T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YER SABİT UYDULARDA ISIL KONTROL SİSTEMİ ÖN TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR METODUNDA AĞ YAPISI/SİMÜLASYON PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Yunus MURAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Eş Danışman

Prof. Dr. Nedim SÖZBİR

Temmuz, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YER SABİT UYDULARDA ISIL KONTROL SİSTEMİ ÖN TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR METODUNDA AĞ YAPISI/SİMÜLASYON PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Yunus MURAT tarafından hazırlanan tez çalışması 05.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı-Proses Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Prof. Dr. Nedim SÖZBİR Sakarya Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Hatice MERCAN
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mehmet Zafer GÜL
Marmara Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yer Sabit Uydularda Isıl Kontrol Sistemi Ön Tasarımı Ve Sonlu Elemanlar Metodunda Ağ Yapısı/Simülasyon Parametrelerinin Optimizasyonu adlı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yunus MURAT

İmza

Aileme

ve

biricik eşime

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ ve eş danışmanım Sayın Nedim SÖZBİR'e teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmada gerçekleştirmiş olduğum ısıl modelleme ve analizler için gerekli bilgi birikimi kazanmamı sağlayan kurumum TUSAŞ'a ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarım sırasında yorumları ve önerileri ile değerli katkılar sağlayan çalışma arkadaşım Sayın Süleyman Kaancan ATAER'e ve yüksek lisans sürecimin başından beri sürekli desteğini hissettiğim değerli arkadaşım Ahmet Şahin ŞEN'e ayrıca teşekkür ederim. Beni bugünlere getiren ve her daim desteklerini esirgemeyen başta annem Zühal MURAT olmak üzere aileme teşekkürlerimi sunarım. Yalnızca tez döneminde değil hayatımın her anında bana inanan, destek olan ve hayatıma anlam katan biricik eşim Ezgi KUTLU MURAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yunus MURAT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xvi

ÖZET xvii

ABSTRACT xix

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti ... 4

1.2 Tezin Amacı ... 19

1.3 Hipotez ... 19

2 UYDU ISIL ORTAMI 20

2.1 Uzay Ortamı ... 20

2.1.1 Atmosfer ... 20

2.1.2 Güneş Radyasyonu Spektrumu ... 22

2.2 Yer Sabit Yörünge ve Yörüngesel Isıl Ortam ... 22

2.2.1 Direkt Güneş Radyasyonu ... 25

2.2.2 Albedo Radyasyonu ... 27

2.2.3 Dünya'nın Kızıl Ötesi Yayınımı ... 27

2.2.4 Uydu Isı Üretimi ... 29

2.2.5 Uydu Isı Yayınımı ... 30

2.3 Isı Geçiş Mekanizmaları ... 30

2.3.1 Işınım ile Isı Geçişi ... 31

2.3.2 İletim ... 36

2.3.3 Taşınım ... 37

2.3.4 Kombine Isı Geçiş Mekanizmaları ... 38

3 YER SABİT UYDULARDA ISIL KONTROL SİSTEMİ 39

3.1 Yer Sabit Uydularda Isıl Kontrol Sistemi Donanımları ... 39

3.1.1 Pasif Isıl Kontrol ... 39

3.1.2 Aktif Isıl Kontrol ... 48

4 UYDU PROJELERİNDEKİ FAZLAR 50

4.1 FAZ A-Fizibilite Fazı (Konsept Tasarım Fazı) ... 51

4.2 FAZ B-Ön Tasarım Fazı 51
4.2.1 Sıcaklık Marjları 52
4.3 FAZ C-Detay Tasarım Fazı 54
4.4 FAZ D-Kalifikasyon Fazı 54
5 ANALİTİK HESAPLAMALAR VE ISIL MODELLEMENİN TEMELLERİ 55
5.1 Uydu Enerji Dengesi 55
5.2 Malzeme ve Yüzey Özelliği Tanımlamaları 57
5.3 Sıcaklık Dengesi 58
5.3.1 En Kötü Sıcak Durum 58
5.3.2 En Kötü Soğuk Durum 62
5.4 Geometrik ve Isıl Matematiksel Modelleme 63
5.4.1 Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method) 63
6 YER SABİT UYDUNUN ISIL MATEMATİKSEL MODELİNİN OLUŞTURULMASI 68
6.1 Uydu Görev Yükü Tanımlaması ve El Hesabı ile Isı Atım Kabiliyeti Kontrolü 69
6.2 Basitleştirilmiş CAD Model 71
6.3 Uydu Global Sonlu Elemanlar Modelleri 73
6.3.1 MODEL A-Tek Eleman Modeli 75
6.3.2 Çoklu Eleman Modelleri 76
6.4 Ekipman ve Donanım Modellemeleri 83
6.4.1 Uydu Haberleşme Görev Yükü Ekipmanları 83
6.4.2 Isıl Donanımlar 88
6.5 Simülasyon Modeli- Isıl Bağlantılar, Radyasyon Hacim Zarfları ve Yörüngesel Isınma Tanımlamaları 90
6.5.1 İletim Isı Transferinin Modellenmesi 91
6.5.2 Işınım Isı Transferinin Modellenmesi 92
6.5.3 Tahmini Sıcaklık Hatasının Hesaplanması 95
7 ANALİZ SONUÇLARI 97
7.1 Farklı Boyutta Elemanlara Sahip Panel Ağ Yapılarının Analizleri 97
7.1.1 MODEL A-Tek Eleman Modeli 97
7.1.2 MODEL B-Kaba Ağ Yapısı 101
7.1.3 MODEL C-Detaylı Ağ Yapısı 114
7.1.4 MODEL D-Detaylı Ağ Yapısı-Ekipmanlara Göre Düzenlenmiş 126
7.1.5 MODEL E- Çok Detaylı Ağ Yapısı 131

7.2 Panel Ağ Yapılarının Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması 136
7.3 Simülasyon Modelinde Bazı Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi 142
7.4 Önerilen Modelde Yapılan Soğuk Durum Analizlerinin Sonuçları 156
8 SONUÇ VE ÖNERİLER **159**
KAYNAKÇA **161**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **165**

