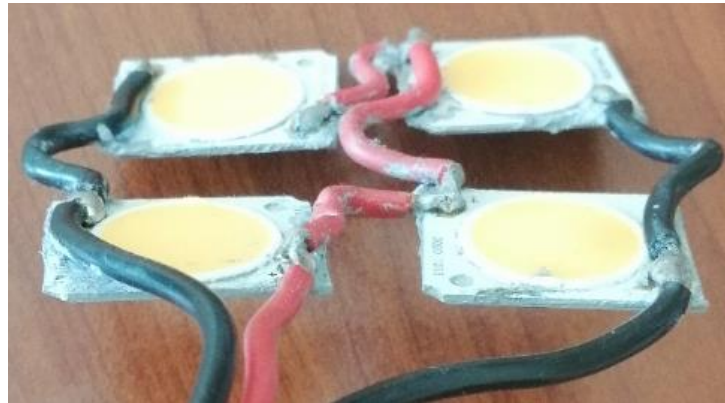
Şekil 3.13. Lumileds L2C5-27901211E1900 model LED karakteristik özellikleri.

COB LED seçimi, deneysel çalışma için prototipi hazırlanan soğutucu ünitenin yapısal boyutları ile uyumlu olması açısından son derece önemlidir. LED'lerin üzerine yerleştirildiği soğutucu plakanın boyutları ve peltier ölçüleri dikkate alınarak belirlenen ve sistemde kullanılan COB LED'e ait mekanik boyutlar Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Nümerik analiz için tasarlanan soğutucu ünite ısı kaynağı olarak kullanılan LED'in boyutları, deneysel çalışma için seçilen COB LED'in mekanik boyutları dikkate alınarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.14. LUXEON L2C5-27901211E1900 LED için mekanik boyutlar (URL-3).

LED'lere elektrik girişi anot ve katot uçlarına bağlantı kabloları lehimlenerek sağlanmıştır. LED'ler ve güç kaynağı arasında iletimi sağlayan kabloların lehimlenme işleminde LED'lerin arızalanmasını önlemek amacıyla lehim noktası sıcaklığı kontrol edilerek minimum seviyede tutulmuştur. Ayrıca lehimlenen bağlantı elemanlarının LED'ler tarafından çekilecek akım değerlerine uygun özelliklerde olmasına dikkat edilmiştir. LED'ler elektriksel olarak birbirine paralel olarak bağlanmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. LED'lerin elektriksel bağlantısı.

3.1.5 Deneyisel çalışmada kullanılan ekipmanlar ve özellikleri

Deney düzeneğinde LED'ler için elektrik beslemesini sağlayacak güç kaynağı seçiminde, LED'lerin çalışma aralığı (Akım - Voltaj) dikkate alınarak TT Technic

marka Rxn 605D model sürücü kullanılmıştır. LED'ler için kullanılan güç kaynağına ait görsel Şekil 3.16'da sunulmuştur.



Şekil 3.16. LED'ler için kullanılan güç kaynağı.

Sabit akımlı çıkış verme özelliği bulunan ayarlanabilir dijital güç kaynağına ait teknik özellikler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. LED'ler için kullanılan güç kaynağı teknik özellikleri.

Besleme Gerilimi	220V $\pm$ 10% AC
Gerilim Çıkışı	0-60 V
Akım Çıkışı	0-5 A
Çalışma Sıcaklığı	-10 °C ~ +40 °C
Depolama Sıcaklığı	-10 °C ~ +40 °C
Bağıl Nem	< %80
Yük Kararlılık	$\leq$ 0,01% +2 mV
Sıcaklık Katsayısı	$\leq$ 200ppm / °C
Ağırlık	2.22 kg
Boyut	200 $\times$ 127 $\times$ 155

Deneyisel çalışmada kullanılan termoelektrik modülün çalıştırılması için ayrıca bir güç kaynağına daha ihtiyaç duyulmuştur. Güç kaynağı, peltierin çalışma sınır şartları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Termoelektrik modüle elektrik sağlamak amacıyla Gw Instek markasına ait PSP-2010 model güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağı Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3.17. Termoelektrik modül için kullanılan güç kaynağı.

Sabit DC voltaj ve akım çıkışı sağlayan dijital programlanabilir güç kaynağı aynı zamanda voltaj, akım veya güç çıkışının ayrı ayrı sınırlayarak kontrol edilmesini sağlamaktadır. Peltier enerji beslemesi için kullanılan güç kaynağına ait teknik özellikler Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Termoelektrik modül için kullanılan güç kaynağı teknik özellikleri.

Besleme Gerilimi	AC 115V / 230V
Gerilim Çıkışı	0~20V
Akım Çıkışı	0~10A
Çalışma Sıcaklığı	0 °C ~ +40 °C
Depolama Sıcaklığı	-10 °C ~ +70 °C
Bağıl Nem	< %80
Yük Kararlılık	≤ 0,05% +3 mV
Sıcaklık Katsayısı	≤ 150ppm / °C
Ağırlık	4 kg
Boyut	225 x 100 x 305mm

Deneyisel çalışmada LED’ler ve soğutucu ünitenin belirlenen kritik noktalarının sıcaklıklarını belirlemek amacıyla Extech markasına ait SDL200 model sıcaklık ölçer (datalogger) kullanılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan sıcaklık ölçüm cihazı Şekil 3.18’de görülmektedir.



Şekil 3.18. Sıcaklık ölçüm cihazı (Datalogger).

Sıcaklık ölçümleri için kullanılan datalogger aynı anda 4 adet termokupl bağlanabilme özelliğine sahiptir. Çalışmada her deney için dört noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Datalogger alınan anlık sıcaklık değerlerini SD karta Excel formatında kaydetmektedir. Ayrıca cihaz 1 ila 3600 saniye arasında örnekleme oranı programlama seçeneği sunmaktadır. Sıcaklık ölçüm cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Sıcaklık ölçüm cihazı teknik özellikleri (URL-4).

Güç	6 x AA pil
K Tip Termokupl	-100 ~ 1300°C
Temel Hassasiyet	±0.4% rdg + 1°C
Kanal Sayısı	4
Hafıza	2 GB
Bağıl Nem	< %85
Çalışma Şartları	0 ~ 50°C
Ağırlık	500 gr
Boyut	182 x 73 x 47,5mm

Sıcaklık ölçüm noktaları ile datalogger arasında veri aktarımı için Termokupl (ısıl çift) kullanılmıştır. Termokupl’lar yüksek sıcaklık ölçüm hassasiyetine sahiptirler. Sıcaklık ölçümlerinde birbirine bağlı iki farklı telden oluşan K tipi termokupl (ısıl çift) kullanılmıştır. Metal tellerin uç kısmındaki sıcaklık ısıl çiftte bir gerilim oluşmasına neden olmaktadır. Metal tellerin uç kısmındaki sıcaklığın değişimi, oluşan gerilim miktarının da değişimine neden olur. Ortaya çıkan gerilim değerinin

ölçülmesi, termokuplların bulundukları veya temas ettikleri ortamın sıcaklığını ölçmeyi sağlar.

Deneysel çalışmada ortam koşullarının standart olması elde edilen verilerin doğruluğu ve geçerliliği için son derece önemlidir. Bu sebeple ölçümler boyunca ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı sürekli kontrol altında tutulmuştur. Rüzgâr hızı ile ortam sıcaklığının kontrolü ve çalışmanın bir kısmında hava debisi ölçümleri için Şekil 3.19’da görülen Benetech markasına ait GM 816 model anemometre kullanılmıştır.



Şekil 3.19. Deneysel çalışmada kullanılan anemometre.

Termoelektrik modüllerden iyi bir soğutma performansı alabilmek ve cihazın sorunsuz çalışabilmesi için peltierin ısısı artan sıcak yüzeyinin soğutulması çok önemlidir. Peltierin ısınan sıcak yüzeyinin etkin bir şekilde soğutulması hem peltierin arızalanmasını önler hem de iki yüzey arasındaki sıcaklık farkını (ΔT) sınır değerinin altında tutarak verimli bir soğutma yapmayı sağlamaktadır. Bu çalışmada peltier sıcak yüzeyini soğutmak için Intel marka 68 x 76 x 35 mm boyutlarında 12 Volt besleme gerilimi ile çalışan fan kullanılmıştır (Şekil 3.20).



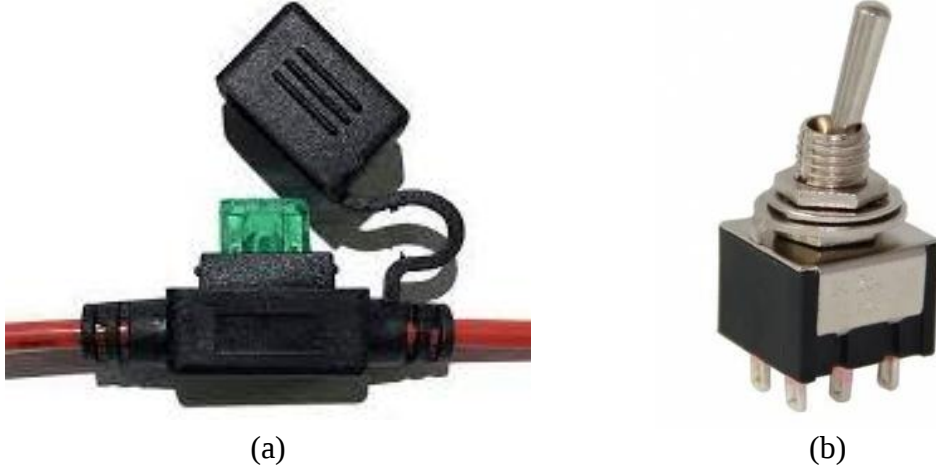
Şekil 3.20. Soğutucu fan.

Deney düzeneğinde LED'ler, soğutucu plakalar, kanatçık ve peltier yüzeylerinin birbirlerine temasını sağlamak amacıyla termal macun kullanılmıştır. Termal macun yüzeylerin birbirine temas etmesini sağlayarak yüzeylerden ısı transferinin sorunsuz gerçekleşmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda yüzeylerdeki mikro pürüzlerin ve kılcal hava boşluklarının kapatılmasını sağlar. Böylelikle deney düzeneğinde kullanılan malzemeler arasında minimum kayıpla ısı transfer kayıplarının önüne geçmektedir. Çalışmada Mastergel Maker marka 11 W/m.K ısı iletim katsayısına sahip nano partiküllü termal macun kullanılmıştır. Tüm ara yüzeylerde termal macun ısı direnç oluşmasına neden olmayacak şekilde, yaklaşık 1 mm kalınlıkta ince bir tabaka halinde kullanılmıştır. Kullanılan termal macuna ait görsel Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Termal arayüz malzemesi.

Aşırı akım ve kısa devre akımlarında elektronik cihazların zarar görmesini önlemek amacıyla elektrik devrelerinde akım kesici sigortalar kullanılmaktadır. Bıçaklı sigortalar, yüksek akım değeri ve güç çekerek çalışan devrelerde yaygın olarak kullanılır. Deneysel çalışmada LED'lerin aşırı akım ve kısa devre durumunda arızalanmasını önleme için üç amperlik bıçaklı sigorta kullanılmıştır (Şekil 3.22 (a)). Ayrıca LED'lere elektrik girişini kontrol etmek ve gereken durumlarda hızlı müdahale ederek enerjiyi kesmek için emniyet amaçlı on - off geçiş anahtarı kullanılmıştır (Şekil 3.22 (b)).



Şekil 3.22. (a) Bıçak sigorta ve (b) On/Off geçiş anahtarı.

3.2 Nümerik Analiz

Bu çalışmada nümerik analizin temel amacı, prototipi üretilen ısı borusu ve termoelektrik soğutucudan oluşan ünitelerdeki deneysel çalışma neticesinde elde edilen bulguları doğrulamaktır. Her iki soğutucu sistemin soğutma performansının belirlenmesinin yanında, iki soğutucu sistemin birleşiminden oluşan hibrit soğutma ünitesinin geliştirilmesi ve kullanılabilirliğinin incelenmesi hedeflenmiştir. Hibrit soğutma sisteminde soğutucu ünitelerin LED'lere göre pozisyonu ve dizilim sıralamasının soğutma performansına etkisi gözlenmiştir. Böylelikle yüksek güçte LED'lerin birçok alanda kullanımını kısıtlayan ısınma probleminin çözümüne katkı sağlamaya çalışılmıştır.

Tasarımda kullanılan LED'ler (ısı kaynağı), alüminyum tabanlar, kanatçık, ısı borusu ve termoelektrik modül modelleri Ansys Workbench'te oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda soğutucu modüllerin tasarımdaki konumları değiştirilerek farklı konfigürasyonlarda en düşük LED jonksiyon sıcaklıkları belirlenmiştir. Aynı zamanda tekil LED soğutma sistemleri ile hibrit soğutma sistemi kıyaslanmıştır. Yapılan CFD analizleri için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- İş akışkanı sıkıştırılmaz kabul edilmiştir,
- Akış üç boyutlu, sürekli rejim olarak kabul edilmiştir,
- Isı borusundaki akış türbülanslı kabul edilmiştir,

- Analizler boyunca hız sıfır kabul edilmiştir,
- Dış ortam sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır,
- İletim, taşınım ve ışıınım ile ısı transferlerinin her biri çözdürülmüştür,
- Çalışmada ısı kaynağı olan LED'ler için uygun boyutta hacim tanımlanmıştır,
- İş akışkanı için viskoz dağılımlar ihmal edilmiştir.

3.2.1 Matematiksel model

Yukarıda belirtilen kabuller göz önünde bulundurularak geliştirilen model üç temel korunum denkleminde oluşmaktadır. Akış çözüm modellerinde kullanılan yönetim denklemleri Navier-Stokes denklemlerine bağlı süreklilik, momentum ve enerji denklemleridir.

3.2.1.1 Süreklilik denklemi (Kütlenin korunumu)

Süreklilik denkleminin diferansiyel formu vektörel olarak denklem 3.1'de verilmiştir.

$$\vec{V} \cdot \rho \vec{V} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

Burada $\vec{V}$ akışkan hızı, $\vec{\nabla}$ gradyan operatörüdür. Üç boyutlu süreklilik denklemi ise denklem 3.2'deki formda yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.2)$$

Çalışma boyunca yapılan sıkıştırılamaz akış ve sürekli rejim kabulleri nedeniyle $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ olacağından nümerik analizlerin tamamında süreklilik denklemi aşağıdaki gibi yazılacaktır.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.3)$$

3.2.1.2 Momentum denklemi (Navier-Stokes eşitliği)

Çalışma boyunca yapılan nümerik analizlerde sıkıştırılamaz akış kabulleri doğrultusunda üç boyutlu doğrusal momentumun korunması denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

x-yönü;

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

y-yönü;

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

z-yönü;

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

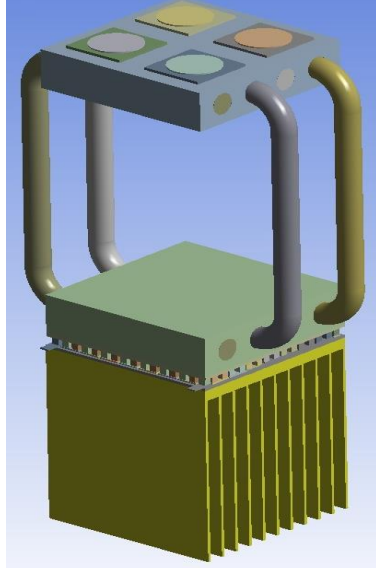
3.2.1.3 Enerji denklemi

Kartezyen koordinatlarda türbülanslı ve sıkıştırılamaz akışlarda kullanılan enerji denklemi aşağıda verilmiştir.

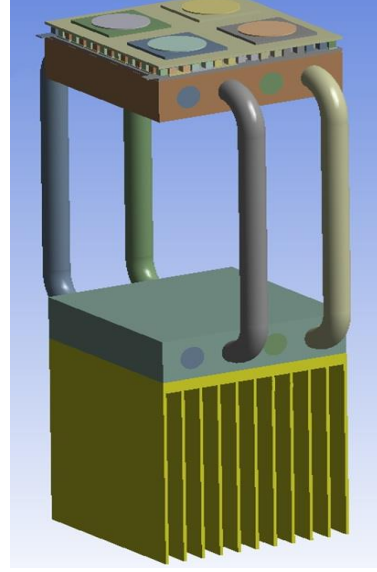
$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{\alpha} + \mu \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.7)$$

3.2.2 Geometrik modeller

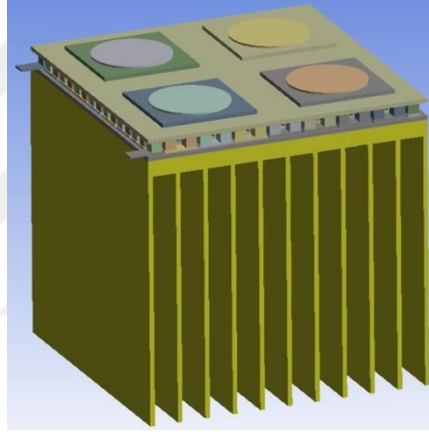
Gerçek bir tasarımın geometrisindeki karmaşıklık HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çözümlerinde zorluklara neden olmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak ve çözümü kolaylaştırmak adına çalışmadaki geometrik modeller üzerinde optimum ağ yapısını sağlayacak şekilde basitleştirmeler yapılmıştır. Böylece problemin çözülme süreci büyük ölçüde azaltılmıştır. Çalışmada kullanılan geometriler SolidWorks yazılımı aracılığıyla çizildikten sonra mesh yapısını oluşturmak ve problemi çözdürmek için ANSYS Workbench yazılımına aktarılmıştır. Analizlerde kullanılan geometrik modeller Şekil 3.23 de görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.23. (a)Isı borusu öncelikli (b)Termoelektrik modül öncelikli (c)Termoelektrik modüllü soğutucu tasarımları.

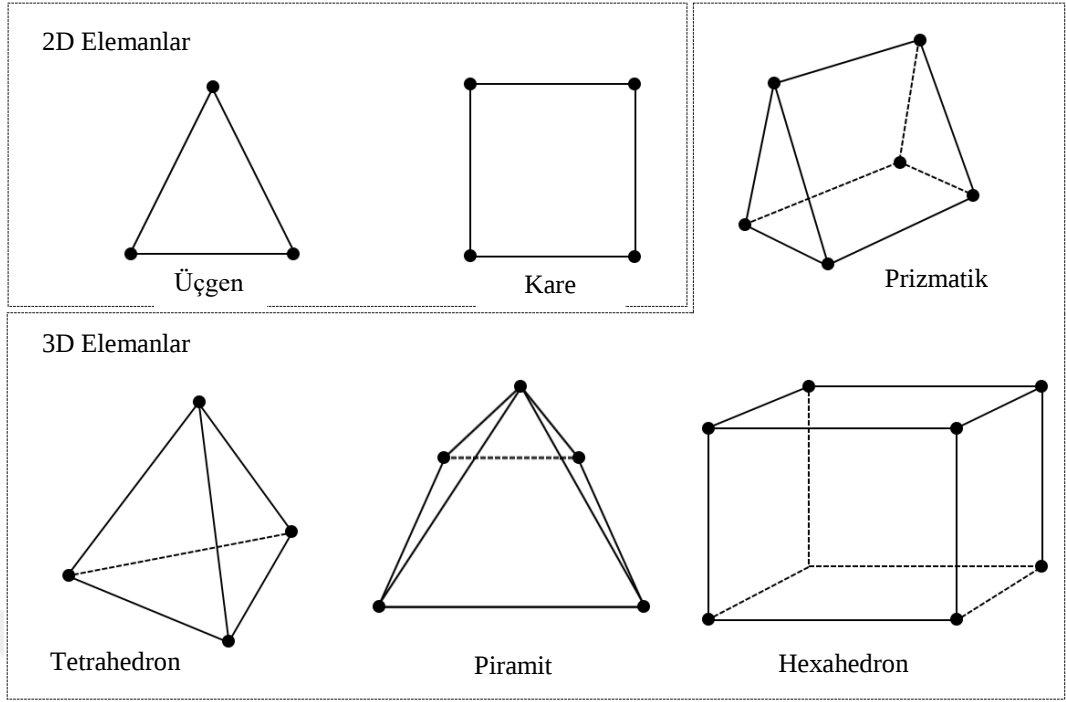
LED çipinden başlayarak tasarımda LED'lere en uzak bölge olan kanatçığa kadar tüm materyallerin üretildiği malzeme ve boyutları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Tasarımdaki Materyallerin Yapısal ve Fiziksel Özellikleri.

Materyal	Malzeme	Boyut (mm)
LED Çipi	GaN	Genişlik 0,5 / Ø 18,5
Metalizasyon	Au-Si	Genişlik 0,01 / Ø 18,5
Kalıp	Silikon	Genişlik 0,375 / Ø 18,5
Kalıp Bağlantısı	Au-20Sn	Genişlik 0,05 / Ø 18,5
Baskı Devre Kartı (PCB)	Al ₂ O ₃ DBC	0,3 x 0,38 x 0,3 / Ø 28
	AlN DBC	0,3 x 0,64 x 0,3 / Ø 28
	Si ₃ N ₄ AMB	0,3 x 0,38 x 0,3 / Ø 28
Termal Arayüz Malzemesi (TIM)	Silikon, ZnO, Cu, Ag, Al	1
Soğutucu Plaka	Alüminyum	62 x 62x 15
Isı Borusu (Evaporatör Bölgesi)	Bakır (Cu)	62 – Ø8
Isı Borusu (Adyabatik Bölge)	Bakır (Cu)	90 – Ø8
Isı Borusu (Kondenser Bölgesi)	Bakır (Cu)	62 – Ø8
Termoelektrik Modül (Peltier)	Seramik, Cu, Bi ₂ Te ₃	62 x 62 x 4,6
Kanatçık	Alüminyum	62 x 62 x 62

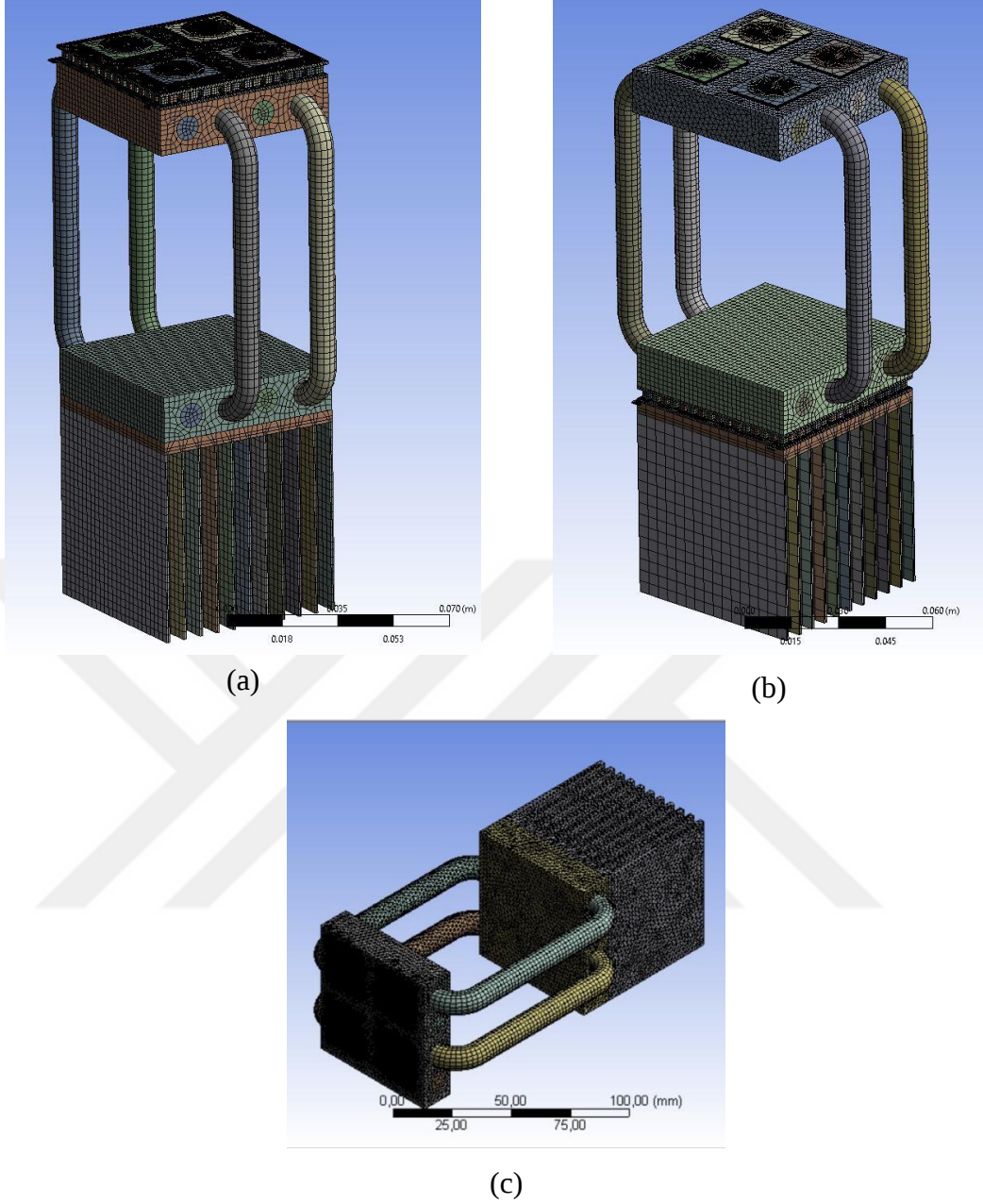
3.2.2.1 Mesh (Çözüm ağı) geometrisi

Bir sistemin HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemiyle çözdürülebilmesi için öncelikle sistemin Geometrik yapısı CAD (Bilgisayar Destekli Grafik-Tasarım) yazılımlarıyla oluşturulmalıdır. Karmaşık problemlerin çözümünü kolaylaştırmak ve hızlandırmak için CAD yazılımlarıyla tasarlanan modellerde çözüm ağı oluşturmak gerekir. Mikro ölçekli hücreler ve düğüm noktalarından oluşan mesh, görece büyük boyutlu ve karmaşık hacimleri simülasyonun yürütüleceği küçük parçalara ayırmaktadır. Hesaplamalar için kullanılan programlar farklı şekil ve boyutlarda mesh yapısı seçeneği sunar. Yapılan hesaplamalar neticesinde en doğru sonuçların elde edilebilmesi için tasarım geometrisine en uygun mesh yapısı seçilmelidir. HAD çözücü programlarında seçenek olarak sunulan mesh yapıları Şekil 3.24’de verilmiştir.



Şekil 3.24. 2D ve 3D mesh elemanlarına ait geometriler (URL-2).

Mesh yapısı belirlenirken göz önünde bulundurulan unsurlar; ağ yapısını oluşturma süresi ve ağ yapısının modelin çözülme süresine etkisidir. Tez çalışması için tasarlanan modeli oluşturan her bir kısmın geometrisi de dikkate alındığında diğer geometriler ile kıyaslandığında daha avantajlı olan hexahedron ve prizmatik ağ yapıları seçilmiştir. Tez çalışması için tasarlanan modellerin ağ yapıları Şekil 3.25’de gösterilmiştir.

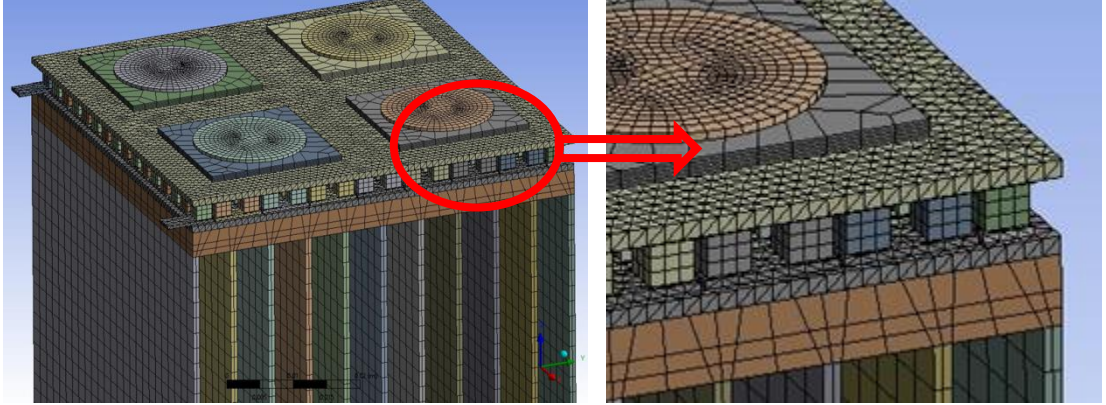


Şekil 3.25. Tasarlanan modellerin mesh (ağ) yapıları; (a) Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite, (b) Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite, (c) Isı borulu soğutucu ünite.

Soğutucu modellerin her birinde mesh (ağ) yapısı oluşturulurken simülasyon süresince modellerdeki sıcaklık dağılımının homojen ve yüksek hassasiyetli olması amaçlanmıştır. Bu nedenle tasarımlarda homojen ağ yapısı oluşturmaya özen gösterilmiştir.

HAD programlarında gerçekleştirilen simülasyonlarda amaç, gerçeğe en yakın simülasyon sonuçlarını elde etmektir. Bu doğrultuda sıcaklığın çok hızlı değişkenlik

gösterdiği LED'lerin ve termoelektrik modülün bulunduğu kısımlarda daha hassas (sık) ağ yapısı kullanılmıştır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Termoelektrik soğutucu mesh (ağ) yapısı.

3.2.2.2 CFD çözümlemede ağdan bağımsızlık

Analiz için geometriden aktarılan görece büyük hacimlerin hesaplanabilir daha küçük hacimlere ayrılması ile oluşan yapı mesh (ağ yapısı) olarak tanımlanmaktadır. Mesh yapısında en önemli husus parçacıkların boyutlarının belirlenmesidir. Mesh elemanlarının boyutlarının küçülmesi daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine imkân tanımaktadır. Ancak çok küçük boyutlu eleman kullanımı bilgisayar kapasitesini aşırı zorlamaktadır. Bu da yakınsama süresinin uzatarak zaman kaybına yol açmaktadır. Bahse konu faktörler nedeniyle en uygun mesh yapısı ve boyutu kullanmak son derece önemlidir.

Tasarlanan soğutucu ünitelerin akış analizleri için mesh, ANSYS Fluent-Meshing programında oluşturulmuştur. Literatüre göre HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çözümlemelerinde üç farklı türde ağ yapısı kullanılmaktadır. Bunlar yapılandırılmış (structured), yapılandırılmamış (unstructured) ve hibrit ağ yapılarıdır. Tasarımdaki tüm akış alanının haritalama fonksiyonu kullanılarak hesaplama alanına dönüştürülebilmesi durumunda yapılandırılmış ağ yapısı kullanılabilir. Fakat grift ve karmaşık yapısal bölümlere sahip geometrik tasarımlarda yapılandırılmamış ağ yapısı tercih edilmektedir (Chung, 2010). Tez çalışması için tasarlanan soğutucu ünitelerin kompleks geometrik yapıda olması nedeniyle yapılandırılmamış (unstructured) ağ elemanları kullanılmıştır.

