



**KAPALI HACİM İÇERİSİNDEKİ ELEKTRONİK KARTLARIN TERMAL
DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Yener USUL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2021

Yener USUL tarafından hazırlanan “KAPALI HACİM İÇERİSİNDEKİ ELEKTRONİK KARTLARIN TERMAL DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Murat AKTAŞ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TOBB ETÜ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Oğuz TURGUT

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 18/01/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Yener USUL
18/01/2021

KAPALI HACİM İÇERİSİNDEKİ ELEKTRONİK KARTLARIN TERMAL DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Yener USUL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

ÖZET

Sunulan tez kapsamında, kapalı hacim içerisinde bulunan bir elektronik kart kompleksinin zamana bağımlı doğal taşınım altındaki termal davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kart üzerinde iki adet elektronik komponent bulunmaktadır. Kart kompleksi dört adet ayak üzerine sabitlenmiş ve bu ayaklar da ısıtıcı bir plaka üzerine yerleştirilmiştir. Nümerik analizler iletim tabanlı SEY (Sonlu Elemanlar Yöntemi) ve HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinin çözümü, zamana bağımlı doğal taşınım ile ısı transferi olan problemlerde oldukça uzun sürmektedir. Öte yandan, iletim tabanlı SEY analizlerinde, sistemde bulunan hava analiz modeline dahil edilmemektedir. Bu da çözüm doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, iletim tabanlı SEY analiz modelinde, taşınım sınır şartı tanımlanması için kullanılan taşınım katsayıları deneysel veriler referans alınarak doğrulanmıştır. Ayrıca analiz modelinde belirsizlik içeren, komponentler ile kart arasındaki termal temas direnci ve komponentlerde meydana gelen güç düşüm oranı değerleri de yine deneysel veriler kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel veriler kullanılarak doğrulanan analiz modeli ile sistemin termal davranışı 64 farklı sınır şartı için parametrik olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, komponent sıcaklığının komponent gücünden, kartın alt yüzeyinin ise, komponent ile aynı hızda olsa bile, kartın alt yüzeyine bakan ısıtıcı plaka sıcaklığından önemli miktarda etkilendiği çıkarımına varılmıştır. Sistem başlangıç sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda, ısıtıcı plaka sıcaklığı ve komponent sıcaklığının farklı değerleri için kart ve komponent sıcaklıklarında artış, azalış, önce azalış sonra artış veya önce artış sonra azalış görülebilmektedir. Bu etkiler, ilgili bölgeler ve ısı kaynakları arasındaki termal direnç ile alakalıdır. Ek olarak, beş farklı sınır şartı için HAD ve iletim tabanlı SEY analizleri ve bu sınır şartlarından ikisi için deneyler gerçekleştirilip analiz ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre iletim tabanlı SEY analiz modeli doğru kurulduğu takdirde, HAD analizleri ile ve deneyler ile benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91412

Anahtar Kelimeler : Elektronik kartlar, ısı transferi, doğal taşınım, iletim-tabanlı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Abaqus, Star-CCM+, Isight

Sayfa Adedi : 188

Danışman : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THERMAL BEHAVIOR OF ELECTRONIC BOARDS INSIDE AN ENCLOSURE

(M. Sc. Thesis)

Yener USUL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2021

ABSTRACT

In this study, experimental and numerical investigations of thermal behavior of an electronic board assembly under unsteady natural convection in an enclosure was performed. There are two electronic components placed on the electronics board. The assembly is placed on four legs, which stand over a heater plate. Numerical analyses were performed using conduction based FEM (Finite Element Method) and CFD (Computational Fluid Dynamics). Solutions using CFD analyses take long times, especially for time dependent problems with natural convection. On the other hand, in conduction based FEM, the fluid within the system, in general air, is not modeled directly, and hence, solution accuracy may be affected negatively. In this study, the heat transfer coefficients that were used to define the convective heat transfer boundary conditions were corrected by taking the experimental results as a reference. Additionally, unknown analysis input parameters, thermal contact resistance between the components and the board and component power deration rate were determined again using experiment results. Using the corrected analysis model, thermal behavior of the electronic board was examined for 64 different scenarios. The results of the examination indicate that the temperature of the upper surface of the components were highly affected from the component power, whereas, the temperature of the bottom side of the board was highly affected from the heater plate temperature, although the point of interest is right across the component. For the cases when the initial temperature of the system is relatively high, the temperature values of the board and the components may increase, decrease, firstly decrease then increase and vice versa. These behaviors are related to the thermal resistance between the heat sources and points of interest. Moreover, CFD and FEM analyses were performed for five more different boundary conditions and experiments were performed for two of them. Then, the results were compared. According to the results, setting up the FEM analysis model properly, results close to the CFD analysis and experiment results can be obtained.

Science Code : 91412

Key Words : Electronic boards, heat transfer, natural convection, conduction-based Finite Element Method (FEM), Computational Fluid Dynamics (CFD), Abaqus, Star-CCM+, Isight

Page Number : 188

Supervisor : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında, bilgi ve tecrübelerini cömertçe paylaşarak beni yönlendiren tez hocam Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA'ya,

Gerek teknik, gerekse teknik dışı konularda bilgi ve tecrübelerini paylaşarak bilinçli bir mühendis olmayı bizlere her daim aşılamaya çalışan, kendisi ile çalışmaktan büyük memnuniyet duyduğum yöneticim Bülent ACAR'a,

Bu çalışmanın başından itibaren teknik ve teknik dışı bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren Emre KÜTÜKÇEKEN'e,

Özellikle elektronik kartların termal davranışının incelenmesi konusunda birlikte özveri ile çalıştığımız Mustafa ÖZÇATALBAŞ ve Emir ÖZKÖKDEMİR'e,

Çalışma süresince kaynaklarından faydalandığım Roketsan A.Ş'ye,

Bu süreçte destekleri ile hep yanımda olan anneme ve babama,

Ve çalışma boyunca sabırla ve manevi desteğiyle hep yanımda olan eşime

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
3. PROBLEMİN TANIMI VE KULLANILAN YÖNTEMLER	25
3.1. Fiziksel Model.....	27
3.2. Korunum Denklemleri ve Sınır Şartları	29
3.3. İletim Tabanlı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)	32
3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD).....	33
3.5. İletimsel Sey Analiz Modelinin Doğrulanması Kapsamında Gerçekleştirilen Deneysel Çalışma.....	35
3.5.1. Kapalı ortam kontrollü ısıtma deney düzeneği	35
3.5.2. Kapalı hacim içerisinde gerçekleştirilen deneysel çalışma.....	46
4. SEY VE HAD YÖNTEMLERİNİN MEVCUT PROBLEME UYGULANMASI	53
4.1. SEY Analiz Modelinin Kurulması	58
4.1.1. SEY analiz modelinin hücre sayısından bağımsızlaştırılması.....	62

Sayfa

4.1.2. SEY analiz modelinin deneysel çalışma ile doğrulanması	66
4.2. HAD Analiz Modelinin Kurulması	87
4.2.1. HAD analiz modelinin hücre sayısından bağımsızlaştırılması	87
4.2.2. HAD analiz modelinin deneysel çalışma ile doğrulanması	90
5. PARAMETRİK NÜMERİK (SEY VE HAD) ANALİZLER.....	91
5.1. SEY Analizleri ve Sonuçları	95
5.1.1. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda, T_{plaka} ve q değerlerinin kart ve komponent sıcaklıkları üzerindeki etkisinin araştırılması.....	95
5.1.2. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ durumunda, T_{plaka} ve q değerlerinin kart ve komponent sıcaklıkları üzerindeki etkisinin araştırılması.....	114
5.1.3. $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda, T_{ilk} ve q değerlerinin kart ve komponent sıcaklıkları üzerindeki etkisinin araştırılması.....	131
5.1.4. $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda, T_{ilk} ve q değerlerinin kart ve komponent sıcaklıkları üzerindeki etkisinin araştırılması.....	137
5.2. HAD Analizi ve Sonuçları	142
5.3. İletim Tabanlı SEY ve HAD Analiz Sonuçları ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	159
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	167
KAYNAKLAR	175
EKLER	180
EK-1. Hata analizi.....	181
ÖZGEÇMİŞ	188

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Kabin bileşenlerinin termal malzeme özellikleri	41
Çizelge 3.2. Isılçiftler için kalibrasyon denklemleri	45
Çizelge 4.1. Elektronik kart kompleksi termal malzeme özellikleri.....	58
Çizelge 4.2. SEY analiz modelinin ağdan bağımsızlaştırma çalışması kapsamında kullanılan eleman sayıları bilgileri	62
Çizelge 4.3. Analiz modelinde değeri bilinmeyen girdilerin sonuçlara etkisi ve belirlenme sırası.....	68
Çizelge 4.4. Komponent ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin ilk değeri, iterasyon için belirlenen değer aralığı ve nihai değeri.....	71
Çizelge 4.5. Taşınım katsayıları ve komponentlerdeki güç düşüm değeri için ilk değer, iterasyon için gerekli değer aralığı ve nihai değerler.....	78
Çizelge 4.6. Elektronik kart ve komponentlerin yüzeylerindeki 'C' katsayısının doğrulanmış değerleri	78
Çizelge 4.7. Mevcut çalışma kapsamında taşınım katsayısının hesaplanması için kullanılan denklem girdileri ve çıktıları (kartın alt ve üst yüzeyleri için) ..	80
Çizelge 4.8. HAD analizlerinden elde edilen taşınım katsayısı değerleri (kartın alt ve üst yüzeyleri için)	81
Çizelge 4.9. Literatürde yatay yüzeylerdeki doğal taşınım katsayısı hesabı için kullanılan denklem ile hesaplanan taşınım katsayısı değerleri (kartın alt ve üst yüzeyleri için).....	81
Çizelge 4.10. Üç farklı yöntem kullanılarak elde edilen taşınım katsayısı değerleri (kartın alt ve üst yüzeyleri için)	82
Çizelge 4.11. Mevcut çalışma kapsamında taşınım katsayısının hesaplanması için kullanılan denklem girdileri ve çıktıları (komponent üst yüzeyi için)	83
Çizelge 4.12. Doğrudan deney verileri ile ve mevcut çalışma kapsamında kullanılan denklem ile hesaplanan komponent üzerindeki taşınım katsayısı değerleri	86
Çizelge 4.13. HAD analiz modelinin ağdan bağımsızlaştırma çalışması kapsamında kullanılan eleman sayıları bilgileri	88

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. HAD ve iletim tabanlı SEY ısı transferi analizi gerçekleştirilen sınır şartları	92
Çizelge 5.2. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları	95
Çizelge 5.3. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri	99
Çizelge 5.4. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri	101
Çizelge 5.5. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri	104
Çizelge 5.6. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri	107
Çizelge 5.7. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri ..	110
Çizelge 5.8. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri ..	113
Çizelge 5.9. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları	114
Çizelge 5.10. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri.....	117
Çizelge 5.11. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri.....	120
Çizelge 5.12. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri.....	122
Çizelge 5.13. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri.....	124
Çizelge 5.14. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri ..	127
Çizelge 5.15. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri ..	130
Çizelge 5.16. $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları	131
Çizelge 5.17. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri ..	134

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.18. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 20^{\circ}C$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri	136
Çizelge 5.19. $T_{plaka} = 80^{\circ}C$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları	137
Çizelge 5.20. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 80^{\circ}C$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri	139
Çizelge 5.21. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 80^{\circ}C$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri	141
Çizelge 5.22. SEY ve HAD analizi gerçekleştirilen senaryolar	142



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Mevcut çalışma için akış şeması.....	6
Şekil 3.1. Analiz modelinin doğrulanması akış şeması	26
Şekil 3.2. Komponent içerisinde ısı üretimi olan bölge.....	27
Şekil 3.3. Elektronik kart kompleksinin ebatları	28
Şekil 3.4. Kabin iç hacim ebatları ve kart yerleşimi	28
Şekil 3.5. İki boyutlu bir probleminin çözümünde kullanılan düğüm noktaları.....	32
Şekil 3.6. Üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde hücre yapısı	33
Şekil 3.7. Üç boyutlu bir hücre için kontrol hacmi.....	34
Şekil 3.8. Kabin patlatılmış görünüm	37
Şekil 3.9. Kabin bileşenleri şematik çizimi	38
Şekil 3.10. Kabinde bulunan plaka, rezistanslı ısıtıcı ve ilgili yalıtımların şematik çizimleri ve boyutları.....	39
Şekil 3.11. Bakır plakaya gömülü olarak yerleştirilen ısılıçiftlerin konumu	41
Şekil 3.12. Varyak güç seviyesine göre ısıtıcı plaka sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği	42
Şekil 3.13. Kabin içerisindeki havanın sıcaklığının ölçülmesi için kullanılan sensörlerin konumu	43
Şekil 3.14. Kart kompleksinin kabin içerisindeki konumu.....	46
Şekil 3.15. Deneyin ilk kısmında bakır plakanın sıcaklık-zaman grafiği	47
Şekil 3.16. Elektronik kart kompleksi üzerine yerleştirilen ısılıçiftlerin konumları.....	48
Şekil 3.17. Kart kompleksi sınır şartları şematik gösterimi.....	48
Şekil 3.18. Kabin sınır şartları şematik gösterimi.....	48
Şekil 3.19. Analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneyin ilk kısmında elektronik kart ve komponent üzerine yerleştirilen ısılıçiftler ile elde edilen ölçüm sonuçları	49

Şekil	Sayfa
Şekil 3.20. Analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneyin ikinci kısmında elektronik kart ve komponent üzerine yerleştirilen ısı çiftleri ile elde edilen ölçüm sonuçları	49
Şekil 3.21. Komponentlerin çalışmadığı durumda kart etrafındaki ortam sıcaklıkları....	50
Şekil 3.22. Komponentlerin çalıştığı durumda kart etrafındaki ortam sıcaklıkları.....	51
Şekil 3.23. Analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneyin ilk kısmı için tekrarlanabilirlik çalışması	52
Şekil 3.24. Analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneyin ikinci kısmı için tekrarlanabilirlik çalışması	52
Şekil 4.1. Elektronik kart kompleksi geometrisi simetri düzlemleri	54
Şekil 4.2. ISIGHT yazılımı iterasyon şeması.....	56
Şekil 4.3. SEY kart kompleksi geometrisi	58
Şekil 4.4. SEY analiz modelinde parçalar arasında tanımlanan temaslar	59
Şekil 4.5. SEY analiz modelinde tanımlanan sınır şartları şematik görünümü	61
Şekil 4.6. SEY analizlerinde kart üzerinde 600. saniyedeki sıcaklık dağılımının incelendiği patika	62
Şekil 4.7. SEY analizlerinde kart üzerinde 600. saniyedeki sıcaklık dağılımının eleman ebadına göre değişimi, a)5mm-2,5mm; b)2,5mm-1,25mm	63
Şekil 4.8. SEY analizlerinde kart üzerinde 600. saniyedeki sıcaklık dağılımının eleman ebadına göre değişimi, a)1,25mm-0,625mm; b)0,625mm-0,5mm	64
Şekil 4.9. SEY analizlerinde komponent üst yüzey sıcaklığının farklı eleman ebatlarına göre değişimi, a) 0-600 saniye, b) 500-600 saniye	65
Şekil 4.10. SEY analizlerinde komponent üst yüzey sıcaklığının 600. saniyedeki değerinin farklı eleman ebatlarına göre değişimi	66
Şekil 4.11. Farklı yüzey tipleri için basınç-termal temas direnci grafiği.....	69
Şekil 4.12. Tüm yüzeylerde $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken, komponent ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin 1, 10 ve 100 $\text{m}^2\text{K/W}$ olduğu durumlardaki SEY analiz sonuçları, a) K-1 noktası, b) K-2 noktası, c) K-3 noktası	70

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin nihai değerleri ile gerçekleştirilen SEY analiz sonuçları ve deney sonuçları	71
Şekil 4.14. Tüm yüzeylerde $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken, komponentlerdeki güç düşüm oranının $\%10/10^\circ\text{C}$, $\%15/10^\circ\text{C}$ ve $\%20/10^\circ\text{C}$ olduğu durumlardaki SEY analiz sonuçları, a) K-1 noktası, b) K-2 noktası, c) K-3 noktası	73
Şekil 4.15. Komponentlerdeki güç düşüm oranı $\%15/10^\circ\text{C}$ iken tüm yüzeylerdeki taşınım katsayılarının 5, 15 ve $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğu durumlardaki SEY analiz sonuçları, a) K-1 noktası, b) K-2 noktası, c) K-3 noktası	75
Şekil 4.16. Taşınım katsayısı ve komponent güç düşüm değerleri için ilk değerler ($5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\%15/10^\circ\text{C}$) tanımlanarak gerçekleştirilen SEY analizi ve deney sonuçları	77
Şekil 4.17. Doğrulanmış SEY analiz modeli kullanılarak gerçekleştirilen analiz ve deney sonuçları	79
Şekil 4.18. HAD analiz modelinde kullanılan kapalı hacim ve elektronik kart kompleksi geometrisi	87
Şekil 4.19. HAD analizlerinde komponent üst yüzey sıcaklığının farklı eleman ebatlarına göre değişimi, a) 0-600 saniye, b) 500-600 saniye	89
Şekil 4.20. HAD analizlerinde komponent üst yüzey sıcaklığının 600. saniyedeki değerinin farklı eleman ebatlarına göre değişimi	89
Şekil 4.21. Kart kompleksi üzerindeki ölçüm noktalarının zamana bağlı sıcaklık değişimi, HAD analizi ve deney sonuçları	90
Şekil 5.1. Elektronik kart kompleksi üzerinde zamana bağlı sıcaklık sonucu paylaşılan noktaların konumları	92
Şekil 5.2. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^\circ\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^\circ\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	97
Şekil 5.3. $T_{ilk} = 20^\circ\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^\circ\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3	98
Şekil 5.4. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^\circ\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^\circ\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	100
Şekil 5.5. $T_{ilk} = 20^\circ\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^\circ\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3	101

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3.....	103
Şekil 5.7. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3	104
Şekil 5.8. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3.....	106
Şekil 5.9. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3	107
Şekil 5.10. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	109
Şekil 5.11. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$, c) $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$, d) $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$	110
Şekil 5.12. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	112
Şekil 5.13. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$, c) $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$, d) $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$	113
Şekil 5.14. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	115
Şekil 5.15. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3	116
Şekil 5.16. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3.....	118
Şekil 5.17. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3	119
Şekil 5.18. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3.....	121
Şekil 5.19. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3	122

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3.....	123
Şekil 5.21. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3	124
Şekil 5.22. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	126
Şekil 5.23. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$, c) $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$, d) $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$	127
Şekil 5.24. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	129
Şekil 5.25. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$, c) $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$, d) $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$	130
Şekil 5.26. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	132
Şekil 5.27. $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{ilk} = 30^{\circ}\text{C}$, c) $T_{ilk} = 40^{\circ}\text{C}$, d) $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$	133
Şekil 5.28. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	135
Şekil 5.29. $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{ilk} = 30^{\circ}\text{C}$, c) $T_{ilk} = 40^{\circ}\text{C}$, d) $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$	136
Şekil 5.30. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	138
Şekil 5.31. $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $Q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{ilk} = 30^{\circ}\text{C}$, c) $T_{ilk} = 40^{\circ}\text{C}$, d) $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$	139
Şekil 5.32. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3	140
Şekil 5.33. $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{ilk} = 30^{\circ}\text{C}$, c) $T_{ilk} = 40^{\circ}\text{C}$, d) $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$	141

Şekil	Sayfa
Şekil 5.34. Kapalı ortam içerisindeki havanın 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık, hız ve basınç sonuçlarının paylaşıldığı kesit düzlemleri	142
Şekil 5.35. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları şematik gösterimi.....	143
Şekil 5.36. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	143
Şekil 5.37. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları.....	144
Şekil 5.38. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları	144
Şekil 5.39. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları...	145
Şekil 5.40. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları şematik gösterimi.....	146
Şekil 5.41. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	147
Şekil 5.42. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları.....	147
Şekil 5.43. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları	148
Şekil 5.44. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları	148
Şekil 5.45. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları şematik gösterimi.....	150
Şekil 5.46. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	150
Şekil 5.47. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları.....	151
Şekil 5.48. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları	151

Şekil	Sayfa
Şekil 5.49. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları...	152
Şekil 5.50. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları	153
Şekil 5.51. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	153
Şekil 5.52. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları.....	154
Şekil 5.53. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları	154
Şekil 5.54. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları...	155
Şekil 5.55. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları	156
Şekil 5.56. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	156
Şekil 5.57. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları.....	157
Şekil 5.58. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları	157
Şekil 5.59. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları...	158
Şekil 5.60. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	159
Şekil 5.61. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	160
Şekil 5.62. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	160
Şekil 5.63. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$, $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	161

Şekil**Sayfa**

Şekil 5.64. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$, $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi 162



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Kabin ikinci seviye yükseklikte olduğu durumdaki genel görünümü	36
Resim 3.2. Kabin birinci kademe tavan açık görünüm	36
Resim 3.3. Kabin ikinci kademe tavan açık görünüm	37
Resim 3.4. Folyo kaplı cam yününün kabin içerisindeki yerleşimi	39
Resim 3.5. Teflon yalıtımın kabin içerisindeki yerleşimi.....	39
Resim 3.6. Rezistanslı ısıtıcının kabin içerisindeki yerleşimi	40
Resim 3.7. Mat siyaha boyanmış bakır plakanın kabin içerisindeki yerleşimi.....	40
Resim 3.8. Kabin dış yalıtımı	40
Resim 3.9. Rezistanslı ısıtıcıya kontrollü güç verilmesi için kullanılan varyak.....	42
Resim 3.10. Kabin içerisindeki kabloların dış ortama çıkartılması için gövde üzerinde bulunan kablo çıkış deliği.....	43
Resim 3.11. Deney düzeneği iki kademeli durumdaki genel görünümü	44
Resim 3.12. Elektronik kart kompleksinin kabin içerisindeki yerleşimi	44
Resim 3.13. Elektronik kart kompleksinin ayrıntılı görünümü	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a, b, c	Komponent en, boy, derinlik, (m)
A_{ışınım}	Komponent ışıınım ısı transfer alanı (m ²)
A_{iletim}	Komponent-kart arasındaki ısı iletim alanı (m ²)
A_{taşınım+ışıınım}	Komponent ışıınım/taşınım ısı transfer alanı (m ²)
c_p	Özgöl ısı (J/kg.K)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
Gr	Grashof sayısı
h	Yüzeydeki taşınım katsayısı (W/m ² .K)
h_{eşdeğer}	İşınım için eşdeğer taşınım katsayısı (W/m ² .K)
H-1, H-2, H-3	Havadaki ısı çift konumları
k	Termal iletkenlik katsayısı (W/m.K)
K-1, K-2, K-3	Kart komplei üzerindeki ısı çift konumları
m	Komponent kütlei (kg)
Nu	Nusselt sayısı
P	Basınç (Pa)
q	Komponentlerde üretilen ısı (mW/mm ³)
Q_{depo}	Komponentte depolanan toplam ısı (W)
q_{ışıınım}	Birim alandan ışıınım ile geçen ısı akısı (W/m ²)
Q_{ışıınım}	Komponentten ışıınım ile aktarılan toplam ısı (W)
q_{iletim}	Birim alandan iletim ile geçen ısı akısı (W/m ²)
Q_{iletim}	Komponentten iletim ile geçen toplam ısı (W)
Q_{komp}	Komponentte üretilen toplam ısı güç (W)
q_{parametrik}	Parametrik olarak değıştirilen ısı güç (mW/mm ³)
q_{taşınım}	Birim alandan taşınım ile geçen ısı akısı (W/m ²)
Q_{taşınım}	Komponentten taşınım ile aktarılan toplam ısı (W)
R	Termal temas direnci (m ² .K/W)
R_{kart}	Kart kalınlığı boyunca termal direnç (m ² .K/W)

Simgeler**Açıklamalar**

Ra	Rayleigh sayısı
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık (°C)
T_{çevre}[K]	Komponent çevresindeki ortam sıcaklığı (K)
T_{duvarlar}	Kapalı hacim iç duvar sıcaklığı (°C)
T_{ilk}	Sistem başlangıç sıcaklığı (°C)
T_{kart_alt}	Kart alt yüzey sıcaklığı (°C)
T_{komponent}	Komponent sıcaklığı (°C)
T_{komp}[K]	Komponent sıcaklığı (K)
T_{ortam}	Ortam sıcaklığı (°C)
T_{parametrik}	Parametrik olarak değiştirilen sıcaklık değeri (°C)
T_{plaka}	Isıtıcı plaka sıcaklığı (°C)
T_{yüzey}	Yüzey sıcaklığı (°C)
T₀	İlk sıcaklık değeri (°C)
T₁, T₂	Aralarında ısı transferi olan yüzey sıcaklıkları (°C)
T₆₀₀	600. Saniyedeki sıcaklık değeri (°C)
u, v, w	Hız bileşenleri (m/s)
V	Komponent hacmi (m ³)
W_i	Bağımsız değişkenlerin hata oranı
x, y, z	Koordinat Eksenleri (m)
α	Termal yayıcılık (m ² /s)
β	Termal genleşme katsayısı (1/K)
ΔT	Aynı noktanın farklı zamanlardaki sıcaklık farkı (°C)
ε	Yüzey yayıcılık katsayısı
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
ρ_∞	Referans Yoğunluk (kg/m ³)
σ	Stefan Boltzmann sabiti: 5,67.10 ⁻⁸ (W/m ² .K ⁴)
∇T	Sıcaklık gradyanı (°C/m)

Kısaltmalar**Açıklamalar****HAD**

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

SEY

Sonlu Elemanlar Yöntemi



1. GİRİŞ

Elektronik sistemlere duyulan ihtiyaç, beraberinde sanayinin her alanında elektronik sistemlerin yoğun bir şekilde kullanımını getirmektedir. Bu ihtiyacın her geçen gün artması ile birlikte, elektronik sistemlerin tasarımı daha dar hacimlerde daha fazla güç kullanımına yönelik olmaktadır. Bu da daha fazla ısınma ve daha düşük soğutma kapasitesi anlamına gelmektedir. Elektronik sistemler çalışma sırasında hem dâhili ısınmalara hem de harici ısınmalara maruz kalmaktadır. Dâhili ısı kaynağı, elektronik komponentlerin çalışması sırasında komponentler içerisinde elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesiyle ortaya çıkan ısıdır. Harici ısı kaynakları ise sistem ile; iletim, taşınım veya ışıyım aracılığıyla termal olarak etkileşimi olan tüm ısı kaynakları olarak düşünülebilir. Güneş ışıyımı, motor, ısıl pil, aerodinamik ısınma harici ısı kaynaklarına örnek olarak gösterilebilir. Elektronik sistemlerin görev süresince düzgün bir şekilde çalışması için komponentlerin ve elektronik kartların tasarımcı tarafından belirlenen çalışma sıcaklığı sınırları dâhilinde kalması gerekmektedir. Bu sınırlar dâhilinde kalınıp kalınmadığının tespiti için sistemlerin termal açıdan uygun bir yöntem ile incelenmesi gerekmektedir. Termal açıdan incelenen sistem gerekli şartları sağlayamadığı durumda tasarımda değişikliğe gidilmelidir ve tasarımı güncellenen sistem tekrar termal açıdan analiz edilmelidir. Bu tasarım-analiz süreci sistem gerekli termal şartları sağlayana kadar devam etmelidir. Bu sebeple kullanılacak analiz yöntemi iteratif olarak çalışmaya uygun bir yöntem olmalıdır.

Sistemin, termal açıdan incelenebilmesi için farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler temel olarak; İletim Tabanlı SEY (Sonlu Elemanlar Yöntemi) ısı transferi analizi, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizi, termal direnç ağı yöntemi ve deneysel yöntemler olarak sayılabilir. Bu yöntemlerin kendi içlerinde avantajları ve dezavantajları vardır. Uygun düzenek kurulduğunda ve uygun veri toplama işlemi gerçekleştirildiğinde deneysel olarak sistemin termal davranışının incelenmesi ile diğer yöntemlere göre en gerçekçi sonuçlar elde edilecektir. Deneysel yöntemlerin dezavantajları arasında, sistem kurulum maliyeti, veri toplama maliyeti, ısıl çift vb. sensörler kullanıldığında sistemin termal karakteristiğinin değişmesi ihtimali, istenen her senaryo için deney düzeneği kurulamaması, tekrarlanabilirlik problemi ve çok sayıda iteratif denemeler için makul olmaması gibi etkenler yer almaktadır.

Öte yandan HAD analizleri kullanıldığında, doğru model kurulduğu takdirde hem doğru sonuçlar elde edilebilecek, hem tekrarlanabilirlik, iteratif çalışmalar için makul olmama, maliyet, sistemin termal karakteristiğinin değişmesi gibi dezavantajlar görülmeyecektir. Fakat HAD analiz çözümleri genel anlamda çözüm süresi açısından dezavantajlıdır. Özellikle zamana bağlı doğal taşınım ile ısı transferinin gerçekleştiği analizler oldukça uzun sürmektedir. Eğer, sistem farklı sınır şartlarında parametrik olarak incelenecekse birçok sayıda analiz koşturulması gerekmektedir. Bu da, HAD yöntemi ile pratik anlamda uygulanabilir değildir.

Diğer bir yöntem olan termal direnç ağı ile ısı transferi çözümü için sonlu farklar yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde yalnızca iletim ile ısı transferi çözülmektedir. Taşınım ile ısı transferi olan problemlerde, taşınım sınır şartı kullanılarak çözüm yapılmaktadır. Basit geometri ve sınır şartlarındaki problemlerde bu yöntem ile oldukça basit ve hızlı bir şekilde model kurulup çözüme ulaşılabilir ve doğru sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca sistem geometrisi değişmediği sürece, kurulan model farklı sınır şartları için de kullanılabilir. Fakat problem geometrisinde, ısı transferine etkisi olacak ayrıntı seviyesi arttıkça basit model ile yeteri kadar hassas çözüm elde edilemeyecektir. Termal direnç ağı yönteminde ağ sıklığı arttıkça çözüm hassasiyeti de artmaktadır. Fakat ağ sıklığının fazla olduğu bir modelin kurulması oldukça zahmetli ve zaman alıcıdır. Ayrıca modelin yönetimi ağ sıklığı arttıkça zorlaşmaktadır. Bu gibi durumlarda termal direnç ağı yönteminin en önemli avantajı olan basitlik faktörü ortan kalkmış olur. Bu sebeplerden dolayı çok basit geometri ve sınır şartlarının haricinde termal direnç ağı yöntemi tercih edilmemelidir.

İletim Tabanlı SEY ısı transferi yöntemi maliyet, çözüm doğruluğu, iş gücü, çözüm süresi, tekrarlanabilirlik açısından avantajlı bir yöntemdir. İletim Tabanlı SEY ısı transferi analizlerinin en büyük dezavantajı, problemde yer alan akışkanın (örn. elektronik kutu içerisinde bulunan hava) analiz modeline doğrudan dâhil edilmemesidir. Akışkan ile katı yüzeyler arasında gerçekleşen ısı transferinin modellenebilmesi üzere taşınım sınır şartı kullanılmaktadır. Bunun için yüzeylerdeki taşınım katsayısının biliniyor olması gerekmektedir. Taşınım sınır şartında kullanılan ısı transfer katsayısının değeri analiz sonucunun doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır.

Sistemin iteratif olarak incelenebilmesi için zaman, efor ve maliyet olarak düşük isterlere sahip olan fakat doğru ve hassas çözüm elde edilebilecek bir yöntem kullanılmalıdır.

Yöntemlerin avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurulduğunda sistemin iteratif olarak incelenebilmesi için iletim tabanlı SEY en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. Doğru analiz modeli kurulduğunda, bir sistemin termal davranışının incelenmesi için iletim tabanlı SEY ısı transferi analizleri oldukça avantajlı bir yöntem olmaktadır.

Çalışmanın amacı ve hedefleri

Bu çalışmanın nihai amacı; kapalı ortamda bulunan ve herhangi bir aktif soğutma elemanı içermeyen bir elektronik kart kompleksinin farklı sınır şartlarındaki termal davranışının en hızlı ve doğru şekilde incelenebilmesi üzere bir yöntem geliştirip, bu yöntem ile gerekli termal incelemelerin gerçekleştirilmesidir. Sistemin farklı koşullarda termal açıdan doğru olarak, düşük maliyetle ve en az zaman harcayarak incelenebilmesi için en uygun seçenek olarak iletim tabanlı SEY belirlenmiştir. Bu sebeple bu çalışmada elektronik kart kompleksinin farklı sınır şartlarında termal açıdan incelenebilmesi için iletim tabanlı SEY kullanılmıştır. Fakat öncelikle, çözüm doğruluğundan ödün vermemek adına, iletim tabanlı SEY'in HAD yöntemine ve deneysel yöntemle kıyasla en önemli eksikliği olan akışkanın doğrudan modellenememesi dezavantajının ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu dezavantaj, akışkanın katı üzerindeki termal etkisinin hesaba dâhil edilebilmesi üzere, iletim tabanlı SEY analiz modelinde taşınım sınır şartı tanımlanması ile ortadan kaldırılabilir. İletim tabanlı SEY analiz modelinde tanımlanan taşınım sınır şartı için taşınım katsayısı ve ortam sıcaklığı bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Taşınım katsayısı, pratik uygulamalarda analitik olarak hesaplanabilen bir değişken değildir. Bu sebeple bu değişkenin deneysel yöntemlerle veya akışkanın fiziksel olarak modellendiği HAD analizi ile belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde, basit geometrik yapıdaki yüzeyler için taşınım katsayılarının hesaplanabileceği deneysel yöntemler mevcuttur. Fakat bu yöntemler ile hesaplanan taşınım katsayıları problem tipine bağlı olarak yüksek hata oranına sahip olabilmektedir. Bu yüzden taşınım katsayılarının olabildiğince probleme özgü olarak belirlenmesi en doğru yöntem olacaktır.

Taşınım sınır şartında bilinmesi gereken diğer bir değişken olan ortam sıcaklığı da pratik uygulamalarda analitik olarak hesaplanamamaktadır. Bu sebeple, ortam sıcaklığının da deneysel yöntemlerle veya akışkanın fiziksel olarak modellendiği HAD analizi kullanılarak belirlenmesi gerekmektedir.

Ayrıca, herhangi bir analiz modelinde tüm analiz girdilerinin biliniyor olması gerekmektedir. Eğer ki analiz girdileri arasında bilinmeyen veya belirsizlik içeren herhangi bir değişken varsa öncelikle bu değişkenlerin değerleri belirlenmelidir. Mevcut problemde, elektronik komponent ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direnci ve komponentlerde yüksek sıcaklıkta meydana gelen güç düşüm oranı da analiz modeline girdi olan fakat değeri bilinmeyen ve analitik olarak hesaplanamayan değişkenlerdir.

Özet olarak, mevcut durumda elektronik kart kompleksinin iletim tabanlı SEY ısı transfer analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için;

- Yüzeylerdeki taşınım sınır şartı için gerekli taşınım katsayılarının,
- Yüzeylerdeki taşınım sınır şartı için gerekli ortam sıcaklıklarının,
- Elektronik komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin ve
- Elektronik komponentlerde yüksek sıcaklıkta meydana gelen güç düşüm oranının

biliniyor olması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, çalışmanın nihai amacına yönelik olarak, kapalı hacim içerisinde bulunan elektronik kart kompleksinin doğal taşınım altındaki ısınmasının simüle edileceği iletim tabanlı SEY analiz modeli kurulmuş ve kurulan analiz modeli matematiksel ve fiziksel olarak doğrulanmıştır. Matematiksel doğrulama kapsamında analiz modelinin çözüm açısından bağımsızlaştırılması yer almaktadır. Analiz modelinin fiziksel olarak doğrulanması amacıyla, kapalı ortam içerisinde bulunan kart kompleksi için komponentlere sabit ısı akısı uygulanarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, analiz modelinde belirsizlik içeren; yüzeylerdeki taşınım katsayıları, parçalar arasındaki termal temas direnci ve elektronik komponentlerdeki güç düşüm değerinin belirlenmesi için referans olarak kullanılmıştır.

Yüzeylerdeki taşınım sınır şartının tanımlanması için gerekli olan ortam sıcaklıklarının belirlenmesi bu çalışma kapsamında yer almamaktadır. Bunun yerine, doğrulama amacıyla gerçekleştirilen deneyde ısılıçiftler ile ölçülen ortam sıcaklık değerleri iletim tabanlı SEY analiz modeline girdi olarak sağlanmıştır. Böylece değeri belirlenmesi gereken bilinmeyen sayısı en aza indirilerek değişkenlerin değerleri en az hata ile belirlenmiştir. Bu sayede, doğrulanan analiz modeli kullanılarak, varsayılan ortam sıcaklıklarında termal analizler gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada nihai amaç belirli bir sınır şartında sistemin

cevabının belirlenmesi olmayıp, sistemin parametrik olarak farklı sınır şartlarında karşılaştırmalı olarak termal davranışının incelenebilmesi amacıyla en uygun yöntemin geliştirilmesi ve bu yöntem ile gerekli incelemelerin yapılmasıdır. Çalışmanın amacı göz önünde bulundurulduğunda, ortam sıcaklıklarının analiz modelinin doğrulanması kapsamında belirlenmemesi herhangi bir sorun teşkil etmemektedir.

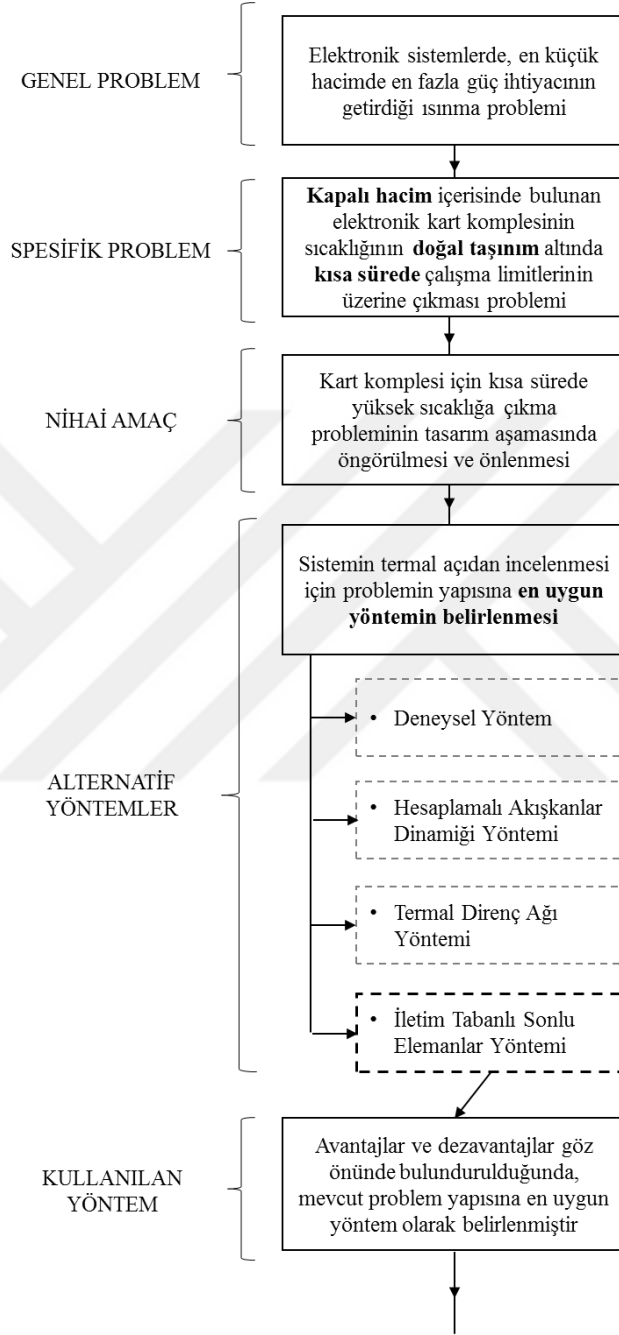
Deneysel çalışma sonuçları kullanılarak analiz modelinin doğrulanması işleminde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

1. Elektronik kart kompleksi için kapalı ortamda deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi
2. Kart kompleksinin iletim tabanlı SEY ısı transfer analiz modelinin kurulması
3. SEY analiz modelinin hücre sayısından bağımsızlaştırılması
4. SEY analiz modeline girdi olan fakat değeri bilinmeyen değişkenlere ilk değer belirlenip atanması
5. Tanımlanan ilk değerler ile kart kompleksinin deney şartlarını yansıtan iletim tabanlı SEY ısı transfer analizinin gerçekleştirilmesi
6. Analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılıp, karşılaştırma sonucuna göre değeri bilinmeyen değişkenlere yeni değerlerin atandığı iterasyon sürecinin gerçekleştirilmesi
7. Gerçekleştirilen iteratif analizlerin arasından, analiz ve deney sonuçlarının örtüştüğü durumdaki analiz girdilerinin gerçek değerler olarak elde edilmesi

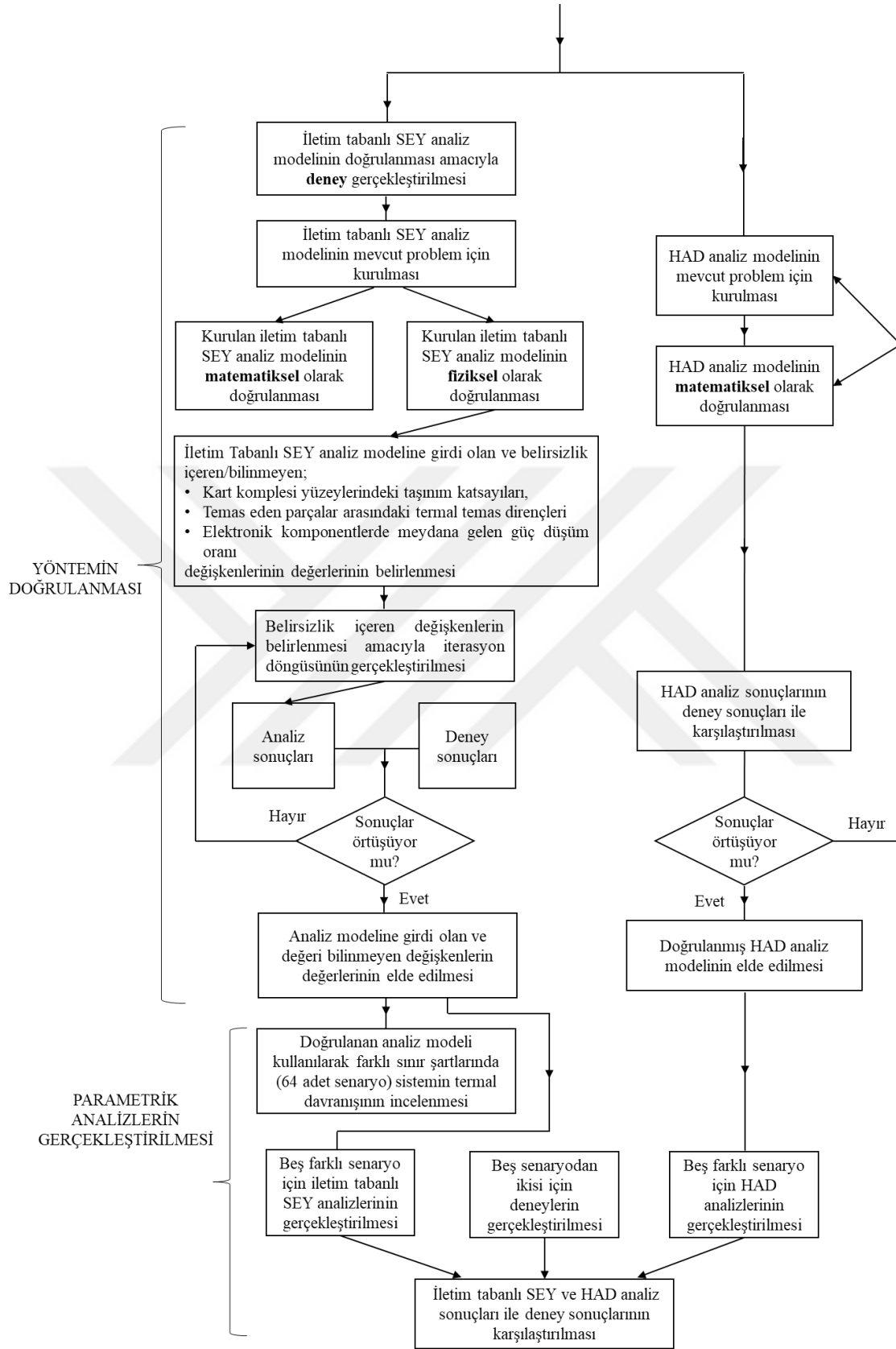
Bu adımlar tamamlandıktan sonra mevcut problem için iletim tabanlı SEY analiz modelinin hem matematiksel olarak hem de fiziksel olarak doğrulandığı söylenebilir. Sistemin karakteristiğini etkileyecek geometrik, yapısal vb. kritik değişiklikler yapılmadığı takdirde sistemin farklı sınır şartlardaki termal davranışı doğrulanmış analiz modeli kullanılarak incelenebilir.

Çalışmanın son aşamasında, doğrulanmış analiz modeli kullanılarak, sistem başlangıç sıcaklığı, taban yüzey sıcaklığı ve elektronik komponentlerin gücünün farklı değerleri için sistemin termal davranışının incelenmesi üzere gerekli analizler gerçekleştirilmiş ve ilgili sonuçlar paylaşılmıştır. Ayrıca, beş farklı senaryo için HAD ve SEY analizleri gerçekleştirilip, sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada takip edilen akış şeması Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Mevcut çalışma için akış şeması



Şekil 1.1. (devam) Mevcut çalışma için akış şeması

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, kapalı hacim içerisindeki elektronik kart komplekslerinin doğal taşınım altında termal davranışının incelenmesi ile ilgili literatürde bulunan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Ocak, bir elektronik kartın kapalı bir hacim içerisindeki termal davranışını farklı durumlar için komponent seviyesinde, kart seviyesinde ve sistem seviyesinde nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışma kapsamında 3 farklı problem ele alınmıştır. İlk problem, kapalı ortam içerisinde bulunan doğal taşınım altındaki elektronik kart kompleksinin 5 farklı seviyede kompakt olarak modellendiği durum için ve ayrıntılı modellendiği durum için HAD analizlerinin yapılmasını ve bu kart kompleksinin deneysel olarak incelenmesini kapsamaktadır. İkinci problemde bir DC/DC çeviricinin fan kullanılarak aktif olarak soğutulması deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bu problemde DC/DC çevirici kompleksinin 3 farklı seviyede kompakt modellendiği durum için HAD analizleri koşturulmuş ve sistem deneysel olarak incelenmiştir. Üçüncü problemde ise 12 adet elektronik kart kompleksinden oluşan bir elektronik kutunun 5 farklı seviyede kompakt olarak dâhil modellendiği durum için HAD analizleri ve deneysel olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Kompakt modellemenin amacı hesaplama süresinin azaltılmasıdır. Farklı kompakt modelleme seviyelerinin kart üzerindeki sıcaklık sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Tüm analizler HAD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıntılı modelleme tekniği, parçaların ince ayrıntıları nümerik modele dâhil edildiği için hem modelleme aşamasında hem de analizin koşturulması aşamasında zaman ve efor açısından oldukça dezavantajlı olduğundan, kabul edilebilir hata bandında kalınacak en basit seviyede kompakt modelleme tekniğinin kullanılması gereklidir. Analiz ve deney sonuçlarına göre kart seviyesi analizlerde ayrıntılı model kullanılması gerektiği, fakat kart ve sistem seviyesi analizlerde kompakt modelleme tekniği kullanılabileceği çıkarımına varılmıştır. 1., 2. ve 3. seviye kompakt modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonuçlarında hücre sayısı yaklaşık olarak %70 azalmasına rağmen, ayrıntılı modelleme tekniği ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre kabul edilebilir hata bandının dışında kalmayacak sonuçlar elde edilmektedir. 4. ve 5. seviye kompakt modelleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde komponent ayakları vialar vs. ayrıntılar modellenmediğinden hücre sayısı ayrıntılı modelleme tekniğine göre yaklaşık olarak %90 azaltılmıştır. 4. ve 5.

seviyede kompakt modelleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilen analizler ile elde edilen sıcaklık değerleri yaklaşık %10 hata bandında kalmaktadır, fakat kart ve gövde yüzeyi üzerindeki sıcaklık dağılımı ayrıntılı modelleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilen analizlere göre farklılık göstermektedir [1].

Eveloy ve Rodgers, zerine 160-ayaklı plastik dörtlü düz paket yapısında olan bir komponentin yerleştirildiği bir elektronik kart kompleksinin termal davranışını incelemiştir. İnceleme kapsamında deneysel ve nümerik yöntemler kullanılmıştır. Nümerik analizler ticari bir HAD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Komponentte üretilen ısınma miktarı ve ortam hava sıcaklığı zamana bağlı olarak değişmektedir. Analiz ve deneylerde kart kompleksinin, havanın farklı hızları için ve ortam hava sıcaklığının farklı artış hızları için termal davranış gerçekleştirilmiştir. Ortamdaki hava hızının 0 (doğal taşınım), 1, 2,25 ve 4 m/s olduğu durumlar incelenmiştir. Ortamdaki hava sıcaklığının ise 5, 15 ve 25 °C/dk oranlarında arttığı durumlar incelenmiştir. Kararlı durumda analiz ve deney sonuçları arasında 3 °C'nin altında fark elde edilmektedir. Komponentte üretilen ısı miktarı sabit tutulup ortam hava sıcaklığı değişken olduğuunda analiz ve deney sonuçları arasındaki farkın 4,5 °C'nin altında olduğu tespit edilmiştir. Komponentte üretilen ısı miktarı ve ortam hava sıcaklığının değişken olduğu durumda analiz ve deney sonuçları 5 °C bandında örtüşmektedir. Eşlenik olarak czlen analiz sonuçlarının eşlenik olmayan analiz sonuçlarına göre daha doğru olduğu çıkarımına varılmıştır [2].

Byon, Choo ve Kim, baskı devre kartı üzerinde bulunan bir mikroipin kalınlığının ip sıcaklığı üzerindeki etkisini deneysel ve analitik olarak incelemiştir. alışmalar ipte üretilen ısının farklı değerleri için gerçekleştirilmiştir. ip kalınlığının 21,5, 42, 100 ve 400 mikrometre değerleri için inceleme yapılmıştır. Komponentte üretilen ısı değerleri 0,2, 0,3, 0,4 ve 0,5 W olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ısıtıcı bölgesindeki sıcaklık değerleri için deneysel ve analitik çalışmalar arasında en fazla %7 fark görülmüştür. Isıtıcı bölgesinden uzaklařtıķa harici hava hareketleri vb. sebeplerden dolayı bu fark artmaktadır. ip kalınlığı ile ip sıcaklığı arasında oldukça yüksek bir ters orantı olduğu tespit edilmiştir [3].

Lira ve Greenlee, bir elektronik kart kompleksinin ayrıntılı ve basitleştirilmiş olarak termal analizlerini gerçekleştirmiştir. Basitleştirilmiş model ve ayrıntılı model kullanılarak gerçekleştirilen termal analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında termal

vakum ve termal döngü analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde girdi olan taşınım katsayıları, literatürde bulunan deneye dayalı yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıntılı model kurulması ve bu model ile analizlerin koşturulması zaman ve efor açısından maliyetli olacağından kabul edilebilir hata bandında kalındığı sürece basitleştirilmiş model kullanılması gerekmektedir. Kart kompleksinin bağlandığı gövde üzerindeki sıcaklık değerlerinin hesaplanması için basitleştirilmiş model kullanılmasının makul olduğu belirlenmiştir. Fakat kart üzerinde bulunan komponentlerin sıcaklık değerlerinin kabul edilebilir hata bandında hesaplanabilmesi için ayrıntılı model kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kart üzerinde yoğun olarak elektronik komponent bulunduğu durumlarda da basitleştirilmiş model kullanımı ile yeteri kadar düşük hata oranları elde edilebileceği çıkarımına varılmıştır [4].

Devellioğlu, deniz platformuna entegre edilen bir elektronik sistemin termal davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Nümerik analizler ticari bir SEY analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler karalı durum için gerçekleştirilmiştir. Analizlerde elektronik kartların termal iletkenlik değerinin hesaplanmasında eşdeğer özellikler kullanılmıştır. Yüzeylerdeki taşınım katsayıları literatürde bulunan deneye dayalı yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda elde edilecek yüzey sıcaklık değerleri bilinmediği için ve taşınım katsayıları yüzey ile ortam sıcaklıkları farkına bağlı olduğu için taşınım katsayıları iteratif analizler koşturularak elde edilen sonuçlara göre hesaplanmıştır. Toplamda 5 adet iterasyon yapılarak taşınım katsayıları elde hesaplanmıştır. Analizlere ek olarak cihaz çalışır durumdayken operasyonel yüksek sıcaklık deneyi gerçekleştirilmiştir. Analiz ve deney sonuçlarında cihazın görev sırasında ulaştığı en yüksek sıcaklık değerinin, çalışma sıcaklık limitinin altında kaldığı görülmektedir [5].

Cheng, Ciou, Chen, Kuo, Lu ve Wu, kart seviyesinde bir transmitterin doğal taşınım altında kararlı durumdaki termal davranışı iletim tabanlı SEY ısı transferi analizi ve HAD analizi ile incelenmiştir. Analizler, çipin yer çekimi ile aynı yönde ve ters yönde olduğu durumlar için gerçekleştirilmiş ve bu analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Analizlerde elektronik kartın termal iletkenlik değerinin hesaplanmasında eşdeğer özellikler kullanılmıştır. SEY (iletim) analizlerinde taşınım katsayısı, literatürde bulunan deneye dayalı yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca kızılötesi kamera kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Analizlerde elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Analiz deney karşılaştırmasına ek olarak sistemin parametrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma kapsamında, ısı plakası kalınlığı, ısı kuyusu taban alanı, kanatçık yüksekliği, baskı devre kartı alanı, gres termal iletkenlik değeri ve ana katman termal iletkenliğinin farklı değerleri için sistemin termal davranışı incelenmiştir. Isı plakası kalınlığı 1, 2 ve 3 mm, ısı kuyusu taban alanı 1, 2 ve 3 mm², kanatçık yüksekliği 1, 2 ve 3 mm, baskı devre kartı alanı 1, 2 ve 3 mm², gres termal iletkenlik değeri 1, 2 ve 3 W/m.K, ana katman malzemesi termal iletkenlik değeri 1, 2 ve 3 W/m.K değerleri için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz ve deney sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü görülmüştür. Çipin yer çekimine ters yönde olduğu durumda doğal taşınım etkisinden dolayı daha iyi termal performans elde edilmiştir. Isı plakası kalınlığı, ısı kuyusu, baskı devre kartı ve ana katman malzeme termal iletkenlik değerleri arttıkça termal performansta iyileşme elde edilmektedir [6].

Kumar, Somashekhar ve Jagalur, bir otomobil kontrol ünitesinin termal yönetimini deneysel ve nümerik olarak ele almıştır. Nümerik analizler SEY kullanılarak kararlı durum için gerçekleştirilmiştir. Elektronik kontrol ünitesi analiz modelinde bütün parçalar arasındaki termal temas direnci ihmal edilmiştir. Ünitenin dış ortam ile ısı alışverişi taşınım sınır şartı ile modellenmiştir. Taşınım katsayıları 5-10 W/m².K değerleri arasında kabul edilmiştir. Deneysel çalışma ile taşınım katsayılarının değeri tespit edilmiştir. Deney ile doğrulanan analiz modeli kullanılarak elektronik kontrol ünitesinin termal açıdan optimum tasarımı belirlenmiştir. 5 farklı tasarım alternatifi belirlenip bu alternatiflerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Alternatifler arasında ısı kuyusunun cinsi, konumu ve oryantasyonu farklılık göstermektedir. Elde edilen sıcaklık sonuçlarına göre en iyi termal performansın görüldüğü tasarım belirlenmiştir [7].

Cheng, Chen ve Cheng, baskı devre kartı üzerine yerleştirilmiş bir komponentin doğal taşınım altında kararlı durumdaki termal davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Nümerik analiz, iletim tabanlı SEY ısı transferi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Nümerik analiz modelinde doğal taşınım ile ısı transferi, taşınım sınır şartı kullanılarak simüle edilmiştir. Taşınım katsayısı literatürde bulunan deneye dayalı yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Problemin deneysel incelenmesinde sıcaklık ölçümleri için kızılötesi kamera kullanılmıştır. Komponent paketleme şekilleri değiştirilerek parametrik incelemeler yapılmıştır. Analiz ve deney sonuçlarının örtüştüğü

gözlemlenmiştir. Komponent ile baskı devre kartı arasındaki termal iletim yollarının artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır [8].

Joshy, Jellesen, Ambat, kapalı bir hazne içerisinde bulunan ve birbirine paralel duran plakalardan oluşan bir elektronik komplemin farklı değişkenler altındaki termal davranışını hem zamana bağlı durum için hem de kararlı durum için incelemiştir. Plakalardan bir tanesi üzerinde sistemin ısınmasına sebep olacak komponentler bulunmaktadır. Diğer iki plakada ise düşük seviyede güç çeken komponentler bulunmaktadır. Kapalı hazne dikdörtgen prizma yapısındadır ve haznenin üst yüzeyinde bir adet delik bulunmaktadır. Sistemin termal davranışına etkisi incelenen değişkenler; plakalar arası mesafe ve kutu üst yüzeyinde bulunan deliğin çapıdır. İnceleme deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra direnç-kapasitör modeli ile nümerik olarak incelenmiştir. Plakalar arası mesafenin 7,5; 11,25 ve 15 mm olduğu durumlar için ve delik çapının 0, 2 ve 10 mm olduğu durumlar için incelemeler yapılmıştır. Plakalar arası mesafenin değişmesi ile ortadaki plakanın sıcaklığında görülen değişim yalnızca 3°C civarında olmaktadır. Kutudaki deliğin çapındaki değişim ise ortadaki plakanın sıcaklığının yalnızca 2°C değişmesine sebep olmaktadır [9].

Xu, bir işlemcinin farklı değişkenler altındaki termal davranışını incelemek amacıyla nümerik analizlerini yapmıştır. Analizler ticari bir HAD yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. İşlemci üzerinde bir adet kanatçıklı ısı kuyusu bulunmaktadır. Fakat bu ısı kuyusunun kanatçıkları arasındaki hava, çözüm süresinin azaltılması amacıyla nümerik modele geometrik olarak dâhil edilmemiş bunun yerine ısı kuyusu üzerinde gerçekleşecek ısı transferine eşdeğer bir taşınım katsayısı kullanılmıştır. Sistemin termal davranışına etkisi incelenen değişkenler; çekirdek sayısı, çekirdek dağılım konfigürasyonu ve işlemciye verilen güç miktarıdır. Çekirdek sayısının 4 ve 16 olduğu durumlar incelenmiştir. İşlemciye verilen güç değerinin 4 W/çekirdek ve 8 W/çekirdek olduğu durumlar incelenmiştir. Çekirdek dağılımı ise, 4 adet çekirdek için ilk olarak merkezde bir arada ikinci olarak da köşelerde, 16 adet çekirdek için öncelikle ortada yan yana, daha sonra da altta ve üstte birbirinden ayrı olduğu durumlar arasında değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. 4 çekirdekli işlemci için, dağınık yerleşim olan durumda toplu yerleşim olan durumdan 10°C daha düşük sıcaklık sonuçları elde edilmiştir. 16 çekirdekli işlemci için, dağınık yerleşim olan durumda sıcaklık değeri toplu yerleşim olan durumdan yaklaşık olarak 8°C daha düşük çıkmıştır. 4 ve 16 çekirdekli işlemcilerde toplu yerleşim

konfigürasyonunda birbirine yakın termal direnç değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde 4 ve 16 çekirdekli işlemcilerde dağınık yerleşim durumunda birbirine yakın termal direnç değerleri görülmektedir. Fakat aynı çekirdek sayısı farklı konfigürasyonlarda dizildiğinde toplu yerleşim ile elde edilen termal direnç değeri dağınık yerleşim ile elde edilen değerin yaklaşık 1,5 katı olmaktadır [10].

Yu ve Joshi, kapalı bir ortamda bulunan ve üzerinde kanatçıklı ısı kuyusu bulunan bir ısı kaynağından iletim, taşınım ve ışıınım yoluyla aktarılan ısı transferini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Isıtıcı, üzerinde bir açıklık bulunan haznede, hazne ise etrafı tamamen kapalı olan bir hacim içerisinde bulunmaktadır. Isıtıcının yatay yüzeyde ve düşey yüzeyde durduğu durumlar için incelemeler yapılmıştır. Analizler HAD yöntemi ile gerçekleştirilmiştir [11].

Stancato, Santos ve Pustelnik, bir hava aracında kullanılan bir elektronik sistemin termal davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Elektronik kart üzerinde hacimsel ve yüzeysel ısı akısı tanımlamanın sıcaklık sonuçlarına etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Elektronik sistemin doğal taşınım ve zorlanmış taşınım soğutulduğu durumlar için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler karalı durum için koşturulmuştur. Yüzeysel ısı akısı tanımlanması genel anlamda hacimsel ısı akısı tanımlanmasından daha yüksek sıcaklık değerleri ile sonuçlanmıştır. Deney ve analiz sonuçlarının birçok noktada birbirine yakın olduğu görülmektedir [12].

Deng, iki boyutlu kare şeklinde kapalı hacim içerisinde 2 ve 3 adet ısıtıcının düşey pozisyonda olduğu durumda laminer bölgede doğal taşınım ile ısı transferi davranışını nümerik olarak incelemiştir. Ra sayısının ısı transferine etkisi incelenmiştir. Isıtıcılar birbirinden uzaklaştıkça girdap sayısı ve ısı transferi miktarı azalmaktadır [13].

Khatamifar, Lin, Armfield, Holmes ve Kirkpatrick, iki boyutlu kare şeklinde kapalı bir hacim içerisinde gerçekleşen doğal taşınım ile ısı transferini HAD analizleri ile incelemiştir. Kapalı hacim farklı boyutlarda iki küçük hacme bölünerek ve duvar sıcaklıklarının farklı değerlerde olacak şekilde ısıtıldığı durumlar için incelemeler yapılmıştır. Kapalı hacmin iki küçük hacme bölünmesi için kullanılan bölmenin kalınlığının 0,05; 0,1 ve 0,2, bölme pozisyonunun 0,25; 0,5 ve 0,75, Ra sayısının 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 , 10^9 , boyutsuz değerlerinde olduğu durumlar için incelemeler yapılmıştır. Analiz

sonuçlarına göre, kapalı hacim içerisinde bölme bulunmasının ısı transferini önemli miktarda etkilediği görülmüştür. Bölme kalınlığı ile ısı transferi arasında ters orantı olduğu sonucuna varılmıştır. Bölmenin hacim içerisindeki pozisyonunun toplam ısı transferine etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu çıkarımına varılmıştır [14].

Zaman, Turja ve Molla, iki boyutlu dikdörtgensel bir kapalı hacim içerisinde tabanda iki adet ısıtıcı bulunan durumda farklı Ra sayıları için doğal taşınım ile gerçekleşen ısı transferini nümerik olarak incelemiştir. Analizlerde HAD yöntemi kullanılmıştır. Ra sayısı 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 , değerleri arasında değiştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre Ra sayısı arttıkça doğal taşınım akış debisinin arttığı gözlemlenmiştir. Isıtıcılardaki bölgesel ısı transferi Ra sayısının artışıyla birlikte artmaktadır. [15].

Nogueira, Martins ve Ampessan, bir duvarı sıcak, bir duvarı soğuk sabit sıcaklıkta olan dikdörtgensel bir kapalı hacim içerisindeki kararlı durumda doğal taşınım ile gerçekleşen ısı transferini nümerik olarak incelemiştir. Kapalı hacim içerisinde farklı Ra değerlerinin ve farklı en/boy oranlarının etkisi incelenmiştir. Analizler, HAD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ra sayısının 10^4 , 10^5 ve 10^6 olduğu değerler, en/boy oranının 0,5; 1; 2 ve 3 olduğu durumlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre Ra sayısının ısı transferine önemli ölçüde etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Nu sayısının en/boy oranı ile doğru orantılı olduğu çıkarımına varılmıştır [16].

Taliyan, Sarkar, Biswas ve Kumar, kapalı hacme sahip bir elektronik rafın HAD kullanılarak termal analiz çalışmasını gerçekleştirmiş ve deneysel çalışma ile analiz sonuçlarının doğrulanması aşamasını gerçekleştirmiştir. Analiz, kararlı durum için gerçekleştirilmiştir. Raf içerisinde güç kaynağı, işlemci gibi ısı kaynakları bulunmaktadır. Sistemde herhangi bir aktif soğutma elemanı yer almamaktadır. Sonuçlar incelendiğinde analiz ve deney sonuçları 3-4 °C fark ile örtüşmektedir. Kapalı hacmin içi ile dışı arasında en yüksek 20°C fark görülmüştür [17].

Chavan ve Sathe, kapalı bir hacim içerisine yerleştirilmiş bir elektronik kompleinin, sistemde bulunan elektronik komponentlerin ısınması sonucundaki termal davranışını nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Nümerik analizler HAD kullanılarak kararlı durum için gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında komponentlerin baskı devre kartı üzerindeki yerleşiminin ve hacim içerisine doğal taşınım ile ısı transferini artırmak

amacıyla ızgara yerleştirilmesinin sistem üzerindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analiz ve deney sonuçları 2-3°C bandında örtüşmektedir. Komponentlerin uygun bir şekilde yerleştirildiği durumda kutunun sıcaklığı 3-6°C arası azalmaktadır. Izgara konulması ise doğal taşınım ile ısı transferini artırdığından yaklaşık 3-5°C sıcaklık düşüşü sağlanmaktadır [18].

Han, Jung, otomobilde kullanılan ve kapalı hacim içerisinde bulunan bir elektronik sistemin termal davranışını HAD analizleri ile incelemiştir. Çalışmada analiz modeli 5 farklı ayrıntı seviyesinde modellenmiştir. Bu farklı modelleme teknikleri arasındaki farklar incelenmiştir. Beklendiği gibi, modeldeki ayrıntı seviyesi arttıkça sonuçlardaki ayrıntı seviyesi ve hassasiyet de artmaktadır. Fakat aynı zamanda ayrıntı seviyesinin artması ile çözüm ağı da büyüyeceği için çözüm süresinde artış olmaktadır. Bu sebeple ayrıntı seviyesi için bir eniyileme çalışması yapıp, en kısa sürede en hassas sonuçların elde edildiği ayrıntı seviyesi belirlenmiştir [19].