SİMGE LİSTESİ

I_i	A_i yüzeyine dik ışınım yoğunluğu [W/m²]
A	Alan [m²]
ρ_A	Ayna gibi yansıtma
q	Birim zamandaki ısı akısı [W/m²]
$\dot{Q}$	Birim zamandaki ısı geçişi [W]
ρ_D	Difüze yansıtma
α	Emicilik katsayısı [-]
τ	Geçirgenlik
$\{T\}$	Global bilinmeyenler matrisi (Sonlu Elemanlar Metodunda)
$[K]_e$	Global matris (Sonlu Elemanlar Metodunda)
$\{f\}$	Global yük matrisi (Sonlu Elemanlar Metodunda)
VF	Görüş faktörü [-]
$I_{Güneş}$	Güneşten gelen ısı akısı $[W/m^2]$
k	Isı iletim katsayısı [W/m. K]
Rji	Işınım ısı geçiş katsayısı
F_{ij}	i'den j'ye olan görüş faktörü
Cij	İletim değeri (W/K)
N	Katman Sayısı
M	Kütle [kg]
Δx	Mesafe [m]
c	Özgül Isı [J/kg.K]
ξ	Referans koordinat ekseni (x ekseni ile eşlenik)
η	Referans koordinat ekseni (y ekseni ile eşlenik)
T_i	Sıcaklık [K], [°C]
ΔT	Sıcaklık farkı [K]
σ	Stefan-Boltzmann Sabiti $[W/m^2 . K^4]$
f_{BE}	Şekil Fonksiyonu
ϵ_T	Tahmini sıcaklık hatası
h	Taşınım ısı geçiş katsayısı [W/m². K]
ε	Yayınım katsayısı [-]
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

AU	Astronomik Birim
CAD	Computer Aided Drawing (Bilgisayar Destekli Çizim)
ÇKYB	Çok Katmanlı Yalıtım Battaniyesi
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EPC	Electric Power Conditioner
ESA	European Space Agency
FDM	Finite Difference Method (Sonlu Farklar Metodu)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
GEO	Geostationary Orbit (Yer Sabit Yörünge)
GGY	Güney Görev Yükü
GMM	Geometrik Matematiksel Model
GTO	Geostationary Transfer Orbit (Yer Sabit Transfer Yörüngesi)
HPI	High Power Isolator
IKS	Isıl Kontrol Sistemi
ISS	International Space Station (Uluslararası Uzay İstasyonu)
KGG	Kalifikasyon Gözden Geçirme
KGY	Kuzey Görev Yükü
KTGG	Kritik Tasarım Gözden Geçirme
LEO	Low Earth Orbit (Alçak Dünya Yörüngesi)
MEO	Medium Earth Orbit (Orta Dünya Yörüngesi)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ONET	Output Network
OSR	Optik Solar Reflektör
ÖTGG	Ön Tasarım Gözden Geçirme
PCB	Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
PIU	Payload Interface Unit (Görev Yükü Arayüz Birimi)
RF	Radyo Frekans
SADM	Solar Array Drive Mechanism (Güneş Paneli Sürüş Mekanizması)
SGGG	Sistem Gereksinimleri Gözden Geçirme
SRN	Sıcaklık Referans Noktası

SSO	Sun-Synchronous Orbit (Güneş Eş Zamanlı Yörünge)
TKY	Tek Katmanlı Yalıtım
TMM	Termal Matematiksel Model
TSS	Thermal Synthesizer System (Ticari Yazılım)
TWT	Travelling Wave Tube (Yürüyen Dalga Tüpü)
0D	Sıfır Boyutlu
1D	Bir Boyutlu
2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Dört farklı radyatör alanı ve tek parça radyatör alanı kullanımı [5] ...7
Şekil 1.2 Isı borusu dizilimi 1(solda) ve 2(sağda) 8
Şekil 1.3 En kötü sıcak durumda ısı borusuz panelin sıcaklık dağılımı [5] 8
Şekil 1.4 En kötü soğuk durumda ısı borusuz panelin sıcaklık dağılımı [5] 9
Şekil 1.5 Isı borusu dizilimi 1ve 2-Panel sıcaklık dağılımı en kötü soğuk durum [5] 9
Şekil 1.6 Türk uydusu kuzey görev yükü ekipman ve ısı borusu yerleşimi [6] 10
Şekil 1.7 Türk uydusu güney görev yükü ekipman ve ısı borusu yerleşimi [6] 11
Şekil 1.8 Isıl modelin gösterimi [7].....13
Şekil 1.9 Maksimum tolerans değerlerindeki sıcaklık sonuçları [7].....14
Şekil 1.10 Minimum tolerans değerlerindeki sıcaklık sonuçları [7].....15
Şekil 1.11 Yer sabit uydunun görseli [8].....16
Şekil 1.12 Radyatör enerji dengesi [8].....16
Şekil 2.1 Alçak dünya yörüngesi ve yer sabit yörünge.....20
Şekil 2.2 Atmosfer basıncının yörünge uzaklığına göre değişimi [13].....21
Şekil 2.3 Uydu ısıl ortamı [14] 21
Şekil 2.4 Güneş radyasyonu spektrumu [15]. 22
Şekil 2.5 Yer sabit yörünge [16] 23
Şekil 2.6 Yer sabit transfer yörüngesi [16].....24
Şekil 2.7 Güneş'in NASA tarafından çekilen fotoğrafı [17] 25
Şekil 2.8 Yer sabit uydularda Güneş'in kuzey ve güney panele geliş açıları [5] 26
Şekil 2.9 Albedo ve kızıl ötesi yayınımın irtifa ile değişimi [15].....29
Şekil 2.10 Mevsimlere göre Güneş'in geliş açısının değişimi 29
Şekil 2.11 İki yüzey arasındaki görüş faktörü [20] 33
Şekil 2.12 Görüş faktörü toplam kuralı [21] 35
Şekil 2.13 Δx kalınlığında ve A alanına sahip bir levhadan iletimle geçen ısı [19] 36
Şekil 3.1 TURKSAT 5A uydusu [23] 40
Şekil 3.2 Çok katmanlı yalıtım battaniyesinin genel yapısı [24].....41
Şekil 3.3 Çok katmanlı yalıtım battaniyesi görseli [25].....41
Şekil 3.4 Tek katmanlı yalıtım görseli [27] 43