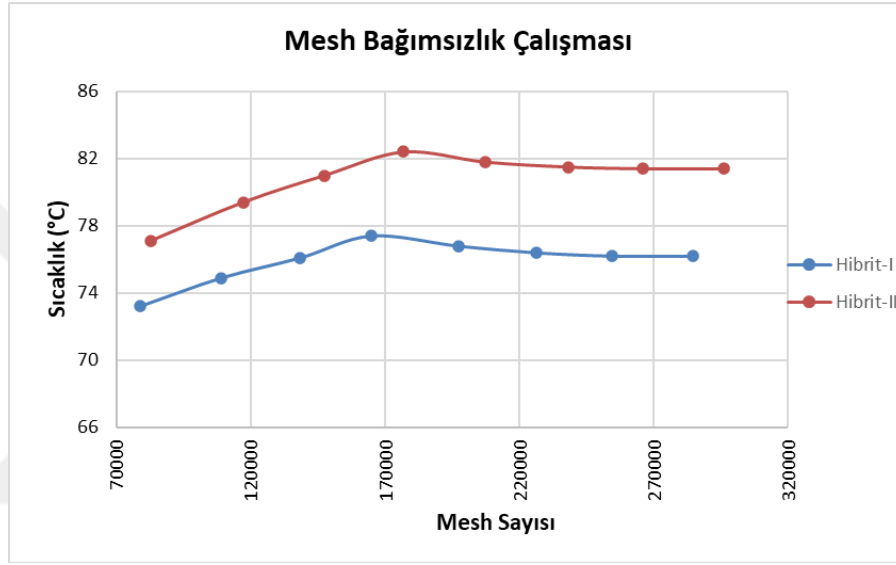
Ansyes Fluent yazılımında mesh kalitesini belirleyen başlıca faktörler çarpıklık (skewness), eleman kalitesi (element quality), ortogonal kalite (orthogonal quality) ve en / boy oranı (aspect ratio) değerleridir. Hücrenin şekli ile eşdeğer bir hacme sahip eşkenar hücrenin şekli arasındaki fark olarak tanımlanan çarpıklık değeri (skewness) 0 ile 1 arasında bir değer ile tanımlanır. Ansys Fluent programı maksimum skewness değerinin 0.9'un altında olmasını önermektedir (ANSYS, 2013). Skewness değerinin sıfıra yaklaşması ağ yapısının kalitesini artırmaktadır. Örgü dik kalite değeri (orthogonal quality) ağ kalitesi hakkında önemli ipuçları veren faktörlerdendir. Ortogonal kalite 0 ile 1 arasında değişen bir değerdir. 1'e daha yakın olan dik kalite değerleri daha yüksek kaliteye sahip örgü yapıları elde edildiğini göstermektedir. Mesh yapısındaki elemanların kalitesini tanımlayan element quality değeri de ortogonal kalite değerine benzer şekilde 0 ile 1 arasında değer almaktadır. İyi bir sonuç elde etmek için element quality değerinin 1'e yakın olması gerekmektedir. Bir diğer önemli parametre olan aspect ratio, minimum eleman kenar uzunluğunun maksimum eleman kenar uzunluğuna oranı şeklinde tanımlanır. Aspect ratio'nun 1 değerini alması kusursuz bir mesh yapısı oluşturulduğunu belirtir. Bu değerin 1 - 3 arasında olması iyi mesh, 3 ile 20 arasında bir değer alması ise kabul edilebilir mesh anlamına gelmektedir (Ansys, 2010). Başka bir ifadeyle elde edilen sonuçların doğruluğu ve yakınsama için aspect ratio değerinin 20'yi aşmaması istenmektedir.

Bu çalışmada ısı borusu öncelikli ve termoelektrik modül öncelikli olmak üzere iki farklı hibrit soğutucu ünite tasarımı için elde edilen ağ kalitesi parametre değerleri Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Mesh kalite parametreleri.

Mesh Parametreleri	Isı Borusu Öncelikli Model	TEC Öncelikli Model
Element Numbers	238100	226300
Nodes Numbers	612302	601907
Element Quality	0,91	0,88
Aspect Ratio, min	1.02	1.08
Aspect Ratio,max	12,75	14.21
Skewness, max	0.81	0.78
Orthogonal Quality, ort.	0.86	0.89

Yukarıda belirtilen parametrelerin uygun değer aralıklarında seçilmesi, doğru sonuçlar elde etmek için büyük önem ifade etmektedir. Bunun yanı sıra istenilen bir diğer önemli husus çözüm süresinin minimum olmasıdır. En doğru yakınsama ve iterasyon süresinin kısaltması için mesh (çözüm ağı) sayısı ile çözüm süresi arasında bir optimizasyon çalışması gerekmektedir. Bu amaçla 140 Watt LED giriş gücü için ağ bağımsızlık çalışması (mesh independence) yapılmıştır. Her iki tasarım için farklı eleman boyutları kullanılarak oluşturulan ağ yapısına göre LED lehim noktası sıcaklıkları Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. Mesh bağımsızlık analizi.

Şekildeki Hibrit-I ve Hibrit-II serileri sırasıyla termoelektrik modül öncelikli ve ısı borusu öncelikli hibrit soğutma ünitesi tasarımını ifade etmektedir. Mesh bağımsızlığı için Hibrit-I tasarımında 78700 ile 284800 aralığında mesh kullanılarak sekiz farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Hibrit-II tasarımında ise 82900 ile 296100 aralığında mesh kullanılarak sekiz farklı analiz yapılmıştır. Mesh sayısı Hibrit-I ve Hibrit-II tasarımları için sırasıyla 226300 ve 238100 olduğu durumdan sonra mesh sayısındaki artışın sonuçlarda kayda değer bir değişikliğe sebep olmadığı dolayısıyla bu değerlerden itibaren çalışmanın mesh sayısından bağımsız olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak optimal ağ elemanı sayıları Hibrit-I tasarımı için 226300, Hibrit-II tasarımı için 238100 olarak belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde termoelektrik modüllü, ısı borulu ve hibrit soğutucu üniteler için nümerik ve deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular yorumlanarak değerlendirilmiştir.

4.1 Termoelektrik Modül Verimi

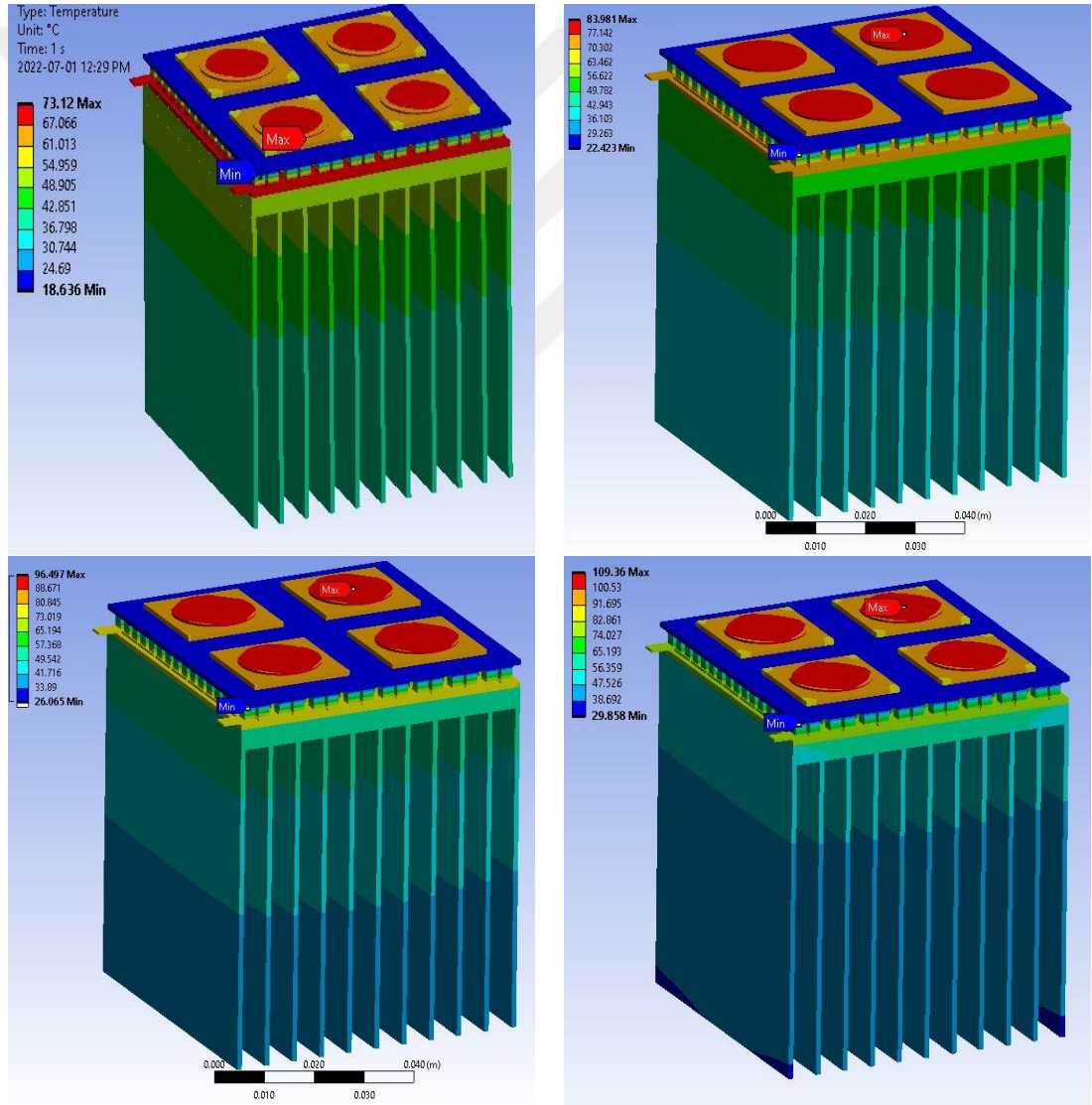
Tez çalışmasında nihai amaç LED jonksiyon sıcaklığını kritik eşik sıcaklık değeri olan 125 °C'nin altında tutmaktır. Çalışmanın termoelektrik modül kullanılan kısımlarında analiz ve deneyleri sınırlayan faktörlerden biri, termoelektrik modülün iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) için sınır değer olan 67 °C'dir. Sınır sıcaklık değerinin aşılması, termoelektrik modülün arızalanmasına neden olmaktadır. Belirtilen faktörler dikkate alınarak çalışmanın bu bölümünde LED yongası 80, 100, 120 ve 140 Watt giriş güçlerinde çalıştırılmıştır. Dış ortam sıcaklığı çalışma süresince 25 °C olarak belirlenmiştir.

LED birleşme noktasına en yakın sıcaklığı ölçülebilir bölge olan T1 lehim noktası sıcaklığı, Jonksiyon sıcaklığını hesaplamak için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle çalışmada öncelikle T1 noktası sıcaklığının minimum değerde tutulması hedeflenmektedir. Ayrıca T2, T3 ve T4 ölçüm noktalarında elde edilen sıcaklık değerleriyle sistemdeki ısı akışı incelenmiştir.

Termoelektrik modül ve kanatçıklı yapıdan oluşan soğutucu modelin 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için ANSYS programında elde edilen simülasyon görselleri Şekil 4.1'de verilmiştir. LED'lerde ışığın üretildiği birleşme noktasının aynı zamanda ısıнын açığa çıktığı nokta olması, maksimum sıcaklık bölgesini belirlemede etkili olmaktadır. Bu bağlamda tüm LED giriş güçlerinde maksimum sıcaklık değeri LED'lerin merkezinde elde edilmiştir. 80 Watt LED giriş gücü için LED merkezindeki maksimum sıcaklık değeri 73.12 °C 'iken 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 83.98, 96.49 ve 109.36 °C olarak tespit edilmiştir. Böylece LED giriş gücü arttıkça model üzerinde elde edilen maksimum sıcaklık değerinin arttığı görülmektedir.

Soğutucu modül üzerinde minimum sıcaklık değeri ise tüm LED giriş güçleri için termoelektrik modül soğuk yüzeyinde görülmektedir. 80 Watt LED giriş gücünde

18.63 °C olan termoelektrik modül soğuk yüzey sıcaklığı 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için sırasıyla 22.42, 26.06 ve 29.85 °C olarak tespit edilmiştir. LED giriş gücü arttığında ışık akısındaki artışın yanı sıra LED birleşme noktasında açığa çıkan ısının artması, termoelektrik modülün soğuk yüzey sıcaklığının değişiminde son derece etkili olmaktadır. LED giriş gücündeki artış, termoelektrik modül soğuk yüzeyindeki sıcaklığın da artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda ısı emici kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı incelendiğinde simülasyonda elde edilen görsellere göre, ısı emici kanatçığın termoelektrik modülün sıcak yüzeyine yakın kısımlarında sıcaklığın arttığı görülmektedir. Termoelektrik sıcak yüzeyinden uzaklaştıkça ise sıcaklığın lineer olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.1. 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için termoelektrik modüllü soğutucu üniteye sıcaklık dağılımı.

Termoelektrik modüllü soğutucu ünite simülasyonunda farklı güç girişleri için elde edilen noktasal sıcaklık değerleri Çizelge 4.1’de görülmektedir. Burada 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için termoelektrik modül 4 Volttan 10 Volta kadar yedi farklı giriş voltajında çalıştırılmıştır. Her bir LED giriş gücü ve peltier ileri voltaj değerleri için daha önce belirlenen dört noktanın (T1,T2,T3,T4) sıcaklık değerleri belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı peltier güçlerinde noktasal sıcaklık değerleri (Simülasyon).

Farklı Peltier Güçlerinde Noktasal Sıcaklık Değerleri (Simülasyon)								
80 Watt					100 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	62,5	20,6	38	30,7	73	24,6	39	31,1
5	62,1	19	41,5	32,3	72,6	23	42,5	32,7
6	62	18,5	45,4	34	72,4	22,4	46,4	34,4
7	61,9	18,1	49,7	36	72,5	22,8	50,6	36,4
8	62,3	20,1	54,3	38	72,8	24	55,1	38,4
9	62,8	22,2	59	40,1	73,3	26,1	59,8	40,5
10	63,4	24,9	63,8	42,4	73,9	28,7	64,6	42,7
120 Watt					140 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	83,5	28,7	40	31,6	94,3	32,9	41	32
5	83	27	43,5	33,2	94	31,2	44,5	33,6
6	82,9	26,4	47,4	34,9	93,7	30,5	48,3	35,3
7	83	26,7	51,6	36,8	93,8	30,8	52,5	37,2
8	83,3	28	56	38,8	94,1	32	57	39,2
9	83,8	30	60,7	40,9	94,5	34	61,5	41,3
10	84,4	32,5	65,5	43,1	95,1	36,5	66,3	43,5

Nümerik çalışmada elde edilen sıcaklık değerlerine ait veriler Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Tüm LED giriş güçlerinde en yüksek sıcaklık değerleri T1 lehim noktasında belirlenmiştir. Bununla birlikte LED giriş gücünün artışıyla birlikte en

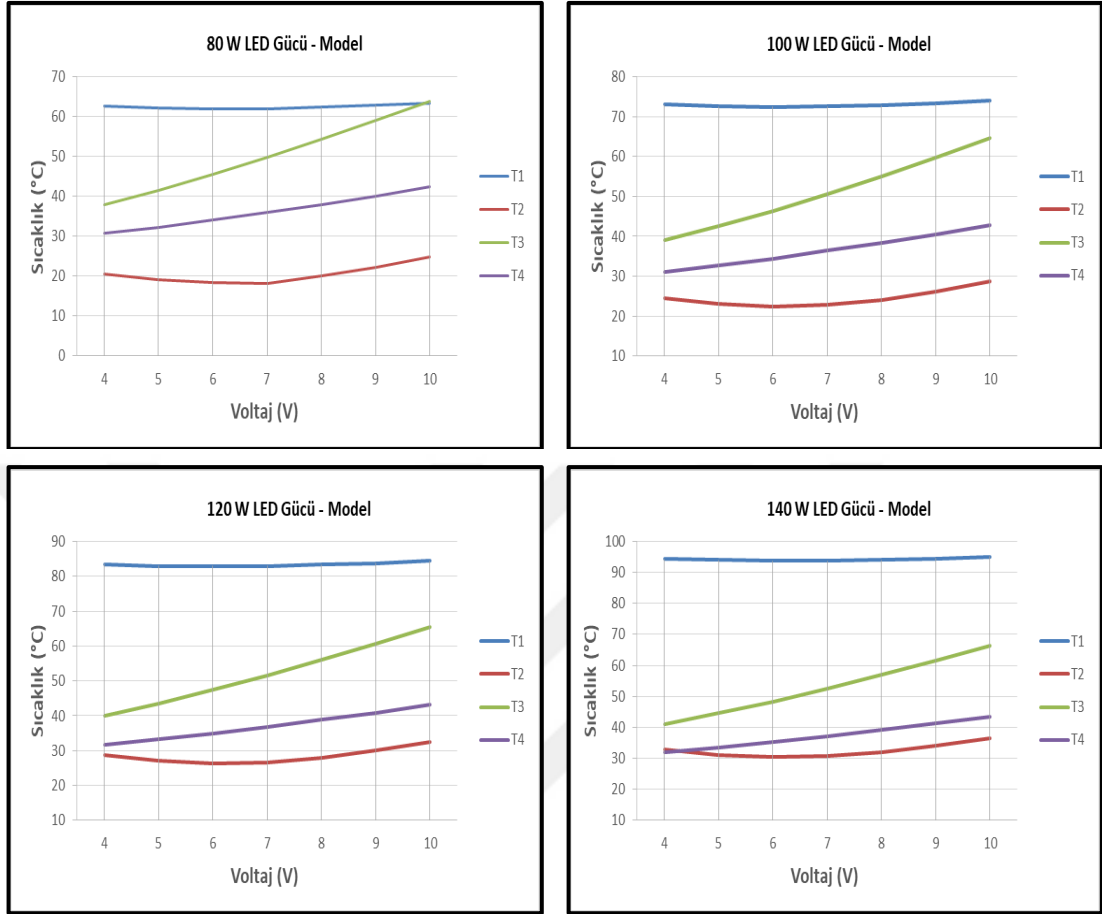
fazla sıcaklık değişimi T1 noktasında görülmektedir. 80 W LED giriş gücünden itibaren her 20 W'lık güç artışında T1 noktasındaki sıcaklık değeri ortalama 11 °C artmıştır. T2, T3 ve T4 noktalarında sırasıyla bu artış ortalama 4, 1.5 ve 1 °C olmuştur. T1 lehim noktasının LED'e en yakın konum olması, LED giriş gücüne bağlı olarak sıcaklık değerlerinin bu bölgede daha fazla değişimine neden olmuştur. Buna bağlı olarak LED'lerden uzaklaştıkça noktasal sıcaklık değerlerindeki değişim oranı azalmaktadır.

Grafikler incelendiğinde en düşük lehim noktası (T1) sıcaklığı, 80 W LED giriş gücü için peltier besleme gerilimi 7 Volt olduğunda tespit edilmiştir. 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde ise en düşük lehim noktası sıcaklığı 6 Volt peltier besleme geriliminde elde edilmiştir. En düşük T1 lehim noktası sıcaklığı 80 W LED giriş gücünde 61.9 °C olurken 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde bu değer sırasıyla 72.4, 82.9 ve 93.7 °C olarak belirlenmiştir. Böylelikle T1 lehim noktası sıcaklığının, LED giriş gücünün artışıyla doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir.

Buna ek olarak 80 W LED giriş gücünde, 4 Volt besleme gerilimi için peltier sıcak-soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) 17.4 °C iken, 10 Volt besleme gerilimi için bu değer 38.9 °C'ye yükselmiştir. Benzer şekilde 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde de peltier sıcak - soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT), peltier besleme gerilimine bağlı olarak artış göstermektedir. En düşük T1 noktasal sıcaklık değerinin elde edildiği durumlar için 80 W LED giriş gücünde peltier sıcak - soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) 31.6 °C iken 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde bu değer sırasıyla 24, 21 ve 17.8 °C olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak LED giriş gücü arttıkça peltier sıcak - soğuk yüzey sıcaklık farkı azalmıştır. Bu durum peltier soğutma performansının LED giriş gücü azaldıkça buna bağlı olarak arttığını göstermektedir.

Ayrıca T1 lehim noktası sıcaklığı ile T2 peltier soğuk yüzey sıcaklığının 80 W LED giriş gücü için 4 Volttan 7 Volta kadar azaldığı, 7 Volttan itibaren 10 Volta kadar tekrar artmaya başladığı görülmektedir. Benzer şekilde diğer LED giriş güçleri için T1 ve T2 noktasal sıcaklıklarının 4 Volttan 6 Volt peltier besleme gerilimine kadar azaldığı, 6 Volttan itibaren besleme gerilimi arttıkça 10 Volta kadar ise yükseldiği belirlenmiştir. Bununla birlikte peltier alt yüzey sıcaklığı (T3) ve kanatçık uç

sıcaklığının (T4), LED giriş güçlerinin tamamında besleme gerilimi artışı ile doğru orantılı olarak yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.2. Farklı LED ve peltier güç girişleri için nümerik çalışmada elde edilen sıcaklık değerleri.

Tasarımı yapılan termoelektrik modüllü soğutucu ünite imal edilerek dış ortam sıcaklığı 25 °C olan laboratuvar ortamında test edilmiştir. Deney düzeneği üzerinde daha önce belirlenen noktalara (T1,T2,T3,T4) ısı çiftleri yerleştirilmiştir. Çizelge 4.2’de termoelektrik modül ve ısı emici kanatçıktan oluşan soğutucu ünitenin deneysel ölçümlerinde elde edilen noktasal sıcaklık değerleri verilmiştir. Deney düzeneğinde termoelektrik modül her bir LED giriş gücü için (80, 100, 120, 140 W) 4 Volttan 10 Volta kadar kademeli olarak yedi farklı ileri voltaj değerinde beslenmiştir. Sistemin kararlı hale gelmesi için noktasal sıcaklık değerleri iki saniye aralıklarla bir saat boyunca kaydedilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı peltier güçlerinde noktasal sıcaklık değerleri (Deney).

Farklı Peltier Güçlerinde Noktasal Sıcaklık Değerleri (Deney)								
80 Watt					100 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	63,5	21	37,5	30,8	75	23,8	37,2	32,5
5	62,5	19,8	40,2	33	71,9	21,5	41,3	34,6
6	61,7	18,9	44,8	35,9	70,7	20,7	45,1	35,9
7	61	18,5	49,9	38,9	70,4	20,5	50	37,2
8	62,3	19,2	55,6	40,1	71,1	22,6	54,7	39,9
9	63	21,5	60,8	42,1	72	24,8	58,5	42
10	63,8	23,5	65,3	42,9	74,4	26,9	63,7	44,6
120 Watt					140 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	84,6	26,9	38,7	33,1	93,9	32,2	39,1	33,5
5	82,3	25,5	41,8	34,7	92,8	30	43,5	35,1
6	81,2	24,7	45,7	36,2	92,4	29	48	36,8
7	80,9	24,6	50	38,4	91,8	28,9	51,7	38,4
8	81,4	25,9	55,1	39,8	92,2	29,9	56,4	40,6
9	82,5	28,9	59,4	41,4	92,8	32,1	61,2	41,7
10	83,6	31	64,8	44,2	94,2	35,5	66,6	43,3

Deneyisel çalışmada elde edilen sıcaklık değerlerine ait veriler Şekil 4.3’de verilmiştir. Deneyisel ölçümlerde en yüksek sıcaklık değeri, nümerik analizde elde edilen sonuçlara benzer şekilde LED’lere en yakın ölçüm noktası olan T1 ısıl çift noktasında ölçülmüştür. Aynı zamanda LED giriş gücünün artışıyla birlikte T1 ısıl çift noktasındaki sıcaklık değişimi, diğer ısıl çift noktalarına göre daha yüksek olmuştur. 80 W LED giriş gücünden itibaren her 20 W’lık güç artışında T1 noktasındaki sıcaklık değeri yaklaşık 10 °C artış göstermiştir. T2, T3 ve T4 ısıl çift noktalarında sırasıyla bu artış 4, 1 ve 0,5 °C civarında olmuştur. Tüm LED giriş güçlerinde en yüksek sıcaklık değerleri T1 ısıl çift noktasında, en düşük sıcaklık ise

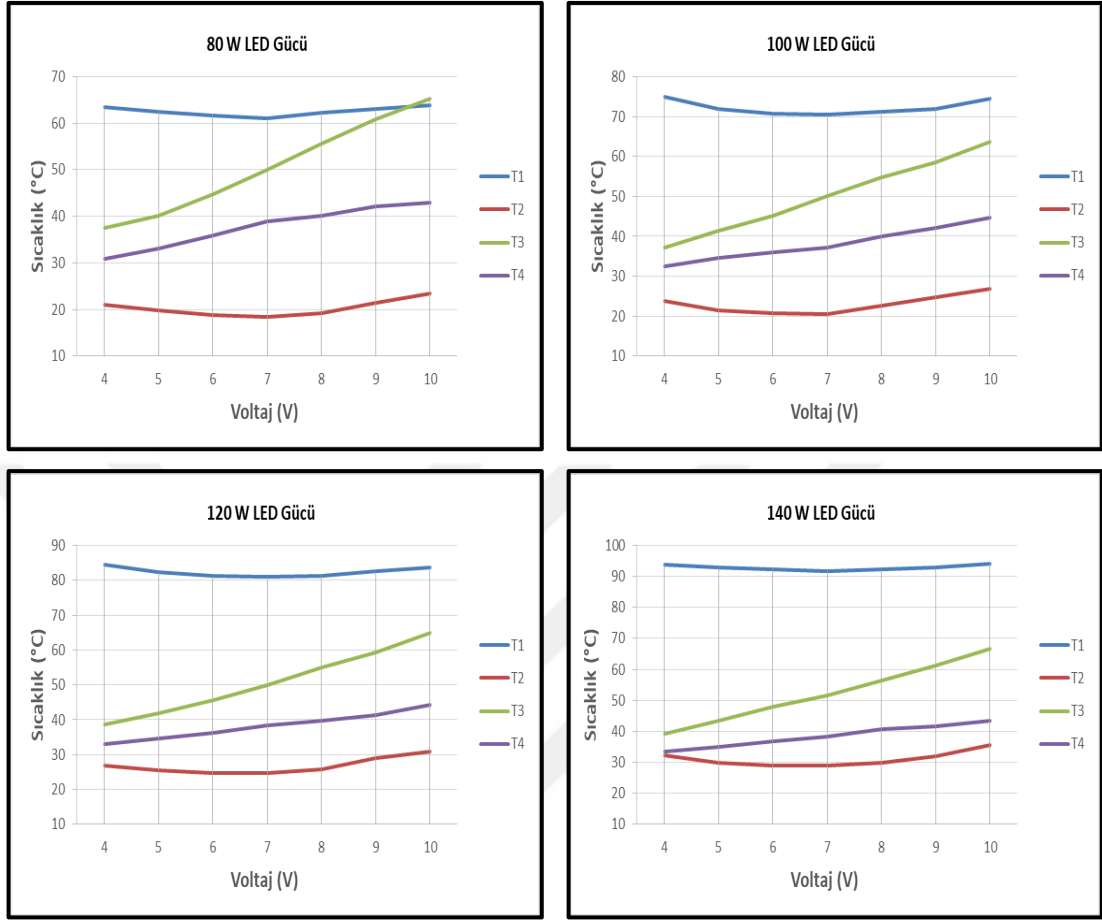
peltier soğuk yüzeyindeki T2 ısı çift noktasında ölçülmüştür. Aynı zamanda LED'lerden uzaklaştıkça noktasal sıcaklık değerlerindeki değişim oranının azaldığı görülmektedir.

Grafiklere göre en düşük lehim noktası (T1) sıcaklığı, tüm LED giriş güçleri için peltier besleme gerilimi 7 Volt olduğu durumda ölçülmüştür. Nümerik analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, 80 W LED giriş gücü için her iki yöntemde de en düşük T1 noktası sıcaklığı 7 Volt peltier besleme geriliminde elde edilmiştir. Ancak 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde nümerik analiz yönteminde en düşük T1 noktası sıcaklığı 6 Volt peltier besleme geriliminde elde edilmişken, deneysel çalışmada ise 7 Volt peltier besleme geriliminde ölçülmüştür. 80 W LED giriş gücü için minimum T1 lehim noktası sıcaklığı 61 °C olarak ölçülmüştür. 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde bu değer sırasıyla 70.4, 80.9 ve 91.8 °C olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre T1 lehim noktası sıcaklığının, LED giriş gücünün artışıyla doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir.

Ayrıca peltierin sorunsuz çalışması için sınır değer olan sıcak - soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT), 80 W LED giriş gücü için 4 Volt besleme geriliminde 16.5 °C iken, 10 Volt besleme gerilimi için bu değer 41.8 °C'ye yükselmiştir. Benzer şekilde 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde de peltier sıcak - soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT), peltier besleme gerilimi artırıldıkça buna bağlı olarak yükselmektedir. Minimum T1 noktasal sıcaklık değerinin ölçüldüğü 7 Volt peltier besleme gerilimi için 80 W LED giriş gücünde peltier sıcak - soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) 31.4°C olmuştur. 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde ise bu değer sırasıyla 29.5, 25.4 ve 22.8 °C olarak tespit edilmiştir. Elde edilen veriler kıyaslandığında ΔT sıcaklık farkının deneysel çalışmada nümerik analize göre daha yüksek olduğu görülmektedir. LED giriş gücü arttıkça peltier sıcak - soğuk yüzey sıcaklık farkı azalmıştır. Sonuç olarak tüm LED giriş güçleri için ΔT sıcaklık farkı, sınır sıcaklık değerinin altında tespit edilmiştir.

Buna ek olarak T1 lehim noktası sıcaklığı ile T2 peltier soğuk yüzey sıcaklığındaki değişim, nümerik analiz sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Tüm LED giriş güçlerinde T1 ve T2 noktalarındaki sıcaklıklar peltier besleme gerilimi arttıkça 4 Volttan 7 Volta kadar azalmakta, 7 Volttan itibaren 10 Volta kadar tekrar artmaktadır. Peltier alt yüzey sıcaklığı (T3) ve kanatçık uç sıcaklığının (T4) ise, tüm

LED giriş güçlerinde besleme gerilimindeki artışa bağlı olarak doğru orantılı bir şekilde yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.3. Farklı LED ve peltier güç girişleri için deneysel çalışmada elde edilen sıcaklık değerleri.

Çizelge 4.3’de 80, 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinde elde edilen nümerik analiz ve deneysel ölçüm sonuçları görülmektedir. Çizelge, her LED giriş gücü için jonksiyon sıcaklığı hesaplamada kritik öneme sahip T1 lehim noktası sıcaklığının minimum olduğu şartlardaki noktasal sıcaklık değerleri temel alınarak oluşturulmuştur.

80 W LED giriş gücü için her iki çalışma yöntemindeki noktasal sıcaklık değerleri kıyaslandığında T1, T2 ve T3 ölçüm noktalarında birbirine çok yakın sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Analiz ve ölçüm arasında en yüksek sıcaklık farkı 2.9 °C olarak T4 ölçüm noktasında tespit edilmiştir. Böylelikle maksimum hata oranı T4 sıcaklık ölçüm noktasında % 8 olarak belirlenmiştir.

100 Watt LED giriş gücünde elde edilen noktasal sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında T1, T2 ve T4 ölçüm noktalarında her iki çalışma yönteminde de birbirine çok yakın sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Analiz ve ölçüm arasında en yüksek sıcaklık farkı 3.6 °C olarak T3 ölçüm noktasında tespit edilmiştir. Bu verilere göre 100 W LED giriş gücü için maksimum hata oranı % 9 olarak T2 ölçüm noktasında belirlenmiştir.

120 Watt LED giriş gücü için elde edilen noktasal sıcaklık değerleri kıyaslandığında T1, T2 ve T3 ölçüm noktalarında nümerik ve deneysel çalışmalarda elde edilen sıcaklık değerleri birbirine çok yakındır. İki çalışma yöntemi arasında en yüksek sıcaklık farkı T4 ölçüm noktasında 3.5 °C olarak bulunmuştur. Analiz ve ölçüm sonuçlarına göre maksimum hata oranı % 9 olarak T4 ölçüm noktasında bulunmuştur.