Chen, Cheng ve Shen, baskı devre kartı üzerinde bulunan bir elektronik komponentin üç boyutlu SEY analiz modelinin kurulmasında yeni bir yöntem kullanmıştır. Çalışmada numune olarak bir adet 100 ayaklı ince düz paketlenmiş bir komponent kullanılmıştır. Yöntem aynı zamanda kart kompleksinin deneysel incelenmesini kapsamaktadır. Gerçekleştirilen deneyde komponentin çalıştırılması ile dâhili ısınma meydana gelmektedir. Kart üzerindeki sıcaklık dağılımı kızılötesi kamera vasıtası ile ölçülmektedir. Kamera ölçüm sonuçları SEY analiz modeline aktarılıp, analiz modelinde sınır şartı olarak kullanılmaktadır. Böylece kart kompleksinin karakterizasyonu SEY analizleri ile yapılabilmektedir. Çalışma doğal taşınım altındaki kart kompleksinin kararlı durumu için gerçekleştirilmiştir. Doğal taşınım ile ısı transferi, SEY analiz modeline taşınım sınır şartı tanımlanarak dâhil edilmiştir. Taşınım katsayısı literatürdeki deneye dayalı yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır [20].

Pang, tümleşik güç elektroniği modülünün farklı sınır şartlarındaki termal davranışını incelemiştir. Çalışma kapsamında deneysel ve nümerik yöntemler kullanılmıştır. Nümerik analizler ticari bir HAD yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler nümerik modellerin valide edilmesi, tümleşik güç modülünün termal performansının karakterize edilmesi ve farklı soğutma tekniklerinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Doğrulanmış nümerik analizler ise geometrik şartlar, malzeme özellikleri gibi farklı termal tasarım

parametrelerinin modül üzerindeki termal davranışının incelenmesi, farklı soğutma tekniklerinin incelenmesi ve termal tasarıma yön verecek çıkarımlar elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda sıcaklık ölçümleri kızılötesi kamera kullanılarak yapılmıştır. Nümerik modelin doğrulanması aşamasında deneysel ve nümerik sonuçlar yaklaşık 2°C bandında örtüşmektedir. Sistem üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi parametrik olarak incelenen değişkenler; çipler arası mesafe ve bakır yolların alanı, bileşenlerin malzemesi, yalıtım kalınlığı ve soğutma mekanizmasıdır. Sonuç olarak, mosfetlerin güç tüketimine bağlı sıcaklık artışı karakterize edilmiştir. Çipler arası mesafenin değiştirilmesi ile sıcaklık artışında 10°C'ye kadar fark görülmektedir. Seramik malzeme cinsinin değiştirilmesi ile 15°C'ye kadar fark görülmektedir. Bileşenlerin kalınlığının değişmesi ile sıcaklık artışında %20 fark gözlemlenmiştir. Sıvı ile soğutma sisteminde akışkan hızı arttıkça soğutma performansı da artmaktadır fakat belirli bir değerden sonra akış hızı sistemin termal davranışına olumsuz etki etmektedir [21].

Zahn ve Stout, bir elektronik komponentin, FR4 ve alüminyum malzemelerinden üretilmiş baskı devre kartları üzerine yerleştirildiği durum için doğal taşınım altında kararlı durumdaki SEY ısı iletimi analizlerini gerçekleştirmiştir. Taşınım ile ısı transferini sisteme dâhil etmek için kart ve komponent yüzeylerine taşınım ile ısı transferi sınır şartı tanımlanmıştır. Taşınım katsayıları için üç farklı deneye dayalı yöntem (eş sıcaklık, tek yüzey eş ısı akısı, çift yüzey eş ısı akısı) kullanılmıştır. SEY analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu iki sonuç HAD analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. FR4 baskı devre kartı için, eş sıcaklık taşınım katsayısı hesaplama modeli kullanıldığında yaklaşık %12 hata ile en doğru sonuçlar elde edilmektedir. Alüminyum baskı devre kartı için çift yüzey eş ısı akısı taşınım katsayısı hesaplama modeli kullanıldığında yaklaşık %13 hata ile en doğru sonuçlar elde edilmektedir [22].

Dhinsa, Bailey ve Pericleous, kapalı ortamda bulunan fan kullanılarak soğutulan bir elektronik kart kompleksinin kararlı durum için HAD analizlerini gerçekleştirmiştir. HAD analiz modeli farklı türbülans modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu modeller arasındaki farklar incelenmiştir. Kullanılan modelleme teknikleri; LVEL, LVEL CAP, Wolfstein, k- ϵ , k- ω , SST, k- ϵ /kl'dir. Standart Reynolds k- ϵ modeli kullanıldığında, referans değerlerden en uzak sonuçlar elde edilmektedir. Diğer modeller kullanılarak elde edilen sonuçların referans değerler ile uyumu arasında net bir ayrım yapılamamıştır [23].

Rosten ve Parry, plastik dört düz paket (PQFP) tipi entegre devreler için standart bir termal model geliştirmek amacıyla bir adet 208 ayaklı plastik dört düz paket tipi entegre devrenin deneysel ve nümerik olarak termal modelinin doğrulanması çalışmasını gerçekleştirmiştir. Termal modelin doğrulanması kapsamında jonksiyon-hava arası termal direnç değeri ve kart ve paket üzerindeki sıcaklık dağılımı için nümerik analiz ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Nümerik yöntem olarak HAD kullanılmıştır. Termal modelin doğrulanması kapsamında, kapalı ortamda doğal taşınım altında bulunan ilgili devre elemanına güç verilmesi sonucu ısınması deneysel olarak ve HAD analizleri ile incelenmiş ve jonksiyon-hava arası termal direnç değeri ve kart ile paket yüzeylerindeki sıcaklık dağılımı için analiz ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada JEDEC ve SEMI standartlarında belirtilen kapalı hacimler için ayrı ayrı deneyler ve analizler gerçekleştirilmiştir. Kapalı hacim içerisinde bulunan kart ve tümleşik devre JEDEC standardına göre yatay, SEMI standardına göre dikey pozisyonda tutulmuştur. Her iki standartta da kapalı hacim boyutları 305x305x305 mm'dir. Çalışma, sistemin kararlı haldeki davranışı için gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyde, deneme kartı ve PQFP yüzeyi üzerindeki sıcaklık dağılımının ölçülmesi üzere yüksek çözünürlüklü kızılötesi ısı görüntüleme tekniği kullanılmıştır. Kapalı hacim içerisindeki hava sıcaklığının ölçülmesi için ise yatay pozisyonundaki durum için karttan 25 mm uzağa, dikey pozisyonundaki durum için ise karttan 13 mm uzağa T tipi ısılıçift yerleştirilmiştir. Deneyde tümleşik devreye 1 W güç sağlanmıştır. Çalışma kapsamında nümerik analizler ticari bir HAD yazılımı olan FLOTHERM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PQFP bileşenleri dikdörtgen prizma olarak modellenmiştir. Bileşenler arası termal temas direnci değerinin ihmal edilebilir seviyede olduğu ispatlanmış ve HAD analiz modelinde bu değerler ihmal edilmiştir. Kartın alt ve üst yüzeyleri için ve PQFP üst yüzeyi için ışıınım sınır şartı tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen analiz sonucunda verilen toplam 1 W'lık gücün %75'inin kart üzerinden havaya aktarıldığı belirlenmiştir. Analiz ve deney sonuçları %3,5'in altında fark ile örtüştüğü sonucuna varılmıştır. JEDEC deneyinde elde edilen direnç değeri SEMI deneyinde elde edilenden 1,2 °C/W daha yüksek çıkmaktadır. Bunun sebebi ise kartın yatay ve dikey duruş pozisyonudur. PQFP için termal model kurulduktan sonra, kurulan model kullanılarak bir diz üstü bilgisayarın sistem seviyesinde termal analizi gerçekleştirilmiştir. Diz üstü bilgisayarda kullanılan PQFP analiz modeli için gerekli yapısal değişiklikler yapılmış ve daha sonra analiz gerçekleştirilmiştir. Deney ve analiz sonuçlarının %10'un altında hata ile örtüştüğü sonucuna elde edilmiştir. Böylece PQFP için doğrulanan termal modelin pratik bir örnekte uygulanabilirliği gösterilmiştir. [24]

Elektronik komponentlerin termal performanslarının hızlı ve doğru bir şekilde incelenmesi üzere gerekli sadeleştirmeler yapılarak nümerik yöntemler kullanılmaktadır. Lall, Guenin, Marrs ve Molnar, komponent paket geometrisinde, baskı devre kartında ve kart ile hava arasında gerçekleşen ısı transferinin modellenmesinde belirli sadeleştirmeler yaparak dört düz paket yapısındaki entegre devrenin termal modelinin kurulmasına dair yöntemleri anlatmış ve bu yöntemlerin doğruluğunu daha kapsamlı nümerik modellerle ve deneysel yöntem ile incelemiştir. Öncelikle paket geometrisinde, ayakların eşdeğer boyutlarda ve modifiye edilmiş termal iletkenlik katsayısındaki bir plaka ile değiştirilmesi ile basitleştirme yapılmıştır. Daha sonra baskı devre kartında gerekli sadeleştirme yapılmıştır. Tek sinyal katmanı (1S) olan ve iki sinyal, iki iç katmanı (2S2P) olan baskı devre kartları aynı boyutlarda eşdeğer termal iletkenlik katsayıları kullanılarak tek bir plaka olarak modellenmiştir. Kart ile hava arasında taşınım ve ışıınım ile gerçekleşen ısı transferi için eşdeğer tek bir katsayı kullanılmıştır. İlgili basitleştirmeler ile gerçekleştirilen analizler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Doğal taşınım durumunda sonuçlar oldukça düşük hata ile örtüşürken, zorlanmış taşınım durumunda ortalama %5, en fazla %8 hata görülmüştür. [25]

Lall, Guenin ve Molnar, homojen olmayan güç tüketimi karakteristiği gösteren dikey plaka üzerine sabitlenmiş bir çoklu-yonga-modülünün (MCM) doğal taşınım ve zorlanmış taşınım durumları için termal karakteristiğinin elde edilmesi üzere ısınma deneylerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada 208 ayaklı bir plastik çoklu-yonga-modülü (PMCM) kullanılmıştır. Deneyler ile jonksiyon-hava arası termal direnç belirlenmeye çalışılmıştır. Modül üzerindeki güç dağılımının homojen ve geometrinin özdeş olduğu durumda yonga ortalama sıcaklığı kullanılabilmektedir. Fakat mevcut çalışmada geometriler özdeş olmayıp, güç dağılımı da homojen olmadığından her bir jonksiyon için ayrı ayrı termal direnç değeri hesaplanmıştır. Deneyler doğal taşınım durumu için ve zorlanmış taşınım durumu için gerçekleştirilmiştir. Zorlanmış taşınım ola durumlardaki deneyler rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. jonksiyon-hava arasındaki termal direnç değeri jonksiyon sıcaklıklarının süperpozisyonu ile hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre termal direnç değerleri için denklemler elde edilmiştir. Sonuç olarak, çalışma kapsamında kullanılan paket tipi için bir jonksiyon-hava arası termal direnç değeri hesaplanması üzere kullanılan yöntem doğrulanmıştır. [26]

Rodgers, Eveloy, Lohan, Fager, Tiilikka ve Rantala, elektronik sistemlerin nümerik olarak incelenebilmesi için bir karşılaştırma modeli oluşturmak üzere üç farklı paket tipi kullanarak deneysel ve nümerik analizler gerçekleştirmiştir. Yapılan deneyler ile nümerik çalışmaların sonucu karşılaştırılmıştır. Kullanılan paket tipleri SO16, TSOP48 ve PQFP208'dir. Çalışma, baskı devre kartı üzerinde bir adet komponentin bulunduğu ve birden fazla komponentin bulunduğu durumlar için gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma ölçütü olarak kararlı durumdaki jonksiyon sıcaklığı ele alınmıştır. Deneylerde, sıcaklık ölçümü için termal test kalıbı ve kızılötesi görüntüleme teknikleri kullanılmıştır. Nümerik çalışma, ticari bir HAD yazılımı olan Flotherm kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz modeli basit seviyeden başlanıp karmaşık seviyeye doğru aşama aşama modellenmiştir. İlk etapta yalnızca termal iletim çözülmüş. Aşama aşama ilerlenerek en sonunda ise çok komponentli baskı devre kartının eşlenik analizi gerçekleştirilmiştir. Hesaplama süresinin gereksiz yere artırılmaması için gerçek geometride bulunan ve ısı transferine etkisi ihmal edilebilir düzeyde olan ayrıntılar analiz modeline dâhil edilmemiştir. Her bir durum için analiz ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Detaylı modelleme tekniği kullanıldığında PQFP komponenti hariç analiz ve deney sonuçlarının birbirine oldukça yakın çıktığı görülmüştür. [27]

Adams, Blackburn, Joshi ve Berning, elektronik paketlerin kompakt modellenmesinin validasyonu için bir yöntem geliştirmiştir. Çalışma kapsamında, bir 88 ayaklı PQFP komponenti deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Komponentin ısıtıldığı deneysel çalışma JEDEC standardında tanımlanan kapalı hacim içerisinde gerçekleştirilmiştir. Deneyin içerisinde gerçekleştirilmediği kapalı kutu $0,3048 \times 0,3048 \times 0,3048$ m ebatlarındadır. Deneyde herhangi bir aktif soğutma elemanı bulunmamaktadır. Sıcaklık ölçümleri için komponent üzerinde ve kapalı kutu içerisindeki havada farklı noktalara T tipi ısılıçift yerleştirilmiştir. Komponent jonksiyon sıcaklığı dâhili sensör kullanılarak ölçülmüştür. Nümerik modelde baskı devre kartının termal iletkenlik değerinin izotropik ve homojen olduğu varsayılmıştır. Sistem seviyesi modellemede ışıınım ile ısı transferi hesaba katılmıştır. Ayak vb. küçük ayrıntı içeren kısımlar eşdeğer geometrik ve termal özellikler hesaplanarak kompakt olarak modellenmiştir. Kompakt modelleme yapılırken termal iletkenlik değerinin hesaplanmasında termal direnç değerinin de hesaba katılabilmesi amacıyla komponentin ilgili kısmı için farklı sınır şartlarında detaylı iletim tabanlı sonlu elemanlar yöntemi analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler ticari bir HAD yazılımı olan Flotherm kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz ve deney sonuçları

örtüştüğünden kompakt modelleme tekniğinin doğrulandığı sonucuna varılmıştır. Böylece sistemde termal model yapısını önemli miktarda etkileyecek bir değişiklik yapılmadığı sürece kompakt modelleme tekniği kullanılarak farklı durumlar için sistemin termal davranışı incelenebilecektir. [28]

Eveloy, Rodgers ve Lohan 160 ayaklı bir PQFP komponentin ısınmasını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. İnceleme, komponentin doğal taşınım altında olduğu durum için ve 1m/s ve 2,25 m/s hava akış hızına altında olduğu durum için gerçekleştirilmiştir. Sistemin termal incelenmesi zaman bağlı durum için yapılmıştır. Zamana bağlılık üç farklı senaryo halinde sağlanmıştır. İlk senaryoda, komponente zamana bağlı güç profili verilip ortam sıcaklığı sabit tutulmuştur. İkinci durumda bunun tam aksine olarak, komponente sabit güç verilip ortam sıcaklığı zamana bağlı olarak değiştirilmiştir. Son durumda ise hem komponente verilen güç değeri hem de ortam sıcaklık değeri zamana bağlı olarak değiştirilmiştir. Gerçekleştirilen deney ve analizlerin sonuçlarının karşılaştırılmasında ölçüt olarak jonksiyon sıcaklığı ve yüzey sıcaklık dağılımı kullanılmıştır. Deneyde sıcaklık ölçümleri için termal test kalıbı ve kızılötesi görüntüleme teknikleri kullanılmıştır. Nümerik analizler, ticari bir HAD yazılımı olan Flotherm kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerde nominal komponent ve baskı devre kartı boyutları ile malzeme özelliklerinin nominal değerleri kullanılmıştır. Baskı devre kartı termal özellikleri ortotropik olarak modellenmiştir. Komponent ve baskı devre kartı yüzeylerine ısınım sınır şartı tanımlanmıştır. Tüm senaryolar için gerçekleştirilen deney ve analiz sonuçlarının kabul edilebilir hata bandında örtüştüğü görülmektedir. [29]

Eveloy, Rodgers ve Hashmi bir elektronik kart kompleksinin ısınmasını deneysel ve nümerik olarak incelemiş ve bu sonuçları karşılaştırmıştır. Kart kompleksi basitten zora gidilecek şekilde üç farklı seviyede incelenmiştir. Birinci seviyede baskı devre kartının bir yüzeyinde bir adet 160 ayaklı PQFP komponent bulunmaktadır. İkinci seviyede kartın ortasındaki komponente ek olarak iki kenarda da üçer adet komponent olmak üzere toplamda 7 adet PQFP komponent bulunmaktadır. Üçüncü seviyede ise 3x5 matris oluşturacak şekilde toplam 15 adet PQFP komponent bulunmakla beraber bu duruma ek olarak kartın her iki yüzeyinde de komponentler olduğu durumu yansıtmak üzere kartın diğer yüzeyine 50 mm kalınlığında yalıtım malzemesi yerleştirilmiştir. Deneyler, sistem kararlı hale gelene kadar sürdürülmüştür. Aktif soğutma olması amacıyla sisteme rüzgâr tüneline 2 m/s ve 4 m/s hızlarında hava akışı sağlanmıştır. Nümerik analizler ticari bir

HAD yazılımı olan Flotherm kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baskı devre kartı termal iletkenlik katsayısı ortotropik olarak modellenmiştir. Nümerik analizler viskoz rejimin laminar ve türbülanslı olarak seçildiği durumlar için gerçekleştirilmiştir. türbülans modelleme yöntemi olarak k-e ve LVEL yöntemleri kullanılmıştır. Her bir seviye için deneysel ve nümerik analizlerde elde edilen tüm komponentlerin sıcaklık değerleri farklı viskoz rejim modelleme tekniklerine göre karşılaştırılmıştır. Sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında farklı komponentlerde farklı rejimlerin farklı hata oranlarına sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Yani aynı analizde bir komponent için k-e modeli daha düşük hataya sebep olurken, diğer bir komponent üzerindeki sıcaklık değeri laminar rejim ile daha doğru tahmin edilebilmektedir. Sonuç olarak bir kart kompleksinin termal davranışı farklı seviyelerde sistematik olarak deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Modelleme tekniklerinin farklılığı, aynı analiz içerisinde farklı komponentlerde farklı hata oranlarına sebep olmakla beraber hemen hemen tüm analizlerde %10 hata bandının altında kalmıştır. [30]

Görüldüğü üzere elektronik sistemlerin termal davranışının incelenmesi amacıyla hem deneysel çalışmalar hem de, gerek mikro düzeyde gerek makro düzeyde, analiz çalışmaları mevcuttur. Analiz çalışmalarında da iletim tabanlı SEY, HAD, termal direnç ağı yöntemi vb. farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin bir kısmında analiz modelinin karmaşıklık seviyesinin azaltılması ve çözüm süresinin kısaltılması amacıyla kompakt termal modeller kullanılmıştır. İncelenen çalışmalara göre, karmaşık geometri ve sınır koşullarındaki problemler için en uygun yöntemin iletim tabanlı SEY olduğu sonucuna varılmıştır. İletim tabanlı SEY analizlerinde ise havanın doğrudan modellenememesi bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Bu dezavantaj ortadan kaldırıldığı takdirde iletim tabanlı SEY oldukça makul bir yöntem olacaktır. Fakat incelenen çalışmaların hiçbirinde iletim tabanlı SEY analizlerinde havanın doğrudan modellenememesi dezavantajının deneysel çalışma veya HAD analizi desteğiyle ortadan kaldırılması ile ilgili bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada kapalı hacim içerisinde yer alan doğal taşınım altındaki, üzerinde ısınan komponentlerin bulunduğu bir elektronik kart kompleksinin iletim tabanlı SEY analiz modeli doğrulanmıştır. İletim tabanlı SEY analiz modelinde havanın doğrudan analiz modeline dâhil edilmesi yerine taşınım sınır şartı uygulanmıştır. Fakat taşınım sınır şartında yüzeylerdeki taşınım katsayılarının doğru olarak belirlenmesi analiz sonuçlarının doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Doğrulama kapsamında hem standart olarak belirsizlik içeren analiz girdilerinin değeri belirlenmiş, hem de taşınım katsayılarının

hesaplandığı denklemde yer alan bir değişkenin değeri her bir yüzey için belirlenerek farklı sınır şartlarında taşınım katsayılarının hızlı bir şekilde belirlenip iletim tabanlı SEY analizlerinin koşturulması sağlanmıştır. Doğrulanmış analiz modeli kullanılarak elektronik kart kompleksinin 64 farklı sınır şartı için termal davranışı incelenmiştir. Ayrıca analiz yönteminin doğruluğunun test edilmesi ve hava hareketinin de ayrıca incelenmesi amacıyla bu sınır şartlarına ek 5 farklı sınır şartı için HAD analizleri ve iletim tabanlı SEY analizleri ve bu 5 sınır şartından ikisi için ise deney gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırılmıştır.





3. PROBLEMİN TANIMI VE KULLANILAN YÖNTEMLER

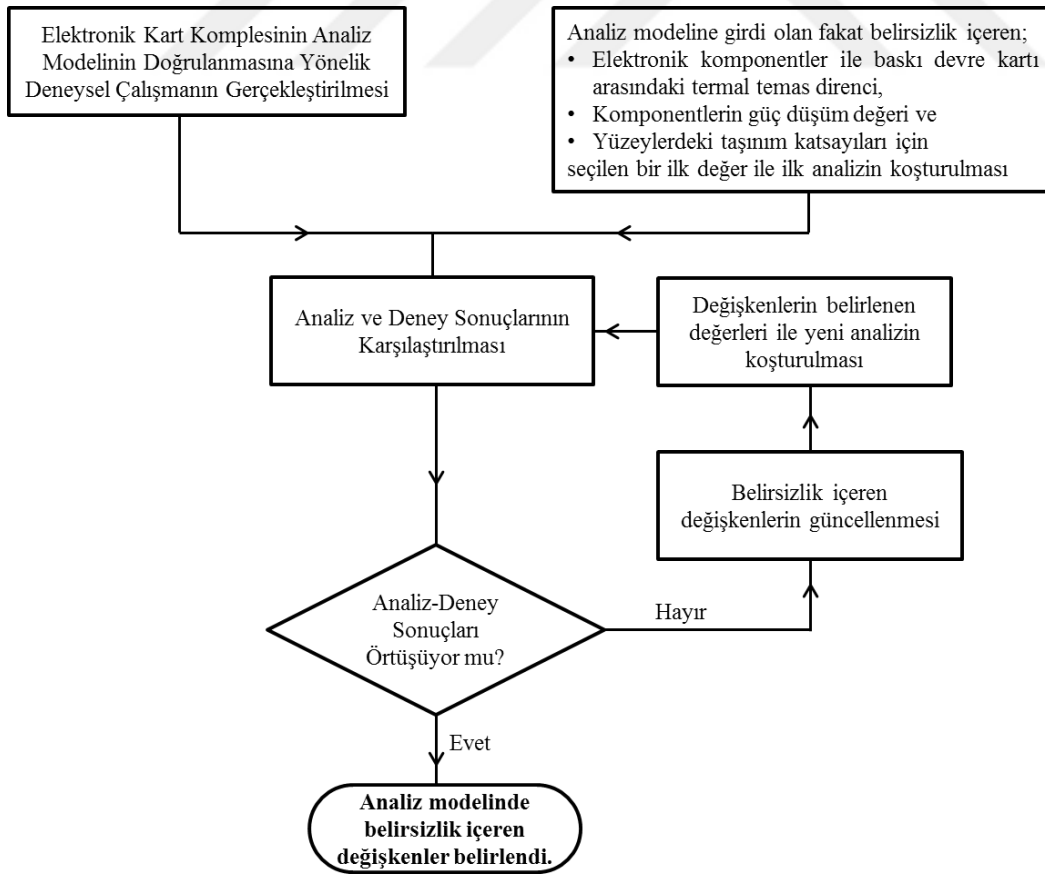
Bu çalışmada, kapalı hacim içerisinde yer alan ve üzerinde, ısı üretimi olan iki adet komponentin bulunduğu bir elektronik kart kompleksinin termal analizinin gerçekleştirilmesi üzere analiz modeli kurulmuş ve kurulan analiz modeli kullanılarak, kart kompleksinin farklı sınır şartları altındaki termal davranışı incelenmiştir. Bölüm 1’de belirtildiği üzere sistem farklı şartlar için incelendiğinden zaman, efor, maliyet ve çözüm doğruluğu açısından analiz aracı olarak en uygun yöntem olarak belirlenen iletim tabanlı SEY kullanılmıştır. Herhangi bir nümerik analiz gerçekleştirilmeden önce doğru sonuçlar elde edilebilmesi için analiz modelinin doğrulanması gerekmektedir. Analiz modelinin doğrulanmasının ilk aşaması analiz modeline girdi olan fakat belirsizlik içeren değişkenlerin değerlerinin belirlenmesidir. Herhangi bir sistemin nümerik olarak termal analizinin yapılabilmesi için; analiz modeline dâhil edilen tüm parçaların termal malzeme özelliklerinin, birbirine temas eden parçalar arasındaki temas özelliğinin ve sistemdeki diğer tüm sınır şartlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan kart kompleksinde komponentler baskı devre kartına el yordamıyla lehim uygulanarak sabitlenmiştir. Dolayısı ile elektronik komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direnci değeri bilinmemektedir.

Direnç tipi komponentlerde sabit voltaj değeri sağlandığı durumda üretilen ısı değeri, genellikle komponent sıcaklığı 75°C ’ye ulaşana kadar sabit kalmaktadır. Komponent sıcaklığı 75°C ’yi aştıktan sonra komponentte üretilen güç değeri doğrusal olarak azalmaktadır. Bu çalışmada komponentlerde görülen güç düşüm oranı da analiz modeline girilmesi gereken fakat bilinmeyen bir değişkendir. Ayrıca Bölüm 1’de belirtildiği gibi SEY kullanılmasının en büyük dezavantajlarından birisi hava hareketinin analiz modeline dâhil edilememesidir. Bunun yerine elektronik kart ve komponent yüzeylerine taşınım sınır şartı uygulanmıştır. Bu varsayım yapılarak gerçeğe yakın analiz sonuçları elde edilebilmesi için taşınım katsayılarının doğru olarak belirlenebilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın ilk aşaması nümerik analiz modelindeki belirsizlik içeren değişkenlerin değerlerinin belirlenmesidir. İkinci aşama ise doğrulanmış analiz modeli kullanılarak farklı sınır şartlarında SEY analizlerinin gerçekleştirilerek sistemin termal davranışının incelenmesidir. Bu yöntem ile her bir sınır şartı için deney yapılmasının veya HAD

analizlerinin gerçekleştirilmesinin maliyet, zaman, tekrarlanabilirlik, uzun çözüm süresi gibi dezavantajları ortadan kaldırılmıştır.

Analiz modelinin doğrulanması aşaması elektronik kart kompleksinin için gerçekleştirilen deneysel çalışmayı ve iteratif SEY analizlerini kapsamaktadır. Deneyde, kart ve komponentler üzerinde belirlenen noktaların sıcaklıkları zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Daha sonra, problemin SEY analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz modelinde girdi olarak kullanılan fakat belirsizlik içeren değişkenler belirli bir sırada deney ve analiz sonuçları örtüşene kadar iteratif olarak değiştirilmiştir. Belirsizlik içeren değişkenlerin analiz sonuçları ile deney sonuçlarının örtüştüğü durumdaki değerleri geçerli değerler olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, doğrulanmış analiz modeli ile farklı sınır şartlarında SEY analizleri gerçekleştirilerek sistemin termal davranışı incelenmiştir. Analiz modelinin doğrulanması ve parametrik analizlerin gerçekleştirilmesi prosedürü özet olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Son olarak, belirlenen farklı sınır şartları için HAD ve SEY analizleri gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırılmıştır.

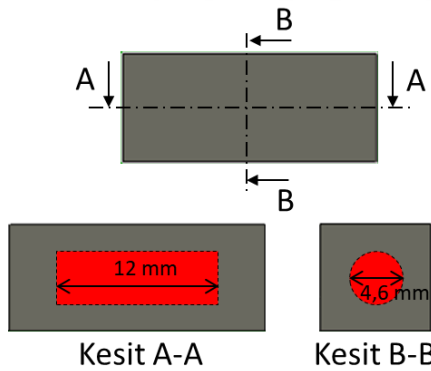


Şekil 3.1. Analiz modelinin doğrulanması akış şeması

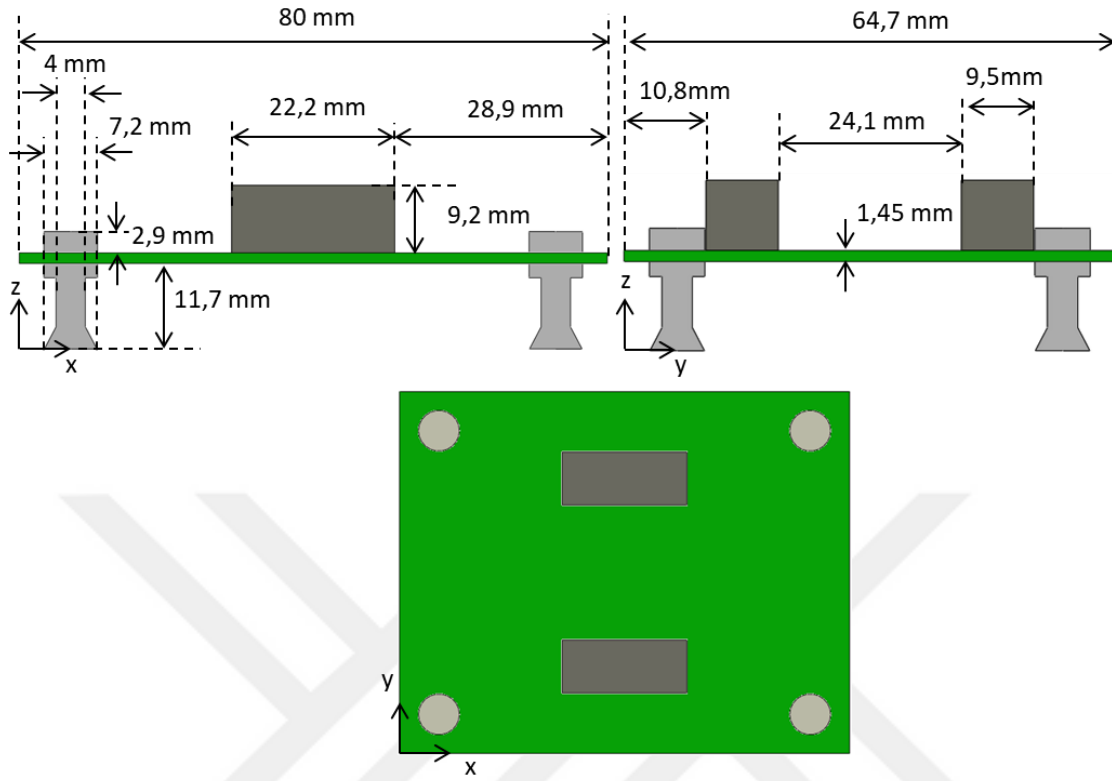
Bu yöntem ile yalnızca, SEY analiz modelinin doğrulanması amacıyla deney gerçekleştirilmiş olup diğer tüm parametrik analizler doğrulanmış SEY analiz modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede tasarım aşamasında düşük maliyet ile kısa sürede gerekli analizler gerçekleştirilmiştir.

3.1. Fiziksel Model

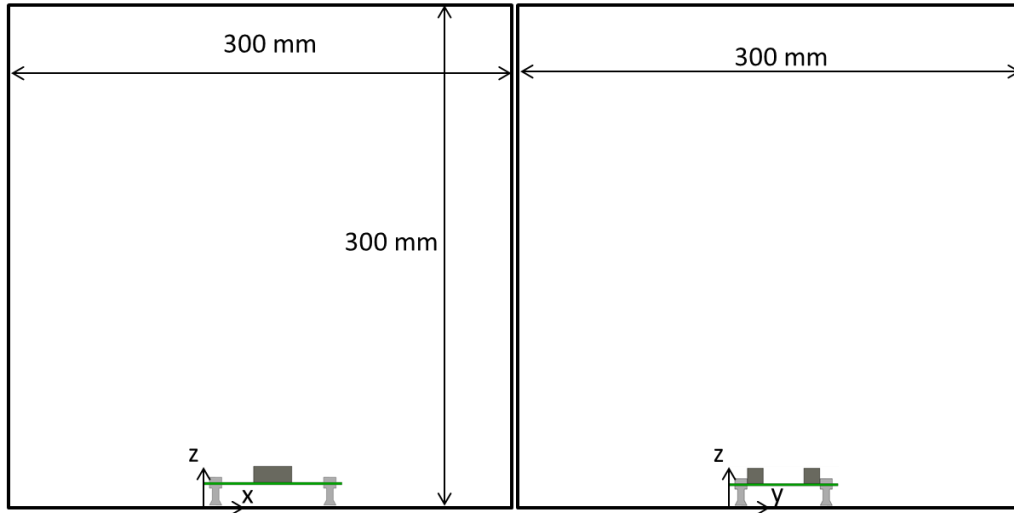
Çalışma kapsamında kullanılan elektronik kart kompleksinin üzerinde iki adet component bulunmakta ve kart kompleksi bir kapalı hacim içerisinde yer almaktadır. Elektronik kart, ayaklar ile bir ısıtıcı plaka üzerine yerleştirilmiştir. Sistemde, elektronik kart üzerinde bulunan elektronik componentler ve elektronik kartın yerleştirildiği ısıtıcı plaka olmak üzere iki farklı ısı kaynağı bulunmaktadır. Isı üretimi, component içerisinde silindirik bir hacimde meydana gelmektedir. Component içerisinde ısı üretimi olan bölge Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Kapalı hacim içerisinde herhangi bir fan vb. aktif soğutma elemanı bulunmayıp hava hareketi yalnızca doğal taşınım ile gerçekleşmektedir. Kart kompleksinin ve sistemin boyutları sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Komponent içerisinde ısı üretimi olan bölge



Şekil 3.3. Elektronik kart kompleksinin ebatları



Şekil 3.4. Kabin iç hacim ebatları ve kart yerleşimi

3.2. Korunum Denklemleri ve Sınır Şartları

Katılarda ısı iletim denklemi, kartezyen koordinatlarda zamana bağlı sıkıştırılamaz akışlar için süreklilik, momentum, enerjinin korunumu denklemleri ve doğal taşınım ile ısı transfer probleminin nümerik çözümünde kullanılan ‘Boussinesq’ yaklaşımı aşağıda verilmiştir.

Genel Isı İletim Denklemi

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Süreklilik Denklemi

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

Momentum Denklemleri

x – yönündeki momentum denklemi:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

y – yönündeki momentum denklemi:

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

z – yönündeki momentum denklemi:

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

Enerji Denklemi

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

Boussinesq Yaklaşımı

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\beta\vec{g}(T - T_{\infty}) - \frac{1}{\rho_{\infty}}\nabla(p - p_{\infty}) + \nu\nabla^2\vec{V} \quad (3.7)$$

Kapalı hacim içerisinde bulunan elektronik kart kompleksi için uygulanan sınır şartları aşağıda verilmiştir.

Isıtıcı plaka;

$$T_{\text{plaka}} = T_{\text{parametrik}}$$

$T_{\text{parametrik}}$, farklı senaryolar için 20, 40, 60 ve 80°C değerlerini almaktadır. Bu değerler analiz süresi boyunca sabit tutulmaktadır.

Komponent iç hacmi;

$$q = q_{\text{parametrik}}$$

$q_{\text{parametrik}}$, farklı senaryolar için 0,5, 1, 2 ve 4 mW/mm³ değerlerini almaktadır. Bu değerler analiz süresi boyunca sabit tutulmaktadır.

İletim tabanlı Sonlu Elemanlar Yöntemi analiz modelinde geçerli olan komponent üst yüzey ve yan yüzeyler, baskı devre kartı alt yüzey ve üst yüzey sınır şartı;

$$q_{\text{taşınım}} = h.(T_{\text{yüzey}} - T_{\text{ortam}})$$

Kabin iç yan duvarlar ve üst duvar;

$$T_{\text{duvarlar}} = T_{\text{parametrik}}$$

$T_{\text{parametrik}}$, farklı senaryolar için 20, 30, 40 ve 50°C değerlerini almaktadır. Bu değerler analiz süresi boyunca sabit tutulmaktadır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analiz modelinde geçerli simetri sınır şartı;

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analiz modelinde geçerli kaymaz sınır şartı;

$$z \text{ düzleminde: } u = 0, v = 0$$

$$y \text{ düzleminde: } u = 0, w = 0$$

$$x \text{ düzleminde: } w = 0, v = 0$$

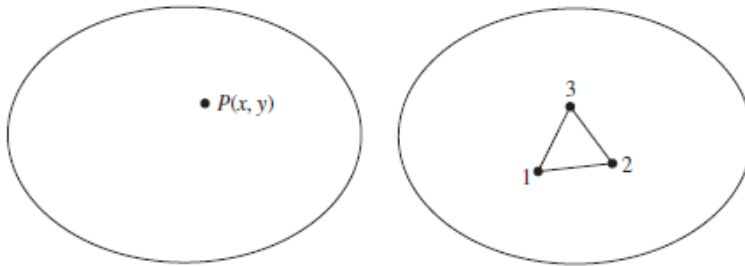
Doğal taşınımdaki hava rejiminin (türbülanslı/laminer) saptanması amacıyla, basit ön hesaplarla kart kompleksi ve kapalı hacim için elde edilen yaklaşık sıcaklık değerleri kullanılarak Gr sayısı hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken emniyetli tarafta kalmak için en kritik şartlar göz önünde bulundurulmuştur. Deneydeki ölçümlerde ve yapılan ön hesaplarda sistemdeki en yüksek sıcaklık 100°C'yi geçmemektedir. Sistemdeki en düşük sıcaklık ise 20°C'nin altına düşmemektedir. Sistemde karakteristik uzunluk olarak kapalı hacmin yüksekliği alınmıştır. Eş. 3.8'de Gr sayısının formülü verilmiştir.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (3.8)$$

Eş. 3.8'de g değeri 9.81 m/s², karakteristik uzunluk, L değeri 0,3 m alınmıştır. T₁ ve T₂ değerleri en kritik durum göz önünde bulundurularak sırasıyla, 80 ve 20°C alınmıştır. β ve ν değerleri T₁ ve T₂ değerlerin ortalaması temel alınarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre Ra sayısı 2,74*10⁷ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, yatay kapalı hacimler için kritik Ra sayısı olan 10⁸ değerinin altında kaldığı için sistem HAD analizlerinde laminer olarak modellenmiştir [38].

3.3. İletim Tabanlı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

Tez kapsamında gerçekleştirilen bütün iletim tabanlı SEY ısı transferi analizleri için ABAQUS ticari yazılımı kullanılmıştır. İletim tabanlı ısı transferi analizlerinde akışkan doğrudan modellenmez. Bunun yerine katı ile akışkan arasında gerçekleşecek ısı transferinin hesaba katılabilmesi için taşınım sınır şartı tanımlanır. ABAQUS yazılımında sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin sayısal algoritması aşağıdaki üç basamaktan oluşmaktadır. Birinci basamakta, çözüm alanındaki bütün kontrol hacimlerinde akışı temsil eden korunum denklemlerinin entegrasyonu gerçekleştirilir. Daha sonra ikinci basamakta entegre edilmiş denklemlerde, taşınım, iletim ve kaynak terimleri gibi akışı temsil eden terimler sonlu farklar tipi yaklaşımlarla yerine konur. Bunun sonucunda integral formundaki denklemler cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülür. Son basamakta cebirsel denklemler iteratif yöntemlerle çözülür. İki boyutlu bir sınır şartı problemi için düğüm noktaları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. [56]



Şekil 3.5. İki boyutlu bir probleminin çözümünde kullanılan düğüm noktaları [56]

Şekil 3.5'te gösterilen üç düğüm noktası için alan değişkenleri Eş. 3.9 ile tanımlanabilir.

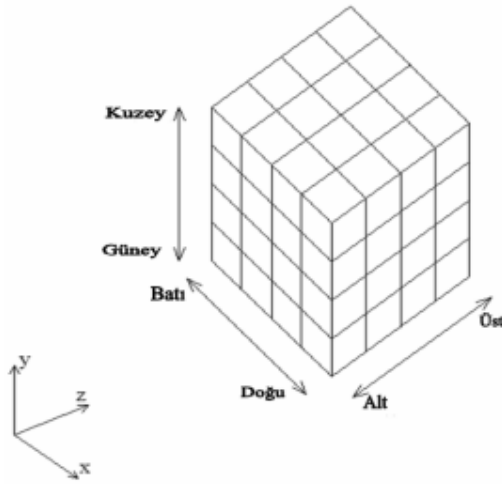
$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (3.9)$$

Eş. 3.9'da ϕ_1 , ϕ_2 ve ϕ_3 alan değişkenleri, N_1 , N_2 ve N_3 ise interpolasyon fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyon şekil fonksiyonu olarak da bilinir. Sonlu elemanlar yönteminde düğüm değerleri, hesaplanacak bilinmeyen sabitlerdir. İnterpolasyon fonksiyonları bağımsız değişkenlerin önceden belirlenmiş bilinen fonksiyonlarıdır [56].

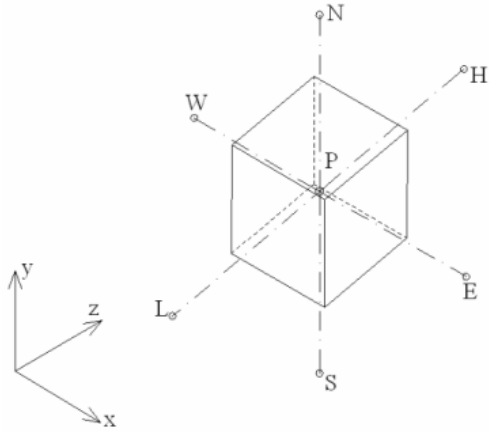
Çalışma kapsamında kurulan iletim tabanlı SEY analiz modeli ile ilgili ayrıntılar ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır.

3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Tez kapsamında gerçekleştirilen bütün HAD analizleri için Star-CCM+ ticari yazılımı kullanılmıştır. Star-CCM+ yazılımında sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır. Sonlu hacimler yönteminin sayısal algoritması aşağıdaki üç basamaktan oluşmaktadır. Birinci basamakta, çözüm alanındaki bütün kontrol hacimlerinde akışı temsil eden korunum denklemlerinin entegrasyonu gerçekleştirilir. Daha sonra ikinci basamakta entegre edilmiş denklemlerde, taşınım, iletim ve kaynak terimleri gibi akışı temsil eden terimler sonlu farklar tipi yaklaşımlarla yerine konur. Bunun sonucunda integral formundaki denklemler cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülür. Son basamakta cebirsel denklemler iteratif yöntemlerle çözülür. Fiziksel korunum prensipleriyle sayısal algoritma arasındaki belirgin ilişki sonlu hacimler metodunu özellikle mühendisler arasında daha cazip ve anlaşılır kılmıştır. Şekil 3.6’te üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde hücre yapısı ve Şekil 3.7’te üç boyutlu bir hücre için kontrol hacmi görülmektedir. [53]



Şekil 3.6. Üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde hücre yapısı [53]



Şekil 3.7. Üç boyutlu bir hücre için kontrol hacmi [53]

P noktasındaki ϕ_P değeri komşu ϕ değerleriyle ilişkilidir. Ayrıca eğer problem zamana bağımlı ise bir önceki zaman dilimindeki ϕ_P ile de ilişkilidir. Bunun sonucunda aşağıdaki lineer cebirsel eşitliği yazmak mümkündür [53]:

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_H \phi_H + a_L \phi_L + a_T \phi_T + b \quad (3.10)$$

Eşitlik 4.1’de a’lar katsayıları (coefficients), b ise kaynakları (sources) gösterir. Dikkat edilirse her komşu hücrenin ayrı bir katsayısı mevcuttur. Bu katsayının nümerik değeri birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan bazıları [53];

- Hücre geometrisi
- Akışkanın bir hücreden diğerine akış hızı
- Akışkanın yerel özellikleri
- vb.

Her bir hücre, değişken, zaman dilimi için cebirsel bir denklem yazmak mümkündür. Bunun neticesinde, toplam denklem sayısı = $N_X \times N_Y \times N_Z \times N_\Phi \times N_T$ olur. Burada N_X , N_Y , N_Z sırasıyla x, y ve z yönündeki hücre sayısı, N_Φ değişken sayısı, N_T ise çözümün kararsız olması durumunda zaman dilimi sayısıdır [53].

Çalışma kapsamında kurulan HAD analiz modeli ile ilgili ayrıntılar ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır.

3.5. İletimsel Sey Analiz Modelinin Doğrulanması Kapsamında Gerçekleştirilen Deneysel Çalışma

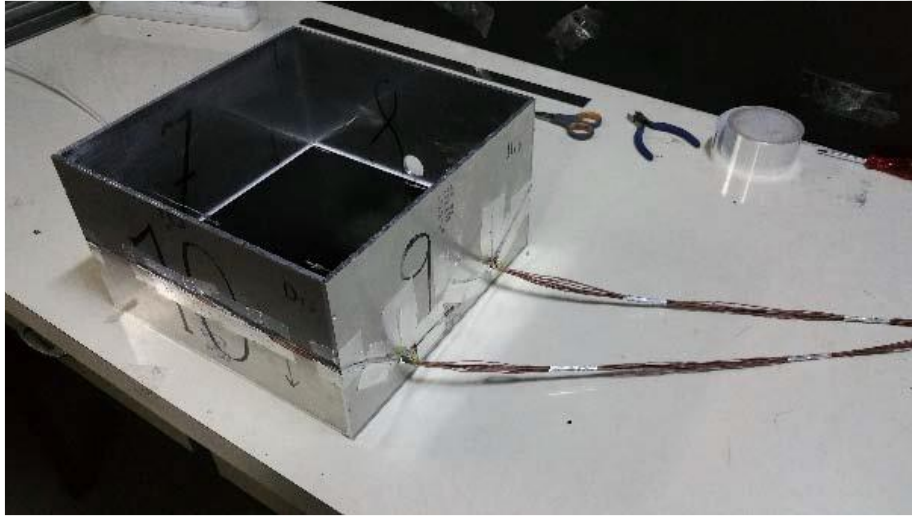
Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan deney düzeneğine dair ayrıntılar ve analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

3.5.1. Kapalı ortam kontrollü ısıtma deney düzeneği

Elektronik kart kompleksinin için gerçekleştirilen deney, kapalı bir kabin içerisinde gerçekleştirilmiştir. Kabin içerisinde, tabanda kontrollü olarak ısıtılabilen bir ısıtıcı plaka bulunmaktadır. Kabinin yüksekliği iki farklı seviyeye ayarlanabilmekte olup iç ebatlar 300x300x150 mm ve 300x300x300 mm olacak şekilde kullanılabilir. Kabin gövdesinin duvar kalınlığı 5 mm'dir. Gövde malzemesi Alüminyum 6000 serisidir. Gövde, düz plakaların birbirine metrik 2 cıvatalarla sabitlenmesi ile oluşturulmuştur. Gövdenin üst kademesinin alt yüzeyinde her bir plakada ikişer adet pim ve alt kademenin üst yüzeyinde bu pimlere karşılık gelen delikler bulunmaktadır. Kabin iki kademeli olarak kullanılacağı zaman üst kademe, pimler deliklere girecek şekilde alt kademenin üzerine oturtulmaktadır. Kabin Deneyin gerçekleştirildiği kabinin genel görünümü ve kademeleri Resim 3.1, Resim 3.2 ve Resim 3.3'te gösterilmiştir. Kabin bileşenleri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'de şematik olarak gösterilmiştir.



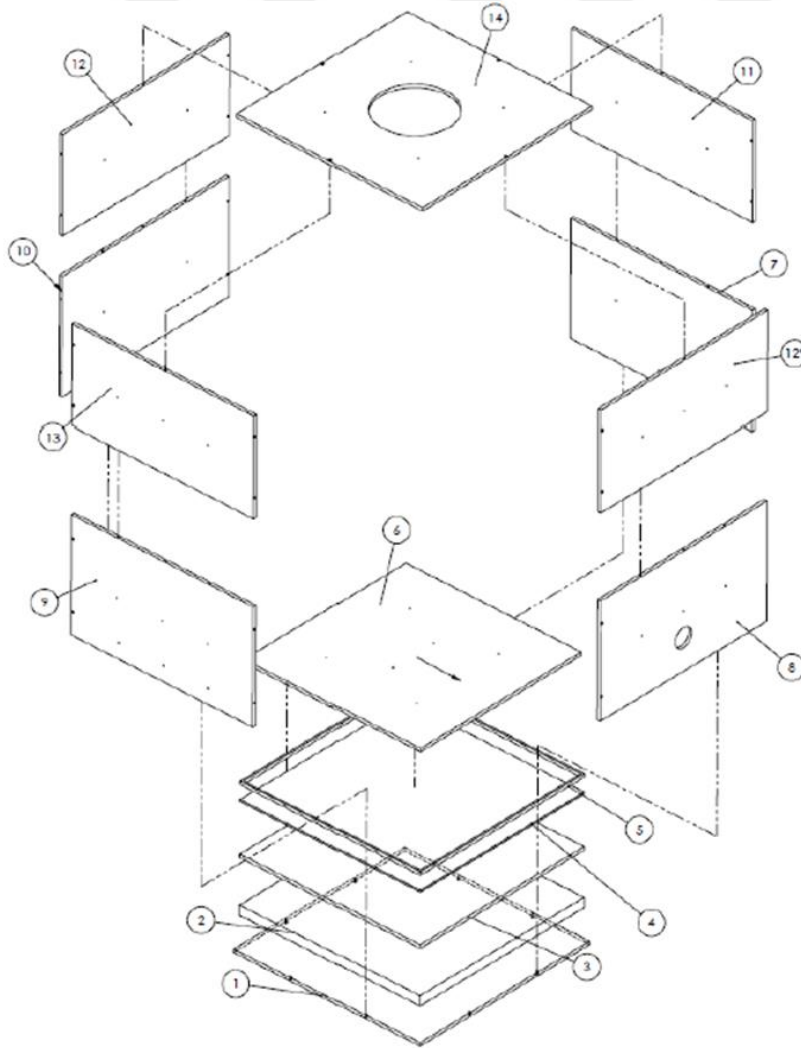
Resim 3.1. Kabin ikinci seviye yükseklikte olduğu durumdaki genel görünümü



Resim 3.2. Kabin birinci kademe tavan açık görünüm

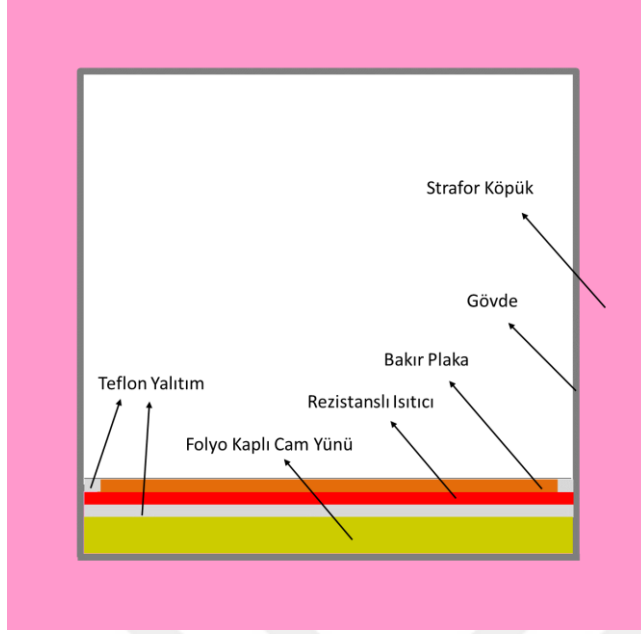


Resim 3.3. Kabin ikinci kademe tavan açık görünüm



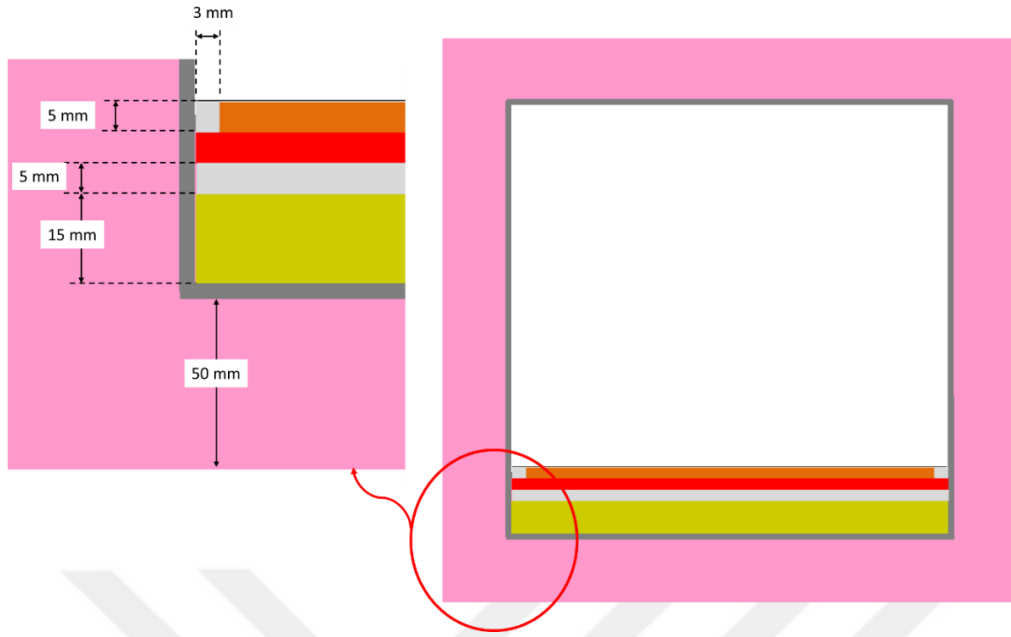
1	Gövde Taban
2	Folyo Kaplı Cam Yünü
3	Teflon Yüzey
4	Rezistanslı Isıtıcı
5	Teflon Çerçeve
6	Saf Bakır Plaka
7	Gövde Yan Duvar
8	Gövde Yan Duvar
9	Gövde Yan Duvar
10	Gövde Yan Duvar
11	Gövde Yan Duvar
12	Gövde Yan Duvar
13	Gövde Yan Duvar
14	Gövde Yan Duvar

Şekil 3.8. Kabin patlatılmış görünüm



Şekil 3.9. Kabin bileşenleri şematik çizimi

Kabin içerisinde, tabanda bulunan plaka homojen olarak ısıtılıp sabit sıcaklıkta tutulabilmektedir. Isıtma için plakanın altına silikon kaplı rezistanslı ısıtıcı yerleştirilmiştir. Isıtıcı ile 1000 W değerine kadar ısı güç sağlanabilmektedir. Isıtıcının emniyetli çalışma sıcaklık limiti 120°C'dir. Rezistanslı ısıtıcıda üretilen ısının en az kayıpla plakaya aktarılabilmesi için rezistanslı ısıtıcı ile gövde tabanı arasına teflon yalıtım ve folyo kaplı cam yünü yerleştirilmiştir. Ayrıca plakanın etrafına plaka ile gövde arasında kalacak şekilde 3 mm kalınlığında teflon yalıtım çerçeve yerleştirilmiştir. Ek olarak kabin ile dış ortam arasındaki ısı transferini en aza indirmek için gövdenin dışına 50 mm kalınlığında strafor köpük yerleştirilmiştir. Plaka, rezistanslı ısıtıcı ve ilgili yalıtımların temsili resmi Şekil 3.10'te ve kabini üzerindeki görünümüleri Resim 3.4 - Resim 3.8 arasında gösterilmiştir. Plakanın deney sırasında kullanılacak yüzeyinin tamamının sıcaklık değerinin konuma bağlı olarak homojen olması üzere ısıtıcı plaka bakırdan üretilmiştir. Isıtıcı plaka üzerinde konuma bağlı homojenlik değeri $\pm 2^{\circ}\text{C}$ bandında kalmaktadır. Isıtıcı plaka sıcaklığının değerinin ve sıcaklık dağılımının homojenliğinin kontrol edilebilmesi için plakaya gömülü farklı noktalarda 6 adet ısı çift bulunmaktadır. Isıl çift konumları Şekil 3.11'te gösterilmiştir. Ayrıca bakır plaka yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında bakır plaka yüzeyinden kabin içerisindeki daha düşük sıcaklıktaki diğer yüzeylere ışıınım ile ısı transferi gerçekleşecektir. Yüzey üzerinde daha homojen bir yayıcılık katsayısı elde edebilmek üzere bakır plakanın kabinin içine bakan yüzeyi mat siyaha boyanmıştır.



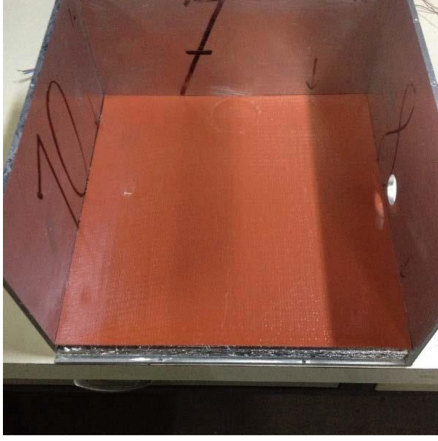
Şekil 3.10. Kabinde bulunan plaka, rezistanslı ısıtıcı ve ilgili yalıtımların şematik çizimleri ve boyutları



Resim 3.4. Folyo kaplı cam yününün kabin içerisindeki yerleşimi



Resim 3.5. Teflon yalıtımın kabin içerisindeki yerleşimi



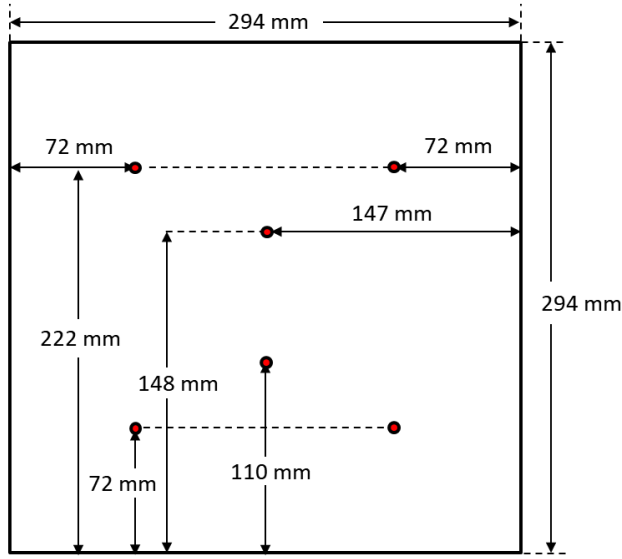
Resim 3.6. Rezistanslı ısıtıcının kabin içerisindeki yerleşimi



Resim 3.7. Mat siyaha boyanmış bakır plakanın kabin içerisindeki yerleşimi



Resim 3.8. Kabin dış yalıtımı



Şekil 3.11. Bakır plakaya gömülü olarak yerleştirilen ısılıçiftlerin konumu

Deneyin gerçekleştirildiği kabine ait parçaların termal özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

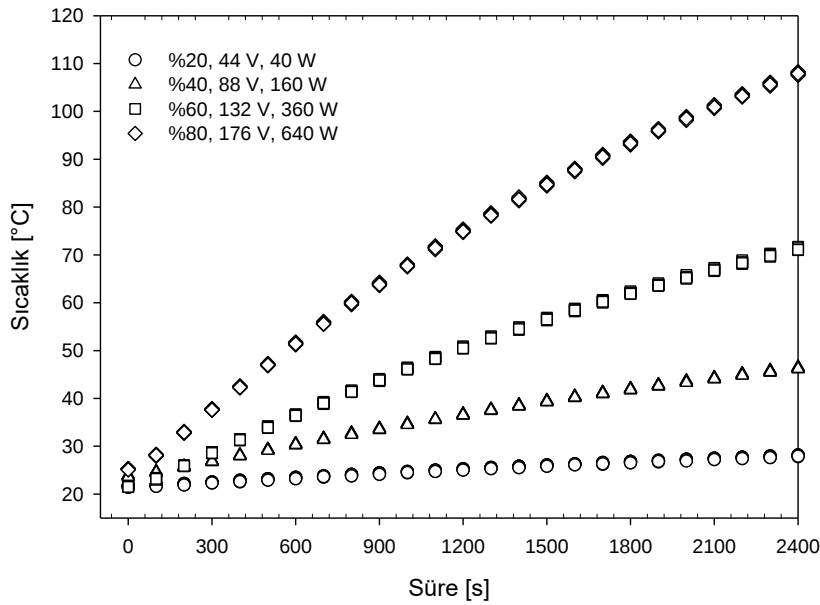
Çizelge 3.1. Kabin bileşenlerinin termal malzeme özellikleri

	k [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg.K]
Al-600 serisi	160	2700	1256
Saf Bakır	386	8950	380
Teflon (PTFE)	0.25	2150	980
Cam Yünü	0.04	16	670
Strafor Köpük	0.036	20	1215

Isıtıcı plakanın sıcaklığının istenilen değere getirilmesi ve sabit tutulması için plakanın altında bulunan ısıtıcı rezistanslara verilen güç varyak ile kontrol edilmiştir. Kullanılan varyak Resim 3.9’da gösterilmiştir. Varyak ile ısıtıcı plaka arasında sıcaklık kontrol devresi bulunmadığından varyaktan sağlanan voltaj değeri deney süresince manuel olarak ayarlanmıştır. Varyakın manuel olarak kontrol edilebilmesi için deney öncesinde varyaktan sağlanan voltaj değeri ile ısıtıcı plakanın zamana bağlı sıcaklık eğrisi elde edilmiştir. İlgili grafik Şekil 3.12’te paylaşılmıştır.