Şekil 3.5 Radyatör yüzeyinde enerji dengesi [15] 44
Şekil 3.6 Farklı tipte yüzeyleri ısıl optik özellikleri [15] 44
Şekil 3.7 Isı borusunun iç kısmındaki oluk yapısı [30] 46
Şekil 3.8 Isı borusunun çalışma prensibinin şematik gösterimi [31] 46
Şekil 3.9 Isı borusu için 80 muhtemel akışkanın ısı taşıma kapasiteleri [29] ..47
Şekil 3.10 Yer sabit yörüngede quartz aynaların bozunması [15] 48
Şekil 4.1 Proje fazlarında ısıl modelleme ve analiz aktiviteleri [35] 50
Şekil 4.2 Isıl kontrol sistemi sıcaklık marjları [36] 53
Şekil 5.1 21 Haziran gün dönümü 59
Şekil 5.2 21 Aralık gün dönümü 59
Şekil 5.3 Ekinoks gün dönümü 60
Şekil 5.4 Ekinoks gün dönümünde tutulma evresi 61
Şekil 5.5 Eleman, düğüm ve eleman kenarlarını içeren ağ yapısı örneği [32] ..64
Şekil 6.1 Gerçek CAD model ile basitleştirilmiş CAD model üzerindeki ağ yapılarının karşılaştırılması 72
Şekil 6.2 Uydu basitleştirilmiş CAD modeli 73
Şekil 6.3 Uydu geometrik matematiksel modeli 74
Şekil 6.4 Uydu tek eleman modeli 76
Şekil 6.5 Model-B FEM modeli 78
Şekil 6.6 Model-B görev yükü paneli eleman boyutları 79
Şekil 6.7 Model-C FEM modeli 79
Şekil 6.8 Model-C görev yükü paneli eleman boyutları 80
Şekil 6.9 Model-D görev yükü paneli eleman boyutları 81
Şekil 6.10 Model-D görev yükü paneli FEM modelinin eleman kalite kontrolü ..82
Şekil 6.11 Model-E görev yükü paneli eleman boyutları 83
Şekil 6.12 Güney görev yükünde ekipmanların yerleşimi 84
Şekil 6.13 Işınımsal TWT ve EPC ikilisi [39] 85
Şekil 6.14 HPI yüksek güç izolatörleri [40] 85
Şekil 6.15 Ku-bant ONET [41] 86
Şekil 6.16 Detaylı ve indirgenmiş ısıl geometrik modeller [43] 87
Şekil 6.17 Görev yükü paneli ısı borusu ve ekipman konumları 89
Şekil 6.18 Isı borusu sonlu elemanlar modeli 89
Şekil 6.19 ÇKYB sonlu elemanlar modeli (turuncu renkte) 90
Şekil 6.20 Paneldeki ısı iletimi temsili gösterimi 91

Şekil 6.21 Isı borularının ısıyı taşıması temsili gösterim.....92
Şekil 6.22 Yörüngesel ısınma.....93
Şekil 6.23 Uydu içi ve dışı radyasyon tanımlaması.....95
Şekil 7.1 Model A maksimum radyatör sıcaklıkları 98
Şekil 7.2 Model A yörünge boyunca sıcaklık değişimi.....98
Şekil 7.3 Model A Güneş görüş faktörlerinin yörünge boyunca değişimi.....99
Şekil 7.4 Model A gelen Güneş akılarının yörünge boyunca değişimi 99
Şekil 7.5 Model A maksimum radyatör sıcaklıkları-İç ışınım aktif.....100
Şekil 7.6 Model A yörünge boyunca sıcaklık değişimi-İç ışınım aktif.....101
Şekil 7.7 Model B güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=181440sn).....102
Şekil 7.8 Model B güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=181440sn)- Düğüm gösterimi.....103
Şekil 7.9 Model B güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=181440sn).....104
Şekil 7.10 Model B güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=181440sn).....104
Şekil 7.11 Model B güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları.....105
Şekil 7.12 Model B güney radyatör paneli ve iç yüzeyi tahmini sıcaklık hatası 106
Şekil 7.13 Model B güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları-(t=235920sn) İç ışınım aktif 107
Şekil 7.14 Model B güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları-(t=235920sn)-İç ışınım aktif-Düğüm gösterimi 107
Şekil 7.15 Model B güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=235920sn)-İç ışınım aktif 108
Şekil 7.16 Model B güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=235920sn)-İç ışınım aktif (Düğüm gösterimi) 109
Şekil 7.17 Model B güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları-İç ışınım aktif 110
Şekil 7.18 Model B güney radyatör paneli ve iç yüzeyi tahmini sıcaklık hatası-İç ışınım aktif.....111
Şekil 7.19 Model B güney görev yükü iç yüzünün net ışınım akısı 112
Şekil 7.20 Model B-3 yörünge analizi en sıcak en kritik ekipmanlar 113
Şekil 7.21 Model B-1 yörünge analizi en sıcak en kritik ekipmanlar 113
Şekil 7.22 Model B-3 yörünge (solda) ve kararlı durum sonrası 1 yörünge (sağda) güney radyatör sıcaklıkları.....114
Şekil 7.23 Model C-3 güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları 115
Şekil 7.24 Model C güney panel radyatör yüzey sıcaklıkları (t=253200s)-Düğüm gösterimi.....116

Şekil 7.25 Model C güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=253200s).....117
Şekil 7.26 Model C güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=253200s)-Düğüm gösterimi.....117
Şekil 7.27 Model C güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları.....118
Şekil 7.28 Model C- Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=234240s)-İç Işınım Aktif.....119
Şekil 7.29 Model C-3 Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=234240s)-İç Işınım Aktif-Düğüm Gösterimi.....119
Şekil 7.30 Model C-3 güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=234240s)-İç ışınım aktif.....120
Şekil 7.31 Model C-3 güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=234240s)-İç ışınım aktif-Düğüm gösterimi.....121
Şekil 7.32 Model C- güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları.....122
Şekil 7.33 Model C güney görev yükü iç yüzünün net ışınım akısı.....122
Şekil 7.34 Model C güney panel iç ve dış (radyatör) yüzey tahmini sıcaklık hatası.....123
Şekil 7.35 Model C 3 yörünge analizi en sıcak en kritik ekipmanlar.....124
Şekil 7.36 Model C-1 yörünge analizi en sıcak en kritik ekipmanlar.....124
Şekil 7.37 Model C-3 yörünge (solda) ve kararlı durum sonrası 1 yörünge (sağda) güney radyatör sıcaklıkları.....125
Şekil 7.38 Model D-Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=60480sn).....127
Şekil 7.39 Model D-Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=60480sn)-Düğüm gösterimi.....127
Şekil 7.40 Model D-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=60480s).....128
Şekil 7.41 Model D-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=60480s)-Düğüm gösterimi.....129
Şekil 7.42 Model D-Güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları.....130
Şekil 7.43 Model D Güney panel iç ve dış (radyatör) yüzey tahmini sıcaklık hatası.....130
Şekil 7.44 Model D-Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=61680sn).....132
Şekil 7.45 Model E-Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=61680sn)-Düğüm gösterimi.....132
Şekil 7.46 Model E-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=61680sn).....133
Şekil 7.47 Model E-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=61680sn)-Düğüm gösterimi.....134
Şekil 7.48 Model E-Güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları.....135