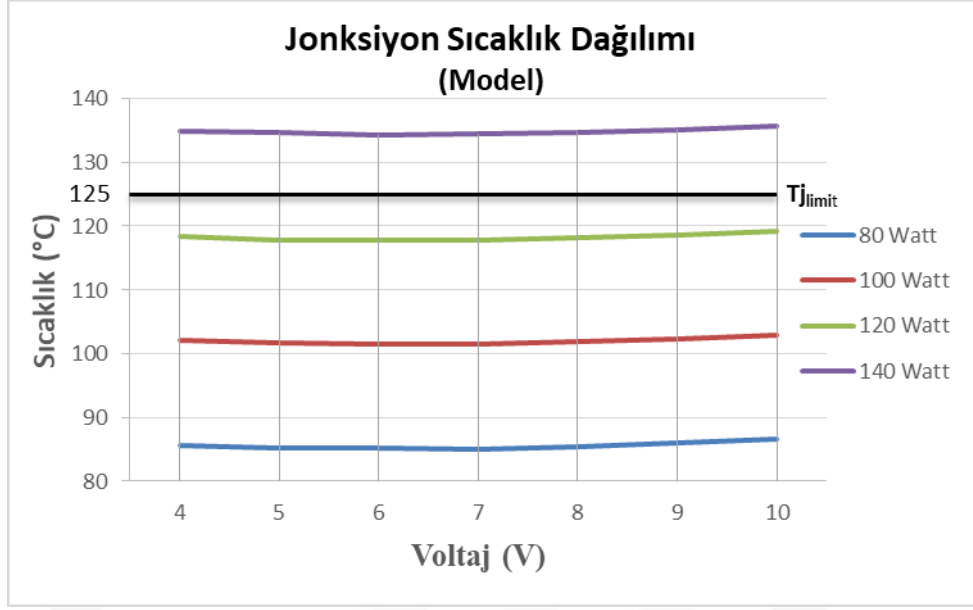
140 Watt LED giriş gücünde elde edilen nümerik analiz ve deneysel ölçüm sonuçlarına göre T1 ve T2 ölçüm noktalarında birbirine çok yakın sıcaklık değerleri elde edilmiştir. T4 ölçüm noktasında 3.1 °C'lik sıcaklık farkı belirlenmişken, analiz ve ölçüm arasında en yüksek sıcaklık farkı ise 3.4 °C olarak T3 ölçüm noktasında tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre 140 W LED giriş gücü için maksimum hata oranı % 8 olarak T4 ölçüm noktasında görülmüştür.

Tüm LED giriş güçleri için dört ölçüm noktasında da tespit edilen hata oranları % 10'un altında bulunarak sistemin validasyon işlemi başarıyla sağlanmıştır. Sonuç olarak 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için termoelektrik modüllü soğutucu ünitenin nümerik ve deneysel testleri başarıyla sonuçlandırılmıştır.

Çizelge 4.3. Termoelektrik soğutucuda farklı LED giriş güçleri için hata oranları.

80 Watt				100 Watt			
	Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı		Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı
T1	61,9	61	% 1	T1	72,4	70,4	% 2
T2	18,1	18,5	% 2	T2	22,4	20,5	% 9
T3	49,7	49,9	% 1	T3	46,4	50	% 7
T4	36	38,9	% 8	T4	34,4	37,2	% 8
120 Watt				140 Watt			
	Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı		Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı
T1	82,9	80,9	% 2	T1	93,7	91,8	% 2
T2	26,4	24,6	% 7	T2	30,5	29	% 5
T3	47,4	50	% 5	T3	48,3	51,7	% 7
T4	34,9	38,4	% 9	T4	35,3	38,4	% 8

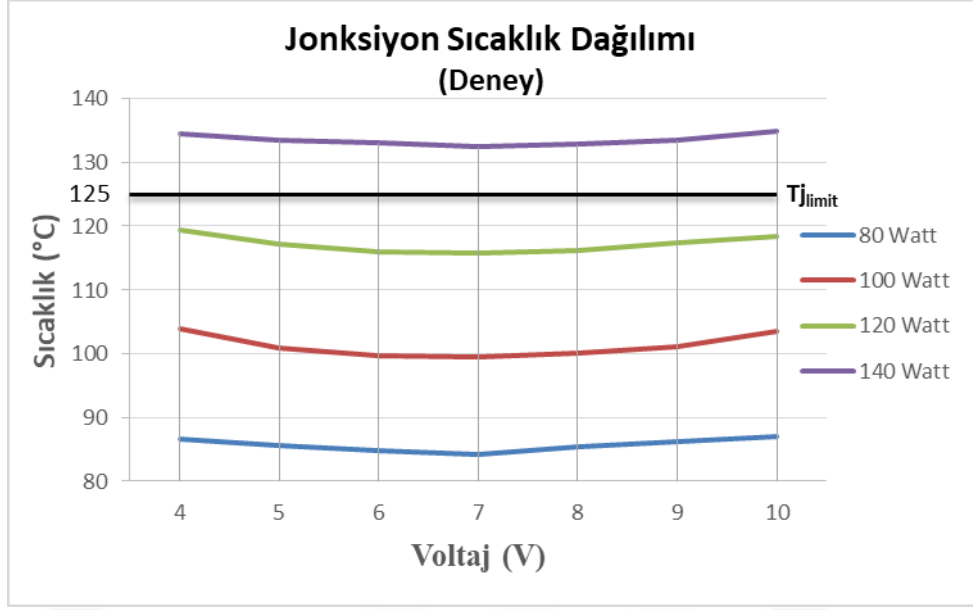
Termoelektrik modüllü soğutucu model üzerinde elde edilen noktasal sıcaklık değerleri dikkate alınarak LED jonksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. Şekil 4.4’de görüldüğü üzere jonksiyon sıcaklıkları 80, 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinin tamamında, yedi farklı peltier giriş voltajı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elde edilen jonksiyon sıcaklıkları, çalışmada kullanılan LED’in limit jonksiyon sıcaklık değeri ($T_{j\text{limit}}=125\text{ }^{\circ}\text{C}$) ile kıyaslanmıştır. Peltier besleme gerilimi dikkate alındığında en düşük jonksiyon sıcaklığı 80 W LED giriş gücü için 7 Volt peltier besleme geriliminde $85.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. 100, 120 ve 140 W LED giriş güçleri için en düşük jonksiyon sıcaklıkları, 6 Volt peltier besleme geriliminde sırasıyla 101.4, 117.7 ve $134.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. LED giriş gücü arttıkça jonksiyon sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Jonksiyon sıcaklığının, LED giriş gücündeki her 20 Watt’lık artışta yaklaşık $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ yükseldiği görülmüştür. 80, 100 ve 120 W LED giriş güçleri için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları sınır değerinin altındadır. Fakat 140 W LED giriş gücü için hesaplanan jonksiyon sıcaklığının sınır değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak termoelektrik modüllü soğutucu modelin soğutma performansına bakıldığında, çalışmada belirlenen sınır şartlarına göre 120 W LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Termoelektrik soğutucu ünite de jonksiyon sıcaklık dağılımı (Model).

Termoelektrik modüllü soğutucu ünitelerden elde edilen noktasal sıcaklık değerlerine göre LED jonksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. Deneysel ölçüm neticesinde hesaplanan jonksiyon sıcaklıklarına ait veriler Şekil 4.5’de görülmektedir. Jonksiyon sıcaklıkları her LED giriş gücü için, yedi farklı peltier giriş voltajında hesaplanmıştır. Hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları, çalışmada kullanılan LED’in limit jonksiyon sıcaklık değeri ($T_{jlimit}=125\text{ °C}$) ile karşılaştırılmıştır. 80, 100, 120 ve 140 W LED giriş güçlerinin tamamında en düşük jonksiyon sıcaklığı, 7 Volt peltier besleme geriliminde elde edilmiştir. En düşük jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 84.2, 99.4, 115.7 ve 132.4 °C olarak hesaplanmıştır. Jonksiyon sıcaklığının LED giriş gücü ile doğru orantılı değiştiği görülmektedir.

LED giriş gücündeki her 20 Watt’lık artış, jonksiyon sıcaklığında ortalama 16 °C yükselişe neden olmuştur. 80, 100 ve 120 W LED giriş güçleri için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları sınır değerin altında iken 140 W LED giriş gücü için ise sınır değerin üzerindedir. Bu sonuçlara göre termoelektrik modüllü soğutucu ünitenin, nümerik çalışmaya benzer şekilde 120 W LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Termoelektrik soğutucu ünite de jonksiyon sıcaklık dağılımı (Deney).

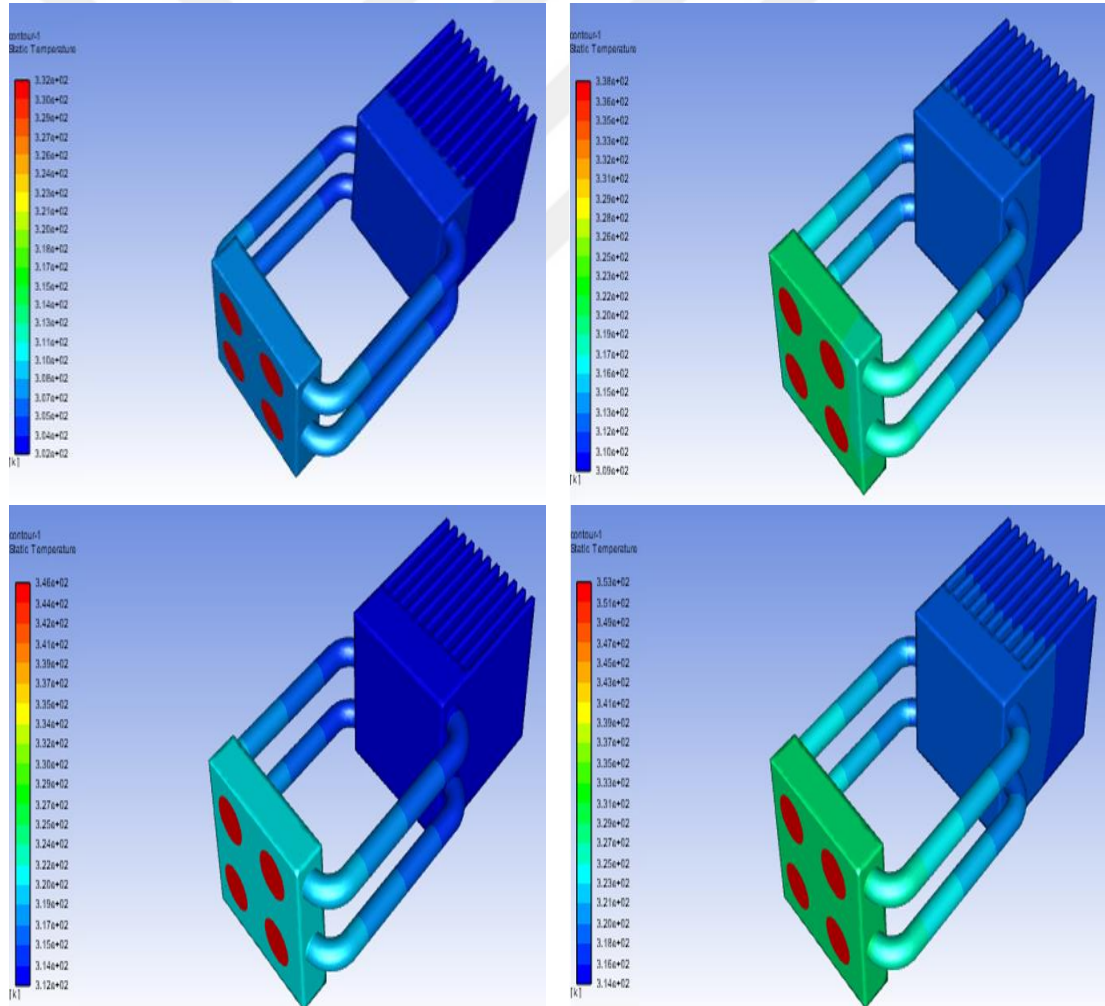
4.2 Isı Borusu Verimi

Çalışmada dörtlü LED yongasının soğutulması için ısı borulu soğutucu ünite kullanılmıştır. Burada nihai amaç LED’lerdeki birleşme noktası (jonksiyon) sıcaklığını limit değer olan 125 °C’nin altında ve mümkün olan en düşük sıcaklıkta tutmaktır. Bu bağlamda jonksiyon sıcaklığının hesaplanması ve sistemdeki termal akışın gözlenmesi için belirlenen dört noktanın (T1,T2,T3,T4) sıcaklıkları ölçülmüştür. LED yongası 40, 60, 80 ve 100 Watt giriş güçlerinde çalıştırılarak soğutma performansı incelenmiştir. Simülasyon ve deneysel ölçümle elde edilen sıcaklık değerleri karşılaştırılarak sistem doğrulaması yapılmıştır.

Isı borusu ve kanatçıklı yapıdan oluşan soğutucu modelin 40, 60, 80 ve 100 Watt LED giriş güçleri için ANSYS programında elde edilen simülasyon görselleri Şekil 4.6’da verilmiştir. Model üzerinde maksimum sıcaklık değeri, ısının açığa çıktığı bölge olan ışığın üretildiği birleşme noktasında görülmektedir. Böylelikle tüm LED giriş güçleri için maksimum sıcaklık değeri LED’lerin merkezinde elde edilmiştir. 40 Watt LED giriş gücü için model üzerindeki maksimum sıcaklık değeri 59.9 °C ‘iken 60, 80 ve 100 Watt LED giriş güçleri için maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 66.2, 73.9 ve 81.6 °C olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü üzere LED giriş gücü arttıkça model üzerinde elde edilen maksimum sıcaklık değeri de artmıştır.

Model üzerinde minimum sıcaklık değeri ise tüm LED giriş güçleri için kanatçık uç noktasında belirlenmiştir. 40 Watt LED giriş gücünde 29.8 °C olan kanatçık uç noktası sıcaklığı 60, 80 ve 100 Watt LED giriş güçleri için sırasıyla 35.5, 38.5 ve 41 °C olarak tespit edilmiştir. LED giriş gücündeki artışa bağlı olarak LED birleşme noktasında açığa çıkan ısının artması, model üzerinde yukarı yönlü sıcaklık değişiminde etkili olmaktadır.

Son olarak, soğutucu model üzerindeki sıcaklık dağılımı incelendiğinde simülasyonda elde edilen görsellere göre LED birleşme noktasından uzaklaştıkça sıcaklık değerleri azalmaktadır. Böylelikle LED'lere yakın olan ısı borusu evaporatör bölgesinde, ısı borusu kondenser bölgesi ve ısı emici kanatçığa göre daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.6. 40, 60, 80 ve 100 Watt LED giriş güçleri için ısı borulu soğutucu ünite üzerindeki sıcaklık dağılımı.

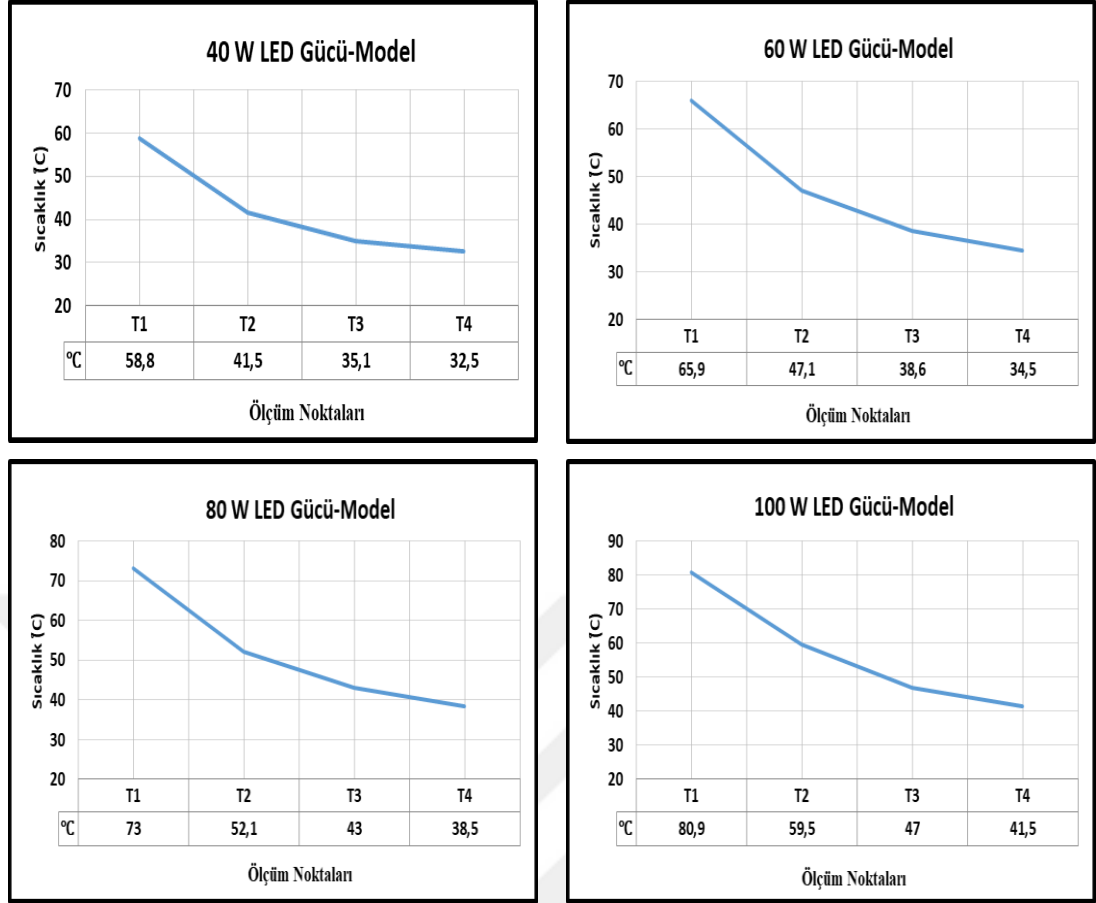
Nümerik çalışmada elde edilen noktasal sıcaklık değerlerine ait veriler Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Isı borulu soğutucu modelde LED’ler 40, 60, 80 ve 100 Watt giriş güçlerinde çalıştırılmıştır. Her bir LED giriş gücü için belirlenen dört noktanın (T1,T2,T3,T4) sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde T1; lehim noktası sıcaklığını, T2; ısı borusu evaporatör bölgesi sıcaklığını, T3; ısı borusu kondenser bölgesi sıcaklığını, T4; ısı emici kanatçık uç noktası sıcaklığını ifade etmektedir.

Tüm LED giriş güçlerinde en yüksek sıcaklık değerleri T1 lehim noktasında belirlenmiştir. Bunun başlıca sebebi T1 noktasının LED birleşme noktasına en yakın ölçüm noktası olmasıdır. Aynı zamanda LED giriş gücüne bağlı olarak ölçüm bölgelerinde en fazla sıcaklık değişimi T1 noktasında görülmektedir. 40 W LED giriş gücünden itibaren her 20 W’lık güç artışında T1 noktasındaki sıcaklık değeri ortalama 7.5 °C artmıştır. T2, T3 ve T4 noktalarında sırasıyla bu artış ortalama 5.5, 4 ve 3 °C olmuştur. T1 noktasının LED’e en yakın konumda bulunması, LED giriş gücündeki değişimle orantılı olarak tespit edilen sıcaklık değerlerinin bu bölgede daha fazla değişmesine neden olmuştur. Bu bağlamda LED’lerden uzaklaştıkça noktasal sıcaklık değerlerindeki değişim oranında azalış görülmektedir.

Grafiklere göre en düşük T1 lehim noktası sıcaklığı 40 W LED giriş gücünde 58.8 °C iken 60, 80 ve 100 W LED giriş güçlerinde bu değer sırasıyla 65.9, 73 ve 80,9 °C olarak belirlenmiştir. Veriler ışığında T1 lehim noktası sıcaklığının, LED giriş gücündeki artışa bağlı olarak doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir.

Ayrıca ölçüm noktaları arasındaki sıcaklık farkı LED giriş gücüne bağlı olarak artmaktadır. 40 W LED giriş gücünde T1-T2-T3-T4 noktaları arasındaki sıcaklık farkları sırasıyla 17.3, 6.4 ve 2.6 °C iken 100 W LED giriş gücüne çıkıldığında bu sıcaklık farkları sırasıyla 21.4, 12.5 ve 5.5 °C ‘ye yükselmiştir.

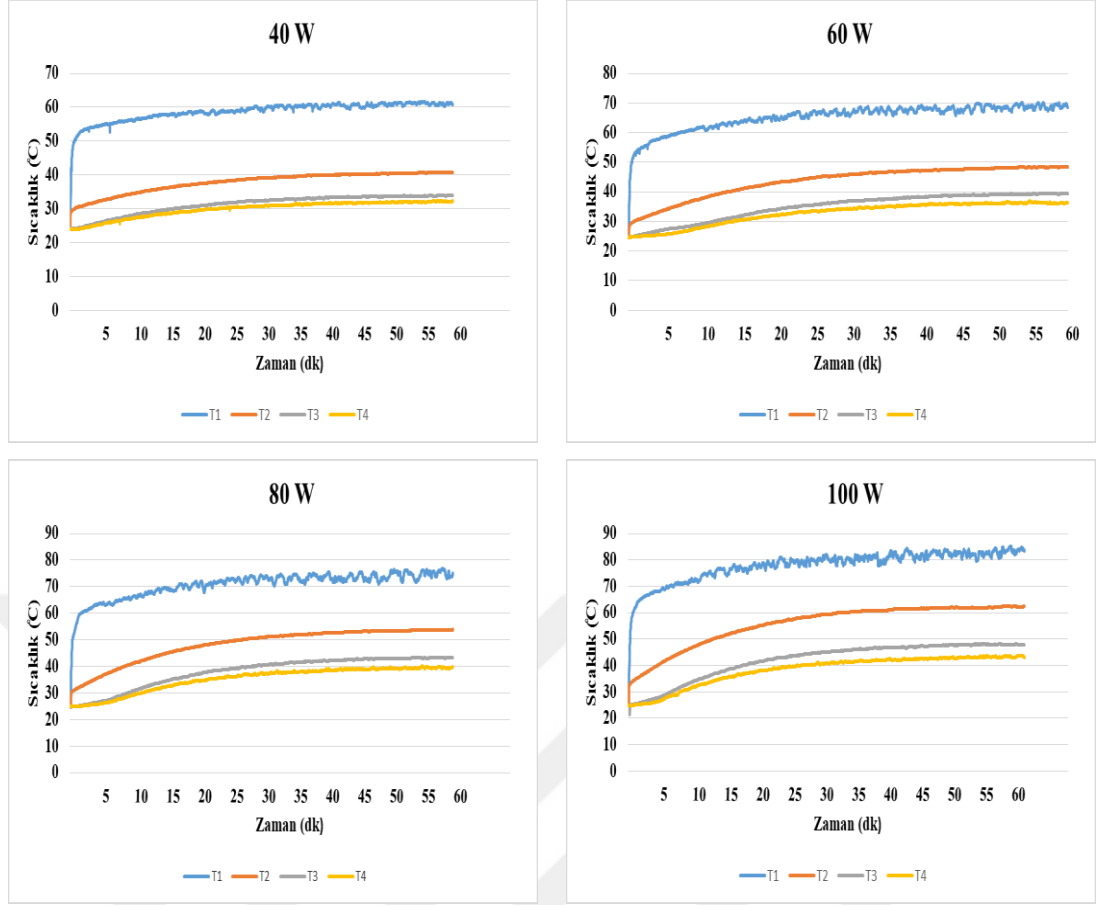
Benzer şekilde model üzerinde LED’lere en yakın ölçüm noktası (T1) ile en uzak ölçüm noktası (T4) arasındaki sıcaklık farkı LED giriş gücüne bağlı olarak değişmektedir. 40 W LED giriş gücünde bu değer 26.3 °C iken 60, 80 ve 100 W LED giriş güçlerinde sırasıyla 31.4, 34.5 ve 39.4 °C olmuştur. Sonuçta LED giriş gücü arttıkça ısı kaynağı ile soğutucu modelin en uzak noktası arasındaki sıcaklık farkında artış gözlenmiştir.



Şekil 4.7. Farklı LED giriş güçleri için elde edilen sıcaklık değerleri (Model).

Tasarlanan ısı borulu soğutucu ünite imal edilerek çevre sıcaklığının 25 °C olduğu laboratuvar ortamında test edilmiştir. Deney düzeneğinde daha önce belirlenen ve nümerik çalışmada da sıcaklık değerleri alınan noktalara (T1,T2,T3,T4) ısı çiftler yerleştirilmiştir. Çalışmanın bu kısmında her LED giriş gücü için (40, 60, 80, 100 W) bir saat süresince noktasal ölçüm değerleri alınmıştır. Ölçülen sıcaklık değerleri iki saniye aralıklarla veri toplayıcıya dijital olarak kaydedilmiştir.

T1, T2, T3 ve T4 noktalarında ölçülen saatlik sıcaklık değerleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Grafiklere göre tüm LED giriş güçlerinde en hızlı sıcaklık değişimi T1 ölçüm noktasında gözlenmiştir. LED’lerden uzaklaştıkça ölçüm noktalarındaki sıcaklık değişiminin zamana yayıldığı görülmektedir. Sonuç olarak LED giriş güçlerinin tamamında sistemin ortalama 40 dakikada kararlı hale geldiği tespit edilmiştir. Çalışmanın ısı borusu kullanılan kısımlarında, nihai noktasal sıcaklık değeri olarak bir saatlik ölçüm sonucundaki değerler dikkate alınmıştır.

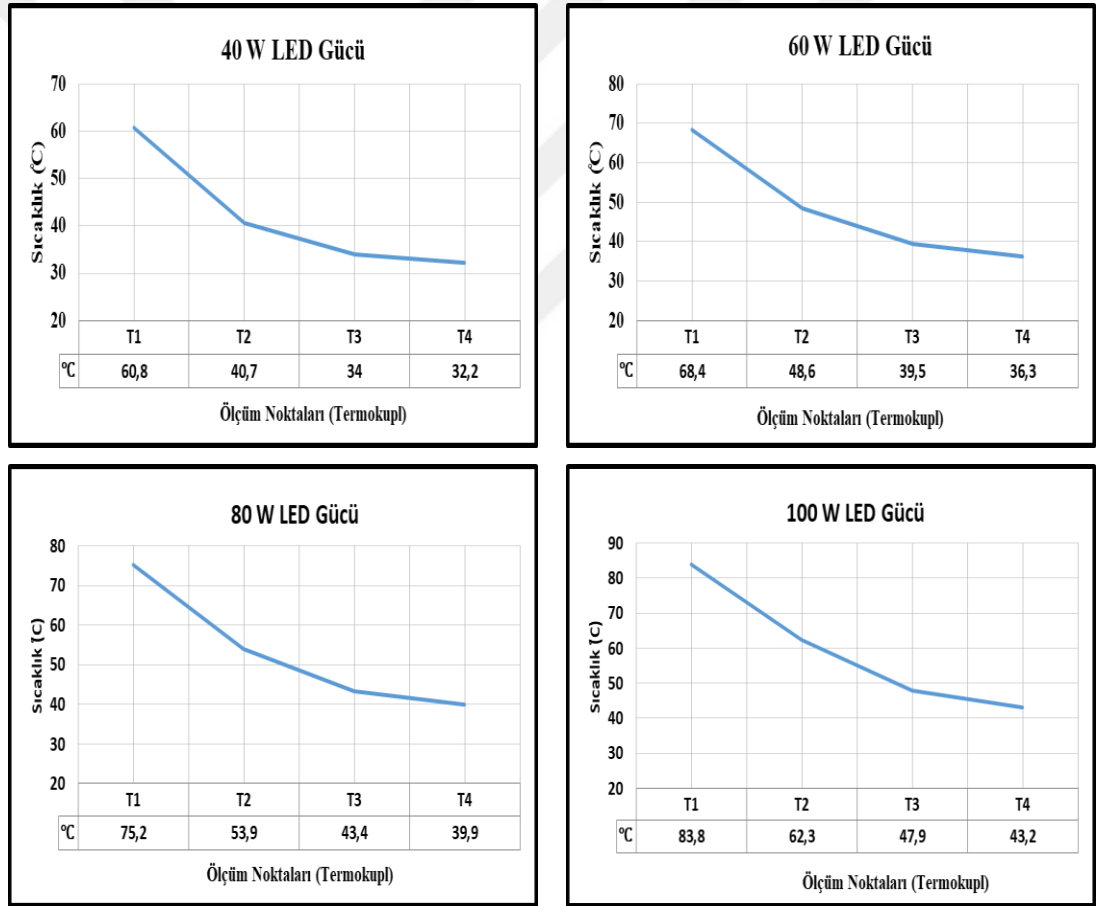


Şekil 4.8. Farklı LED giriş güçleri için saatlik ölçüm sonuçları.

Deneysel çalışmada ölçülen sıcaklık değerlerine ait veriler Şekil 4.9’da görülmektedir. Nümerik analiz sonuçlarına benzer şekilde deneysel ölçümlerde de en yüksek sıcaklık değeri, LED’lere en yakın ölçüm noktası olan T1 ısıl çift noktasında ölçülmüştür. Benzer şekilde LED giriş gücündeki değişime bağlı en yüksek sıcaklık değişimi T1 ısıl çiftinde ölçülmüştür. Ölçümlerin alındığı en düşük LED giriş gücü olan 40 W’tan itibaren 20 W’lık giriş gücü artışlarında T1 ısıl çiftinde 8 °C civarında sıcaklık artışı tespit edilmiştir. Bu artış T2, T3 ve T4 ısıl çiftlerinde sırasıyla 7.5, 4.5 ve 3.5 °C olarak belirlenmiştir. Verilere göre, LED giriş gücüne bağlı olarak sistemdeki ısı kaynağı olan LED’lere yaklaştıkça noktasal sıcaklık değerlerindeki değişim oranının arttığı görülmüştür. Grafikler incelendiğinde 40 W LED giriş gücünde 60.8 °C olan T1 noktası sıcaklığı 60, 80 ve 100 W giriş güçlerinde sırasıyla 68.4, 75.2 ve 83.8 °C olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak T1 noktası sıcaklığı, LED giriş gücündeki yükselişe doğru orantılı bir şekilde artmaktadır.

Buna ek olarak ölçüm noktaları arasındaki sıcaklık farkı, LED giriş gücüne bağlı olarak artmıştır. Örneğin 40 W LED giriş gücünde T1-T2-T3-T4 noktaları arasındaki sıcaklık farkları 20.1, 6.7 ve 1.8 °C olurken 100 W LED giriş gücünde bu sıcaklık farkları sırasıyla 21.5, 14.4 ve 4.7 °C ‘ye yükselmiştir.

Aynı zamanda soğutucu üniteye LED’lere en yakın ölçüm noktası (T1) ile en uzak ölçüm noktası (T4) arasındaki sıcaklık farkının, LED giriş gücüne göre değiştiği belirlenmiştir. 40 W LED giriş gücünde bu değer 28.6 °C olurken 60, 80 ve 100 W LED giriş güçlerinde ise sırasıyla 32.1, 35.3 ve 40.6 °C olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak LED giriş gücündeki artışla birlikte, ısı kaynağı ile soğutucu modelin en uzak noktası arasındaki sıcaklık farkı da artmıştır.



Şekil 4.9. Farklı LED giriş güçleri için elde edilen sıcaklık değerleri (Deney).

Çizelge 4.4’de 40, 60, 80 ve 100 W LED giriş güçlerinde ısılı çift bulunan dört noktada elde edilen simülasyon ve deneysel ölçüm sonuçları verilmiştir. Noktasal

sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında tüm LED giriş güçlerinde, dört ısı çift noktasında da birbirine çok yakın sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

40 W LED giriş gücünde iki çalışma yönteminde tespit edilen sıcaklık değerleri kıyaslandığında T1 lehim noktası için sıcaklık farkı 2 °C olmuştur. T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkı ise sırasıyla 0.8, 1.1 ve 0.3 °C olarak belirlenmiştir. Bu verilere göre analiz ve ölçüm arasında en yüksek sıcaklık farkı T1 ölçüm noktasında tespit edilmiştir. Maksimum hata oranı T1 ve T3 noktalarında % 3 olarak bulunmuştur.

60 W LED giriş gücünde T1 lehim noktasındaki sıcaklık farkı 2.5 °C iken bu değer T2, T3 ve T4 noktalarında sırasıyla 1.5, 0.9 ve 1.8 °C olmuştur. Sonuçta 60 W LED giriş gücünde iki çalışma yöntemi arasındaki maksimum sıcaklık farkı T1 ölçüm noktasında belirlenmiştir. Buna ek olarak en yüksek hata oranı T4 ölçüm noktasında % 5 olarak tespit edilmiştir.