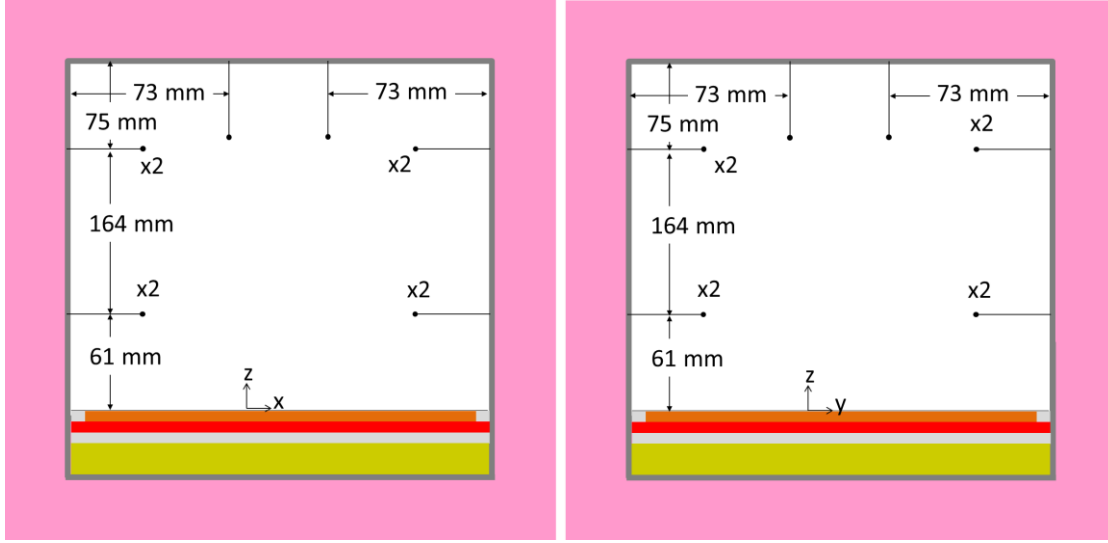


Resim 3.9. Rezistanslı ısıtıcıya kontrollü güç verilmesi için kullanılan varyak



Şekil 3.12. Varyak güç seviyesine göre ısıtıcı plaka sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği

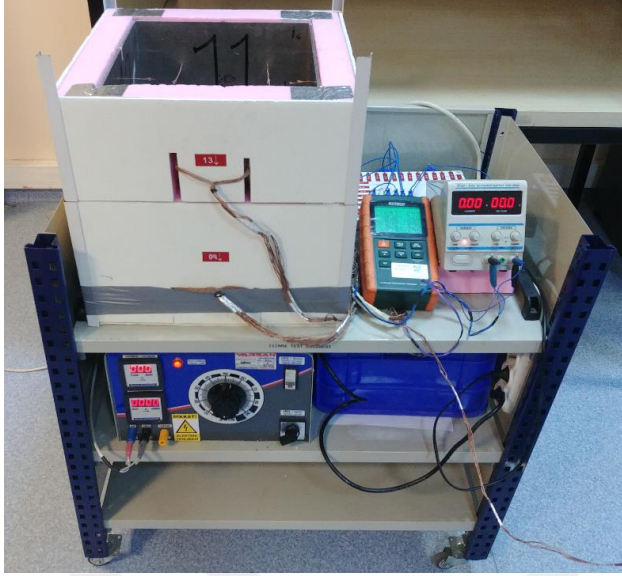
Kabin içerisinde farklı noktalardaki hava sıcaklığının ölçülebileceği 18 adet ısı çift bulunmaktadır. Isı çiftlerin kabin içerisindeki konumları Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Kabin içerisine yerleştirilen elektronik kartın çalıştırılması için kullanılan kablolar ve ısı çift kabloları dış ortama, kabin gövdesi üzerine açılan 30 mm çapında bir delikten uzatılmıştır. Delikten dolayı iç ortam ve dış ortam arasındaki hava alışverişini dolayısı ile de ısı transferini en aza indirmek üzere kutunun dışının yalıtılması için kullanılan yalıtım malzemesi kullanılarak delik büyük ölçüde (>%95) kapatılmıştır. Kablo çıkışı için kullanılan delik Resim 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Kabin içerisindeki havanın sıcaklığının ölçülmesi için kullanılan sensörlerin konumu



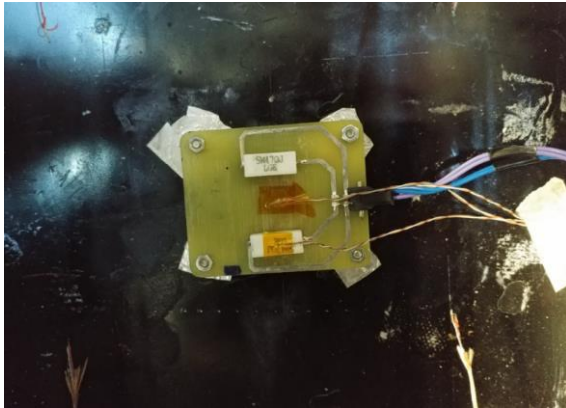
Resim 3.10. Kabin içerisindeki kabloların dış ortama çıkartılması için gövde üzerinde bulunan kablo çıkış deliği



Resim 3.11. Deney düzeneği iki kademeli durumdaki genel görünümü



Resim 3.12. Elektronik kart kompleksinin kabin içerisindeki yerleşimi



Resim 3.13. Elektronik kart kompleksinin ayrıntılı görünümü

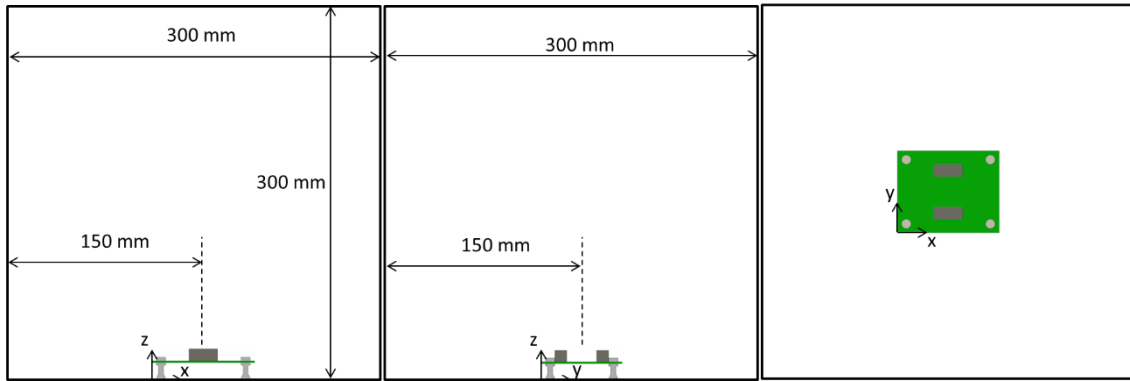
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyde sıcaklık ölçümleri T tipi ısılcıftlar kullanılarak yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri yapılmadan önce ısılcıftların kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada buzlu su kullanılmıştır. İkinci aşamada ise kaynayan su kullanılmıştır. Kaynama noktası, Ankara için atmosferik basınç hesaplanıp bu basınç değerine karşılık gelen saf suyun kaynama sıcaklığı tespit edilerek belirlenmiştir. Böylece 0-100°C aralığında tüm ısılcıftlar için kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen kalibrasyon eğrisi denklemleri Çizelge 3.2 gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Isılcıftlar için kalibrasyon denklemleri

No	Buzlu Su (°C)	Kaynar Su (°C)	Kalibrasyon Denklemi
1	0	97,5	$0,992821 \cdot t - 0,69497$
2	0,1	98	$0,988764 \cdot t - 1,18652$
3	0,1	97,1	$0,997938 \cdot t - 0,29938$
4	0,2	97,8	$0,991803 \cdot t - 0,9918$
5	0,2	98,3	$0,986748 \cdot t - 1,48012$
6	0,2	98,6	$0,98374 \cdot t - 1,77073$
7	0,4	99,2	$0,979757 \cdot t - 2,35142$
8	0,4	99,1	$0,98075 \cdot t - 2,25572$
9	0,6	96,6	$1,008333 \cdot t + 0,201667$
10	0,6	98,6	$0,98775 \cdot t - 1,77796$
11	0,6	98,7	$0,986748 \cdot t - 1,87482$
12	0,6	98,7	$0,986748 \cdot t - 1,87482$
13	0,6	97,6	$0,997938 \cdot t - 0,79835$
14	0,6	98,2	$0,991803 \cdot t - 1,38852$
15	0,6	98,2	$0,991803 \cdot t - 1,38852$
16	0,7	98,1	$0,99384 \cdot t - 1,29199$
17	0,6	97,7	$0,99691 \cdot t - 0,89722$
18	0,7	98,7	$0,98775 \cdot t - 1,87673$
19	0,7	97,1	$1,004149 \cdot t - 0,30124$
20	-0,5	98,6	$0,976791 \cdot t - 1,75822$
21	-0,2	98	$0,985743 \cdot t - 1,18289$
22	-0,3	97,1	$0,99384 \cdot t - 0,29815$
23	0	99,1	$0,976791 \cdot t - 2,24662$
24	0	96	$1,008333 \cdot t + 0,806667$
25	0	97,8	$0,989775 \cdot t - 0,98978$
26	0,1	98	$0,988764 \cdot t - 1,188652$
27	0,2	96,2	$1,008333 \cdot t + 0,605$

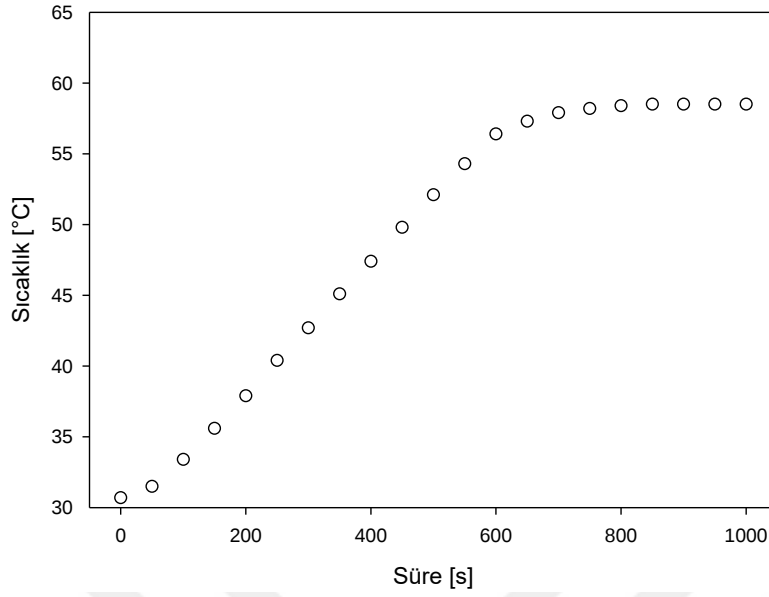
3.5.2. Kapalı hacim içerisinde gerçekleştirilen deneysel çalışma

Çalışma kapsamında, analiz modelinin doğrulanması amacıyla elektronik kart üzerinde bulunan komponentlere sabit güç uygulanarak ve ısıtıcı plaka belirli bir sıcaklık değerinde tutularak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deney, kabin yüksekliğinin ikinci kademedeki olduğu durumda yani kabin iç hacminin 300x300x300 mm olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Kart kompleksi kapalı ortam kontrollü ısıtma deney düzeneği içerisinde ısıtıcı plakanın üzerine yerleştirilmiştir. Kart kompleksinin kabin içerisinde ısıtıcı plaka üzerindeki konumu Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen deney iki kısımdan oluşmaktadır. Deneyin ilk kısmında kabin içerisindeki ısıtıcı plaka ortam sıcaklığından 60°C’ye doğrusal olarak ısıtılmış ve belirli bir süre (yaklaşık 300 saniye) boyunca 60°C’de sabit tutulmuştur. İlk kısımda baskı devre kartı üzerinde bulunan komponentlere güç verilmemiştir ve sistemin ısınmasında yalnızca ısıtıcı plakanın sıcaklığı etkili olmuştur. Deneyin ikinci kısmında ise ısıtıcı plaka sıcaklığı 60°C’de sabit tutulmuş ve komponentlere 8,3 V, 0,35 A elektrik sağlanarak 2,9 W (7,3 mW/mm³) değerinde güç verilmiştir. Deneyin iki farklı kısımdan oluşmasının sebebi analiz modelinin doğrulanması aşamasında bilinmeyen sayısının en aza indirilmesidir. Analiz modelinin doğrulanması ile ilgili ayrıntılar Bölüm 5.1.2’de anlatılmıştır.



Şekil 3.14. Kart kompleksinin kabin içerisindeki konumu

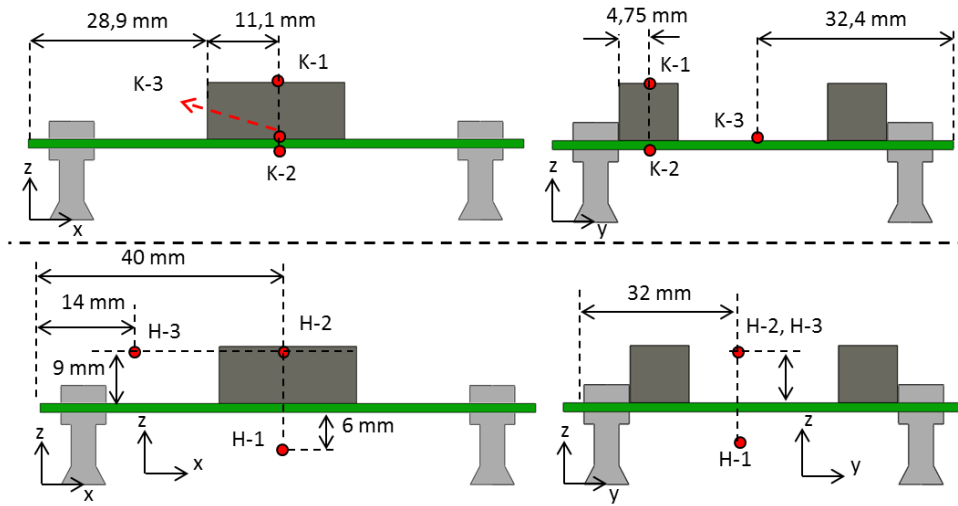
Isıtıcı plaka, 30°C olan ortam sıcaklığından 60°C’ye kadar doğrusal olarak ısıtılıp, ısıtıcı yüzeyinin tamamı $\pm 2^\circ\text{C}$ bandında 60°C olduğunda da plaka sıcaklığı sabit tutulacak şekilde voltaj sağlanmıştır. Deneyin ilk kısmında varyaktan rezistanslı ısıtıcıya güç verildiğinde ısıtıcı plakanın sıcaklık-zaman grafiği Şekil 3.15’deki gibi olmaktadır.



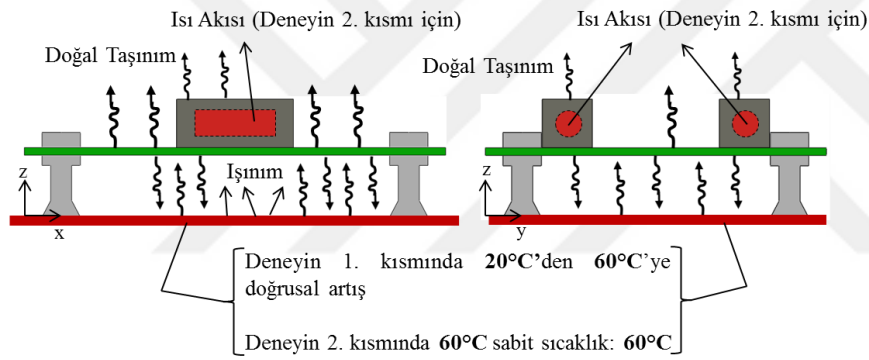
Şekil 3.15. Deneyin ilk kısmında bakır plakanın sıcaklık-zaman grafiği

Elektronik komponentler baskı devre kartı üzerine, komponent ayaklarından lehimlenerek sabitlenmiştir. Deneyin ikinci kısmında ısıtıcı plaka sıcaklığı 60°C'de sabitken komponentlere güç kaynağından sabit güç uygulanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan komponentlere verilen gücün tamamı ısıya dönüşmektedir.

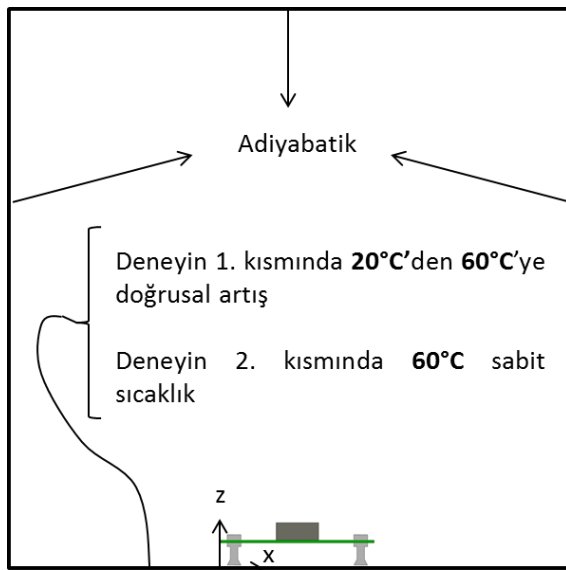
Elektronik kart kompleksinde kart üzerinde iki noktanın ve komponent üzerinde bir noktanın olmak üzere toplamda 3 noktanın zamana bağlı sıcaklık değerleri T tipi ısıçift kullanılarak ölçülmüştür. Kart kompleksi civarındaki havanın sıcaklığını ölçmek için ise deney düzeneğinde bulunan ısıçiftlerden dört tanesi kullanılmış, ek olarak da üç adet T tipi ısıçift yerleştirilmiştir. Elektronik kart kompleksi üzerinden veri toplanan noktaların konumu Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Deneyin ilk kısmında toplam 1000 saniye, ikinci kısmında ise 600 saniye veri toplanmıştır. Deneyde kullanılan sınır şartları özet olarak Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Elektronik kart kompleksi üzerine yerleştirilen ısıçiftlerin konumları

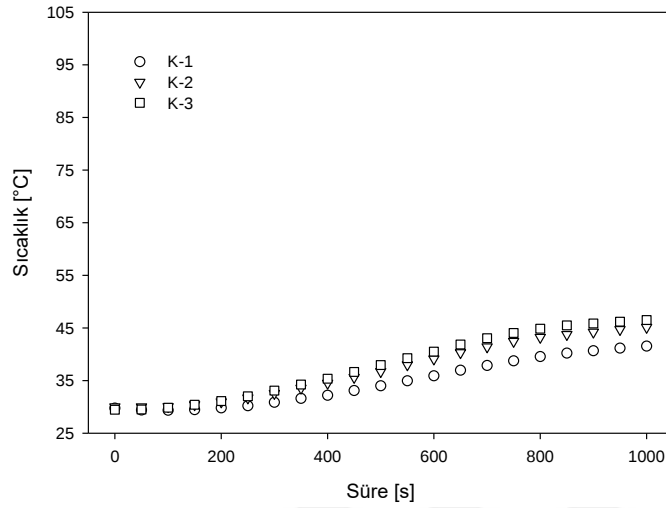


Şekil 3.17. Kart kompleksi sınır şartları şematik gösterimi

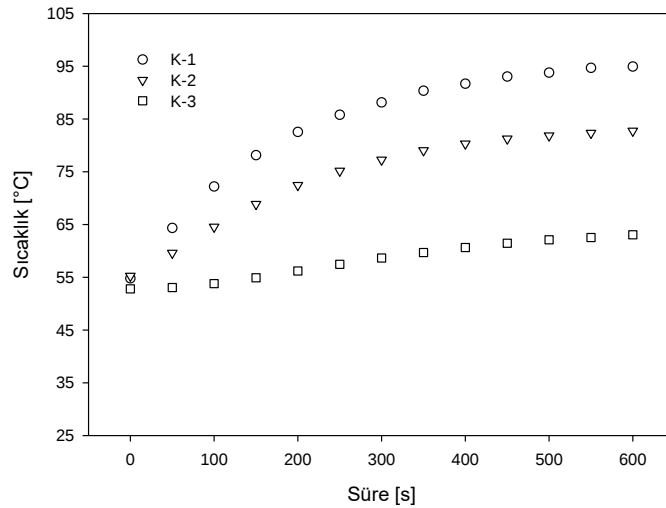


Şekil 3.18. Kabin sınır şartları şematik gösterimi

Deneyin birinci ve ikinci kısmında Şekil 3.16’da gösterilen kart ve component üzerindeki noktalara (K-1, K-2, K-3) ait elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Analiz modelinin doğrulanması kapsamında referans değerler olarak Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’te gösterilen sonuçlar kullanılmıştır.



Şekil 3.19. Analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneyin ilk kısmında elektronik kart ve component üzerine yerleştirilen ısılıçiftler ile elde edilen ölçüm sonuçları

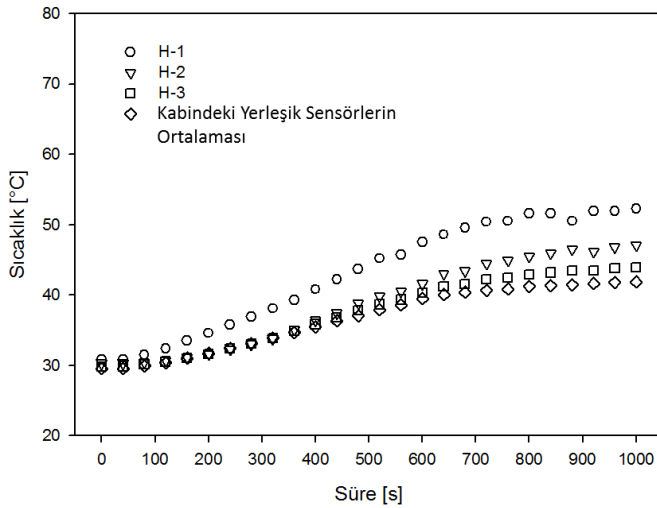


Şekil 3.20. Analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneyin ikinci kısmında elektronik kart ve component üzerine yerleştirilen ısılıçiftler ile elde edilen ölçüm sonuçları

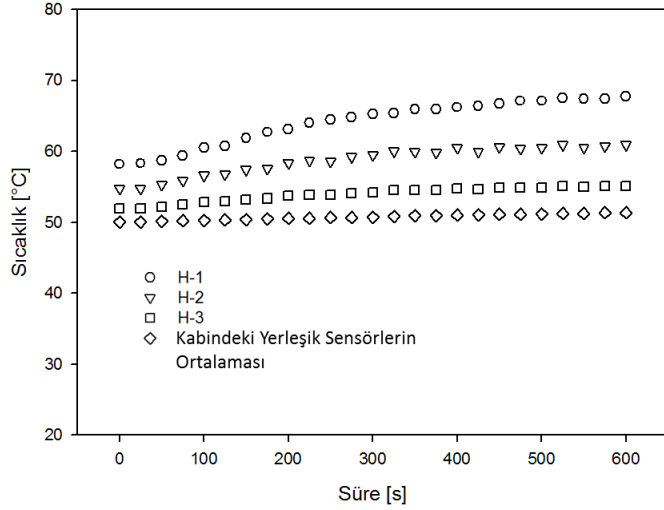
Deneyin birinci kısmında komponente güç verilmeyip yalnızca bakır plaka ısıtıldığı için ölçüm noktalarındaki sıcaklık artışı, Şekil 3.19’da görüldüğü gibi birbirine yakın

olmaktadır ve bu artış değeri yaklaşık 15-20°C mertebesinde. Fakat ikinci kısım deneyde, ısıtıcı plakaya göre daha etkin ısıtma sağlayan komponent çalıştırıldığı için ölçüm noktalarının sıcaklıklarındaki artışın ve bu noktaların sıcaklıkları arasındaki farkın deneyin ilk kısmına göre oldukça yüksek olduğu Şekil 3.20’de görülmektedir. Deneyin ikinci kısmında deney başlangıç anından 600 saniye sonuna kadar, K-3 noktasındaki sıcaklık artışı yaklaşık 10°C civarında iken, K-1 noktasındaki sıcaklık artışı, bu nokta komponentin üzerinde olduğu için, 40°C’nin üzerindedir.

Deney düzeneğinde yerleşik olarak bulunan, kabin iç hava sıcaklığını ölçen, Şekil 3.13’te konumları gösterilen sensörlerden elde edilen ortalama havanın sıcaklık değerleri komponentlerin çalışmadığı ve çalıştığı durumlar için sırasıyla Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de gösterilmiştir. H-1, H-2 ve H-3 noktaları Şekil 3.16’da gösterildiği gibi, elektronik kart ve komponentlere yakın bölgelere yerleştirilmiştir. Kabin içerisinde yerleşik olarak bulunan ve Şekil 3.13’te konumları gösterilen sensörler ise kart kompleksinden uzakta bulunup kabin içerisindeki ortalama hava sıcaklığının ölçülmesi amacıyla kullanılmıştır. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de bu yerleşik sensörlerde ölçülen ortalama sıcaklık değerleri sunulmuştur.



Şekil 3.21. Komponentlerin çalışmadığı durumda kart etrafındaki ortam sıcaklıkları



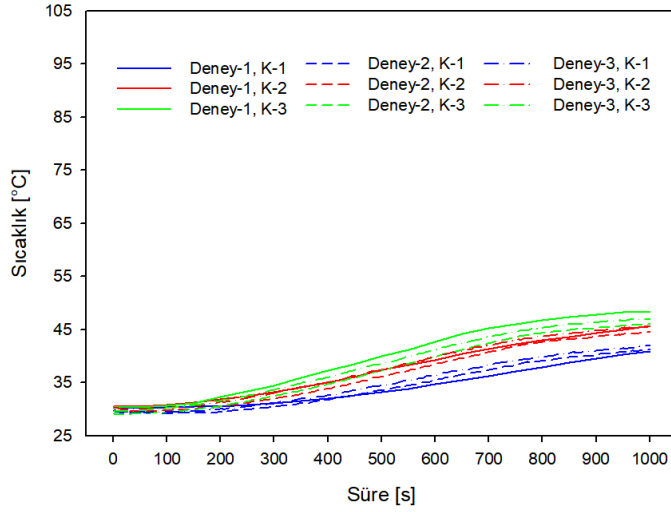
Şekil 3.22. Komponentlerin çalıştığı durumda kart etrafındaki ortam sıcaklıkları

Deneyin ilk kısmında hava sıcaklığını ölçen tüm sensörlerin benzer eğimde ısındığı Şekil 3.21'de görülmektedir. Bunun temel sebebi, plakanın, kabinin tabanının tamamını kaplıyor olması, sistemdeki tek ısı kaynağının plaka olması ve plakanın homojen olarak ısınmasıdır. İkinci kısım deneyde ise Şekil 3.22'de görüldüğü gibi tüm ölçüm noktalarında yine benzer sıcaklık profili görülmekte olup, noktalar arası sıcaklık değerleri deneyin ilk kısmına göre artmıştır. Plaka sıcaklığı ikinci deneyde sabit olduğundan, komponentlerden nispeten uzak olan H-3 sensörü ve kabin iç hava ortalama sıcaklığı 600 saniye boyunca yaklaşık olarak sabit kalmıştır.

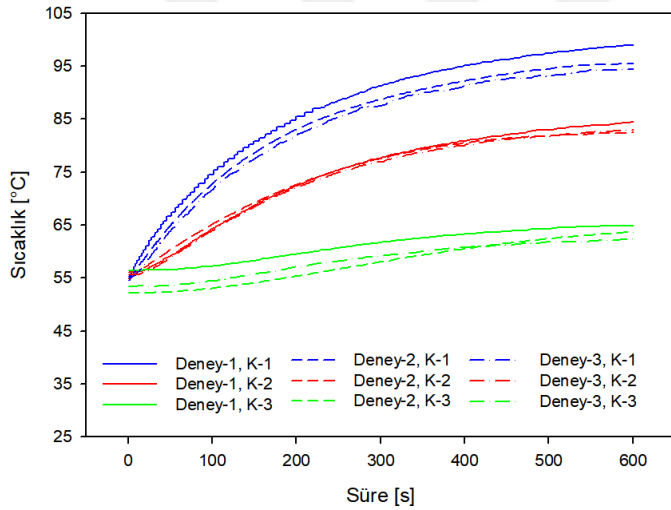
Gerçekleştirilen deney için tekrarlanabilirlik çalışması

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerin tekrarlanabilir olduğunun gösterilebilmesi için, analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deney aynı şartlar altında üç kez gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneye dair sonuçlar sırasıyla Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te sunulmuştur.

Şekil 3.23'te görüldüğü üzere ilk kısım için gerçekleştirilen deneylerde elde edilen ölçüm sonuçları arasında görülen farklar 1000 saniye boyunca 1-2°C mertebesinde kalmaktadır. Bu da en fazla %4-5 değerinde hata olduğu anlamına gelmektedir. Bu değerler ile deneyin ilk kısmının tekrarlanabilir olduğu görülmektedir.



Şekil 3.23. Analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneyin ilk kısmı için tekrarlanabilirlik çalışması



Şekil 3.24. Analiz modelinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen deneyin ikinci kısmı için tekrarlanabilirlik çalışması

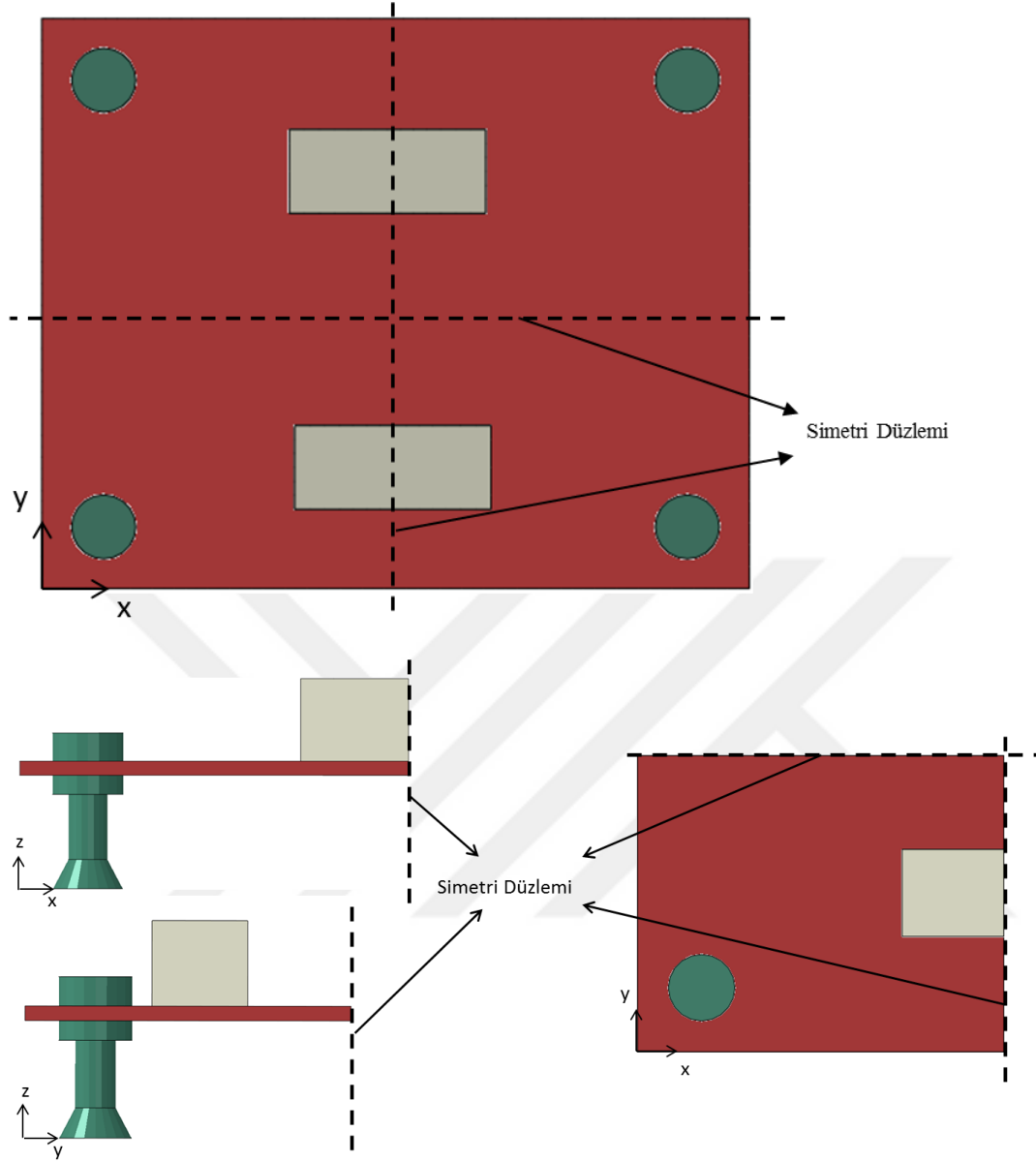
Şekil 3.24'te, ikinci kısım için gerçekleştirilen deney sonuçları arasındaki farkın en fazla 5-6°C mertebesinde olduğu görülmektedir. Bu da hata oranının %5 civarında olduğu anlamına gelmektedir. Problemin fiziği göz önünde bulundurulduğunda elde edilen sonuçların bahsedilen hata oranlarında kalması sonuçların kabul edilebilir ve deneylerin tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir.

4. SEY VE HAD YÖNTEMLERİNİN MEVCUT PROBLEME UYGULANMASI

Herhangi bir problemin nümerik analiz ile çözülüp gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmesi için öncelikle doğru analiz modelinin kurulmuş olması gerekmektedir. Doğru analiz modelinin kurulması, problem geometrisinin kurulup çözüm ağının oluşturulmasını ve oluşturulan analiz modelinin, sonuçları bilinen analitik veya deneysel bir çalışma ile doğrulanmasını gerektirmektedir.

Analiz modeli kurulmasının ilk aşaması, problemin hangi boyutta çözüleceğinin belirlenmesidir. Eğer mümkünse çözüm maliyetini ve süresini en aza indirmek amacıyla problem bir boyutlu, mümkün değilse iki boyutlu, o da mümkün değilse o halde üç boyutlu olarak modellenmelidir. Bu çalışmada incelenen problem geometrik olarak ve sınır şartları açısından bir boyutlu veya iki boyutlu modellenmeye uygun olmadığı için üç boyutlu olarak modellenmiştir.

Nümerik analiz modeli kurulmasının ikinci aşaması problemin analiz modelinde çözülecek kısmının belirlenmesidir. Eğer ki problemde geometri ve sınır şartı açısından simetri varsa, simetrik olan bölgelerde aynı sonuçlar elde edileceğinden, çözüm süresini ve maliyetini en aza indirmek üzere analiz modelinde simetri bölgesinin yalnızca bir tarafı çözülür. Bu çalışmada kullanılan kart kompleksi kapalı hacmin tam ortasında bulunmaktadır. Kart üzerinde bulunan komponentler de bir eksende kartın tam ortasına diğer eksende ise birbirlerine simetrik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca komponentler özdeş olduğundan, komponentlerin gücü de birbirine eşittir. Dolayısı ile fiziksel model iki düzlemde de geometri ve sınır şartı açısından simetrik olduğundan problemin yalnızca dörtte birlik kısmı analiz modeline dâhil edilip, çözümler yalnızca dörtte birlik kısım için yapılabilir. SEY analiz modelinde hava geometrik olarak modellenmediği ve katı model karmaşık bir yapıda olmadığı için modelin simetrik olarak modellenmesi çözüm süresini önemli miktarda değiştirmemektedir. Fakat HAD analiz modelinde hava geometrik olarak modellendiği ve katı-hava arası etkileşim çözüldüğü için modelin simetrik olarak kurulması çözüm süresini önemli oranda etkilemektedir. Bu sebeple HAD analiz modeli sistemin dörtte birlik kısmı için kurulmuştur. Böylece çözüm maliyeti ve süresi azaltılmıştır. Problemdeki simetri şematik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Elektronik kart kompleksi geometrisi simetri düzlemleri

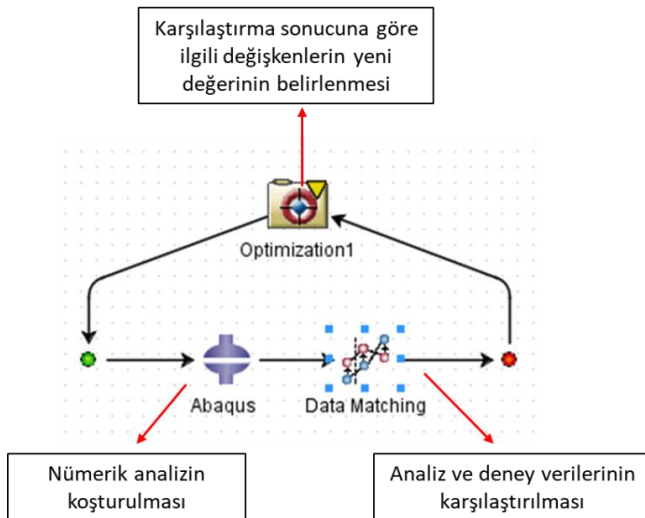
Nümerik analiz modeli kurulmasının diğer bir aşaması, problem geometrisinin analiz modelinde gerekli ve yeterli ölçüde ayrıntı içerecek şekilde oluşturulmasıdır. Problem geometrisinin tüm ayrıntılarının analiz modeline dâhil edilmesi hem model kurulması aşamasında zahmetli olacaktır hem de hesaplama süreci uzun zaman alacaktır. Problem geometrisinin olması gerektiğinden az ayrıntı içermesi ise hatalı sonuç elde edilmesine ve düşük ayrıntıda sonuçlar elde edilmesine sebep olacaktır. Bu yüzden, problem geometrisinin gerekli ve yeterli ölçüde ayrıntı içermesi herhangi bir nümerik analiz modelinde özellikle parametrik incelemelerin yapılacağı analiz modellerinde oldukça önemlidir. Bu çalışmada, elektronik kart, komponent ve ayaklar için SEY analiz modelinde

kullanılan geometrik modelin dörtte birlik kısmı HAD analiz modelinde kullanılmıştır. HAD analiz modelinde, SEY analiz modeline ek olarak kart kompleksinin içinde bulunduğu kapalı hacmin içerdiği hava da modellenmiştir. Elektronik kart, düz plaka olarak modellenmiştir. Komponent, dikdörtgen prizma olarak modellenmiş, üzerinde ısı transferine etkisi ihmal edilebilecek kadar küçük olan ayrıntılar analiz modeline dâhil edilmemiştir. Kart ile ısıtıcı plaka arasındaki bağlantı ayakları üzerinde yine ısı transferine etkisi ihmal edilebilecek kadar küçük olan geometrik ayrıntılar analiz modeline dâhil edilmemiştir. Sonuç olarak, analiz modelinde, kart kompleksi üzerinde gerçekleşecek ısı transferinin doğru hesaplanabileceği en az seviyede ayrıntı kullanılmıştır.

Nümerik analiz modeli kurulmasında, problem geometrisi oluşturulduktan sonra çözüm ağının oluşturulması aşaması gelmektedir. Çözüm ağının içerdiği eleman sayısının ve dolayısıyla ortalama eleman boyutunun gerekli ve yeterli büyüklükte olması gerekmektedir. Çözüm elemanlarının olması gerekenden büyük seçilmesi yanlış sonuçlara ve sonuçların düşük ayrıntıda incelenmesine sebep olacaktır. Gereğinden küçük elemanların kullanılması ise çözüm ağını gereksiz yere büyütecek ve çözüm süresini artıracaktır. Çünkü belirli bir değerden sonra eleman ebadı ne kadar küçülürse küçülsün çözüm sonucunu değiştirmeyecektir. Hatta bazı durumlarda olması gerekenden küçük eleman kullanılması hata oranını artırmaktadır. Bu kapsamda, hem SEY analiz modeli için hem de HAD analiz modeli için analiz modelinin çözüm ağından bağımsızlaştırılması çalışması yapılmıştır. İlgili çalışma Bölüm 5.1.1 ve Bölüm 5.2.1’de anlatılmıştır.

Problem geometrisi uygun bir şekilde kurulup çözüm ağının gerekli ve yeterli yoğunlukta oluşturulması ile matematiksel olarak doğru analiz modeli kurulmuştur. Kurulan modelin fiziksel olarak da gerçeği yansıtmaması için matematiksel olarak doğru olarak kurulan analiz modelinin sonucu bilinen bir referans çalışma ile veya bir deneysel çalışma ile doğrulanması gerekmektedir. Bu çalışmada kart kompleksi ile ilgili analiz modeline girdi olan fakat değeri bilinmeyen değişkenler; komponentler ile kart arasındaki termal temas direnci, komponentlerde yüksek sıcaklıklarda meydana gelen güç düşüm oranı ve kart ve komponent yüzeylerindeki taşınım katsayılarıdır. Komponentler ile kart arasındaki termal temas direnci değeri ve komponentte meydana gelen güç düşüm değeri doğrudan fiziksel model ile alakalı değerler olduğundan ve taşınım katsayıları yalnızca SEY analiz modelinde gerekli olduğundan yalnızca SEY analiz modeli için doğrulama çalışması yapılması yeterlidir. HAD analiz modeli için ise doğrulama çalışması sonucu elde edilen

bu değerler kullanılarak analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Doğrulama çalışmaları kapsamında, Bölüm 4'te anlatılan elektronik kart kompleksi için kapalı ortamda gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılmıştır. Bu deneyi simüle etmek üzere matematiksel olarak doğrulanmış analiz modeli kullanılarak SEY analizi gerçekleştirilmiştir. İlk analizde, belirsizlik içeren analiz girdileri için fiziksel olarak makul aralıkta kalacak şekilde bir ilk değer tanımlanmıştır. Daha sonra ilk analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Değişkenlerin değerleri belirli bir sıra ile analiz ve deney sonuçları arasındaki fark kapanana kadar makul aralıkta kalınacak şekilde değiştirilip tekrar analiz koşturulmuştur. Bu işlem iteratif olarak tekrarlanmıştır. İteratif olarak değişken değerlerinin değiştirilip yeni analiz koşturulması işlemi, farklı programlar arasında etkileşim kurulup iş akışları oluşturulabilen bir ticari yazılım olan ISIGHT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ISIGHT yazılımı ile geniş yelpazede farklı yazılımlar kullanılarak iş ve simülasyon akışları oluşturulabilir, bu yazılımlar ile döngüsel işlemler yapılabilir, farklı tasarım alternatifleri araştırılabilir, matematiksel olarak en iyi tasarım belirlenebilir ve bunlara benzer işlemler gerçekleştirilebilir. Tüm bunların yapılması üzere kullanılan ana bileşenler, Deney Tasarımı (Design of Experiment), Eniyileme ve Hedef Çözücü (Optimization and Target Solver), Yaklaşımlar (Approximations), Monte Carlo Analizi, Altı Sigma ve Taguchi Yöntemi'dir. ISIGHT ile bağlantı kurularak kullanılabilen bazı uygulama bileşenleri ise ABAQUS, Dymola, CATIA V5, Microsoft Office: Word ve Excel, e-posta, MATLAB, Mathcad, COM, OS komutu, Simcode olarak sayılabilir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ISIGHT yazılımındaki iterasyon sürecinin şeması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



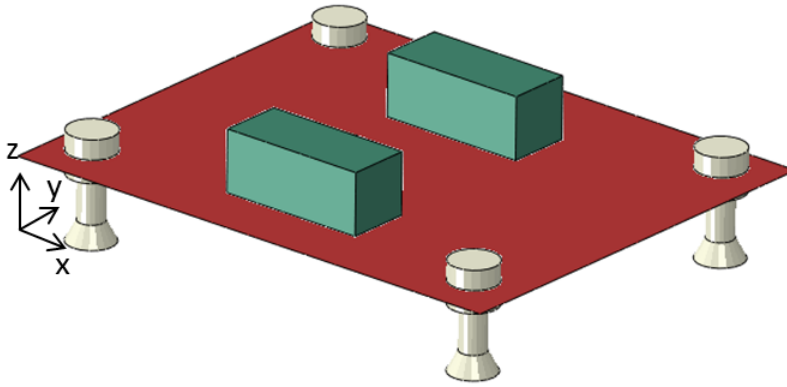
Şekil 4.2. ISIGHT yazılımı iterasyon şeması

Şekil 4.2’de gösterilen şemada işlem bileşeni olarak Eniyileme (Optimization), ve uygulama bileşeni olarak ABAQUS ve Veri Eşleştirme (Data Matching) kullanılmıştır. Özet olarak; iletim tabanlı SEY analizlerinin gerçekleştirildiği ABAQUS bileşeninde belirsizlik içeren değişkenler için bir ilk değer tanımlanmıştır. Tanımlanan ilk değerler kullanılarak ilk analiz gerçekleştirilmiştir. Veri Eşleştirme bileşeninde hem deneysel veriler tanımlanmış hem de ABAQUS bileşeninin çıktıları aktarılmıştır. Veri Eşleştirme bileşeninde analiz ve deney sonuçları karşılaştırılıp aralarındaki farkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değer Eniyileme bileşenine aktarılmıştır. Eniyileme bileşenine aynı zamanda ABAQUS bileşenindeki belirlenecek değişkenler de aktarılıp değişkenlerin belirleneceği değer aralığı tanımlanmıştır. Bu aralığın kullanıcı tarafından fiziksel olarak makul değerler olarak tanımlanması doğru sonuçlar elde edilmesi açısından son derece önemlidir. Aksi takdirde nümerik olarak doğru fakat fiziksel olarak yanlış sonuçlar elde edilebilecektir. Eniyileme bileşeninde farklı eniyileme algoritma seçenekleri mevcuttur. Bu seçenekler, eniyilenecek değişken sayısına, eniyilenecek değer aralığına, veri tipine ve buna benzer kısıtlara göre farklılık göstermektedir. Bu tez kapsamında AMGA (Archive-based Micro Genetic Algorithm) algoritması kullanılmıştır. Her bir iterasyonda, eniyileme bileşeninde analiz ve deney sonuçları arasındaki farkların kareleri toplamı değeri en aza indirilmek üzere ilgili algoritma kullanılarak ABAQUS bileşenindeki değişkenlere yeni değer atanmaktadır. Bu döngü mümkün olan en az fark elde edilene kadar devam etmektedir. Değişkenlerin iterasyonlar sonucu analiz ve deney sonuçlarının örtüştüğü durumdaki değerleri gerçek değerler olarak kabul edilmiştir. Böylece fiziksel olarak da doğru analiz modeli kurulmuştur.

Bu bölümde kapalı hacim içerisinde bulunan elektronik kart kompleksinin nümerik analiz modelinin kurulup doğrulanmasına dair ayrıntılar anlatılmış ve ilgili sonuçlar paylaşılmıştır.

4.1. SEY Analiz Modelinin Kurulması

SEY analiz modelinde, gerekli basitleştirmeler yapılan geometri kullanılmıştır. Kullanılan geometri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu bölümde, SEY analiz modeline dair ayrıntılar, modelin eleman sayısından bağımsızlaştırılması çalışması ve eleman sayısından bağımsızlaştırılan analiz modelinin deneysel sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları anlatılmıştır.



Şekil 4.3. SEY kart kompleksi geometrisi

SEY analiz modeli toplamda üç parçadan oluşmaktadır. Bunlar; baskı devre kartı, baskı devre kartı üzerine yerleştirilen elektronik komponentler ve baskı devre kartının sabitlenip ısıtıcı plaka üzerine yerleştirildiği ayaklardır. Bu parçaların termal malzeme özellikleri Çizelge 4.1 gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Elektronik kart kompleksi termal malzeme özellikleri

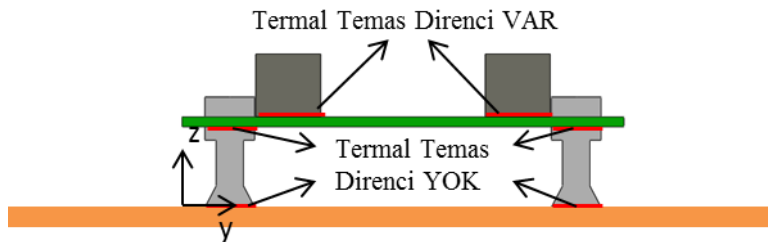
	k [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg.K]
Komponent	35	3890	880
Baskı Devre Kartı	düzlemsel yönde: 0,6 düzleme dik yönde: 0,3	1850	950
Ayak	16	8000	485

Fiziksel olarak birbiri ile temas eden parçalar arasındaki temas özelliklerinin analiz modelinde tanımlanması gerekmektedir. Deneysel çalışmada elektronik komponentler baskı devre kartı üzerine herhangi bir basma kuvveti kullanılmadan lehimlenerek

sabitlenmiştir. Bu sebeple komponentler ve kart arasında önemli kabul edilecek seviyede termal temas direnci meydana gelmektedir. Analiz modelinde de ısı transferini etkileyecek bu durumu simüle etmek üzere bu iki parça arasına termal temas direnci tanımlanmıştır. Fakat kart ile komponent arasındaki termal temas direnci değeri bilinmediğinden tanımlanan değer geçici bir değerdir. Termal temas direncinin gerçek değeri Bölüm 5.1.2’de ayrıntılı olarak anlatıldığı şekilde belirlenmiştir.

Ayaklar baskı devre kartına, cıvata bağlantısı ile sıkı bir şekilde sabitlenmiştir. Bu sebeple ayaklar ile kart arasında önemli miktarda basma kuvveti bulunmaktadır. Tüm model göz önünde bulundurulduğunda ayaklar ile kart arasındaki termal temas direnci, kart ve komponent arasındaki termal temas direncine nispeten oldukça küçük olacaktır. Bu durumdan dolayı analiz modelindeki bilinmeyen sayısını artırmamak adına ayaklar ile kart arasındaki termal temas direnci ihmal edilmiştir.

Son olarak, ayaklar ile ısıtıcı plaka arasında temas mevcuttur. Ayakların ısıtıcı plakaya basan yüzeylerinde ve ısıtıcı plaka yüzeyinde oldukça az pürüz bulunmaktadır. Ayrıca, yapılan deneyde ayaklar ile ısıtıcı plaka arasındaki az da olsa pürüzlerin olumsuz etkisini en aza indirmek üzere termal macun kullanılmış ve ayaklar plakaya yakın kısımdan alüminyum bant ile yapıştırılmıştır. Yine tüm model göz önünde bulundurulduğunda, ayaklar ile ısıtıcı plaka arasındaki termal temas direnci değeri, komponent ile kart arasındaki termal temas direncine göre oldukça düşük seviyededir. Bu durum ile birlikte modeldeki bilinmeyen sayısını en az seviyede tutmak için ayaklar ile ısıtıcı plaka arasındaki termal temas direnci de ihmal edilmiştir. Bu yüzden ısıtıcı plaka modele dâhil edilmeyip, ısıtıcı plakanın deney sırasında ölçülen sıcaklık değeri ayakların plakaya temas eden yüzeyine sınır şartı olarak tanımlanmıştır. SEY analiz modelindeki temaslar Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. SEY analiz modelinde parçalar arasında tanımlanan temaslar

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deney iki kısımdan oluştuğu ve bu iki kısımda sınır şartları farklılık gösterdiği için, analiz modelinde sınır şartları deneyin her iki kısmı için de ayrı ayrı oluşturulmuştur.

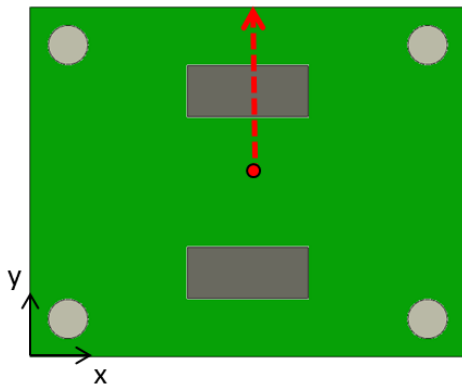
Deneyin birinci kısmında ısıtıcı plaka ortam sıcaklığından 60°C 'ye ısıtılıp bir süre sabit tutulmuştur. Deney sırasında bakır plakaya gömülü olarak bulunan ısılıçiftler ile plaka sıcaklığı ölçülmüştür. Bu sıcaklık değeri zaman bağılı olarak analiz modelinde ayakların plakaya temas eden yüzeylerine sıcaklık sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Deneyin ilk kısmında komponentlere güç verilmemiştir. Dolayısı ile deneyin ilk kısmı için komponentlere analiz modelinde herhangi bir sınır şartı tanımlanmamıştır. Komponent ve kart yüzeyleri ile kabin içerisindeki hava arasında doğal taşınım ile ısı transferi gerçekleşmiştir. Bu yüzeylere taşınım sınır şartı tanımlanmıştır. Taşınım sınır şartında tanımlanan, yüzeylerdeki taşınım katsayısı değeri, belirsizlik içeren ve analiz modelinin doğrulanması aşamasında belirlenmesi gereken bir değişkendir. Öte yandan, taşınım sınır şartında tanımlanan, ortam sıcaklık değeri de bilinmeyen değer olmakla beraber bu çalışmanın amacı göz önünde bulundurulduğunda, belirlenmesi zorunlu olan bir değişken değildir. Çünkü bu çalışmada asıl amaç, mevcut elektronik kart kompleksinin belirli bir sınır şartındaki termal davranışının tespit edilmesi olmayıp farklı sınır şartlarında sistemin termal davranışının karşılaştırmalı olarak incelenmesi olduğundan varsayılan ortam sıcaklıklarında analizlerin gerçekleştirilmesi yeterli olmaktadır. Analiz modelinin doğrulanması aşamasında, analiz modelinde oluşturulan taşınım sınır şartında tanımlanan ortam sıcaklık değerleri için, deneyde kart kompleksi etrafındaki havadan ısılıçiftler ile ölçülen değerler kullanılmıştır. Böylece, değeri belirlenmesi gereken değişkenlerin sayısı en aza indirilip, en az hata ile hesaplanması sağlanmıştır. Isıtıcı plaka yüzeyi mat siyah renkte olduğundan dolayı yayıcılık değeri yüksektir ve kart ile ısıtıcı plaka arasında ihmal edilemeyecek seviyede ışıınım ile ısı transferi gerçekleşmesine yetecek kadar yüksek sıcaklık farkı bulunmaktadır. Bu durumlardan dolayı ısıtıcı plaka ile kart arasında ihmal edilemeyecek düzeyde ışıınım ile ısı transferi gerçekleşmiştir. Plaka ile kart arasında gerçekleşen ışıınım ile ısı transferi, doğrusal olmayan ışıınım denkleminin çözülmesi yerine ilgili yüzeye taşınım sınır şartı uygulanıp eşdeğer taşınım katsayısı tanımlanarak hesaplanmıştır. Eşdeğer taşınım katsayısı hesaplanması Eş. 4.1 – Eş. 4.4 arasında gösterilmiştir.

4.1.1. SEY analiz modelinin hücre sayısından bağımsızlaştırılması

Bu bölümde, kart üzerinde belirlenen bir patika boyunca analiz ile elde edilen sıcaklık değerleri, farklı hücre ebatları için incelenmiştir. Hücre ebatları azaldıkça sıcaklık değerleri belirli bir profile yakınsamaktadır. Analiz sonuçlarındaki değişimin ihmal edilebilir düzeye geldiği yaklaşık hücre ebadı değeri, çalışma boyunca kullanılacak yaklaşık hücre ebadı değeri olarak belirlenmiştir. Sıcaklık farkları kart üzerinde fazla olup ayak ve komponentlerde az olduğundan komponent ve ayakların eleman ebatları değiştirilmemiş, yalnızca kart eleman ebadı değiştirilmiştir. Analiz sonuçları, yaklaşık hücre ebadının 5 mm, 2,5 mm, 1,25 mm, 0,625 mm ve 0,5 mm değerleri için incelenmiştir. Hücre sayısından bağımsızlaştırma çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlerdeki eleman ebatları ve sayıları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Kart üzerinde sıcaklık dağılımının incelendiği patika Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

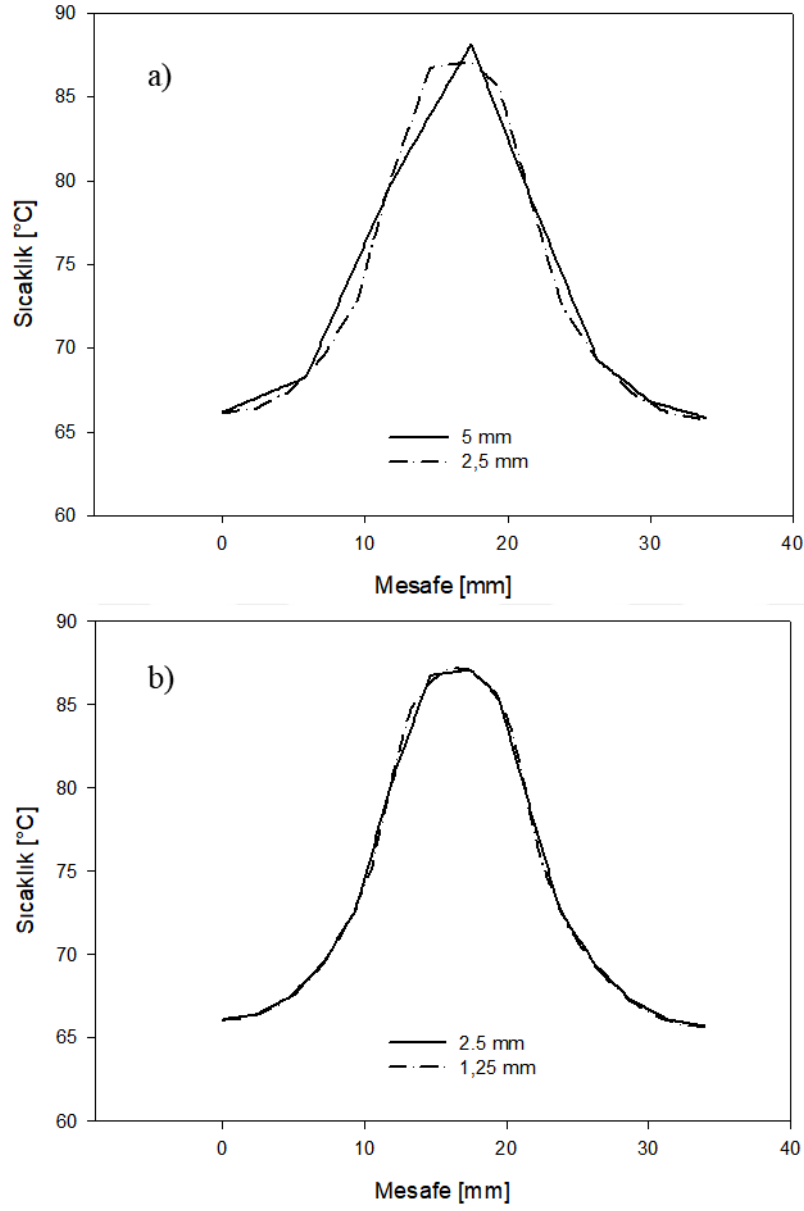
Çizelge 4.2. SEY analiz modelinin ağdan bağımsızlaştırma çalışması kapsamında kullanılan eleman sayıları bilgileri

Deneme No	Ortalama Eleman Ebadı [mm]	Kart Üzerindeki Eleman Düğüm Sayısı
1	5	133
2	2,5	330
3	1,25	1153
4	0,625	3961
5	0,5	5980

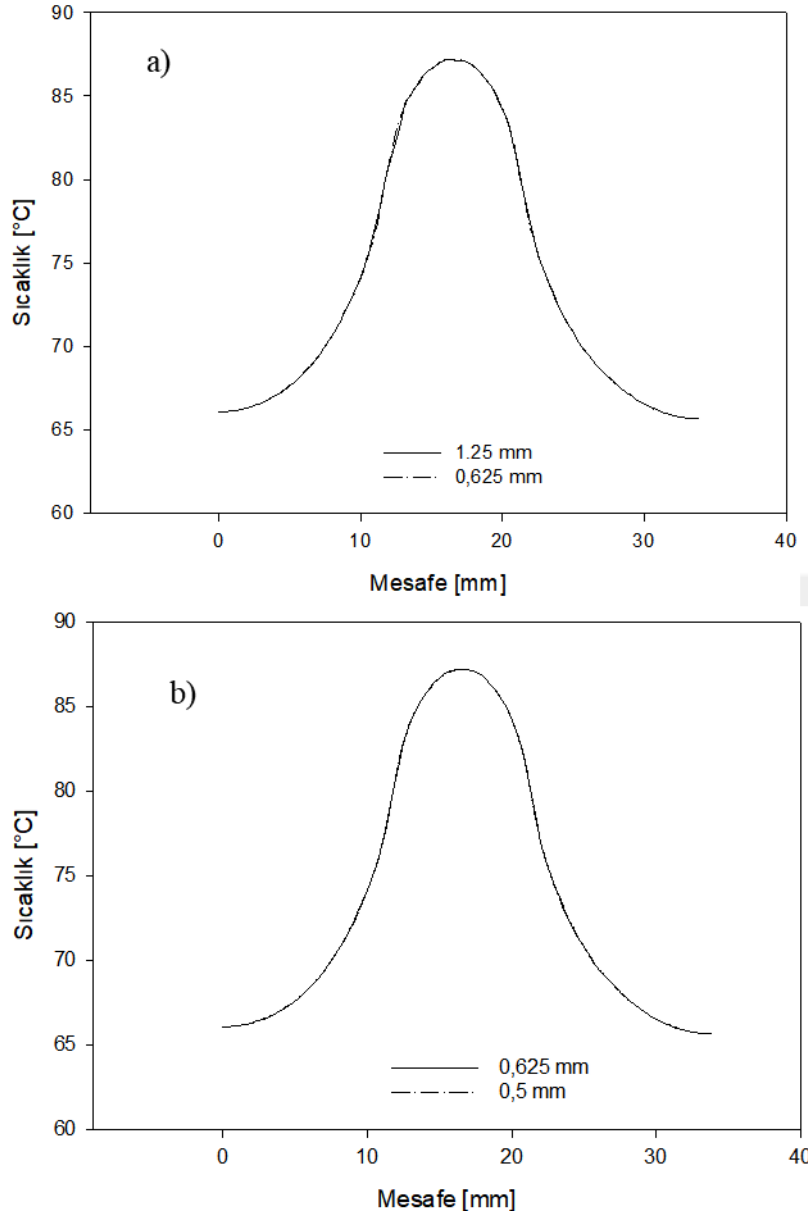


Şekil 4.6. SEY analizlerinde kart üzerinde 600. saniyedeki sıcaklık dağılımının incelendiği patika

Şekil 4.6’de gösterilen patika boyunca elde edilen sıcaklık dağılımının farklı hücre ebatlarına göre değişimi Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. SEY analizlerinde kart üzerinde 600. saniyedeki sıcaklık dağılımının eleman ebadına göre değişimi, a)5mm-2,5mm; b)2,5mm-1,25mm

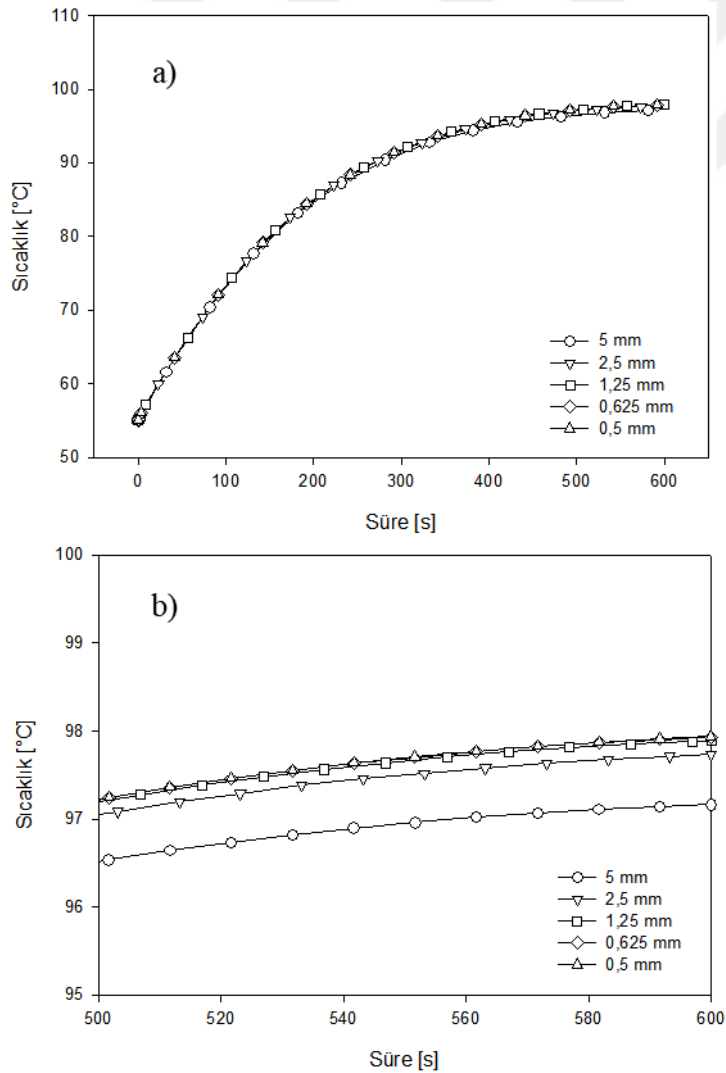


Şekil 4.8. SEY analizlerinde kart üzerinde 600. saniyedeki sıcaklık dağılımının eleman ebadına göre değişimi, a)1,25mm-0,625mm; b)0,625mm-0,5mm

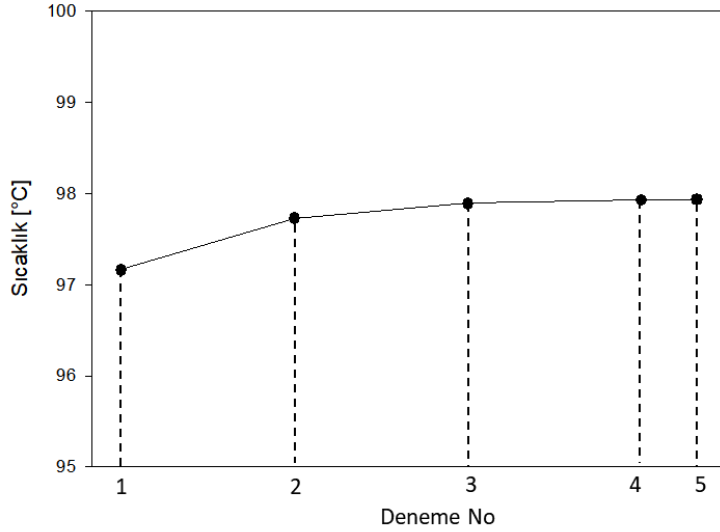
Şekil 4.7’de görüldüğü gibi ortalama eleman ebadının 5 mm olduğu durumda elde edilen sonuçlar ile ortalama eleman ebadının 2,5 mm olduğu durumda elde edilen sonuçlar arasında bölgesel olarak 4-5°C farklılık görülebilmektedir. Bu farklar çalışma sıcaklık aralığı ve kabul edilebilir hata aralığı göz önünde bulundurulduğunda oldukça fazladır. Öte yandan, 64,7 x 80 mm ebadında olan kart üzerinden 5 mm eleman ebadı kullanıldığında oldukça az sayıda noktadan veri elde edilebildiği Şekil 4.7’de görülmektedir. 5 mm – 2,5 mm eleman ebatları için gerçekleştirilen analiz sonuçları arasındaki farka nispeten az olsa da 2,5 – 1,25 mm eleman ebatları için gerçekleştirilen analiz sonuçları arasında da önemli

miktarda fark olduğu Şekil 4.7’de görülmektedir. Şekil 4.8’da görüldüğü gibi, 1,25 mm ve daha düşük eleman ebadı için gerçekleştirilen analizlerin sonuçları arasındaki fark çözüm doğruluğunu etkilemeyecek kadar düşüktür.

Ayrıca komponent üzerinde belirlenen K-1 ölçüm noktasının eleman ebadına göre zamana bağlı sıcaklık profilinin değişimi ve bu noktanın 600. saniyedeki sıcaklık değerinin eleman ebadına göre değişimi sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’de gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda ortalama eleman ebadı 1,25 mm ve daha küçük olduğu durumlarda kart kompleksi üzerindeki sıcaklık ve ısı akısı değerlerinde görülen farklar ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Bu sebeple SEY analizlerinde yaklaşık eleman ebadı 1,25 mm olarak devam edilecektir.



Şekil 4.9. SEY analizlerinde komponent üst yüzey sıcaklığının farklı eleman ebatlarına göre değişimi, a) 0-600 saniye, b) 500-600 saniye



Şekil 4.10. SEY analizlerinde komponent üst yüzey sıcaklığının 600. saniyedeki değerinin farklı eleman ebatlarına göre değişimi

4.1.2. SEY analiz modelinin deneysel çalışma ile doğrulanması

SEY analiz modeli, Bölüm 4'te ayrıntıları verilen deney ile elde edilen sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. SEY analiz modeli için uygun geometri hazırlanmış ve ağ sayısından bağımsızlaştırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Tüm bunlar ile matematiksel olarak doğru analiz modeli kurulmuştur. Bir sonraki aşama fiziksel olarak da doğru analiz modelinin kurulabilmesi için analiz modelinin deneysel çalışma ile doğrulanmasıdır. Bu çalışmada kullanılan SEY analiz modelinde komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin değeri, komponentlerde meydana gelen sıcaklığa bağlı güç kaybı değeri ve yüzeylerdeki taşınım katsayısı değerleri bilinmemektedir. Doğru analiz modelinin kurulabilmesi için bu değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde SEY analiz modelinde girdi olarak kullanılan fakat değerleri bilinmeyen bu değişkenlerin değerlerinin deneysel çalışma kullanılarak belirlenmesi anlatılmıştır.

Analiz sonuçları, değerleri belirlenecek olan tüm analiz girdilerinden etkilendiği için analiz girdilerinin belirlenmesinde uygun bir sıra takip edilmelidir. Bunun için hangi analiz girdisinin hangi durumda analiz sonuçları üzerinde ne kadar etkili olduğu tespit edilmelidir. Komponentlerdeki yüksek sıcaklığa bağlı güç düşüm oranı, komponent çalıştığı ve komponent sıcaklık değeri 75°C'nin üzerine çıktığı durumda ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple komponentler çalıştırılmadan gerçekleştirilen analizlerde bu değerlerin bilinmesine gerek yoktur. Bölüm 4'te anlatıldığı üzere deney iki kısımdan

oluşmaktadır. Birinci kısımda komponentler çalıştırılmamış, yalnızca ısıtıcı plakaya güç verilmiştir. Isıtıcı plaka sıcaklığı ortam sıcaklık değerinden başlayıp 60°C'ye kadar ısıtılmış ve bir süre 60°C sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Deneyin ikinci kısmında ise ısıtıcı plaka sıcaklık değeri 60°C'de sabit tutulurken komponentlere de sabit ısı güç verilmiştir.

Deneyin ilk kısmında komponentlerin çalıştırılmamasının sebebi komponentlerde yüksek sıcaklıkta meydana gelen güç düşüm oranı değişkeninin analiz modeline dâhil edilmeyerek bilinmeyen sayısının en az seviyede tutulmasıdır. Komponentler ile baskı devre kartı arasındaki ve ayaklar ile ısıtıcı plaka arasındaki termal temas direnci değeri her durumda mevcuttur ve değeri sabittir. Bu yüzden, her durumda bu değişken göz önünde bulundurulmalıdır. Yüzeylerdeki taşınım katsayıları da her durumda yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak analiz sonuçlarını etkileyecektir. Fakat yüksek sıcaklık değerlerinde taşınım katsayılarının sonuçlara etkisi düşük sıcaklık değerlerindeki duruma göre daha fazla olduğundan, taşınım katsayıları, sıcaklıkların daha yüksek olduğu, yani komponentlerin çalıştırıldığı durumda belirlenmelidir.

Deneyin ilk kısmı için, komponentler çalıştırılmadığından bilinmeyen olarak komponentler ile kart arasındaki termal temas direnci değerleri ve yüzeylerdeki taşınım katsayıları kalmıştır. Taşınım katsayıları, daha yüksek sıcaklıklara ulaşılan, komponentlerin çalıştırıldığı durumda belirlendiği için deneyin ilk kısmında yalnızca termal temas direnci değerleri belirlenmiştir.

Deneyin ikinci kısmı için ise komponentlerde yüksek sıcaklıkta meydana gelen güç düşüm oranı ve yüzeylerdeki taşınım katsayıları belirlenmiştir. Her iki değişkenin değerleri de iterasyon aşamasında aynı anda değiştirilerek gerçek sonuçlar elde edilmiştir.