Şekil 7.49 Model E Güney panel iç ve dış (radyatör) yüzey tahmini sıcaklık hatası 135
Şekil 7.50 Model C, Model D ve Model E radyatör sıcaklıkları (en sıcak andaki) 138
Şekil 7.51 Model C, Model D ve Model E panel iç yüzey sıcaklıkları (en sıcak andaki) 138
Şekil 7.52 EPC-1 sıcaklığının farklı modellerdeki zamanla değişimi 139
Şekil 7.53 EPC-2 sıcaklığının farklı modellerdeki zamanla değişimi 139
Şekil 7.54 TWT-3 sıcaklığının farklı modellerdeki zamanla değişimi 140
Şekil 7.55 TWT-8 sıcaklığının farklı modellerdeki zamanla değişimi 140
Şekil 7.56 Yörünge üzeri 2 nokta 143
Şekil 7.57 Yörünge üzeri 4 nokta 143
Şekil 7.58 Yörünge üzeri 8 nokta 144
Şekil 7.59 Yörünge üzeri 12 nokta 144
Şekil 7.60 Yörünge üzeri 24 nokta 144
Şekil 7.61 Yörüngedeki nokta sayısı artıkça sıcakların değişimi 145
Şekil 7.62 Yörünge nokta sayısına göre EPC-1 sıcaklığının zamanla değişimi 146
Şekil 7.63 Yörünge nokta sayısına göre EPC-2 sıcaklığının zamanla değişimi 146
Şekil 7.64 Yörünge nokta sayısına göre TWT-3 sıcaklığının zamanla değişimi 147
Şekil 7.65 Yörünge nokta sayısına göre TWT-8 sıcaklığının zamanla değişimi 147
Şekil 7.66 Monte-Carlo ışın izlemenin işleyişi 151
Şekil 7.67 Monte-Carlo ışın sayısının etkisi [49] 152
Şekil 7.68 Monte-Carlo 1000 ışın sayısında güney panelin çevresel görüş faktörü 154
Şekil 7.69 Monte-Carlo 5000 ışın sayısında güney panelin çevresel görüş faktörü 154
Şekil 7.70 Monte-Carlo 10000 ışın sayısında güney panelin çevresel görüş faktörü 155
Şekil 7.71 Güney görev yükü panelinde ısıtıcı yerleşimi öngörüsü 157
Şekil 7.72 Güney görev yükü ekipmanlarının soğuk durumdaki sıcaklık değişimleri 158
Şekil 7.73 Güney görev yükü paneli iç ve dış yüzey sıcaklık dağılımları 158

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Uyduların Kütlesine Göre Sınıflandırılması [3] 2
Tablo 1.2 Simülasyon yazılımlarının özelliklerinin karşılaştırılması [4] 5
Tablo 1.3 Analiz sonuçları [6] 12
Tablo 1.4 ECSS standartlarında verilen tolerans değerleri [7] 14
Tablo 3.1 Bazı OSR tiplerinin ısıl-optik özellikleri [15] 45
Tablo 5.1 Sık kullanılan 1D elemanların şekilleri ve interpolasyon fonksiyonları 66
Tablo 5.2 Sık kullanılan 2D elemanların şekilleri ve interpolasyon fonksiyonları 66
Tablo 6.1 Ekipmanların yaklaşık ısı yayınımları.....69
Tablo 6.2 Ekipmanların çalışma sıcaklık limitleri.....70
Tablo 6.3 Uydu global modelinde kullanılan malzemelerinin özellikleri.....74
Tablo 6.4 Görev yükü panelinin bir yüzeyindeki elemanların özellikleri.....75
Tablo 7.1 3 yörünge ve kararlı durum sonrası 1 yörüngenin karşılaştırılması ..114
Tablo 7.2 3 yörünge ve kararlı durum sonrası 1 yörüngenin karşılaştırılması ..125
Tablo 7.3 Panel ağ yapılarının analiz sonuçlarının karşılaştırılması 136
Tablo 7.4 Yörünge üzerindeki nokta sayısının etkisi 145
Tablo 7.5 Zaman adımlarının etkisi 149
Tablo 7.6 Monte-Carlo ışın sayısının etkisi.....153

ÖZET

Yer Sabit Uydularda Isıl Kontrol Sistemi Ön Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Metodunda Ağ Yapısı/Simülasyon Parametrelerinin Optimizasyonu

Yunus MURAT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Eş-Danışman: Prof. Dr. Nedim SÖZBİR

Son yıllarda uydu tasarım ve üretim çalışmaları giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. Uydular yörüngede görev yaptıkları süre boyunca uzay ortamının aşırı ısıl koşullarına maruz kalırlar. Uydularda yapısal panellerde yer alan ekipmanların görevlerini sorunsuz olarak sürdürebilmesini sağlamak amacıyla izin verilen uçuş sıcaklık limitleri aralığında kalması için ısıl kontrol sistem tasarımı çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle olası en kötü senaryolar dikkate alınarak modellenmesi, simülasyonunun yapılması ve doğru bir şekilde test edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, konsept bir yer sabit haberleşme uydusunun genel ısıl tasarım adımları, ısıl modelleme ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada aynı zamanda uzay koşullarında görev yapan uyduların ısıl modelleme ve analizinin temel anlayışına da yer verilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, faydalı yük panellerinin ısı atım kabiliyetlerinin belirlenmesi için bazı analitik hesaplamalar yapılmıştır. Bir sonraki adımda, sonlu

elemanlar yöntemine dayalı ticari bir yazılım (NX-Space Systems Thermal) kullanılarak, farklı eleman boyutlarına sahip beş adet ısıl model oluşturulmuştur. Bu modellerin simülasyonları koşturulduktan sonra, modellerin yeterliliğinin değerlendirilmesi için sıcaklık sonuçları, simülasyon süreleri ve sonuç dosyalarının boyutundan oluşan bir karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca yörünge hesaplama noktaları, Monte-Carlo ışın sayıları gibi bazı simülasyon parametrelerinin değişiminin etkileri de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, genel uydu projelerinin farklı aşamalarında kullanmak üzere farklı ağ yapısı yoğunluğundaki modellerin yeterliliği hakkında önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uydu ısıl tasarım, ısıl modelleme ve yörünge simülasyonu, yer sabit uydu sonlu elemanlar yöntemi, ısı geçişi.