LED giriş gücü 80 W olduğu durumda simülasyon ve deneysel çalışma bulguları kıyaslandığında T1 lehim noktasındaki sıcaklık farkı 2.2 °C'dir. T2, T3 ve T4 ölçüm noktalarındaki sıcaklık farkları ise sırasıyla 1.8, 0.4 ve 1.4 °C olmuştur. Bu verilere göre en yüksek sıcaklık farkı T1 ölçüm noktasında bulunmuştur. Aynı zamanda 80 W LED giriş gücü için T1, T2 ve T4 noktalarında hata oranı % 3 iken T3 noktasında ise % 1 olarak tespit edilmiştir.

100 W LED giriş gücündeki bulgulara bakıldığında T1 lehim noktasındaki sıcaklık farkı 2.9 °C iken T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları ise sırasıyla 2.8, 0.9 ve 1.7 °C olmuştur. Görüldüğü üzere diğer LED giriş güçlerinde olduğu gibi 100 W LED giriş gücünde de en yüksek sıcaklık farkı, LED'lere en yakın ölçüm noktası T1'de tespit edilmiştir. Bununla birlikte maksimum hata oranı T2 ve T4 ölçüm noktalarında % 4 olarak bulunmuştur. T1 noktasında hata oranı % 3, T3 noktasında ise % 2 olmuştur.

Çalışmanın bu bölümünde tüm LED giriş güçleri için dört ölçüm noktasında da belirlenen hata oranları % 10'un altında bulunarak sistemin validasyon işlemi sorunsuz olarak tamamlanmıştır. Böylelikle 40, 60, 80 ve 100 Watt LED giriş güçleri

için ısı borulu soğutucu ünitenin nümerik ve deneysel testleri başarıyla sonuçlandırılmıştır.

Çizelge 4.4. Isı borulu soğutucuda farklı LED giriş güçleri için hata oranları.

40 Watt				60 Watt			
	Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı		Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı
T1	58,8	60,8	% 3	T1	65,9	68,4	% 3
T2	41,5	40,7	% 2	T2	47,1	48,6	% 3
T3	35,1	34	% 3	T3	38,6	39,5	% 2
T4	32,5	32,2	% 1	T4	34,5	36,3	% 5

80 Watt				100 Watt			
	Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı		Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı
T1	73	75,2	% 3	T1	80,9	83,8	% 3
T2	52,1	53,9	% 3	T2	59,5	62,3	% 4
T3	43	43,4	% 1	T3	47	47,9	% 2
T4	38,5	39,9	% 3	T4	41,5	43,2	% 4

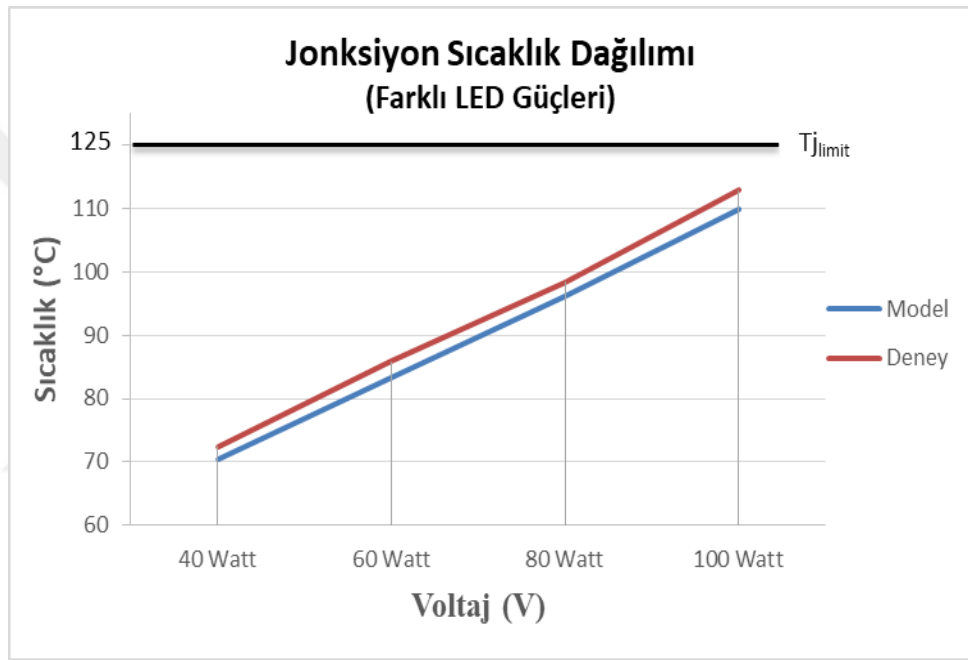
Isı borulu soğutucu üniteden elde edilen veriler ile LED jonksiyon sıcaklıkları hesaplanarak Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Jonksiyon sıcaklıkları hem nümerik hem de deneysel çalışma için 40, 60, 80 ve 100 W LED giriş güçleri için hesaplanmıştır. Hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları, LED'in limit jonksiyon sıcaklık değeri ($T_{j\text{limit}}=125\text{ }^{\circ}\text{C}$) ile karşılaştırılmıştır.

Modelde 40 W LED giriş gücü için jonksiyon sıcaklığı $70.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ olurken 60, 80 ve 100 W LED giriş güçleri için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 83.3, 96.2 ve $109.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmuştur. LED giriş gücündeki her 20 Watt'lık artışa bağlı olarak, jonksiyon sıcaklığı ortalama $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ yükselmiştir. Böylece LED giriş gücü arttıkça jonksiyon sıcaklığı da artmaktadır.

Deneysel çalışmada ise 40 W LED giriş gücünde hesaplanan jonksiyon sıcaklığı $72.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken 60, 80 ve 100 W LED giriş güçlerinde jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 85.8, 98.4 ve $112.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmiştir. Verilere bakıldığında nümerik çalışmaya benzer şekilde LED giriş gücündeki artış jonksiyon sıcaklığını da artırmaktadır.

Simülasyon ve deneysel çalışma verilerinden elde edilen jonksiyon sıcaklıkları karşılaştırıldığında, 40 W LED giriş gücü için 2 °C sıcaklık farkı oluşmuştur. 60, 80 ve 100 W LED giriş güçleri için iki çalışma yönteminde elde edilen jonksiyon sıcaklık farkları sırasıyla 2.5, 2.2 ve 2.9 °C olmuştur. Genel itibariyle her iki çalışma yönteminde birbirine çok yakın jonksiyon sıcaklıkları elde edilmiştir.

Sonuç olarak ısı borulu soğutucu ünitenin soğutma performansına bakıldığında, çalışmada belirlenen sınır şartlarına göre 100 W LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.



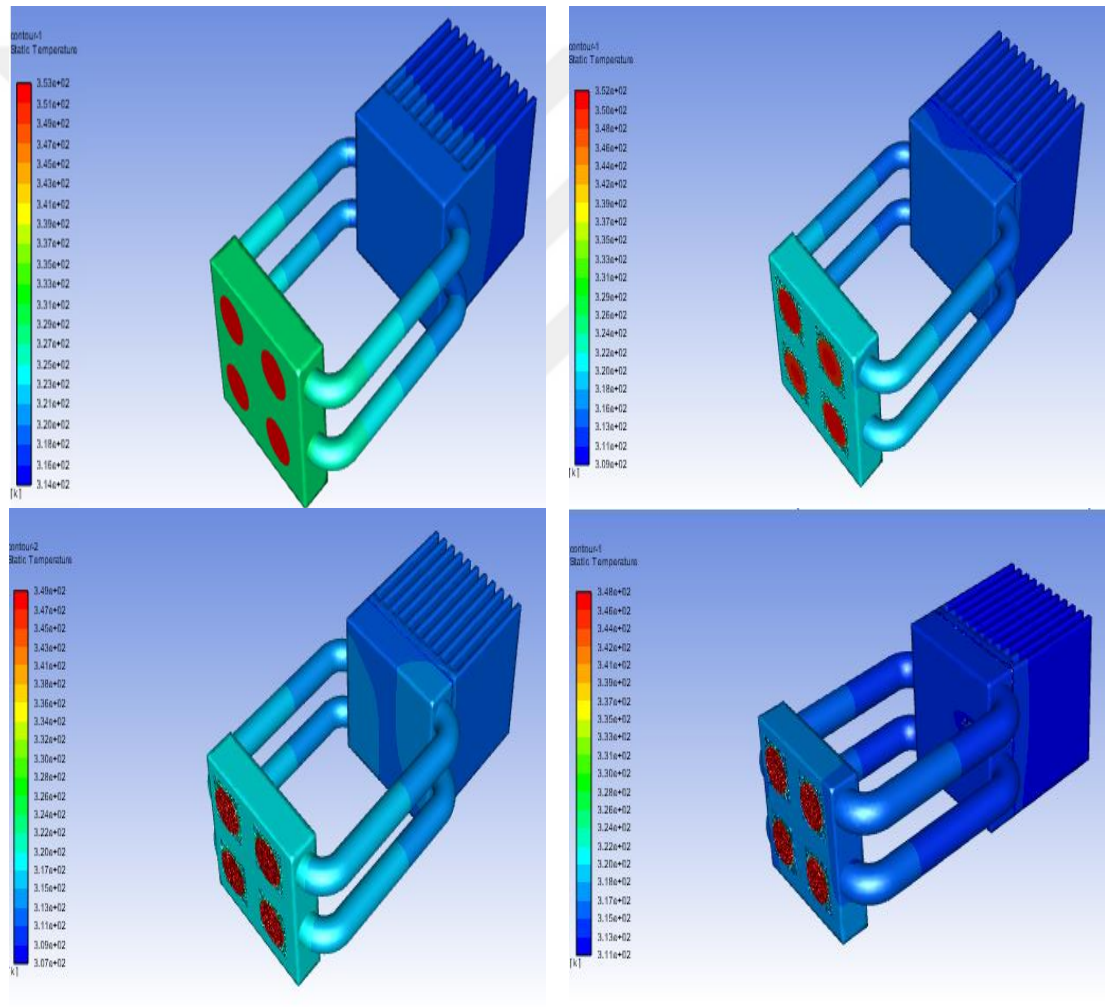
Şekil 4.10. Farklı LED giriş güçleri için ısı borulu soğutucu ünitelerdeki jonksiyon sıcaklık dağılımı (Model-Deney).

4.2.1 100 Watt LED gücünde ısı borusu çap değişiminin soğutma performansına etkisi

Tasarlanan ısı borulu soğutucu modelde, farklı boru çapları için ANSYS programında elde edilen simülasyon görselleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Modeldeki ısı borusu 8, 10, 12 ve 14 mm olmak üzere dört farklı çapta tasarlanmıştır. Modellerin her biri 100 W LED giriş gücünde çalıştırılmıştır. Dört modelde de en yüksek sıcaklık değeri sistemin ısı kaynağı olan LED birleşme noktasında görülmektedir. 8 mm ısı borusu çapında modeldeki maksimum sıcaklık değeri 81.6 °C iken bu değer 10 mm boru çapında 79.1 °C, 12 mm boru çapında 75 °C, 14

mm boru çapında 75.9 °C olmuştur. Maksimum sıcaklık değeri 12 mm boru çapına kadar azalış eğilimindeyken, 12 mm boru çapından itibaren boru çapındaki büyüme ile tekrar artışa geçmektedir.

Tüm boru çaplarında en düşük sıcaklık değerleri LED'lere en uzak bölge olan kanatçık uç noktasında tespit edilmiştir. Boru çapının 8 mm olduğu modelde kanatçık uç sıcaklığı 41 °C iken, 10, 12 ve 14 mm boru çaplarında ise bu değer sırasıyla 36, 34 ve 38 °C olmuştur. Model üzerindeki minimum sıcaklık değerinin de maksimum sıcaklık değerine benzer şekilde 12 mm boru çapına kadar azaldığı, 12 mm'den itibaren boru çapındaki artışla birlikte tekrar yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.11. 8, 10, 12 ve 14 mm boru çapları için ısı borulu soğutucu ünite üzerindeki sıcaklık dağılımı.

Farklı çapta ısı boruları kullanılan modellerdeki sıcaklık dağılımı incelendiğinde simülasyon görsellerine göre LED'lerden uzaklaştıkça sıcaklık da azalmaktadır.

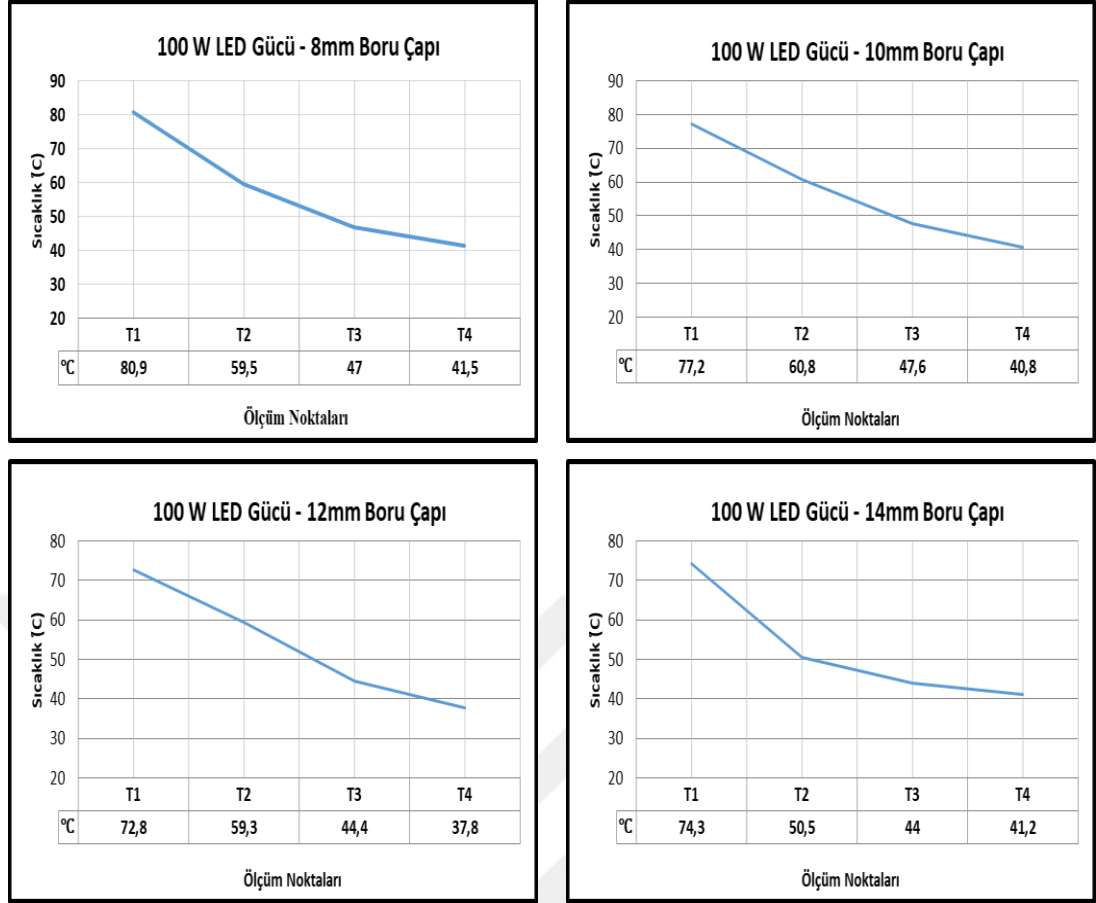
LED'lere yakın olan ısı borusu evaporatör bölgesinde, daha uzak konumda bulunan ısı borusu kondenser bölgesi ve ısı emici kanatçığa göre daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

Farklı ısı borusu çapları için nümerik çalışmada elde edilen noktasal sıcaklık değerleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Soğutucu model 8, 10, 12 ve 14 mm boru çapları için 100 W LED giriş gücünde çalıştırılmıştır. Dört farklı boru çapı için daha önce belirlenen dört noktanın (T1,T2,T3,T4) sıcaklık değerleri alınmıştır. T1; LED lehim noktası sıcaklığını, T2; ısı borusu evaporatör bölgesi sıcaklığını, T3; ısı borusu kondenser bölgesi sıcaklığını, T4; ısı emici kanatçık uç noktasını ifade etmektedir.

Dört farklı ısı borusu çapına sahip modelde belirlenen noktasal sıcaklıklara göre maksimum sıcaklık değeri, LED birleşme noktasına en yakın ölçüm yeri olan T1 lehim noktasında elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere 8 mm ısı borusu çapında T1 noktası sıcaklığı 80.9 °C olmuştur. 10, 12 ve 14 mm boru çaplarında T1 noktası sıcaklıkları sırasıyla 77.2, 72.8 ve 74.3 °C olarak belirlenmiştir. 8 mm'den 12 mm'ye kadar boru çapındaki artışla birlikte T1 noktası sıcaklığı azalmış, 14 mm boru çapında ise artmıştır.

Noktasal sıcaklık değerleri incelendiğinde T1 lehim noktası ile T2 ısı borusu evaporatör bölgesi sıcaklığı arasındaki en düşük farkın 12 mm boru çapında 13.5 °C olduğu görülmektedir. Bu değer 8, 10 ve 14 mm boru çaplarında sırasıyla 21.4, 16.4 ve 23.8 °C olmuştur. Ayrıca ısı borusu evaporatör ve kondenser bölgelerinde elde edilen sıcaklıklar (T2-T3) arasındaki fark 14 mm boru çapında diğer çaplara kıyasla daha büyük oranda azalmaktadır. Mevcut tasarım ve çalışma şartlarda ısı borusundaki faz değişimi veya bir başka ifadeyle ısı transferinin, 14 mm boru çapı için yetersiz kaldığı görülmektedir.

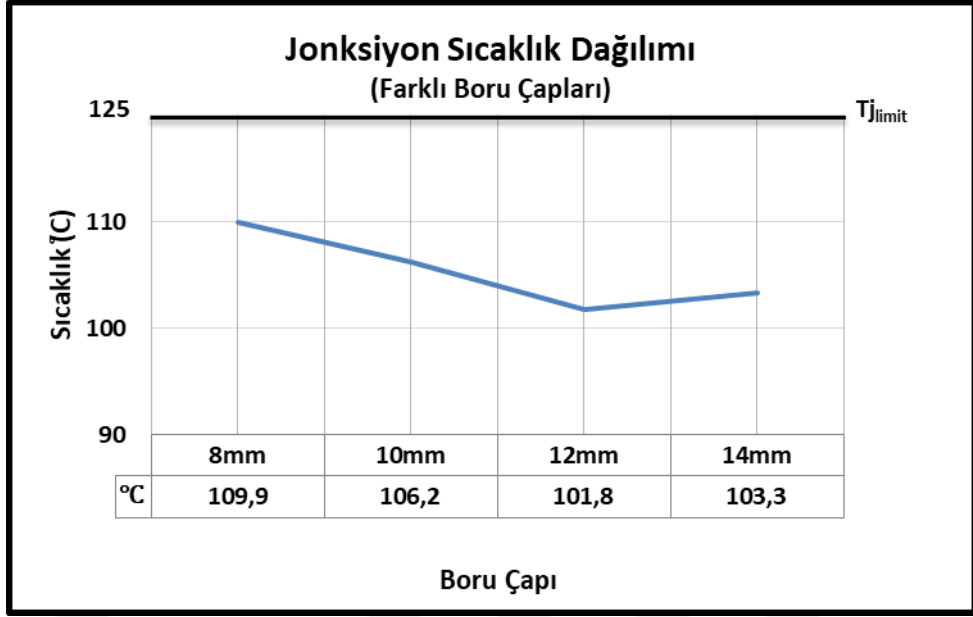
Isı borulu soğutucu ünitenin farklı boru çaplarındaki simülasyon verileri ile hesaplanan LED jonksiyon sıcaklıkları Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Jonksiyon sıcaklıkları 8, 10, 12 ve 14 mm boru çapları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Belirlenen jonksiyon sıcaklıkları LED'ler için sınır değer olan 125 °C (T_{jlimit}) ile kıyaslanmıştır.



Şekil 4.12. Farklı ısı borusu çapları için noktasal sıcaklık değerleri.

Isı borusu çapının 8 mm olduğu durumda hesaplanan jonksiyon sıcaklığı 109.9 °C iken 10, 12 ve 14 mm boru çaplarında bu değer sırasıyla 106.2, 101.8 ve 103.3 °C olmuştur. Boru çapı 8 mm'den 10 mm'ye yükseldiğinde jonksiyon sıcaklığı 3.7 °C azalmıştır. Boru çapı 10 mm'de 12 mm'ye çıktığında jonksiyon sıcaklığında 4.4 °C düşüş görülmüştür. Fakat boru çapı 12 mm'den 14 mm'ye yükseldiğinde jonksiyon sıcaklığı 1.5 °C artmıştır.

Dört farklı ısı borusu çapında da 100 Watt LED giriş gücü için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları, LED sınır sıcaklık değerinin altındadır. Aynı zamanda en düşük jonksiyon sıcaklığı, ısı borusu çapının 12 mm olduğu durumda elde edilmiştir. Ancak 12 mm'den itibaren ısı borusu çapındaki artış, jonksiyon sıcaklığının yükselmesine neden olmuştur. Sonuç olarak mevcut tasarım boyutları için en ideal ısı borusu çapının 12 mm olduğu görülmektedir.

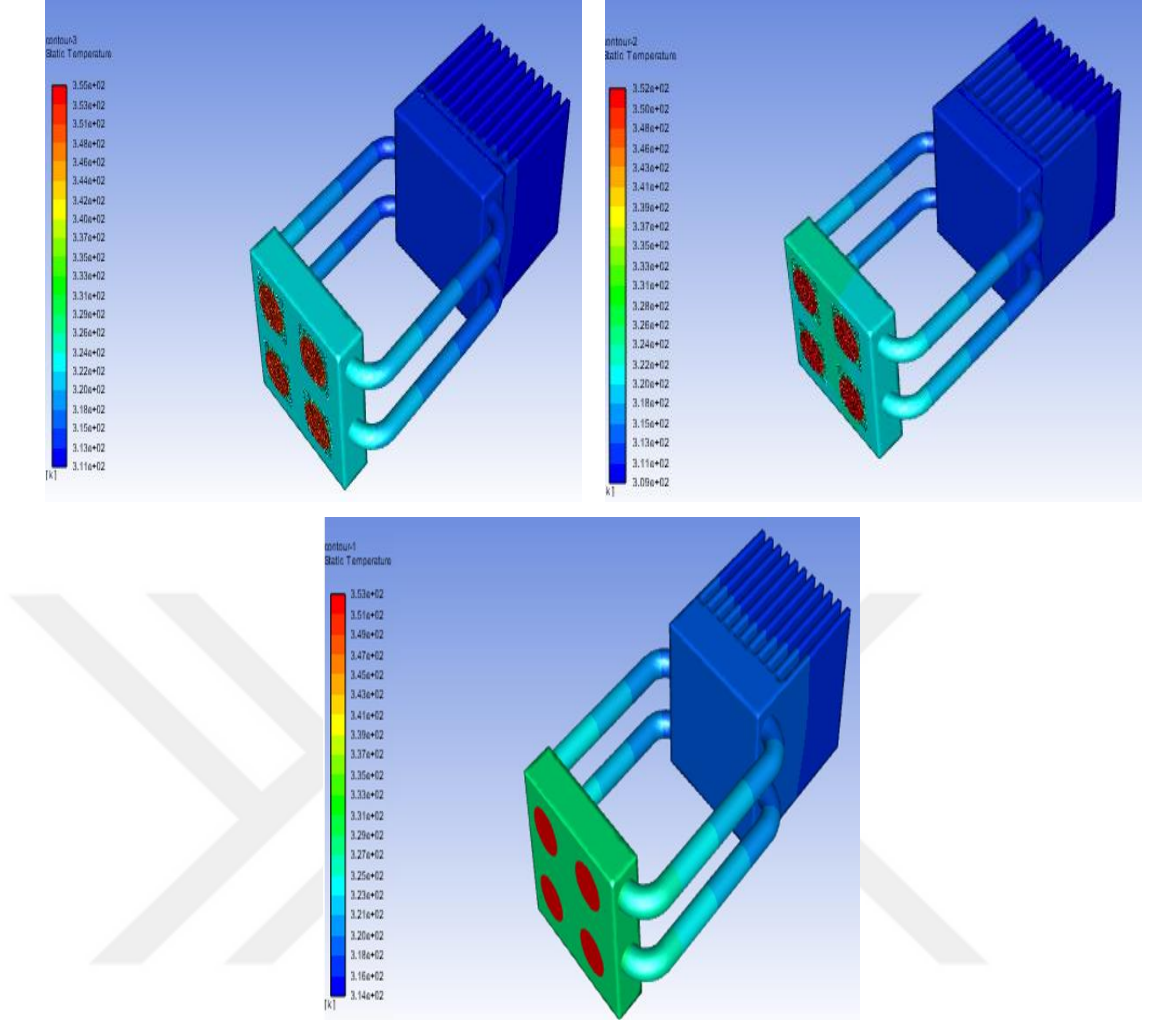


Şekil 4.13. Farklı boru çapları için ısı borulu soğutucudaki jonksiyon sıcaklıkları.

4.2.2 100 Watt LED gücünde kanatçık boyutunun soğutma performansına etkisi

Isı borusu ve ısı emici kanatçıktan oluşan modeldeki farklı kanatçık uzunlukları için elde edilen sıcaklık dağılım görselleri Şekil 4.14’de verilmiştir. Isı borulu soğutucu modeldeki ısı emici kanatçıklar 48, 56 ve 62 mm olmak üzere üç farklı uzunlukta tasarlanmıştır. Analizler süresince LED’ler 100 Watt giriş gücünde çalıştırılmıştır. Üç farklı modelin görselleri incelendiğinde en yüksek sıcaklık değerleri LED’lerin merkezinde görülmüştür. 48 mm kanatçık uzunluğunda 82.9 °C olan maksimum sıcaklık değeri 56 ve 62 mm kanatçık uzunluklarında sırasıyla 81.9 °C ve 81.6 °C olmuştur. Görseller incelendiğinde kanatçık uzunluğundaki değişimin, maksimum sıcaklık değerlerinde önemli bir farklılığa neden olmadığı görülmektedir.

Farklı kanatçık uzunluğu için modellerdeki sıcaklık dağılımına bakıldığında simülasyon görsellerinde, ısı kaynağı olan LED’lerden uzaklaştıkça sıcaklığın düştüğü görülmektedir. Sıcaklık renk dağılımına bakıldığında ısı borusunun LED’lere en yakın bölgesi olan evaporatörden başlayarak adyabatik bölge, kondenser bölgesi ve kanatçığa doğru kademeli olarak sıcaklık azalmaktadır. Böylelikle üç farklı kanatçık uzunluğunda da modeller üzerinde minimum sıcaklık değerleri kanatçık uç noktasında belirlenmiştir.

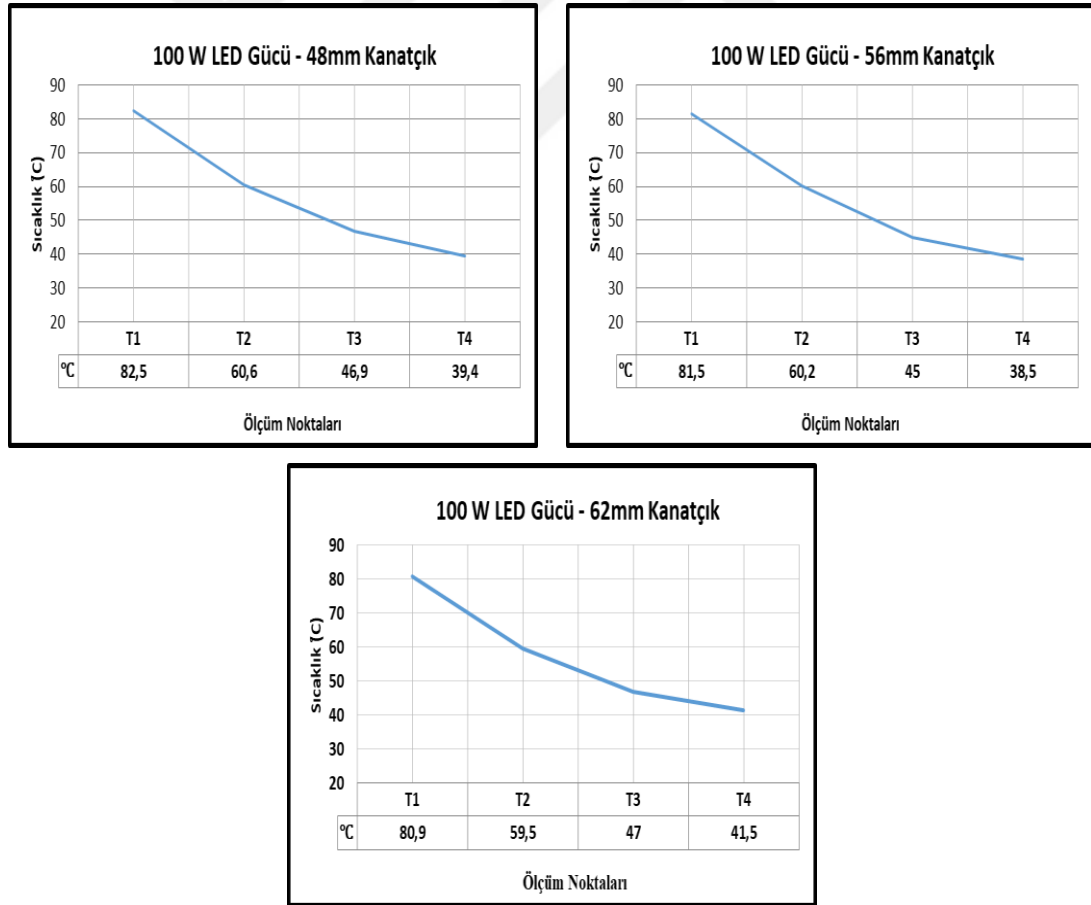


Şekil 4.14. 48, 56 ve 62 mm kanatçık uzunlukları için ısı borulu soğutucu üniteye sıcaklık dağılımı.

Farklı kanatçık uzunlukları için nümerik çalışmada bulunan noktasal sıcaklık değerleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Üç farklı kanatçık uzunluğu için daha önce belirlenen dört noktanın (T1,T2,T3,T4) sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Grafikteki T1; LED lehim noktasını, T2; ısı borusu evaporatör bölgesini, T3; ısı borusu kondenser bölgesini, T4; kanatçık uç noktasını ifade etmektedir. Isı borulu soğutucu model 100 W LED giriş gücünde 48, 56 ve 62 mm kanatçık uzunlukları için çalıştırılmıştır.

Üç farklı kanatçık uzunluğunda tasarlanan modelde elde edilen noktasal sıcaklıklar incelendiğinde maksimum sıcaklık değerleri, tüm kanatçık uzunlukları için LED birleşme noktasına en yakın ölçüm bölgesinde (T1) elde edilmiştir. 48 mm kanatçık uzunluğunda T1 noktası sıcaklığı 82.5 °C olmuştur. 56 mm ve 62 mm kanatçık

uzunluklarında T1 noktası sıcaklıkları sırasıyla 81.5 °C ve 80.9 °C olarak belirlenmiştir. Kanatçık uzunluğu 48 mm'den 56 mm'ye artırıldığında T1 noktası sıcaklığı 1 °C azalmıştır. Aynı zamanda kanatçık uzunluğunun 56 mm'den 62 mm'ye yükseldiğinde T1 noktası sıcaklığı 0.6 °C azalmıştır. Bu verilere göre kanatçık uzunluğu arttıkça T1 noktası sıcaklığının azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde T2 noktasında elde edilen sıcaklıklar karşılaştırıldığında 48 mm kanatçık uzunluğunda T2 noktası sıcaklığı 60.6 °C iken bu değer 56 mm ve 62 mm kanatçık uzunluklarında sırasıyla 60.2 °C ve 59.5 °C olmuştur. Kanatçık uzunluğundaki artış, T2 noktası sıcaklığında küçük de olsa bir azalışa neden olmuştur. Ayrıca T1 LED lehim noktası ile LED'lere en uzak bölge olan kanatçık uç noktaları arasındaki sıcaklık farkları karşılaştırıldığında 48 mm kanatçık uzunluğu için bu değer 43.1 °C'dir. Bahse konu iki nokta arasındaki sıcaklık farkı 56 mm ve 62 mm kanatçık uzunlukları için sırasıyla 43 °C ve 39.4 °C olmuştur. Bu bağlamda kanatçık uzunluğu arttıkça LED'lere en yakın ve en uzak ölçüm noktaları arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır.