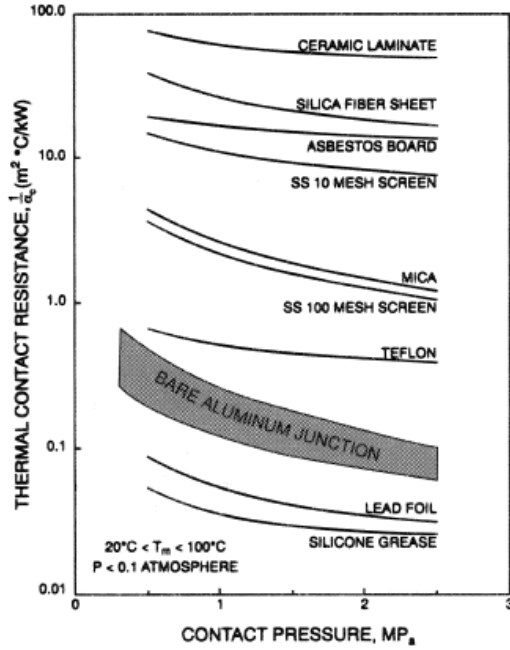
Analiz modelinde girdi olarak kullanılan fakat değeri bilinmeyen değişkenlerin analiz modelindeki etkisi ve belirlenme sırası özet olarak Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Analiz modelinde değeri bilinmeyen girdilerin sonuçlara etkisi ve belirlenme sırası

		Deneyin 1. Kısım	Deneyin 2. Kısım
Deneydeki Sınır Şartları	Isıtıcı Plaka	20°C → 60°C doğrusal ısınma	60°C sabit sıcaklık
	Elektronik Komponentler	KAPALI	Sabit ısı gücü
Analiz Modeline Girdi Olan ve Değeri Bilinmeyen Değişkenler	Termal Temas Direnci	Var ve değeri sabit	Var ve değeri sabit
	Komponent Güç Düşümü	YOK	VAR
	Taşıma Katsayıları	Var ve düşük etkide	Var ve yüksek etkide
İteratif Analizlerle Değeri Belirlenen Değişkenler	Termal Temas Direnci	+	Belirlendi
	Komponent Güç Düşümü	-	+
	Taşıma Katsayıları	-	+

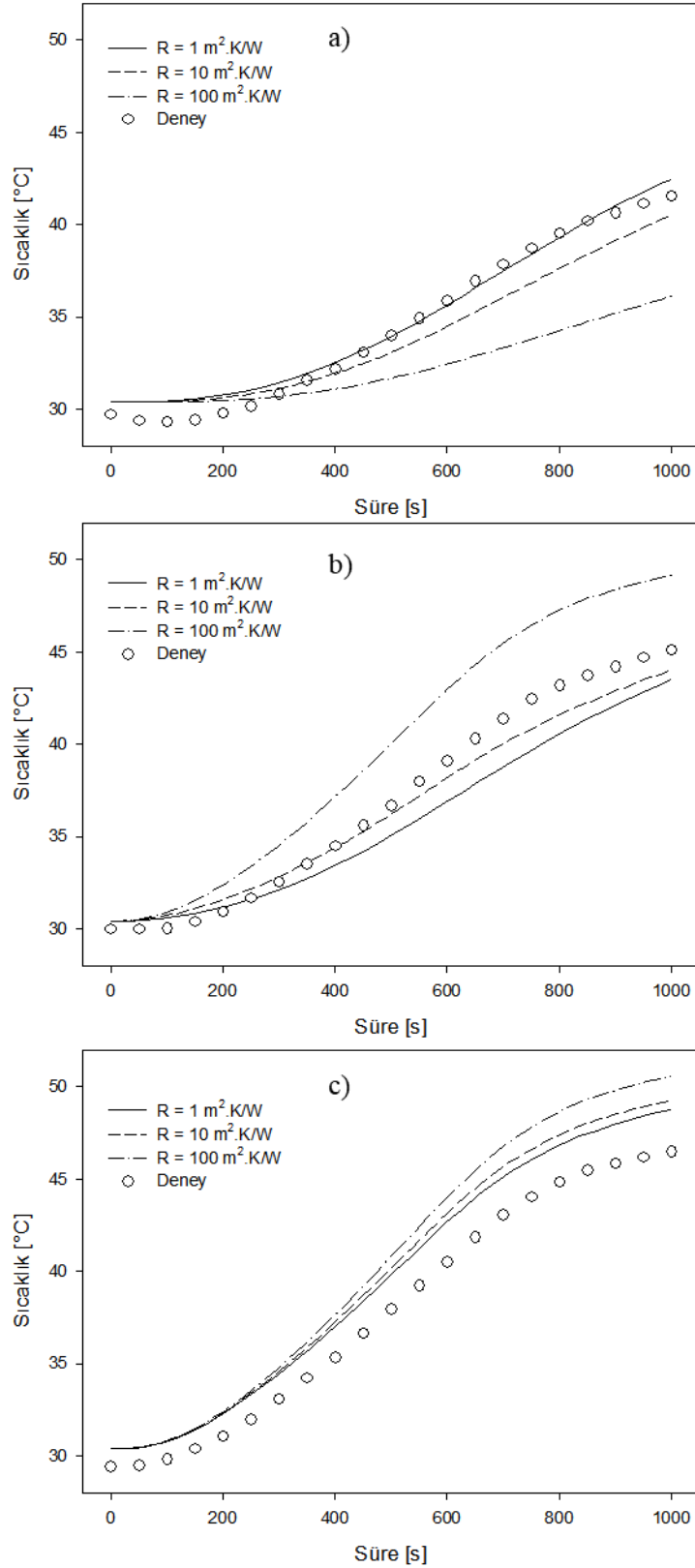
Komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direnci değerinin belirlenmesi

İki yüzey arasındaki termal temas direnci yüzeylerin pürüzlülüğüne, bağlantı şekline ve yüzeyler arasındaki temas basıncına bağlıdır. İki yüzey arasındaki termal temas direnci değeri için Şekil 4.11’de gösterilen değerler kabaca tahmin açısından kullanılabilir.



Şekil 4.11. Farklı yüzey tipleri için basınç-thermal temas direnci grafiği

İlk analizin koşturulması için değerleri bilinmeyen değişkenlere bir ilk değer tanımlanması gerekmektedir. Bu değer fiziksel olarak makul bir aralıkta olması gerekmektedir. Aksi takdirde nümerik olarak doğru fakat fiziksel olarak yanlış sonuçların elde edilmesi muhtemeldir. Bu sebeple komponentler ile kart arasındaki termal temas direnci için bir ilk değer tanımlanması için Şekil 4.11 kullanılmıştır. Komponent malzemesi seramik ve yüzeyi az pürüzlü, baskı devre kartı malzemesi FR4 ve yüzeyi orta seviyede pürüzlüdür. Komponentler baskı devre kartına el yordamı ile lehim uygulanarak ek herhangi bir basınç oluşturulmadan sabitlenmiştir. Tüm bunlar hesaba katıldığında termal temas direnci değerinin yaklaşık olarak 10-100 $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ mertebesinde olması beklenmektedir. İlk aşmada taşınım katsayıları belirlenmeyip yalnızca termal temas direnci değeri belirlendiği için termal temas direnci değeri iteratif olarak değiştirilirken yüzeylerdeki taşınım katsayılarının sabit tutulması gerekmektedir. Taşınım katsayılarının değeri bilinmediği için doğal taşınım katsayısı değerinin alabileceği değer aralığından ortalama bir değer seçilmelidir. Bu sebeple termal temas direnci değerinin belirlenmesi aşamasında taşınım katsayısı değeri tüm yüzeylerde 5 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ olarak kabul edilmiştir. Komponentlerin çalıştırılmadığı, taşınım katsayılarının tüm yüzeyler için 5 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ olduğu ve komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin 1, 10 ve 100 $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ değerlerinde olduğu durumlar için gerçekleştirilen analiz sonuçları ve deneyin birinci kısmının sonuçları Şekil 4.12’te gösterilmiştir. Şekil 4.12’te gösterilen sonuçlardan yola çıkılarak termal temas değeri için ilk değer olarak 10 $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ seçilmiştir.

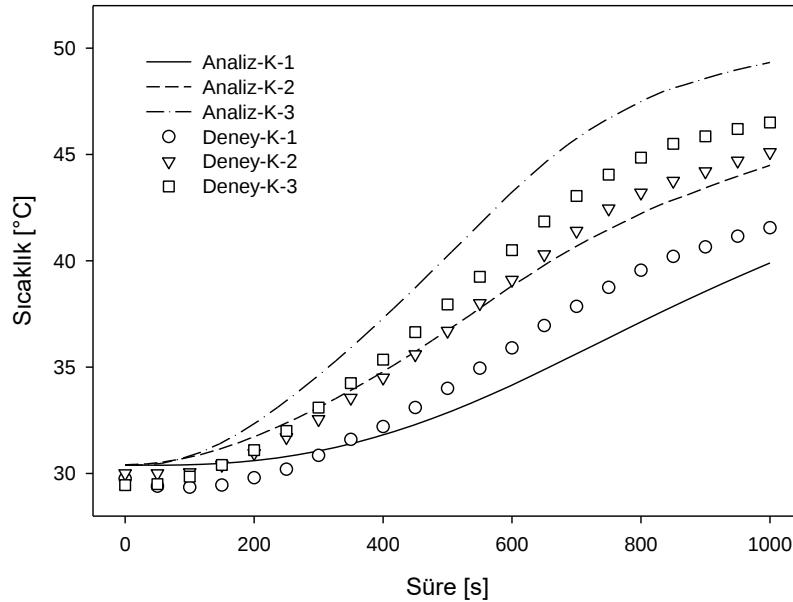


Şekil 4.12. Tüm yüzeylerde $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken, komponent ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin 1, 10 ve $100 \text{ m}^2\text{K/W}$ olduğu durumlardaki SEY analiz sonuçları, a) K-1 noktası, b) K-2 noktası, c) K-3 noktası

Bundan bir sonraki aşamada analiz ve deney sonuçları arasındaki farklar kabul edilebilir düzeylere gelene kadar termal temas direnci değerleri ISIGHT yazılımı kullanılarak iteratif olarak değiştirilmiştir. Termal temas direnci değeri 1-50 m²K/W aralığında değiştirilmiştir. Bu aralık Şekil 4.11'e göre belirlenmiştir. ISIGHT yazılımı içerisinde her iterasyon için analiz ve deney sonuçları karşılaştırılıp aradaki farkın kapanıp kapanmadığı değerlendirilmektedir. Bu kapsamda 500 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Termal temas direncinin ilk değeri, iteratif olarak değiştirildiği değer aralığı ve gerçekleştirilen iteratif analizler sonucunda elde edilen değeri Çizelge 4.4 gösterilmiştir. İteratif analizler sonucunda nihai olarak elde edilen termal temas direnci değerleri için koşturulan analiz sonuçları ve deney sonuçları Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Komponent ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin ilk değeri, iterasyon için belirlenen değer aralığı ve nihai değeri

	R [m ² .K/W]
İlk Değer	10
Belirlenen Değer Aralığı	1-100
Nihai Değer	14,3



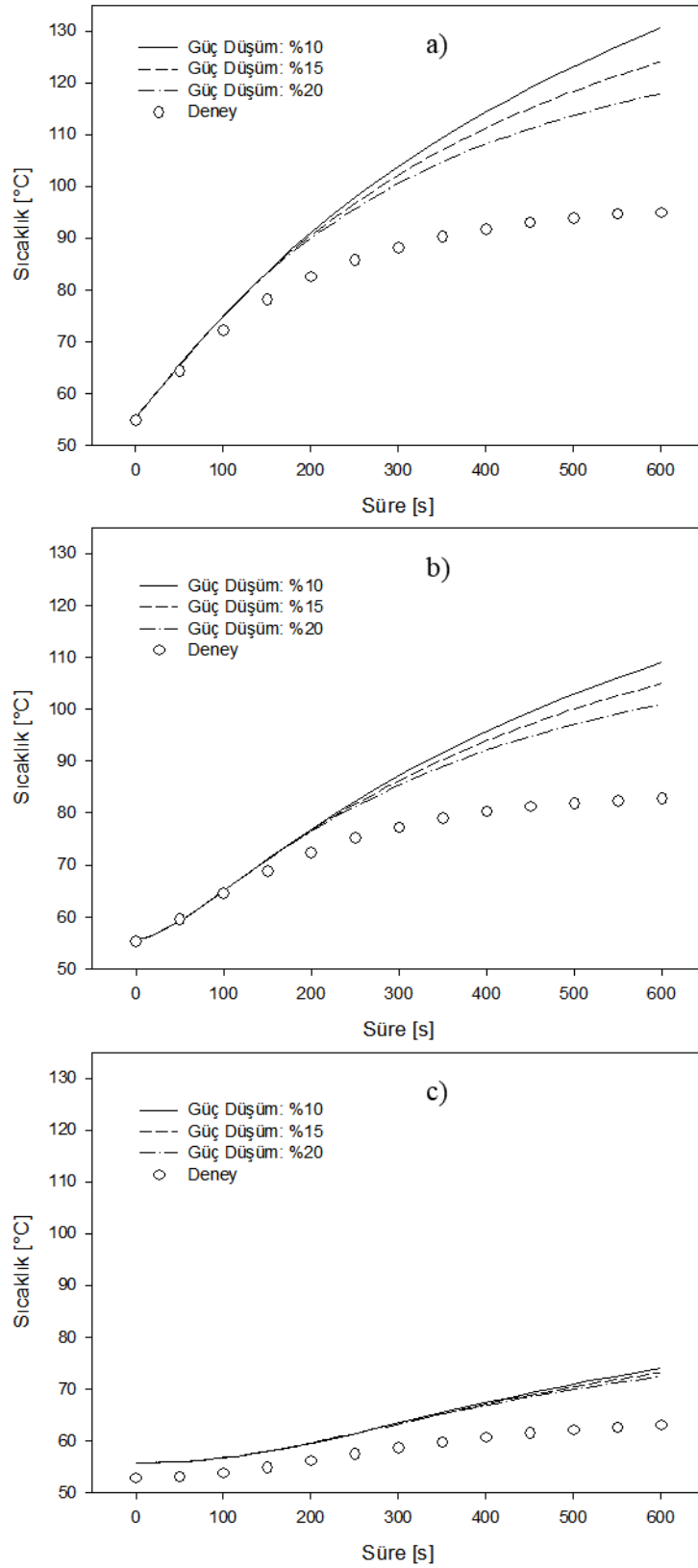
Şekil 4.13. Komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin nihai değerleri ile gerçekleştirilen SEY analiz sonuçları ve deney sonuçları

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere analiz ve deney sonuçları arasındaki farklar $1-2^{\circ}\text{C}$ mertebesinde. Bu farkların kabul edilebilir düzeyde olmasıyla beraber en önemli sebeplerinden birisi analiz modelinde taşınım katsayılarının gerçek değerleri yerine iterasyon sürecinin daha kısa ve kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmesi üzere sabit ve ortalama bir değer olarak tanımlanmasıdır.

Bu aşamada elektronik komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direnci değerleri belirlenmiştir. Bundan sonraki süreçte analizlerde termal temas dirençlerinin belirlenen değerleri kullanılmış ve böylece bilinmeyen sayısı komponentlerdeki güç düşüm değeri ve yüzeylerdeki taşınım katsayıları olmak üzere ikiye düşürülmüştür.

Komponent güç kaybı değerinin ve taşınım katsayılarının belirlenmesi

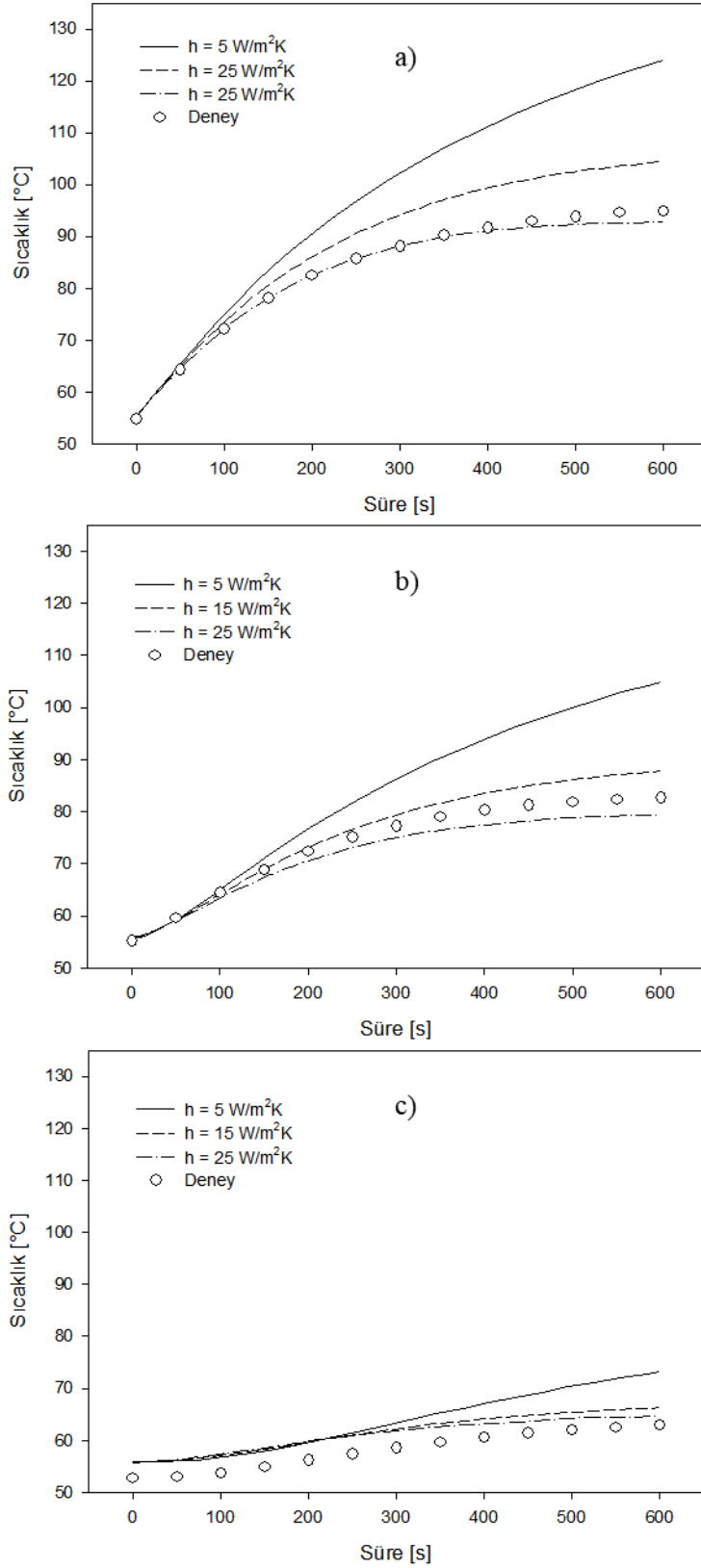
Çalışma kapsamında komponentler güç kaynağından sabit voltaj değeri ile beslenmiştir. Kullanılan komponentler direnç tipi komponent olduğundan, komponent sıcaklığı yaklaşık olarak 75°C 'ye ulaştıktan sonra güç kaynağından sağlanan güç değeri sabit kalmasına rağmen komponent üzerinde üretilen güç belirli bir oranda doğrusal olarak azalmaktadır. Komponent ortalama sıcaklığı 75°C 'ye ulaştıktan sonra meydana gelen güç düşüm değeri yaklaşık olarak $\%10-20/10^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Komponentlerdeki güç düşüm değerinin analiz sonuçlarına etkisinin incelenmesi üzere taşınım katsayılarının tüm yüzeylerde $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinde sabit tutulduğu durumda komponentlerdeki güç düşüm değerinin $\%10/10^{\circ}\text{C}$, $\%15/10^{\circ}\text{C}$ ve $\%20/10^{\circ}\text{C}$ değerleri için analizler gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları Şekil 4.14'te paylaşılmıştır.



Şekil 4.14. Tüm yüzeylerde $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken, komponentlerdeki güç düşüm oranının %10/10°C, %15/10°C ve %20/10°C olduğu durumlardaki SEY analiz sonuçları, a) K-1 noktası, b) K-2 noktası, c) K-3 noktası

Şekil 4.14'te görüldüğü üzere %10-20/10°C değerleri ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları arasında özellikle komponent üzerindeki nokta olan K-1 noktası için 10-15°C'ye kadar farklar görülmektedir. Bu sebeple güç düşüm oranının doğru olarak belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Şekil 4.14'te gösterilen sonuçlar taşınım katsayısının tüm yüzeylerde sabit 5 W/m²K olduğu durumda gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarıdır. Analiz sonuçları ile deney sonuçlarının arasında görülen 20°C'ye yakın mertebede farklar görülmesinin en temel sebebi budur.

Doğal taşınım katsayısı elektronik kart ve komponent yüzeylerinde standart koşullarda hava için genel olarak 2-25 W/m²K değerleri arasındadır. [24]. Fakat taşınım katsayısı bölgesel olarak daha yüksek değerler de alabilir. Yüzeylerdeki taşınım katsayılarının analiz sonuçlarına etkisinin incelenmesi üzere komponentlerdeki güç düşüm oranının %15/10°C değerinde sabit tutulduğu durumda taşınım katsayılarının tüm yüzeylerde 5 W/m²K, 15 W/m²K ve 25 W/m²K olduğu durumlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Taşınım sınır şartında tanımlanan ortam sıcaklık değerleri deneyden elde edilmiştir. İlgili analizlerin sonuçları Şekil 4.15'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.15. Komponentlerdeki güç düşüm oranı %15/10°C iken tüm yüzeylerdeki taşınım katsayılarının 5, 15 ve 25 W/m²K olduğu durumlardaki SEY analiz sonuçları, a) K-1 noktası, b) K-2 noktası, c) K-3 noktası

Şekil 4.15’da görüldüğü üzere taşınım katsayılarının tüm yüzeyler için 5 W/m²K, 15 W/m²K ve 25 W/m²K olduğu durumlar için gerçekleştirilen analizlerin sonuçları arasında 20-25°C civarında farklar görülmektedir.

Komponentlerde meydana gelen güç düşüm oranının ve taşınım katsayılarının fiziksel olarak alabileceği değer aralığındaki farklı değerleri ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarında 20-25°C civarındaki farklar görülebilmektedir. Elektronik kartların ve komponentlerin sorunsuz olarak çalışabileceği sıcaklık sınırının yaklaşık olarak 85°C olduğu göz önünde bulundurulduğunda, analiz sonuçlarında bu kadar yüksek hata görülmesi kabul edilebilir değildir. Bu sebeple komponentlerdeki güç düşüm değerinin ve kart ve komponentlerin yüzeylerindeki taşınım katsayılarının doğru olarak belirlenmesi güvenilir analiz sonuçları elde edilmesi için büyük önem arz etmektedir.

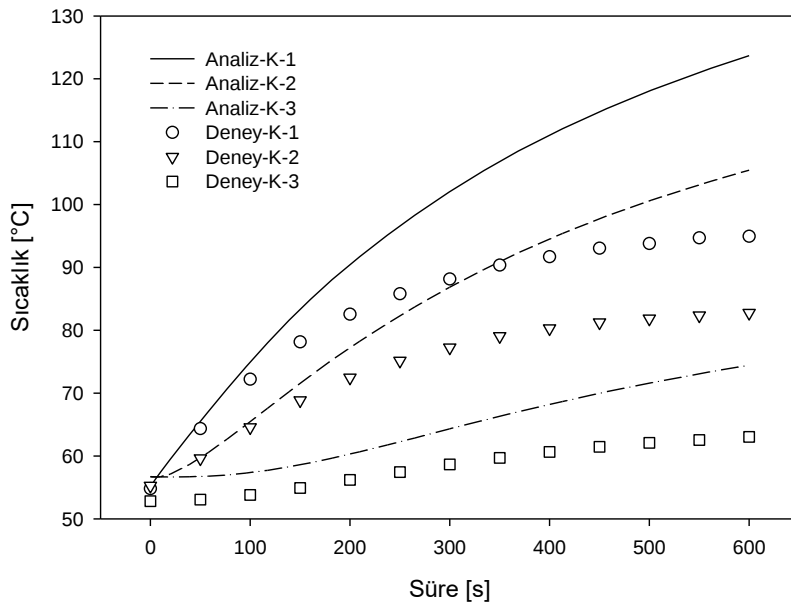
Kapalı hacim içerisindeki elektronik kart ve komponentlerin yüzeylerindeki taşınım katsayılarının belirlenmesi için literatürde, deneye bağlı farklı yöntemler mevcuttur. Bunlardan bir tanesi Eş. 4.5’te gösterilmiştir [25]. Bu çalışmada elektronik kart kompleksi yüzeylerine tanımlanan taşınım katsayısının belirlenmesi için Eş. 4.5 kullanılmıştır.

$$h = 0,52 C \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25} \quad (4.5)$$

Eş. 4.5’te, h, taşınım katsayısı [W/m²K], ΔT, yüzey ile ortam arasındaki sıcaklık farkı [°C], L, ilgili yüzeyin karakteristik uzunluğunu [m] temsil etmektedir. ‘C’ katsayısı ise yüzey geometrisi, yüzey oryantasyonu, yüzeyin yakınında bulunan engeller gibi değişkenlere bağlı olan bir katsayıdır. Bu katsayı analitik olarak hesaplanabilen bir katsayı değildir ve değeri deneysel olarak belirlenmelidir. Bu sebeple çalışma kapsamında, Eş. 4.5’te yer alan ‘C’ katsayısı Bölüm 4’te anlatılan deney sonuçları kullanılarak iteratif olarak belirlenmiştir.

Öncelikle komponentlerdeki güç düşüm değeri ve yüzeyler için ‘C’ katsayıları bilinmediğinden SEY analiz modelinde bu değişkenler için bir ilk değer tanımlanması gerekmektedir. Bu ilk değerlerin fiziksel olarak makul bir aralıkta olması gerekmektedir. Aksi takdirde sayısal olarak doğru fakat fiziksel olarak yanlış olan geçici bir çözüm elde edilebilir. Bu çalışmada komponentlerdeki güç düşüm değeri için ilk değer olarak %15/10°C, taşınım katsayısı için tüm yüzeylere 5 W/m²K değerinde taşınım katsayıları tanımlanmıştır. Analiz modelinde taşınım sınır şartı tanımlanması için ortam sıcaklığının

bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneyde ortamdaki havanın sıcaklığı Bölüm 4'te anlatıldığı gibi zamana bağlı olarak ölçülmüş ve analiz modelinde taşınım sınır şartının tanımlanmasında bu ölçülen değerler kullanılmıştır. Fiziksel olarak makul aralıkta olduğu sürece ilk analizde tüm yüzeylere aynı değerin tanımlanması ve tanımlanan ilk değer ile gerçek değerler arasındaki farkın büyük olması herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. İterasyonlar sonucunda her bir yüzey için olması gereken değer elde edilecektir. Bilinmeyen değişkenler için ilk değerler tanımlanarak gerçekleştirilen analiz ve deney sonuçları Şekil 4.16'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Taşınım katsayısı ve komponent güç düşüm değerleri için ilk değerler (5 W/m²K, %15/10°C) tanımlanarak gerçekleştirilen SEY analizi ve deney sonuçları

Bir sonraki aşamada, değerleri belirlenmesi istenen değişkenler ISIGHT yazılımı kullanılarak tanımlanan değer aralığında iteratif olarak değiştirilip, her bir değiştirilen değer için analiz gerçekleştirilmiştir.

Bahsedilen iterasyon süreci analiz ve deney sonuçları örtüşene kadar sürdürülmüştür. Bunun için toplamda 500 adet analiz koşturulmuştur. Değişkenlerin analiz ve deney sonuçları arasındaki fark kabul edilebilir aralıkta olduğu durumdaki değerleri gerçek değerler olarak kabul edilmiştir. Değişkenler için tanımlanan ilk değerler, belirlenen değer aralığı ve iterasyonlar sonucu elde edilen nihai değerler Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

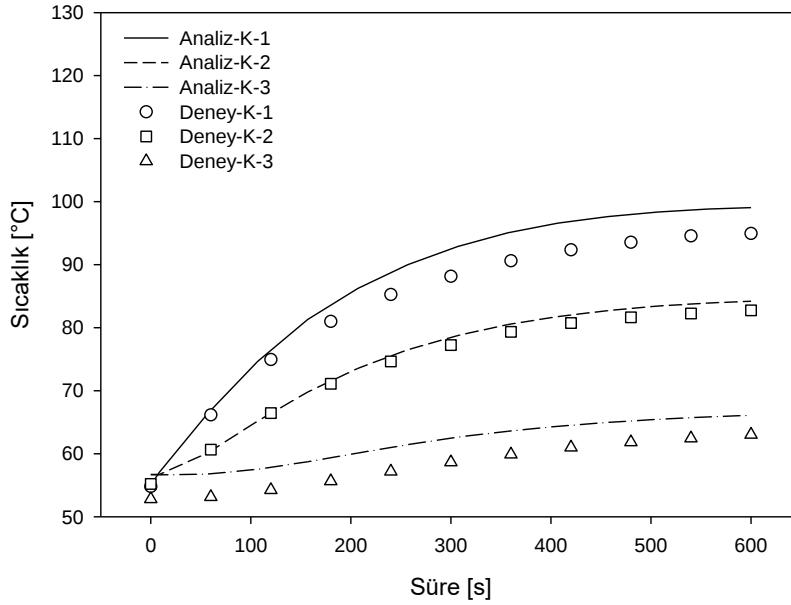
Çizelge 4.5. Taşınım katsayıları ve komponentlerdeki güç düşüm değeri için ilk değer, iterasyon için gerekli değer aralığı ve nihai değerler

	Doğal taşınım katsayısı hesabında kullanılan 'C' değeri	Komponentlerde meydana gelen güç düşüm değeri
İlk Değer	1,0	%15/10°C
Değer Aralığı	1-10	%10/10°C-%20/10°C
Nihai Değer	Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.	%15/10°C

Çizelge 4.6. Elektronik kart ve komponentlerin yüzeylerindeki 'C' katsayısının doğrulanmış değerleri

Yüzey	C
Komponentlerin Üst Yüzeyi	6,8
Komponentlerin Birbirine Bakan Uzun Yüzeyleri	3,9
Komponentlerin Dışa Bakan Uzun Yüzeyleri	3,4
Komponentlerin Kısa Yüzeyleri	4,9
Kartın Üst Yüzeyinin Komponentlere Yakın Bölgesi	8,8
Kartın Üst Yüzeyinin Komponentlere Uzak Bölgesi	2,4
Kartın Alt Yüzeyinin Komponentlere Yakın Bölgesi	6,8
Kartın Alt Yüzeyinin Komponentlere Uzak Bölgesi	5,9

Bu değerlerin elde edilmesi analiz modelinin fiziksel olarak da doğrulandığı anlamına gelmektedir. Doğrulanmış analiz modeli kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları ve deney sonuçları Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi doğrulanmış analiz modeli ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile deney sonuçları arasında en fazla 1-2°C fark görülmektedir.



Şekil 4.17. Doğrulanmış SEY analiz modeli kullanılarak gerçekleştirilen analiz ve deney sonuçları

Bu aşamada analiz modelinin matematiksel ve fiziksel olarak doğrulanması tamamlanmıştır. Sistemin geometrisi, kullanılan malzemeler vs. köklü değişiklikler yapılmadığı sürece, doğrulanmış analiz modeli kullanılarak, farklı konfigürasyon ve sınır şartlarında elektronik kart kompleksinin termal davranışı düşük maliyetle, hızlı bir şekilde incelenebilir. Aksi takdirde, sistemde önemli değişiklikler yapılması durumunda analiz modeli doğruluğunu yitirecektir ve analiz modelinin tekrar doğrulama çalışmasının yapılması gerekecektir.

Bu çalışma kapsamında, doğrulanmış analiz modeli kullanılarak kart ayaklarının temas ettiği yüzey sıcaklığı, komponentler arasındaki mesafe, sistem başlangıç sıcaklığı, komponentlerde üretilen ısı miktarının farklı değerleri ve farklı ayak malzemeleri için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışmalar bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

Taşınım katsayısı değerlerinin farklı yöntemlerle hesaplanması

Elektronik kartın alt ve üst yüzeylerindeki taşınım katsayıları üç farklı yöntem kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler; 1) mevcut çalışma kapsamında kullanılan, iletim tabanlı SEY analizlerinde kullanılan denklem (Eş. 4.5), 2) HAD analizlerinde elde edilen değerler, 3) literatürde yatay yüzeylerdeki taşınım katsayısının hesaplanması için kullanılan bir ampirik denklem. Taşınım katsayıları, $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$, $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartlarında gerçekleştirilen analizlerin ve deneyin 600. saniyesi için hesaplanmıştır.

Kart alt ve üst yüzeylerindeki taşınım katsayılarının, mevcut çalışma kapsamında iletim tabanlı SEY analizlerinin doğrulanmasında kullanılan denklem ile hesaplanması

Elektronik kart ve komponentlerin yüzeylerindeki taşınım katsayılarının hesaplanması için kullanılan Eş. 4.5'teki 'C' katsayısı, iletim tabanlı SEY analiz modelinin doğrulanması kapsamında belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak elektronik kartın alt ve üst yüzeyleri için 600. saniyedeki taşınım katsayıları Eş. 4.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Eş. 4.5'te kullanılan girdiler ve hesaplanan taşınım katsayıları Çizelge 4.7'de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Mevcut çalışma kapsamında taşınım katsayısının hesaplanması için kullanılan denklem girdileri ve çıktıları (kartın alt ve üst yüzeyleri için)

	C	$T_{yüzey} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{ortam} [^{\circ}\text{C}]$	L [m]	$h [\text{W/m}^2\text{K}]$
Kart alt yüzeyi-1	6,8	73	75	0,072	7,3
Kart alt yüzeyi-2	5,9	73	75		
Kart üst yüzeyi-1	8,8	72	57		7,9
Kart üst yüzeyi-2	2,4	72	57		

Çizelge 4.7’de, denklem girdi ve çıktı değerleri gösterilen, kart alt yüzeyi ve kart üst yüzeyi iki farklı değerde ele alınmıştır. Bu değerler kartın komponentlere yakın ve uzak olan bölgelerini temsil etmektedir. Nihai hesapta alansal oranları göz önünde bulundurularak bu iki değerlerin ortalaması alınmıştır.

HAD analizlerinden elde edilen taşınım katsayısı değerleri

Kartın alt ve üst yüzeyi için HAD analiz sonuçları kullanılarak elde edilen taşınım katsayısı değerleri Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. HAD analizlerinden elde edilen taşınım katsayısı değerleri (kartın alt ve üst yüzeyleri için)

	h [W/m ² K]
Kart alt yüzeyi	8,2
Kart üst yüzeyi	9,7

Taşınım katsayılarının literatürde bulunan bir denklem ile hesaplanması [38]

Literatürde yatay yüzeylerdeki doğal taşınım katsayısının hesaplanması için kullanılan denklem Eş. 4.6’da gösterilmiştir. Bu denklemin kullanılabileceği Ra sayısı aralığı 10⁴-10⁷’dir [38]. Eş. 4.6 kullanılarak hesaplanan taşınım katsayıları Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

$$Nu = 0,54Ra^{0,25} \quad (4.6)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_{yüzey} - T_{ortam})L^3}{\alpha\nu} \quad (4.7)$$

$$h = \frac{Nu \times k}{L} \quad (4.7)$$

Çizelge 4.9. Literatürde yatay yüzeylerdeki doğal taşınım katsayısı hesabı için kullanılan denklem ile hesaplanan taşınım katsayısı değerleri (kartın alt ve üst yüzeyleri için)

	T _{yüzey} [°C]	T _{ortam} [°C]	Ra	h [W/m ² K]
Kart alt yüzeyi	73	75	~10 ³	4,3
Kart üst yüzeyi	71	45	~10 ⁴	8,1

Kartın alt ve üst yüzeyleri için üç farklı yöntem kullanılarak hesaplanan taşınım katsayısı değerleri Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Çizelge 4.10 incelendiğinde kart üst yüzeyindeki taşınım katsayısı için yöntemler arasında görülen fark %25'nin altındadır. Bu mertebedeki farklar, doğal taşınım katsayısı için kabul edilebilirdir. Zira tek ısı transfer modunun doğal taşınım olmadığı makro düzeydeki problemlerde, doğal taşınım katsayılarında görülen hata oranları, sıcaklık sonuçlarında genellikle çok daha düşük hata oranlarına tekabül etmektedir. Fakat kart alt yüzeyi için, analiz modelinin doğrulanmasında kullanılan yöntem ile elde edilen taşınım katsayısı değeri ile HAD analizinde elde edilen değerler arasındaki fark %15'in altında iken, bu fark analiz modelinin doğrulanmasında kullanılan yöntem ile literatürde bulunan yöntem arasında %40'lara kadar çıkmaktadır. Bunun en temel sebebi, kart alt yüzeyi için hesaplanan Ra sayısının denklemin geçerli olduğu Ra sayısı aralığının dışında kalması olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, literatürdeki denklemlerden elde edilen taşınım katsayıları ile lokal etkilerin bulunduğu hususi problemlerde gerçekte olan taşınım katsayıları arasında, özellikle zamana bağlı doğal taşınım durumu için, belirli oranlarda hatalar görülmesi beklenen bir durumdur.

Çizelge 4.10. Üç farklı yöntem kullanılarak elde edilen taşınım katsayısı değerleri (kartın alt ve üst yüzeyleri için)

	Mevcut çalışma kapsamında kullanılan yöntem ile hesaplanan h [W/m ² K]	HAD analizi ile elde edilen h [W/m ² K]	Literatürde bulunan denklem kullanılarak hesaplanan h [W/m ² K]
Kart alt yüzeyi	7,3	8,2	4,3
Kart üst yüzeyi	7,9	9,7	8,1

Ek olarak, komponent yüzeyindeki taşınım katsayısı deneysel veriler kullanılarak hesaplanıp, analiz modelinin doğrulanması kapsamında kullanılan denklem ile elde edilen taşınım katsayısı değeri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar komponentlerden bir tanesi için deneyin son anı (600. saniye) için yapılmıştır.

Komponent üst yüzeyindeki taşınım katsayısının, mevcut çalışma kapsamında iletim tabanlı SEY analizlerinin doğrulanmasında kullanılan denklem ile hesaplanması

Elektronik kart ve komponentlerin yüzeylerindeki taşınım katsayılarının hesaplanması için kullanılan denklemdeki (Eş. 4.5) ‘C’ katsayısı, iletim tabanlı SEY analiz modelinin doğrulanması kapsamında belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak komponent üst yüzeyi için 600. saniyedeki taşınım katsayıları Eş. 4.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Eş. 4.5’te kullanılan girdiler ve hesaplanan taşınım katsayıları Çizelge 4.11’te sunulmuştur.

Çizelge 4.11. Mevcut çalışma kapsamında taşınım katsayısının hesaplanması için kullanılan denklem girdileri ve çıktıları (komponent üst yüzeyi için)

	C	T _{yüzey} [°C]	T _{ortam} [°C]	h [W/m ² K]
Komponent üst yüzeyi	6,8	73	75	25,3

Komponent yüzeylerindeki taşınım katsayısının deneysel yöntem ile hesaplanması

Taşınım katsayısının doğrudan deneysel yöntemle hesaplanması çok basit geometri ve sınır şartları (örn. iki boyutlu varsayımı yapılabilecek ve birden çok yönde gerçekleşen ısı transferi ihmal edilebilecek basit yapılar) haricinde oldukça zor ve yüksek maliyetli olduğundan, hesaplamalar önemli basitleştirmeler ve varsayımlar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu basitleştirmeler ve varsayımlar; ısıtıcı plakanın komponent üzerindeki ısı transferine etkisinin ihmal edilmesi, komponent sıcaklığının homojen kabul edilmesi, komponentte anlık olarak depolanan enerji miktarının ortalama olarak hesaplanması olarak sayılabilir.

Komponent yüzeylerindeki taşınım katsayısı, komponentte üretilen ısı miktarı ve deney sırasında komponent üzerinden ve ortamdan alınan sıcaklık ölçüm değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama arıntıları aşağıda gösterilmiştir.

$$Q_{komp} = IxE = 6,1 \times 0,26 = 0,8 \text{ W} \quad (4.8)$$

$$Q_{komp} = Q_{iletim} + Q_{taşınım} + Q_{ışınım} + Q_{depo} \quad (4.9)$$

$$R_{kart} = \frac{L}{k} = \frac{0,00145}{0,3} = 0,00483 \frac{m^2 K}{W} \quad (4.10)$$

$$q_{iletim} = \frac{T_{komp} - T_{kart_{alt}}}{R + R_{kart}} = \frac{93 - 81}{0,0143 + 0,00145} = 627,2 \frac{W}{m^2} \quad (4.11)$$

$$A_{iletim} = a \times b = 0,0222 \times 0,0095 = 0,00021 m^2 \quad (4.12)$$

$$Q_{iletim} = q_{iletim} \times A = 0,13 W \quad (4.13)$$

$$Q_{taşınım} + Q_{ışınım} + Q_{depo} = Q_{komp} - Q_{iletim} = 0,67 W \quad (4.14)$$

$$Q_{depo} = \frac{m \times c_p \times \Delta T}{\Delta t} \quad (4.15)$$

600 saniyelik ısınma profili 100'er saniyelik dilimlerle 6 eşit parçada incelendiğinde son 100 saniyelik kısımdaki sıcaklık değişiminin hemen hemen doğrusal olduğu görülmektedir. Bu sebeple 600. saniyede depolanan ısı doğrusal varsayım ile hesaplanmıştır. Son 100 saniyelik kısımda ısınmanın, ortalama ısınmanın üçte birine tekabül ettiği görülmektedir. Bu durumdan dolayı depolanan ısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır,

$$Q_{depo} = \frac{1}{3} \frac{m \times c_p \times \Delta T}{\Delta t} = 0,16 W \quad (4.16)$$

$$Q_{taşınım} + Q_{ışınım} = Q_{komp} - Q_{iletim} - Q_{depo} = 0,5 W \quad (4.17)$$

Taşınım ve ışınım hesabı için, komponent üzerinde taşınım ve ışınım gerçekleşen tüm yüzeyler dahil edilmiştir. Işınım ve taşınım ayrı ayrı hesaplanmayıp ikisi için eşdeğer sonuç hesaplanmıştır.

$$A_{taşınım+ışınım} = a \times b + 2 \times b \times c + 2 \times a \times c = 0,000795 m^2 \quad (4.18)$$

$$q_{taşınım} + q_{ışınım} = \frac{Q_{taşınım} + Q_{ışınım}}{A_{taşınım+ışınım}} = 634 \frac{W}{m^2} \quad (4.19)$$

$$h = \frac{q_{taşınım} + q_{ışınım}}{T_{komp} - T_{ortam}} = 13,2 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.20)$$

Işınım ile gerçekleşen ısı transferinin de hariç tutulup yalnızca taşınım ile gerçekleşen ısı transferine göre yapılan hesaplama aşağıda gösterilmiştir. Komponent yüzeyi pürüzlü ve mat koyu beyaz olup yayıcılık değeri 0,8'dir.

$$Q_{ışınım} = 5,67 \times 10^{-6} \times 0,8 \times (T_{komp}[K]^4 - T_{çevre}[K]^4) \times (A_{ışınım}) = 0,15 W \quad (4.21)$$

$$Q_{ışınım} = 0,5 - 0,15 = 0,35 \text{ W} \quad (4.22)$$

$$q_{taşınım} = \frac{Q_{taşınım}}{A_{taşınım}} = 443,4 \frac{W}{m^2} \quad (4.23)$$

$$h = \frac{q_{taşınım}}{T_{komp} - T_{ortam}} = 9,2 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.24)$$

Ayrıca, komponentin yan yüzeylerinden taşınım ile gerçekleşen ısı transferi de hariç tutulup yalnızca komponentin üst yüzeyinden taşınım ile gerçekleşen ısı transferine göre yapılan hesaplama aşağıda gösterilmiştir. Yan yüzeylerden doğal taşınım ile gerçekleşen ısı transferi, literatürde düşey yüzeylerdeki Nu sayısının hesaplanması için kullanılan genel bir ampirik denklem kullanılarak hesaplanmıştır. [38]

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (4.25)$$

$$h = \frac{Nu \times k}{L} = 10 \frac{W}{m^2} \text{ (yan yüzeyler için)} \quad (4.26)$$

$$Q_{taşınım_{yan}} = h \times (T_{komp} - T_{ortam_{yan}}) \times A_{taşınım_{yan}} = 0,19 \text{ W} \quad (4.27)$$

$$Q_{taşınım_{üst}} = Q_{taşınım} - Q_{taşınım_{yan}} = 0,16 \text{ W} \quad (4.28)$$

$$q_{taşınım_{üst}} = \frac{Q_{taşınım_{üst}}}{A_{taşınım_{üst}}} = 754,6 \frac{W}{m^2} \quad (4.29)$$

$$h = \frac{q_{taşınım_{üst}}}{T_{komp} - T_{ortam}} = 15,7 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.30)$$

Son olarak, mevcut çalışma kapsamında kullanılan yöntem ile hesaplanan taşınım katsayısı değeri, deneysel veriler ile hesaplanan ısı ile ısı transferi hariç tutularak hesaplanmıştır. Hesaplama ayrıntıları aşağıda gösterilmiştir.

$$q_{taşınım_{üst}} = q_{(taşınım+ışınım)_{üst}} - q_{ışınım_{üst}} \quad (4.31)$$

$$= 25,4 * (T_{komp} - T_{ortam})$$

$$- 5,67 \times 10^{-8} \times 0,8 \times (T_{komp}^4 [K] - T_{çevre}^4 [K]) = 870,8 \frac{W}{m^2}$$

$$h = \frac{q_{taşınım_{üst}}}{T_{komp} - T_{ortam}} = 18,1 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.32)$$

Doğrudan deney verileri ile ve analiz modelinin doğrulanması kapsamında kullanılan denklem ile hesaplanan, komponent üzerinde 600. saniyedeki taşınım katsayısı değerleri Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Doğrudan deney verileri ile ve mevcut çalışma kapsamında kullanılan denklem ile hesaplanan komponent üzerindeki taşınım katsayısı değerleri

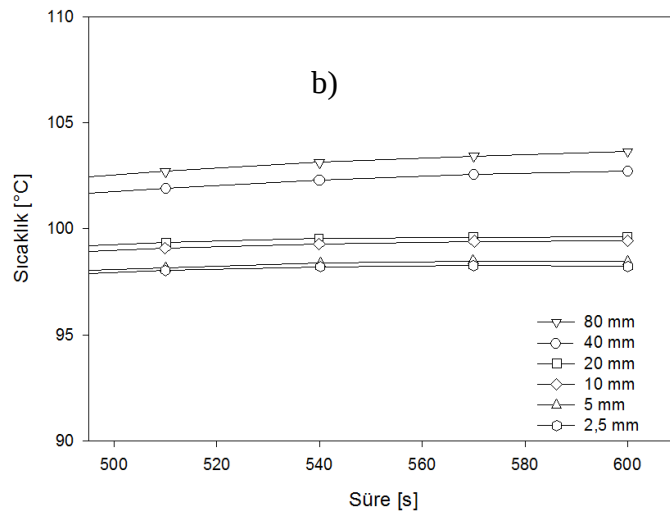
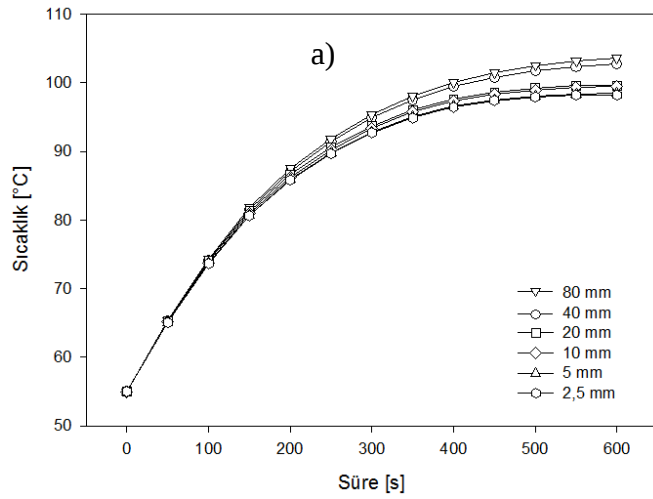
Deneyisel veriler ile hesaplanan h [W/m^2K]	Işınım ve yan yüzeylerdeki taşınım dahil	13,2
	Yan yüzeylerdeki taşınım dahil	9,2
	Yalnızca üst yüzeydeki taşınım	15,7
Mevcut çalışma kapsamında kullanılan yöntem ile hesaplanan h [W/m^2K]		25,4
Mevcut çalışma kapsamında kullanılan yöntem ile hesaplanan h [W/m^2K] (deneysel verilerle hesaplanan ısınım hariç)		18,1
HAD analizi ile elde edilen h [W/m^2K]		20,1

Mevcut çalışma kapsamında kullanılan yöntem ile ısınım yoluyla transfer edilen ısı hariç tutularak hesaplanan, yalnızca doğal taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin yansıtıldığı, taşınım katsayısı ile HAD analizinde elde edilen taşınım katsayısı arasındaki fark %10 mertebesinde olmaktadır. Zamana bağımlı olarak doğal taşınım ile ısı transferinin gerçekleştiği bir problem için bu hata mertebesi oldukça başarılı sayılabilir. Öte yandan, deney verileri ile hesaplanan taşınım katsayıları ile diğer iki yöntem ile hesaplanan taşınım katsayısı arasındaki fark %20-25 civarında olmaktadır. Bunun temel sebepleri ise, doğrudan deneysel veriler kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamada, komponente ısıtıcı plakadan gelen ısı akısının ihmal edilip komponentin müstakil bir ısı kaynağı olarak değerlendirilmesi gibi yapılan basitleştirmeler ve varsayımlar, deneyde sıcaklık ölçümü alınan noktaların sınırlı olması ve hesaplarda bu değerlerin kullanılması, ve literatürdeki ampirik yöntemlerin probleme spesifik olmamasından dolayı ortaya çıkan hatalar olarak sayılabilir.

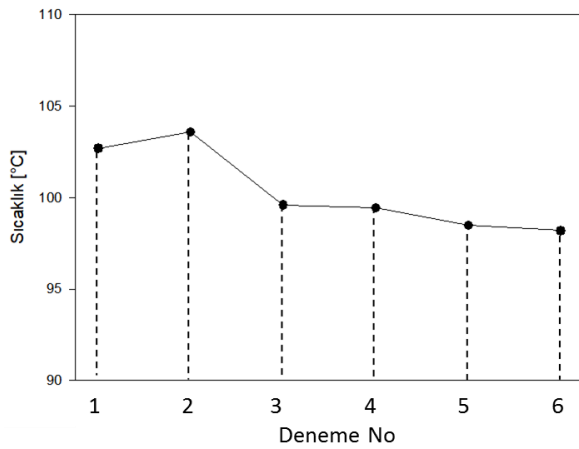
bölümde komponent üzerindeki bir noktanın sıcaklığının farklı eleman ebatları için değişimi incelenmiştir. Kart, komponentler ve ayakların eleman sayıları sabit tutulup, yalnızca kapalı hacim içerisindeki havanın eleman ebadı değiştirilmiştir. Ağ sayısından bağımsızlaştırma çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlerdeki eleman ebatları ve sayıları Çizelge 4.13’de gösterilmiştir. Komponent üzerinde belirlenen K-1 ölçüm noktasının eleman ebadına göre 600 saniye boyunca zamana bağlı sıcaklık profilinin değişimi ve bu noktanın 600. saniyedeki sıcaklık değerinin eleman ebadına göre değişimi sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. HAD analiz modelinin ağdan bağımsızlaştırma çalışması kapsamında kullanılan eleman sayıları bilgileri

Deneme No	Ortalama Eleman Ebadı [mm]	Hava Eleman Düğüm Sayısı
1	80	8 446
2	40	25 434
3	20	107 161
4	10	625 886
5	5	4 676 429
6	2,5	35 593 458



Şekil 4.19. HAD analizlerinde komponent üst yüzey sıcaklığının farklı eleman ebatlarına göre değişimi, a)0-600 saniye, b)500-600 saniye

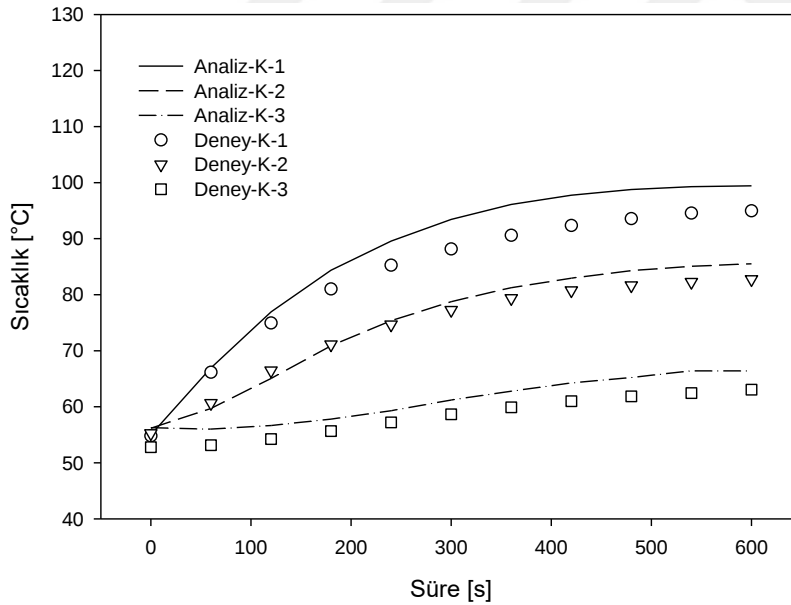


Şekil 4.20. HAD analizlerinde komponent üst yüzey sıcaklığının 600. saniyedeki değerinin farklı eleman ebatlarına göre değişimi

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de görüldüğü üzere yaklaşık eleman ebadı 5 mm ve daha küçük olan durumlarda sıcaklık sonuçlarındaki farkın ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. 10 mm ve daha büyük ebatta eleman kullanıldığında ise sonuçlar önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu sebeple analiz modelinde kullanılacak yaklaşık eleman ebadı 5 mm olarak belirlenmiştir.

4.2.2. HAD analiz modelinin deneysel çalışma ile doğrulanması

HAD analiz modelinde problem geometrisi gerekli ve yeterli seviyede ayrıntı ile kurulup, çözüm ağı da gerekli ve yeterli büyüklükteki eleman ebadı ile oluşturulduktan sonra, analiz modeli deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Kart kompleksinin kapalı hacim içerisindeki ısı transferi problemi, oluşturulan HAD analiz modeli ile çözülmüş ve kart ve komponent üzerinde hesaplanan sıcaklık değerleri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz ve deney sonuçları Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Kart kompleksi üzerindeki ölçüm noktalarının zamana bağlı sıcaklık değişimi, HAD analizi ve deney sonuçları

Şekil 4.21’de görüldüğü üzere analiz ve deneyde elde edilen sıcaklık sonuçları 2-3°C fark ile örtüşmektedir. Böylece problemin HAD analiz modeli doğru bir şekilde kurulmuştur. Bu HAD analiz modeli kullanılarak, problemin farklı sınır şartları için analizleri yapılabilir.

5. PARAMETRİK NÜMERİK (SEY VE HAD) ANALİZLER

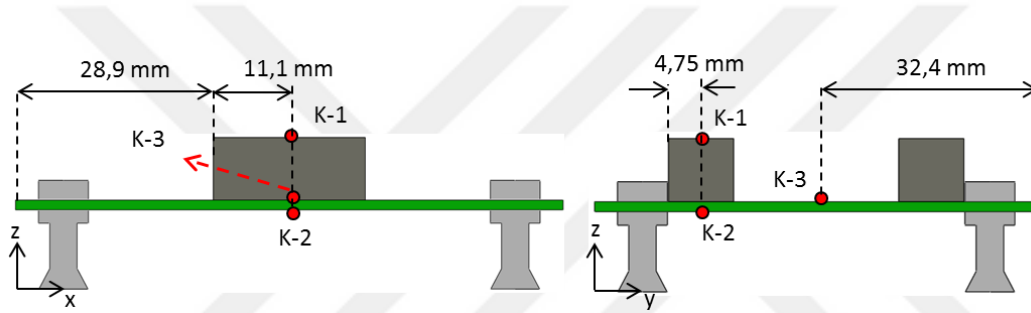
Doğrulanmış analiz modeli kullanılarak sistemin farklı geometri ve sınır şartlarındaki termal davranışı incelenmiştir. Sistemin termal davranışına etkisi incelenen değişkenler, sistemin başlangıç sıcaklığı, kart ayaklarının temas ettiği yüzeyin sıcaklığı ve komponentlerde üretilen ısı miktarıdır. Bu değişkenlerin gerçek uygulamada alabileceği değerler göz önünde bulundurulduğunda her bir değişkenin dört farklı değeri için, tüm değişkenlerin birbiri ile etkisinin incelenmesi üzere toplam 64 adet SEY analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç sıcaklığının 20; 30; 40 ve 50°C, ısıtıcı plaka sıcaklığının 20; 40; 60 ve 80°C, komponentlerde üretilen ısının ise 0,5; 1; 2 ve 4 mW/mm³ olduğu durumlar için analizler koşturulmuştur. Gerçekleştirilen 64 adet SEY analizinde kabin içerisindeki havanın sıcaklığının sistemin ilk sıcaklığına eşit ve analiz süresi boyunca sabit olduğu varsayılmıştır. Plaka sıcaklığı, belirlenen değerlerde analiz süresi boyunca sabit tutulmuştur.

Doğrulanmış iletim tabanlı SEY analiz modeli kullanılarak farklı sınır şartlarında analizlerin gerçekleştirilmesi, kart kompleksi üzerindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımının incelenmesi için yeterlidir. Fakat farklı sınır şartlarında, kabin içerisindeki havanın sıcaklık, basınç ve hız dağılımının incelenmesi ve iletim tabanlı SEY analiz sonuçlarının HAD analiz sonuçları ile uyumunun gösterilmesi amacıyla, iletim tabanlı SEY analizleri gerçekleştirilen 64 adet senaryoya ek olarak 5 farklı senaryo için HAD ve iletim tabanlı SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. 64 adet senaryo için gerçekleştirilen iletim tabanlı SEY analizlerinin sonuçları incelendiğinde sistemin farklı ısınma-soğuma durumlarının incelenmesi üzere 5 adet senaryonun yeterli olduğu değerlendirilmiştir. Bu 5 senaryodan iki tanesi için deneyler gerçekleştirilip iletim tabanlı SEY ve HAD analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla da uyumu gösterilmiştir.

Yukarıda belirtilen 5 adet senaryo için öncelikli olarak HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra seçilen 5 adet senaryo için, ayrıntıları Bölüm 5.1’de anlatılan doğrulanmış SEY analiz modeli kullanılarak, SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. SEY analiz modelinde tanımlanan; termal temas direnci, taşınım katsayıları ve komponentlerde yüksek sıcaklıkta meydana gelen güç düşüm oranı değerleri için ayrıntıları Bölüm 5.1’de anlatılan doğrulanmış değerler kullanılmıştır. SEY analiz modelinde tanımlanan taşınım sınır

şartındaki ortam sıcaklık değerleri için ise HAD analizlerinden elde edilen ortam sıcaklık değerleri kullanılmıştır.

Daha sonra, bahsedilen 5 adet senaryo için gerçekleştirilen SEY ve HAD analizlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Analizleri gerçekleştirilen senaryolar Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. 64 adet senaryo için yapılan SEY analizleri ve 5 adet senaryo için yapılan SEY ve HAD analizlerinin sonuçları kart kompleksi üzerindeki belirli noktalar için sıcaklık-zaman grafiği ve belirli kesitler için sıcaklık (HAD analizlerinde ek olarak hız ve basınç) kontur grafiği olarak sunulmuştur. Kart kompleksi üzerindeki sıcaklıkları incelenen noktaların konumları Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Elektronik kart kompleksi üzerinde zamana bağlı sıcaklık sonucu paylaşılan noktaların konumları

Çizelge 5.1. HAD ve iletim tabanlı SEY ısı transfer analizi gerçekleştirilen sınır şartları

	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [°C]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [°C]	Komponent Gücü [mW/mm ³]	Nümerik Yöntem
Senaryo-1	20	20	20	0,5	SEY
Senaryo-2	20	20	20	1	SEY
Senaryo-3	20	20	20	2	SEY
Senaryo-4	20	20	20	4	SEY
Senaryo-5	20	20	40	0,5	SEY
Senaryo-6	20	20	40	1	SEY
Senaryo-7	20	20	40	2	SEY
Senaryo-8	20	20	40	4	SEY
Senaryo-9	20	20	60	0,5	SEY
Senaryo-10	20	20	60	1	SEY
Senaryo-11	20	20	60	2	SEY
Senaryo-12	20	20	60	4	SEY

Çizelge 5.1. (devam) HAD ve iletim tabanlı SEY ısı transfer analizi gerçekleştirilen sınır şartları

	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [°C]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [°C]	Komponent Gücü [mW/mm ³]	Nümerik Yöntem
Senaryo-13	20	20	80	0,5	SEY
Senaryo-14	20	20	80	1	SEY
Senaryo-15	20	20	80	2	SEY
Senaryo-16	20	20	80	4	SEY
Senaryo-17	30	30	20	0,5	SEY
Senaryo-18	30	30	20	1	SEY
Senaryo-19	30	30	20	2	SEY
Senaryo-20	30	30	20	4	SEY
Senaryo-21	30	30	40	0,5	SEY
Senaryo-22	30	30	40	1	SEY
Senaryo-23	30	30	40	2	SEY
Senaryo-24	30	30	40	4	SEY
Senaryo-25	30	30	60	0,5	SEY
Senaryo-26	30	30	60	1	SEY
Senaryo-27	30	30	60	2	SEY
Senaryo-28	30	30	60	4	SEY
Senaryo-29	30	30	80	0,5	SEY
Senaryo-30	30	30	80	1	SEY
Senaryo-31	30	30	80	2	SEY
Senaryo-32	30	30	80	4	SEY
Senaryo-33	40	40	20	0,5	SEY
Senaryo-34	40	40	20	1	SEY
Senaryo-35	40	40	20	2	SEY
Senaryo-36	40	40	20	4	SEY
Senaryo-37	40	40	40	0,5	SEY
Senaryo-38	40	40	40	1	SEY
Senaryo-39	40	40	40	2	SEY
Senaryo-40	40	40	40	4	SEY
Senaryo-41	40	40	60	0,5	SEY
Senaryo-42	40	40	60	1	SEY
Senaryo-43	40	40	60	2	SEY
Senaryo-44	40	40	60	4	SEY

Çizelge 5.1. (devam) HAD ve iletim tabanlı SEY ısı transfer analizi gerçekleştirilen sınır şartları

	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [°C]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [°C]	Komponent Gücü [mW/mm ³]	Nümerik Yöntem
Senaryo-45	40	40	80	0,5	SEY
Senaryo-46	40	40	80	1	SEY
Senaryo-47	40	40	80	2	SEY
Senaryo-48	40	40	80	4	SEY
Senaryo-49	50	50	20	0,5	SEY
Senaryo-50	50	50	20	1	SEY
Senaryo-51	50	50	20	2	SEY
Senaryo-52	50	50	20	4	SEY
Senaryo-53	50	50	40	0,5	SEY
Senaryo-54	50	50	40	1	SEY
Senaryo-55	50	50	40	2	SEY
Senaryo-56	50	50	40	4	SEY
Senaryo-57	50	50	60	0,5	SEY
Senaryo-58	50	50	60	1	SEY
Senaryo-59	50	50	60	2	SEY
Senaryo-60	50	50	60	4	SEY
Senaryo-61	50	50	80	0,5	SEY
Senaryo-62	50	50	80	1	SEY
Senaryo-63	50	50	80	2	SEY
Senaryo-64	50	50	80	4	SEY
Senaryo-65	20	HAD hava sıcaklık sonuçları	80	4	SEY-HAD
Senaryo-66	50	HAD hava sıcaklık sonuçları	20	0,5	SEY-HAD
Senaryo-67	50	HAD hava sıcaklık sonuçları	20	4	SEY-HAD
Senaryo-68	50	HAD hava sıcaklık sonuçları	80	0,5	SEY-HAD
Senaryo-69	50	HAD hava sıcaklık sonuçları	80	4	SEY-HAD

5.1. SEY Analizleri ve Sonuçları

Bu bölümde Çizelge 5.1’de gösterilen senaryolar için gerçekleştirilen iletim tabanlı SEY analiz sonuçları sunulmuştur. Çizelge 5.1’de gösterilen değişkenlerin her birinin kart ve komponent üzerindeki sıcaklık değerlerine etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kart ve komponent üzerindeki belirli noktaların sıcaklık-zaman grafiği ve kart kompleksinin 600 saniye sonundaki sıcaklık dağılımı şeklinde sunulmuştur. Sıcaklık-zaman grafiği sonuçları analiz modelinin doğrulanması aşamasında kullanılan noktalar için gösterilmiştir. (Bkz. Şekil 5.1). Ayrıca her bir senaryo için K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri, ΔT , ilgili bölümlerde çizelge olarak sunulmuştur.

$$\Delta T = T_{600} - T_0 \quad (6.1)$$

5.1.1. $T_{ilk} = 20^\circ\text{C}$ durumunda, T_{plaka} ve q değerlerinin kart ve komponent sıcaklıkları üzerindeki etkisinin araştırılması

Bu bölümde Çizelge 5.1’de gösterilen Senaryo-1’den Senaryo-16’ya kadar olan senaryolar için gerçekleştirilen SEY analizlerinin sonuçları paylaşılmıştır. Bu senaryoların tümünde sistemin ilk sıcaklığı 20°C olup, $T_{plaka} = 20, 40, 60$ ve 80°C ve $q = 0,5, 1, 2, 4 \text{ mW/mm}^3$ değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde analiz sonuçları paylaşılan senaryolar Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Kabin içi hava sıcaklığının, analiz süresi boyunca sistemin ilk sıcaklığına eşit değerde (20°C) olduğu kabul edilmiştir. Bu sınır şartlarındaki analiz sonuçları Şekil 5.2 – Şekil 5.13 arasında gösterilmiştir.