ABSTRACT

A Numerical Work For the Optimization of Mesh Sizes and Simulation Parameters Regarding with The Preliminary Thermal Design of Geo-satellites

Yunus MURAT

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Co-supervisor: Prof. Dr. Nedim SÖZBİR

In recent years, satellite design and manufacturing studies have an increasing importance. During their mission period in orbit, satellites are exposed to extreme thermal conditions of the space environment. In order to keep equipment that is accommodated on the structural panels of satellites within their allowable flight temperature limits, thermal control system design plays a crucial role. For this reason, it should be modeled, simulated, and tested accurately considering possible worst-case scenarios. Within the scope of this study, the general design steps, modeling, and simulation studies of a concept geostationary communication satellite have been performed. The study also includes the basic understanding of the thermal modeling and analysis of satellites under space conditions.

In the early stage of the study, some analytical calculations are performed for the determination of heat rejection capabilities of payload panels. In the next step, by using a commercial software (NX-Space Systems Thermal) based on the finite

element method, five thermal models that have different element sizes are created. After running simulations of these models, a comparison that consists of temperatures results, simulation times, and size of result files is made for evaluations of the sufficiency of the models. In addition, the effects of changing some simulation parameters such as orbital calculation points, Monte-Carlo ray numbers, etc. have been investigated. According to the obtained results, suggestions are given on the mesh density of models which will be sufficient to use in different phases of the satellite project.

Keywords: Satellite thermal design, thermal modelling and orbit simulation, geo-satellite, finite element method, heat transfer.

1
GİRİŞ

A.B.D Federal iletişim komisyonu eski başkanı bir anısından şöyle bahsediyor: “Bir ziyaretinde Başkan Kennedy bana iletişim uydularını sordu. Ona söyle cevap verdim: uyduları uzaya göndermek insanları göndermekten çok daha önemlidir. Çünkü uydular uzaya fikirleri taşır ve fikirler insanlardan daha uzun yaşarlar” [1].

Sputnik-1’in 1957’de uzaya gönderilmesiyle başlayan [2], insanoğlunun uzay serüveni ilk insanın uzaya çıkması ve aya ilk adım gibi insanlık için büyük adımlarla devam etmiştir. Bugün geldiğimiz noktada insanoğlu gelişen teknolojinin yardımıyla Güneş sistemindeki bütün gezegenler hakkında bilgiler edinebilme, üzerlerinde araştırmaları yapabilme kabiliyetlerine sahiptir. Yakın gelecekte insanoğlunun Mars’a ilk adımı atacağından kimsenin şüphesi yok. Belki de gezegende bir koloni kurarak orada yaşamaya başlayacak. Bütün bu gelişmelerin her aşamasında, öğrenilen bütün bilgilerde uzay araçlarının baş rolde olduğunu söylenebilir.

1957’de Dünya yörünge tek bir uydu varken bugün birbirlerine tehlike oluşturabilecek kadar çok sayıda (binlerce) uydu görev yapmaktadır. Dünya yörüngesinde önemli bir görev gerçekleştiren uydu türlerinden biri haberleşme uydularıdır. Bu tür uydular Dünya’nın yer sabit yörüngesinde görev yapmaktadır ve diğerlerine göre daha büyük ve karmaşık bir yapıya sahiptir.

Uydular görevlerini yerine getirirken uzay ortamında maruz kaldığı uzay ortamı ve buna bağlı ısıl yüklerden dolayı bir ısıl kontrol sistemine ihtiyaç duymaktadırlar. Isıl kontrol sistemi uydu üzerinde görev yapan ekipmanların uydunun ömür sonuna kadar güvenli bir şekilde çalışmasında için kritik öneme sahiptir.

Uydular kütle ve görevlerine göre sınıflandırılırlar. Uyduların kütlesi doğrudan uzaya erişim ile bağlantılı olduğundan en önemli özelliğidir. Ayrıca uyduların kütlesi, doğal olarak hacimlerini, kullanılabilecek sistemlerin büyüklük ve

kapasitelerini, uydu tarafından gerçekleştirilebilecek olan görev kapsam ve sayısını etkilemektedir [3]. Uyduların kütlelerine göre sınıflandırılmasını içeren bilgiler Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1 Uyduların Kütlesine Göre Sınıflandırılması [3]

Uyduların Sınıflandırılması		
Büyük	>1 ton	Türksat Uyduları
Orta	500 kg-1ton	Göktürk 1
Küçük	<500 kg	
Mini	100 kg-500 kg	Göktürk 2
Mikro	10 kg-100 kg	RASAT, LAGARİ
Nano	1 kg-10 kg	Türksat 3USAT
Piko	0.1 kg-1 kg	İTÜpSAT1
Femto	0.01 kg-0.1 kg	TAMSAT SimpleSAT
Atto	<0.01 kg	
Zepto	<0.001 kg	

Haberleşme uyduları büyük uydu sınıfına girmekte ve dolayısıyla en karmaşık uydu türüdür.

- **Yer Sabit Haberleşme Uyduları**

Yer sabit uydular yani haberleşme uyduları yer yüzünden yaklaşık 35786 km uzaklıkta ekvator düzleminde görev yapan uydulardır. Haberleşme amacıyla kullanılan bu uydular çok yüksek alıcı-verici anten modemlere benzetilebilir. Dönme periyotları Dünya'nın periyoduna eşittir ve bu da yer sabit uyduların dünyanın üzerinde bir konuma göre sabitlenmiş gibi kalmasını sağlamaktadır [3].

Yere göre sabit olmaları nedeni ile TV/radyo yayıncılığı, internet, data transferi hizmetleri için oldukça elverişlidir. Kutup bölgeleri GEO uydular tarafından kapsanmaz ancak bu kısımda nüfusun az olduğu düşünüldüğünde büyük bir dezavantaj değildir [3].