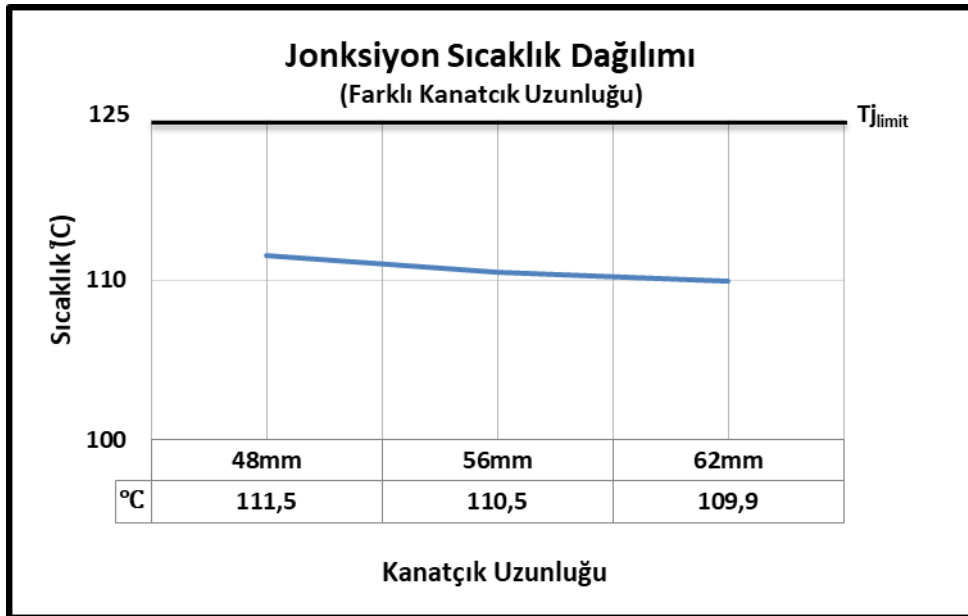


Şekil 4.15. Farklı kanatçık uzunluklarındaki noktasal sıcaklık değerleri.

Isı borulu soğutucu ünitenin farklı kanatçık uzunluklarındaki simülasyon verilerine göre hesaplanan LED jonksiyon sıcaklıkları Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Jonksiyon sıcaklıkları 48, 56 ve 62 mm kanatçık uzunlukları için hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde belirlenen jonksiyon sıcaklıkları, LED’ler için sınır değer olan 125 °C ($T_{j\text{limit}}$) ile karşılaştırılmıştır.

Kanatçık uzunluğunun 48 mm olduğu model için hesaplanan jonksiyon sıcaklığı 111.5 °C iken 56 mm ve 62 mm kanatçık uzunluklarında bu değer sırasıyla 110.5 °C ve 109.9 °C olmuştur. Kanatçık uzunluğu 48 mm’den 56 mm’ye arttığında jonksiyon sıcaklığı 1 °C azalmıştır. Kanatçık uzunluğu 56 mm’den 62 mm’ye yükseldiğinde ise jonksiyon sıcaklığında 0.6 °C düşüş görülmüştür. Sonuç olarak kanatçık uzunluğunun artması jonksiyon sıcaklığında azalışa neden olmuştur.

100 Watt LED giriş gücünde üç farklı kanatçık uzunluğu için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları, tasarımda kullanılan LED’lerin limit sıcaklık değeri olan 125 °C’den daha düşüktür. Modeller arasındaki en düşük jonksiyon sıcaklığı 62 mm uzunluğunda kanatçığa sahip olan modelde elde edilmiştir. Ancak kanatçık uzunluğundaki değişimin LED jonksiyon sıcaklığında büyük bir değişime neden olmadığı görülmüştür. Sonuçta analiz edilen soğutucu modeller içinde en ideal kanatçık boyutu 62 mm olmuştur.



Şekil 4.16. Farklı kanatçık uzunlukları için ısı borulu soğutucudaki jonksiyon sıcaklıkları.

4.4.3 100 Watt LED gücü için bakır malzeme kullanımında soğutucu performansı

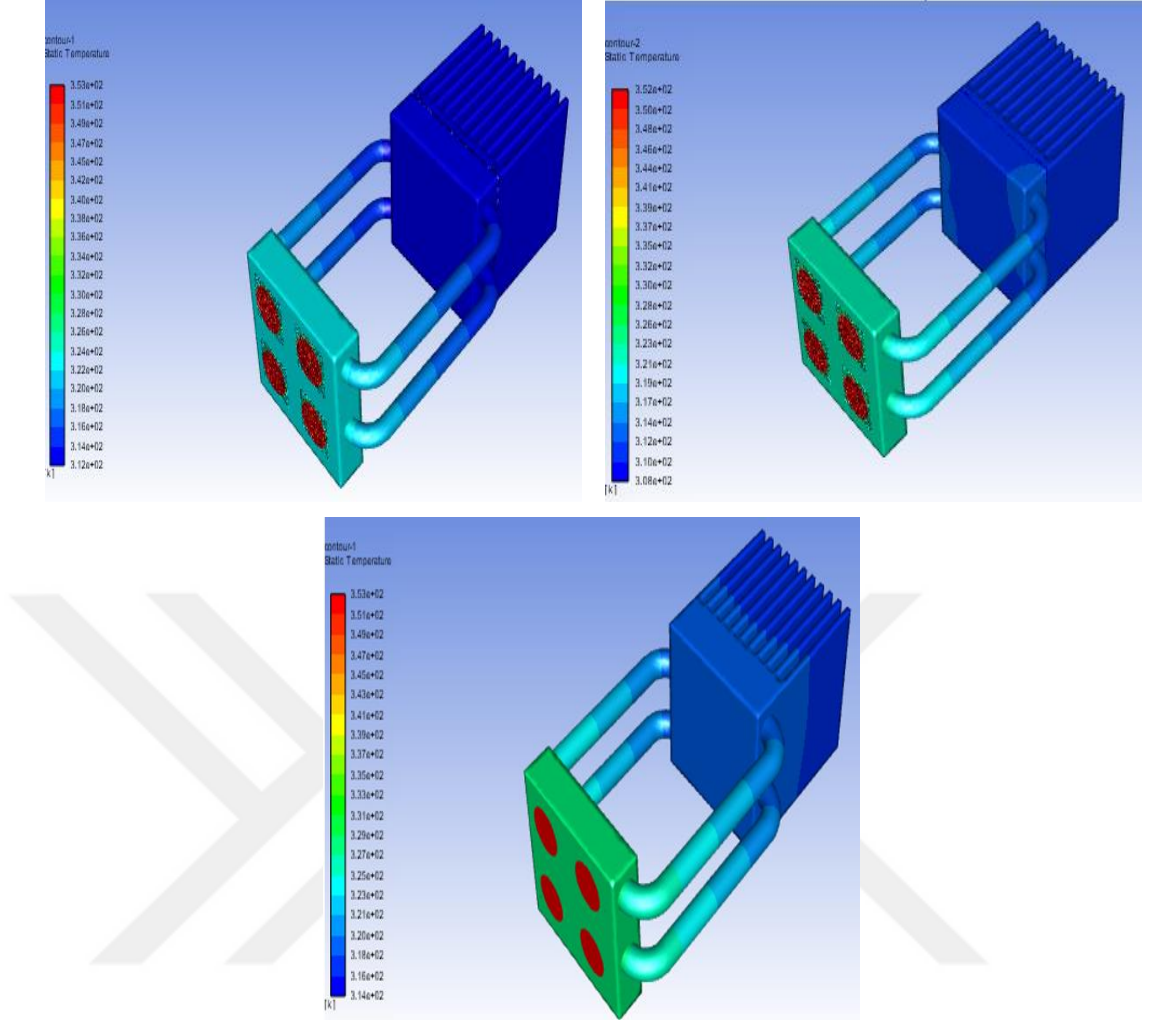
Isı borusu ve ısı emici kanatçıktan oluşan modelin farklı kısımlarında kullanılan malzeme türlerinde elde edilen sıcaklık dağılım görselleri Şekil 4.17’de verilmiştir. Prototipi üretilen ısı borulu soğutucu modelde alüminyum malzemedan imal edilen ısı emici taban ve kanatçığın malzeme türü değiştirilerek 100 Watt LED giriş gücündeki soğutma performansı incelenmiştir.

Modelde öncelikle alüminyum malzeme olarak tasarlanan kanatçık malzemesi bakır malzeme olarak değiştirilmiştir. Bakır kanatçıklı modelin görseli incelendiğinde en yüksek sıcaklık değeri LED’lerin merkezinde 80 °C olarak elde edilmiştir. Alüminyum kanatçıklı modelle kıyaslandığında maksimum sıcaklık değerinde önemli bir farklılık görülmemiştir.

Ayrıca modelde alüminyum olan ısı emici taban bakır malzeme olarak değiştirilmiştir. Isı emici tabanlı bakır olan modelde maksimum sıcaklık değeri 79 °C olarak LED’lerin merkezinde görülmektedir. Alüminyum ısı emici tabanlı model ile kıyaslandığında maksimum sıcaklık değerlerinde önemli bir farklılık oluşmamıştır.

Farklı malzeme türlerine sahip modellerde minimum sıcaklık değeri, LED’lere en uzak bölge olan kanatçık uç noktasında elde edilmiştir. Alüminyum malzeme kullanılan modelde kanatçık uç noktası sıcaklığı 41 °C iken bu değer bakır kanatçıklı modelde 39 °C, bakır ısı emici tabanlı modelde 35 °C olmuştur. Üç model kıyaslandığında en düşük kanatçık uç noktası sıcaklığı bakır ısı emici tabanlı modelde elde edilmiştir.

Modellerdeki sıcaklık renk dağılımlarına bakıldığında bakır kanatçıklı modelde ısı borusu kondenser bölgesi ile kanatçık uç noktasındaki sıcaklıkların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bakır ısı emici tabanlı model görseli incelendiğinde LED lehim noktası ile ısı borusu evaporatör bölgesi sıcaklıklarının çok yakın değerler olduğu görülmektedir. Bakır malzemenin ısı iletim katsayısının alüminyum malzemeye göre yüksek olması, bu bölgelerdeki ısı iletiminin artmasını sağlamıştır.



Şekil 4.17. Bakır kanatçık, bakır ısı emici taban ve model için ısı borulu soğutucudaki sıcaklık dağılımı.

Isı borulu soğutucu ünitadaki farklı malzeme türleri için nümerik çalışmada bulunan noktasal sıcaklık değerleri Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Üretimi yapılan soğutucu modele ek olarak farklı malzeme türlerinden oluşan modellerde belirlenen dört noktanın (T1,T2,T3,T4) sıcaklık değerleri alınmıştır. Verilerden oluşturulan grafikteki T1; LED lehim noktasını, T2; ısı borusu evaporatör bölgesini, T3; ısı borusu kondenser bölgesini, T4; kanatçık uç noktasını ifade etmektedir. Farklı malzeme türlerinden oluşan ısı borulu soğutucu modeller 100 W LED giriş gücünde çalıştırılmıştır.

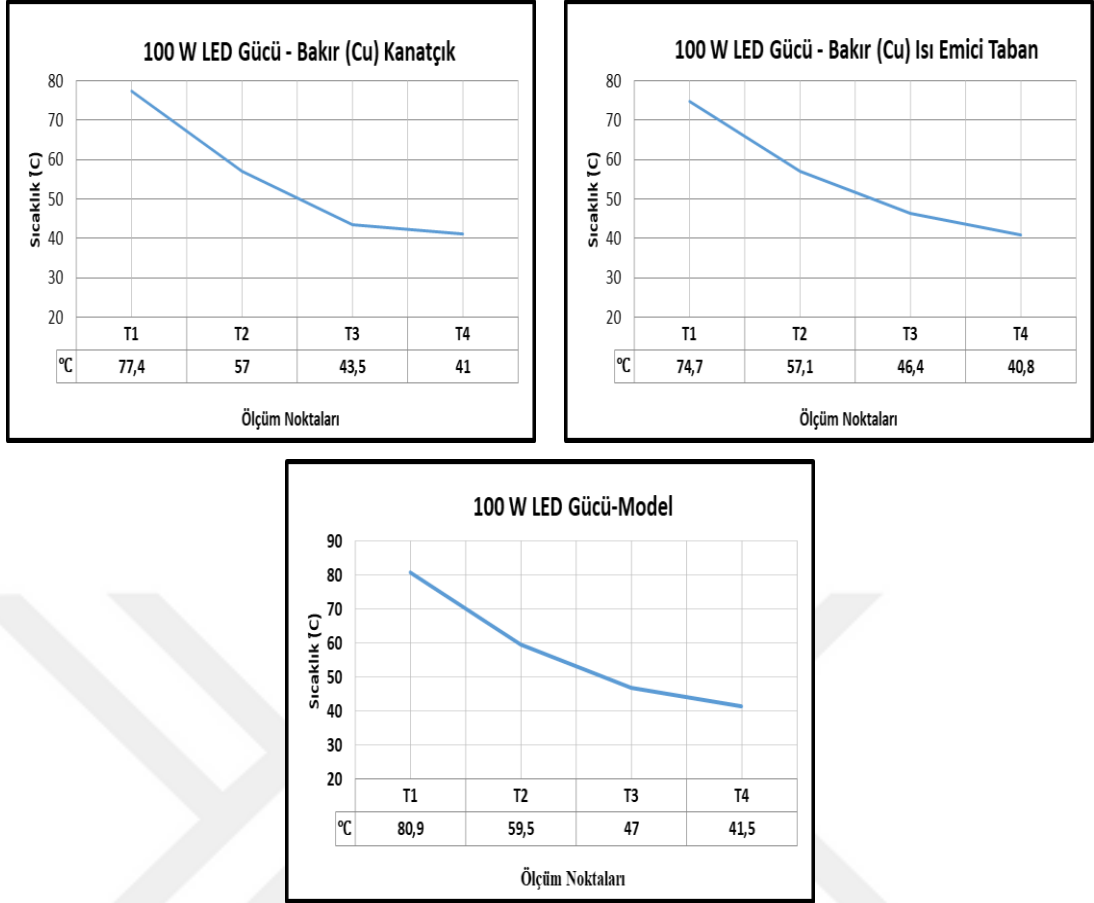
Farklı malzeme türleri kullanılan modellerde elde edilen noktasal sıcaklık değerlerine bakıldığında en yüksek sıcaklık değerleri T1 lehim noktasında tespit edilmiştir. Isı emici taban ve kanatçık malzemesi alüminyum olan modelde T1 lehim noktası

sıcaklığı 80.9 °C olarak belirlenmiştir. Bu değer bakır kanatçıklı model için 77.4 °C, ısı emici tabanı bakır olan model için ise 74.7 °C olmuştur. Prototipi üretilen modeldeki kanatçık malzemesi alüminyum yerine bakır seçildiğinde T1 noktası sıcaklığı 3.5 °C azalmıştır. Yine prototipi üretilen soğutucu modelde alüminyum olan ısı emici taban malzemesi bakır malzemeye değiştirildiğinde T1 noktası sıcaklığı 6.2 °C azalmıştır.

LED'lere en yakın ve en uzak ölçüm noktaları olan T1 ve T4 sıcaklık değerleri arasındaki farka bakıldığında prototipi imal edilen modelde sıcaklık farkı 39.4 °C'dir. Bakır kanatçıklı modelde T1 ve T4 noktaları arasındaki sıcaklık farkı 36.4 °C iken, bakır ısı emici tabanlı modelde ise bu değer 33.9 °C olmuştur.

Ayrıca soğutucu modelde bakır malzeme kullanılan kısımlardaki sıcaklık farkları incelendiğinde ısı emici tabanı alüminyum malzemeden oluşan tasarımda T1 ve T2 noktaları arasındaki sıcaklık farkı 21.4 °C iken, aynı kısmı bakır malzemeden oluşan tasarımda bu değer 17.6 °C'ye düşmektedir. Yine kanatçık malzemesi alüminyum olan tasarımda T3 ve T4 noktaları arasındaki sıcaklık farkı 5.5 °C iken, aynı bölümü bakır malzemeden oluşan tasarımda bu değer 2.5 °C'ye düşmüştür. Sonuç olarak alüminyum yerine bakır malzeme kullanılan bölgelerde soğutucu modül üzerinde daha etkin ısı transferi gerçekleştiği görülmektedir.

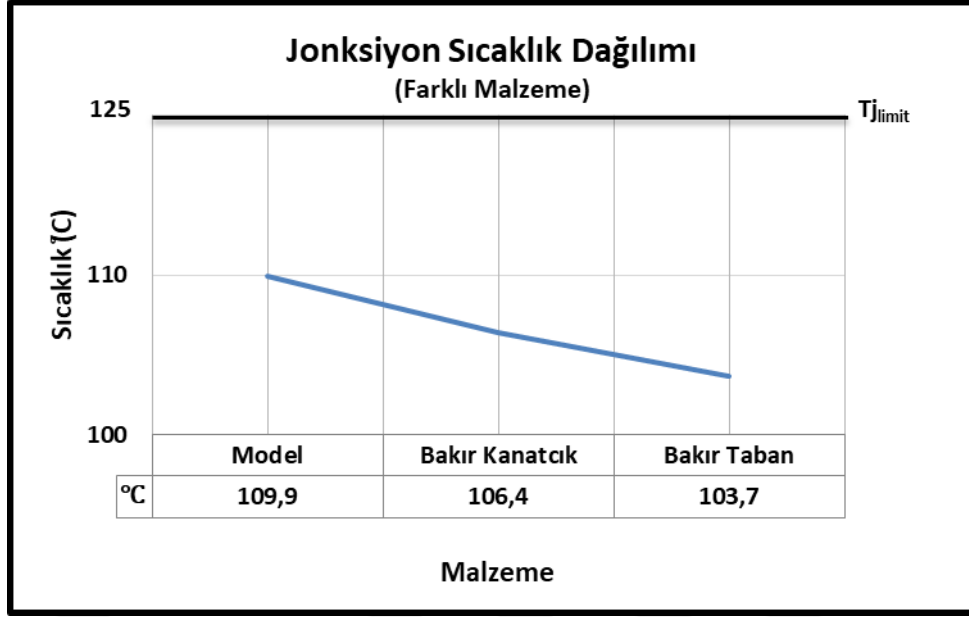
Isı borulu soğutucu ünitenin farklı malzemelerden oluşan simülasyon verilerine göre hesaplanan LED jonksiyon sıcaklıkları Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Prototipi imal edilen model, bakır kanatçıklı model ve bakır ısı emici kanatçıktan oluşan modeller için jonksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. Elde edilen jonksiyon sıcaklıkları LED'ler için sınır değer olan 125 °C ($T_{j\text{limit}}$) ile kıyaslanmıştır.



Şekil 4.18. Farklı malzeme türlerindeki noktasal sıcaklık değerleri.

Prototipi imal edilen model için hesaplanan jonksiyon sıcaklığı 109.9 °C olmuştur. Kanatçık malzemesi bakır olan modelin jonksiyon sıcaklığı 106.4 °C olarak hesaplanmışken, ısı emici taban malzemesi bakır olan modelde bu değer 103.7 °C olarak hesaplanmıştır. Prototipi üretilen modelde alüminyum olan kanatçık malzemesinin bakır ile değişimi jonksiyon sıcaklığında 3.5 °C azalış sağlamıştır. Yine prototipi imal edilen modelde alüminyum olan ısı emici taban malzemesinin bakır seçilmesi jonksiyon sıcaklığını 6.2 °C azaltmıştır.

Malzeme türlerinin değiştirildiği modellerin 100 Watt LED giriş gücünde elde edilen veriler ışığında hesaplanan jonksiyon sıcaklıklarının, LED'lerin sınır sıcaklık değeri olan 125 °C'den daha düşük olduğu görülmektedir. En düşük jonksiyon sıcaklığı ısı emici taban malzemesinin bakır olduğu modelde tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra kanatçık malzemesinin bakır olduğu modelde de jonksiyon sıcaklığında dikkate değer bir azalış görülmektedir.



Şekil 4.19. Farklı malzeme türleri için ısı borulu soğutucuda jonksiyon sıcaklıkları.

4.3 Hibrit Soğutma Ünitesi Verimi

Çalışmanın bu bölümünde dörtlü LED yongasını soğutmak için iki farklı soğutucu sistemi bünyesinde barındıran hibrit soğutma ünitesinde ısı borusu ve termoelektrik modül birlikte kullanılmıştır. Hibrit soğutma ünitesinin soğutma performansı ısı borusu öncelikli ve termoelektrik modül öncelikli olmak üzere iki farklı tasarım için deneysel ve nümerik analizler yapılarak kıyaslanmıştır.

Termoelektrik modüller son derece hassas cihazlardır. Bu nedenle hibrit soğutma ünitesinde kullanılan termoelektrik modülün sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı için limit değer, çalışmayı sınırlandıran önemli bir faktör olmuştur. Kullanılan termoelektrik modül için bu değer 67 °C'dir. Çalışmayı sınırlandıran bir diğer faktör ise LED'lerin sınır jonksiyon sıcaklığı olan 125 °C'dir.

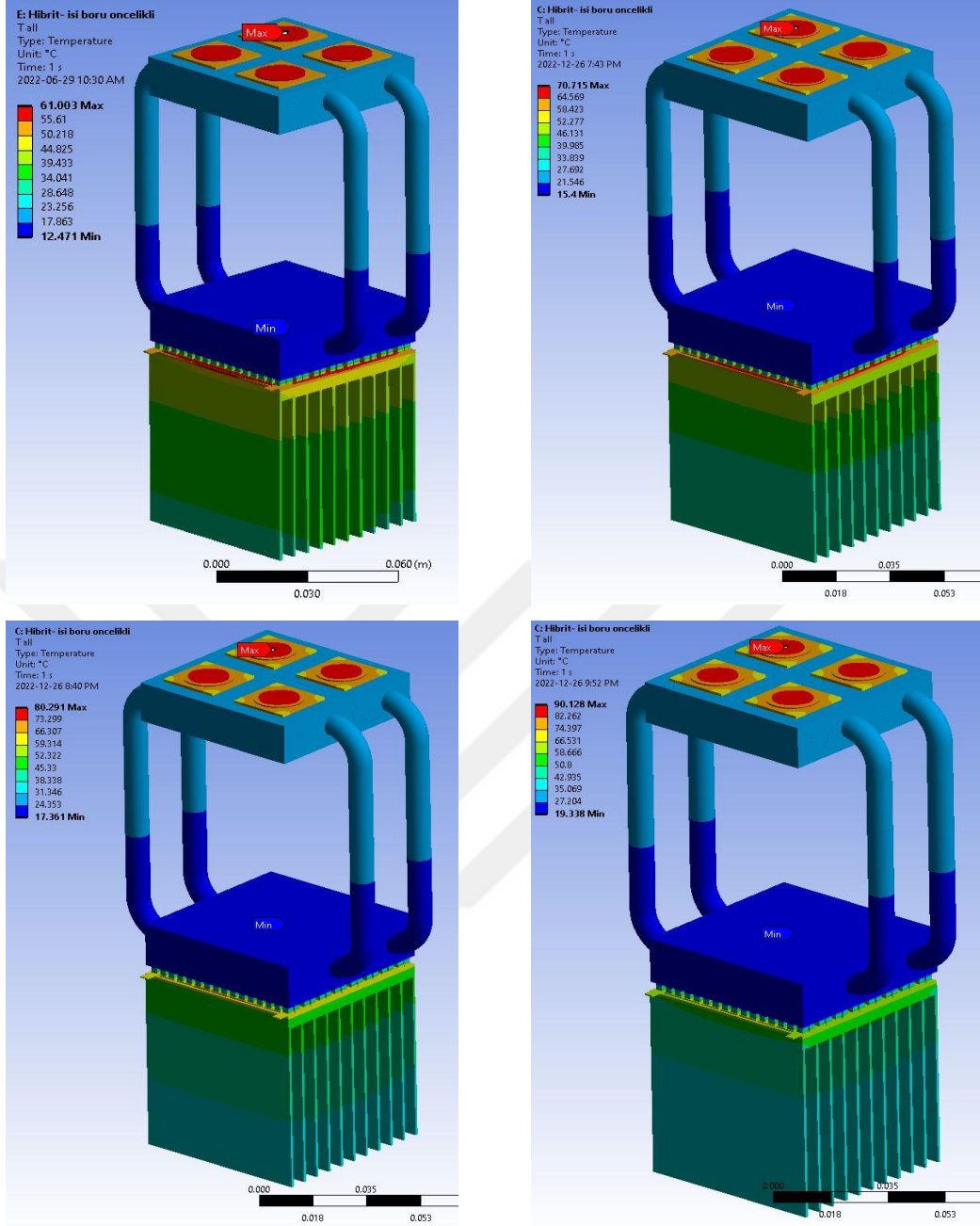
Bu bölümde LED yongası 80, 100, 120 ve 140 Watt olmak üzere dört farklı giriş gücünde çalıştırılmıştır. Tüm LED giriş güçleri için termoelektrik modül 4 Volttan 10 Volta kadar kademeli olarak yedi farklı ileri voltaj girişinde çalıştırılmıştır. Çalışma süresince dış ortam sıcaklığı 25 °C olarak sabit tutulmuştur. Deneysel ölçüm ve nümerik analizler neticesinde elde edilen noktasal sıcaklık değerleri kıyaslanarak sistem doğrulaması yapılmıştır.

4.3.1 Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu

Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu modelin ANSYS programı kullanılarak 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde çalıştırılmasıyla elde edilen simülasyon görselleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Dört farklı LED giriş gücünde de en yüksek sıcaklık değeri LED’lerin merkezi olan birleşme noktasında görülmektedir. Birleşme noktasının LED’lerde ısının açığa çıktığı yer olması maksimum sıcaklığın bu bölgede elde edilmesine neden olmuştur. 80 Watt LED giriş gücü için ısı borusu öncelikli hibrit soğutma ünitesinde belirlenen maksimum sıcaklık değeri 61 °C iken bu değer 100 Watt LED giriş gücünde 70.7 °C olmuştur. 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde ise maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 80.3 °C ve 90.1 °C olarak belirlenmiştir. LED giriş gücündeki her 20 Watt’lık artışta modeldeki maksimum sıcaklık değerinin yaklaşık 10 °C yükseldiği görülmektedir. Bu bağlamda LED giriş gücü ve ışık akısındaki artış LED birleşme noktasında açığa çıkan ısıyı da arttırmaktadır.

Simülasyon görselleri incelendiğinde dört farklı LED giriş gücü için model üzerindeki en düşük sıcaklık değeri ısı borusu kondenser ve termoelektrik modül soğuk yüzeyinin bulunduğu bölgede tespit edilmiştir. 80 Watt LED giriş gücünde 12.5 °C olan minimum sıcaklık değeri 100 Watt LED giriş gücünde 2.9 °C artarak 15.4 °C’ye yükselmiştir. 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde ise en düşük sıcaklık değerleri sırasıyla 17.4 °C ve 19.3 °C olmuştur. LED giriş gücündeki artışa bağlı olarak termoelektrik modül soğuk yüzeyi ve ısı borusu kondenser kısmının bulunduğu bölgedeki sıcaklık değeri de artmaktadır.

Ayrıca maksimum sıcaklığın görüldüğü LED’lerden uzaklaştıkça termoelektrik modül soğuk yüzeyine kadar sıcaklığın azaldığı görülmektedir. Soğutucu modelin devam ettiği kısımda termoelektrik modülün alt yüzeyinde sıcaklık artmış, kanatçık uç noktasına doğru uzaklaştıkça noktasal sıcaklık değeri tekrar azalmıştır.



Şekil 4.20. 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için hibrit soğutucu ünite sıcaklık dağılımı (Isı borusu öncelikli).

Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite simülasyonunda 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için elde edilen noktasal sıcaklık değerleri Çizelge 4.5’de görülmektedir. Soğutucu modeldeki termoelektrik modül 4 Volttan 10 Volta kadar yedi farklı giriş voltajında kademeli olarak çalıştırılmıştır. Belirtilen dört farklı LED giriş gücü ve yedi farklı peltier ileri voltaj değerleri için daha önce belirlenen dört noktanın (T1,T2,T3,T4) sıcaklık değerleri tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5. Hibrit soğutucu (Isı borusu öncelikli) noktasal sıcaklık değerleri (Simülasyon).

Hibrit Soğutma Ünitesi (Isı Borusu Öncelikli) Noktasal Sıcaklık Değerleri (Simülasyon)								
80 Watt					100 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	53,9	23,3	18,6	35,6	62,6	27,9	22,8	36,1
5	52,8	21,8	17	38,9	61,4	26,4	21,1	39,6
6	52,4	21,3	16,2	42,5	60,9	25,4	19,8	43,1
7	52,1	21,1	16,1	46,4	60,5	24,9	19,2	47,1
8	52	20,8	15,9	50,5	60,2	24,8	19,2	51
9	52,5	21,4	17	54,9	60,7	25,8	20,5	55,8
10	53,4	23,4	19,2	59,3	61,6	27,6	22,3	60,2
120 Watt					140 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	74,8	32	25,9	36,5	83,8	34,5	28,3	36,7
5	72	30,4	24	40	82,6	33	26,4	39,8
6	70,4	29,2	22,7	43,5	82	32,1	25,5	43,4
7	69,8	28,5	21,9	47,3	81,6	31,5	24,7	47,5
8	69,5	28	21,7	51,4	81,5	31,3	24,3	51,8
9	70,2	28,6	22,3	56,4	82,1	31,8	25,3	57
10	71,5	30,5	24,4	61,3	83,2	33,8	27,8	62

Nümerik analiz neticesinde belirlenen noktasal sıcaklık değerlerine ait veriler Şekil 4.21’de görülmektedir. Dört farklı LED giriş gücünde de maksimum sıcaklık değeri T1 lehim noktasında tespit edilmiştir. Fakat 80 Watt LED giriş gücünde 9 ve 10 volt peltier ileri voltaj değerlerinde T4 peltier alt yüzeyinde T1 lehim noktasına göre daha yüksek sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Peltier ileri voltaj değerindeki artışın sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkını da artırması, maksimum sıcaklık değerinin bu bölgede görülmesine neden olmuştur. Genel itibariyle tüm LED giriş güçlerinde T1 lehim noktasına en yakın sıcaklık değeri T4 noktasında görülmektedir.

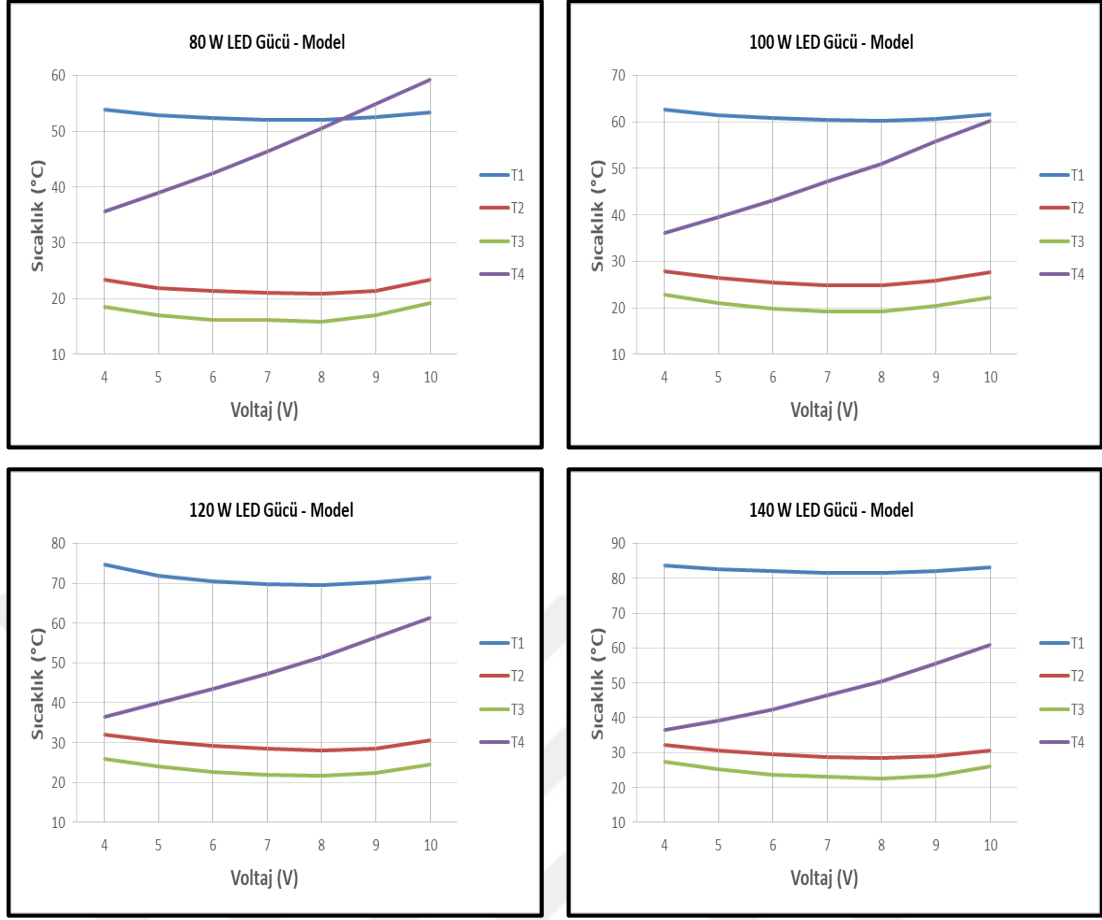
Özellikle peltierin ileri voltaj değeri attıkça T1 ve T4 noktaları arasındaki sıcaklık farkı hızla azalmaktadır.