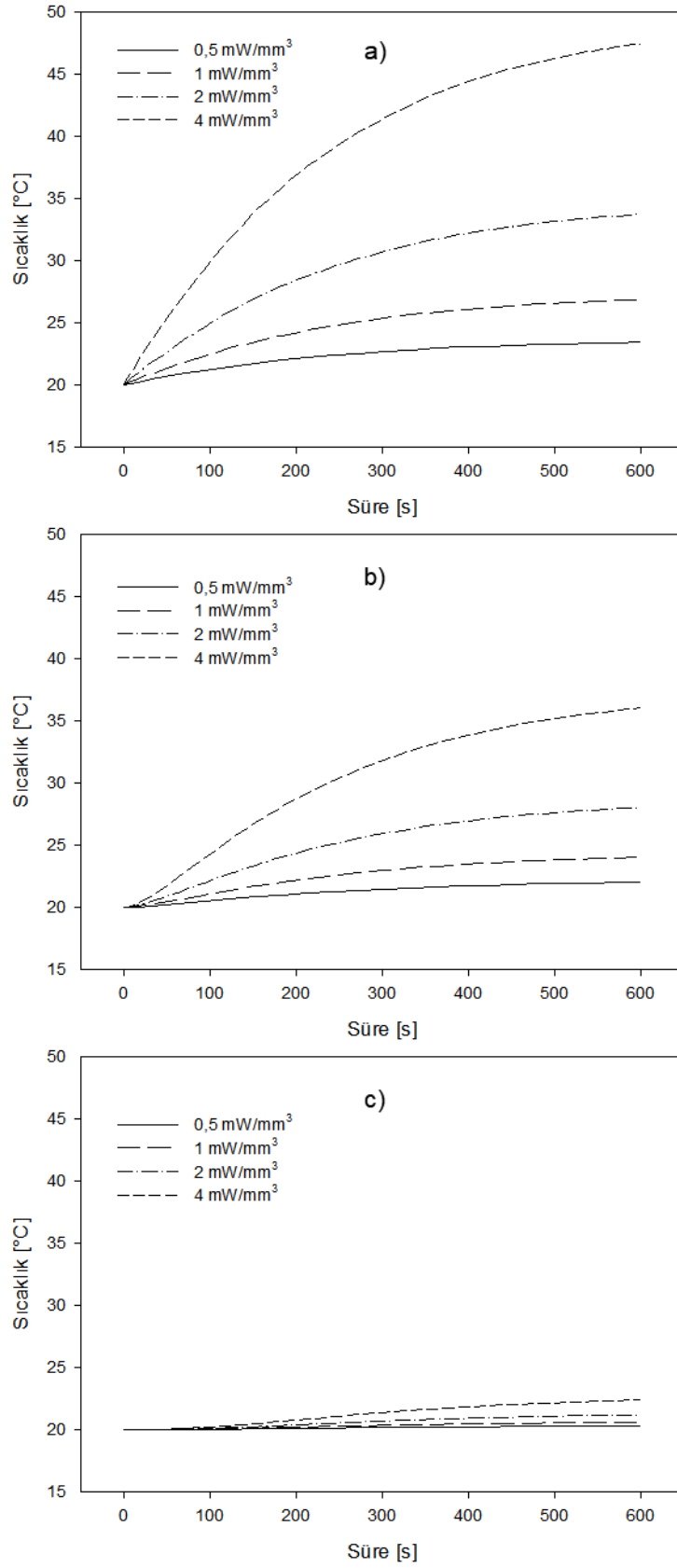
Çizelge 5.2. $T_{ilk} = 20^\circ\text{C}$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları

	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]	Ortam Sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]	Komponent Gücü [mW/mm^3]	Nümerik Yöntem
Senaryo-1	20	20	20	0,5	SEY
Senaryo-2	20	20	20	1	SEY
Senaryo-3	20	20	20	2	SEY
Senaryo-4	20	20	20	4	SEY
Senaryo-5	20	20	40	0,5	SEY
Senaryo-6	20	20	40	1	SEY

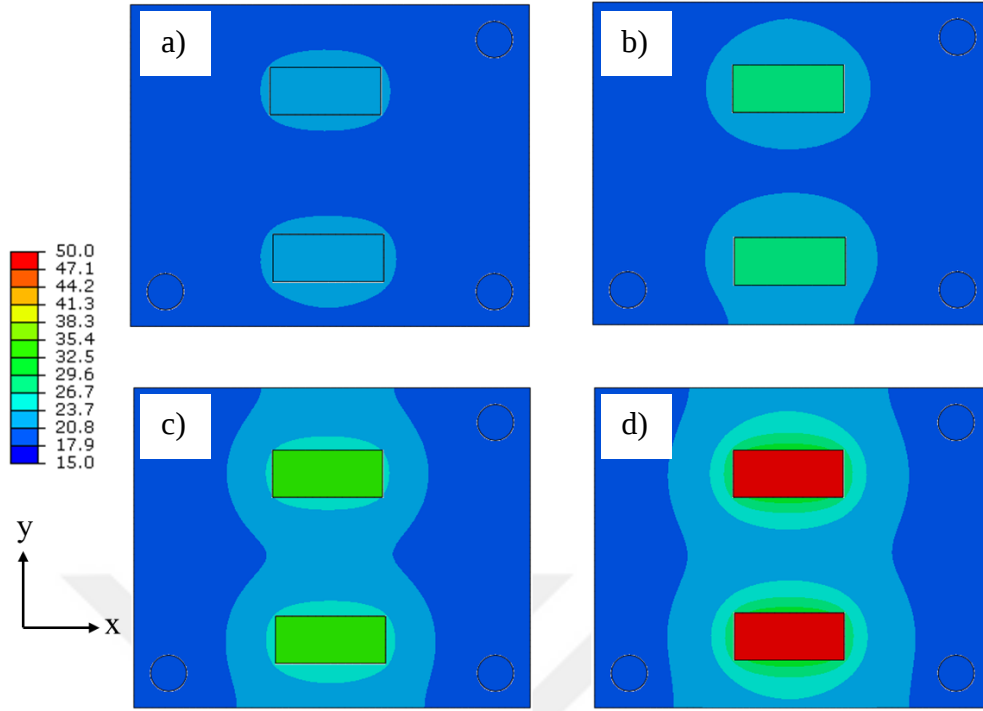
Çizelge 5.2. (devam) $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları

	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Ortam Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Komponent Gücü [mW/mm^3]	Nümerik Yöntem
Senaryo-7	20	20	40	2	SEY
Senaryo-8	20	20	40	4	SEY
Senaryo-9	20	20	60	0,5	SEY
Senaryo-10	20	20	60	1	SEY
Senaryo-11	20	20	60	2	SEY
Senaryo-12	20	20	60	4	SEY
Senaryo-13	20	20	80	0,5	SEY
Senaryo-14	20	20	80	1	SEY
Senaryo-15	20	20	80	2	SEY
Senaryo-16	20	20	80	4	SEY

Öncelikle, sistem başlangıç sıcaklığının ve plaka sıcaklığının 20°C olduğu durumda komponent gücünün 0,5; 1; 2 ve $4 \text{ mW}/\text{mm}^3$ değerleri için gerçekleştirilen analizlerde ölçüm noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.2’de ve kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin 600 saniye sonundaki sıcaklık kontur grafikleri Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.3. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere komponent gücünün değişiminden en çok komponentin üzerindeki ölçüm noktası olan K-1 noktası etkilenmektedir. Komponentteki ısı üretimi $0,5 \text{ mW/mm}^3$ iken bu noktanın sıcaklığı 600 saniye sonunda ancak $1\text{-}2^{\circ}\text{C}$ artış göstermektedir. 600 saniye sonunda K-1 noktasının sıcaklık artış değeri, komponentlerin gücünün 1 mW/mm^3 değeri için yaklaşık $6\text{-}7^{\circ}\text{C}$, 2 mW/mm^3 değeri için ise yaklaşık olarak $12\text{-}13^{\circ}\text{C}$ olmaktadır. Komponentlere verilen ısı gücü 4 mW/mm^3 olarak ayarlandığında ise K-1 noktasının sıcaklık değerindeki artış 600 saniye sonunda yaklaşık olarak 27°C olmaktadır. Öte yandan, K-2 noktasının sıcaklık değeri güç değişiminden K-1 noktası kadar etkilenmemektedir. $0,5 \text{ mW/mm}^3$ değerindeki ısı gücü için K-2 noktasının 600 saniye sonundaki sıcaklık artışı 2°C ’nin altında kalmaktadır. Komponentlerin gücünün 4 mW/mm^3 olduğu durumda ise bu sıcaklık artış değeri yaklaşık 16°C olmaktadır. Baskı devre kartı üzerinde komponentlerin ortasında bulunan K-3 noktasının sıcaklık artışının komponentlerin gücüne bağlılığı ise çok düşüktür. Komponentlere 4 mW/mm^3 ısı gücü verildiğinde bile K-3 noktasının 600 saniye sonundaki sıcaklık artışı $1\text{-}2^{\circ}\text{C}$ mertebesinde kalmaktadır.

Şekil 5.3’de gösterilen kontur grafiğinden de görüldüğü üzere komponent sıcaklık değeri beklenildiği gibi komponentlerde üretilen ısı miktarına oldukça bağlıdır. Fakat kart

üzerindeki sıcaklık dağılımının komponentlerde üretilen ısı miktarına bağlılık seviyesi nispeten çok düşüktür. Kart üzerinde komponentlere yakın olan kısımlarda önemli miktarda ısınma olduğu görülse bile kartın geri kalan kısmında bu etki meydana gelmemektedir. Bunun en önemli sebebi kartın termal difüzivite değerinin oldukça düşük olmasıdır. Ayrıca, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de sonuçları verilen senaryolarda ortam sıcaklığı ve kart ayaklarının bastığı ısıtıcı plaka sıcaklığı, ilk sıcaklık değeri ile aynı değerde tutulduğu için kart kompleksinin ısınacağı tek ısı kaynağı komponentlerdir. Bu sebeple ve kartın termal yayılma değerinin düşük olması sebebiyle kart üzerinde komponentlerden uzak bölgelerde görülen ısınma miktarı oldukça düşük mertebede kalmaktadır.

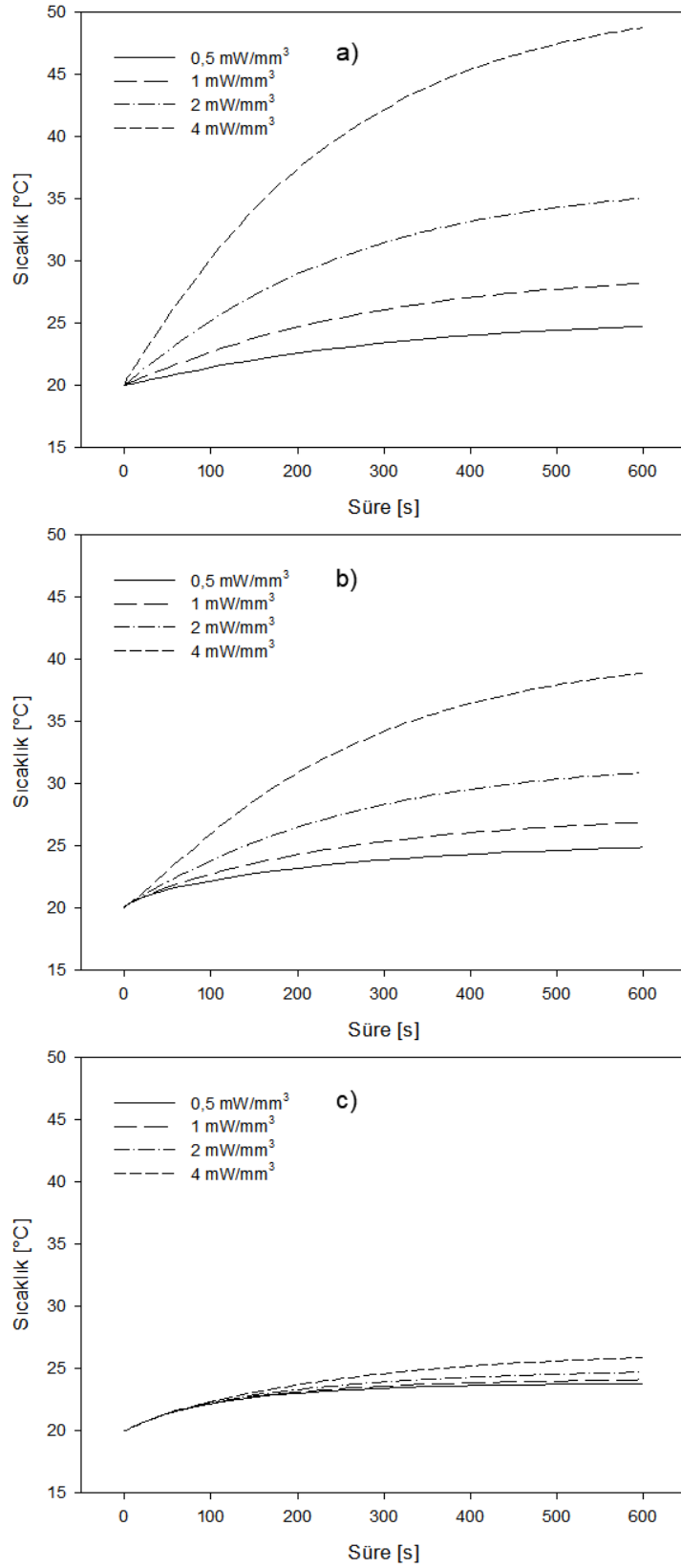
K-1, K-2 ve K-3 noktalarının başlangıç sıcaklıkları ile 600 saniye sonundaki sıcaklıkları arasındaki farklar, komponentlerde üretilen ısınma miktarının 0,5; 1; 2 ve 4 mW/mm³ değerleri için Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

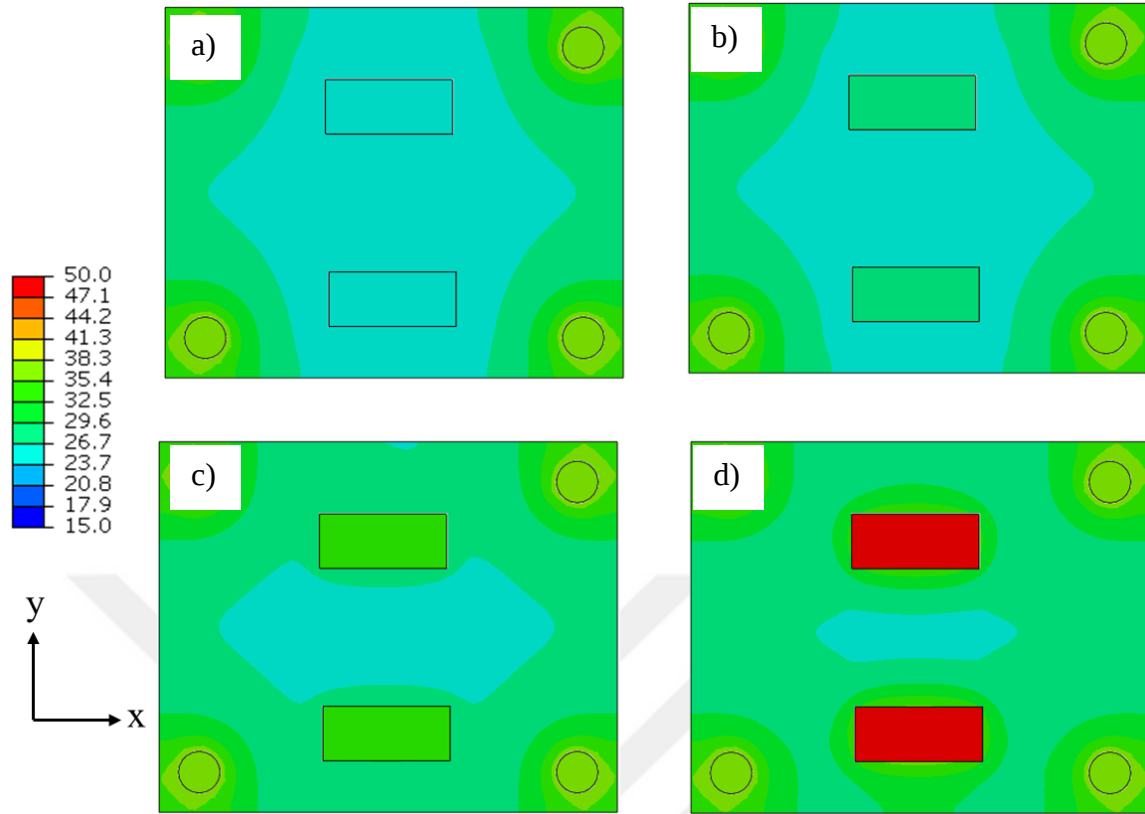
	$q = 0,5$ mW/mm ³	$q = 1$ mW/mm ³	$q = 2$ mW/mm ³	$q = 4$ mW/mm ³
K-1’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	3,4	6,9	13,7	27,5
K-2’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	2,0	4,0	8,0	16,0
K-3’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	0,3	0,6	1,2	2,4

Sistem başlangıç sıcaklığının 20°C ve ısıtıcı plaka sıcaklığının 40°C olduğu durumda komponent gücünün 0,5; 1; 2 ve 4 mW/mm³ değerleri için gerçekleştirilen analizlerde K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

Şekil 5.4’te, kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin 600 saniye sonundaki sıcaklık kontur grafikleri Şekil 5.5’te sunulmuştur.



Şekil 5.4. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.5. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3

Şekil 5.4 incelendiğinde ısııl güç miktarının değişiminden en çok K-1 noktasının daha sonra da K-2 noktasının etkilenip K-3 noktasının ise ısııl güç miktarının değişimine karşı oldukça duyarsız olduğu görülmektedir. Komponentlerin gücünün $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğunda 600 saniye sonunda, K-1 noktasında görülen sıcaklık artışı yaklaşık $5\text{-}6^{\circ}\text{C}$, K-2 noktasında $4\text{-}5^{\circ}\text{C}$ ve K-3 noktasında $2\text{-}3^{\circ}\text{C}$ olmaktadır. Komponentlerin gücünün 4 mW/mm^3 olduğu durumda ise 600 saniye sonundaki sıcaklık artış değerleri, K-1 noktası için 29°C , K-2 noktası için 19°C , K-3 noktası için 6°C olmaktadır. Bu noktaların 600 saniye sonundaki sıcaklık değişimleri Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$q = 0,5$ mW/mm^3	$q = 1$ mW/mm^3	$q = 2$ mW/mm^3	$q = 4$ mW/mm^3
K-1'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	4,7	8,2	15,1	28,8
K-2'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	4,9	6,9	10,9	18,9
K-3'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	3,9	4,1	4,7	5,9

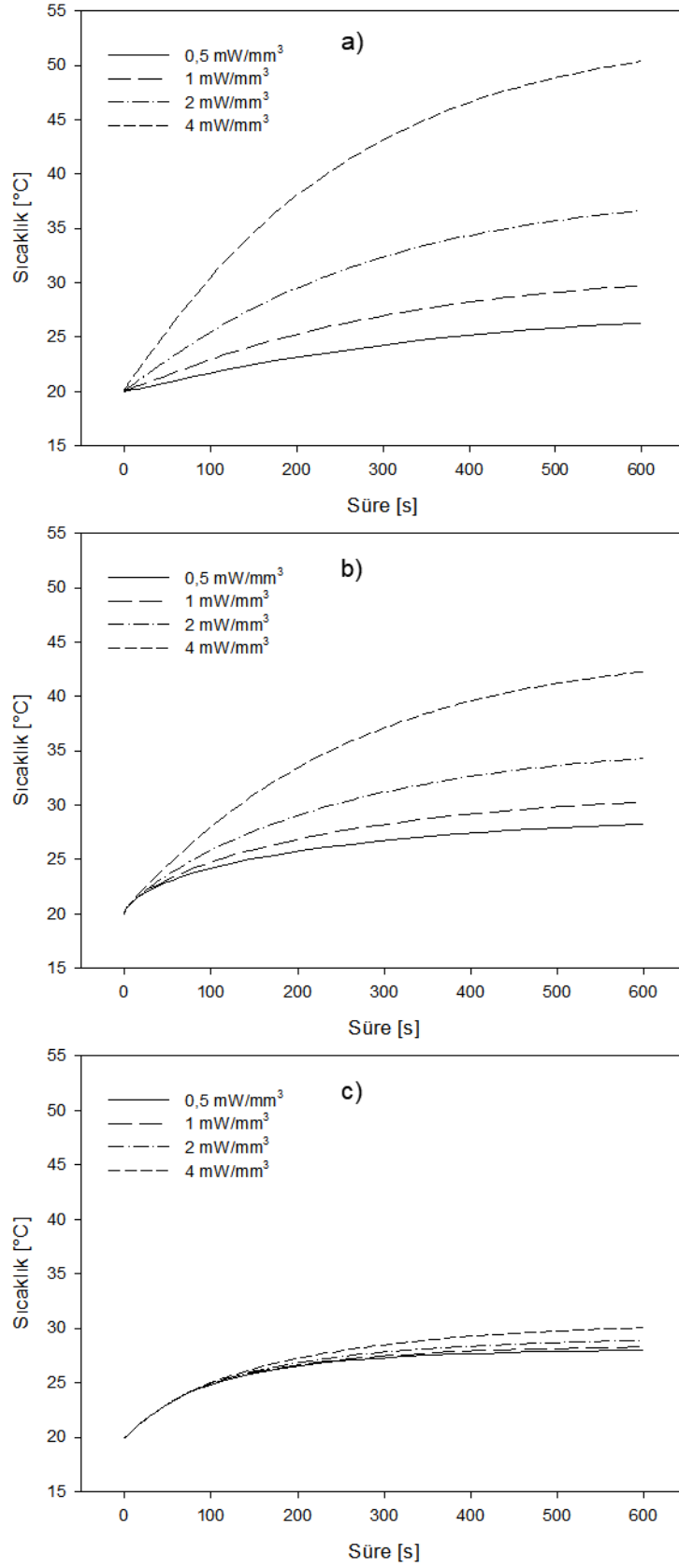
Şekil 5.4'te ve Çizelge 5.4'te görüldüğü üzere K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıkları ısıtıcı plaka sıcaklığının 20°C olduğu duruma göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu durumun sebebi ısıtıcı plaka ile kart kompleksi arasında hem iletim ile hem de ışıınım ile ısı transferinin gerçekleşmesidir.

Isıtıcı plakanın 20°C olduğu durumda başlangıç sıcaklığı ve ortam sıcaklığı da 20°C olduğu için kart kompleksinin henüz ısınmadığı durumda plaka ile sistem arasında herhangi bir ısı transferi mevcut değildir. Kart kompleksi ısınmaya başladıktan sonra soğuk olan ortamla ve plaka ile kart kompleksi arasında ısı transferi gerçekleşmeye başlamaktadır. Fakat düşük sıcaklık farklarında bu ısı transferi ihmal edilecek mertebede olmaktadır. Kart kompleksinin sıcaklığı arttıkça bu ısı transferi de artmaktadır.

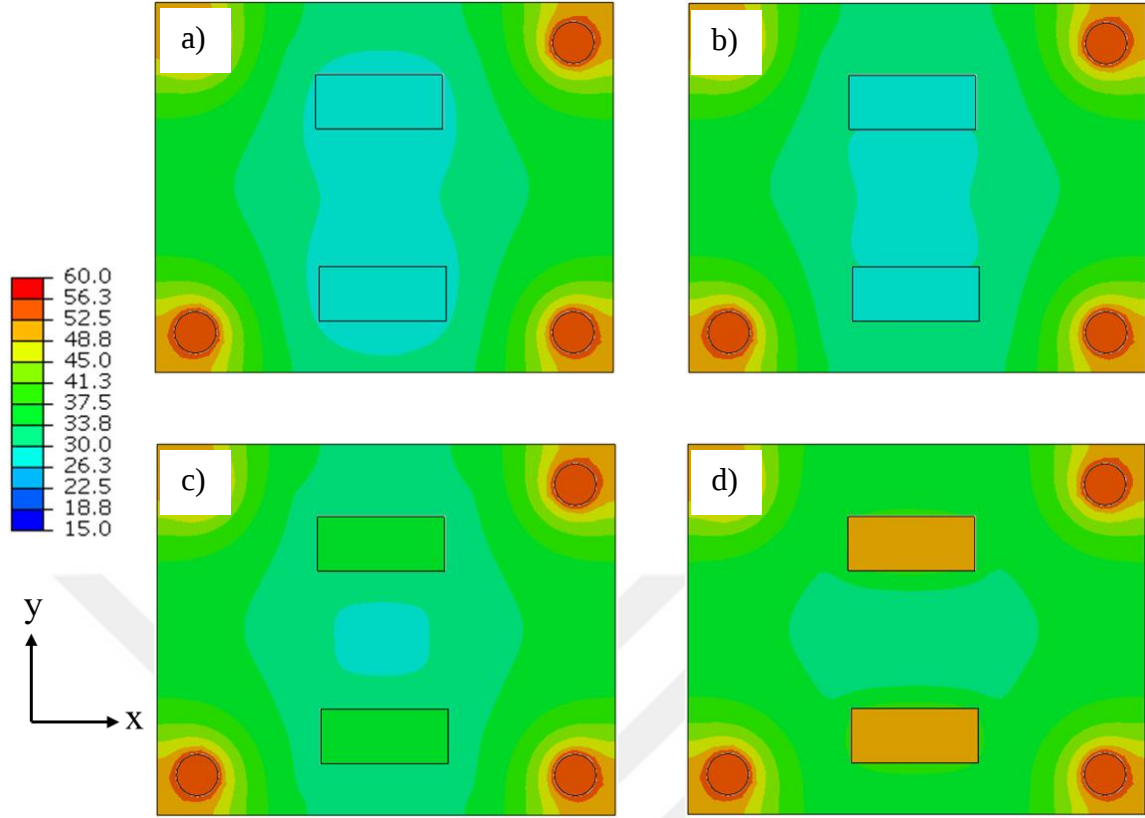
Isıtıcı plakanın başlangıç sıcaklığından yüksek olduğu durumda ise komponentlerde üretilen ısı henüz sisteme yeteri kadar yayılmadan ısıtıcı plaka ile sistem arasında iletim ve ışıınım yolları ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Dolayısı ile özellikle kart sıcaklığında ilk anlarda bir miktar ısınma beklenmektedir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere K-2 ve K-3 için ilk 200 saniyelik kısım incelendiğinde bu fark düşük mertebede de olsa açıkça görülmektedir. Plaka sıcaklığının daha yüksek olduğu durumlarda bu farkın daha da net olarak görülmesi beklenmektedir.

Komponentlerde üretilen ısı belirli bir süre sonra, ilk başta ısıtıcı plaka vasıtasıyla ısınmış olan tüm sisteme yayılmaktadır. Dolayısı ile komponentler de dâhil tüm sistem, ısı gücü miktarı aynı olmasına rağmen, ilk başta ısıtıcı plaka vasıtasıyla ısınmamış sistemin ulaştığı sıcaklıktan daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmaktadır. Sonuç olarak kart kompleksinin yerleştirildiği plakanın sıcaklık değeri sistem sıcaklığını etkilemektedir. Plakanın 40°C olduğu durumda bu etki düşük mertebede görülmektedir. Fakat plaka sıcaklığının daha yüksek olması halinde bu etki daha yüksek mertebede görülecektir.

Sistem başlangıç sıcaklığı 20°C ve ısıtıcı plaka sıcaklığının 60°C iken, komponent gücünün 0,5; 1; 2 ve 4 mW/mm³ değerleri için gerçekleştirilen analizlerde K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.6'da, kart ve komponentlerin üst yüzeylerinde 600 saniye sonundaki sıcaklık dağılımları Şekil 5.7'de sunulmuştur.



Şekil 5.6. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.7. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 incelendiğinde sistem ilk sıcaklığının 20°C ve plaka sıcaklığının 40°C olduğu durum için gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ölçüm noktalarının ısınma profilleri benzer olmakla beraber sıcaklık artış değerleri, plaka sıcaklığından dolayı daha yüksek olmaktadır. K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıklarında 600m saniye sonunda meydana gelen sıcaklık değişimleri Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

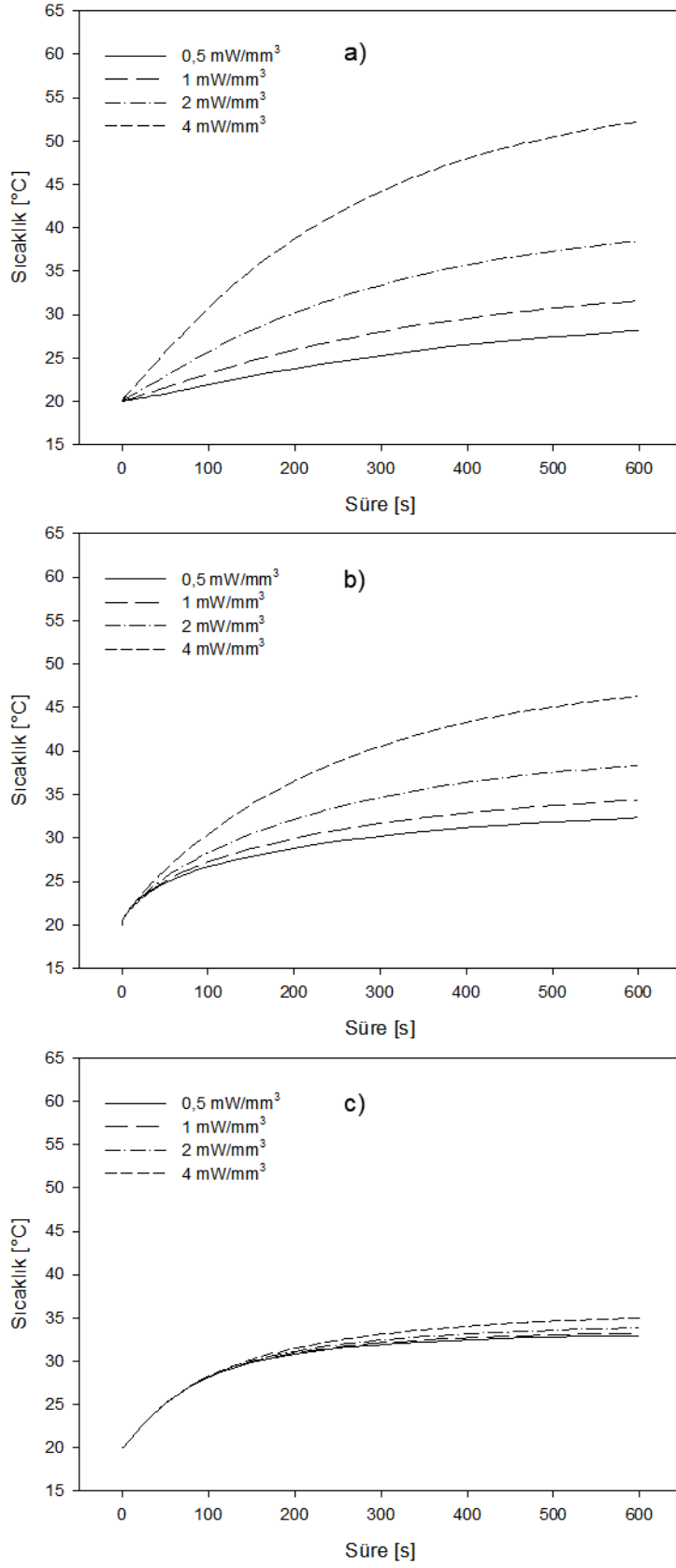
Çizelge 5.5. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$q = 0,5$ mW/mm^3	$q = 1$ mW/mm^3	$q = 2$ mW/mm^3	$q = 4$ mW/mm^3
K-1'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	6,3	9,7	16,6	30,4
K-2'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	8,3	10,3	14,3	22,3
K-3'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	8,0	8,3	8,9	10,0

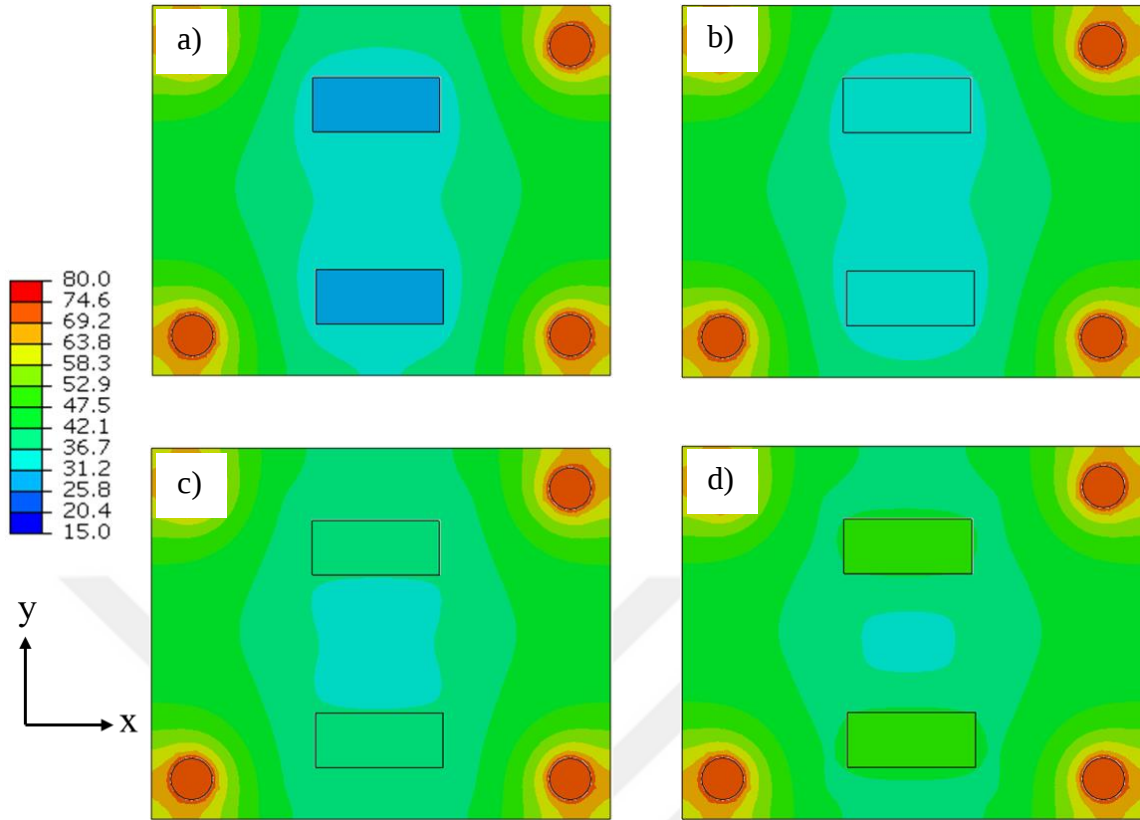
Şekil 5.6 incelendiğinde, sistemin ilk başlarda ısıtıcı plaka vasıtasıyla ısınıp daha sonra komponentlerin gücünden etkilendiği, ısıtıcı plaka sıcaklığının 40°C olduğu durumdaki sonuçlara göre daha net olarak görülmektedir.

Sistem başlangıç sıcaklığının 20°C ve ısıtıcı plaka sıcaklığının en yüksek değerinde, 80°C, olduğu durumda, komponent gücünün 0,5; 1; 2 ve 4 mW/mm³ değerleri için gerçekleştirilen analizlerde K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.8’de, kart ve komponentlerin üst yüzeylerinde 600 saniye sonundaki sıcaklık dağılımları Şekil 5.9’da sunulmuştur.





Şekil 5.8. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.9. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3

Bundan önceki üç senaryoda da sistemin ısınma profili birbirine benzemektedir. Fakat plaka sıcaklıklarından dolayı ölçüm noktalarının sıcaklıklarındaki artış miktarı değişmektedir. Önceki üç senaryo ile karşılaştırıldığında en yüksek sıcaklık artışı Şekil 5.8’de de görüldüğü gibi plaka sıcaklığının 80°C olduğu durumdur. Bu analizlerin sonuçlarına göre belirlenen noktaların 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.6’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

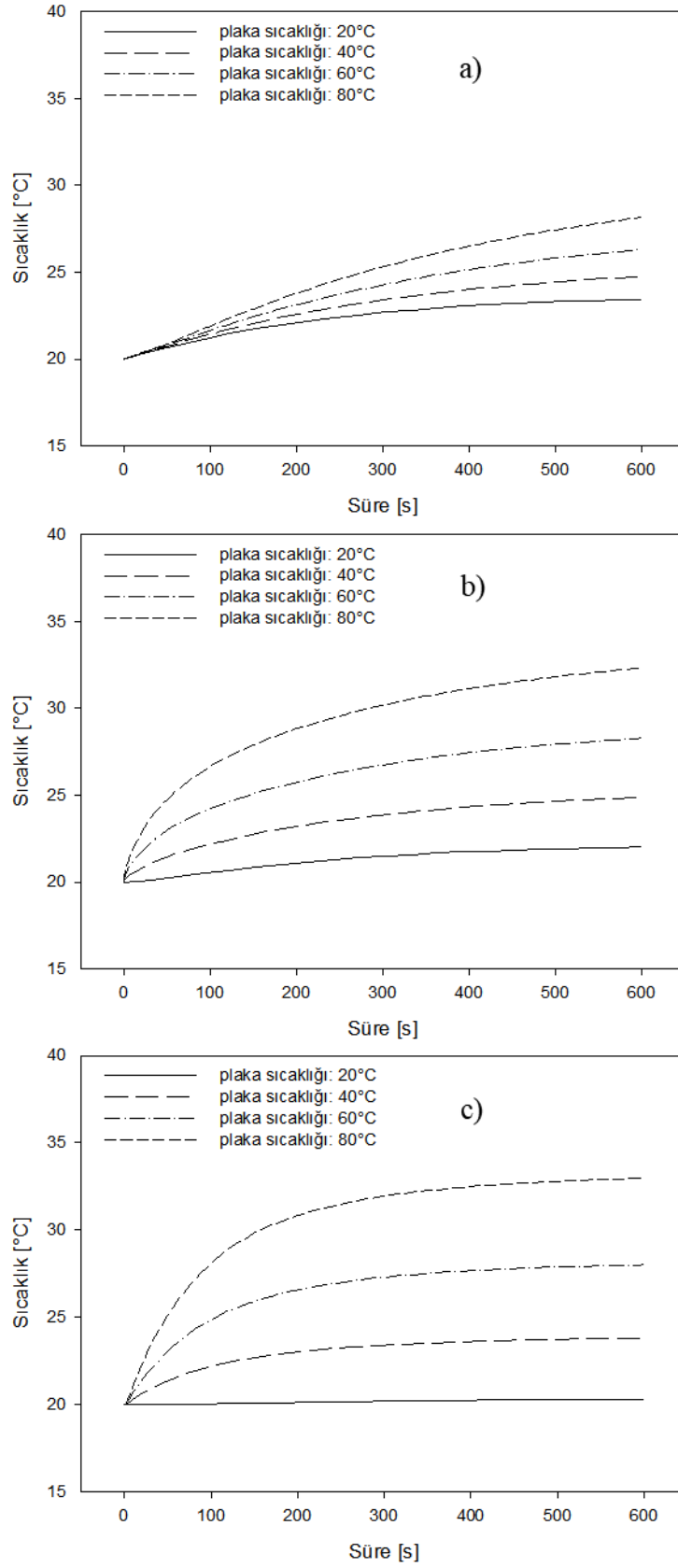
	$q = 0,5$ mW/mm^3	$q = 1$ mW/mm^3	$q = 2$ mW/mm^3	$q = 4$ mW/mm^3
K-1’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	8,2	11,6	18,5	32,2
K-2’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	12,3	14,3	18,3	26,3
K-3’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	13,0	13,3	13,8	15,0

Başlangıç sıcaklığı 20°C , plaka sıcaklığı 20°C iken komponentlerde üretilen ısı miktarının $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumda K-1 noktasının sıcaklık artışı $3\text{-}4^{\circ}\text{C}$, K-3 noktasının sıcaklık

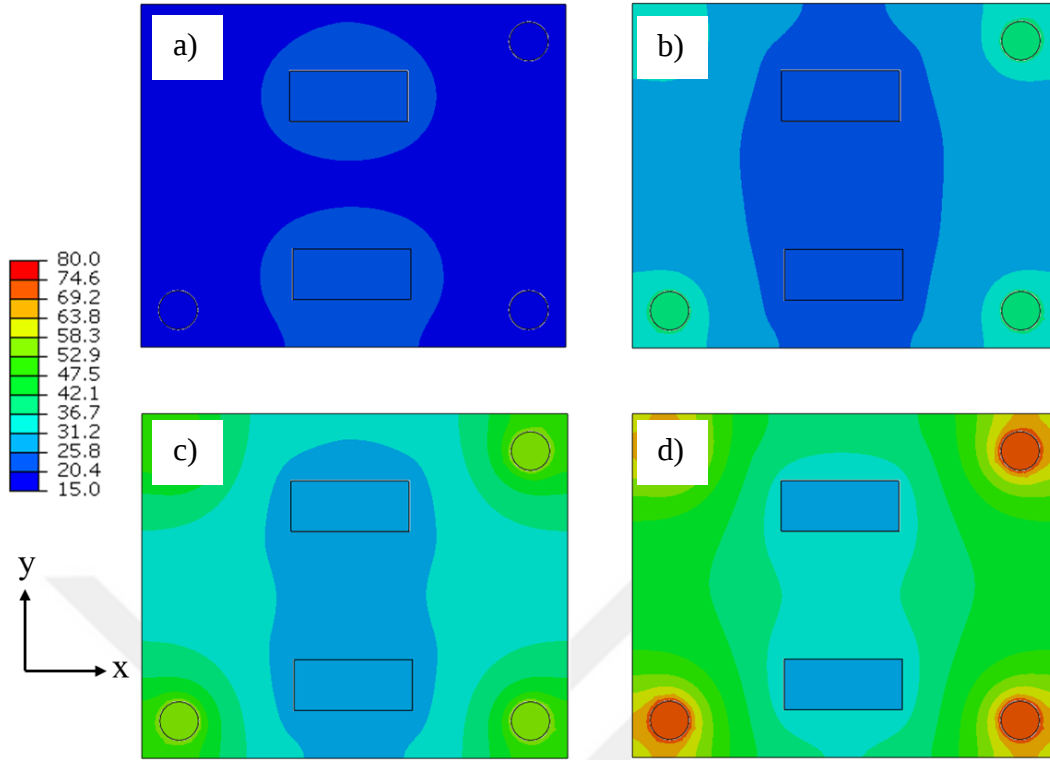
artışı ise 1°C 'nin altında olmaktadır. Komponentlerde üretilen ısı miktarının 4 mW/mm^3 olduğu durumda ise K-1 noktasının sıcaklık artışı yaklaşık 28°C olurken K-3 noktasının sıcaklık artışı 3°C 'nin altında olmaktadır (Bkz. Şekil 5.2 ve Çizelge 5.3). Şekil 5.8 ve Çizelge 5.6 incelendiğinde, başlangıç sıcaklığı 20°C , plaka sıcaklığı 80°C iken komponentlerde üretilen ısı miktarının $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumda K-1 noktasının sıcaklık artışı yaklaşık 8°C , K-3 noktasının sıcaklık artışı ise 13°C olmaktadır. Komponentlerde üretilen ısı miktarının 4 mW/mm^3 olduğu durumda ise K-1 noktasının sıcaklık artışı yaklaşık 32°C olurken K-3 noktasının sıcaklık artışı 15°C olmaktadır.

Bu durumlar değerlendirildiğinde komponent üzerindeki bölgenin sıcaklığı doğrudan komponentte üretilen ısı miktarına bağlı olmakla beraber bu bölgenin sıcaklık değeri ısıtıcı plaka sıcaklığına çok az miktarda bağlılık göstermektedir. Öte yandan kart sıcaklığı, özellikle de kartın komponentlerden uzak olan bölgeleri doğrudan ısıtıcı plaka sıcaklığından etkilenmektedir. Komponentlerde üretilen ısı miktarının ise kartın komponentlere uzak olan bölgelerinin sıcaklığı üzerindeki etkisi oldukça düşüktür.

Şekil 5.10'da, sistem başlangıç sıcaklığının 20°C ve komponent gücünün $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumda, ısıtıcı plaka sıcaklığının 20, 40, 60 ve 80°C değerleri için gerçekleştirilen analizlerde elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.11'de ise bu analizlerde elde edilen, kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin 600 saniye sonundaki sıcaklık dağılımları sunulmuştur.



Şekil 5.10. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{\text{ilk}} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.11. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$, c) $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$, d) $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$

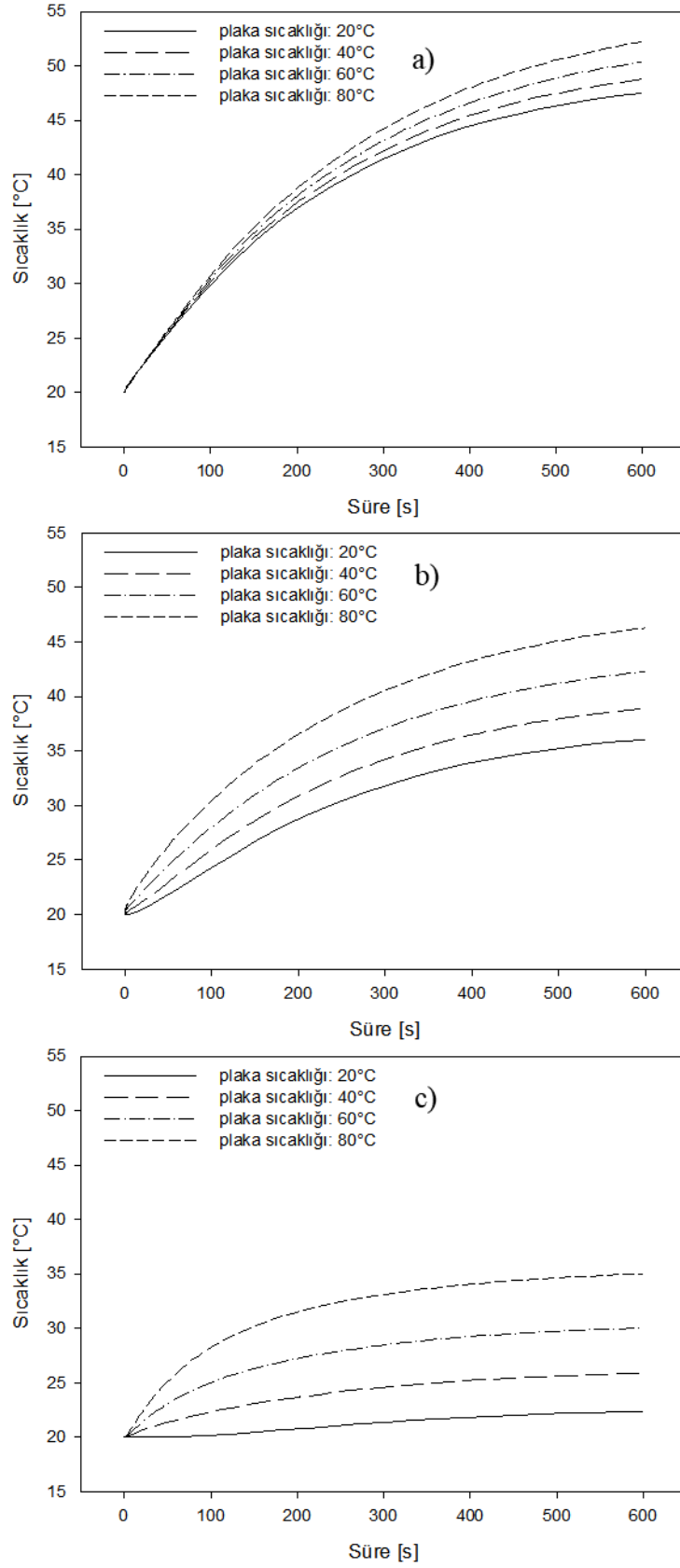
Komponentlerin gücüne oldukça bağlı olan K-1 noktasının sıcaklık artışı, plaka sıcaklığının 20°C olduğu durumda $3,4^{\circ}\text{C}$, 80°C olduğu durumda ise $8,2^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu değerlerden K-1 noktasının plaka sıcaklığına bağlılığının düşük olduğu sonucuna varılabilir. K-3 noktasının sıcaklığının artışı plaka sıcaklığının 20°C olduğu durum için $0,3^{\circ}\text{C}$, plaka sıcaklığının 80°C olduğu durumda ise 13°C olmaktadır. Bu durum ile de K-3 noktasının plaka sıcaklığına önemli oranda bağlı olduğu görülmektedir. Senaryo-1, Senaryo-5, Senaryo-9 ve Senaryo-13 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.7'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

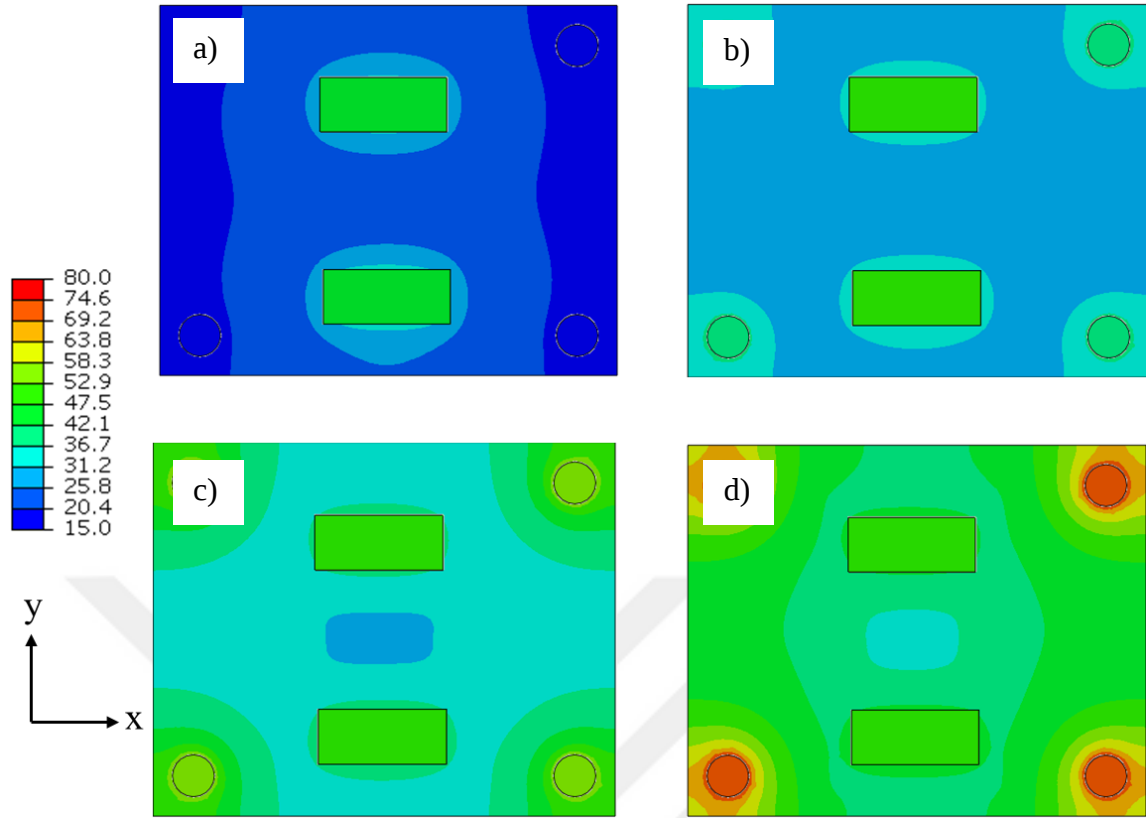
	$T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$
K-1'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	3,4	4,7	6,3	8,2
K-2'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	2,0	4,9	8,3	12,3
K-3'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	0,3	3,8	8,0	13,0

Sistem başlangıç sıcaklığının 20°C ve komponentlerin 4 mW/mm³ olduğu durumda, ısıtıcı plaka sıcaklığının 20, 40, 60 ve 80°C değerleri için gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Şekil 5.12 Şekil 5.13'te gösterilmiştir.





Şekil 5.12. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{\text{ilk}} = 20^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.13. $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$, c) $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$, d) $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$

K-1 noktasının sıcaklığı plaka sıcaklığının tüm değerleri için önemli miktarda artış göstermiştir. Plaka sıcaklığının 20°C olduğu durum ile 80°C olduğu durum arasında K-1 noktasının sıcaklığındaki artış yaklaşık $5\text{-}6^{\circ}\text{C}$ farklılık göstermektedir. K-3 noktası için ise bu fark daha düşük sıcaklık artışı görülmesine rağmen yaklaşık $10\text{-}12^{\circ}\text{C}$ mertebesinde olmaktadır. Senaryo-4, Senaryo-8, Senaryo-12 ve Senaryo-16 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.8’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.8. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$
K-1’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	27,5	28,8	30,4	32,2
K-2’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	16,0	18,9	22,3	26,3
K-3’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	2,4	5,9	10,0	15,0

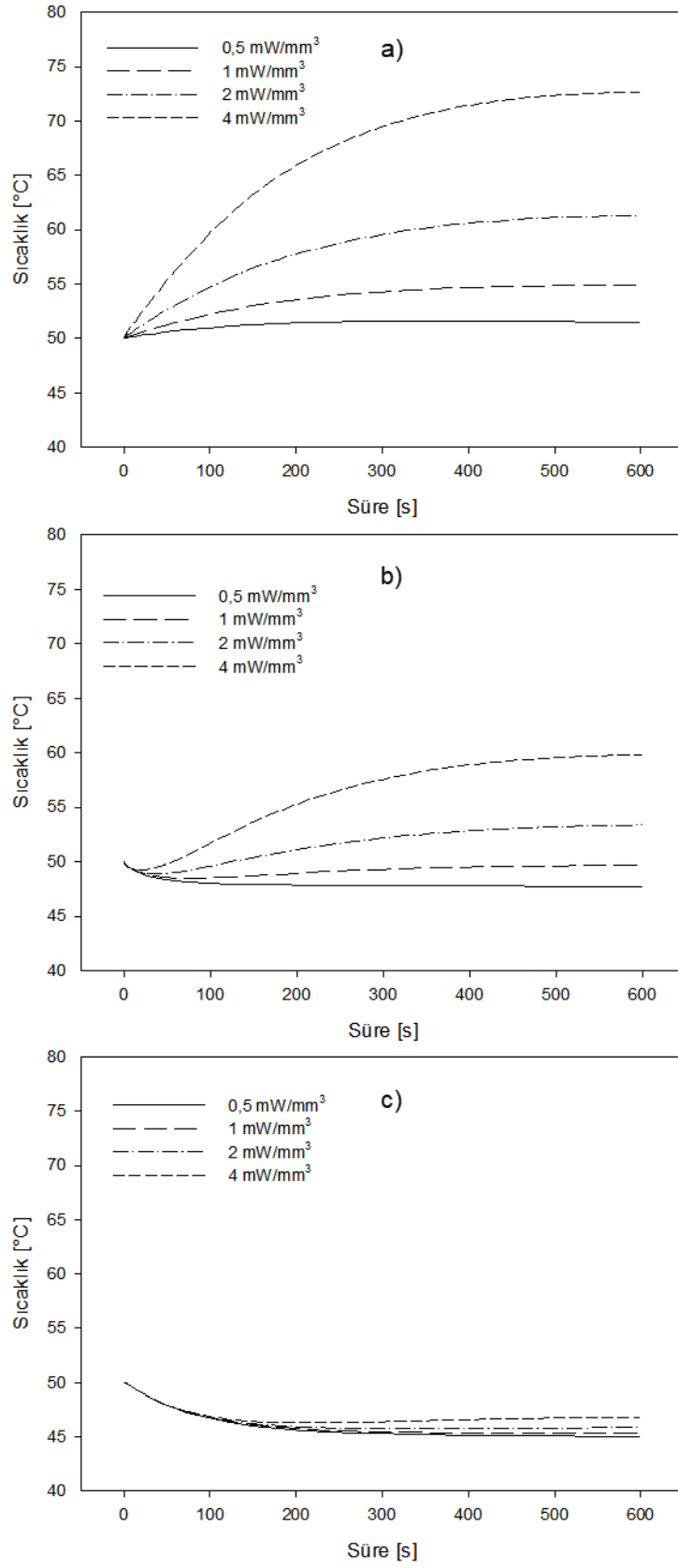
5.1.2. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ durumunda, T_{plaka} ve q değerlerinin kart ve komponent sıcaklıkları üzerindeki etkisinin araştırılması

Bu bölümde Çizelge 5.1’de gösterilen Senaryo-49’dan Senaryo-64’e kadar olan senaryolar için gerçekleştirilen SEY analizlerinin sonuçları paylaşılmıştır. Bu senaryoların tümünde sistemin ilk sıcaklığı 50°C olup, $T_{plaka} = 20, 40, 60$ ve 80°C ve $q = 0,5, 1, 2, 4 \text{ mW/mm}^3$ değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde analiz sonuçları paylaşılan senaryolar Çizelge 5.9’da gösterilmiştir. Kabin içi hava sıcaklığının, analiz süresi boyunca sistemin ilk sıcaklığına eşit değerde (50°C) olduğu kabul edilmiştir. Bu sınır şartları için gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 5.14 – Şekil 5.25 arasında gösterilmiştir.

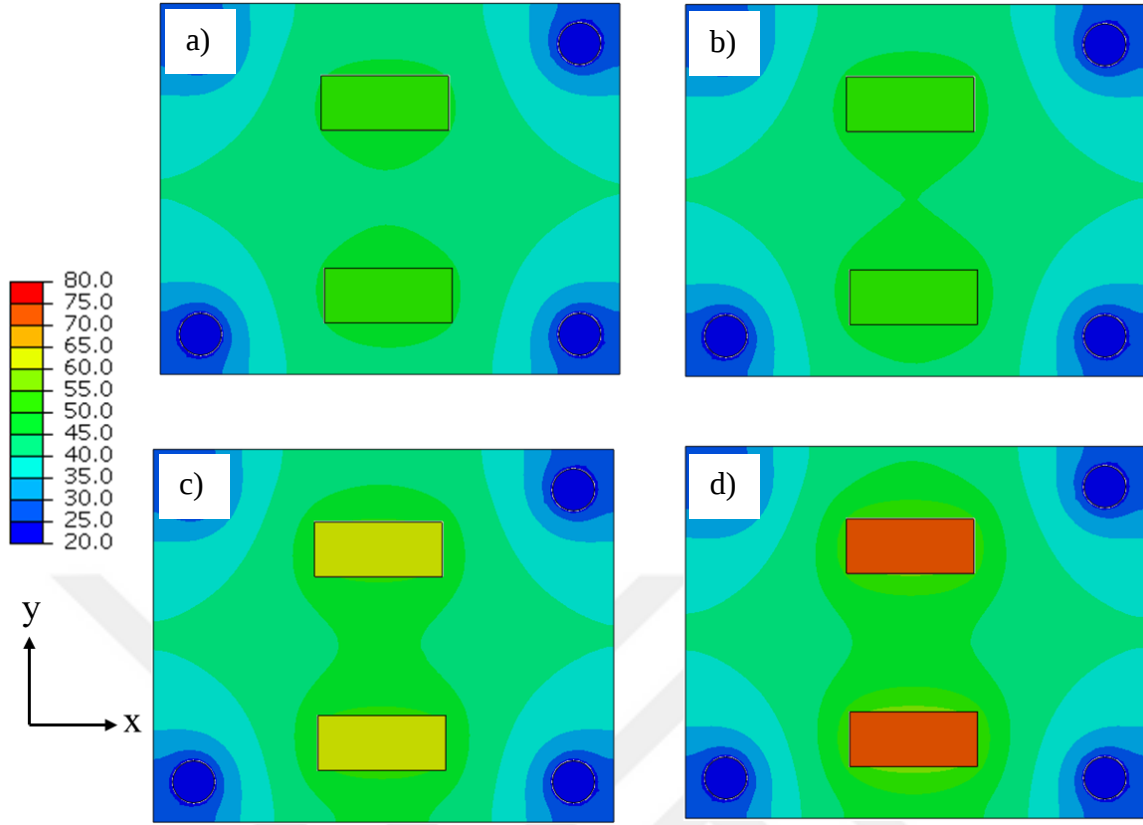
Çizelge 5.9. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları

	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Ortam Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Komponent Gücü [mW/mm^3]	Nümerik Yöntem
Senaryo-49	50	50	20	0,5	SEY
Senaryo-50	50	50	20	1	SEY
Senaryo-51	50	50	20	2	SEY
Senaryo-52	50	50	20	4	SEY
Senaryo-53	50	50	40	0,5	SEY
Senaryo-54	50	50	40	1	SEY
Senaryo-55	50	50	40	2	SEY
Senaryo-56	50	50	40	4	SEY
Senaryo-57	50	50	60	0,5	SEY
Senaryo-58	50	50	60	1	SEY
Senaryo-59	50	50	60	2	SEY
Senaryo-60	50	50	60	4	SEY
Senaryo-61	50	50	80	0,5	SEY
Senaryo-62	50	50	80	1	SEY
Senaryo-63	50	50	80	2	SEY
Senaryo-64	50	50	80	4	SEY

Sistem başlangıç sıcaklığı 50°C ve plaka sıcaklığı 20°C iken, komponentlerin gücünün 0,5; 1; 2 ve 4 mW/mm^3 değerleri için gerçekleştirilen analizlerde ölçüm noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.14’te ve kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin 600 saniye sonundaki sıcaklık kontur grafikleri Şekil 5.15’te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.15. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3

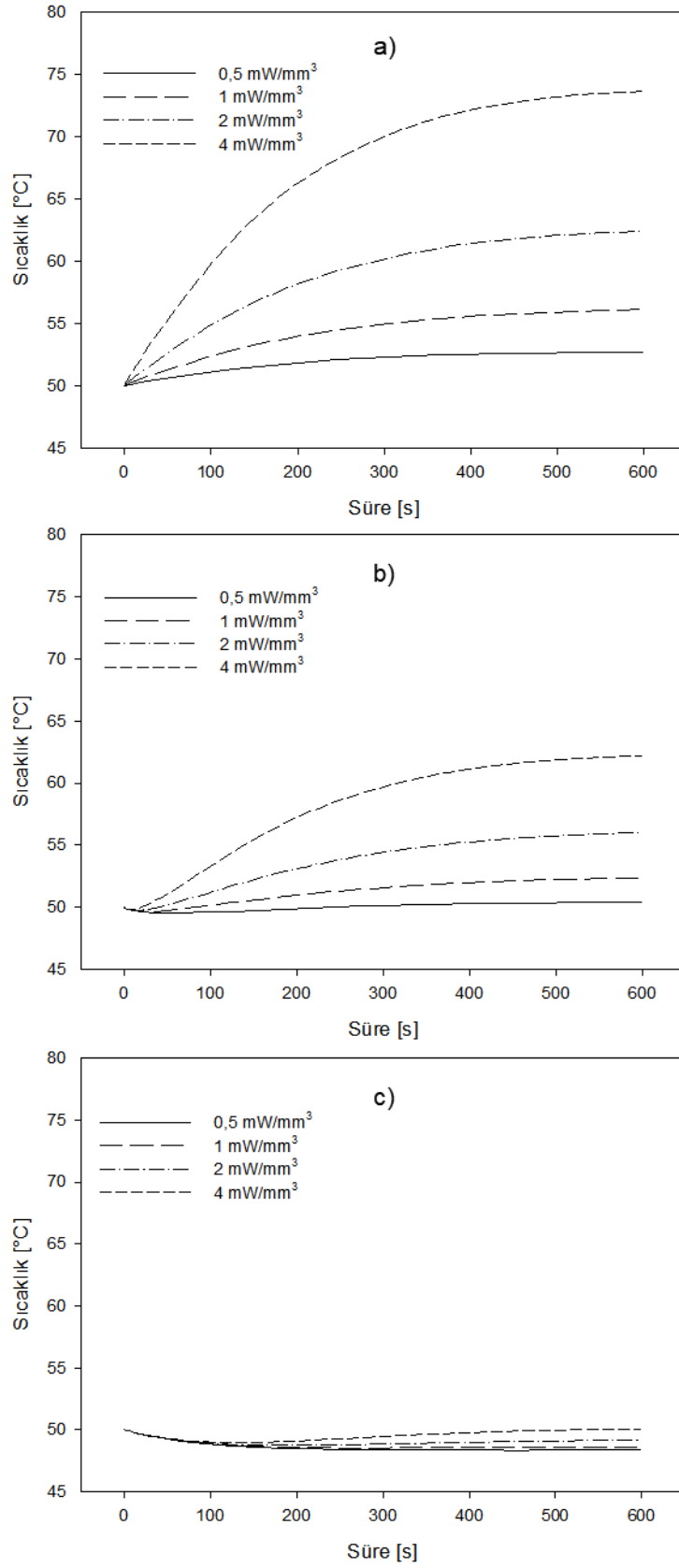
Senaryo-1 – Senaryo-16 için gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarından; K-1 noktasının sıcaklığının doğrudan komponentte üretilen ısı miktarına bağlı olduğu ve ısıtıcı plaka sıcaklığına bağlılığının düşük olduğu sonucuna, K-3 noktasının sıcaklığının ise doğrudan ısıtıcı plaka sıcaklığına bağlı olup komponentte üretilen ısı miktarına çok düşük seviyede bağlı olduğu sonucuna varılmıştır (Bkz. Şekil 5.1 – Şekil 5.9). K-2 noktasının sıcaklığı ise kısmen ısıtıcı plaka sıcaklığına kısmen komponent gücüne bağlıdır. Senaryo-49 – Senaryo-52 için gerçekleştirilen analizlerde de bu etkiler Şekil 5.14’te görülmektedir. Komponentlerde üretilen ısı $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumda K-1 noktasının sıcaklığı ihmal edilebilir düzeyde artış göstermektedir. Üretilen ısı 4 mW/mm^3 olduğunda ise bu artış yaklaşık 23°C olmaktadır. K-3 noktasının sıcaklık değeri komponentlerde üretilen ısı miktarının tüm değerleri için azalış göstermektedir. Beklenildiği üzere, komponentlerde üretilen ısı miktarının değeri arttıkça K-3 noktasının sıcaklık değerindeki azalış miktarı düşmektedir. Fakat bu fark ihmal edilebilir seviyededir. K-2 noktasının sıcaklık değeri ise komponentlerde üretilen ısı miktarını tüm değerleri için ilk 50 saniye azalış göstermektedir. K-2 noktasının sıcaklığı 50 saniyeden sonra üretilen ısının 4 mW/mm^3 olduğu durum için artmaya başlamaktadır. $0,5 \text{ mW/mm}^3$ ısı üretimi değeri olduğu durumda

ise 600 saniye boyunca K-2 noktasının sıcaklığı azalmaktadır. Senaryo-49 – Senaryo-52 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.10’da gösterilmiştir.