Haberleşme uyduları görev yükü ve platform adı verilen iki ana modülden oluşur. Görev yükü haberleşmeyi sağlayan ekipmanların bulunduğu modüldür. Platform ise haberleşme sistemini taşıyan ve destekleyen bölümdür. Bu modülde itki, güç, telemetri, telekoment ve mesafe ölçümü, yörünge kontrolü, ısıl kontrol ve yapı alt sistemleri yer almaktadır [3]. Bu alt sistemlerin farkı görevleri vardır. Görevlerinin tanımları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yapısal Alt Sistemi: Uydu üzerindeki ekipmanları taşıyan uydu iskeletini oluşturmaktadır. Görevi, uydunun en yüksek yapısal altında dahi muhafaza edilmesini sağlamaktadır.
- Güç Alt Sistemi: Uydu ekipmanlarının ihtiyaç duyduğu gücü, güneş panelleri ve piller vasıtasıyla sağlamakla görevlidir.
- Yörünge Yönelim Alt Sistemi: Uydunun yörüngede kontrolünü sağlayan ve istenilen yönelimi yapmasına olanak veren alt sistemdir.
- Görev Yükü Alt Sistemi: Uydunun görevini yerine getirmek için kullandığı donanımları içermektedir. Haberleşme uydularında görevlerinde aktarıcılar (transponder) yer almaktadır.
- Haberleşme Alt Sistemi: Uydunun dış dünya ile ara yüzü olan alt sistemdir. Yer istasyonundan gelen komutları antenleri aracılığı ile alır ve uydu bilgisayarına iletir. Uydu bilgisayarının ilettiği verileri yine haberleşme elektroniğine bağlı verici antenleri ile yer istasyonuna aktarır [3].
- Isıl Kontrol Alt Sistemi: Isıl kontrol alt sisteminin görevi tüm uydu bileşenlerinin, alt sistemlerinin, mühendislik ekipmanlarının, görev yüklerinin ve uçuş sisteminin sıcaklıklarını uzay aracının tüm ömrü boyunca tüm görev kipleri için güvenli çalışma ve hayatta kalma seviyelerinde tutmaktır. Diğer tüm alt sistemler gibi uydu ısıl kontrol alt sistemi de herhangi bir uydunun güvenilir çalışmasını ve uzun süreli hayatta kalmasını sağlamak için hayatidir [3].

Yer sabit yörüngelerinde görevlerini sürdüren TÜRKSAT 3A, 4A, 4B, 5A ve 5B bu tip uydulara örnek olarak verilebilir.

Bu tez çalışmasında yer-sabit yörüngede görev yapacak olan bir haberleşme uydusunun ısıl kontrol sisteminin ön tasarımına ilişkin çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar; uydunun maruz kaldığı uzay ortamının tanıtımı ile başlayıp analitik hesaplamalar, ısıl kontrol sistemi donanımlarının tanıtımını ve son olarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir paket yazılım kullanılarak gerçekleştirilen ısıl modelleme/analiz çalışmaları içermektedir. Isıl modelleme çalışmalarında farklı boyutlarda eleman büyüklüğüne sahip çözüm ağı yapıları kullanılmış ve bu ağ yapılarının uydu projelerinin farklı fazlarında kullanımı ile ilgili öneriler verilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Tez çalışması kapsamında, uydu ısıl kontrol üzerine yapılan literatür araştırmalarından görüldüğü üzere bu konudaki çalışmaların büyük çoğunluğu küp ve nano uydu ile ilgilidir. Bunun en önemli nedeni bu tür uyduların diğer uydu türlerine göre çok küçük, düşük maliyetli, kolay test edilebilen ve basit yapılı uydular olmasıdır.

Bu bölümde literatür araştırması sonucunda bulunan ve çoğunlukla yer sabit uydular ile ilgili bilgiler içeren çalışmalar ve sonuçlarına yer verilmiştir.

Cihan Atar ve Metin Aktaş [4] tarafından yapılan “Uyduların Isıl Modellenmesi ve Analizleri Alanındaki İlerlemeler” adlı çalışmada, genel literatür incelemeleri ile uydu ısıl analizlerinde kullanılan genel bilgiler derlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında yeni geliştirilen ve nispeten eski olan bazı paket yazılımların karşılaştırılması yapılarak bu alanda yaşanan gelişmelere bir ışık tutulmuştur.

Bütün ısıl analiz çalışmalarının amacı genel enerji denklemlerini çözmektir. Uzay aracın bütün alt sistemleri için enerji dengesi denklemlerini analitik yöntemlerle çözmek oldukça zordur ve çok fazla zaman almaktadır. Bu yüzden uzay araçlarının kompleks ısıl ağlarını çözebilmek için ısıl analiz yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlar temel olarak toplu-parametre, sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemlerinden birine dayalı olarak çalışmaktadır. Radyasyon kodları ise gri-difüzyon varsayımı veya Monte-Carlo yaklaşımları ile çözüm yapmaktadır [4].

Verilen Tablo 1.2'de uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan birçok ticari yazılımın özellikleri ve karşılaştırılması verilmiştir. SINDA/FLUINT, ısıl ve akış analiz çözücü yazılımıdır. Bu yazılım için 2D modeller SINAPS ve 3D modeller için Thermal Desktop paket yazılımları kullanılmaktadır. Radyasyon çözümleri için ise RadCAD modülü bulunan bu yazılımda görüş faktörü hesaplamaları için Monte-Carlo yöntemi kullanılmaktadır [4].

TSS (Thermal Synthesizer System), NASA tarafından geliştirilen ve TRASYS yazılımının yerini alan yazılımdır. SYSTEMA/THERMİCA olarak da adlandırılan yazılım hem iç ortamda ekipman analizleri hem de yörüngesel dış ortam ısıl analizleri için oldukça detaylı bir modelleme imkânı sağlamaktadır [4].

Uzay araçlarının ısıl analizleri için Avrupa'da kullanılan ana yazılım ESATAN-TMS'dir. Avrupa Uzay Ajansı tarafından geliştirilen yazılım Fortran dilinde yazılmıştır ve ısıl ağların yörüngesel analizlerini gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. ESARAD ise ALSTROM tarafından geliştirilen ve Avrupa Uzay Ajansı'nın radyasyon analizleri için kullandığı yazılımdır. Bu yazılım Monte-Carlo ışın izleme metodu ile görüş faktörü, ışınım ile ısı transfer faktörleri, direkt ve soğurulan ısı akılarını hesaplayabilmektedir. ESATAN-TMS ise, ESATAN ve ESARAD'ın özelliklerini içeren gelişmiş ısıl analiz paket yazılımıdır [4].