80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinin tamamında en düşük T1 lehim noktası sıcaklık değeri, 8 Volt peltier besleme geriliminde elde edilmiştir. 80 Watt LED giriş gücünde minimum T1 noktası sıcaklığı 52 °C olurken bu değer 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde sırasıyla 60.2, 69.5 ve 81.5 °C olmuştur. Görüldüğü üzere LED giriş gücündeki artış T1 lehim noktası sıcaklığında artışa neden olmuştur.

Noktasal sıcaklık değerlerinin LED giriş gücüne bağlı değişim oranlarına bakıldığında diğer ölçüm noktalarına göre en yüksek sıcaklık değişimi T1 noktasında belirlenmiştir. 80 Watt LED giriş gücünden başlayarak giriş gücündeki her 20 Watt'lık artışta T1 noktası sıcaklığı ortalama 10 °C artarken T2, T3 ve T4 noktalarındaki artış sırasıyla 3.5, 2.5 ve 0.5 °C olmuştur. Sistemin ısı kaynağı olan LED'lere en yakın konumdaki T1 noktası sıcaklık değişimi diğer noktalara göre daha fazla olmaktadır. LED'lerden uzaklaştıkça LED giriş gücündeki değişime bağlı olarak noktasal sıcaklık değerlerindeki değişim azalmaktadır.

Termoelektrik modülün sorunsuz çalışması için önemli olan sıcak ve soğuk yüzeyi arasındaki sıcaklık farkları incelendiğinde peltier besleme gerilimine bağlı olarak doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. 80 Watt LED giriş gücünde 4 Volt besleme gerilimi için peltier yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 17 °C iken bu değer 10 Volt peltier besleme geriliminde 40.1 °C'ye yükselmiştir. 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde de benzer artışlar görülmektedir.

Ayrıca grafiklerde görüldüğü üzere dört farklı LED giriş gücü için peltier besleme gerilimi arttıkça, 4 Volttan 8 Volta kadar T1, T2 ve T3 noktasal sıcaklık değerleri azalmaktadır. 8 Volttan itibaren peltier besleme geriliminin artışıyla birlikte T1, T2 ve T3 noktalarındaki sıcaklık değerlerinde de artış görülmektedir. Peltier alt yüzey sıcaklığı (T4) ise tüm LED giriş güçleri için peltier besleme gerilimindeki her bir voltajlık artışta ortalama 4 °C yükselmiştir.



Şekil 4.21. Farklı LED ve peltier güç girişleri için sıcaklık değerleri (Model).

Tasarlanan ısı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite prototipi üretilerek 25 °C ortam sıcaklığına sahip laboratuvar ortamında test edilmiştir. Soğutma ünitesi üzerinde daha önce belirlenen dört noktaya (T1,T2,T3,T4) sıcaklık değerlerini ölçmek amacıyla ısıl çiftler yerleştirilmiştir. Isı borusu, termoelektrik modül ve ısı emici kanatçıktan oluşan soğutucu ünite üzerindeki deneysel ölçümlerde elde edilen noktasal sıcaklık değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan termoelektrik modül dört farklı LED giriş gücü için (80, 100, 120, 140 W) 4 Volttan başlayarak 10 Volta kadar ileri voltajla kademeli olarak çalıştırılmıştır. Noktasal sıcaklık değerleri iki saniye aralıklarla bir saat boyunca kaydedilmiştir. Böylelikle sistemin kararlı hale gelmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.6. Hibrit soğutucu (Isı borusu öncelikli) noktasal sıcaklık değerleri (Deney).

Hibrit Soğutma Ünitesi (Isı Borusu Öncelikli) Noktasal Sıcaklık Değerleri (Deney)								
80 Watt					100 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	54,5	23	17,9	36,2	64,9	28,7	23,9	35,5
5	52,2	21,5	15,8	38,7	63,4	27,3	22,2	38,8
6	51,4	20,4	15,2	42,8	62,2	26,4	21	42,2
7	51	20,3	15	46,6	61,5	26	20,6	46,4
8	50,6	19,9	14,9	51,1	61	25,7	20,4	50,8
9	51,5	21,7	16,3	55,3	61,2	26,5	21,2	55,4
10	53,9	23,8	18,9	60,4	61,5	28,4	23	60,5
120 Watt					140 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	76,7	32,3	27,4	36,4	89,1	34,9	27,8	35,3
5	74,2	30,5	25,2	39,1	87,6	33	25,9	38,3
6	72,7	29,5	23,7	42,3	86,5	31,8	24,5	42,2
7	72,2	28,7	23	46,3	85,9	30,8	23,6	46,3
8	71,6	28,4	22,6	50,5	85,3	30,5	23	50,4
9	72,3	29	23,5	55,5	85,8	31	24	55,6
10	72,9	30,6	26,1	60,9	87,1	32,8	26,4	61

Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu üniteye ait deneysel çalışmada elde edilen noktasal sıcaklık değerleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Deneyler süresince daha önce belirlenen T1, T2, T3 ve T4 ısı çift noktalarındaki sıcaklık değerleri alınmıştır. T1 ısı çift noktası LED lehim noktası sıcaklığını, T2 ısı çift noktası ısı borusu evaporatör bölgesini, T3 ısı çift noktası ısı borusu kondenser bölgesi ve peltier soğuk yüzeyini, T4 ısı çift noktası peltier sıcak yüzey ve kanatçık bölgesini ifade etmektedir. Soğutucu ünite 80, 100, 120 ve 140 Watt olmak üzere dört farklı giriş gücünde çalıştırılmıştır.

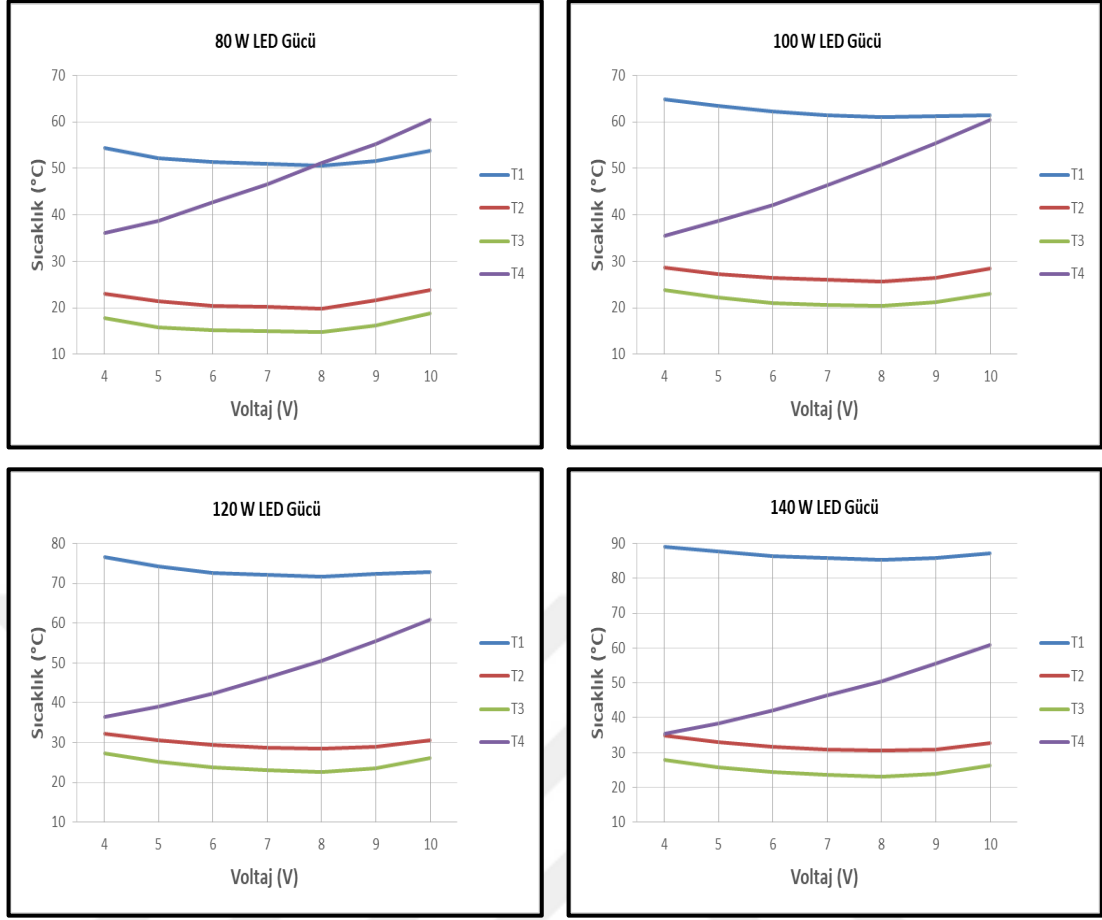
Deneyisel ölçümlere göre maksimum sıcaklık değeri nümerik çalışmada belirlenen değerlere benzer şekilde T1 ısı çift noktasında ölçülmüştür. Yalnızca 80 Watt LED giriş gücünde 8, 9 ve 10 Volt peltier besleme geriliminde maksimum sıcaklık T4 ısı çift noktasında ölçülmüştür. T1 ısı çift noktasından sonra en yüksek sıcaklık değeri peltier sıcak yüzeyinde bulunan T4 ısı çift noktasında ölçülmüştür. Tüm LED giriş güçlerinde peltier besleme gerilimi arttıkça T4 ısı çift noktasındaki sıcaklık değeri hızla artmıştır. Bu durum peltier besleme geriliminin artmasıyla birlikte T1 ve T4 ısı çift noktaları arasındaki sıcaklık farkının azalmasına neden olmuştur.

Tüm LED giriş güçleri için T1 lehim noktası sıcaklığı peltier besleme gerilimi 4 Volttan 8 Volta kadar artırıldıkça azalmakta, 8 Volttan itibaren 10 Volt peltier besleme gerilimine kadar tekrar artmaktadır. Bu bağlamda dört farklı LED giriş gücünde de minimum T1 lehim noktası sıcaklığı 8 Volt peltier besleme geriliminde ölçülmüştür. 80 Watt LED giriş gücünde en düşük T1 sıcaklığı 50.6 °C olurken 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde bu değer sırasıyla 61, 71.6 ve 85.3 °C'ye yükselmiştir. LED giriş gücünün artması, T1 ısı çift noktasındaki sıcaklığın da artmasına yol açmıştır.

LED giriş gücündeki artışa bağlı ısı çift noktalarındaki sıcaklık değişimi incelendiğinde en yüksek sıcaklık değişimi T1 ısı çift noktasında görülmektedir. En düşük LED giriş gücünden itibaren 20 Watt'lık güç artışlarında T1 noktasındaki sıcaklık yaklaşık 11 °C yükselirken T2, T3 ve T4 ısı çift noktalarında sıcaklık artışı sırasıyla 3.5, 2 ve 0.5 °C olmuştur. Sistemde ısının açığa çıktığı LED'lerden uzaklaştıkça noktasal sıcaklık değerlerindeki değişimin azaldığı görülmektedir.

Peltier sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı 80 Watt LED giriş gücü için 4 Volt peltier besleme geriliminde 18.3 °C iken bu değer 10 Volt peltier besleme geriliminde 41.5 °C'ye yükselmiştir. Diğer LED giriş güçlerinde de peltier besleme gerilimi arttıkça peltierin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı artmıştır.

Ayrıca grafiklere göre peltier besleme gerilimine bağlı olarak T1, T2 ve T3 ısı çift noktalarındaki sıcaklık değerleri tüm LED giriş güçlerinde 8 Volta kadar azalış eğilimindedir. Fakat 8 Volttan daha yüksek peltier besleme gerilimlerinde bu ısı çift noktalarındaki sıcaklıklar tekrar artışa geçmiştir. T4 ısı çift noktasında ise sıcaklık değeri her birim voltaj artışında yaklaşık 5 °C artış göstermektedir.



Şekil 4.22. Farklı LED ve peltier güç girişleri için sıcaklık değerleri (Deney).

80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde nümerik ve deneysel çalışmalarda belirlenen noktasal sıcaklık değerleri ve hata oranları Çizelge 4.7’de verilmiştir. LED jonksiyon sıcaklığını hesaplamada T1 lehim noktası sıcaklığı en önemli parametredir. Bu nedenle çizelge, tüm LED giriş güçlerinde noktasal sıcaklık değerleri elde edilen minimum T1 lehim noktası sıcaklığı dikkate alınarak hazırlanmıştır.

İki çalışma yönteminde elde edilen noktasal sıcaklık değerleri 80 Watt LED giriş gücü için karşılaştırıldığında ölçüm noktalarında birbirine çok yakın sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. En yüksek sıcaklık farkı T1 ölçüm noktasında 1.4 °C olarak belirlenmiştir. Yüzdesel olarak en yüksek hata oranı ise T3 noktasında % 6 olarak tespit edilmiştir.

100 Watt LED giriş gücündeki noktasal sıcaklık değerlerine bakıldığında T1, T2 ve T4 ölçüm noktalarında birbirine çok yakın sıcaklık değerleri görülmektedir. Dört

ölçüm noktası arasındaki en yüksek sıcaklık farkı T3 noktasında 1.2 °C olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak en yüksek hata oranı % 6 olarak T3 ölçüm noktasında elde edilmiştir.

120 Watt LED giriş gücünde tüm ölçüm noktalarında birbirine son derece yakın noktasal sıcaklık değerleri elde edilmiştir. İki yöntem arasında belirlenen maksimum sıcaklık farkı 2.1 °C olarak T1 ölçüm noktasında tespit edilmiştir. 120 Watt LED giriş gücü için en yüksek hata oranı ise T3 ölçüm noktasında % 4 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.7. Hibrit soğutucuda (Isı borusu öncelikli) farklı LED giriş güçleri için hata oranları.

80 Watt				100 Watt			
	Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı		Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı
T1	52	50,6	% 2	T1	60,2	61	% 1
T2	20,8	19,9	% 4	T2	24,8	25,7	% 3
T3	15,9	14,9	% 6	T3	19,2	20,4	% 6
T4	50,5	51,1	% 1	T4	51	50,8	% 1
120 Watt				140 Watt			
	Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı		Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı
T1	69,5	71,6	% 3	T1	81,5	85,3	% 4
T2	28	28,4	% 1	T2	31,3	30,5	% 2
T3	21,7	22,6	% 4	T3	24,3	23	% 5
T4	51,4	50,5	% 1	T4	51,8	50,4	% 2

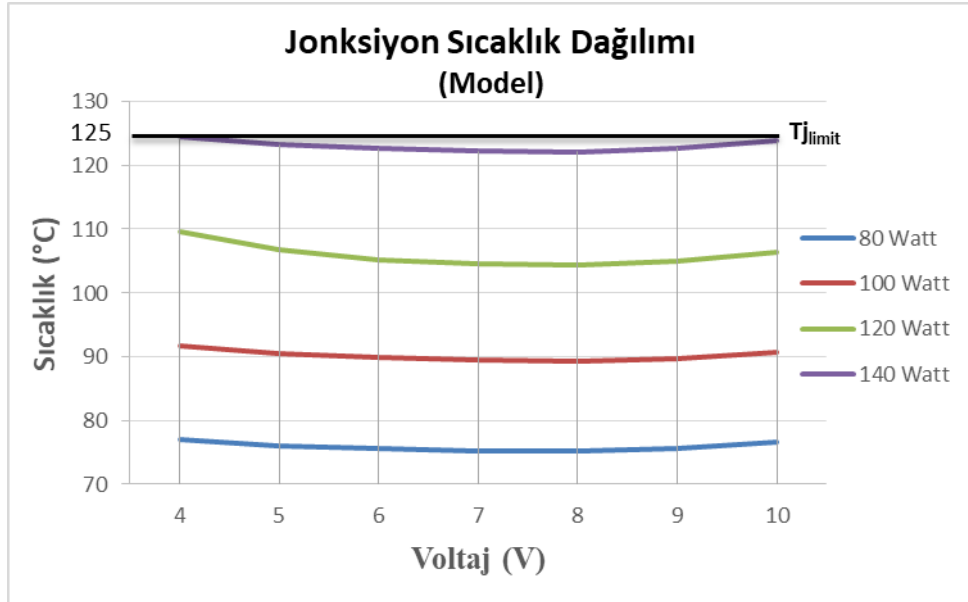
Çalışmadaki en yüksek LED giriş gücü olan 140 Watt için elde edilen noktasal sıcaklıklara bakıldığında en yüksek sıcaklık farkı, T1 ölçüm noktasında 3.8 °C olarak belirlenmiştir. Dört noktadaki yüzdesel hata oranları incelendiğinde en büyük hata oranı % 5 olarak T3 ölçüm noktasında tespit edilmiştir.

Sonuç olarak 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için tüm sıcaklık ölçüm noktalarında tespit edilen hata oranları % 10'un altında bulunmuştur. Böylece sistemin validasyon işlemi başarıyla sağlanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde tüm

LED giriş güçleri için ısı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünitenin nümerik ve deneysel testleri başarıyla sonuçlandırılmıştır.

Grafikte görüldüğü üzere tüm LED giriş güçlerinde hesaplanan en düşük jonksiyon sıcaklığı 8 Volt peltier besleme geriliminde elde edilmiştir. 80 Watt LED giriş gücünde belirlenen en düşük jonksiyon sıcaklığı 75,2 °C olmuştur. 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerindeki en düşük jonksiyon sıcaklıkları ise sırasıyla 89.2, 104.3 ve 122.1 °C olarak hesaplanmıştır. 80 Watt LED giriş gücünden itibaren her 20 Watt'lık güç artışında jonksiyon sıcaklığının 14, 15.1 ve 17.8 °C arttığı görülmektedir. Böylelikle LED giriş gücü arttıkça jonksiyon sıcaklığının artış hızı yükselmektedir.

Hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları LED limit jonksiyon sıcaklığı ile karşılaştırıldığında 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinin tamamında sınır değerden daha düşük jonksiyon sıcaklıkları elde edilmiştir. Fakat 140 Watt LED giriş gücü için hesaplanan jonksiyon sıcaklığının sınır değere çok yakın olduğu görülmektedir. Sonuç olarak ısı borusu öncelikli hibrit soğutucu modelin, çalışma sınır şartları altında 140 Watt LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma performansına sahip olduğu belirlenmiştir.

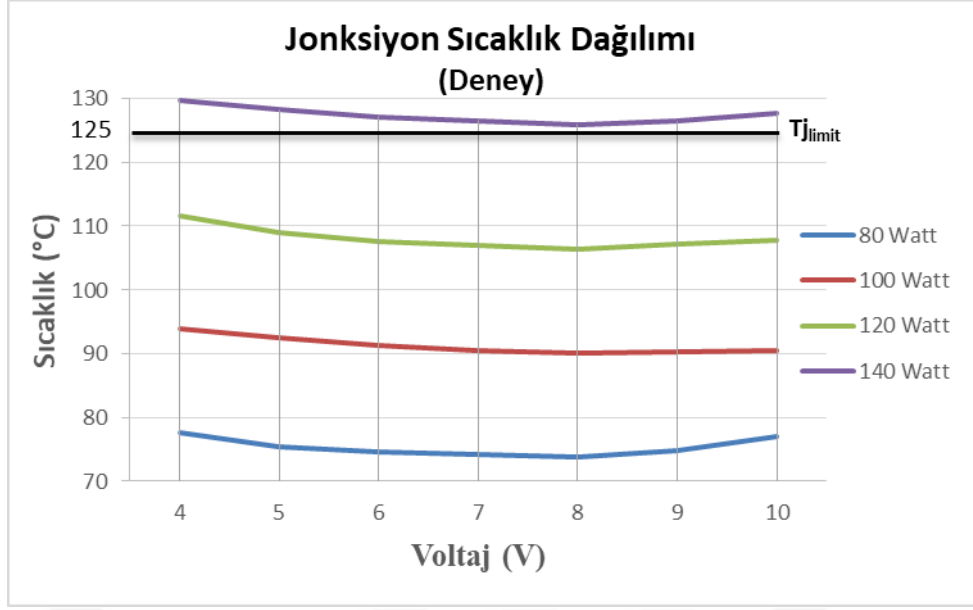


Şekil 4.23. Hibrit soğutucudaki (Isı borusu öncelikli) jonksiyon sıcaklık dağılımı (Model).

Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünitesinde daha önce belirlenen ölçüm noktalarında elde edilen sıcaklık değerlerinin yardımıyla LED jonksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. Veriler yardımıyla hesaplanan jonksiyon sıcaklıklarına ait sonuçlar Şekil 4.24’de görülmektedir. Jonksiyon sıcaklıkları nümerik çalışmadaki gibi dört farklı LED giriş gücü ve yedi farklı peltier besleme gerilimi için hesaplanmıştır. Deneysel çalışma verileriyle hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları, kullanılan LED’lere ait limit jonksiyon sıcaklığı ($T_{j\text{limit}}=125\text{ }^{\circ}\text{C}$) ile kıyaslanmıştır.

80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinin tamamında hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklığı 8 Volt peltier besleme geriliminde elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre 80 Watt LED giriş gücünde hesaplanan minimum sıcaklık değeri $73.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmuştur. 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için hesaplanan minimum sıcaklık değerleri sırasıyla 90, 106.4 ve $125.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. En düşük LED giriş gücünden başlayarak LED giriş gücündeki her 20 Watt artışta jonksiyon sıcaklığı 16.2, 16.4 ve $19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ artmıştır. LED gücü arttıkça jonksiyon sıcaklığı artış hızı yükselmiştir.

Grafikte görüldüğü üzere dört farklı LED giriş gücü için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları LED sınır jonksiyon sıcaklığı ile kıyaslanmış, 80, 100 ve 120 Watt LED giriş güçleri için belirlenen jonksiyon sıcaklıkları sınır değerin altındadır. Çalışmadaki en yüksek LED giriş gücü olan 140 Watt LED giriş gücü için hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklığı sınır sıcaklık değerinin üzerindedir. Sonuç olarak ısı borusu öncelikli hibrit soğutma ünitesi 120 Watt LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma sağlamıştır. 140 Watt LED giriş gücü için ise mevcut şartlarda soğutma kapasitesinin yeterli olmadığı görülmektedir.



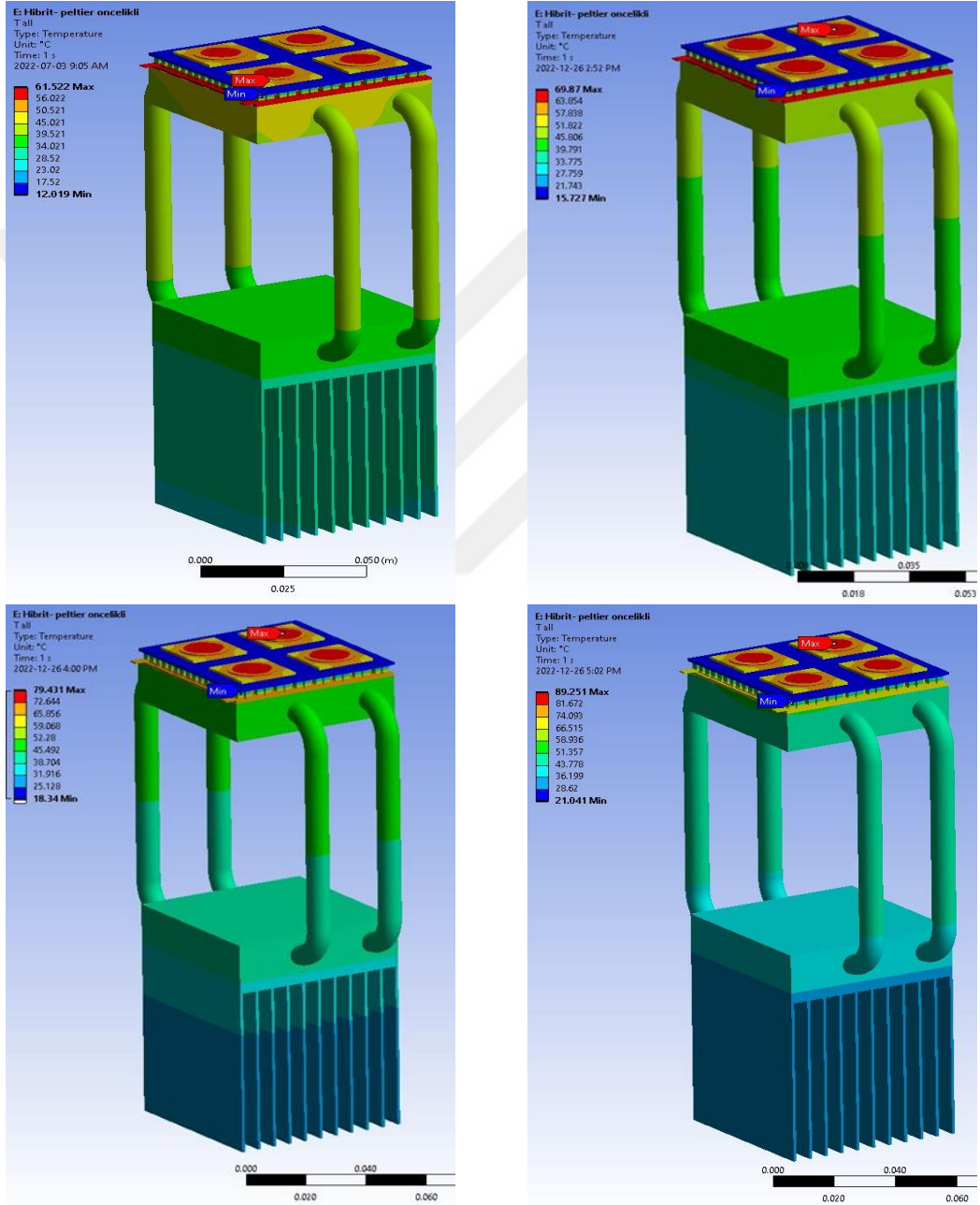
Şekil 4.24. Hibrit soğutucudaki (Isı borusu öncelikli) jonksiyon sıcaklık dağılımı (Deney).

4.3.2 Termoelektrik modül (peltier) öncelikli hibrit soğutucu

Peltier öncelikli hibrit soğutucu modelin 80, 100, 120 ve 140 Watt olmak üzere dört farklı LED giriş gücü için elde edilen simülasyon görselleri Şekil 4.25’de verilmiştir. LED giriş güçlerinin tamamında maksimum sıcaklık değeri LED’lerin birleşme noktasında görülmektedir. Modeldeki ısı kaynağının LED’ler olması, maksimum sıcaklığın burada tespit edilmesinde en büyük etken olmuştur. Isı borusu öncelikli hibrit soğutma ünitesi için 80 Watt LED giriş gücünde elde edilen en yüksek sıcaklık değeri 61.5 °C olarak belirlenmiştir. 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde ise en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla 69.9, 79.4 ve 89.3 °C’ye yükselmiştir. 80 Watt LED giriş gücünden başlayarak her 20 Watt’lık güç artışında modeldeki en yüksek sıcaklık değeri ortalama 9.5 °C yükselmiştir. Görüldüğü üzere LED giriş gücü ve ışık akısının artması, LED birleşme noktasında açığa çıkan ısıyı ve maksimum sıcaklık değerini yükseltmektedir.

Modele ait görsellere göre LED giriş güçlerinin tamamında minimum sıcaklık değeri, peltier soğuk yüzeyinin bulunduğu bölgede tespit edilmiştir. 80 Watt LED giriş gücünde en düşük sıcaklık değeri 12 °C’dır. 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde en düşük sıcaklık değerleri sırasıyla 15.7, 18.3 ve 21 °C’ye yükselmiştir. LED giriş gücündeki her 20 Watt’lık artışla birlikte peltier soğuk yüzey sıcaklığı

ortalama 3 °C artmaktadır. Ayrıca görsellerdeki ısı akışını iki kısma ayırmak mümkündür. Birinci kısımda en yüksek sıcaklığın görüldüğü LED'lere en yakın bölge olan peltier üst yüzeyine doğru sıcaklık hızla azalarak minimum değere düşmektedir. İkinci ısı akış kısmında peltier alt yüzeyinde çalışma prensibine dayalı olarak tekrar artan sıcaklığın ısı borusu ve kanatçık boyunca azalmaya devam ettiği görülmektedir.



Şekil 4.25. 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için hibrit soğutucu ünite içindeki sıcaklık dağılımı (Peltier öncelikli).

Simüle edilen peltier öncelikli hibrit soğutucu model üzerinde 80, 100, 120 ve 140 Watt olmak üzere dört farklı LED giriş gücü için elde edilen noktasal sıcaklık değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Soğutucu modeldeki peltier, 4 Vottan başlayarak kademeli artışlarla 10 Volta kadar yedi farklı besleme geriliminde çalıştırılmıştır. Farklı LED giriş gücü ve peltier besleme geriliminde daha önce belirlenen T1, T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklıklar belirlenmiştir.

Çizelge 4.8. Hibrit soğutucu (Peltier öncelikli) noktasal sıcaklık değerleri (Simülasyon).

Hibrit Soğutma Ünitesi (Peltier Öncelikli) Noktasal Sıcaklık Değerleri (Simülasyon)								
80 Watt					100 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	52,9	15,6	35,4	29	61,2	19,5	35,7	29,6
5	52,3	13,8	38,5	30,1	60,4	18,3	38,8	30,8
6	51,7	13,4	42	31,5	59,7	17,8	42,4	32
7	51,4	13,2	45,8	33	59,4	17,5	46,3	33,4
8	51,3	13	49,9	34,5	59,2	17,2	50,5	34,8
9	51,8	13,9	54,2	36,1	59,8	18	54,6	36,2
10	52,8	16,2	58,6	37,8	60,9	20,1	59,3	38
120 Watt					140 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	69,2	22,4	36	29,5	79	25,3	36,5	29,6
5	68,2	21	39,1	30,7	77,9	24,1	39,7	30,9
6	67,4	20,6	42,8	32,1	77,3	23,6	43,4	32,2
7	67	20,2	46,8	33,5	76,8	23,2	47,5	33,7
8	66,7	20	51	35	76,4	22,9	51,6	35,2
9	67,5	20,9	55,5	36,7	77	23,8	56,2	37
10	68,8	23	60,1	38,4	78,2	25,8	61,1	38,6

Peltier öncelikli hibrit soğutucu modeldeki nümerik çalışma neticesinde elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 4.26’da verilmiştir. Soğutucu model simülasyonuna göre tüm

LED giriş güçlerinde en yüksek sıcaklık değeri T1 LED lehim noktasında görülmüştür. Sadece 80 Watt LED giriş gücünde 9 ve 10 Volt peltier besleme gerilimi için T3 peltier alt yüzey sıcaklığı, T1 lehim noktası sıcaklığından daha yüksek değere ulaşmıştır. Peltier'in yüksek güçte çalıştırılması sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklığın artmasına, dolayısıyla alt yüzey sıcaklığının da yükselmesine yol açmaktadır. Bu bağlamda T1 LED lehim noktasına en yakın sıcaklık değeri T3 peltier sıcak yüzeyinde elde edilmiştir. Tüm LED giriş güçlerinde peltier besleme geriliminin artmasıyla birlikte T1 ve T3 noktaları arasındaki sıcaklık farkı süratle azalmaktadır.