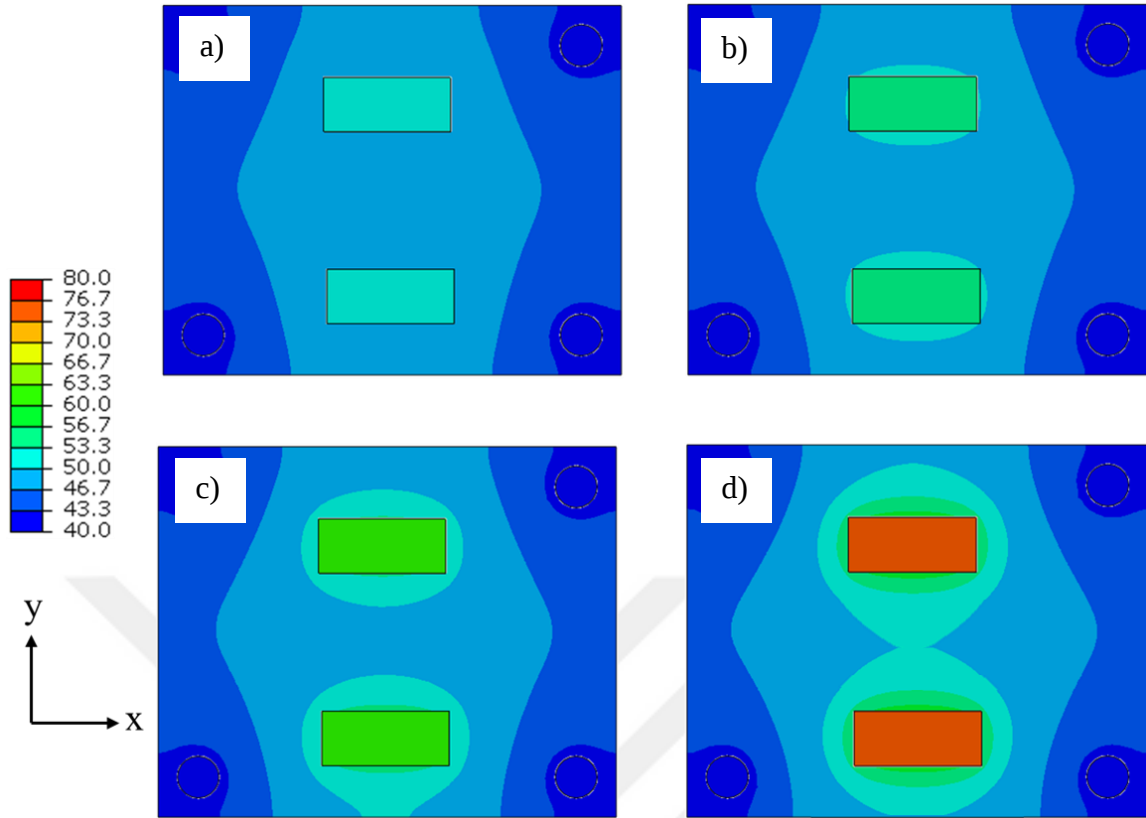
Çizelge 5.10. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$q = 0,5$ mW/mm^3	$q = 1$ mW/mm^3	$q = 2$ mW/mm^3	$q = 4$ mW/mm^3
K-1’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	1,5	4,9	11,3	22,7
K-2’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	-2,3	-0,4	3,4	9,8
K-3’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	-5,0	-4,7	-4,2	-3,2

Sistem başlangıç sıcaklığının 50°C ve plaka sıcaklığının 40°C olduğu durumda komponentlerin gücünün 0,5; 1; 2 ve 4 mW/mm^3 değerleri için gerçekleştirilen analizlerde ölçüm noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.16’da ve kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin 600 saniye sonundaki sıcaklık kontur grafikleri Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



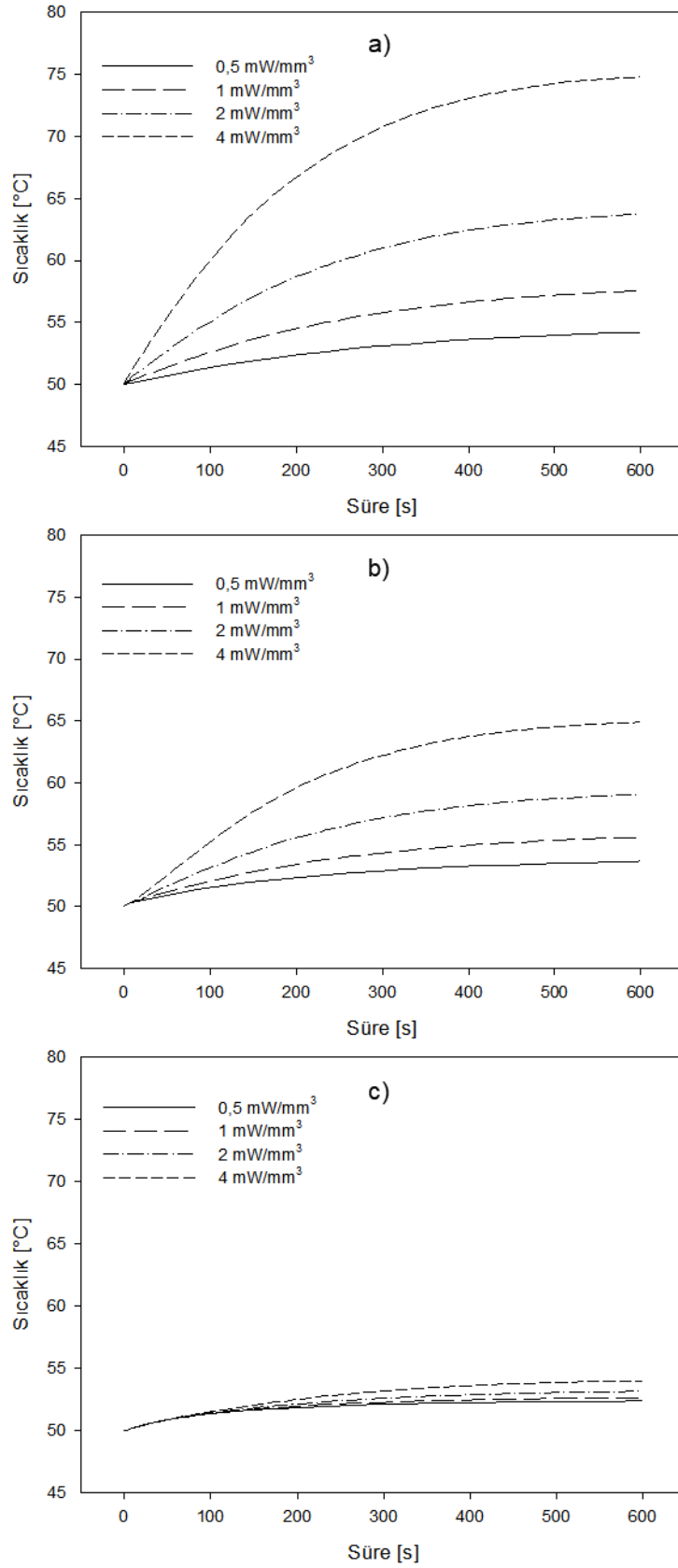
Şekil 5.17. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3

Senaryo-53 – Senaryo-56 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarında Senaryo-49 – Senaryo-52 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına benzer durumlar görülmektedir. Isıtıcı plaka sıcaklığı, sistem başlangıç sıcaklığından düşük olduğundan özellikler plaka sıcaklığından en çok etkilenen K-1 ve K-2 noktalarında bir miktar soğuma görülmektedir. Fakat bu soğuma, başlangıç sıcaklığı ve plaka sıcaklığı arasındaki farkın az olmasından dolayı, plaka sıcaklığının 20°C olduğu durumlar kadar etkili olmamaktadır. K-3 noktasının sıcaklığı, üretilen ısı miktarının tüm değerleri için azalış göstermektedir. Yalnızca 4 mW/mm^3 ısı üretimi olduğu durumda sabit kalmaktadır. K-2 noktasının sıcaklığı yalnızca $0,5 \text{ mW/mm}^3$ değerinde ısı üretimi olduğu durumda ilk 100 saniye ihmal edilecek düzeyde azalış göstermektedir. Diğer tüm ısı üretim değerlerinde K-2 noktasının sıcaklığı artmaktadır. K-1 noktası ise her durumda 600 saniye boyunca ısınmaktadır. Senaryo-53 – Senaryo-56 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.11’de gösterilmiştir.

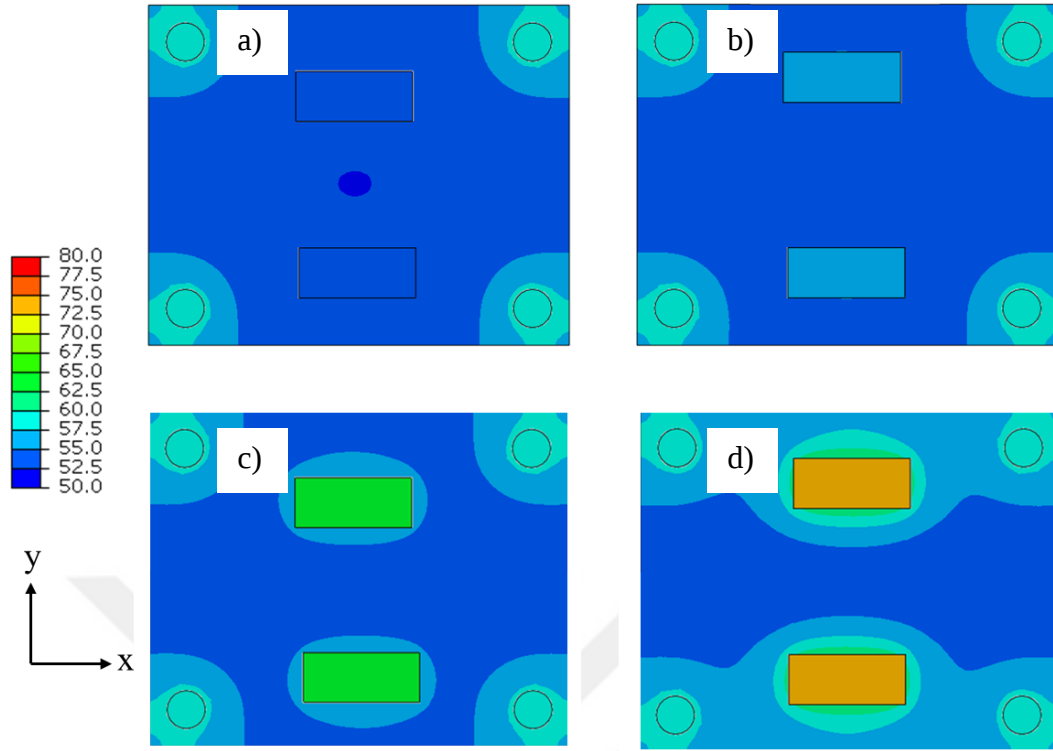
Çizelge 5.11. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$q = 0,5$ mW/mm^3	$q = 1$ mW/mm^3	$q = 2$ mW/mm^3	$q = 4$ mW/mm^3
K-1'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	2,7	6,1	12,4	23,7
K-2'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	0,4	2,4	6,0	12,2
K-3'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	-1,6	-1,4	-0,8	0,1

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da sırasıyla, sistem başlangıç sıcaklığının 50°C ve ısıtıcı plaka sıcaklığının 60°C olduğu durumda, komponentlerin 0,5; 1; 2 ve 4 mW/mm^3 güç değerleri için gerçekleştirilen analizlerde elde edilen, ölçüm noktalarının zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri ve 600 saniye sonunda kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin sıcaklık dağılımları sunulmuştur.



Şekil 5.18. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.19. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3

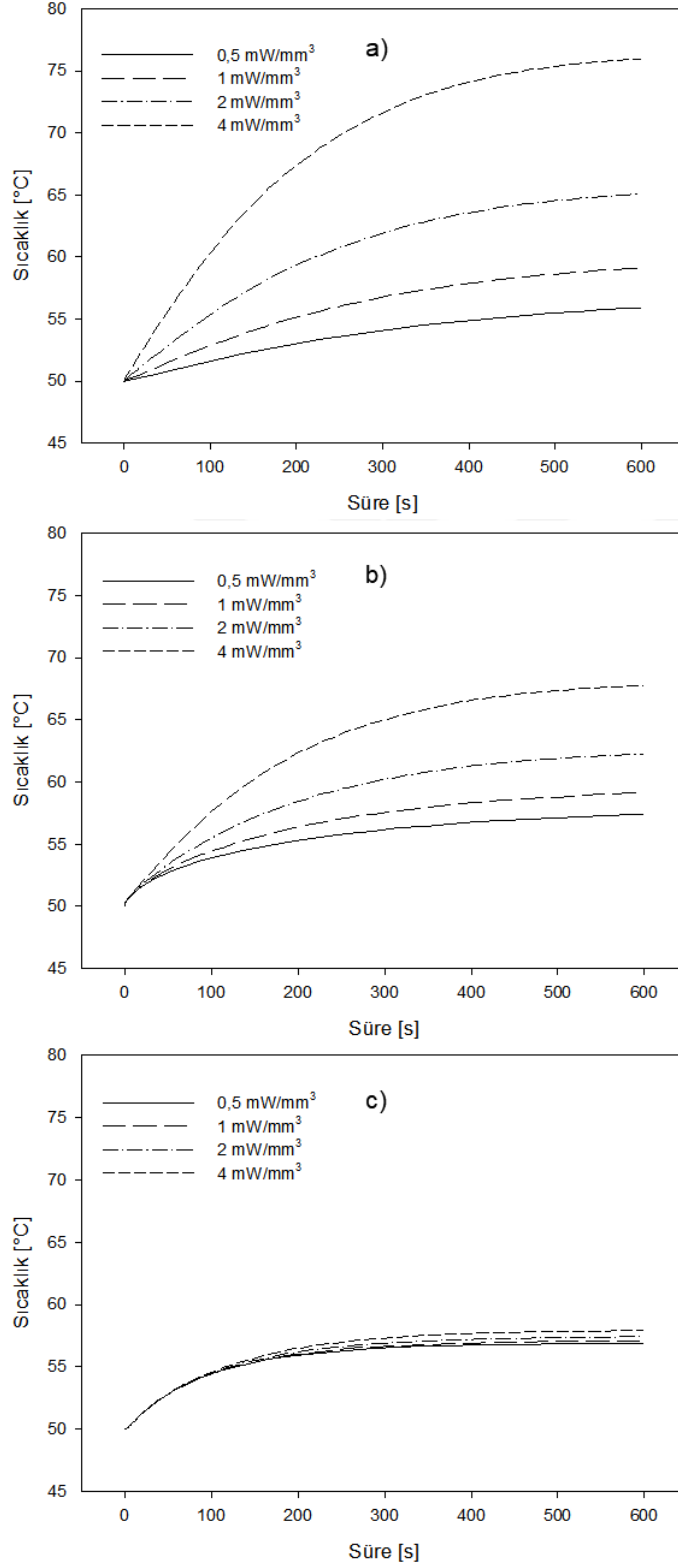
$T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumlarında, plaka sıcaklığı başlangıç sıcaklığından yüksektir. Bu senaryolarda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıkları tüm durumlar için 600 saniye boyunca artmaktadır. Bunun sebebi ağırlıklı olarak K-1 noktası için komponentler, K-3 noktası için ısıtıcı plaka sıcaklığı, K-2 noktası için ise her ikisi de olmaktadır. Senaryo-57 – Senaryo-60 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

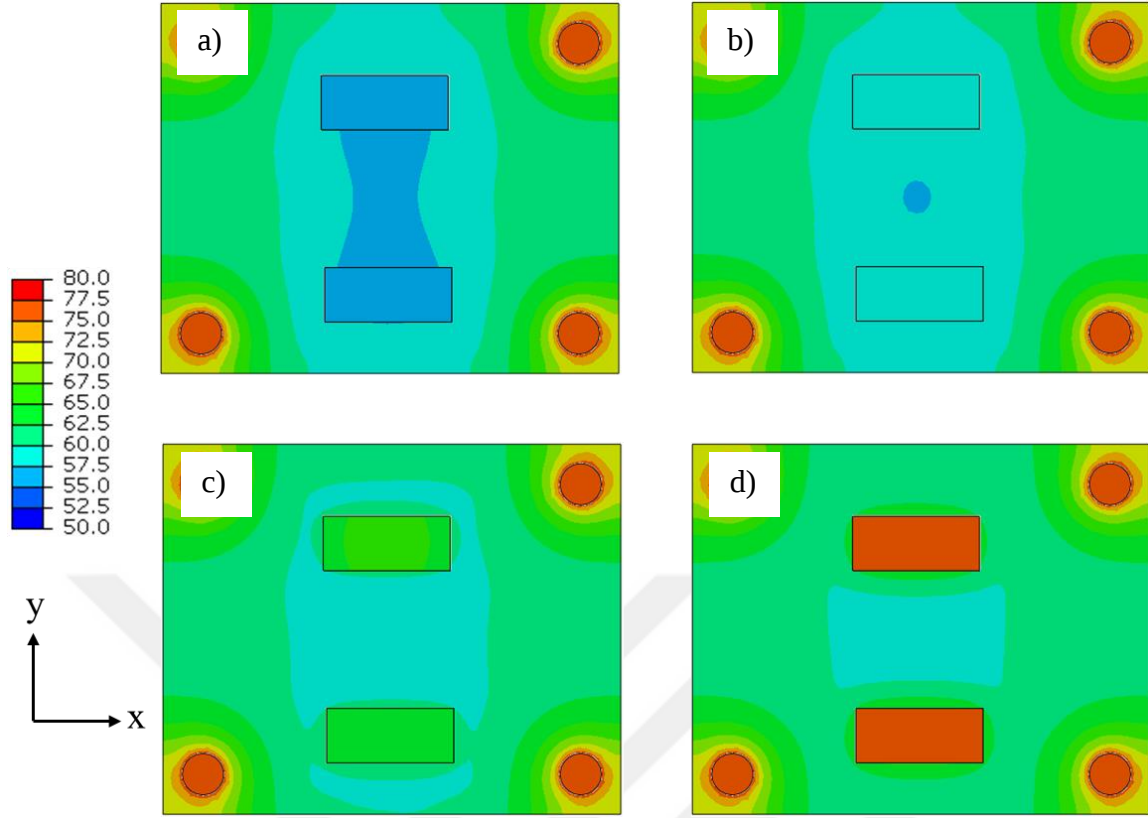
	$q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$	$q = 1 \text{ mW/mm}^3$	$q = 2 \text{ mW/mm}^3$	$q = 4 \text{ mW/mm}^3$
K-1’deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	4,2	7,6	13,7	24,8
K-2’deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	3,7	5,6	9,1	14,9
K-3’deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	2,4	2,6	3,1	4,0

Sistem başlangıç sıcaklığının 50°C ve plaka sıcaklığının 80°C olduğu durumda komponentlerin gücünün $0,5$; 1 ; 2 ve 4 mW/mm^3 değerleri için gerçekleştirilen analizlerde ölçüm noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.20’de ve kart ve

komponentlerin üst yüzeylerinin 600 saniye sonundaki sıcaklık kontur grafikleri Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.21. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $0,5 \text{ mW/mm}^3$, b) 1 mW/mm^3 , c) 2 mW/mm^3 , d) 4 mW/mm^3

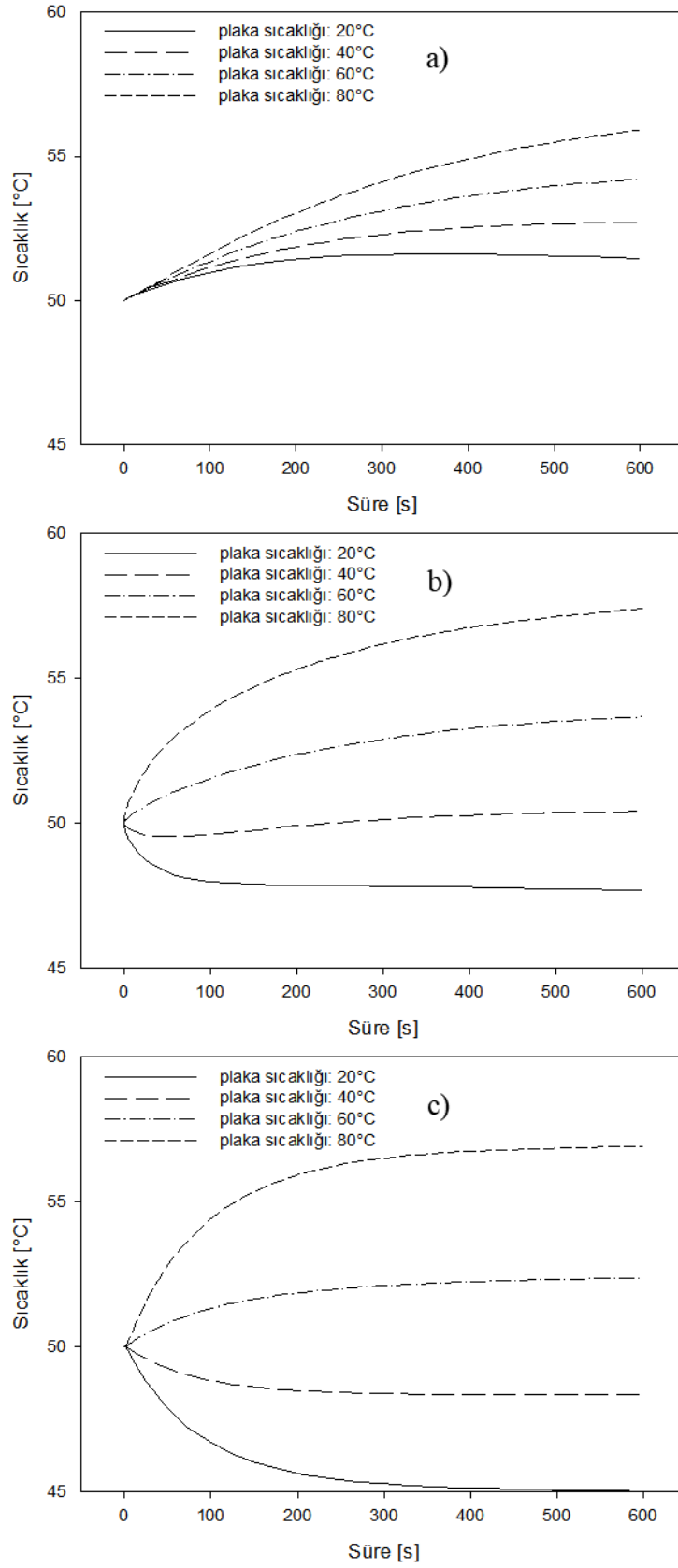
Plaka sıcaklığının 80°C olduğu senaryolarda başlangıç sıcaklığı ve ısıtıcı plaka sıcaklığı arasında 30°C fark bulunduğu için plaka ile kart arasında önceki senaryolara nispeten hızlı bir ısı transferi gerçekleşmiştir. Bu durumdan en çok K-3 noktası, daha sonra da K-2 noktası etkilenmiştir. Fakat K-1 noktasının sıcaklık değerindeki artış hızı plaka sıcaklığının 20 , 40 ve 60°C olduğu durumlar ile hemen hemen aynı olmaktadır. Yalnızca 600 saniye sonundaki sıcaklık değeri 80°C plaka sıcaklığı olan durumda bir miktar daha yüksek olmaktadır. Senaryo-61 – Senaryo-64 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.13. Farklı ısı akıları için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

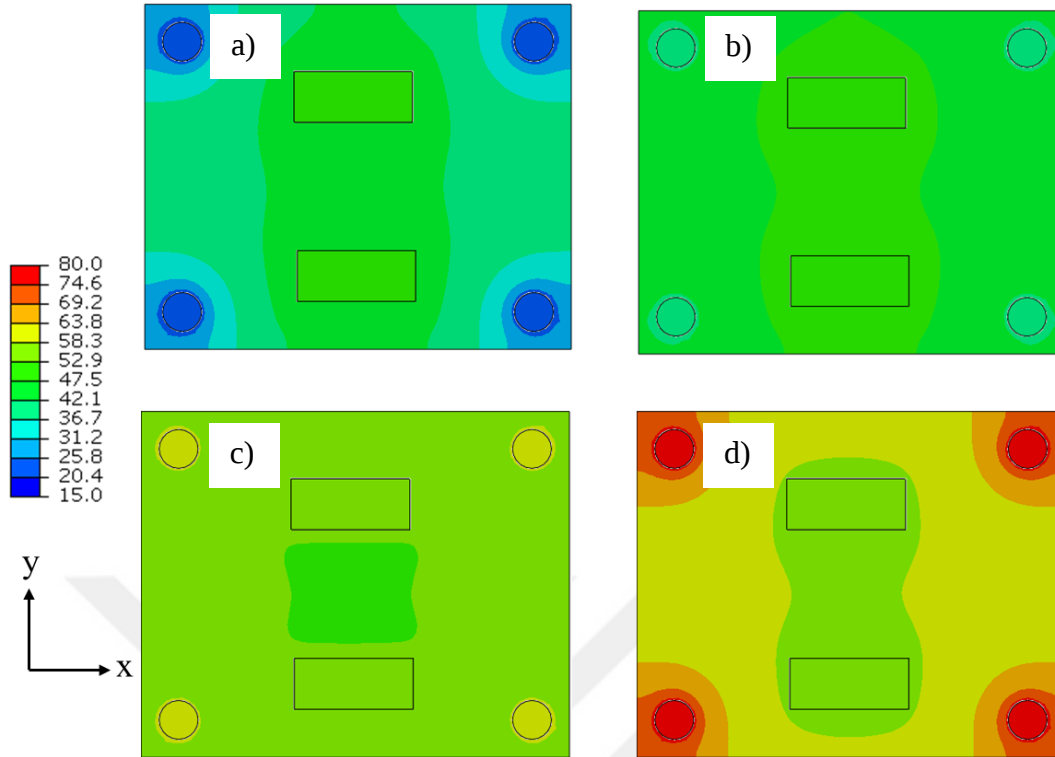
	$q = 0,5$ mW/mm^3	$q = 1$ mW/mm^3	$q = 2$ mW/mm^3	$q = 4$ mW/mm^3
K-1’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	5,9	9,1	15,1	26,0
K-2’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	7,4	9,1	12,3	17,8
K-3’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	6,9	7,1	7,4	7,9

Sistem başlangıç ve ısıtıcı plaka sıcaklık değerlerinin sabit tutulup komponent güçlerinin farklı değerleri için gerçekleştirilen analizlerden sonra, sistem başlangıç değerinin 50°C olduğu durumda, komponent güç değerleri sırasıyla 0,5 ve 4 mW/mm³ değerlerinde tutulup, ısıtıcı plaka sıcaklığının 20, 40 60 ve 80°C değerleri için iletim tabanlı SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Komponent güç değerinin 0,5 mW/mm³ olduğu durumda gerçekleştirilen analizin sonuçları Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te gösterilmiştir.





Şekil 5.22. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{\text{ilk}} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.23. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$, c) $T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$, d) $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$

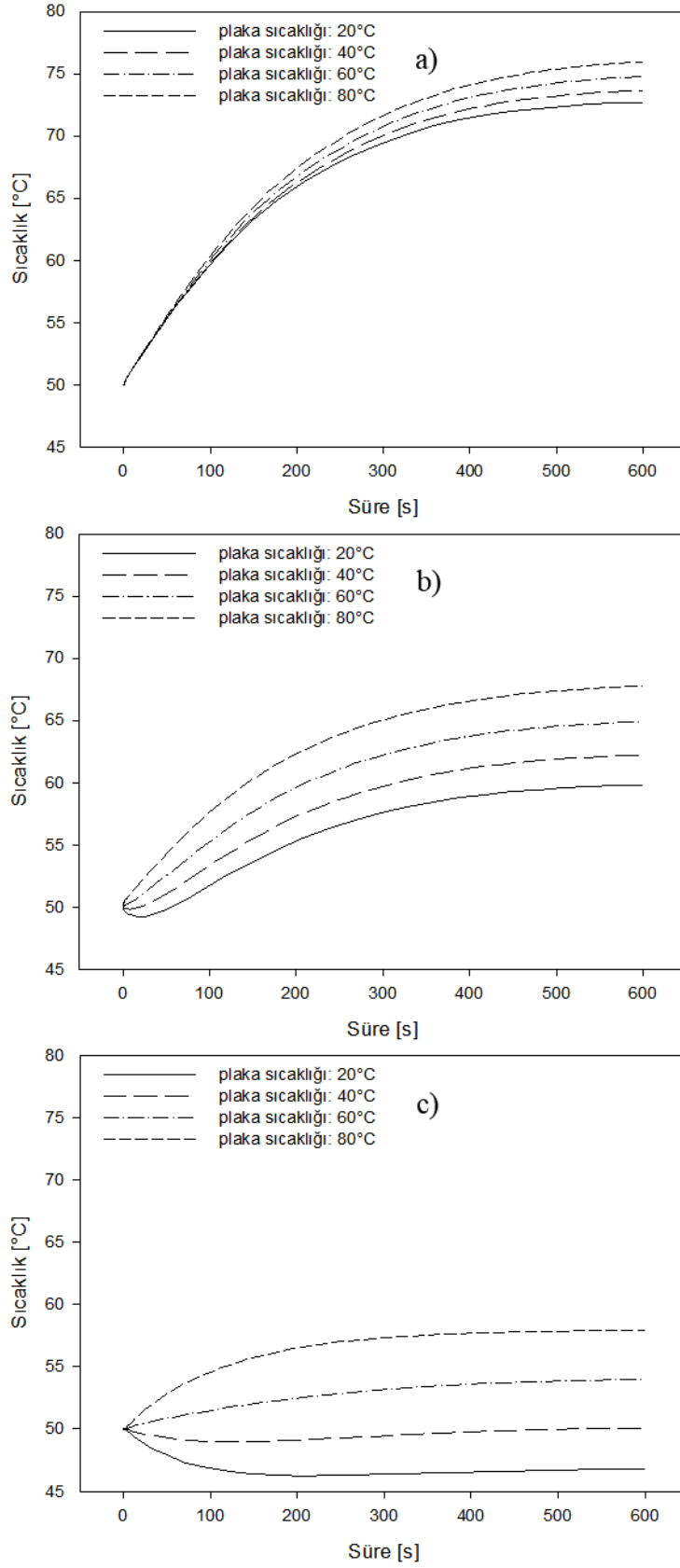
Komponentlerin gücünün düşük olması nedeniyle K-1 noktasının sıcaklığı en fazla 5-6°C artış göstermiştir. 20°C plaka sıcaklığı olan senaryoda K-1 noktasının sıcaklığı 300 saniyeden sonra düşüş göstermektedir. K-3 noktasının sıcaklığı, plaka sıcaklığının 20 ve 40°C olduğu durumlarda ilk andan itibaren düşüş, plaka sıcaklığının 60 ve 80°C olduğu durumlarda ise ilk andan itibaren artış göstermektedir. K-2 noktasının sıcaklığında ise 60 ve 80°C plaka sıcaklıkları için artış, 20°C plaka sıcaklığı için azalış görülmektedir. 40°C plaka sıcaklığında ilk 50 saniye bir miktar düşüş daha sonra is artış görülmektedir. 40°C plaka sıcaklığı durumundaki artış ve azalış miktarı 1°C'nin altındadır. Senaryo-49, Senaryo-53, Senaryo-57 ve Senaryo-61 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.14. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

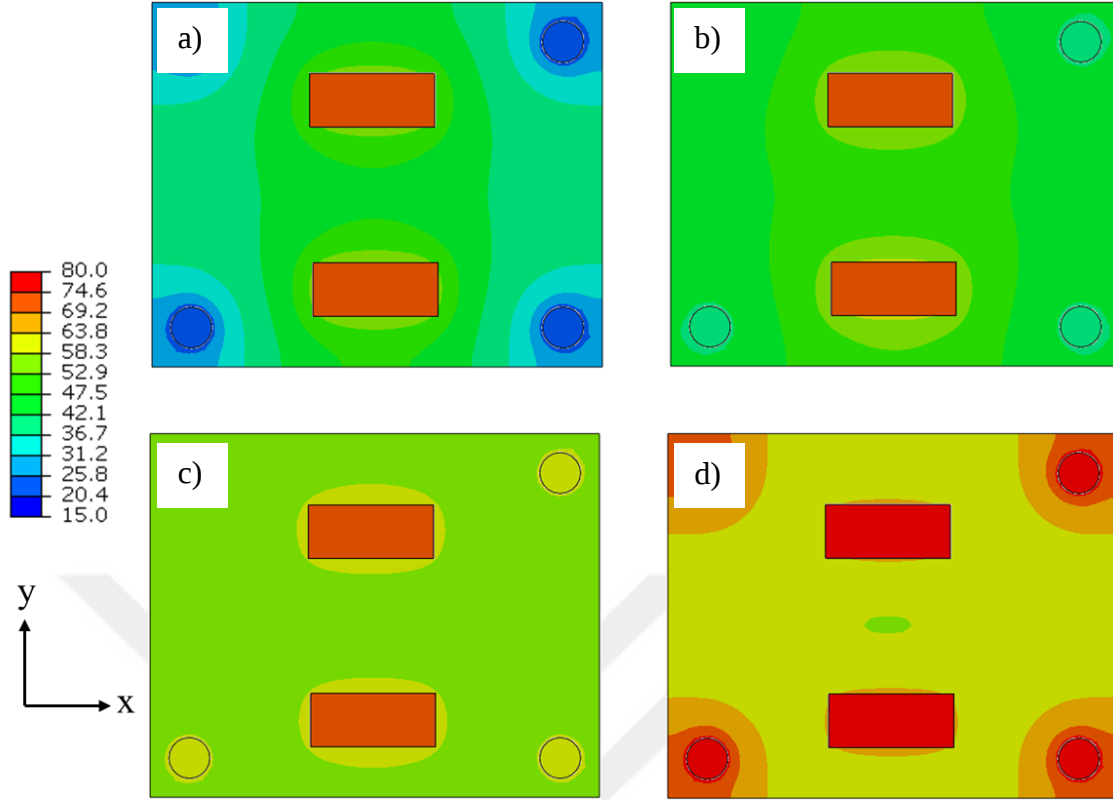
	$T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 60^{\circ}\text{C}$	$T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$
K-1'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	1,5	2,7	4,2	5,9
K-2'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	-2,3	0,4	3,7	7,4
K-3'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	-5,0	-1,6	2,4	6,9

Sistem başlangıç sıcaklığının 50°C ve komponent gç değerinin 4 mW/mm³ olduğu durumda ısıtıcı plakanın 20, 40, 60 ve 80°C sıcaklık değerleri için gerçekleştirilen analizlerin sonuçları şekil 5.24 ve şekil 5.25'te sunulmuştur.





Şekil 5.24. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{\text{ilk}} = 50^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.25. $T_{ilk} = 50^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{plaka} = 20^\circ\text{C}$, b) $T_{plaka} = 40^\circ\text{C}$, c) $T_{plaka} = 60^\circ\text{C}$, d) $T_{plaka} = 80^\circ\text{C}$

Sistemde genel anlamda sistem başlangıç sıcaklığının 50°C , komponentlerin gücünün $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumdaki senaryolara benzer profilde sıcaklık değişimleri görülmektedir. Fakat 4 mW/mm^3 ısı üretimi olan senaryolarda, ısı üretimi miktarı 8 katına çıktığı için K-1 noktasının sıcaklık değerindeki artış çok daha fazla olmakla beraber tüm senaryolarda artmaktadır. K-3 noktasının sıcaklığı, plaka sıcaklığının 20 ve 40°C olduğu durumlarda ilk başta bir miktar azalıp daha sonra artmaktadır. K-2 noktasının sıcaklığı ise yalnızca 20°C plaka sıcaklığında ilk 25 saniye bir miktar düşüp daha sonra artmaktadır. Diğer plaka sıcaklık değerlerinde herhangi bir azalış görülmeden 600 saniye sonuna kadar artmaktadır. Belirtilen senaryolar için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.15’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.15. Farklı T_{plaka} değerleri için $T_{ilk} = 50^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$T_{plaka} = 20^\circ\text{C}$	$T_{plaka} = 40^\circ\text{C}$	$T_{plaka} = 60^\circ\text{C}$	$T_{plaka} = 80^\circ\text{C}$
K-1’deki $\Delta T [^\circ\text{C}]$	22,7	23,7	24,8	26,0
K-2’deki $\Delta T [^\circ\text{C}]$	9,8	12,2	14,9	17,8
K-3’deki $\Delta T [^\circ\text{C}]$	-3,2	0,1	4,0	7,9

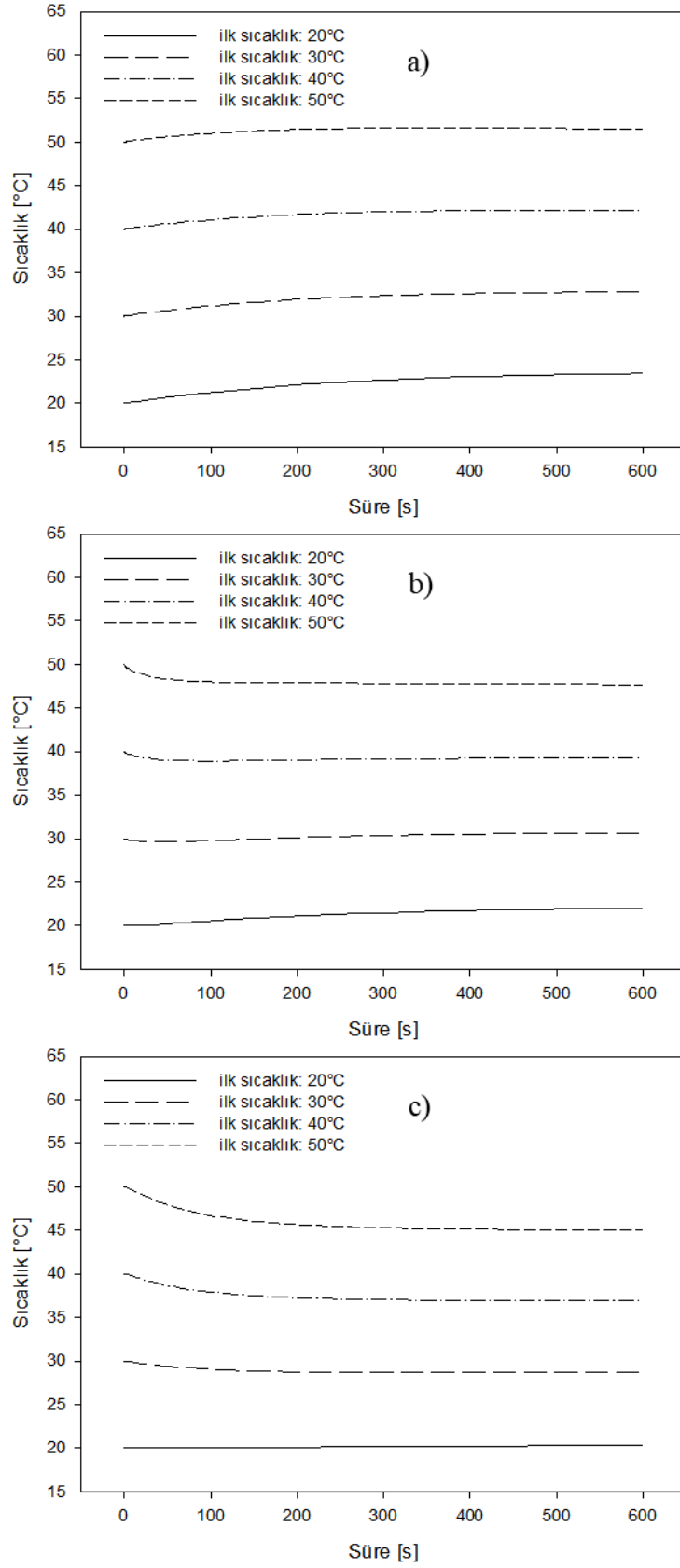
5.1.3. $T_{\text{plaka}} = 20^{\circ}\text{C}$ durumunda, T_{ilk} ve q değerlerinin kart ve komponent sıcaklıkları üzerindeki etkisinin araştırılması

Bu bölümde Çizelge 5.1’de gösterilen Senaryo-1, Senaryo-4, Senaryo-17, Senaryo-20, Senaryo-33, Senaryo-36, Senaryo-49 ve Senaryo-52 için gerçekleştirilen SEY analizlerinin sonuçları paylaşılmıştır. Bu bölümde analiz sonuçları paylaşılan senaryolar Çizelge 5.16’da gösterilmiştir. Bu senaryoların tümünde plaka sıcaklığı 20°C ’de sabit tutulmuştur. Senaryo-1, Senaryo-17, Senaryo-33, Senaryo-49 senaryolarında komponentlerdeki ısı üretiminin $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumda sistem başlangıç sıcaklığının dört farklı değeri ($20, 30, 40$ ve 50°C) için analizler gerçekleştirilmiştir. Senaryo-4, Senaryo-20, Senaryo-36, Senaryo-52 senaryolarında ise komponentlerdeki ısı üretiminin 4 mW/mm^3 olduğu durumda sistem başlangıç sıcaklığının dört farklı değeri ($20, 30, 40$ ve 50°C) için analizler gerçekleştirilmiştir. İlgili analizlerin sonuçları Şekil 5.26 – Şekil 5.29 arasında paylaşılmıştır.

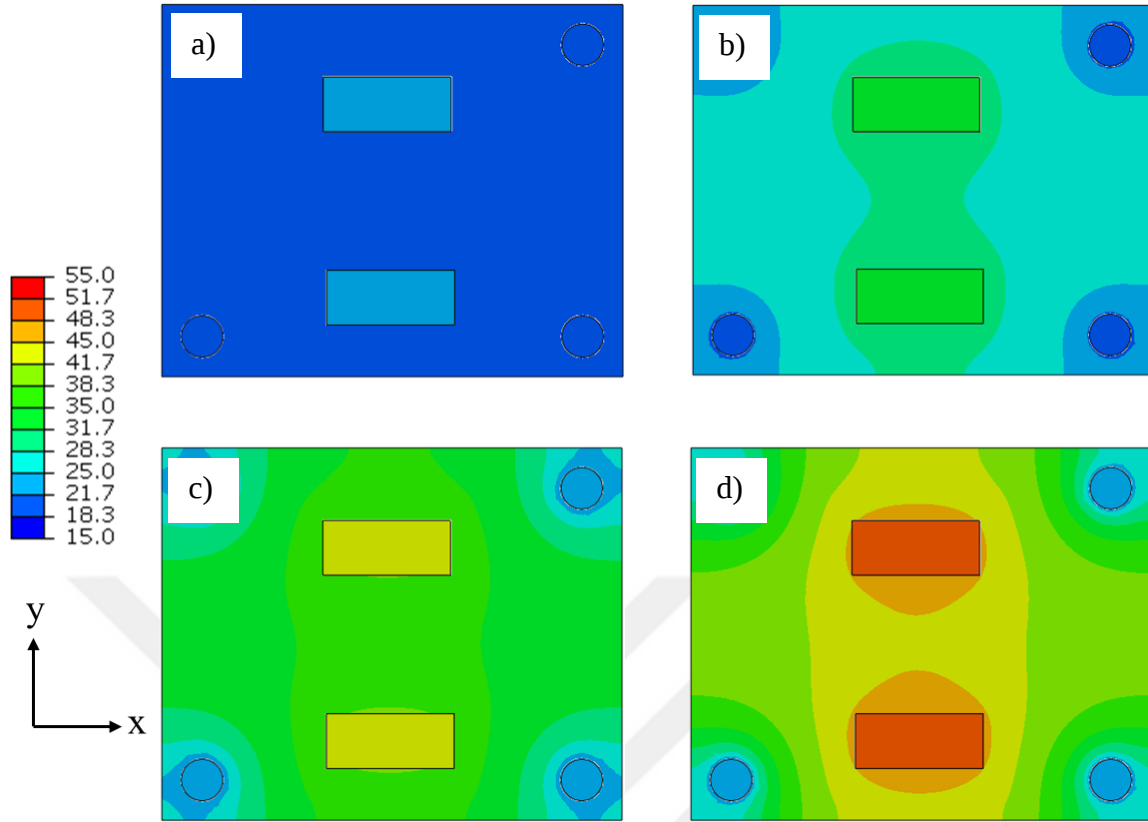
Çizelge 5.16. $T_{\text{plaka}} = 20^{\circ}\text{C}$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları

	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Ortam Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Komponent Gücü [mWmm^3]	Nümerik Yöntem
Senaryo-1	20	20	20	0,5	SEY
Senaryo-4	20	20	20	4	SEY
Senaryo-17	30	30	20	0,5	SEY
Senaryo-20	30	30	20	4	SEY
Senaryo-33	40	40	20	0,5	SEY
Senaryo-36	40	40	20	4	SEY
Senaryo-49	50	50	20	0,5	SEY
Senaryo-52	50	50	20	4	SEY

Isıtıcı plaka sıcaklık değeri 20°C , komponentlerin gücü $0,5 \text{ mW/mm}^3$ iken farklı başlangıç sıcaklıkları için gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de gösterilmiştir.



Şekil 5.26. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{\text{plaka}} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



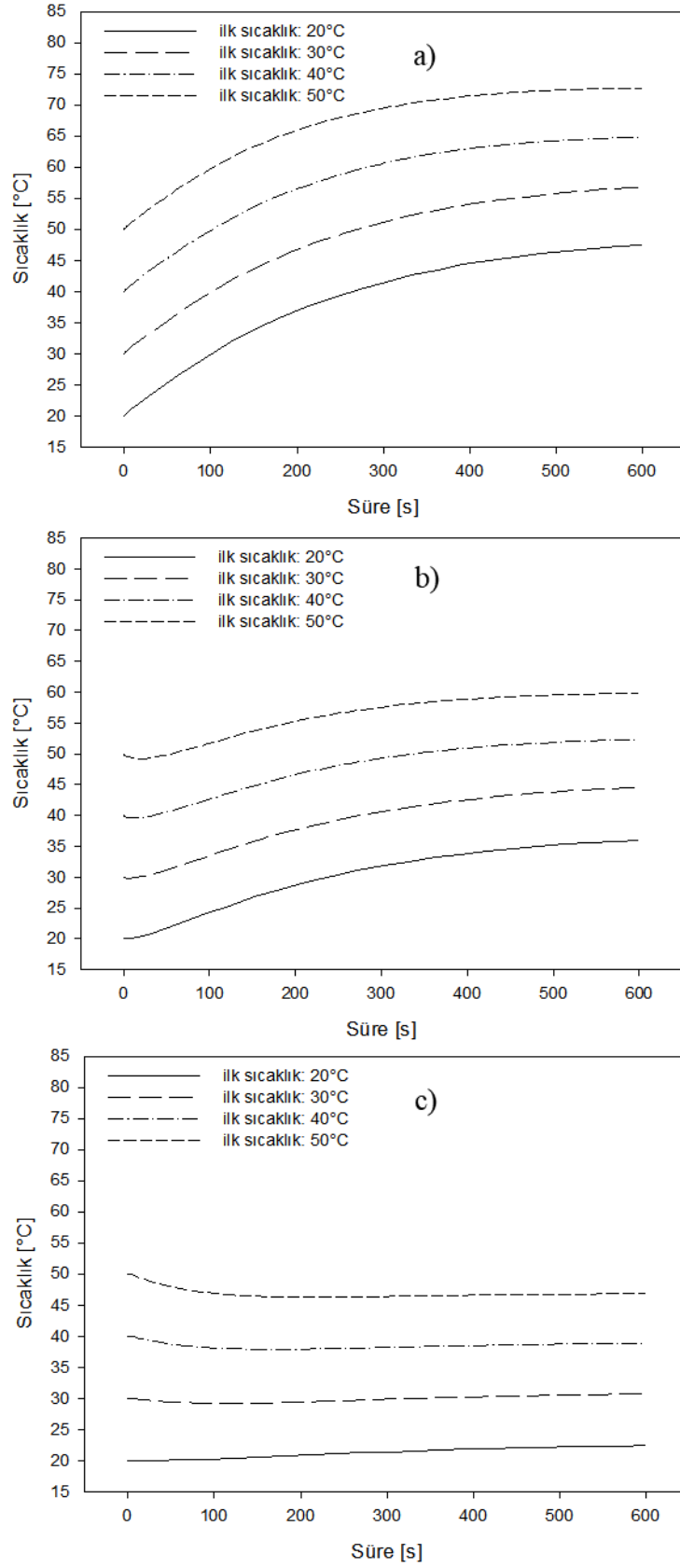
Şekil 5.27. $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{ilk} = 30^{\circ}\text{C}$, c) $T_{ilk} = 40^{\circ}\text{C}$, d) $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$

Şekil 5.26'da görüldüğü gibi K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklık değeri 600 saniye boyunca yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bunun sebebi kart kompleksinin ısınmasını sağlayacak tek kaynağın komponentler olması ve komponentlerde de düşük miktarda ($0,5 \text{ mW/mm}^3$) ısı üretilmesidir. Sistem başlangıç sıcaklığı ve plaka birbirine eşit veya yakın olduğunda ($20\text{-}30^{\circ}\text{C}$) K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklık değişimleri ihmal edilebilir düzeyde olmaktadır. Başlangıç sıcaklığı daha yüksek ($40\text{-}50^{\circ}\text{C}$) olduğunda ise K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıklarında plaka sıcaklığından dolayı $5\text{-}6^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşüş görülmektedir. K-1 noktasının sıcaklığı ise büyük oranda üretilen ısı miktarına bağlı olduğundan sıcaklık artış miktarı tüm başlangıç sıcaklık değerleri için aynı olmaktadır ve bu artış $1\text{-}2^{\circ}\text{C}$ mertebesinde kalmaktadır. Senaryo-1, Senaryo-17, Senaryo-33 ve Senaryo-49 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.17'da gösterilmiştir.

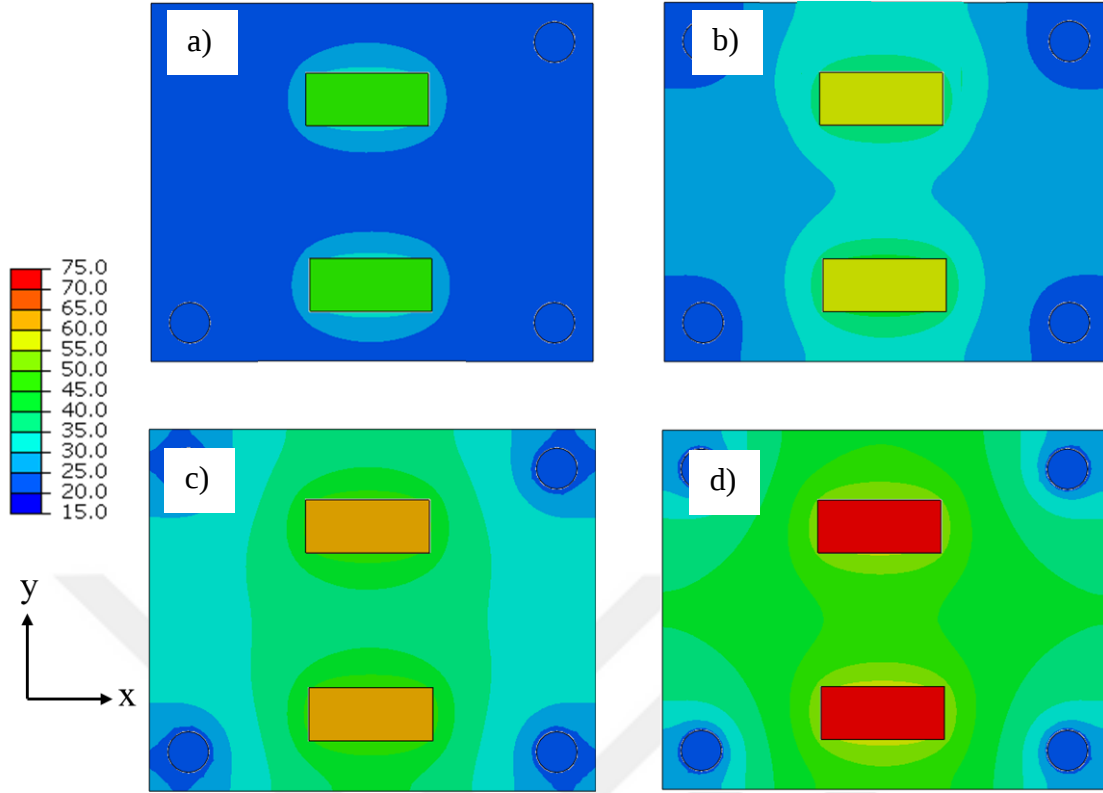
Çizelge 5.17. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$T_{ilk} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{ilk} = 30^{\circ}\text{C}$	$T_{ilk} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$
K-1'deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	3,4	2,8	2,2	1,5
K-2'deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	2,0	0,7	-0,8	-2,3
K-3'deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	0,3	-1,3	-3,1	-5,0

Isıtıcı plaka değeri 20°C , komponentlerin gücü 4 mW/mm^3 iken farklı başlangıç sıcaklıkları için gerçekleştirilen analizlerde elde edilen, ölçüm noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.28'de, 600 saniye sonunda kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin sıcaklık dağılımı Şekil 5.29'da gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.29. $T_{\text{plaka}} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{\text{ilk}} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{\text{ilk}} = 30^{\circ}\text{C}$, c) $T_{\text{ilk}} = 40^{\circ}\text{C}$, d) $T_{\text{ilk}} = 50^{\circ}\text{C}$

K-1 noktasının sıcaklık değeri büyük oranda komponentlerin gücüne bağlı olduğundan tüm başlangıç sıcaklık değerleri için yaklaşık olarak aynı sıcaklık artışını göstermektedir. K-3 noktasının sıcaklık değeri komponentlerin gücüne ihmal edilebilir düzeyde bağlı olduğundan sıcaklık değişimi bu senaryolarda düşük mertebede olmaktadır. Başlangıç sıcaklığının yüksek olduğu ($40, 50^{\circ}\text{C}$) durumlarda kart ile plaka arasında iletim ve ışınlım, kart ile kabin içerisindeki hava arasında da taşınım yolları ile gerçekleşen ısı transferinden dolayı ilk 100 saniyede K-3 noktasının sıcaklığı bir miktar düşmektedir. K-2 noktası ise hem komponentlerde üretilen ısı miktarından hem de ortam sıcaklığından etkilendiğinden dolayı dört senaryoda da sıcaklığı yaklaşık 15°C mertebesinde artmıştır. Senaryo-4, Senaryo-20, Senaryo-36 ve Senaryo-52 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.18. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{\text{plaka}} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$T_{\text{ilk}} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 30^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 50^{\circ}\text{C}$
K-1’deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	27,5	26,8	24,8	22,7
K-2’deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	16,0	14,6	12,3	9,8
K-3’deki $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	2,4	0,7	-1,2	-3,2

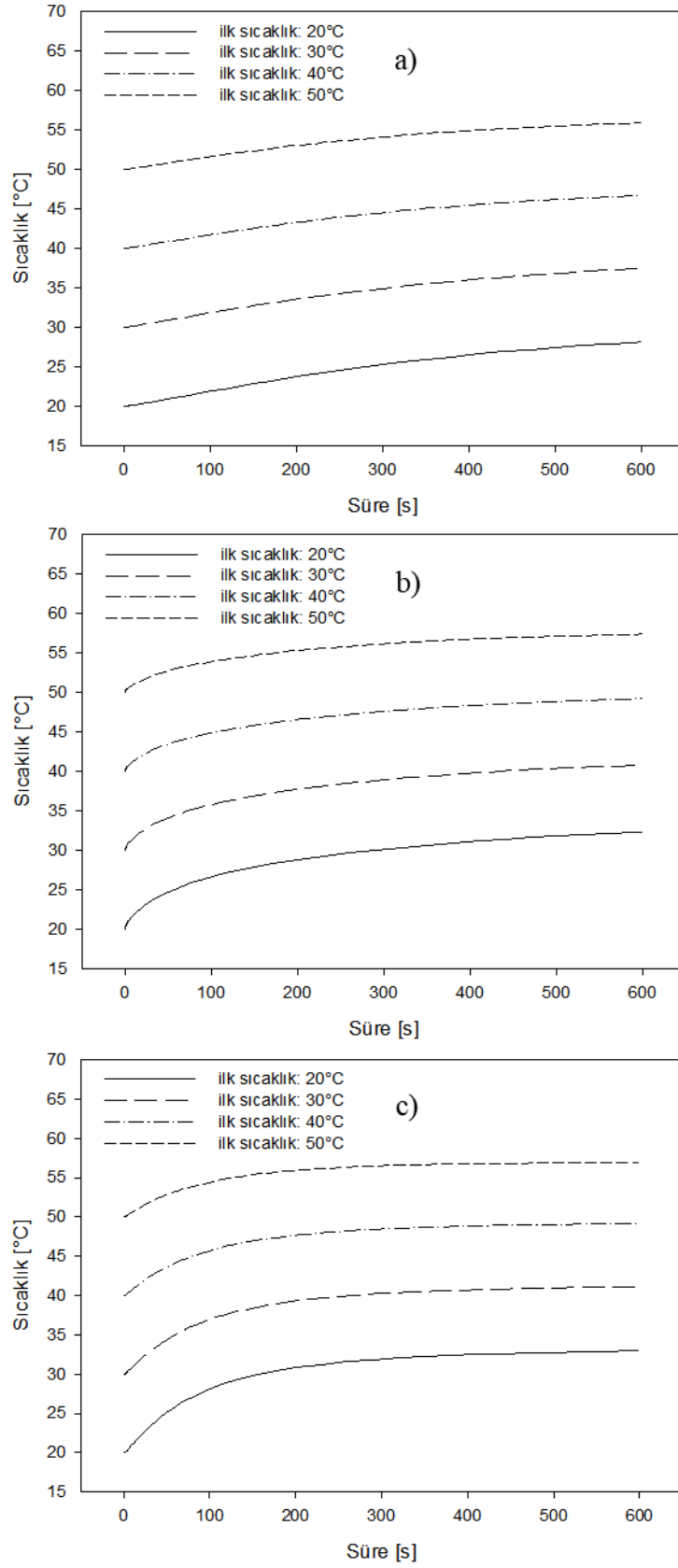
5.1.4. $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ durumunda, T_{ilk} ve q değerlerinin kart ve komponent sıcaklıkları üzerindeki etkisinin araştırılması

Bu bölümde Çizelge 5.1’de gösterilen Senaryo-13, Senaryo-16, Senaryo-29, Senaryo-32, Senaryo-48, Senaryo-48, Senaryo-61 ve Senaryo-64 için gerçekleştirilen SEY analizlerinin sonuçları paylaşılmıştır. Bu bölümde analiz sonuçları paylaşılan senaryolar Çizelge 5.19’da gösterilmiştir. Bu senaryoların tümünde plaka sıcaklığı 80°C ’de sabit tutulmuştur. Senaryo-13, Senaryo-29, Senaryo-45, Senaryo-61 senaryolarında komponentlerdeki ısı üretiminin $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumda sistem başlangıç sıcaklığının dört farklı değeri ($20, 30, 40$ ve 50°C) için analizler gerçekleştirilmiştir. Senaryo-16, Senaryo-32, Senaryo-48, Senaryo-64 senaryolarında ise komponentlerdeki ısı üretiminin 4 mW/mm^3 olduğu durumda sistem başlangıç sıcaklığının dört farklı değeri ($20, 30, 40$ ve 50°C) için analizler gerçekleştirilmiştir. İlgili analizlerin sonuçları bu bölümde Şekil 5.30 – Şekil 5.33 arasında paylaşılmıştır

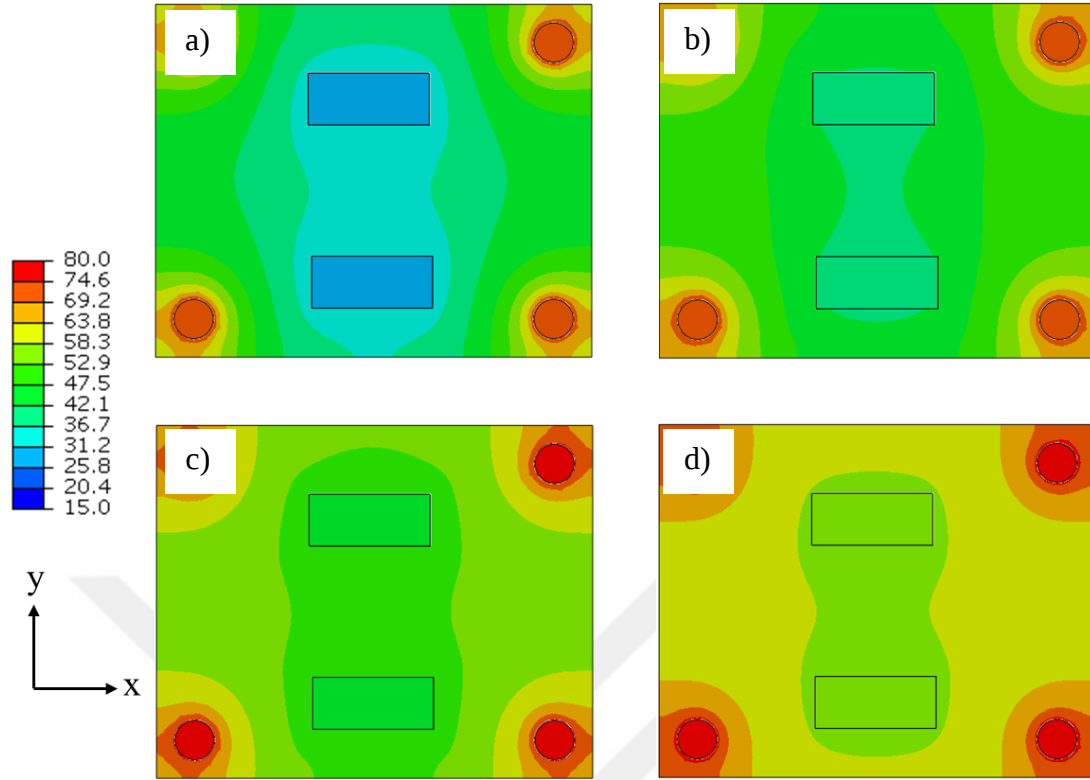
Çizelge 5.19. $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ durumu için SEY analizi gerçekleştirilen sınır şartları

	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Ortam Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Komponent Gücü [mW/mm^3]	Nümerik Yöntem
Senaryo-13	20	20	80	0,5	SEY
Senaryo-16	20	20	80	4	SEY
Senaryo-29	30	30	80	0,5	SEY
Senaryo-32	30	30	80	4	SEY
Senaryo-45	40	40	80	0,5	SEY
Senaryo-48	40	40	80	4	SEY
Senaryo-61	50	50	80	0,5	SEY
Senaryo-64	50	50	80	4	SEY

Isıtıcı plaka değeri 80°C , komponentlerin gücü $0,5 \text{ mW/mm}^3$ iken farklı başlangıç sıcaklıkları için gerçekleştirilen analizlerde elde edilen, ölçüm noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.30’da, 600 saniye sonunda kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin sıcaklık dağılımı Şekil 5.31’de gösterilmiştir.



Şekil 5.30. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



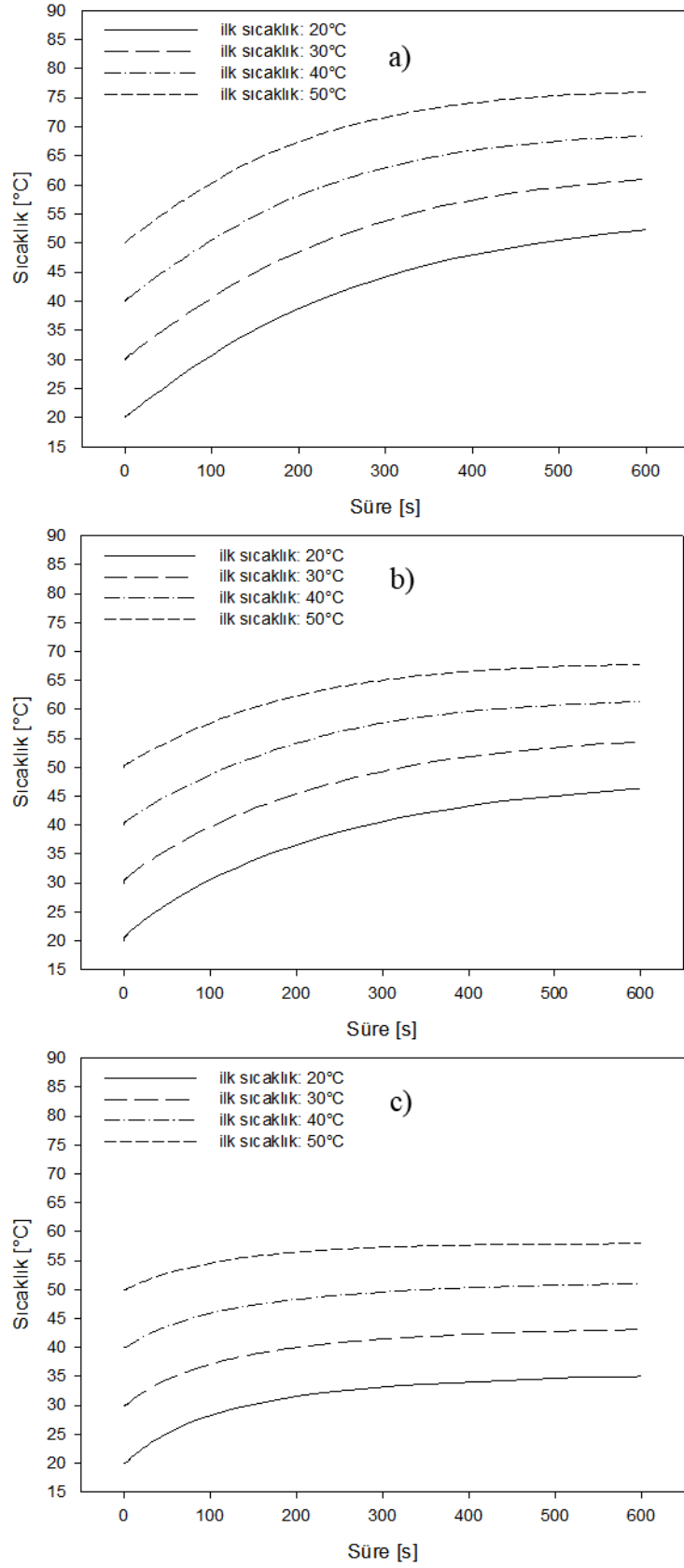
Şekil 5.31. $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $Q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{\text{ilk}} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{\text{ilk}} = 30^{\circ}\text{C}$, c) $T_{\text{ilk}} = 40^{\circ}\text{C}$, d) $T_{\text{ilk}} = 50^{\circ}\text{C}$

$0,5 \text{ mW/mm}^3$ ısı üretiminin sistemin ısınması üzerinde önemli oranda bir etkisi görülmemektedir. Plaka sıcaklığının 80°C olmasından kaynaklı olarak sistem ile plaka arasında önemli miktarda ısı transferi gerçekleşip K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıkları artış göstermektedir. Senaryo-13, Senaryo-29, Senaryo-45 ve Senaryo-61 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.20’de gösterilmiştir.