Tablo 1.2 Simülasyon yazılımlarının özelliklerinin karşılaştırılması [4]

Özellikler	**SINDA/ FLUINT**	**TSS Space Design**	**ESATAN-TMS**	**NX-Space System Thermal**	**COMSOL /Multiphysics**	**ANSYS**
GMM Oluşturma	Auto CAD	Space3D	CAD bench	NX	Design Module	Discovery SpaceClaim
Yığın özellikler Tanımlama	✓	✓	✓	✓	✓	✓

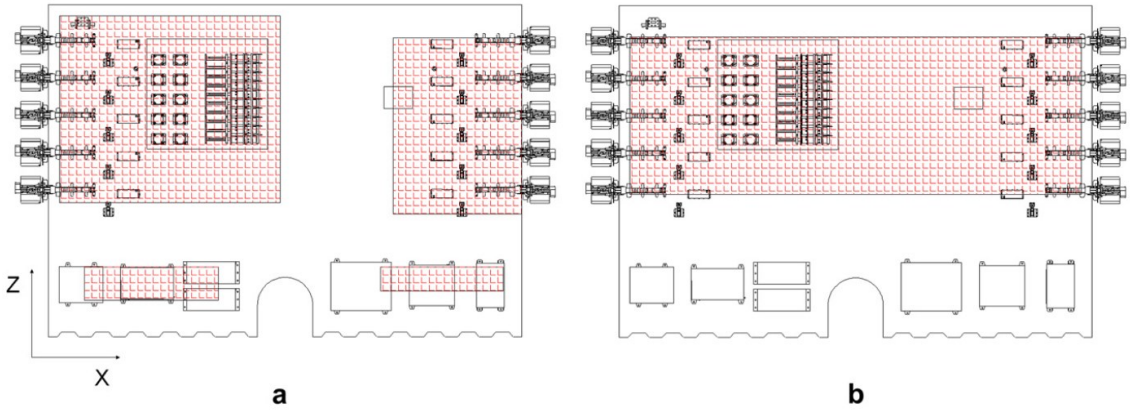
Tablo 1.2 Simülasyon yazılımlarının özelliklerinin karşılaştırılması (devamı)

Optik Özellikler Tanımlama	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Yüzey Tanımlamaları	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Genel Ağ yapısı oluşturma	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ağ Oluşturma Operasyonları	✕	✓	✓	✓	✓	✓
Montaj Tanımlamaları	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Yüzey Sınır Koşulları	✓	✕	✓	✓	✓	✓
Işınım Çözücüsü	RadCAD	Radk	ESARAD	İçinde Entegre	İçinde Entegre	İçinde Entegre
Isıl Analiz Çözücüsü	SINDA	SINDA	ESATAN	İçinde Entegre	İçinde Entegre	İçinde Entegre
Isıl-Akış Bileşimi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Isıl-Mekanik Bileşimi	✕	✕	✕	✓	✓	✓

Çoğunlukla Avrupa'da kullanılan diğer bir önemli yazılım ise NX Space Systems Thermal'dir. Daha önceden NX I-deas TMG Isıl Analiz yazılımı olarak bilinen yazılım ve Maya HTT tarafından geliştirilen yazılım Siemens Ürün Yaşam Döngüsü çözümlerinin bir parçası olarak karşımıza çıkmaktadır. Yazılım, kullanıcılarına 3D katı modelleri ve sonlu elemanlar modelleri oluşturma imkânı sunmaktadır. FORTRAN yazılım diliyle oluşturulan yazılım ile lineer olmayan ve zamana bağlı ısı transfer problemleri için oldukça hızlı ve doğru ısıl simülasyon modelleri oluşturulabilmektedir [4].

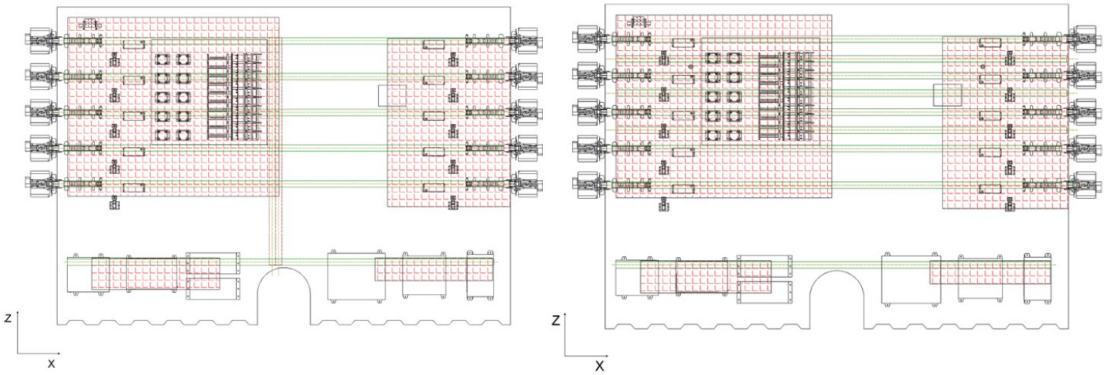
Diğer yazılımlara göz atılacak olursa karşımıza ANSYS ve COMSOL MultiPhysics paket yazılımları çıkıyor. Bu yazılımlar genel amaçlı kullanılmakta birçok fizik alanında çözümler sunmaktadır. COMSOL MultiPhysics sonlu elemanlar metodu modüler simülasyonların oluşturulmasına imkân vermektedir. Geniş bir mühendislik alanı yelpazesinde birçok farklı problemin çözümüne olanak sağlamaktadır. Benzer şekilde ANSYS de birleşik farklı sistem için çözüm imkanları sunmaktadır [4].

Kien Fan Cesar Hung Sam ve Zhongmin Deng [5] 2011 yılında yaptığı çalışmada yer sabit yörüngede görev yapan bir uydunun görev yükü paneli üzerindeki radyatör alanının verimini artırmak için yaptıkları optimizasyon çalışmalarına yer vermiştir. Çalışmada, gün geçtikçe artan rekabette uydu ağırlığının azaltılması için radyatör alanlarını en verimli şekilde kullanarak boyutların ve ısıl donanımların azaltılması amaçlanmıştır. Üzerinde çalışılan görev yükü panelinde en kötü sıcak durum, güneş akıları, ısı yayınımları ve ekipman sıcaklık limitlerinin yanı sıra panel boyutları, panelin ısıl ve ısıl-optik özellikleri ve yüzeylerin kirlenmesi/bozulması faktörleri değerlendirilmiştir. Radyatör alanı ekipmanların sıcaklık limitlerine göre 4 farklı alana ayrılmıştır. Sıcaklık limitleri birbirine yakın ekipmanlar birbirine yakın konumlandırılmıştır. Bu sayede her bir radyatör alanının kendi içinde daha geniş bir marj kullanımı sağlanmıştır. Şekil 1.1'de sol resimde (a) gösterildiği gibi bir radyatör seçimi ve bu 4 farklı alan içinde marj kullanımı sağdaki resimdeki (b) kullanımdan daha verimlidir. Bu yüzden çalışmalara Şekil 1.1'deki (a) radyatör ile devam edilmiştir [5].