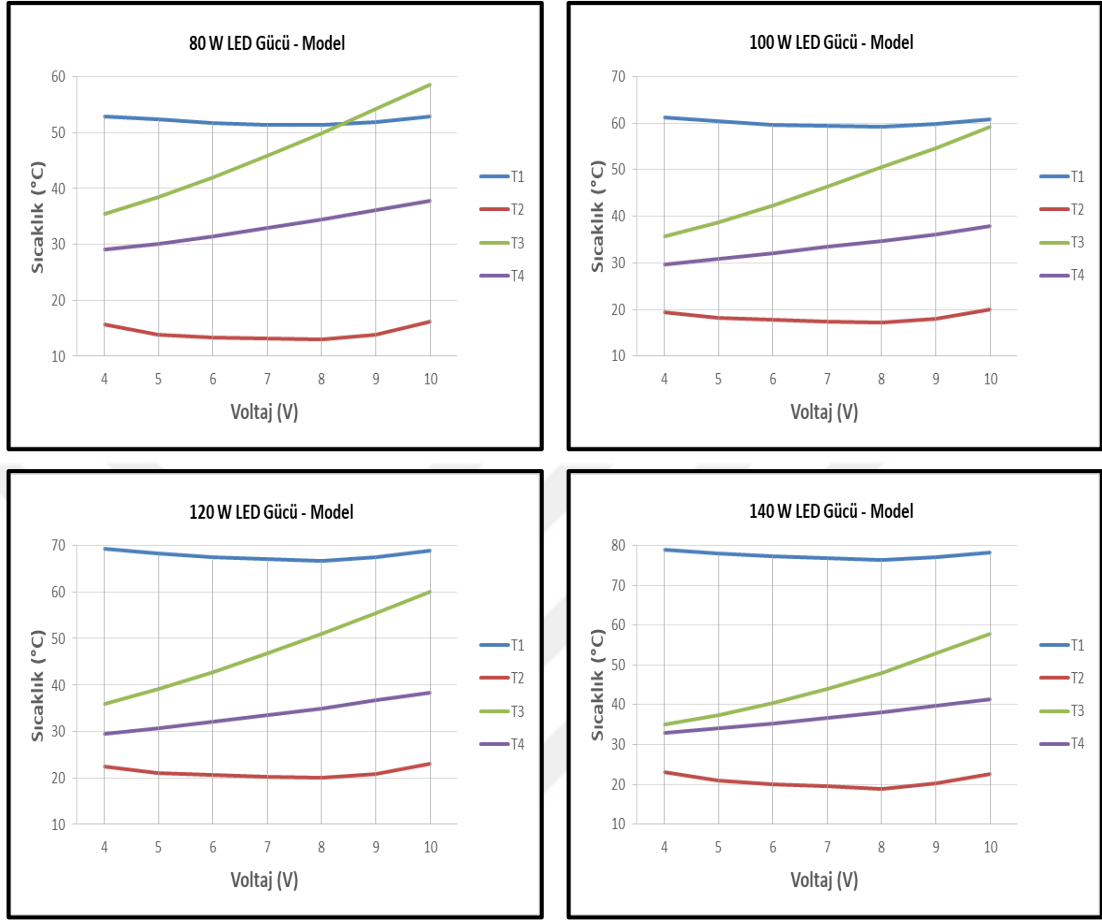
Peltier besleme geriliminin T1 lehim noktası sıcaklığına etkisine bakıldığında en düşük T1 noktası sıcaklığı tüm LED giriş güçleri için 8 Volt peltier besleme geriliminde belirlenmiştir. 80 Watt LED giriş gücünde en düşük T1 noktası sıcaklığı 51.3 °C iken bu değer 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için sırasıyla 59.2, 66.7 ve 76.4 °C'ye yükselmiştir. LED giriş gücündeki artışla birlikte T1 LED lehim noktası sıcaklığı da artmaktadır.

LED giriş gücündeki değişime bağlı olarak noktasal sıcaklık değerlerindeki değişim oranı incelendiğinde en yüksek sıcaklık değişimi T1 noktasında görülmektedir. En düşük LED giriş gücü olan 80 Watt'tan itibaren 20 Watt'lık LED giriş gücü artışlarında T1 noktasındaki sıcaklık ortalama 8.5 °C yükselmiştir. Bu artış oranı T2, T3 ve T4 noktalarında ise sırasıyla 3, 0.6 ve 0.2 °C olmuştur. T1 noktasının LED'e en yakın konum olması burada sıcaklığın daha fazla artmasına yol açmıştır.

Peltier'in çalışmasını sınırlandıran faktörlerin başında gelen iki yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkı, peltier besleme gerilimindeki artışla birlikte yükselmektedir. 80 Watt LED giriş gücünde 4 Volt peltier besleme gerilimi için iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı 19.8 °C olurken 10 Volt besleme geriliminde bu değer 42.4 °C'ye yükselmiştir. Diğer LED giriş güçlerinde de bu değerlere yakın artışlar tespit edilmiştir.

Grafiklere göre T1 ve T2 noktasal sıcaklıkları tüm LED giriş güçlerinde 8 Volt besleme gerilimine kadar azalmıştır. Peltier besleme geriliminin artışı devam ettikçe T1 ve T2 noktalarındaki sıcaklıklar artmaya başlamıştır. Peltier sıcak yüzeyi olan T3

noktası ve devamı niteliğindeki T4 noktasındaki sıcaklıklar ise peltier besleme gerilimindeki artışla paralel olarak yükselmektedir.



Şekil 4.26. Farklı LED ve peltier güç girişleri için sıcaklık değerleri (Model).

Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite 80, 100, 120 ve 140 Watt olmak üzere dört farklı LED giriş gücü için elde edilen deneysel ölçüm sonuçları Çizelge 4.9’da görülmektedir. Soğutma ünitesindeki peltier 4 Volttan 10 Volta kadar kademeli olarak yedi farklı voltaj girişinde çalıştırılmıştır. Farklı LED giriş güçleri ve peltier besleme gerilimlerinde önceden belirlenen T1, T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri ısıl çiftler yardımıyla elde edilmiştir.

Çizelge 4.9. Hibrit soğutucu (Peltier öncelikli) noktasal sıcaklık değerleri (Deney).

Hibrit Soğutma Ünitesi (Peltier Öncelikli) Noktasal Sıcaklık Değerleri (Deney)								
80 Watt					100 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	57,3	15,1	34,1	30,8	64,3	19,5	36,3	31,7
5	54	13,1	36,9	32	61,3	17,7	38,4	33
6	51,4	12,6	40	33,5	58,7	16,8	41	34,4
7	50	12,3	43,5	34,8	57,6	16,3	44,7	35,8
8	48,5	12	47,2	36,3	56,9	15,9	48,8	37,3
9	49	12,6	51,9	37,7	57,9	17	53,5	38,9
10	50,8	14,9	57,6	39,2	58,8	19,2	58,7	40,6
120 Watt					140 Watt			
V	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
4	73,2	23,2	35	32,9	85,8	26,6	37	33,1
5	70,2	21,1	37,3	34,1	82,7	24,3	39,4	34,3
6	68	20,1	40,5	35,4	80,7	23,1	42,6	35,6
7	66,8	19,6	43,9	36,8	79,5	22,4	46,1	37
8	65,8	19	48	38,2	78,5	21,7	50	38,6
9	67,5	20,3	53	39,7	80,4	23,2	55,1	40,3
10	68,3	22,7	57,9	41,3	81,9	25,9	60	41,9

Şekil 4.27’de peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite üzerinde deneyel ölçüm sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri görülmektedir. Deneysel çalışmada LED giriş güçlerinin tamamı için maksimum sıcaklık değeri T1 LED lehim noktasında ölçülmüştür. Yalnızca 80 Watt LED giriş gücü için 9 ve 10 Volt peltier besleme gerilimi şartlarında T3 peltier sıcak yüzeyinde, T1 lehim noktasından daha yüksek sıcaklık değeri ölçülmüştür. Genel itibariyle peltier besleme gerilimi arttıkça iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı artmaktadır. Bu yüzden özellikle peltier besleme gerilimi arttıkça T3 noktasındaki sıcaklık hızla artarak T1 noktasında ölçülen sıcaklık

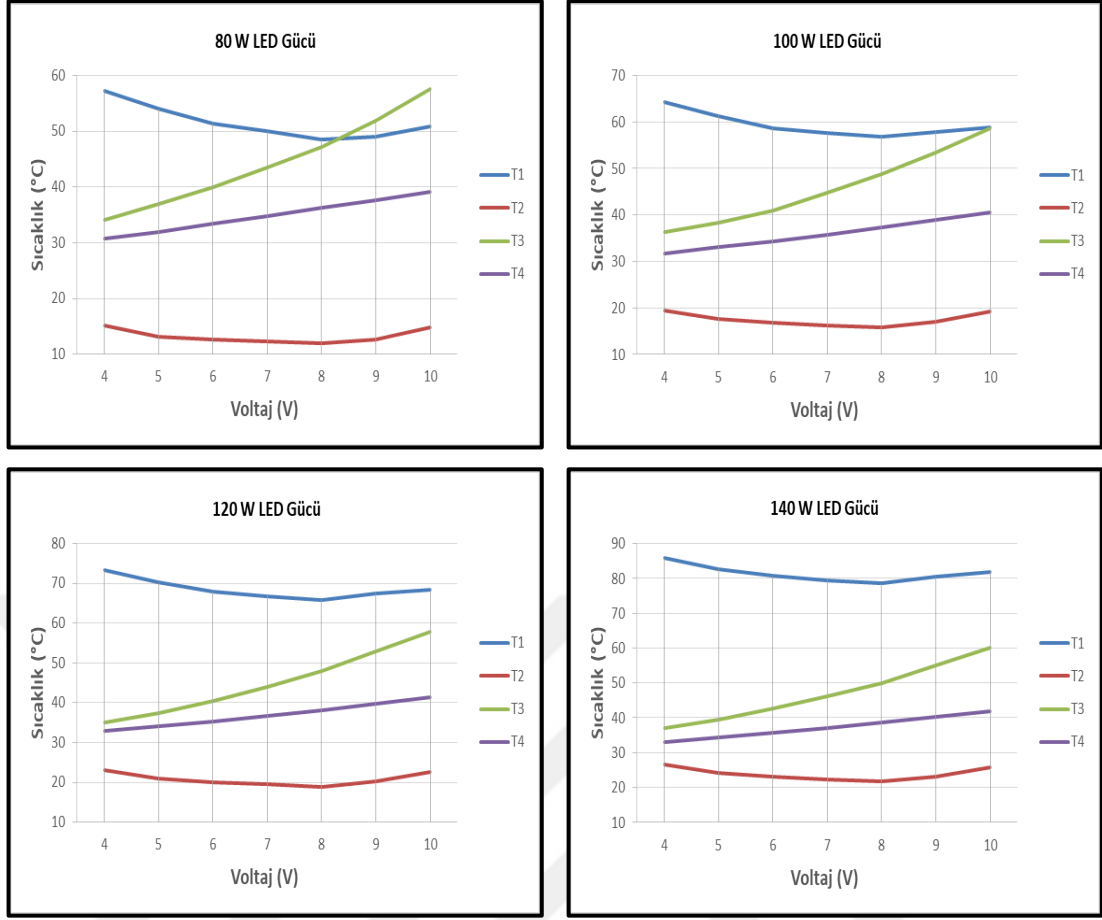
değerine yaklaşmaktadır. Böylelikle tüm LED giriş güçlerinde T1 noktası sıcaklığına en yakın sıcaklık değerleri T3 noktasında ölçülmüştür.

Peltier besleme gerilimi ile T1 lehim noktası sıcaklığı arasındaki etkileşim incelendiğinde 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinin tümünde minimum T1 noktası sıcaklığı 8 Volt peltier besleme geriliminde ölçülmüştür. 80 Watt LED giriş gücünde ölçülen en düşük T1 LED lehim noktası sıcaklığı 48.5 °C iken 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde bu değer sırasıyla 56.9, 65.8 ve 78.5 °C'ye yükselmiştir. LED giriş gücünün artmasıyla birlikte T1 noktası sıcaklığının da arttığı görülmektedir.

Noktasal sıcaklık değerlerinin LED giriş gücüne göre değişim oranına bakıldığında diğer ölçüm noktalarına kıyasla en büyük sıcaklık değişimi T1 noktasındadır. 80 Watt LED giriş gücünden başlayarak her 20 Watt'lık güç artışında T1 sıcaklığı ortalama 10 °C yükselmiştir. T2, T3 ve T4 noktalarında ise bu artış sırasıyla ortalama 3.2, 1.5 ve 0.9 °C olmuştur. Sistemde ısının açığa çıktığı LED'lere en yakın ölçüm noktası olan T1'deki sıcaklık artışı diğer ölçüm noktalarına göre çok daha fazla olmuştur.

Grafiğe göre peltier soğuk ve sıcak yüzeylerindeki sıcaklık değerleri olan T2 ve T3 noktaları arasındaki sıcaklık farkı, peltier besleme gerilimindeki artışa bağlı olarak yükselmektedir. 80 Watt LED giriş gücünde 4 Volt peltier besleme geriliminde 19 °C olan sıcaklık farkı besleme gerilimi 10 Volta çıkarıldığında 42.7 °C'ye yükselmiştir. 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde de benzer sıcaklık artışları görülmektedir.

LED giriş güçlerinin tümünde T1 ve T2 ölçüm noktalarındaki sıcaklık değerleri 8 Volt peltier besleme gerilimine kadar azalmaktadır. 8 Volt peltier besleme geriliminden itibaren voltaj artışıyla birlikte T1 ve T2 noktalarındaki sıcaklıklar da artmaktadır. T3 ve T4 ölçüm noktalarındaki sıcaklıklar ise peltier besleme gerilimi ile doğru orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 4.27. Farklı LED ve peltier güç girişleri için sıcaklık değerleri (Deney).

Peltier öncelikli hibrit soğutma ünitesi için 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde iki çalışma yönteminde belirlenen noktasal sıcaklık değerleri ve hata oranları Çizelge 4.10’da verilmiştir. T1 LED lehim noktası sıcaklığının jonksiyon sıcaklığı hesaplamada en önemli parametre olması nedeniyle çizelge, tüm LED giriş güçlerinde minimum T1 lehim noktası sıcaklığı dikkate alınarak hazırlanmıştır.

80 Watt LED giriş gücü için iki çalışma yönteminde elde edilen noktasal sıcaklık değerleri kıyaslandığında maksimum sıcaklık farkı T1 ölçüm noktasında 2.8 °C olarak tespit edilmiştir. Yüzdesel olarak en yüksek hata oranı ise T2 ölçüm noktasında % 8 olarak belirlenmiştir.

100 Watt LED giriş gücünde elde edilen noktasal sıcaklık değerleri incelendiğinde dört ölçüm noktası arasında en yüksek sıcaklık farkı T4 ölçüm noktasında 2.5 °C olmuştur. En yüksek hata oranı ise % 8 olarak T2 ölçüm noktasında belirlenmiştir.

120 Watt LED giriş gücünde iki çalışma yöntemi arasında belirlenen en yüksek sıcaklık farkı 3.2 °C olarak T4 ölçüm noktasında belirlenmiştir. Maksimum hata oranı da yine T4 ölçüm noktasında % 9 olarak tespit edilmiştir.

Çalışmadaki maksimum LED giriş gücü olan 140 Watt için belirlenen noktasal sıcaklık değerlerine göre en yüksek sıcaklık farkı, T4 ölçüm noktasında 3.4 °C olarak tespit edilmiştir. 140 Watt LED giriş gücündeki yüzdesel hata oranlarına bakıldığında maksimum hata oranı % 9 olarak T4 ölçüm noktasında belirlenmiştir.

Sonuç olarak dört farklı LED giriş gücü için tüm sıcaklık ölçüm noktalarında belirlenen hata oranları % 10'luk sınır değerinin altında tespit edilmiştir. Böylelikle validasyon başarıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, tüm LED giriş güçleri için peltier öncelikli hibrit soğutucu ünitenin nümerik ve deneysel testleri başarıyla sonuçlandırılmıştır.

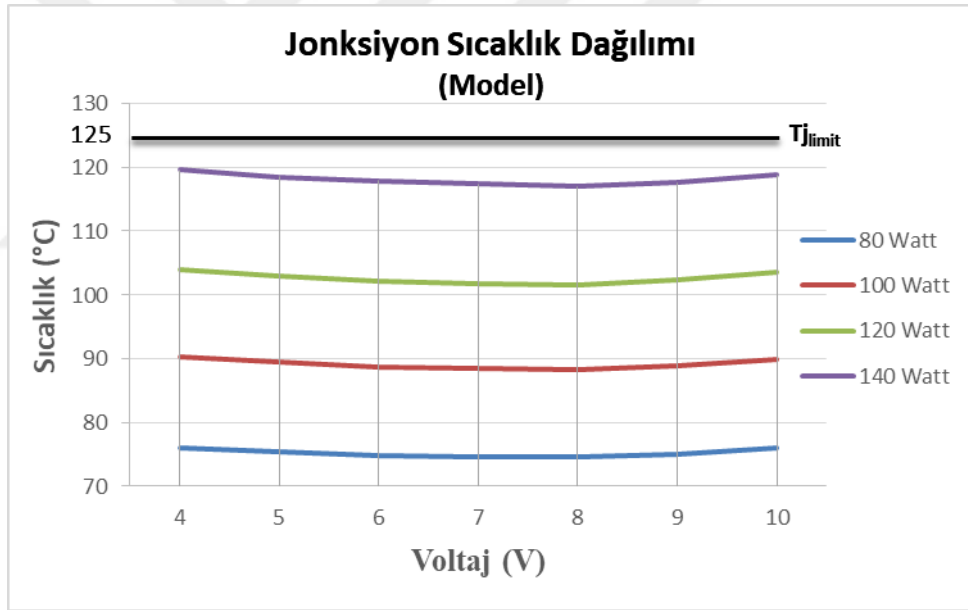
Çizelge 4.10. Hibrit soğutucuda (Peltier öncelikli) farklı LED giriş güçleri için hata oranları.

80 Watt				100 Watt			
	Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı		Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı
T1	51,3	48,5	% 5	T1	59,2	56,9	% 4
T2	13	12	% 8	T2	17,2	15,9	% 8
T3	49,9	47,2	% 5	T3	50,5	48,8	% 3
T4	34,5	36,3	% 5	T4	34,8	37,3	% 7
120 Watt				140 Watt			
	Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı		Nümerik Analiz	Deneysel Ölçüm	Hata Oranı
T1	66,7	65,8	% 1	T1	76,4	78,5	% 2
T2	20	19	% 5	T2	22,9	21,7	% 5
T3	51	48	% 6	T3	51,6	50	% 3
T4	35	38,2	% 9	T4	35,2	38,6	% 9

Şekil 4.28'de peltier öncelikli hibrit soğutucu modelin nümerik analizinde elde edilen noktasal sıcaklıklar dikkate alınarak hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları görülmektedir. Jonksiyon sıcaklıkları 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri için yedi farklı peltier besleme geriliminde ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çalışmada modellenen

LED'lerin sınır jonksiyon sıcaklık değeri ($T_{j\text{limit}}=125\text{ }^{\circ}\text{C}$) ile hesaplanan jonksiyon sıcaklık değerleri kıyaslanarak modelin soğutma performansı belirlenmiştir.

Peltier besleme gerilimindeki değişim jonksiyon sıcaklığının da değişmesine neden olmuştur. Dört farklı LED giriş gücünde de en düşük jonksiyon sıcaklığı 8 Volt peltier besleme geriliminde elde edilmiştir. Peltier besleme gerilimi 8 Volttan uzaklaştıkça jonksiyon sıcaklığında artış görülmüştür. 80 Watt LED giriş gücü için modelde hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklığı $74.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Diğer LED giriş güçlerine bakıldığında 100, 120 ve 140 Watt güçlerinde minimum jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 88.2, 101.5 ve $117\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmiştir. En düşük LED giriş gücünden başlayarak 20 Watt'lık güç artışlarında jonksiyon sıcaklığı 13.7, 13.3 ve $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ yükselmiştir. Böylelikle maksimum jonksiyon sıcaklığı değişimi LED giriş gücünün 120 Watt'dan 140 Watt'a yükseldiğinde elde edilmiştir.



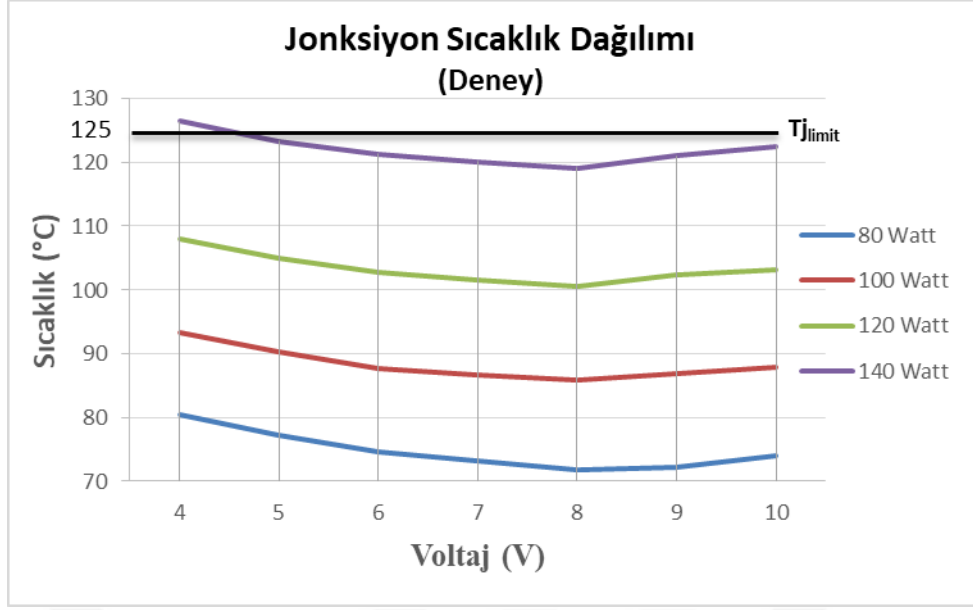
Şekil 4.28. Hibrit soğutucudaki (Peltier öncelikli) jonksiyon sıcaklık dağılımı (Model).

Hesaplanan jonksiyon sıcaklık değerleri, LED'lerin sınır jonksiyon sıcaklığı ile kıyaslandığında tüm LED giriş güçlerinde daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir. Sınır değere en yakın jonksiyon sıcaklığı 140 Watt LED giriş gücünde görülmektedir. Sonuçta mevcut tasarım ve çalışma şartlarında peltier öncelikli hibrit soğutucu modelin maksimum 140 Watt LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

Peltier öncelikli hibrit soğutma ünitesinin deneysel çalışmadaki ölçüm noktalarında elde edilen veriler yardımıyla hesaplanan jonksiyon sıcaklıklarına ait sonuçlar Şekil 4.29'da görülmektedir. Jonksiyon sıcaklıkları nümerik çalışmadaki gibi 80, 100, 120 ve 140 Watt olmak üzere dört farklı LED giriş gücü ve yedi farklı peltier besleme gerilimi için hesaplanmıştır. Deneysel bulgularla hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları, kullanılan LED'lere ait limit jonksiyon sıcaklığı ($T_{j\text{limit}}=125\text{ }^{\circ}\text{C}$) ile karşılaştırılmıştır.

80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinin tümünde minimum jonksiyon sıcaklığı, peltier besleme gerilimi 8 Volt iken tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada 80 Watt LED giriş gücü için hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklığı $71.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmuştur. 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklıkları ise sırasıyla 85.9, 100.6 ve $119.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. 80 Watt LED giriş gücünden itibaren LED giriş gücündeki her 20 Watt artışta jonksiyon sıcaklığı 14.2, 14.7 ve $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ yükselmiştir. LED giriş gücü arttıkça jonksiyon sıcaklığı artış hızı yükselmiştir. Bu bağlamda en yüksek jonksiyon sıcaklığı değişimi 120 ve 140 Watt LED giriş güçleri arasında gerçekleşmiştir.

Grafikte görüldüğü üzere dört farklı LED giriş gücü için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları LED sınır jonksiyon sıcaklığı ile karşılaştırılmıştır. 80 Watt'tan 140 Watt'a kadar tüm LED giriş güçleri için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları, LED sınır jonksiyon sıcaklığının altında kalmıştır. Limit değere en yakın jonksiyon sıcaklığı 140 Watt LED giriş gücünde görülmektedir. 140 Watt LED giriş gücü için hesaplanan jonksiyon sıcaklığı sınır sıcaklık değerinden $5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ daha düşük olmuştur. Sonuç olarak üretilen peltier öncelikli hibrit soğutma ünitesinin, mevcut çalışma sınır şartlarında 140 Watt LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.29. Hibrit soğutucudaki (Peltier öncelikli) jonksiyon sıcaklık dağılımı (Deney).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Teknolojideki değişim ve gelişimle birlikte aydınlatma sektöründe LED kullanımı yaygınlaşmaktadır. Geleneksel aydınlatma elemanlarıyla kıyaslandığında benzer ışıık akısını daha küçük alanda sağlaması ve mikro devre elemanlarıyla çalışması LED’lerde termal yönetim gerektirmektedir. Bilhassa yüksek ışıık akısı istenen küçük hacimli aydınlatma bölgelerinde termal yönetim zorunluluk haline gelmektedir. Geleneksel soğutma sistemlerinde boyut, tasarım, kapasite gibi sınırlılıklar nedeniyle LED’lerdeki ısının artması ışıık kalitesini olumsuz etkilemektedir. Aynı zamanda ısı artışıyla birlikte LED’in limit sıcaklık değerine ulaşılması, LED’lerin arızalanmasına neden olmaktadır. Bahsedilen sorunların çözömlenmesi adına farklı LED soğutma yöntemleri üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

Tez çalışmasında ısı borusu ve termoelektrik modölden oluşan soğutucu sistemler kullanılarak yüksek güçlü LED’lerdeki ısınma problemine çözüm aranmıştır. Bu amaçla öncelikle ısı borulu soğutucu ve termoelektrik modöllu soğutucu olmak üzere iki farklı model tasarlanmıştır. Daha sonra bahse konu iki soğutucuyu üzerinde barındıran hibrit soğutma sistemi tasarlanmıştır. Hibrit soğutma sistemi ısı borusu öncelikli ve termoelektrik modöl öncelikli olmak üzere iki farklı tasarımdan oluşmaktadır. Tasarlanan modellerin LED soğutma performansları nümerik analiz ve deneysel ölçömlerle incelenmiştir. Çalışmanın nümerik kısmında öncelikle tasarımı yapılan dört farklı soğutucu modelin HAD analizleri yapılmıştır. Elde edilen HAD simölasyon sonuçları deneysel testlerle desteklenerek sistem doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Nümerik çalışmada ayrıca ısı borulu soğutucu ünitenin belirli kısımlarındaki malzeme türündeki değişim ve farklı malzeme boyutlarının soğutma performansına etkisi incelenmiştir. Deney düzeneğinin kurulumu ve testlerin yapılabilmesi için öncelikle uygun boyut ve kapasitede termoelektrik modöl temin edilmiştir. Isı borusu, evaporatör ve kondenser bölömlerini içerisinde barındıran ısı emici tabanlar ve ısı kanatçık termoelektrik modöl boyutları ile birebir uyumlu ölçölerde imal edilmiştir. Sistemdeki ısı akışının incelenmesi ve jonksiyon sıcaklığının hesaplanması için belirli bölgelerin sıcaklıkları ısııl çiftlerin yardımıyla ölçölerek simölasyon verileriyle kıyaslanmıştır. Farklı soğutucuların birlikte kullanılması ile yüksek güçlü LED’lerdeki ısınmanın önüne geçilebileceği belirlenmiştir. Aynı zamanda ulaşölan sonuçlar, gelecek çalışmalar için fikir edinilmesini sağlamıştır.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar dört bölümde özetlenebilir:

Termoelektrik modüllü soğutucu ünite; LED giriş gücü ile lehim noktası sıcaklığı arasında doğru orantılı değişim görülmüştür. Simülasyon ve deneysel verilere göre LED giriş gücündeki 20 Watt'lık değişim, lehim noktası sıcaklığında yaklaşık 11 °C değişime neden olmuştur.

Diğer ölçüm noktalarına kıyasla özellikle LED birleşme noktasına en yakın ölçülebilir bölüm olan lehim noktasında, LED güç değişimine bağlı daha agresif sıcaklık değişimi gözlenmiştir. Böylelikle LED giriş gücüne bağlı olarak lehim noktası sıcaklığındaki değişim, tasarımda LED'e en uzak kısım olan ısı emici kanatçıktaki sıcaklık değişimine göre beş kat daha fazla olmuştur.

LED'lerden uzaklaştıkça sıcaklık değerlerinin daha düşük olması nedeniyle simülasyon ve deneysel veriler arasındaki hata oranları genellikle LED'e uzak ölçüm noktalarında görülmüştür.

Peltier besleme geriliminin artmasıyla birlikte alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının tüm LED giriş güçlerinde arttığı gözlenmiştir. İki yüzeydeki sıcaklık değişim oranlarına bakıldığında peltier sıcak yüzeyindeki değişimin soğuk yüzeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Peltier soğuk yüzeyinin ısının açığa çıktığı LED'lere çok yakın olması bu sonucun elde edilmesinde belirleyici olmuştur.

Çalışmadaki temel amaç, LED jonksiyon sıcaklıklarını belirlemek ve LED giriş gücüne bağlı jonksiyon sıcaklığındaki değişimi tespit etmektir. 80 Watt LED giriş gücünde simülasyon verilerine göre hesaplanan jonksiyon sıcaklığı 85.1 °C iken deneysel ölçüm verilerine göre bu değer 84.2 °C olarak hesaplanmıştır. 100 Watt LED giriş gücü için simülasyon ve deney verilerine göre hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 101.4 °C ve 99.4 °C olmuştur. 120 Watt LED giriş gücünde ulaşılan verilerle hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları simülasyona göre 117.7 °C iken deneysel çalışmada bu değer 115.7 °C olarak tespit edilmiştir. Son olarak 140 Watt LED giriş gücü için elde edilen simülasyon verilerine göre 134.3 °C olarak hesaplanan jonksiyon sıcaklığı, deneysel ölçüm verileriyle 132.4 °C olarak hesaplanmıştır.

Termoelektrik modüllü soğutma ünitesinin LED soğutma kapasitesine bakıldığında 120 Watt LED giriş gücüne kadar başarıyla soğutma sağladığı ve yeterli olduğu belirlenmiştir. Ancak 120 Watt'tan daha yüksek LED giriş güçleri için mevcut soğutucu tasarımın yeterli olmadığı görülmüştür.

Isı borulu soğutucu ünite; ısı borulu soğutucu ünite farklı LED giriş güçlerinin tamamında maksimum sıcaklık değerleri sistemdeki ısı kaynağı LED merkezinde belirlenmiştir. LED giriş gücü arttıkça maksimum sıcaklık değerinin de arttığı görülmüştür. Her 20 Watt'lık güç artışında maksimum sıcaklık değeri ortalama 7.5 °C yükselmiştir.

Simülasyon ve deney verilerine göre dört farklı ölçüm noktası arasında en yüksek sıcaklık değeri LED lehim noktasında ölçülmüştür. Yine LED giriş gücüne bağlı olarak en yüksek sıcaklık değişimi lehim noktasında tespit edilmiştir.

LED giriş gücündeki artışla birlikte LED'e en yakın ve en uzak ölçüm noktaları arasındaki sıcaklık farkı da artmaktadır. LED'lerin yüksek güçlerde çalışması durumunda açığa çıkan ısı enerjisindeki yukarı yönlü değişim bu sonucun elde edilmesine neden olmuştur.