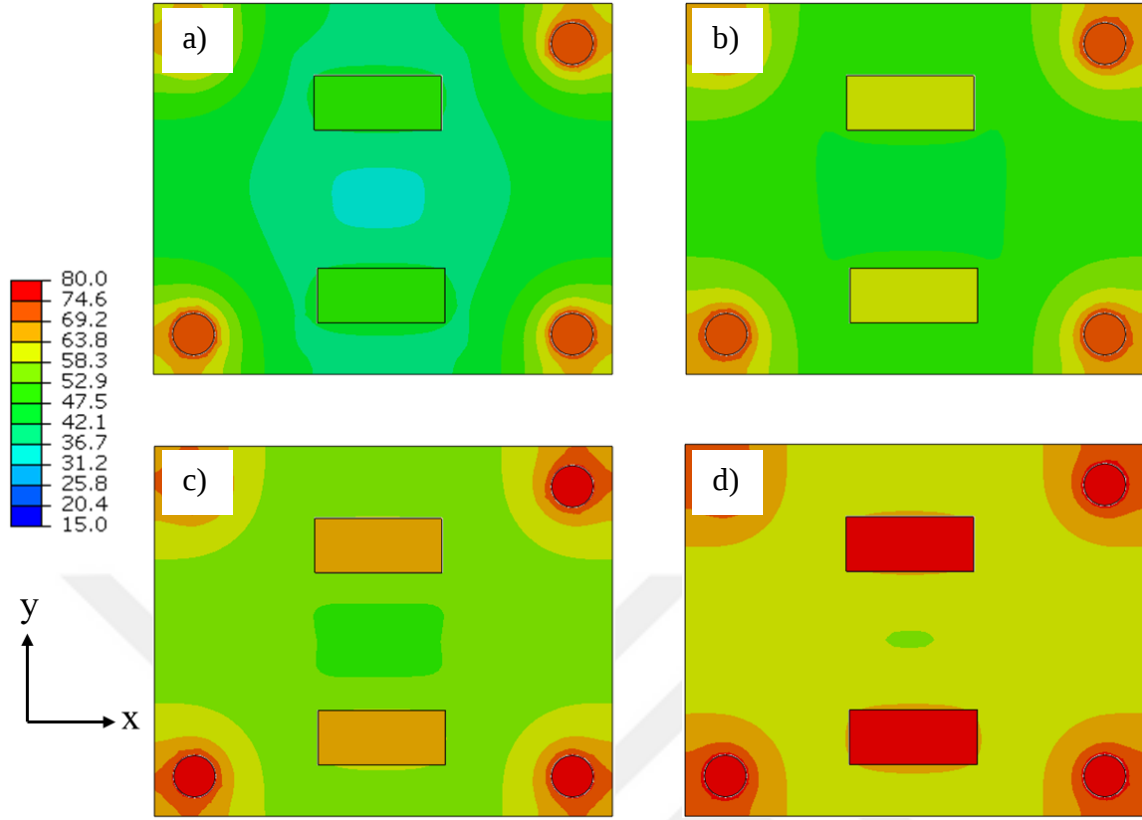
Çizelge 5.20. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

	$T_{\text{ilk}} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 30^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 50^{\circ}\text{C}$
K-1’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	8,2	7,5	6,7	5,9
K-2’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	12,3	10,8	9,2	7,4
K-3’deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	13,0	11,1	9,2	6,9

Isıtıcı plaka değeri 80°C , komponentlerin gücü 4 mW/mm^3 iken farklı başlangıç sıcaklıkları için gerçekleştirilen analizlerde elde edilen, ölçüm noktalarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.32’de, 600 saniye sonunda kart ve komponentlerin üst yüzeylerinin sıcaklık dağılımı Şekil 5.33’te gösterilmiştir.



Şekil 5.32. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda sıcaklığın zamana bağlı değişimi, a) K-1, b) K-2, c) K-3



Şekil 5.33. $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda 600 saniye sonundaki yüzey sıcaklık dağılımı, a) $T_{\text{ilk}} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{\text{ilk}} = 30^{\circ}\text{C}$, c) $T_{\text{ilk}} = 40^{\circ}\text{C}$, d) $T_{\text{ilk}} = 50^{\circ}\text{C}$

Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'te sonuçları paylaşılan analizlerde, plaka sıcaklığının 80°C ve komponentlerdeki ısıl gücün $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumda gerçekleştirilen analizler ile benzer eğilimde ısı transferi gerçekleşmektedir. $0,5 \text{ mW/mm}^3$ ısı miktarı olan senaryolara göre K-1 noktasının sıcaklığı oldukça fazla artış göstermektedir. Senaryo-16, Senaryo-32, Senaryo-48 ve Senaryo-64 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 600 saniye sonundaki sıcaklık değişim değerleri Çizelge 5.21'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.21. Farklı T_{ilk} değerleri için $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniyedeki sıcaklık değişim değerleri

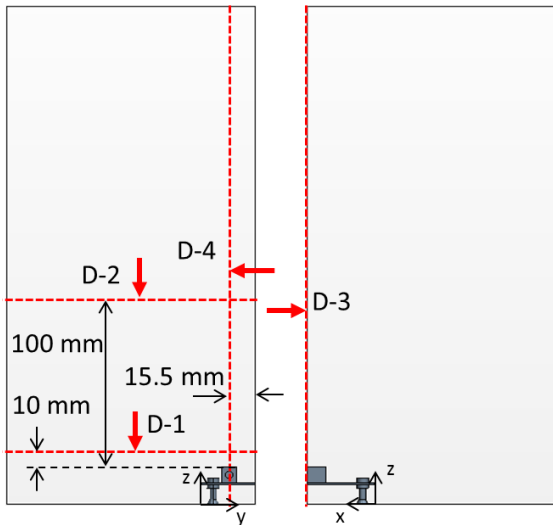
	$T_{\text{ilk}} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 30^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ilk}} = 50^{\circ}\text{C}$
K-1'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	32,2	30,9	25,8	26
K-2'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	26,3	24,4	14,9	17,8
K-3'deki ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	15,0	13,1	2,2	7,9

5.2. HAD Analizi ve Sonuçları

Bu bölümde Çizelge 5.1’de gösterilen senaryolar (Senaryo-65 – Senaryo-69) için gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları paylaşılmıştır. SEY ve HAD analizleri gerçekleştirilen senaryolar Çizelge 5.22’de gösterilmiştir. Sonuçlar, elektronik kart kompleksi üzerindeki belirli noktaların sıcaklık-zaman grafiği ve kabin içerisindeki havanın belirli kesitler için 100., 300. ve 600. saniyelerdeki sıcaklık, hız ve basınç kontur grafiği olarak her bir senaryo için ayrı ayrı sunulmuştur. Sonuçları paylaşılan kesitler ve noktalar Şekil 5.34’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.22. SEY ve HAD analizi gerçekleştirilen senaryolar

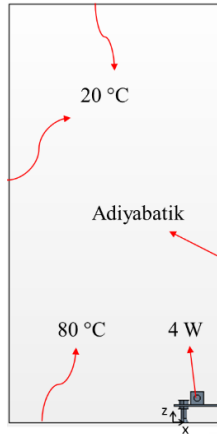
	Sistem Başlangıç Sıcaklığı [°C]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Isıtıcı Plaka Sıcaklığı [°C]	Komponent Gücü [mW/mm ³]	Nümerik Yöntem
Senaryo-65	20	HAD hava sıcaklık sonuçları	80	4	SEY-HAD
Senaryo-66	50	HAD hava sıcaklık sonuçları	20	0,5	SEY-HAD
Senaryo-67	50	HAD hava sıcaklık sonuçları	20	4	SEY-HAD
Senaryo-68	50	HAD hava sıcaklık sonuçları	80	0,5	SEY-HAD
Senaryo-69	50	HAD hava sıcaklık sonuçları	80	4	SEY-HAD



Şekil 5.34. Kapalı ortam içerisindeki havanın 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık, hız ve basınç sonuçlarının paylaşıldığı kesit düzlemleri

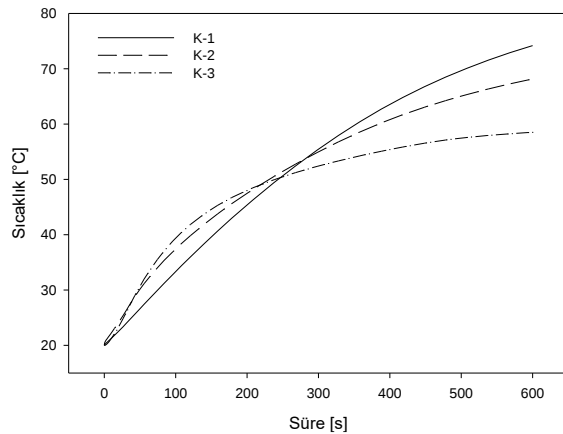
$T_{ilk} = 20^\circ\text{C}$, $T_{plaka} = 80^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ olan durum için elde edilen analiz sonuçları

Bu kısımda tüm sistemin başlangıç sıcaklığının 20°C , ısıtıcı plaka sıcaklığının 80°C olduğu ve komponentlere verilen gücün 4 mW/mm^3 olduğu durum için gerçekleştirilen analiz sonuçları paylaşılmıştır. Kapalı hacmin tabanı (ısıtıcı yüzey) hariç tüm duvarlara 20°C 'de sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Bu kısımda sonuçları paylaşılan analiz sınır şartları Şekil 5.35'te gösterilmiştir.

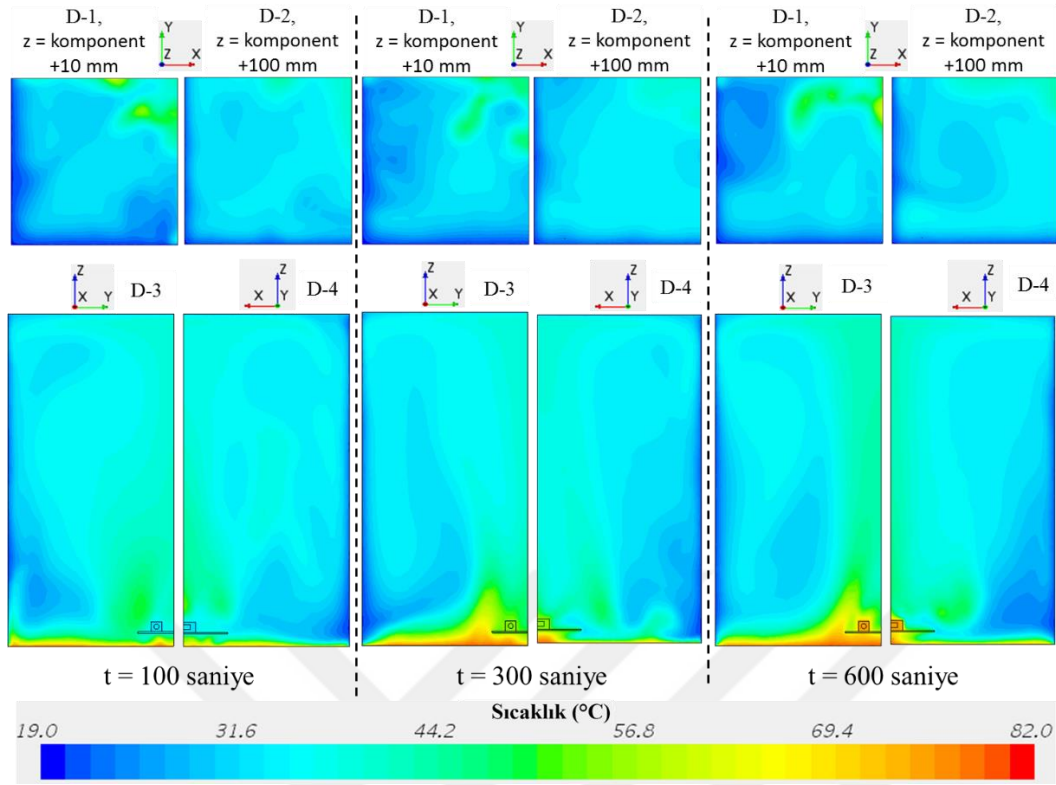


Şekil 5.35. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^\circ\text{C}$, $T_{plaka} = 80^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları şematik gösterimi

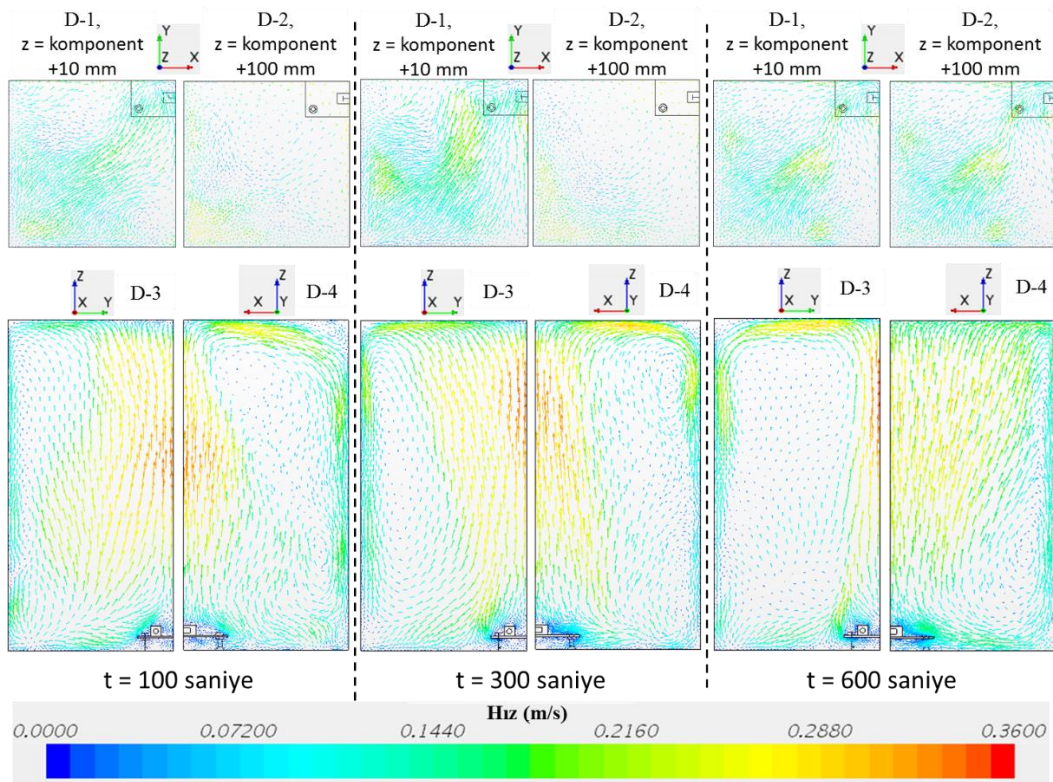
Kart kompleksi üzerindeki K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniye boyunca sıcaklık değişim grafikleri Şekil 5.36'da sunulmuştur. Kapalı hacim içerisindeki havanın 100., 300. ve 600. saniyeler için, farklı kesitlerdeki sıcaklık, hız ve basınç dağılım grafikleri Şekil 5.37-Şekil 5.39 arasında gösterilmiştir.



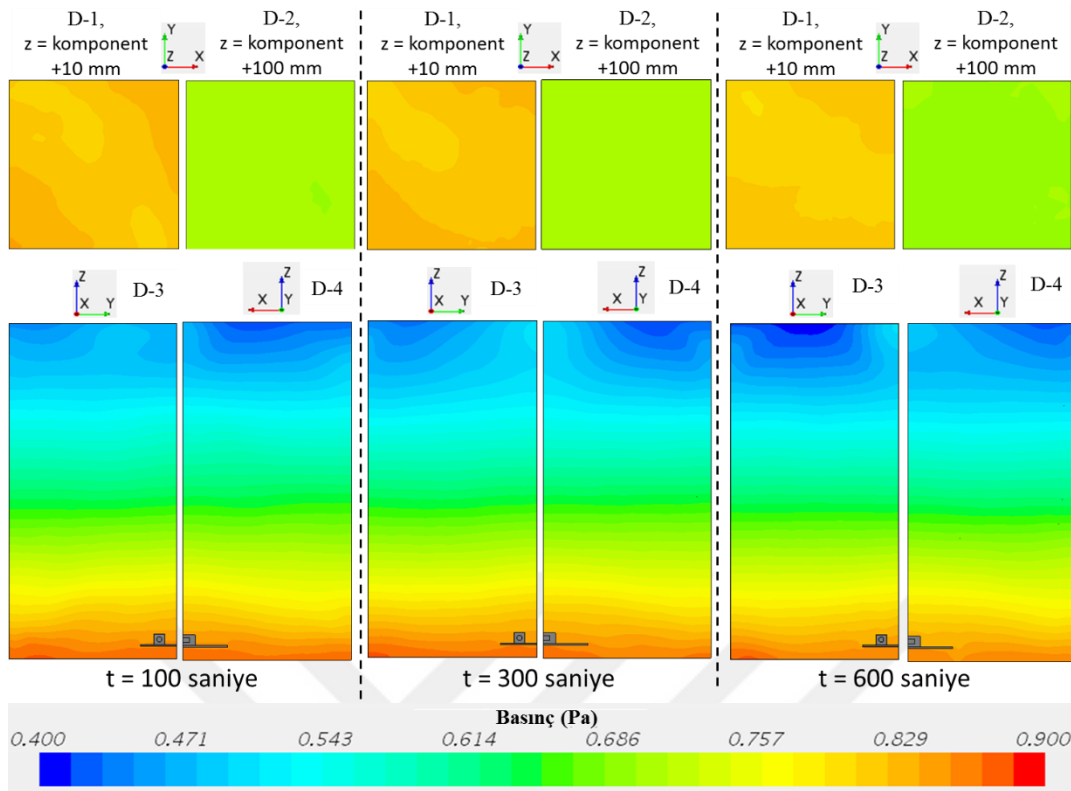
Şekil 5.36. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^\circ\text{C}$, $T_{plaka} = 80^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.37. $T_{\text{ilk}} = T_{\text{duvarlar}} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları



Şekil 5.38. $T_{\text{ilk}} = T_{\text{duvarlar}} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları



Şekil 5.39. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları

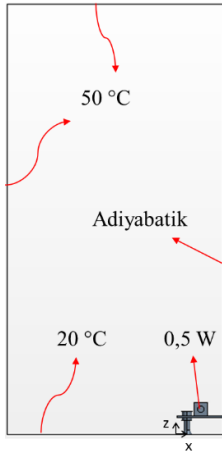
Şekil 5.36’da, en hızlı ısınmanın ve kararlı hale en çabuk yaklaşmanın K-3 noktasında olduğu görülmektedir. En yavaş ısınma ise K-1 noktasında görülmektedir. İlk 250 saniye üç noktadan en sıcak olan K-3 noktası, en soğuk olan ise K-1 noktasıdır. Yaklaşık 300 saniyeden sonra ise en sıcak nokta K-1, en soğuk nokta K-3 noktası olmaktadır. Bu durumun sebebi, ısıtıcı plaka ile K-3 noktası arasındaki termal direncin, komponentin ısı üretilen kısmı ile K-1 noktası arasındaki termal dirençten ilk 300 saniyede daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Benzer durum Şekil 5.37’da gösterilen sıcaklık kontur grafiğinde de görülmektedir. 100. saniyede ve 300. saniyede ısıtıcı plaka üzerindeki bölgenin sıcaklık değeri komponent ve civarındaki sıcaklık değerinden daha yüksektir. 600. saniyede ise komponent sıcaklığı diğer tüm bölgelerden yüksek olmaktadır. Isıtıcı plaka, 600 saniye boyunca 80°C ’de sabit tutulduğu için ve geri kalan tüm bölgelerin başlangıç sıcaklığı 20°C olduğu için ilk anlarda ısıtıcı plakanın hemen her bölgesinde doğal taşınım ile ısınan hava yükselmektedir. İlerleyen sürelerde hem hava hem de kart kompleksi ısınmaktadır. Komponent sıcaklığı dâhili ısınmadan kaynaklı olarak arttıkça kart kompleksi üzerindeki havanın ısınması ve

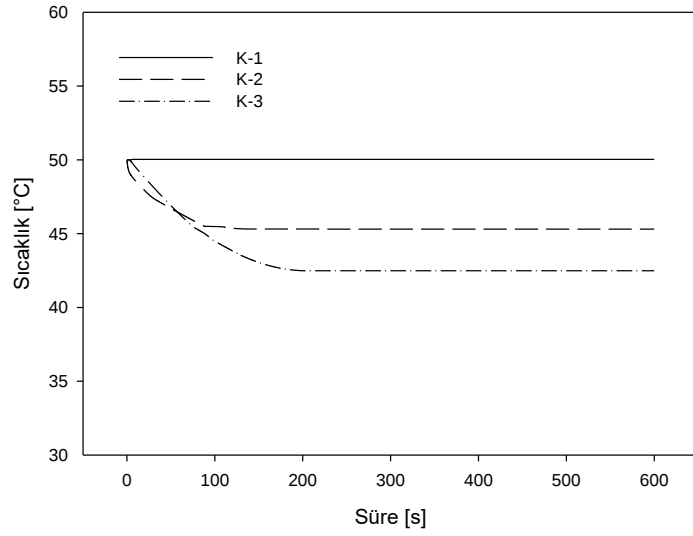
doğal taşınım ile hareketi diğer bölgelerden daha fazla olmaktadır. Isıtıcı plaka hariç kabinin tüm duvarları 20°C’de sabit tutulduğundan duvarlara yakın bölgelerdeki hava sıcaklığı diğer bölgelerden daha düşük olmaktadır. Böylece hava hareketi ilk anlarda hemen her bölgede birbirine yakın olarak görülürken, son anlarda kart kompleksi civarında ısınıp yükselip duvarlara yakın bölgelerde alçalma şeklinde gerçekleşmektedir. Bu durum Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’te sunulan sıcaklık ve hız dağılım grafiklerinde görülmektedir. Şekil 5.39’de görüldüğü üzere hava hareketinin daha fazla olduğu yerlerde basınç değerleri daha düşük değerlerde çıkmaktadır.

$T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ olan durum için elde edilen analiz sonuçları

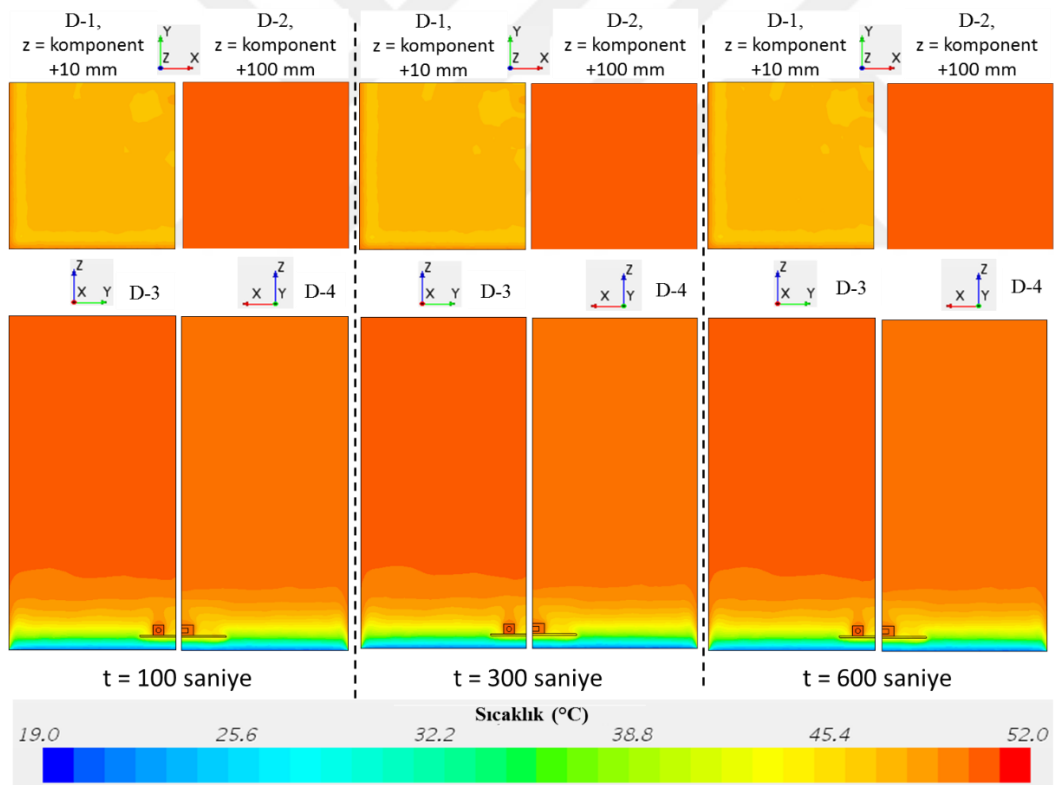
Bu kısımda tüm sistemin başlangıç sıcaklığının 50°C, ısıtıcı plaka sıcaklığının 20°C olduğu ve komponentlere verilen gücün 0,5 mW/mm³ olduğu durum için gerçekleştirilen analiz sonuçları paylaşılmıştır. Kapalı hacmin tabanı (ısıtıcı yüzey) hariç tüm duvarlara 50°C’de sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Bu kısımda sonuçları paylaşılan analiz sınır şartları Şekil 5.40’ta gösterilmiştir. Kart kompleksi üzerindeki K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniye boyunca sıcaklık değişim grafikleri Şekil 5.41’de sunulmuştur. Kapalı hacim içerisindeki havanın 100., 300. ve 600. saniyeler için, farklı kesitlerdeki sıcaklık, hız ve basınç dağılım grafikleri Şekil 5.42-Şekil 5.44 arasında gösterilmiştir.



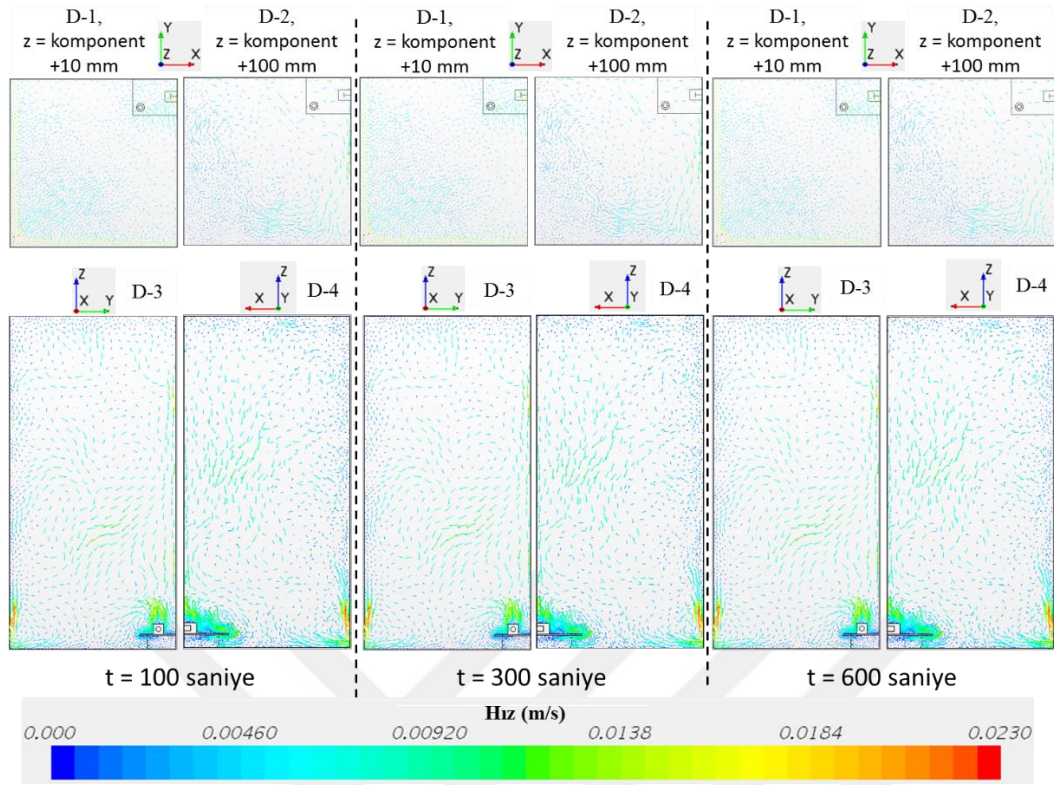
Şekil 5.40. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları şematik gösterimi



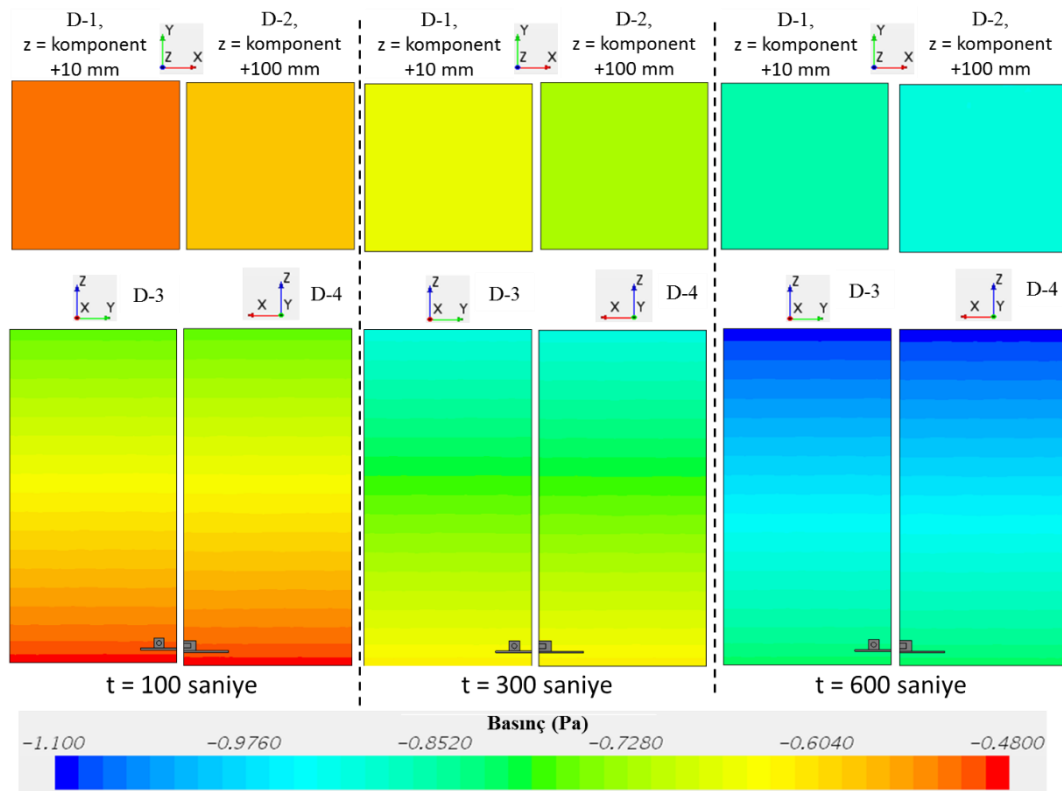
Şekil 5.41. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.42. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları



Şekil 5.43. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları

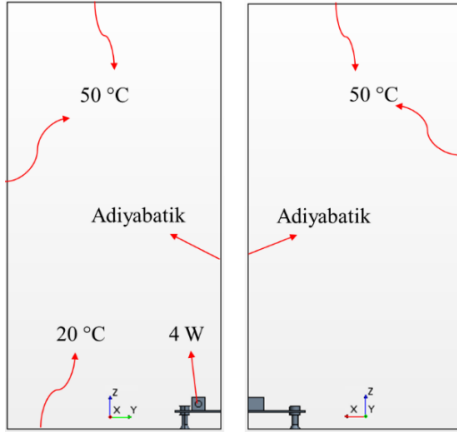


Şekil 5.44. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları

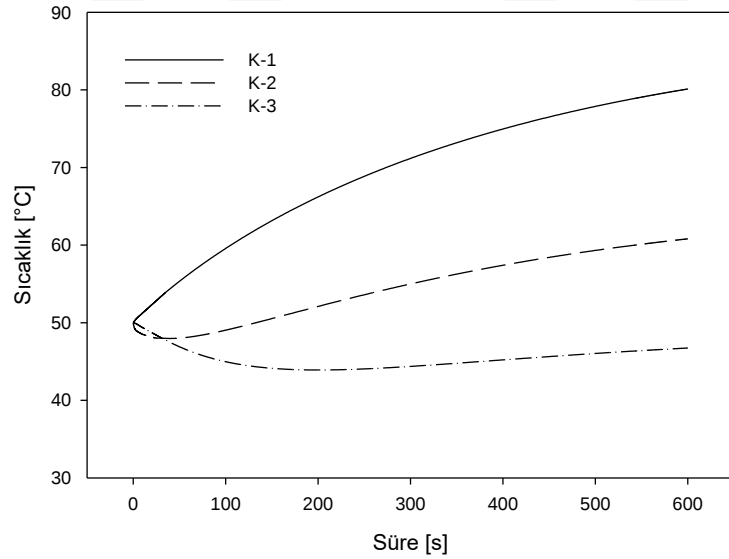
Bu senaryoda komponent gücü $0,5 \text{ mW/mm}^3$ değerindedir. Bu değer sistem sıcaklığına etkisi oldukça düşük olan bir değerdir. Öte yandan ısıtıcı plaka sıcaklığı analiz süresi boyunca 20°C 'de diğer duvarlar da 50°C 'de sabit tutulmuştur. Bu durum ısıtıcı plakanın, havanın ve kart kompleksinin sıcaklığını düşürücü yönde etkisi olmuştur. Bu sebeple komponent sıcaklığı 600 saniye boyunca hemen hemen sabit kalmıştır. Kart üzerindeki K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıkları ise sırasıyla yaklaşık 100 ve 200 saniye boyunca $4\text{-}5$ ve $6\text{-}7^\circ\text{C}$ düşüş gösterip daha sonra sabit kalmıştır. K-1, K-2 ve K-3 noktaları için bahsedilen durumlar Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de görülmektedir. Hem komponent gücü düşük olduğundan hem de plaka sıcaklığı diğer duvarların sıcaklığından ve sistem başlangıç sıcaklığından düşük olduğundan dolayı sistemde önemli miktarda doğal taşınım hareketi görülmemektedir. Bu durum, Şekil 5.42 ve Şekil 5.43'te verilen sıcaklık ve hız vektör dağılımında görülmektedir.

$T_{ilk} = 50^\circ\text{C}$, $T_{plaka} = 20^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ olan durum için elde edilen analiz sonuçları

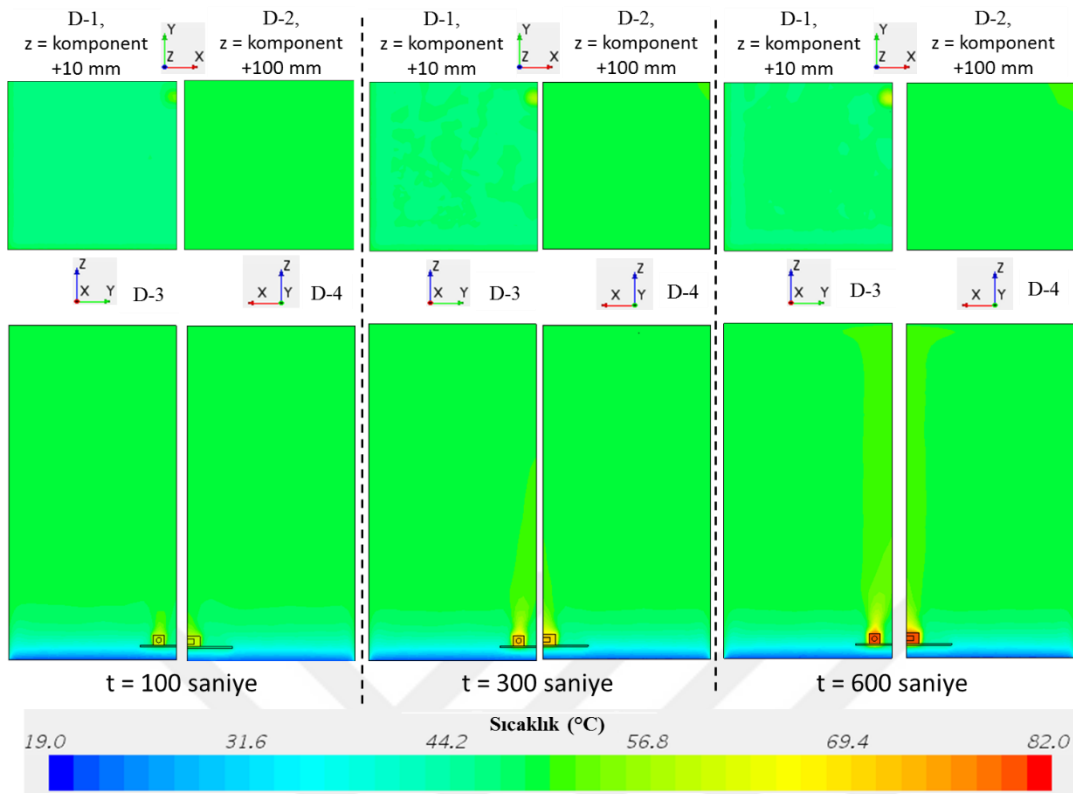
Bu kısımda tüm sistemin başlangıç sıcaklığının 50°C , ısıtıcı plaka sıcaklığının 20°C olduğu ve bir önceki kısımda sonuçları paylaşılan analizlerden farklı olarak komponentlere verilen gücün 4 mW/mm^3 olduğu durum için gerçekleştirilen analiz sonuçları paylaşılmıştır. Kapalı hacmin tabanı (ısıtıcı yüzey) hariç tüm duvarlara 50°C 'de sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Bu kısımda sonuçları paylaşılan analiz sınır şartları Şekil 5.45'te gösterilmiştir. Kart kompleksi üzerindeki K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniye boyunca sıcaklık değişim grafikleri Şekil 5.46'da sunulmuştur. Kapalı hacim içerisindeki havanın 100., 300. ve 600. saniyeler için, farklı kesitlerdeki sıcaklık, hız ve basınç dağılım grafikleri Şekil 5.47-Şekil 5.49 arasında gösterilmiştir.



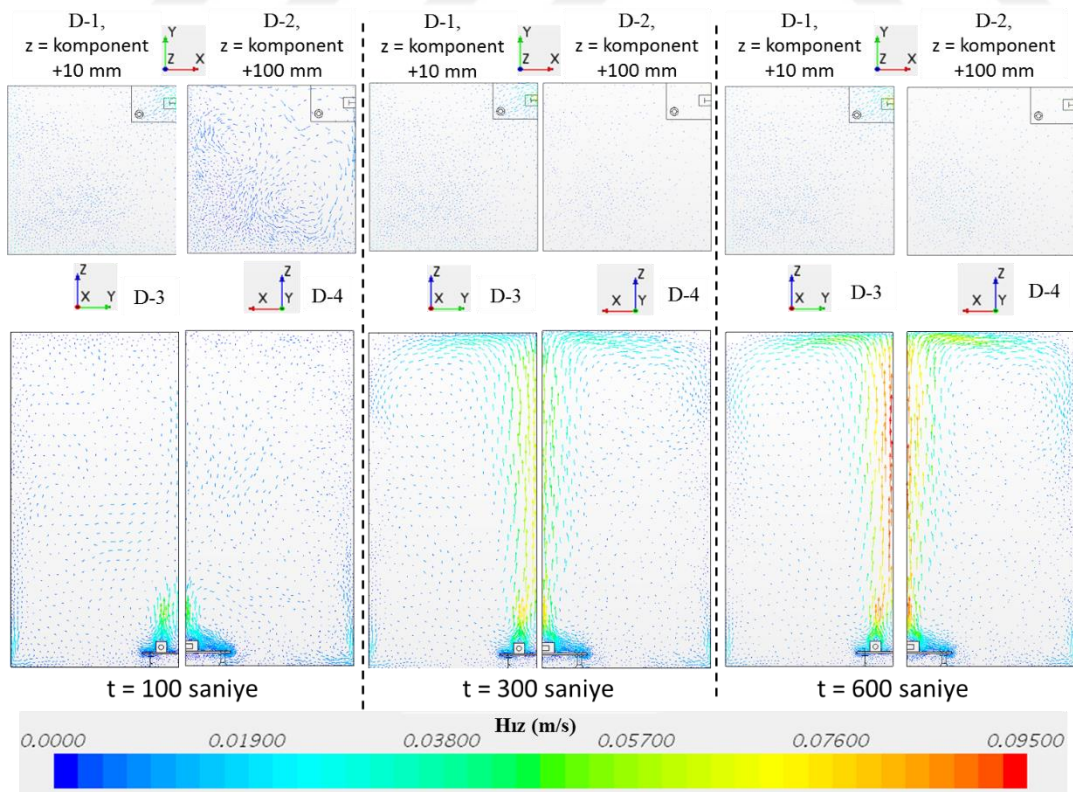
Şekil 5.45. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları şematik gösterimi



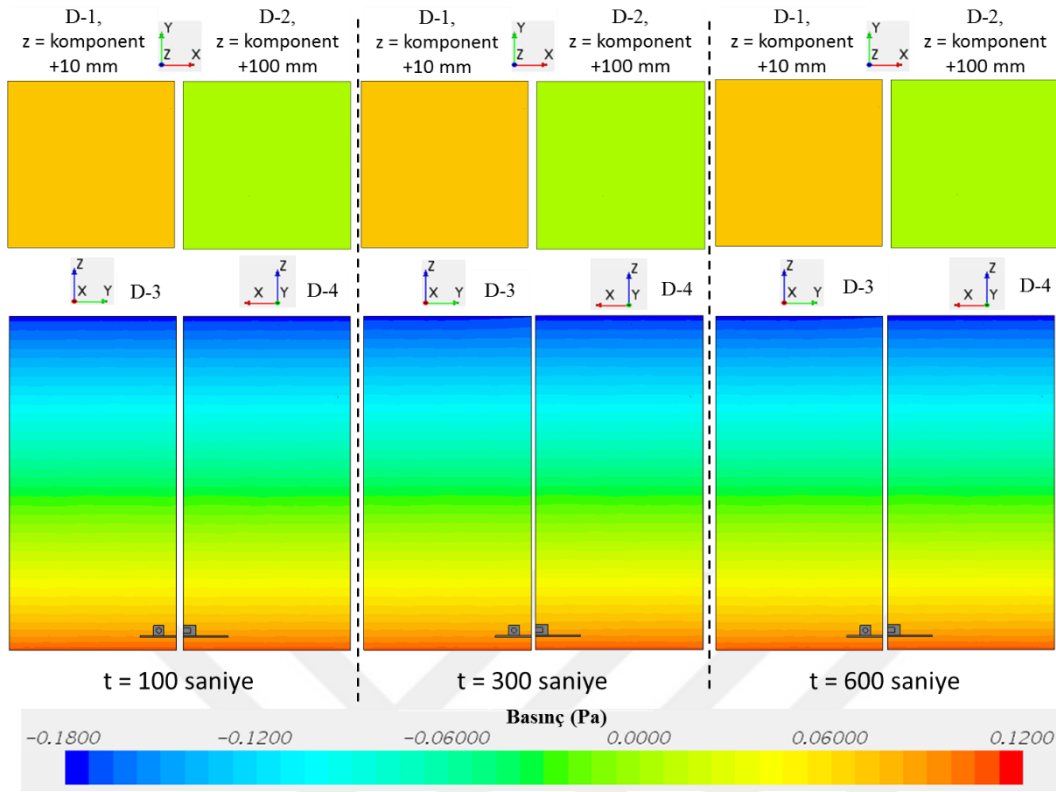
Şekil 5.46. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.47. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları



Şekil 5.48. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları

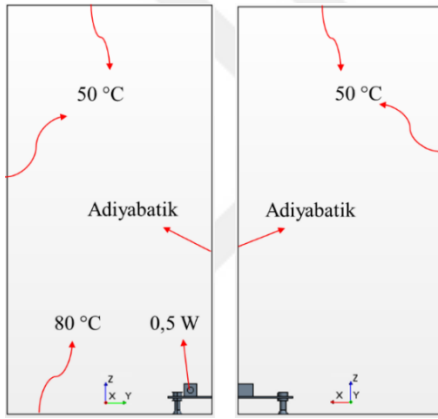


Şekil 5.49. $T_{\text{ilk}} = T_{\text{duvarlar}} = 50^\circ\text{C}$, $T_{\text{plaka}} = 20^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları

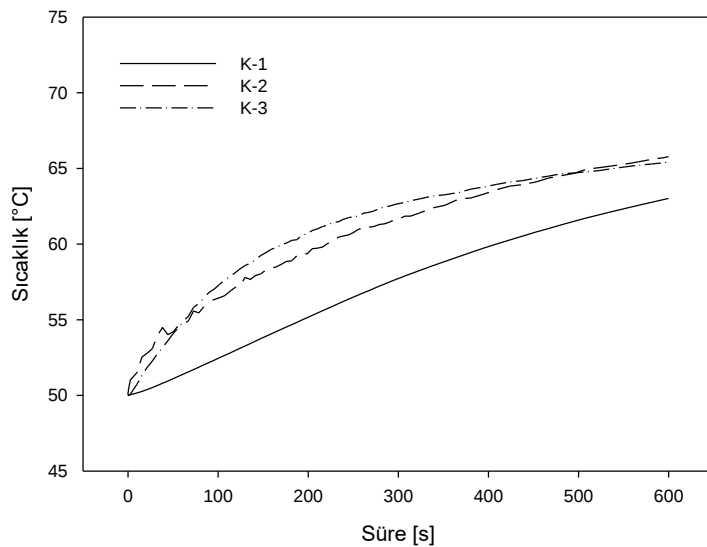
Bu senaryoda komponent gücü 4 mW/mm^3 olduğu için kart kompleksinin ve havanın ısınmasında önemli rol oynamaktadır. Şekil 5.46'da görüldüğü üzere K-1 noktası ilk andan itibaren ısınmaktadır. K-2 ve K-3 noktaları ise, ilk sıcaklığın 50°C ve plaka sıcaklığının 20°C olmasından dolayı önce bir miktar ısı kaybedip daha sonra komponentten yayılan ısının etkisi ile ısınmaktadır. Hava sıcaklığı ilk andan itibaren plaka sıcaklığından yüksek olduğundan kart ile plaka arasında doğal taşınım ile ısı transferi gerçekleşmemektedir. Yalnızca hava yoluyla iletim ile ve ışıınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Plaka ile kart arasında doğal taşınım hareketi olmadığı Şekil 5.47 ve Şekil 5.48'de görülmektedir. Komponent gücü sistemin sıcaklığının armasını etkileyecek kadar yüksek olduğundan komponent sıcaklığından kaynaklı olarak havada doğal taşınım hareketi görülmektedir. Analizin ilk anlarında komponentte üretilen ısı ile komponent ve kart üzerinde komponente yakın bölgelerin sıcaklığı artmaktadır. Bu bölgelerin sıcaklığı arttıkça komponent üzerindeki havada görülen doğal taşınım hareketi de artmaktadır. Bu durum Şekil 5.47 ve Şekil 5.48'de 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık ve hız vektör kontur grafikleri incelendiğinde görülmektedir.

$T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ olan durum için elde edilen analiz sonuçları

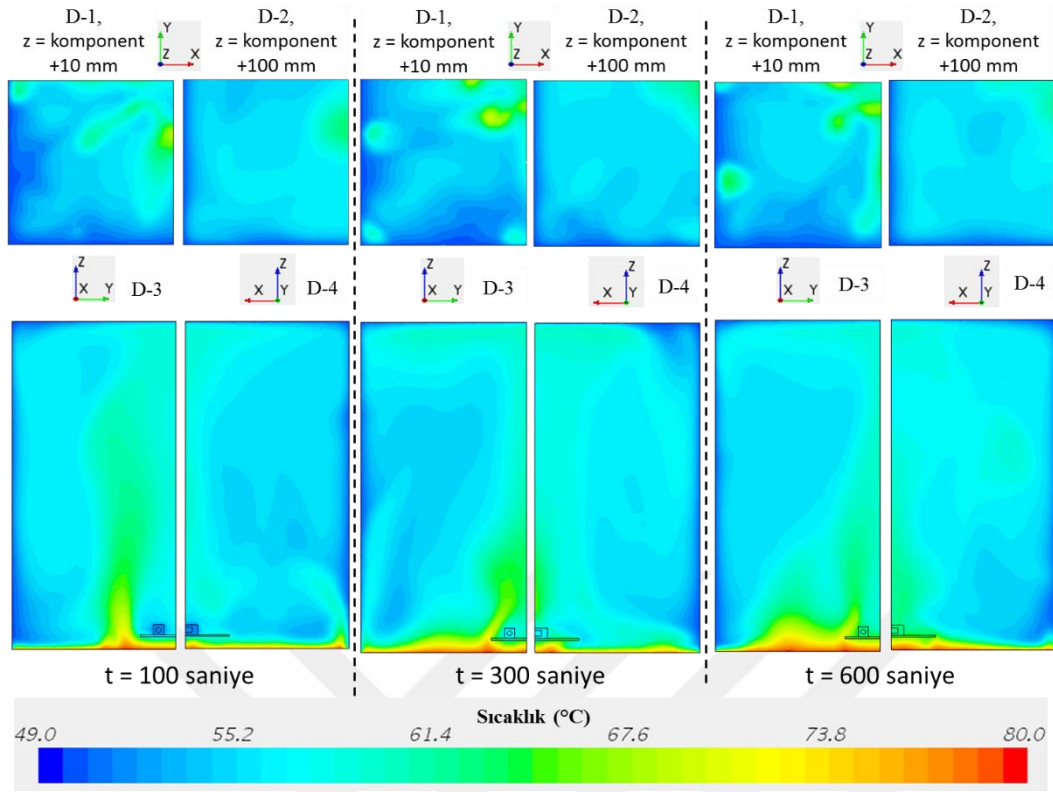
Bu kısımda tüm sistemin başlangıç sıcaklığının 50°C , ısıtıcı plaka sıcaklığının 80°C olduğu ve bir önceki kısımda sonuçları paylaşılan analizlerden farklı olarak komponentlere verilen gücün $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durum için gerçekleştirilen analiz sonuçları paylaşılmıştır. Kapalı hacmin tabanı (ısıtıcı yüzey) hariç tüm duvarlara 50°C 'de sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Bu kısımda sonuçları paylaşılan analiz sınır şartları Şekil 5.50'de gösterilmiştir. Kart kompleksi üzerindeki K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniye boyunca sıcaklık değişim grafikleri Şekil 5.51'de sunulmuştur. Kapalı hacim içerisindeki havanın 100., 300. ve 600. saniyeler için, farklı kesitlerdeki sıcaklık, hız ve basınç dağılım grafikleri Şekil 5.52-Şekil 5.54 arasında gösterilmiştir.



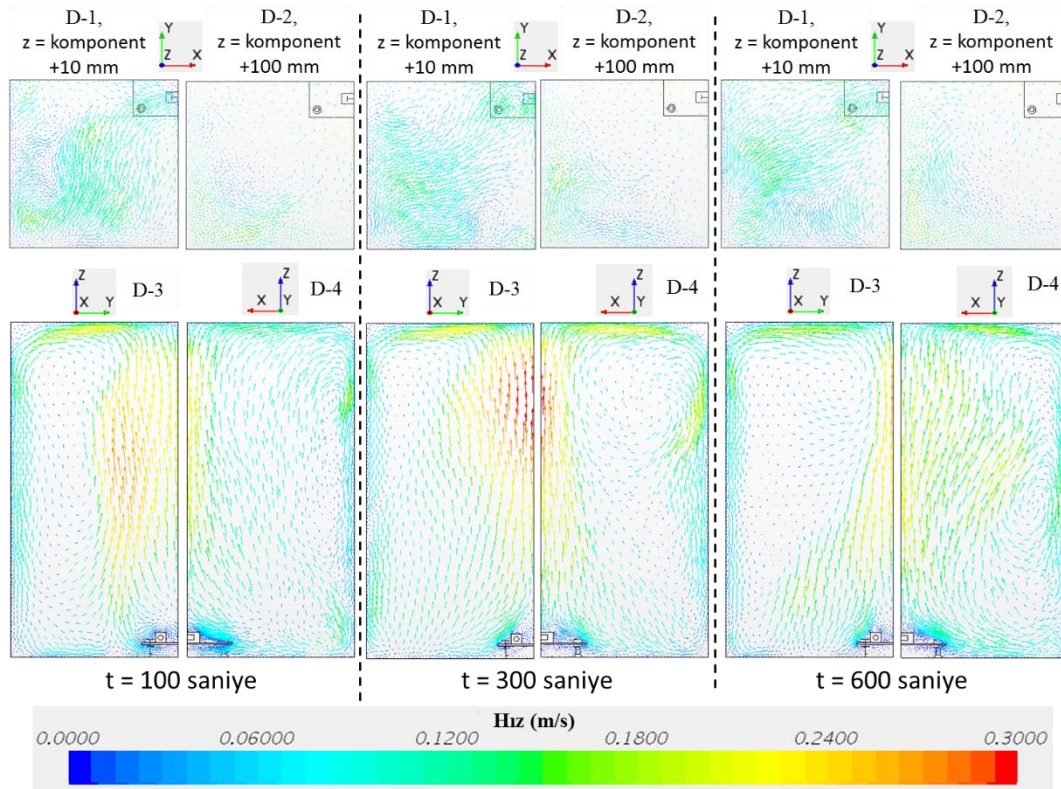
Şekil 5.50. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları



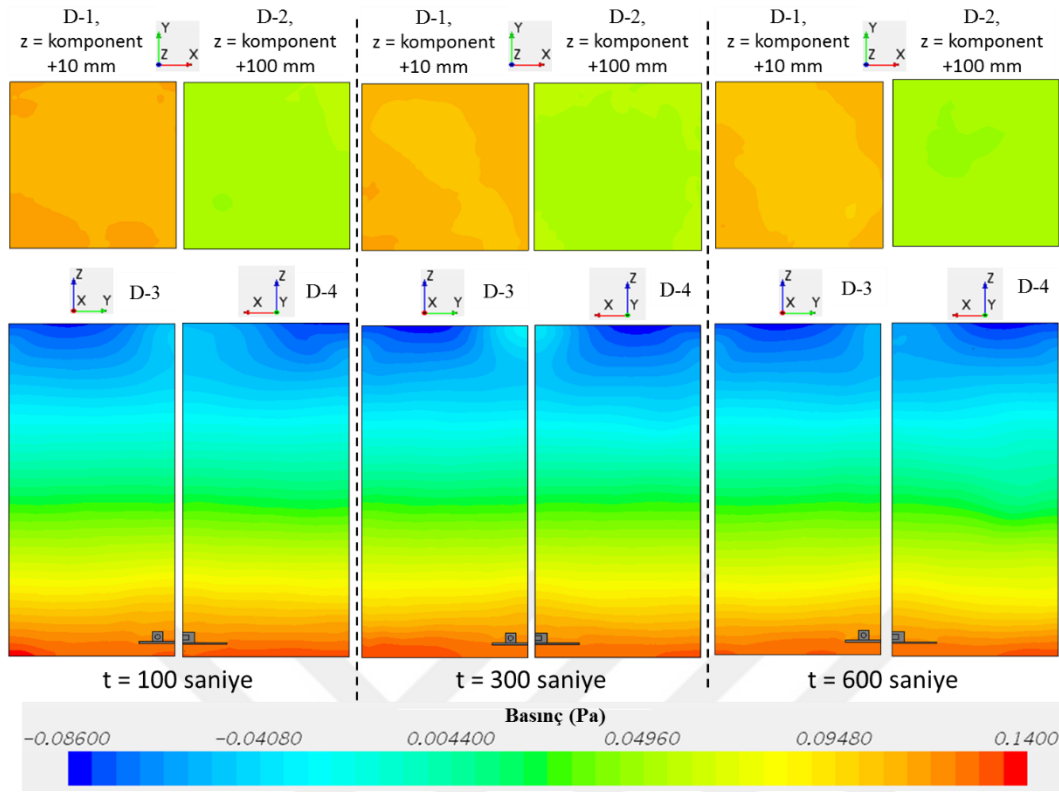
Şekil 5.51. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.52. $T_{\text{ilk}} = T_{\text{duvarlar}} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları



Şekil 5.53. $T_{\text{ilk}} = T_{\text{duvarlar}} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları

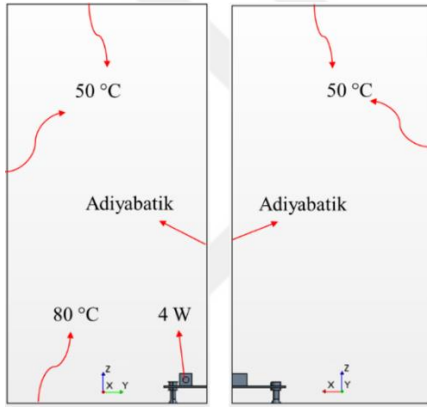


Şekil 5.54. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları

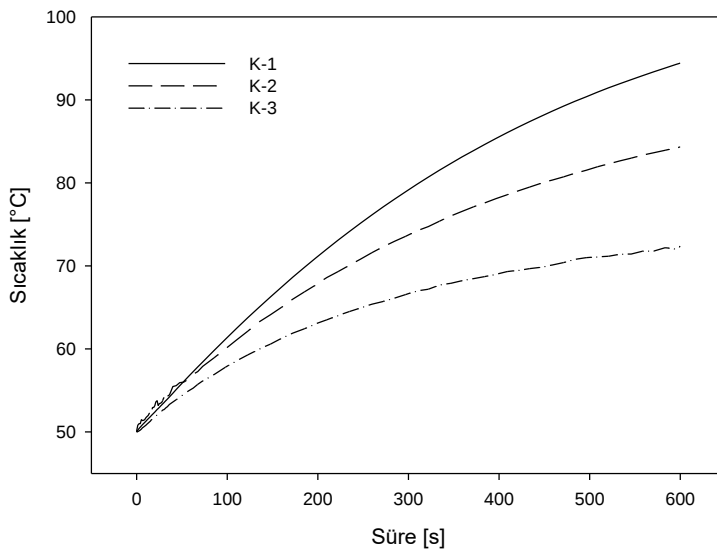
Bu senaryoda komponent gücü $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olup sistemin ısınmasına önemli bir etkisi olacak mertebe değildir. Fakat ısıtıcı plaka sıcaklığı analiz süresi boyunca 80°C 'de, kabinin diğer tüm duvarları 50°C 'de tutulmuştur. Bu durumda kart kompleksinin ve kabin içerisindeki havanın ısınmasında etkili olan ısı kaynağı ısıtıcı plaka olmaktadır. Isıtıcı plaka sıcaklığından, kart kompleksi üzerindeki K-1, K-2 ve K-3 noktalarından en çok K-3 noktası en az ise K-1 noktası etkilenmektedir. Bu durum Şekil 5.51'de gösterilen grafikten de anlaşılmaktadır. Grafikten görüldüğü üzere en hızlı K-3 noktası en yavaş K-1 noktası ısınmaktadır. Analiz süresi boyunca zeminde bulunan ısıtıcı plaka sıcaklığı diğer tüm bölgelerden daha sıcak olduğu için analizin ilk anından itibaren kabin içerisindeki hava doğal taşınım etkisi ile hareket etmektedir. Kart kompleksi sıcaklığı arttıkça havanın yükselme hareketi kart kompleksi bölgesine doğru kaymaktadır. Havanın alçalma hareketi ise ilk andan itibaren nispeten soğuk olan duvara yakın bölgeden gerçekleşmektedir. Bu durum Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'te görülmektedir.

$T_{ilk} = 50^\circ\text{C}$, $T_{plaka} = 80^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ olan durum için elde edilen analiz sonuçları

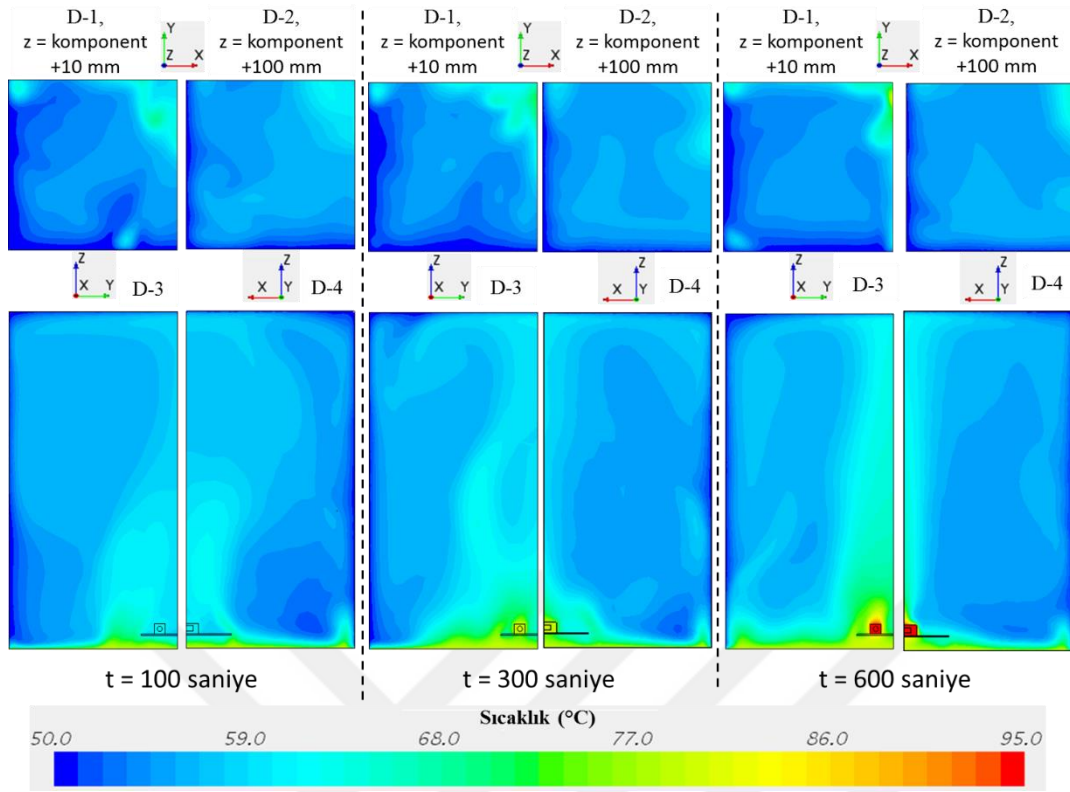
Bu kısımda tüm sistemin başlangıç sıcaklığının 50°C , ısıtıcı plaka sıcaklığının 80°C olduğu ve bir önceki kısımda sonuçları paylaşılan analizlerden farklı olarak komponentlere verilen gücün 4 mW/mm^3 olduğu durum için gerçekleştirilen analiz sonuçları paylaşılmıştır. Kapalı hacmin tabanı (ısıtıcı yüzey) hariç tüm duvarlara 50°C 'de sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Bu kısımda sonuçları paylaşılan analiz sınır şartları Şekil 5.55'te gösterilmiştir. Kart kompleksi üzerindeki K-1, K-2 ve K-3 noktalarının 600 saniye boyunca sıcaklık değişim grafikleri Şekil 5.56'da sunulmuştur. Kapalı hacim içerisindeki havanın 100., 300. ve 600. saniyeler için, farklı kesitlerdeki sıcaklık, hız ve basınç dağılım grafikleri Şekil 5.57-Şekil 5.59 arasında gösterilmiştir.



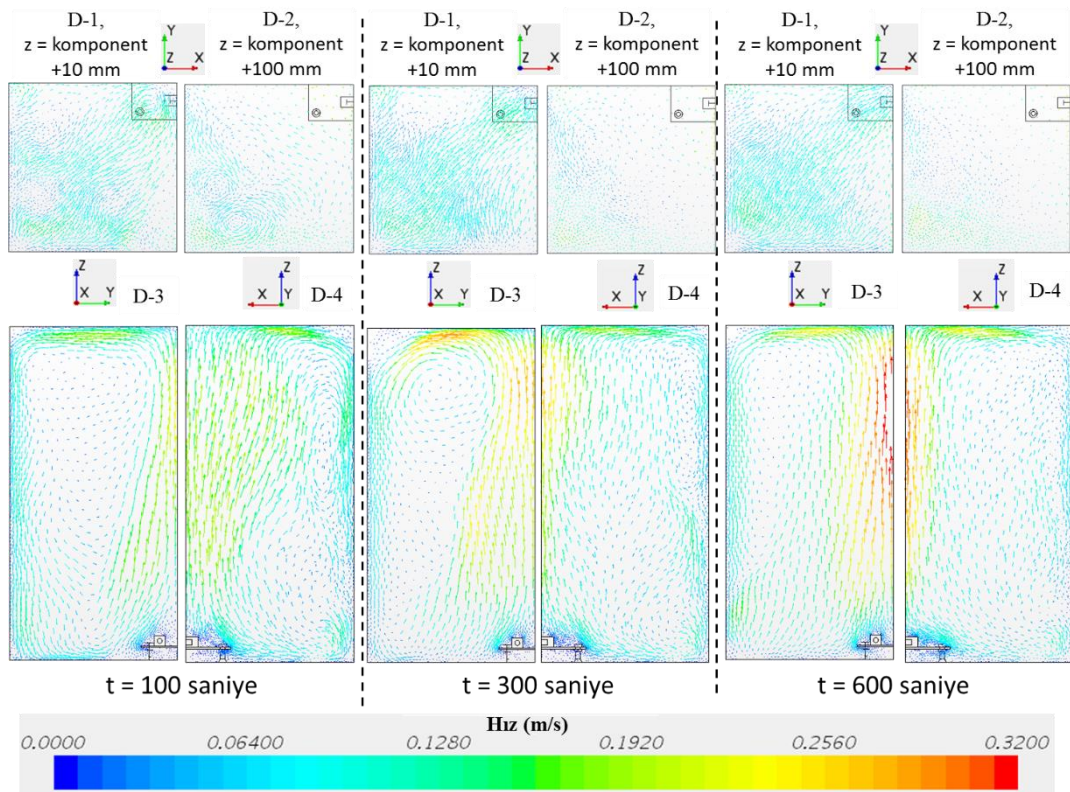
Şekil 5.55. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^\circ\text{C}$, $T_{plaka} = 80^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ sınır şartları



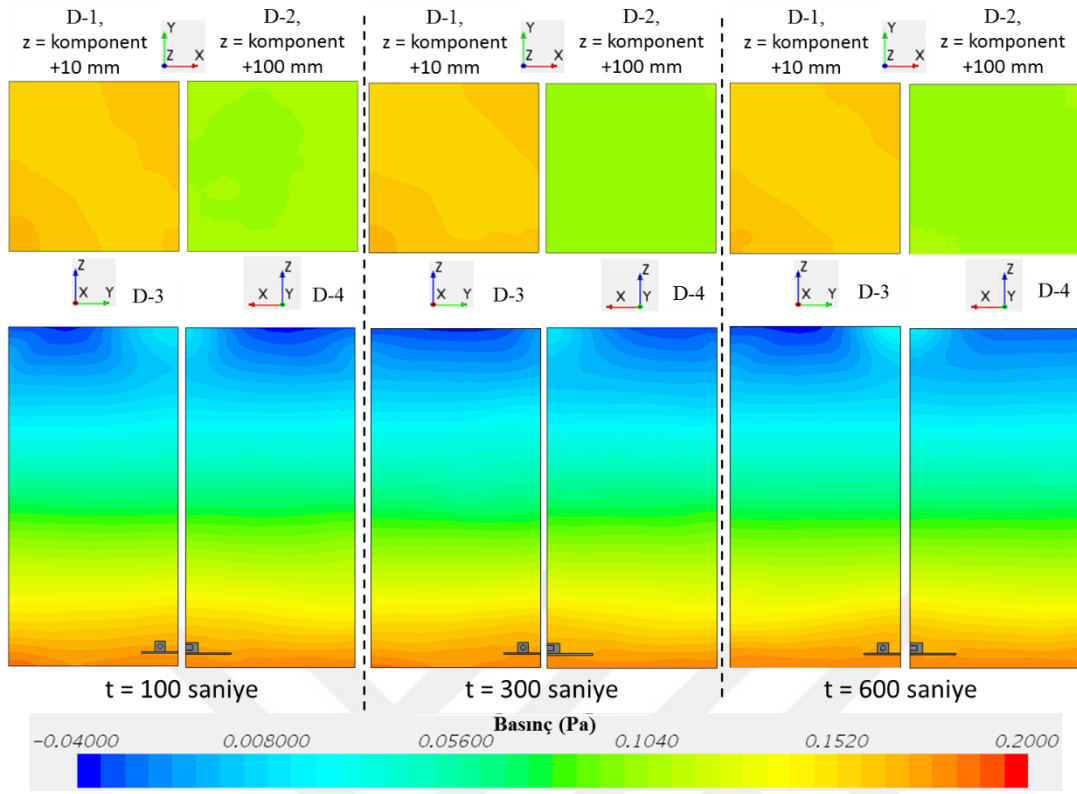
Şekil 5.56. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^\circ\text{C}$, $T_{plaka} = 80^\circ\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.57. $T_{\text{ilk}} = T_{\text{duvarlar}} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki sıcaklık dağılımları



Şekil 5.58. $T_{\text{ilk}} = T_{\text{duvarlar}} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{plaka}} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki hız dağılımları

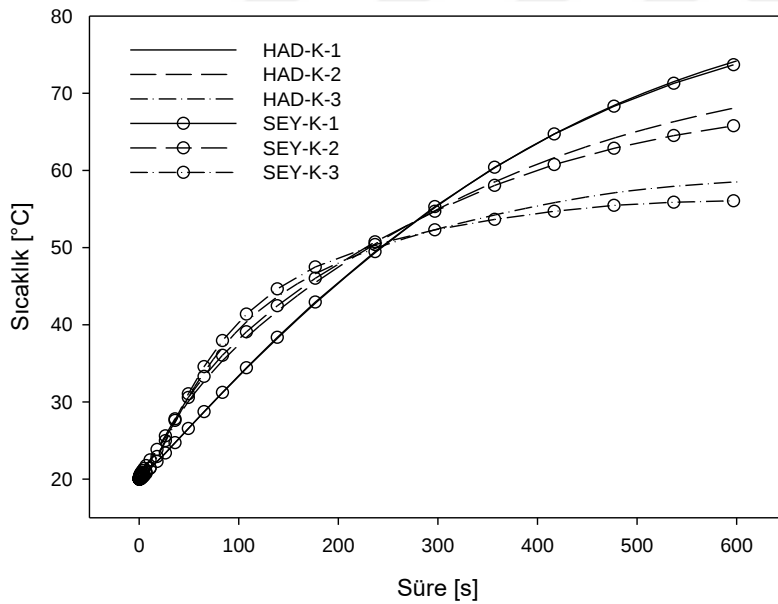


Şekil 5.59. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, havanın farklı kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyedeki basınç dağılımları

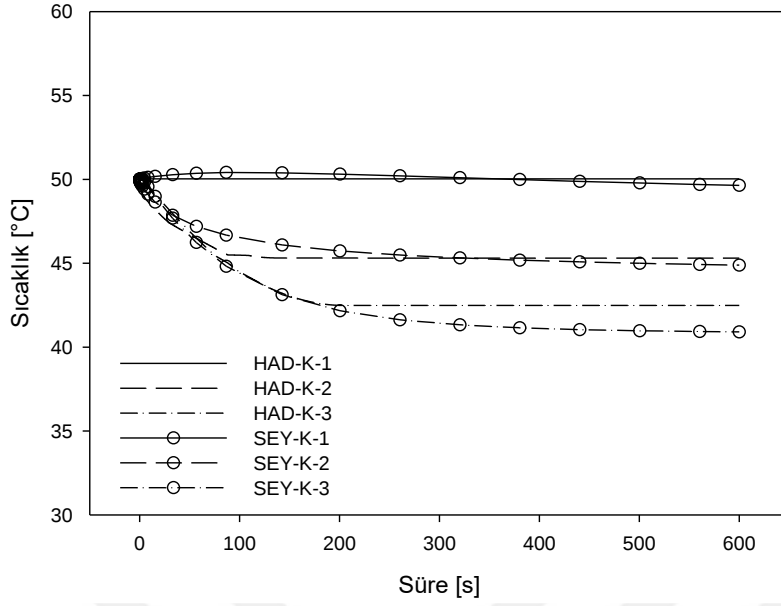
Bu senaryoda hem komponente 4 mW/mm^3 güç verilmiş hem de ısıtıcı plaka sıcaklığı 80°C 'de tutulmuştur. Bu sınır şartları, tüm senaryolar arasında sistemin en çok ısındığı durumdur. Şekil 5.56'da görüldüğü üzere K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklığı son ana kadar sürekli artmaktadır. En hızlı ısınan ve en yüksek sıcaklığa ulaşan nokta K-1 noktası, en yavaş ısınan ve en düşük sıcaklığa ulaşan ise K-3 noktası olmaktadır. Analizin ilk anlarında karttan uzak bölgelerde doğal taşınım hareketi ile havanın yükselmesi görülürken analizin sonlarına doğru havanın yükselme hareketi daha çok kart kompleksi üzerinde gerçekleşmektedir ve yükselme hızı artmaktadır. Havanın alçalma hareketi ise Şekil 5.57 ve Şekil 5.58'de görüldüğü üzere analizin başından beri 50°C 'de tutulan soğuk duvara yakın bölgeden gerçekleşmektedir.