Prototipi üretilen ısı borulu soğutucu ünitenin nümerik ve deneysel verilerle jonksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. 40 Watt LED giriş gücünde simülasyon verilerine göre hesaplanan jonksiyon sıcaklığı 70.4 °C iken deneysel ölçüm verilerine göre bu değer 72.4 °C olarak hesaplanmıştır. 60 Watt LED giriş gücü için simülasyon ve deney verilerine göre hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 83.3 °C ve 85.8 °C olmuştur. 80 Watt LED giriş gücünde elde edilen verilerle hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları simülasyona göre 96.2 °C iken deneysel çalışmada bu değer 98.4 °C olarak tespit edilmiştir. Son olarak 100 Watt LED giriş gücü için elde edilen simülasyon verilerine göre 109.9 °C olarak hesaplanan jonksiyon sıcaklığı, deneysel ölçüm verileriyle 112.8 °C olarak hesaplanmıştır.

Prototipi üretilen ısı borulu soğutucu tasarımın LED soğutma kapasitesine bakıldığında 100 Watt LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Fakat 100 Watt'tan daha yüksek LED giriş güçleri için ısı borulu soğutucu modelin yetersiz kaldığı görülmüştür.

Çalışma için tasarlanan ısı borusu 8 mm boru çapına ek olarak 10, 12 ve 14 mm boru çaplarında tasarlanmıştır. Modeller 100 Watt LED giriş gücünde simüle edilerek boru çapının soğutma performansına etkisi incelenmiştir. Tüm ısı borusu çaplarında yapılan nümerik çalışmada maksimum sıcaklık değeri LED'lerin merkezinde tespit edilmiştir. 8, 10, 12 ve 14 mm boru çaplarında maksimum sıcaklıklar sırasıyla 81.6, 79.1, 75 ve 75.9 °C olmuştur. En düşük sıcaklık değeri 12 mm boru çapında elde edilmiştir.

Farklı ısı borusu çaplarında LED birleşme noktasına en yakın sıcaklık ölçüm noktası olan LED lehim noktasında 8 mm boru çapı için belirlenen sıcaklık 80.9 °C iken 10, 12 ve 14 mm ısı borusu çaplarında bu değer sırasıyla 77.2, 72.8 ve 74.3 °C olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre en düşük LED lehim noktası sıcaklığı ısı borusu çapının 12 mm olduğu modelde elde edilmiştir.

Ayrıca ısı borusu çapı 8, 10, 12 ve 14 mm olan dört model için simülasyon verileri yardımıyla jonksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. 8, 10, 12 ve 14 mm boru çapları için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 109.9, 106.2, 101.8 ve 103.3 °C olmuştur. Dört farklı ısı borusu çapına sahip modelde de hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları LED limit jonksiyon sıcaklığından daha düşük olduğu için 100 Watt LED giriş gücü için soğutma kapasitesinin yeterli olduğu görülmektedir. En düşük jonksiyon sıcaklığı 12 mm ısı borusu çapında tespit edilmiştir. Prototipi imal edilen 8 mm ısı borusu çapına sahip model yerine 12 mm çapında ısı borusu kullanıldığında jonksiyon sıcaklığı 8.1 °C azalmıştır. Sonuç olarak mevcut tasarım boyutları için en ideal ısı borusu çapının 12 mm olduğu görülmektedir.

Isı borulu soğutucu modeldeki ısı emici kanatçık uzunluğu değişiminin soğutma performansına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla modeldeki ısı emici kanatçıklar 48, 56 ve 62 mm olmak üzere üç farklı uzunlukta tasarlanarak 100 Watt LED giriş gücünde simüle edilmiştir. Maksimum sıcaklık değerleri LED'lerin merkezinde tespit edilmiştir. 48, 56 ve 62 mm kanatçık uzunlukları için belirlenen maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 82.9, 81.9 ve 81.6 °C olmuştur. Kanatçık uzunluğundaki 14 mm'lik artışta maksimum sıcaklık değeri 1.3 °C azalmıştır. Kanatçık uzunluğundaki değişimin, maksimum sıcaklık değerinde dikkate değer bir farklılığa neden olmadığı görülmektedir.

Farklı kanatçık uzunlukları için LED birleşme noktasına en yakın sıcaklık ölçüm noktası olan LED lehim noktası sıcaklıkları belirlenmiştir. 48, 56 ve 62 mm kanatçık uzunlukları için belirlenen LED lehim noktası sıcaklıkları sırasıyla 82.5, 81.5 ve 80.9 °C olmuştur. Bu sonuçlara göre en düşük LED lehim noktası sıcaklığı 62 mm kanatçık uzunluğuna sahip modelde elde edilmiştir.

Isı borulu soğutucu ünitenin farklı kanatçık uzunluklarındaki simülasyon verileri dikkate alınarak LED jonksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. 48, 56 ve 62 mm olmak üzere üç farklı kanatçık uzunluğu için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 111.5, 110.5 ve 109.9 °C olmuştur. Kanatçık uzunluğundaki artış, jonksiyon sıcaklığında bir miktar düşüş sağlamıştır. Hesaplamalara göre en düşük jonksiyon sıcaklığı 62 mm uzunluğunda kanatçığa sahip olan modelde elde edilmiştir. Fakat kanatçık uzunluğundaki değişimin LED jonksiyon sıcaklığında büyük bir değişime neden olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak analiz edilen soğutucu modeller içinde en ideal kanatçık boyutu 62 mm olmuştur.

Isı borusu ve ısı emici kanatçıktan oluşan modelde alüminyum malzemeden imal edilen ısı emici taban ve kanatçığın malzeme türü değiştirilerek 100 Watt LED giriş gücündeki soğutma performansı incelenmiştir. Modeldeki alüminyum olan kanatçık ve ısı emici taban malzemesi bakır olarak değiştirildiğinde LED'lerin merkezindeki maksimum sıcaklık değerinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

Isı emici taban ve kanatçık malzemesi alüminyum olan modelde LED lehim noktası sıcaklığı 80.9 °C iken bu değer bakır kanatçıklı modelde ve ısı emici tabanı bakır olan modelde sırasıyla 77.4 °C ve 74.7 °C olmuştur. Prototipi üretilen modeldeki kanatçık malzemesi alüminyum yerine bakır seçildiğinde LED lehim noktası sıcaklığı 3.5 °C azalırken alüminyum olan ısı emici taban malzemesi bakır seçildiğinde LED lehim noktası sıcaklığı 6.2 °C azalmıştır. Isı emici taban malzemesindeki değişim LED lehim noktası sıcaklığında daha büyük değişime neden olmuştur.

Isı borulu soğutucu ünitenin farklı malzemelerden oluşan simülasyon verileri ile LED jonksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. Prototipi imal edilen model için hesaplanan jonksiyon sıcaklığı 109.9 °C iken, kanatçık malzemesi ve ısı emici taban malzemesi bakır olan modellerde bu değer sırasıyla 106.4 °C ve 103.7 °C olarak

hesaplanmıştır. En düşük jonksiyon sıcaklığı ısı emici taban malzemesinin bakır olduğu modelde tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra kanatçık malzemesinin bakır olduğu modelde de jonksiyon sıcaklığında önemli oranda azalış görülmektedir.

Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünite; ısı borusu öncelikli hibrit soğutucu modelin nümerik analizinde 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinin tamamı için en yüksek sıcaklık değeri LED merkezinde belirlenmiştir. Tasarımda 80 Watt LED giriş gücü için en yüksek sıcaklık değeri 61 °C olurken 100, 120 ve 140 Watt giriş güçlerinde maksimum sıcaklık sırasıyla 70.7, 80.3 ve 90.1 °C'ye yükselmiştir.

LED birleşme noktasına en yakın ölçüm noktası ve jonksiyon sıcaklığı belirlemede büyük öneme sahip LED lehim noktası sıcaklığı, LED giriş gücüne bağlı olarak değişmiştir. Simülasyon neticesinde 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde belirlenen en düşük LED lehim noktası sıcaklıkları sırasıyla 52, 60.2, 69.5 ve 81.5 °C'dir. Deneysel çalışmada 80 Watt'dan başlayarak aynı giriş güçleri için ölçülen en düşük LED lehim noktası sıcaklıkları sırasıyla 50.6, 61, 71.6 ve 85.3 °C olmuştur. 80 Watt LED giriş gücünden başlayarak giriş gücündeki 20 Watt'lık artış nümerik çalışmada ortalama 10 °C, deneysel ölçümlerde ise 11 °C yükselişe neden olmuştur.

Tüm LED giriş güçleri için ısı borusu öncelikli hibrit soğutma tasarımında kullanılan peltier besleme geriliminin artmasıyla birlikte alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkında artış gözlenmiştir. Sistemde peltier giriş voltajındaki artış, kullanılan termoelektrik modül için belirlenen iki yüzey arasındaki maksimum sıcaklık farkı dikkate alınarak belirlenmiştir.

Isı borusu öncelikli hibrit soğutucu ünitenin simülasyon verilerine göre 80 Watt LED giriş gücünde hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklığı 75.2 °C iken deneysel ölçüm verilerine göre bu değer 73.8 °C olarak hesaplanmıştır. 100 Watt LED giriş gücü için simülasyon ve deney verilerine göre hesaplanan en düşük jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 89.2 °C ve 90 °C olmuştur. 120 Watt LED giriş gücünde ulaşılan verilerle hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklıkları simülasyona göre 104.3 °C iken deneysel çalışmada bu değer 106.4 °C olarak tespit edilmiştir. Son olarak 140 Watt LED giriş gücü için elde edilen simülasyon verilerine göre 122.1 °C olarak hesaplanan en düşük jonksiyon sıcaklığı, deneysel ölçüm verileriyle 125.9 °C olarak hesaplanmıştır.

Isı borusu öncelikli hibrit soğutma ünitesinin 120 Watt LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. 140 Watt LED giriş gücünde elde edilen jonksiyon sıcaklığı LED sınır sıcaklık değerine çok yakın bulunmuştur. Bu nedenle 140 Watt LED giriş gücünde tasarımın yeterli olmadığı görülmüştür.

Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünite; peltier öncelikli hibrit soğutucu modelde simülasyon verilerine göre 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinin tamamı için maksimum sıcaklık değeri LED merkezinde tespit edilmiştir. Simülasyonda 80 Watt LED giriş gücü için maksimum sıcaklık değeri 61.5 °C iken 100, 120 ve 140 Watt giriş güçlerinde en yüksek sıcaklık değeri sırasıyla 69.9, 79.4 ve 89.3 °C'ye yükselmiştir. Maksimum sıcaklık değeri 80 Watt LED giriş gücünden başlayarak 20 Watt'lık güç artışlarında ortalama 9.5 °C artmıştır.

LED giriş gücüne bağlı olarak, ısının açığa çıktığı LED birleşme noktasına en yakın ölçüm noktası ve jonksiyon sıcaklığı belirlemede kritik önem ifade eden LED lehim noktası sıcaklığının değiştiği tespit edilmiştir. Simülasyon neticesinde 80, 100, 120 ve 140 Watt LED giriş güçlerinde belirlenen en düşük LED lehim noktası sıcaklıkları sırasıyla 51.3, 59.2, 66.7 ve 76.4 °C'dir. Deneysel çalışmada 80 Watt'dan başlayarak aynı giriş güçleri için ölçülen en düşük LED lehim noktası sıcaklıkları 48.5, 56.9, 65.8 ve 78.5 °C olmuştur. 80 Watt LED giriş gücünden başlayarak giriş gücündeki 20 Watt'lık artış nümerik çalışmada ortalama 8.5 °C, deneysel ölçümlerde ise yaklaşık 10 °C yükselişe neden olmuştur.

Dört farklı LED giriş gücünde de peltier besleme gerilimindeki artış, sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının artmasına yol açmıştır. Sistemde kullanılan termoelektrik modül için yüzeyler arası sıcaklık farkı, çalışmayı sınırlayan önemli faktörlerden birisi olmuştur.

Peltier öncelikli hibrit soğutucu ünitenin simülasyon verilerine göre 80 Watt LED giriş gücünde hesaplanan en düşük jonksiyon sıcaklığı 74.5 °C iken deneysel ölçüm verilerine göre bu değer 71.7 °C olarak hesaplanmıştır. 100 Watt LED giriş gücü için simülasyon ve deney verilerine göre hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklıkları sırasıyla 88.2 °C ve 85.9 °C olmuştur. 120 Watt LED giriş gücünde ulaşılan verilerle hesaplanan en düşük jonksiyon sıcaklıkları simülasyona göre 101.5 °C iken deneysel

Çalışmada bu değeri 100.6 °C olarak tespit edilmiştir. Son olarak 140 Watt LED giriş gücü için elde edilen simülasyon verilerine göre 117 °C olarak hesaplanan minimum jonksiyon sıcaklığı, deneysel ölçüm verileriyle 119.1 °C olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak peltier öncelikli hibrit soğutma ünitesinin 140 Watt LED giriş gücüne kadar yeterli soğutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Peltier öncelikli soğutma ünitesinin, ısı borusu öncelikli hibrit soğutma ünitesine göre daha iyi soğutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

Gelecek çalışmalara yönelik öneriler; Tez çalışmasında yüksek güçlü LED'lere yönelik ısı borusu ve termoelektrik modül olmak üzere iki farklı soğutucunun ayrı ayrı ve hibrit olarak soğutma performansı incelenmiştir. Tasarımda özellikle küçük alandan yüksek ışık akısı istenilen ortam ve şartlar dikkate alınarak mikro boyutta çalışılmıştır. Piyasada kullanılan termoelektrik modül boyutlarındaki standartlar, çalışmayı sınırlandıran faktörler arasında yer almaktadır.

Gelecek çalışmalarda ısı borusu iş akışkanını değiştirilerek farklı akışkanların ısı borusu soğutma performansına etkisi incelenebilir. Ayrıca ısı borusu evaporatör, kondenser ve adyabatik bölgeleri boyutları değiştirilerek performans karşılaştırması yapılabilir. Bunun yanı sıra ısı borusu fitil yapısı ve iş akışkanını miktarı ile ilgili değişiklikler yapılarak soğutma kapasitesine etkisi incelenebilir.

Tez çalışmasında termoelektrik modül performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli faktörün sıcak yüzeyindeki ısı artışı olduğu görülmüştür. Bu sorun, termoelektrik sıcak yüzeyindeki ısınmayı önlemek için ekstra soğutma yöntemleri kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda peltier sıcak yüzeyindeki ısı artışını azaltmak için hava hızı ayarlanabilen fan kullanılabilir. Böylelikle farklı hava debilerinin termoelektrik modül yüzey sıcaklıkları değişimine etkisi incelenebilir. Ayrıca aynı sistem üzerinde kaskat bağlı birden fazla özdeş ve farklı boyutlardaki termoelektrik modüllerin performansı ile tek termoelektrik modülün soğutma performansı karşılaştırılarak literatüre katkı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Akasaki, I., Amano, H., ve Nakamura, S., 2014. Blue LEDs – Filling the world with new light. Nobel Prize in Physics. Stockholm
- Ansys, 2010. Ansys fluent theory guide. Ansys Inc., Edition 13, Canonsburg, USA
- Ansys, 2013. Ansys fluent theory guide. Ansys Inc., Edition 15, Canonsburg, USA
- Arıcioğlu, A. K., 2021. Termoelektrik jeneratör kullanılarak elde edilen elektrik enerjisinin farklı boyutlardaki termoelektrik soğutucularda kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, PÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Arslan, G., 2007. Üç kolonlu titreşimli ısı borusunun matematiksel modellenmesi ve deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Athalye, P., 2016. Liquid cooled LED systems. U.S. Patent No. 9435524. Washington, DC: U.S. Patent Office.
- Bădălan, N., ve Svasta, P., 2015. Peltier elements vs. heat sink in cooling of high power LEDs, 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), USA, 124–128.
- Baltakesmez, A., 2011. Elektrokimyasal büyütme tekniği ile elde edilen zno tabanlı homoelektriklerin elektrolüminesansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Barbosa, J. L. F., Simon, D., ve Calixto, W. P. 2017. Design optimization of a high power LED matrix luminaire. Energies, 10(5), 639.
- Beşe, U., 1988. Baca Gazları İçin Isı Borusu Tasarımı ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Bolatlı, G., 2019. Termoelektrik modül ile atık ısıdan elektrik üreten bir sistem uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, SUBÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Boukhanouf, R., Haddad, A., North, M. T., ve Buffone, C., 2006. Experimental investigation of a flat plate heat pipe performance using IR thermal imaging camera. Applied Thermal Engineering, 26(17-18), 2148-2156.
- Bulusu, A., ve Walker, D. G., 2008. Review of electronic transport models for thermoelectric materials. Superlattices and Microstructures, 44(1), 1–36.
- Bulut, H., 2005. Termoelektrik Soğutma Sistemleri. Soğutma Dünyası, 31, 9–16.
- Cao, Y., ve Faghri, A., 1994. Transient fluid flow and heat transfer in a porous structure with partial heating and evaporation on the upper surface. Journal of Enhanced Heat Transfer, 37(10), 1525–1533.

- Chen, S. W., Chiu, W. J., Lin, M. S., Kuo, F. J., Chai, M. L., Lee, J. D. ve Shih, C., 2017. 1D and Q2D thermal resistance analysis of micro channel structure and flat plate heat pipe. *Microelectronics Reliability*, 72, 103–114.
- Chung, T. J., 2010. *Computational Fluid Dynamics*, In Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Cole, M., ve Driscoll, T., 2014. The Lighting Revolution: If We Were Experts Before, We're Novices Now. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2), 1509–1520.
- Costa, V. A. F., ve Lopes, A. M. G., 2014. Improved radial heat sink for led lamp cooling. *Applied Thermal Engineering*, 70(1), 131-138
- Çakmaz, E. S., 2019. Soğuk zincir kutularında peltier ile soğutma tasarımı ve analizi. Yüksek Lisans Tezi, MÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çiçek, B., 2019. M1 ve M2 kategorisinde tanımlanan yol aydınlatma sınıflarına uygun ve yüksek verimli LED'li yol aydınlatma armatür modellerinin tasarımı ve termal analizi. Doktora Tezi, ASÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Çiftçi, E. Sözen, A. ve Karaman, E., 2016. TiO₂ İçeren Nanoakışkan Kullanımının Isı Borusu Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 19(3), 367-376.
- Dalar, U., 2019. Otomobil egzoz sistemlerinde termoelektrik jeneratörlü (TEJ) atık ısı geri kazanım sisteminin irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, DPÜ, Kütahya.
- Demiröz, Ö. B., 2021. Eklemeli imalat ile yüzeyi güçlendirilen termoelektrik modül yüzeyindeki ısı dağılım etkisinin analizi. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Gedik Üniversitesi, İstanbul.
- Derebaşı, N., 2015. Termoelektrik soğutma hücrelerinde geometrik yapısal etkilerin incelenmesi. Doktora tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü. UÜ. Bursa.
- Dunn, P., ve Reay, D., 1994. *Heat Pipes*, Fourth Edition, Elsevier Science Ltd. Pergamon, UK.
- Dzombak, R., Kasikaralar, E., ve Dillon, H. E., 2020. Exploring Cost and Environmental Implications of Optimal Technology Management Strategies in the Street Lighting Industry. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Erol, Y., ve Canbolat, T., 2010. Akım Regüleli LED Test Cihazı Tasarımı. *ELECO'2010 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 370-374.
- Erol, Y., ve Canbolat, T., 2011. Aydınlatma sektöründe yeni nesil power led teknolojileri. *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu*, 1, 239-242

- Faghri, A., 1995. Heat Pipe Science And Technology, Global Digital Press, Taylor and Francis, Washington, USA.
- Faghri, A., 2014. Heat pipes: review, opportunities and challenges. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 5(1).
- Gençoğlu, M. T., 2005. İç aydınlatmada enerji tasarrufu. III. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi. Ankara.
- Goldsmid, H. J., 2016. Review of thermoelectric materials. *Introduction to Thermoelectricity*, 153-195.
- Gray, V. H., 1969. The rotating heat pipe - A wickless, hollow shaft for transferring high heat fluxes. American society of mechanical engineers and American Inst. of chemical engineers, heat transfer conference. Minneapolis.
- Grover, G. M., 1966. U.S. Patent No. 3,229,759. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Gutierrez, J. J., Saiz, P., Azcarate, I., Leturiondo, L. A., Redondo, K., Ruiz de Gauna, S., ve Gonzalez-Otero, D. M., 2017. Sensitivity of modern lighting technologies at varying flicker severity levels. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 92, 34-41.
- Güngör, A., 1995. İklimlendirmede Enerji Geri Kazanımında Isı Borulu Isı Değiştiriciler, Tesisat Mühendisliği Kongresi, Ankara, Bildiriler Kitabı, Cilt I, 638-655.
- He, S., Zhao, J., Liu, Z., Chun, T. W., Yang, J., ve Liu, W. (2018). Experimental investigation of loop heat pipe with a large squared evaporator for cooling electronics. *Applied Thermal Engineering*, 144, 383-391.
- Hsieh, S. S., Hsu, Y. F., ve Wang, M. L., 2014. A microspray-based cooling system for high powered LEDs. *Energy conversion and management*, 78, 338-346.
- Huang, D., Liu, Z., Harris, J., Diao, X., ve Liu, G., 2019. High thermal conductive AlN substrate for heat dissipation in high-power LEDs. *Ceramics International*, 45(1), 1412-1415.
- Huang, D. S., Chen, T. C., Tsai, L. Te., ve Lin, M. T., 2019. Design of fins with a grooved heat pipe for dissipation of heat from high-powered automotive LED headlights. *Energy conversion and management*, 180, 550-558.
- Jang, H., Lee, J. H., Byon, C., ve Lee, B. J., 2018. Innovative analytic and experimental methods for thermal management of SMD-type LED chips. *International journal of Heat and Mass transfer*, 124, 36-45.
- Karri, M. A. 2005. Modeling of an automotive exhaustthermoelectric generator. Phd. Thesis, Clarkson University, New York.

- Kim, C. M., ve Kang, Y. T., 2014. Cooling performance enhancement of LED (Light Emitting Diode) using nano-pastes for energy conversion application. *Energy*, 76, 468-476.
- Kotcioğlu, I., Çalışkan, S., ve Manay, E., 2009. Cooling of a CPU with heat pipes using different refrigeration fluids. *Isı bilimi ve tekniği dergisi-journal of thermal science and technology*, 29(2). 109–116.
- Ku, J., 1999. Operating Characteristics of Loop Heat Pipes. Source: *SAE Transactions*, 108, 503–519.
- Lee, H., 2010. *Thermal Design*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. ABD.
- Lee, H., 2017. *Thermoelectrics: Design and Materials*. John Wiley & Sons, Ltd., Michigan, USA
- Li, J., Tian, W., ve Lv, L., 2016. A thermosyphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling. *Heat and Mass Transfer*, 52, 1541-1548.
- Lin, X., Mo, S., Jia, L., Yang, Z., Chen, Y., ve Cheng, Z., 2019. Experimental study and Taguchi analysis on LED cooling by thermoelectric cooler integrated with microchannel heat sink. *Applied Energy*, 242, 232-238.
- Loebner. E. E., 1976. Subhistories of the light emitting diode. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 23(7), 675-699.
- Lv, L., Li, J., ve Zhou, G. 2017. A robust pulsating heat pipe cooler for integrated high power LED chips. *Heat and Mass Transfer*, 53, 3305-3313.
- Markal, B., ve Aksoy, K., 2018. Yenilikçi Soğutma Teknolojileri: Isı Boruları. *SETSCI Conference Indexing System*, 2, 336–342.
- Mete, S., ve Onaygil, S., 2016. Yüksek güçlü led ışık kaynaklı aydınlatma armatürlerinin soğutmasında ısı borusu kullanımı. 8.Ulusal Aydınlatma Sempozyumu. İzmir.
- Mohamad, M. S., Abdullah, M. Z., ve Abdullah, M. K., 2013. Experimental study on the cooling performance of high power LED arrays under natural convection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 50(1).
- Moon, S. H., Park, Y. W., ve Yang, H. M., 2017. A single unit cooling fins aluminum flat heat pipe for 100 W socket type COB LED lamp. *Applied Thermal Engineering*, 126, 1164–1169.
- Musayev, E., 2002. LED – LED Sistemlerinin araştırılması ve uygulamaları. *ELECO`2002 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği sempozyumu ve fuarı*. Bursa.
- Ngo, I. L., Jang, H., Byon, C., ve Lee, B. J., 2018. Experimental study on thermal performance of SMD-LED chips under the effects of electric wire pattern and

- LED arrangement. International Journal of Heat and Mass Transfer, 127, 746–757.
- Ong, K. S., Tan, C. F., Lai, K. C., Tan, K. H., ve Singh, R., 2016. Thermal management of LED with vapor chamber and thermoelectric cooling. Proceedings of the IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology (IEMT) Symposium, , 1–7.
- Özsoy, A., 2005. Isıtma sistemlerinden ısı geri kazanımında ısı borularının uygulanabilirliği, ekserji ve ekonomik analizi. Doktora tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü. SDÜ. Isparta.
- Özsoy, A., 2005. Yerçekimi destekli bakır-su ısı borusu için deneysel bir çalışma. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 90(5), 13-18.
- Öztürk, M., 2021. Termoelektrik modüllerin ısı ve elektriksel çıkış parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, PÜ, Denizli.
- Padmasali, A., ve Kin, S., 2016. Prognostic algorithms for L70 life prediction of solid state lighting. Lighting Research and Technology, 608–623.
- Rowe, D.M., 1995. CRC Handbook of Thermoelectrics. In CRC Handbook of Thermoelectrics. USA.
- Richard S. Gaugler. (1942). Heat Transfer, Device. U.S. Patent No. 2,350,348. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Riffat, S. B., ve Ma, X., 2003. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. Applied thermal engineering, 23(8), 913-935.
- Ryan, S. W., 2005. System and Method for Programming a Weighing Scale Using a Key Signal To Enter a Programming Mode, U.S. Patent No. 7,872,201, U.S. Patent and Trademark Office.
- Sachs, G., 2015. The Low Carbon Economy. Goldman Sachs Equity Research. New York, USA.
- Sakulchangsattajai, P., Terdtoon, P., Wongratanaphisan, T., Kamonpet, P., ve Murakami, M., 2004. Operation modeling of closed-end and closed-loop oscillating heat pipes at normal operating condition. Applied Thermal Engineering, 24(7), 995-1008.
- Salem, T. K., Khosroshahi, F. S., Arık, M., Hamdan, M. O., ve Budakli, M., 2019. Numerical and experimental analysis of a heat-pipe-embedded printed circuit board for solid state lighting applications. Experimental Heat Transfer, 32(1), 1–13.
- Schmid, G., Huang, Z. L., Yang, T. H., ve Chen, S. L., 2017. Numerical analysis of a vertical double-pipe single-flow heat exchanger applied in an active cooling

- system for high-power LED street lights. *Applied Energy*, 195, 426–438.
- Seo, J. H., ve Lee, M. Y., 2018. Illuminance and heat transfer characteristics of high power LED cooling system with heat sink filled with ferrofluid. *Applied Thermal Engineering*, 143, 438-449.
- Seo, Y. M., Ha, M. Y., Park, S. H., Lee, G. H., Kim, Y. S., ve Park, Y. G., 2018. A numerical study on the performance of the thermoelectric module with different heat sink shapes. *Applied Thermal Engineering*, 128, 1082-1094.
- Seven, M., 2007. Isı borusunun yalıtılmış bölgesindeki akışın analitik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İTÜ, İstanbul.
- Silverstein, C. C., 1992. Design and technology of heat pipes for cooling and heat exchange. NASA STI/Recon Technical Report A, 93, 17523.
- Sosoi, G., Vizitiu, R. S., Burlacu, A., ve Gălătanu, C. D., 2019. A heat pipe cooler for high power LED's cooling in harsh conditions. *Procedia Manufacturing*, 32, 513-519.
- Şahin, M., Büyüktümtürk, F., ve Yüksel, O., 2014. Karma ve Yarı Endirekt Aydınlatma Türlerinin Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 16(2), 26-38.
- Waide, P., 2010. Phase out of incandescent lamps. International Energy Agency. Paris. Fransa.
- Wang, H., Qu, J., Peng, Y., ve Sun, Q., 2019. Heat transfer performance of a novel tubular oscillating heat pipe with sintered copper particles inside flat-plate evaporator and high-power LED heat sink application. *Energy Conversion and Management*, 189, 215-222.
- Wang, J., Zhao, X. J., Cai, Y. X., Zhang, C., ve Bao, W. W., 2015. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package. *Energy Conversion and Management*, 159, 415-415.
- Wang, M., Tao, H., Sun, Z., ve Zhang, C., 2017. The development and performance of the high-power LED radiator. *International Journal of Thermal Sciences*, 113, 65-72.
- Xiao, C., Tian, Q., Zhou, C., Li, J., ve Zhu, W., 2017. A novel cooling system based on heat pipe with fan for thermal management of high-power LEDs. *Journal of Optics*, 46, 269-276.
- Yang, K. S., Yang, T. Y., Tu, C. W., Yeh, C. T., ve Lee, M. T., 2015. A novel flat polymer heat pipe with thermal via for cooling electronic devices. *Energy Conversion and Management*, 100, 37-44.
- Yılmaz, E., Şahin, İ., ve Kocadağ, N. Y., 2019. LED Işık Kaynaklı, Enerji Tasarruflu

ve Yüksek Verimli Ofis Aydınlatma Armatürü Tasarımı. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(2), 138-150.

Yurtseven, M. B., 2017. LED ışık kaynaklı armatür ısı modellemesi ve ısı tasarımı etkileyen faktörlerin istatistiksel analizi. Doktora tezi. İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Yüce, D., Perdahçı, C., ve Ünsalan, H., 2016. Aydınlatmada Geleneksel Işık Kaynaklarından LED'e Kadar Uzanan Tarihçe. Kaynak Elektrik Dergisi, 124–128.

Zhang, M., Lai, Y., Dong, Y., Jin, L., Pei, W., ve Harbor, J., 2013. Laboratory investigation of the heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon. Cold regions science and technology, 95, 67-73.

Zhang, Y., ve Faghri, A., 2008. Advances and Unsolved Issues in Pulsating Heat Pipes. Heat Transfer Engineering, 29(1), 20-44.

Zhang, Z. L., 2014. Conjugate Heat and Mass Transfer in Heat Mass Exchanger Ducts. First Edition, Elsevier Science Academic Press, Amsterdam, Hollanda.

Zhao, X. J., Cai, Y. X., Wang, J., Li, X. H., ve Zhang, C., 2015. Thermal model design and analysis of the high-power LED automotive headlight cooling device. Applied Thermal Engineering, 75, 248-258.

Zhou, G., ve Li, J., 2018. Two-phase flow characteristics of a high performance loop heat pipe with flat evaporator under gravity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 117, 1063-1074.

URL-1<<https://www.elektrikde.com/peltier-etkisi-termoelektrik-sogutucu-nedir/>> Erişim tarihi: 20.08.2022

URL-2 <<https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>> Erişim tarihi: 25.09.2022

URL-3 <https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrolüminesans#cite_note-1> Erişim tarihi: 01.11.2022

URL-4<https://www.extech-online.com/index.php?mainpage=productinfo&products_id=414> Erişim tarihi: 12.02.2022

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Emre ÜRÜN

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : S.Demirel Üniversitesi, Tesisat Öğr. Bölümü, (2001-2005)

Yüksek Lisans : Karabük Üniv., Makine Eğitim A.B.D., (2006-2010)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Çetin Mühendislik Ltd. Şti (Kütahya) (2005-2006)
2. Emniyet Genel Müdürlüğü (2006-2014)
3. Aksaray Üniversitesi Sosyal Bilimler MYO-Öğretim Görevlisi (2014-Devam)

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Çiçek, B., Ürün, E. ve Şahin, N., 2023. Experimental and Numerical Analysis of an Innovative High Power LEDs Thermal Management System, based on Heat Sink-Heat Pipe Design. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 11, 3, 824-836, (Yayınlandı).