5.3. İletim Tabanlı SEY ve HAD Analiz Sonuçları ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

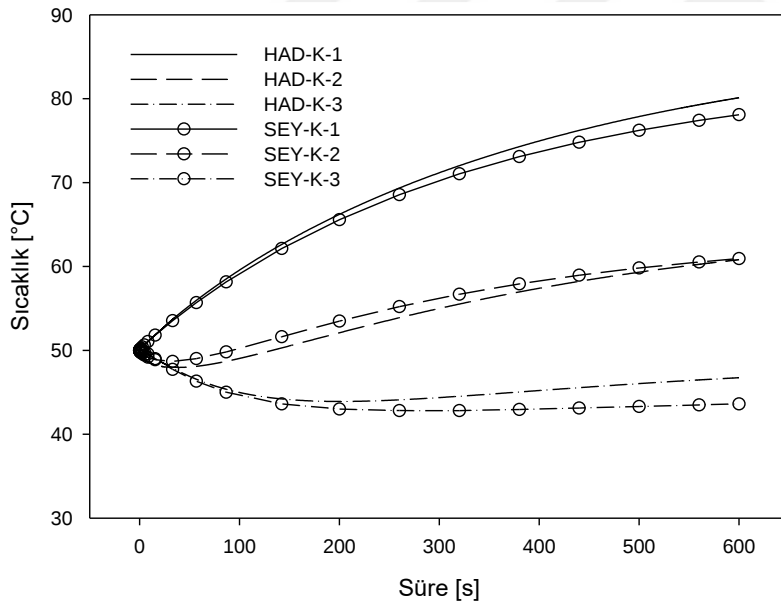
Belirlenen 5 adet senaryo için SEY ve HAD analizleri, bu senaryolardan iki tanesi için de deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve bu yöntemlerle elde edilen, kart kompleksi üzerinde Şekil 5.1’de gösterilen üç noktanın 600 saniyelik sıcaklık profilleri karşılaştırılmıştır. SEY analizleri, Bölüm 5.1’de ayrıntıları anlatılan doğrulanmış analiz modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEY ve HAD analizleri arasında mantıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için SEY analizlerinde taşınım sınır şartındaki ortam sıcaklık değerleri için, HAD analizlerinde elde edilen hava sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Sistem başlangıç sıcaklığının 50°C, ısıtıcı plaka sıcaklığının 80°C olduğu durumda komponentlerin 0,5 ve 4 mW/mm³ güç değerleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen 5 senaryoda kart kompleksi üzerindeki noktalar için elde edilen SEY ve HAD analiz sonuçları Şekil 5.60-Şekil 5.64 arasında gösterilmiştir. Nümerik sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması ise Şekil 5.63 ve Şekil 5.64’te gösterilmiştir.



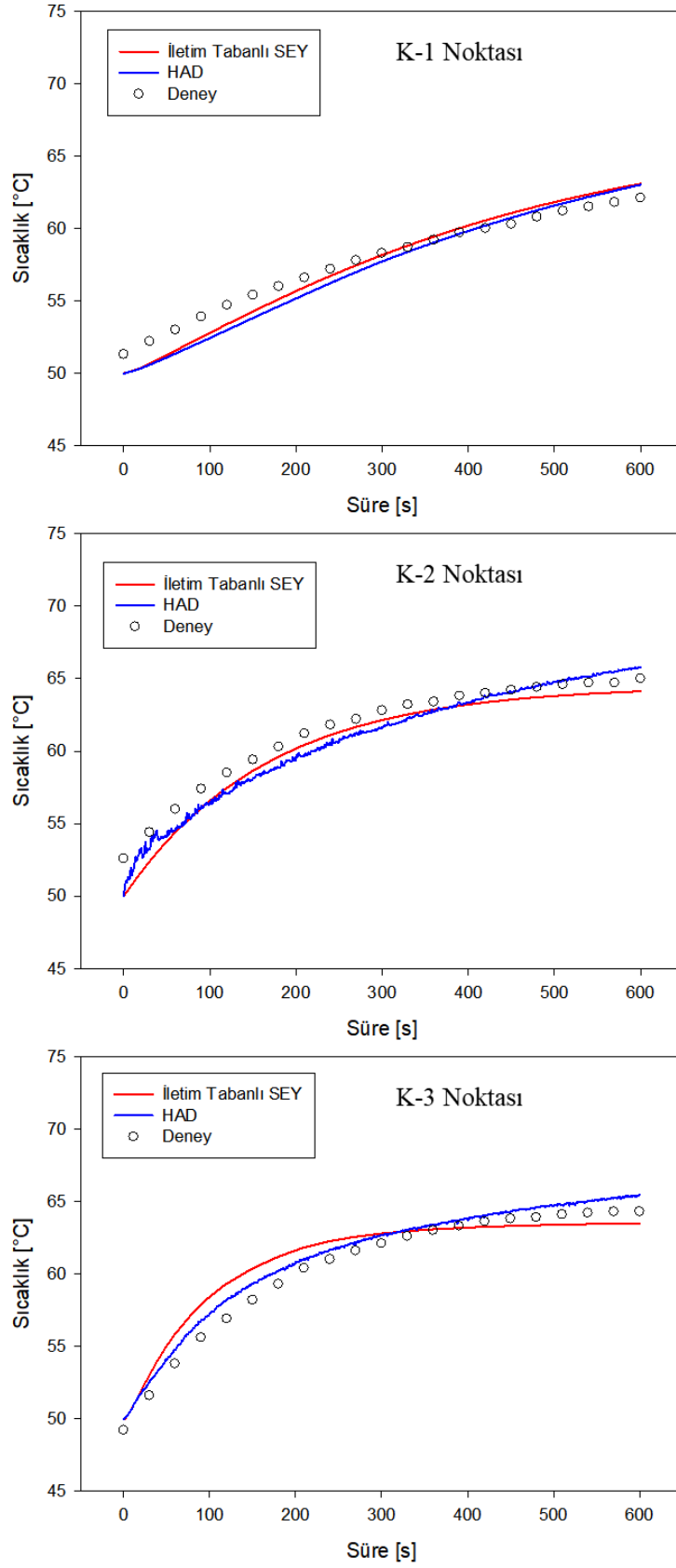
Şekil 5.60. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$ ve $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



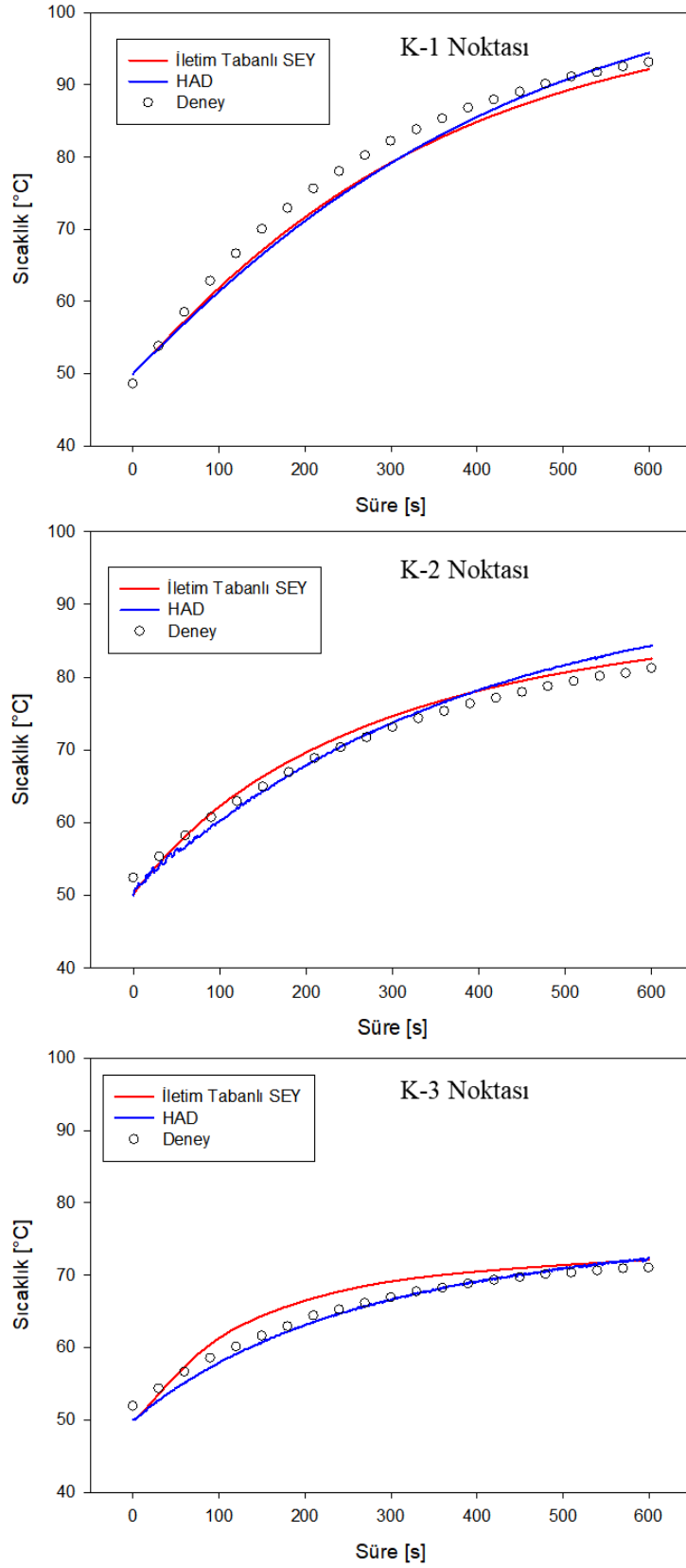
Şekil 5.61. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.62. $T_{ilk} = T_{duvarlar} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 20^{\circ}\text{C}$, $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.63. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$, $q = 0,5 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.64. $T_{ilk} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{plaka} = 80^{\circ}\text{C}$, $q = 4 \text{ mW/mm}^3$ durumunda, SEY ve HAD analizleri ile elde edilen, K-1, K-2 ve K-3 konumlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

Şekil 5.60 - Şekil 5.64 arasındaki şekiller incelendiğinde, kart ve komponent üzerindeki noktalar için elde edilen iletim tabanlı SEY analizi, HAD analizi ve deney sonuçları arasındaki farklar 5°C 'nin altında kalmaktadır. Elektronik komponentlerin genel çalışma sıcaklık aralığı göz önünde bulundurulduğunda farklı hızlarda ve profillerde ısınma ve soğuma karakteristiğinin görüldüğü ve 600 saniye süren analizlerin sonuçlarının 5°C hata ile elde edilmesi, oldukça başarılı bir sonuçtur.

Bu bölümde sonuçları sunulan iletim tabanlı SEY ve HAD analizlerinin gerçekleştirildiği senaryolar özellikle, sistemin termal davranışının en az analiz ile en kapsamlı şekilde incelenmesi amacıyla planlanmıştır. Bu senaryolardan iki tanesi için gerçekleştirilen deneyler ise parametrik inceleme kapsamında gerçekleştirilen nümerik analiz sonuçlarının deneysel verilerle doğrulandığının gösterilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.60'ta sonuçları gösterilen analiz senaryosunda sistem başlangıç sıcaklığı düşük, ısıtıcı plaka sıcaklığı ve komponent gücü yüksektir. Bu senaryo ile sistemin düşük başlangıç sıcaklığında iken en hızlı ısınacağı sınır şartları verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere K-1, K-2 ve K-3 noktaları ilk andan itibaren hızla ısınmaya başlamıştır. Bu senaryoda ısıtıcı plaka sıcaklığı ile başlangıç sıcaklığı arasındaki fark büyük olduğundan, ısıtıcı ile K-3 noktası arasındaki termal direnç oldukça düşüktür. Bu sebeple K-3 noktası diğer noktalardan daha hızlı ısınmaktadır. Bu senaryoda K-2 ve K-3 noktaları için HAD ve SEY analiz sonuçları arasında en fazla $2\text{-}3^{\circ}\text{C}$ fark görülmektedir. K-1 noktası için ise analiz sonuçları arasındaki fark çok daha düşük çıkmaktadır.

Şekil 5.61'de gösterilen sonuçlarda ise kart kompleksinin soğuduğu görülmektedir. Sistemin başlangıç sıcaklığı plaka sıcaklığından yüksek olduğundan ve komponent gücü düşük olduğundan, havadan ve kart kompleksinden, sistem kararlı hale gelene kadar plakaya iletim ve ışıyım yoluyla ısı akışı gerçekleşmektedir. Bir önceki senaryonun aksine bu senaryoda sistem, analiz süresi içerisinde -600 saniye- kararlı hale gelmektedir. K-3 noktası için SEY ve HAD analiz sonuçları arasında $1\text{-}2^{\circ}\text{C}$ fark görülürken K-1 ve K-2 noktaları için bu farkın çok daha az olduğu görülmektedir.

Şekil 5.62'de görüldüğü üzere, sistem başlangıç sıcaklığının 50°C , plaka sıcaklığının 20°C ve komponent gücünün 4 mW/mm^3 olduğu senaryoda kart kompleksi üzerinde, bazı bölgelerde ısınma bazı bölgelerde ise bir süre soğuyup daha sonra ısınma profili

görülmektedir. K-1 noktasının ısınmasında en önemli etken olan komponent gücü yüksek olduğundan K-1 noktası ilk andan itibaren ısınmaktadır. Fakat K-3 noktasının sıcaklık değişimine en çok etkisi olan ısıtıcı plaka sıcaklığı sistem başlangıç sıcaklığından düşük olduğundan, komponentte üretilen ısı K-3 noktasına sirayet edene kadar K-3 noktasının bulunduğu bölgede soğuma görülmektedir. Daha sonra ise bu bölgenin de sıcaklığı artmaktadır. K-2 noktasında da K-3 noktasındaki davranışa benzer bir davranış görülmektedir. Fakat K-2 noktası komponente daha yakın olduğu için K-3 noktasından daha kısa sürede ısınmaya geçmektedir. 600. saniyede K-2 noktası için SEY ve HAD analiz sonuçları hemen hemen aynı çıkmaktadır. K-1 ve K-3 noktası için ise SEY ve HAD analiz sonuçları arasında 1-2°C fark görülmektedir.

Şekil 5.63'te hava ve kart kompleksi başlangıç sıcaklığı 50°C, ısıtıcı plaka sıcaklığı 80°C ve komponent gücü 0,5 mW/mm³ durumları için gerçekleştirilen analiz ve deney sonuçları gösterilmiştir. Komponent gücü düşük olduğundan sistemin ısınmasındaki etkisi de oldukça düşüktür. Bu sebeple sistemdeki ısınma büyük oranda ısıtıcı plakadan kaynaklanmaktadır. K-1, K-2 ve K-3 noktalarından ısıtıcı plakaya en yakın nokta K-2 ve K-3 noktaları olduğundan en hızlı ısınma bu noktalarda, en yavaş ısınma K-1 noktasında görülmektedir. Her üç nokta için de nümerik analiz ve deney sonuçları arasında en fazla 1-2°C fark görülmektedir.

Karşılaştırma analizi yapılan en son senaryo ise başlangıç sıcaklığının 50°C, ısıtıcı plaka sıcaklığının 80°C, komponent gücünün de 4 mW/mm³ olduğu senaryodur. Bu senaryoda kart kompleksinin sıcaklığı diğer senaryolarla kıyaslandığında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu senaryoya ait sıcaklık sonuçları Şekil 5.64'te gösterilmiştir. K-3 noktası için SEY ve HAD analiz sonuçları arasında 200. saniye civarında 5°C'ye kadar fark görülmektedir. Fakat 600 saniye sonunda bu fark 1°C'nin altında inmektedir. K-1 ve K-2 noktaları için ise 600 saniye sonunda bu fark en fazla 1-2°C mertebesinde kalmaktadır. HAD analizleri ile 1-2°C fark ile de olsa iletim tabanlı SEY analizlerine nazaran deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Kart kompleksinde 600 saniyelik analiz boyunca, farklı ısınma soğuma davranışlarının görüldüğü analizlerde, elektronik kart komplelerinin çalışma sıcaklık aralığı göz önünde bulundurulduğunda, SEY ve HAD analiz sonuçları arasında en fazla 5°C hata görülmesi oldukça başarılı bir sonuçtur.

Şekil 5.60-Şekil 5.64 arasında sonuçları paylaşılan analizlerde bilinmesi gereken bir durum, iletim tabanlı SEY analiz modelinde taşınım sınır şartı için ortam sıcaklığı olarak HAD analizinde elde edilen hava sıcaklığının kullanıldığıdır. Bu durum ile SEY ve HAD analiz sonuçları arasında meydana gelebilecek farkın yüksek çıkması bir miktar engellenmiştir. Fakat sistemin termal davranışının farklı sınır şartlarında parametrik olarak incelenmesi için SEY analiz modelinde ortam sıcaklıklarının belirlenmesi zaruri değildir. Varsayılan ortam sıcaklıklarında doğrulanmış analiz modeli kullanılarak gerekli analizler gerçekleştirilebilir. HAD analizlerinde elde edilen hava sıcaklık değerinin SEY analiz modelinde kullanılmasının amacı, SEY ve HAD analiz sonuçları arasında mantıklı bir karşılaştırma yapılmasıdır.





6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektronik sistemlere duyulan ihtiyaç sanayinin hemen her alanında her geçen gün artmaktadır. Bu da beraberinde daha dar hacimlerde daha yoğun elektronik sistemlerin yerleştirilmesini getirmektedir. Böylece elektronik sistemlerde ısı üretim oranı artmakta, soğuma kapasitesi azalmaktadır. Ayrıca birçok uygulamada elektronik sistemler, üzerlerinde bulunan komponentlerin dâhili ısınmasından başka, güneş ışınımı, motor, ısıtıl pil, aerodinamik ısınma gibi harici ısı kaynaklarına da maruz kalabilmektedir. Bu durumlardan dolayı, elektronik sistemlerin çalışma sıcaklık limitleri göz önünde bulundurulduğunda, termal tasarım son derece önemli hale gelmektedir.

Bir sistemin termal açıdan incelenebilmesi için farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler genel olarak; İletim Tabanlı SEY (Sonlu Elemanlar Yöntemi) Isı Transferi Analizi, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Analizi, Termal Direnç Ağı Yöntemi ve Deneysel Yöntemler olarak sayılabilir. Tüm bu yöntemlerin farkı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Sistemin termal açıdan incelenmesi için her zaman ve her durumda kullanılabilecek tek bir yöntem yoktur. Avantaj ve dezavantajlar değerlendirildiğinde kullanılması gereken yöntem uygulama alanına göre değişebilir.

Bu çalışmada, üzerinde ısınan komponentlerin bulunduğu bir elektronik kart kompleksinin farklı sınır şartlarındaki termal davranışının hızlı ve doğru bir şekilde incelenmesi hedeflenmiştir. Sistemin farklı sınır şartlarında parametrik analizlerinin yapılması için iletim tabanlı SEY, zaman, doğruluk, efor vs. açısından oldukça makul bir yöntemdir. Fakat iletim tabanlı SEY'in en büyük dezavantajı, akışkanın analiz modeline doğrudan dâhil edilememesidir. Çözüm doğruluğundan ödün verilmemesi için analiz modeline doğrudan dâhil edilemeyen havanın sistem üzerindeki termal etkisinin en az hata ile yansıtılması gerekmektedir. İletim tabanlı SEY'de havanın termal etkisinin analiz modeline dâhil edilmesi için hava ile arasında kayda değer ısı transferi gerçekleşmesi beklenen yüzeylere taşınım sınır şartı tanımlanmıştır. Taşınım sınır şartında, yüzeylerdeki taşınım katsayılarının ve ortam sıcaklıklarının doğru olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Ayrıca herhangi bir nümerik analiz modelinde, parçaların malzeme özelliklerinin, parçaların birbiri ile temas özelliğinin ve sınır şartlarının bilinmesi gerekmektedir. Çalışma

kapsamında kullanılan kart kompleksinde, komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direnci değeri bilinmemektedir. Bu değişken termal analizin doğruluğu açısından önemli bir değişkendir. Ek olarak komponentlerde belirli bir sıcaklık değerinin üzerinde güç düşmesi meydana gelmektedir. Bu değer de analiz modelinin doğruluğu açısından oldukça önemlidir.

Çalışma kapsamında elektronik kart kompleksinin termal davranışının farklı sınır şartlarında parametrik olarak incelenebilmesi üzere kullanılacak iletim tabanlı SEY analiz modelinin doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Analiz modelinin doğrulanması kapsamında; yüzeylerdeki taşınım katsayılarının hesaplandığı denklemdeki (Bkz. Eş. 4.5) ‘C’ katsayısının her bir yüzey için belirlenmesi, komponentler ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direnci değerinin belirlenmesi ve komponentlerde yüksek sıcaklıkta meydana gelen güç düşüm değerinin belirlenmesi yer almaktadır.

Analiz modelinin doğrulanması temel olarak, belirli bir sınır şartı için elektronik komponentlere sabit ısı akısı uygulanarak gerçekleştirilen deneyin ve aynı sınır şartı için iletim tabanlı SEY analizinin gerçekleştirilip, analiz modelinde bilinmeyen/belirsizlik içeren değişkenlerin analiz ve deney sonuçları örtüşene kadar iteratif olarak değiştirilip nihai değerlerin belirlenmesinden oluşmaktadır. Analiz modeli, deney sonuçları kullanılarak doğrulanmadan önce nümerik hataların önüne geçilmesi amacıyla hücre sayısından bağımsızlaştırılmıştır. Birden fazla bilinmeyen olduğu için gerçekleştirilen deneyde ve analiz modelinin doğrulanması aşamasında belirli bir sıra takip edilmiştir. Öncelikle komponent çalıştırılmadan yalnızca ısıtıcı plaka ısıtılarak sistemin sıcaklığı belirli bir değere getirilmiş daha sonra ise ısıtıcı plaka sıcaklığı sabit tutulup komponente güç verilmiştir. Analiz modelinin doğrulanması aşamasında ise öncelikle deneyin, taşınım katsayılarının etkisinin az olduğu ve komponentlerdeki güç düşüm oranının söz konusu olmadığı ilk kısmı kullanılarak termal temas direnci değeri belirlenmiştir. Deneyin ikinci kısmı kullanılarak ise yüzeylerdeki taşınım katsayılarının hesaplanacağı denklemdeki değişken ve komponent güç düşüm oranı belirlenmiştir. Kart ve komponent üzerinde seçilen üç nokta için analiz ve deney sonuçları 1-2°C hata ile örtüşmesi bilinmeyen değişkenlerin belirlenmesi için yeterli bir kıstas olarak görülmüştür.

İletim tabanlı SEY analiz modelinde bilinmeyen/belirsizlik içeren değişkenlerden komponent ile baskı devre kartı arasındaki termal temas direncinin doğrulanmış değeri

14,3 m²K/W, komponentlerde yüksek sıcaklıkta meydana gelen güç düşüm değeri %15/10°C olarak belirlenmiştir. Yüzeylerdeki taşınım katsayılarının hesaplanması için kullanılan denklemdeki (Bkz. Eş. 4.5) 'C' değişkeninin doğrulanmış değerleri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Daha sonra doğrulanana iletim tabanlı SEY analiz modeli kullanılarak farklı sınır şartlarında sistemin termal davranışı incelenmiştir. Kart kompleksinin termal davranışına etkisi incelenen değişkenler; sistem başlangıç sıcaklığı, ısıtıcı plaka sıcaklığı ve komponent güçleridir. Her bir değişkenin dört farklı seviyesi için analizler gerçekleştirilmiştir. Sistem başlangıç sıcaklığının 20, 30, 40, 50°C değerleri, ısıtıcı plaka sıcaklığının 20, 40, 60, 80°C değerleri ve komponent güçlerinin 0,5, 1, 2 ve 4 mW/mm³ değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu değişkenlerin her bir seviyede birbirleri ile etkileşimleri de incelenmiş olup toplamda 64 adet analiz gerçekleştirilmiştir. İletim tabanlı SEY analizlerinde taşınım sınır şartında tanımlanan ortam sıcaklıkları için, sistem başlangıç sıcaklıkları girilmiş olup 600 saniye boyunca sabit tutulmuştur. Amaç, sistemin parametrik olarak farklı sınır şartlarında termal davranışının incelenmesi olduğu için bu varsayım herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Analizlerin gerçekleştirildiği sınır şartları Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Ek olarak, hem sistemdeki hava hareketinin incelenmesi için hem de SEY ve HAD yöntemlerinin karşılaştırılması için beş farklı sınır şartı için SEY ve HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sınır şartları, sistemin en uç ve birbirinden en farklı termal davranış sergilediği durumları yansıtmak üzere belirlenmiştir. Sınır şartlarından bir tanesinde sistem başlangıç sıcaklığı 20°C, ısıtıcı plaka sıcaklığı 80°C komponent gücü 4 mW/mm³ değerlerinde tutulmuştur. Diğer dört senaryoda ise başlangıç sıcaklığı 50°C, ısıtıcı plaka sıcaklığı 20 ve 80°C, komponent gücü ise 0,5 ve 4 mW/mm³ değerlerinde tutulmuştur. Sistem başlangıç sıcaklığının 50°C ve ısıtıcı plakanın 80°C olduğu durumda komponent gücünün 0,5 ve 4 mW/mm³ olduğu durumlar için nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. SEY ve HAD analizlerinin gerçekleştirildiği senaryolar da Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

İletim tabanlı SEY analizi gerçekleştirilen tüm senaryolar için analiz sonuçları kart ve komponent üzerinde belirlenen üç noktanın analiz süresi boyunca sıcaklık-zaman grafiği

olarak ve 600 saniye sonunda kart ve komponentlerin yüzey sıcaklık dağılımları kontur grafiği olarak verilmiştir.

64 adet senaryo için gerçekleştirilen iletim tabanlı SEY analiz sonuçları incelendiğinde komponentlerden bir tanesinin üzerinde bulunan K-1 noktasının sıcaklık değerinin komponent gücünden oldukça fazla etkilendiği görülmektedir. Baskı devre kartı üzerinde bulunan K-3 noktasının sıcaklığının ise baskın olarak ısıtıcı plakadan etkilendiği görülmektedir. K-2 noktasının sıcaklık değeri hemen her sınır şartında K-1 ve K-3 noktalarının sıcaklık değerinin arasında çıkmaktadır. Bunu sebebi, ısı kaynağı olan komponente ve ısıtıcı plakaya olan termal mesafesinin K-1 ve K-3 noktalarının arasında olmasıdır.

Komponent gücünün 4 mW/mm^3 olduğu her durumda, K-1 noktasının sıcaklık değerinde ciddi anlamda bir artış görülmektedir. Başlangıç sıcaklığının bu artışa etkisi hiç yok denecek kadar azdır. Plaka sıcaklığının bu artışa etkisi 20°C ve 80°C plaka sıcaklıkları arasında $5\text{-}6^\circ\text{C}$ mertebesinde fark görülecek kadardır. Komponent gücünden K-3 noktası ise oldukça az etkilenmektedir. Komponent gücünün 4 mW/mm^3 olduğu durumda bile, plaka sıcaklığı ile sistem başlangıç sıcaklığı aynı ise, yani sistemin ısınmasında tek etken komponent ise, K-3 noktasının sıcaklığı en fazla $2\text{-}3^\circ\text{C}$ artmaktadır. Durum böyle iken komponent gücü $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğunda K-3 noktasının sıcaklığının artışı ihmal edilebilecek düzeydedir. Komponent gücü $0,5^\circ\text{C}$ olduğunda K-1 noktasının sıcaklığı, eğer plaka sıcaklığı ile başlangıç sıcaklığı eşitse, $2\text{-}3^\circ\text{C}$ mertebesinde olmaktadır.

Sistemin termal davranışı parametrik olarak incelenen diğer bir değişken olan plaka sıcaklığından en çok K-3 noktası etkilenmektedir. Sistem başlangıç sıcaklığının 20°C olduğu durumda plaka sıcaklığı 20°C , komponent gücü 4 mW/mm^3 iken K-3 noktasının sıcaklığı ancak $1\text{-}2^\circ\text{C}$ artmaktadır. Fakat sistem başlangıç sıcaklığının 20°C olduğu durumda plaka sıcaklığı 80°C , komponent gücü 4 mW/mm^3 iken K-3 noktasının sıcaklığı yaklaşık 15°C artış göstermektedir. Benzer sonuçlar başlangıç sıcaklığının 20°C , plaka sıcaklığının 20 ve 80°C ve komponent gücünün $0,5 \text{ mW/mm}^3$ olduğu durumlarda da $1\text{-}2^\circ\text{C}$ fark ile görülmektedir.

Başlangıç sıcaklığının 50°C olduğu senaryolarda, plaka sıcaklığı 20°C ise, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıklarında net bir düşüş görülmektedir. K-1 noktasının sıcaklığı ise bu

durumda eğer komponent gücü $0,5 \text{ mW/mm}^3$ ise düşmektedir. Bu durumda komponent gücü 4 mW/mm^3 iken K-1 noktasının sıcaklığı artmaktadır. K-2 noktasının sıcaklığı ise komponent gücünün 4 mW/mm^3 , plaka sıcaklığının 20°C olduğu durumda önce bir miktar düşüp daha sonra yükselmektedir.

Özet olarak, komponent üzerinde bulunan K-1 noktasının sıcaklık değeri, komponent gücüne oldukça bağlıdır. Belirlenen senaryolarda bu noktanın sıcaklık değeri 600 saniye sonunda en fazla 76°C 'ye yükselmiştir. K-3 noktasının sıcaklık değeri ise en fazla ısıtıcı plaka sıcaklığına bağlıdır. Fakat bu bağlılık K-1 noktasının komponent gücüne olan bağlılığı kadar etkili değildir. K-2 noktasının sıcaklık değeri ise genellikle K-1 ve K-3 noktalarının sıcaklık değerinin arasında çıkmaktadır. Sistemin başlangıç sıcaklığının K-1, K-2 ve K-3 noktalarının sıcaklıklarına etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır.

İletim tabanlı SEY analizleri gerçekleştirilen bu senaryolara ek olarak SEY ve HAD analizi gerçekleştirilen senaryolar, yukarıda bahsedilen senaryoların en uç örneklerini yansıtmaktadır. HAD analizlerinde kabin ve içerisindeki hava da modellenmiştir. Kabin duvarları sistem başlangıç sıcaklığında sabit tutulmuştur. Kart ve komponentler üzerinde belirlenen ve 64 senaryo için iletim tabanlı SEY analiz sonuçlarının paylaşıldığı noktalar, ek olarak SEY ve HAD analizlerinin gerçekleştirildiği 5 analiz için de ölçüm noktası olarak belirlenmiştir. Ayrıca, HAD analizlerinde belirli noktalarda hava sıcaklık değerleri de zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. HAD analizlerinden elde edilen hava sıcaklık değerleri SEY analizlerinde taşınım sınır şartında tanımlanan ortam sıcaklık değerlerine girdi olarak kullanılmıştır. Bu işlemin amacı HAD ve SEY analizleri arasında makul bir karşılaştırma yapılabilmesidir. Maksat sistemin farklı sınır şartlarında parametrik olarak incelenmesi olduğundan bu işlem herhangi bir sorun meydana getirmemektedir. HAD analiz sonuçları K-1, K-2 ve K-3 noktaları için sıcaklık-zaman grafiği, belirlenen kesitlerde 100., 300. ve 600. saniyeler için kabin içerisindeki havanın sıcaklık kontur grafiği, hız vektör grafiği ve basınç kontur grafiği olarak verilmiştir.

SEY ve HAD analizlerinde birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. HAD analizlerinde havanın kabin içerisindeki hareketi de incelenmiştir. Genel anlamda kabin alt bölgesinin üst bölgesinden sıcak olduğu durumlarda, olması gerektiği gibi, doğal taşınım ile hava hareketi gözlenmiştir. Kabinin alt bölgesinin üst bölgesinden daha soğuk olduğu durumlarda ise, yine beklendiği gibi, doğal taşınım hareketi gözlenmemiştir.

Görülen diğer bir durum ise analizin ilk başlarında herhangi doğal taşınım ile hava hareketi olmayıp kart kompleksinde ısınma oldukça hava hareketinin görülmeye başlamasıdır.

Isıtıcı plaka sıcaklığının 80°C , komponent gücünün de 4 mW/mm^3 olduğu durum sistemin en çok ısındığı durumdur. Bu durumda kabin iç duvar sıcaklıkları 20°C iken kart kompleksi ve hava sürekli ısınıp kabin yan duvarları ve üst duvar sürekli sistemin en soğuk bölgesi olarak kalmaktadır. Bu sebepten dolayı ilk andan itibaren giderek artan doğal taşınım ile hava hareketi görülmektedir.

Diğer bir senaryoda sistem başlangıç sıcaklığı 50°C , plaka sıcaklığı 20°C ve komponent gücü $0,5 \text{ mW/mm}^3$ değerindedir. Bu sınır şartları sistemde yalnızca komponent içerisinde çok küçük miktarda bir ısınma olup diğer bölgelerde soğumanın gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Plaka sıcaklığı ilk andan itibaren sistem başlangıç sıcaklığından düşüktür. Kabin alt kısımlar soğuk üst kısımlar nispeten sıcak ve soğumakta olduğundan bu senaryoda herhangi bir doğal taşınım hareketi görülmemektedir.

Sistem başlangıç sıcaklığı 50°C , plaka sıcaklığı 20°C ve komponent gücü 4 mW/mm^3 olduğunda benzer şekilde plaka ile hava arasında doğal taşınım hareketi görülmemektedir. Fakat komponentte üretilen ısıdan kaynaklı olarak komponent ve civarının ısınmasıyla ilerleyen sürelerde doğal taşınım ile hava hareketi görülmeye başlanmıştır. K-1 noktası komponent gücünden dolayı ilk andan itibaren ısınırken, K-3 noktası önce plaka sıcaklığının düşük olmasının etkisiyle bir miktar azalıp daha sonra artmaya başlamıştır.

Başlangıç sıcaklığının 50°C , plaka sıcaklığının 80°C olduğu durumda komponent gücü $0,5 \text{ mW/mm}^3$ iken bile her üç nokta da ilk andan itibaren oldukça etkili bir şekilde ısınmakta olup sistemde net bir doğal taşınım hareketi olduğu sıcaklık kontur ve hız vektör grafiklerinden anlaşılmaktadır. Hem ısıtıcı plaka sıcaklığı 80°C hem de komponent gücü 4 mW/mm^3 olduğu durumda ise doğal taşınım ile hava hareketi daha net ve hızlı gerçekleşmektedir. Bu senaryoda K-1, K-2 ve K-3 noktalarının diğer senaryolara göre en yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmüştür. K-1 noktası bu senaryoda 600 saniye sonunda yaklaşık 95°C civarına ulaşmıştır.

Yukarıda bahsedilen 5 senaryoda belirtilen sınır şartlarında K-1, K-2 ve K-3 noktaları için SEY ve HAD analiz sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır. 5 senaryo için de SEY ve

HAD analizleri en fazla 5°C hata ile örtüşmektedir. Bazı senaryolarda analizin ortalarında 5°C'ye yakın olan bu fark analizin sonlarında daha da azalmaktadır. Ek olarak bu senaryolardan iki tanesi için gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ile iletim tabanlı SEY ve HAD analiz sonuçlarının da en fazla 5°C hata ile örtüştüğü görülmektedir.

Bu sonuçlar, iletim tabanlı SEY analiz modelinin doğru bir şekilde kurulduğunu ve HAD analizi olmadan, iletim tabanlı SEY analiz modelinde, kabin içerisindeki havanın, kart kompleksinin termal davranışına etkisinin doğru bir şekilde yansıtılabildiğini göstermektedir. Böylece çalışmanın asıl amacı olan, bir elektronik sistemin termal davranışının farklı sınır şartlarında parametrik olarak hızlı ve doğru bir şekilde incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

İrdelenmesi gereken bir durum şudur ki, iletim tabanlı SEY analiz modelinde taşınım sınır şartı için tanımlanan ortam sıcaklıklarının 64 analiz için deneyde alınan hava sıcaklık ölçümlerinden, diğer 5 analiz için HAD analiz sonuçlarından elde edilmesidir. Bunun yapılmasının amacı yukarıda da belirtildiği gibi HAD ve SEY analiz sonuçları arasında makul bir karşılaştırma yapılmasıdır. Çalışmanın asıl amacı göz önünde bulundurulduğunda, bu işlemin sonuçlara herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamaktadır.

Öneriler

Bu çalışmada, bir ısıtıcı plakanın üzerine yerleştirilmiş ve iki adet komponent bulunduran bir elektronik kart kompleksinin kapalı ortamda doğal taşınım altında zamana bağlı olarak çalıştığı durum için deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve bu problem için deney sonuçları kullanılarak iletim tabanlı SEY ısı transfer analiz modelinin doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, taşınım katsayıları analiz modelinin doğrulanması aşamasında belirlenmiş fakat taşınım sınır şartında kullanılan ortam sıcaklığı değerleri için deneysel veriler kullanılmıştır. Doğrulan analiz modeli kullanılarak 64 farklı sınır şartı için sistemin termal davranışı incelenmiştir. Son olarak 5 farklı sınır şartı için SEY ve HAD analizleri gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaya ek olarak gerçekleştirilebilecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur;

- İletim tabanlı SEY analiz modelinde taşınım sınır şartının tanımlanması için gerekli olan ortam sıcaklıkları da analiz modelinin doğrulanması aşamasında belirlenebilir.

Böylece kurulan analiz modeli daha bütünleşik ve kapsamlı olarak kullanılabilir olacaktır.

- Kartın, içerisinde bulunduğu kapalı ortam hacmi değiştirilerek taşınım katsayıları hacme bağlı olarak belirlenebilir. Böylece kapalı hacmin elektronik kartın termal davranışına etkisi incelenebilir.
- Kart geometrisi ve komponentlerin kart üzerindeki konumu değiştirilerek ek parametrik analizler gerçekleştirilebilir.
- Kartın kapalı hacim içerisinde zemin ile yaptığı açı değiştirilerek (30°, 60°, 90°, 180° vb.) doğrulama çalışması tekrarlanabilir.
- Kartın ısıtıcı plakadan uzaklığı değiştirilerek doğrulama çalışması tekrarlanabilir.
- Komponent sayısı artırılarak farklı komponent sayıları için termal davranışı parametrik olarak incelenebilir.
- Baskı devre kartı ayakları için farklı termal yayılım katsayılarında malzemeler kullanılarak sistem ile ısı kaynakları arasındaki ısı akışı incelenebilir.
- Elektronik kart etrafına gerçek uygulamalarda karşılaşılabilecek ek ısı kaynakları yerleştirilerek analiz modeli tekrar doğrulanabilir.
- Sistemde, faz değiştiren malzeme, ısı kuyu vb. pasif soğutma yöntemleri kullanılarak kart kompleksinin termal davranışı incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Ocak, M. (2010). *Conduction Based Compact Thermal Modeling For Thermal Analysis of Electronic Components*, Master's Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, 27-124.
2. Eveloy, V. and Rodgers, P. (2005, December). Prediction of electronic component-board transient conjugate heat transfer. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 28(4), 817–829
3. Byon, C., Choo, K. and Kim, S. J. (2011, April). Experimental and analytical study on chip hot spot temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(9-10), 2066–2072.
4. Lira, E. and Greenlee, C. (2007). Thermal Analysis and Testing of Missile Avionics Systems. In *AIAA Thermophysics Conference*. Miami, Florida: AIAA.
5. Devellioglu, Y. (2008). *Electronic Packaging and Environmental Test and Analysis of an Emi Shield Electronic Unit for Naval Platform*, Master's Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, 103-136.
6. Cheng, H.-C., Ciou, W.-R., Chen, W.-H., Kuo, J.-L., Lu, H.-C. and Wu, R.-B. (2013, April). Heat dissipation analysis and design of a board-level phased-array transmitter module for 60-GHz communication. *Applied Thermal Engineering*, 53(1), 78–88.
7. Kumar, V., Somashekhar, V. and Jagalur, S. (2015, May). Thermal Management of Electronic Devices used in Automotive Safety A DoE approach. In *SIMULIA Community Conference*. Berlin.
8. Cheng, H. C., Chen, W. H. and Cheng, H. F. (2008, April). Theoretical and experimental characterization of heat dissipation in a board-level microelectronic component. *Applied Thermal Engineering*, 28(5-6), 575–588.
9. Joshy, S., Jellesen, M. and Ambat, R. (2017, July). Effect of interior geometry on local climate inside an electronic device enclosure. In *16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. Orlando, Florida: IEEE.
10. Xu, G. (2017, July). Multi-core server processors thermal analysis. In *16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. Orlando, Florida: IEEE.
11. Yu, E. and Joshi, Y. (2002, December). Heat transfer enhancement from enclosed discrete components using pin–fin heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(25), 4957–4966.
12. Stancato, F., Santos, L., and Pustelnik, M., (2017, September). Electronic Package Cooling Analysis in an Aircraft Using CFD. In *AeroTech Congress & Exhibition*. EMBRAER.

13. Deng, Q.-H. (2008). Fluid flow and heat transfer characteristics of natural convection in square cavities due to discrete source–sink pairs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(25-26), 5949–5957.
14. Khatamifar, M., Lin, W., Armfield, S., Holmes, D. and Kirkpatrick, M. (2017, February). Conjugate natural convection heat transfer in a partitioned differentially-heated square cavity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 82, 161.
15. Zaman, F. S., Turja, T. S. and Molla, M. M. (2013). Buoyancy Driven Natural Convection Flow in an Enclosure with Two Discrete Heating from below. *Procedia Engineering*, 56, 104–111.
16. Nogueira, R. M., Martins, M. A. and Ampessan, F. (2011). Natural Convection In Rectangular Cavities With Different Aspect Ratios. *Revista De Engenharia Térmica*, 10(1-2), 44.
17. Taliyan, S. S., Sakar, S. and Kumar, M. (2010, December). Finite element based thermal analysis of sealed electronic rack and validation. In *2nd International Conference on Reliability, Safety and Hazard* (443–447). Mumbai, India: IEEE.
18. Chavan, S. and Sathe, A. (2016, July). Natural Convection Cooling of Electronic Enclosure. *International Journal of Trend in Research and Development*, 3(4), 93–97.
19. Han, C. K. and Jung, H. (2017, December). A study on thermal behaviour prediction for automotive electronic unit based on CFD. In *23rd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*. Amsterdam: IEEE.
20. Chen, W.-H., Cheng, H.-C. and Shen, H.-A. (2003). An effective methodology for thermal characterization of electronic packaging. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(1), 222–232.
21. Pang Y. F. (2005). *Assessment of Thermal Behavior and Development of Thermal Design Guidelines for Integrated Power Electronics Modules*, Doctoral dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
22. Zahn, B. A. and Stout, R. P. (1997, January). Evaluation of isothermal and isoflux natural convection coefficient correlations for utilization in electronic package level thermal analysis. In *Thirteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. Austin, Texas: IEEE.
23. Dhinsa, K. K., Bailey, C. J. and Pericleous, K. A. (2004). Turbulence modelling and it's impact on CFD predictions for cooling of electronic components. In *The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*. Las Vegas, Nevada: IEEE.
24. Rosten, H. I., Addison, J. D., Viswanath, R., Davies, M. and Fitzgerald, E. (1995, May). Development, validation and application of a thermal model of a plastic quad flat pack. In *45th Electronic Components & Technology Conference*. Las Vegas, Nevada: IEEE

25. Lall, B. S., Guenin, B. M., Marrs, R. C. and Molnarr, R. J. (1996, March). Parametric FEA thermal model for QFP packages. In *Twelfth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Proceedings*. Austin, Texas: IEEE.
26. Lall, B. S., Guenin, B. M. and Molnar, R. J. (1995, February). Methodology for thermal evaluation of multichip modules. In *11th Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. San Rose, California: IEEE.
27. Rodgers, P., Eveloy, V., Lohan, J., Fager, C. M., Tiilikka, P. and Rantala, J. (1999, March). Experimental validation of numerical heat transfer predictions for single and multi-component printed circuit boards in natural convection environments. In *Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. San Diego, California: IEEE.
28. Adams, V. H., Blackburn, D. H., Joshi, Y. W. and Berning, D. undefined. (1997, January). Issues in validating package compact thermal models for natural convection cooled electronic systems. In *Thirteenth Annual IEEE. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. Austin, Texas: IEEE.
29. Eveloy, V., Rodgers, P. and Lohan, J. (2002, May). Comparison of numerical predictions and experimental measurements for the transient thermal behavior of a board-mounted electronic component. In *Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*. San Diego, California: IEEE.
30. Eveloy, V., Rodgers, P. and Hashmi, M. S. J. (2003, March). Numerical prediction of electronic component heat transfer: an industry perspective. In *Nineteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. San Jose, California: IEEE.
31. Joiner, B. and Adams, V. (1999, March). Measurement and simulation of junction to board thermal resistance and its application in thermal modeling. In *Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. San Diego, California: IEEE.
32. Rodgers, B., Punch, J. and Jarvis, J. (2002, May). Finite element modelling of a BGA package subjected to thermal and power cycling. In *Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*. San Diego, California: IEEE.
33. Bosch, E. G. T. and Lasance, C. J. M. (2000, March). Accurate Measurement of Interface Thermal Resistance by Means of a Transient Method. In *Sixteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. San Jose, California: IEEE.
34. Lohan, J. and Davies, M. (1994, May). Transient Thermal Behaviour Of A Board-Mounted 160-Lead Plastic Quad Flat Pack. In *4th Intersociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems*. Washington, District of Columbia: IEEE.

35. Steinberg, D. S. (1991). *Cooling techniques for electronic equipment*. New York: Wiley, 35-155.
36. Modest, M. F. (2013). *Radiative heat transfer*. New York: Academic Press, 61-180.
37. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P. (1985). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: Wiley, 560-584.
38. Çengel Y. A. and Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. New York, NY: McGraw-Hill Education, 466-469.
39. Ellison, G. N. (2020). *Thermal computations for electronics: conductive, radiative, and convective air cooling*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 143-321.
40. American Institute of Aeronautics and Astronautics. (1998). *Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations*. Reston, Virginia: AIAA, 1-19.
41. Remsburg, R. (2001). *Thermal design of electronic equipment*. Boca Raton: CRC, 160-187.
42. Bejan, A. (2013). *Convection heat transfer*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 243-307.
43. Arpaci, V. S. and Larsen, P. (1983). *Convection heat transfer*. Taipei: Central, 21-46.
44. Coombs, C. F. and Holden, H. T. (2016). *Printed circuits handbook*. New York: McGraw-Hill Education, 357-374.
45. Gilmore, D. G. and Donabedian, M. (2003). *Spacecraft thermal control handbook*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 523-636.
46. Tu, J., Liu, C., Yeoh, G. H. and Tu, J. (2013). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Butterworth-Heinemann, 219-274.
47. Kumar, S. (2009). *CFD Analysis of Natural Convection in Differentially Heated Enclosure*, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela, Odisha, 11-24.
48. Malik, A. H., Shah, A. and Khushnood, S. (2013, June). CFD analysis of heat transfer within a bottom heated vertical concentric cylindrical enclosure. *Journal of Physics: Conference Series*, 439, 012004.
49. Ganguli, A., Pandit, A. and Joshi, J. (2009, May). CFD simulation of heat transfer in a two-dimensional vertical enclosure. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(5), 711-727.

50. Boukhanouf, R. and Haddad, A. (2010, November). A CFD analysis of an electronics cooling enclosure for application in telecommunication systems. *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2426–2434.
51. Anandan, S. and Ramalingam, V. (2008). Thermal management of electronics: A review of literature. *Thermal Science*, 12(2), 5–26.
52. Pape, H., Schweitzer, D., Janssen, J., Morelli, A. and Villa, C. (2004, September). Thermal transient modeling and experimental validation in the European project PROFIT. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*.
53. İlhan, D. C. (2016). *Gan Tabanlı Transistörlerde Nümerik Analiz Yöntemi İle Isıl Direnç Karakterizasyonu Yapılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 61-65.
54. Star-CCM+ v12.04 User Guide, Siemens PLM Software, 2017.
55. Star-CCM+ v12.04 Theory Guide, Siemens PLM Software, 2017.
56. Hutton, D. V. (2013). *Fundamentals of finite element analysis*. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 222-285.
57. Holman, J.P. (1994). *Experimental Methods for Engineers* (Sixth edition). New York: McGraw-Hill, 394-409.



EK-1. Hata analizi

Deneysel çalışma kapsamında birtakım ölçümler yapılır. Ölçümler sonucunda elde edilen bağımsız değişkenler başka bağımlı değişkenlerin hesaplanmasında kullanılır. Hesaplanacak değişken R ve bu değişkene etki eden bağımsız değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots x_n$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir. [57]

$$R=R(x_1, x_2, x_3, \dots x_n)$$

Bağımsız değişkenlerin hata miktarı $W_1, W_2, W_3, \dots W_n$ ve R bağımlı değişkeninin hata miktarı W_R aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

Deneyslerde ölçülen ve hesaplamalarda kullanılan bağımsız değişkenlerin hata oranları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Hata analizinde kullanılan deney verileri

Çizelge 6.1. Ölçüm sistemlerindeki hata oranları

Bağımsız Değişken	Hata Oranı
Sıcaklık, T	max(1°C, %0,75)
Boyut, (örn. L)	0,00005 m
Voltaj, E	%1,5
Akım, I	%1

Çizelge 6.2. Hata analizinde kullanılan deney verileri

Voltaj, E	6,1 V
Akım, I	0,26 A
Kart kalınlığı, L	0,00145 m
Q_{komp}	0,793 W
Komponent kart arası iletim alanı, A_{iletim}	$0,0222 \times 0,0095 = 0,00021 \text{ m}^2$
Komponent hacmi, V	$1,99 \times 10^{-7} \text{ m}^3$

EK-1. (devam) Hata analizi

Çizelge 6.2. (devam) Hata analizinde kullanılan deney verileri

Komponent sıcaklığı, T_{komp}	93°C
Kart alt yüzey sıcaklığı, T_{kart_alt}	81°C
Ortam sıcaklığı, T_{ortam}	45°C
Komponent ilk sıcaklık, T_1	48,6°C
Komponent son sıcaklık, T_2	93°C

Komponentlere verilen gücün hesaplanmasındaki hata oranı,

$$Q_{komp} = IxE = 0,793 \text{ W}$$

$$\frac{W_{Q_{komp}}}{Q_{komp}} = \left[\left(\frac{W_I}{I} \right)^2 + \left(\frac{W_E}{E} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,018$$

$$W_{Q_{komp}} = 0,0143$$

Kart kalınlığı boyunca termal direncin hesaplanmasındaki hata oranı,

$$R_{kart} = \frac{L}{k} = \frac{0,00145}{0,3} = 0,00483 \frac{m^2 K}{W}$$

$$\frac{W_{R_{kart}}}{R_{kart}} = \frac{W_L}{L} = \frac{0,00005}{0,00145} = 0,0345$$

$$W_{R_{kart}} = 0,000167$$

Komponentten karta geçen ısı akısının hesaplanmasındaki hata oranı,

$$q_{iletim} = \frac{T_{komp} - T_{kart_alt}}{R_{temas} + R_{kart}} = \frac{93 - 81}{0,0143 + 0,00483} = 627,28 \text{ W/m}^2$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{q_{iletim}}}{q_{iletim}} &= \left[\left(\frac{W_{T_{komp}}}{T_{komp} - T_{kart_alt}} \right)^2 + \left(\frac{W_{T_{kart_alt}}}{T_{komp} - T_{kart_alt}} \right)^2 + \left(\frac{W_{R_{kart}}}{R_{kart}} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left(\left(\frac{1}{12} \right)^2 + \left(\frac{1}{12} \right)^2 + \left(\frac{0,000167}{0,00483} \right)^2 \right)^{1/2} = 0,123 \end{aligned}$$

EK-1. (devam) Hata analizi

$$W_{q_{iletim}} = 77,04$$

Komponentten karta ısı geçiş alanının hesaplanmasındaki hata oranı,

$$A_{iletim} = a \times b = 0,0222 \times 0,0095 = 0,000211 m^2$$

$$\frac{W_{A_{iletim}}}{A_{iletim}} = \left(\left(\frac{W_a}{a} \right)^2 + \left(\frac{W_b}{b} \right)^2 \right)^{1/2} = \left(\left(\frac{0,00005}{0,0222} \right)^2 + \left(\frac{0,00005}{0,0095} \right)^2 \right)^{1/2} = 0,0057$$

$$W_{A_{iletim}} = 0,0000012$$

Komponentten karta toplam ısı geçişinin hesaplanmasındaki hata oranı,

$$Q_{iletim} = q_{iletim} \times A_{iletim} = 627,28 \times 0,000211 = 0,1324 W$$

$$\frac{W_{Q_{iletim}}}{Q_{iletim}} = \left(\left(\frac{W_{q_{iletim}}}{q_{iletim}} \right)^2 + \left(\frac{W_{A_{iletim}}}{A_{iletim}} \right)^2 \right)^{1/2} = 0,123$$

$$W_{Q_{iletim}} = 0,0163$$

Komponent hacminin hesaplanmasındaki hata oranı,

$$V = a \times b \times c = 0,0222 \times 0,0095 \times 0,0092 = 0,00000194 m^3$$

$$\frac{W_V}{V} = \left[\left(\frac{W_a}{a} \right)^2 + \left(\frac{W_b}{b} \right)^2 + \left(\frac{W_c}{c} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,00789$$

$$W_V = 1,5e - 8$$

Komponentte depolanan ısı miktarının hesaplanmasındaki hata oranı,

$$Q_{depo} = \frac{m \times c_p \times \Delta T}{\Delta t} = \frac{\rho \times V \times c_p \times \Delta T}{\Delta t} = \frac{3890 \times 0,00000194 \times 880 \times 44,5}{600} = 0,49254 W$$

$$\frac{W_{Q_{depo}}}{Q_{depo}} = \left(\left(\frac{W_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{W_{T_1}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{W_{T_2}}{\Delta T} \right)^2 \right)^{1/2} = \left((0,00789)^2 + \left(\frac{1}{44,5} \right)^2 + \left(\frac{1}{44,5} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$= 0,0327$$

$$W_{Q_{depo}} = 0,0161$$

EK-1. (devam) Hata analizi

Komponent ile ortamda bulunan hava arasında taşınım ve ısıtım yoluyla gerçekleşen ısı transferinin hesaplanmasındaki hata oranı,

$$Q_{\text{taşınım}} + Q_{\text{ısıtım}} = Q_{\text{komp}} - Q_{\text{iletim}} - Q_{\text{depo}} = 0,793 - 0,1324 - 0,4925 = 0,1681 \text{ W}$$

$$\frac{W_{Q_{\text{taşınım}}+Q_{\text{ısıtım}}}}{Q_{\text{taşınım}} + Q_{\text{ısıtım}}} = \left(\left(\frac{W_{Q_{\text{komp}}}}{Q_{\text{komp}}} \right)^2 + \left(\frac{W_{Q_{\text{iletim}}}}{Q_{\text{iletim}}} \right)^2 + \left(\frac{W_{Q_{\text{depo}}}}{Q_{\text{depo}}} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$= (0,018^2 + 0,123^2 + 0,0327^2)^{1/2} = 0,129$$

$$W_{Q_{\text{taşınım}}+Q_{\text{ısıtım}}} = 0,0217$$

Komponent ile ortamda bulunan hava arasında taşınım ve ısıtım yoluyla ısı transferi gerçekleşen alanın hesaplanmasındaki hata oranı,

$$A_{\text{taşınım}+\text{ısıtım}} = a \times b + 2 \times b \times c + 2 \times a \times c$$

$$= 0,0222 \times 0,0095 + 2 \times 0,0095 \times 0,0092 + 2 \times 0,0222 \times 0,0092$$

$$= 0,0007905 \text{ m}^2$$

$$\frac{W_{A_{\text{taşınım}+\text{ısıtım}}}}{A_{\text{taşınım}+\text{ısıtım}}} = \left[\left(\frac{W_a}{a} \right)^2 + \left(\frac{W_b}{b} \right)^2 + \left(\frac{W_c}{c} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,00798$$

$$W_{A_{\text{taşınım}+\text{ısıtım}}} = 6,3e - 6$$

Komponent ile ortamda bulunan hava arasında taşınım ve ısıtım yoluyla birim alanda gerçekleşen ısı transferinin hesaplanmasındaki hata oranı,

$$q_{\text{taşınım}} + q_{\text{ısıtım}} = \frac{Q_{\text{taşınım}} + Q_{\text{ısıtım}}}{A_{\text{taşınım}+\text{ısıtım}}} = 634,08 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{W_{q_{\text{taşınım}}+q_{\text{ısıtım}}}}{q_{\text{taşınım}} + q_{\text{ısıtım}}} = \left(\left(\frac{W_{Q_{\text{taşınım}}} + W_{Q_{\text{ısıtım}}}}{Q_{\text{taşınım}} + Q_{\text{ısıtım}}} \right)^2 + \left(\frac{W_{A_{\text{taşınım}}} + W_{A_{\text{ısıtım}}}}{A_{\text{taşınım}+\text{ısıtım}}} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$= (0,129^2 + 0,00798^2)^{1/2} = 0,129$$

$$W_{q_{\text{taşınım}}+q_{\text{ısıtım}}} = 81,796$$

EK-1. (devam) Hata analizi

Doğrudan deney verileri kullanılarak hesaplanan taşınım katsayısındaki hata oranı,

$$h = \frac{q_{taşınım} + q_{ışınım}}{T_{komp} - T_{ortam}} = \frac{634,08}{93 - 45} = 13,2 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\frac{W_h}{h} = \left[\left(\frac{W_{q_{taşınım}} + W_{q_{ışınım}}}{q_{taşınım} + q_{ışınım}} \right)^2 + \left(\frac{W_{T_{komp}}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{W_{T_{ortam}}}{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \left(0,129^2 + 2x \left(\frac{1}{48} \right)^2 \right)^{1/2} = 0,133$$

$$W_h = 1,756$$

Mevcut çalışma kapsamında analiz modelinin doğrulanması kapsamında kullanılan denklem ile hesaplanan taşınım katsayısındaki hata oranı,

$$h = 0,52C \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25} = 0,52Cx \left(\frac{92 - 57}{0,01331} \right)^{0,25} = 25,3 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\frac{W_h}{h} = \left[\left(\frac{0,25\Delta T^{-0,75}}{\Delta T^{0,25}} W_{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{(-0,25)L^{-1,25}}{L^{-0,25}} W_L \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \left(\left(\frac{0,25x35^{-0,75}}{35^{0,25}} x1 \right)^2 + \left(\frac{(-0,25)x0,01331^{-1,25}}{0,01331^{-0,25}} x0,00005 \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$= 0,0072$$

$$W_h = 0,1822$$

Rayleigh sayısının hesaplanmasındaki hata oranı

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu} = 8630$$

$$\frac{W_{Ra}}{Ra} = \left[\left(\frac{W_{T_1}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{W_{T_2}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{3L^2}{L^3} W_L \right)^2 \right]^{1/2} = \left(\left(\frac{1}{26} \right)^2 + \left(\frac{1}{26} \right)^2 + (0,01789)^2 \right)^{1/2}$$

$$= 0,055$$

$$W_{Ra} = 474,7$$

EK-1. (devam) Hata analizi

Nusselt sayısının hesaplanmasındaki hata oranı,

$$Nu = 0,54Ra^{0,25} = 5,2$$

$$\frac{W_{Nu}}{Nu} = \left[\left(\frac{0,25Ra^{-0,75}}{Ra^{0,25}} W_{Ra} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,01375$$

$$W_{Nu} = 0.0715$$

Literatürde bulunan denklem kullanılarak hesaplanan taşınım katsayısındaki hata oranı,

$$h = \frac{Nuxk}{L} = 8,1$$

$$\frac{W_h}{h} = \left[\left(\frac{W_{Nu}}{Nu} \right)^2 + \left(\frac{W_L}{L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,014$$

$$W_h = 0,114$$

Çizelge 6.3. Hata analizi değerleri

Değişken	Değeri	Hata Miktarı	Hata Oranı (%)
Komponentte üretilen ısı miktarı	$Q_{komp} = 0,793 \text{ W}$	$W_{Q_{komp}} = 0,0143$	1,80
Kart kalınlığı boyunca termal direnç	R_{kart} $= 0,00483 \frac{m^2 K}{W}$	$W_{R_{kart}}$ $= 0,000167$	3,45
Komponentten karta iletim yoluyla geçen ısı akısı	$q_{iletim} = 627,28 \frac{W}{m^2}$	$W_{q_{iletim}} = 77,04$	12,3
Komponent ısı iletim alanı	A_{iletim} $= 0,000211 m^2$	$W_{A_{iletim}} = 1,2e - 6$	0,57
Komponentten karta iletim yoluyla geçen toplam ısı miktarı	$Q_{iletim} = 0,1324 \text{ W}$	$W_{Q_{iletim}} = 0,0163$	12,3
Komponent hacmi	$V = 0,00000194 m^3$	$W_V = 1,5e - 8$	0,79

EK-1. (devam) Hata analizi

Çizelge 6.3. (devam) Hata analizi değerleri

Komponentte depolanan ısı miktarı	$Q_{depo} = 0,49254 \text{ W}$	$W_{Q_{depo}} = 0,0161$	3,27
Komponentten ortama taşınım ve ışınila geçen toplam ısı miktarı	$Q_{taşınım} + Q_{ışınım} = 0,1681 \text{ W}$	$W_{Q_{taşınım}+Q_{ışınım}} = 0,0217$	12,9
Komponentten ortama taşınım ve ışınila ısı geçiş alanı	$A_{taşınım+ışınım} = 0,0007905 \text{ m}^2$	$W_{A_{taşınım+ışınım}} = 6,3e - 6$	0,80
Komponentten ortama taşınım ve ışınila geçen ısı akısı	$q_{taşınım} + q_{ışınım} = 634,08 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$W_{q_{taşınım}+q_{ışınım}} = 81,796$	12,9
Deneyssel yöntemle hesaplanan taşınım katsayısı	$h = 13,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	$W_h = 1,756$	13,3
Çalışma kapsamında kullanılan denkleme göre hesaplanan taşınım katsayısı	$h = 25,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	$W_h = 0,1822$	0,72
Rayleigh sayısı	$Ra = 8630$	$W_{Ra} = 474,7$	5,50
Nusselt sayısı	$Nu = 5,2$	$W_{Nu} = 0,0715$	1,38
Literatürdeki denkleme göre hesaplanan taşınım katsayısı	$h = 8,1$	$W_h = 0,114$	1,40

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : USUL, Yener
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 30.07.1993, Kırşehir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (533) 140 38 45
 e-mail : yener.usul@roketsan.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	ODTÜ / Makine Mühendisliği	2016
Lise	Gölbaşı Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Roketsan	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Usul Y., Acar B. and Başkaya Ş. (2019, June). Validation of a Finite Element Thermal Analysis Model of a Simple Electronics Board. In *9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*. Istanbul, Turkey.

Hobiler

Kitap okuma, doğa yürüyüşü



GAZİ GELECEKTİR..