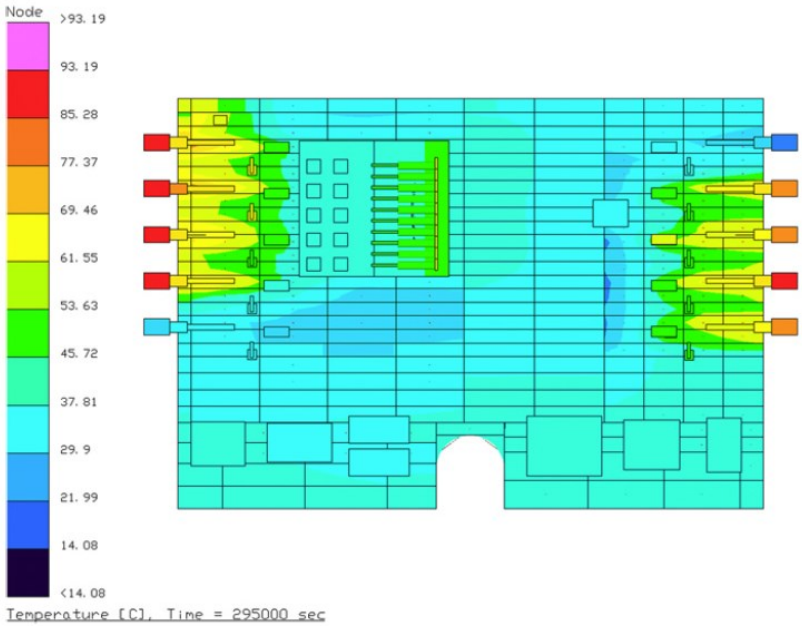
Şekil 1.1 Dört farklı radyatör alanı ve tek parça radyatör alanı kullanımı [5]

Çalışma kapsamında sonlu farklar metoduna dayalı bir ısıl model oluşturulmuştur. Önce ısı borusuz ve sonra 2 farklı ısı borusu dizilimi için analizler yapılmıştır. Isı borusu 1 dizilimi panel içinde 6 gömülü yatay ısı borusu ve 2 dikey yüzeye monte ısı borusundan oluşmaktadır. Isı borusu 2 dizilimi ise 9 gömülü yatay ısı borusu içermektedir. Isı borusu dizilimleri Şekil 1.2'de verilmiştir.

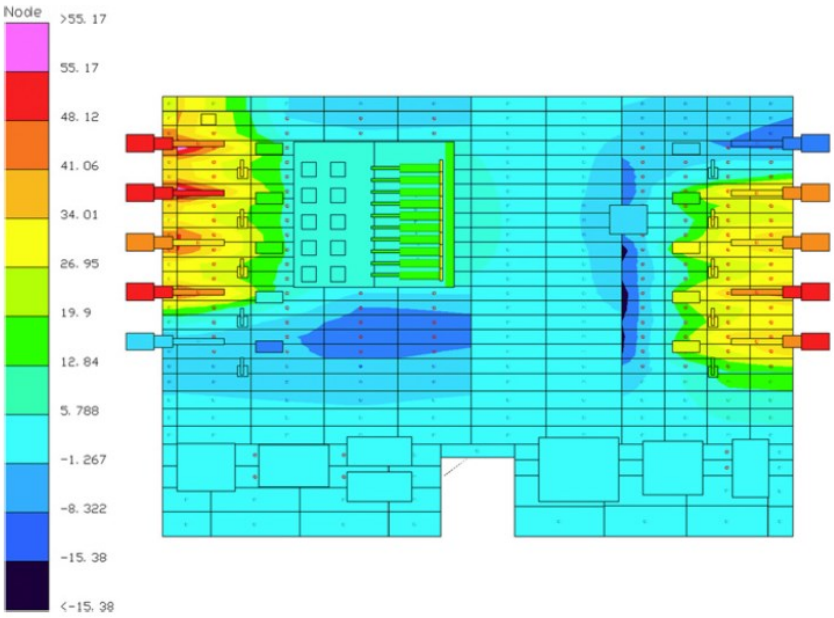


Şekil 1.2 Isı borusu dizilimi 1(solda) ve 2(sağda)

Isı borusuz panelde yapılan ısıl analizler sonucunda elde edilen, sırasıyla en kötü sıcak ve soğuk durum için panel üzerindeki sıcaklık dağılımları Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te verilmiştir.

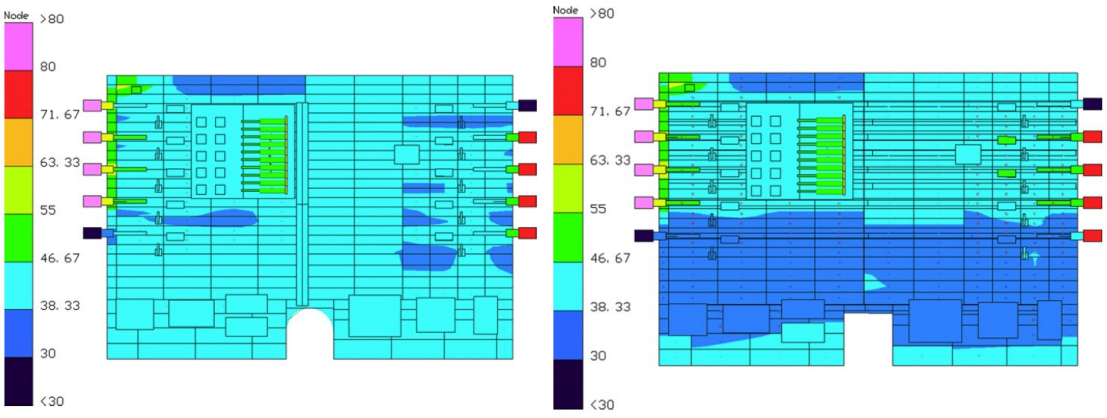


Şekil 1.3 En kötü sıcak durumda ısı borusuz panelin sıcaklık dağılımı [5]



Şekil 1.4 En kötü soğuk durumda ısı borusuz panelin sıcaklık dağılımı [5]

Görüldüğü gibi yüksek ısı yayınımı yapan ekipmanların çevresinde yüksek sıcaklıklar görülürken panelin diğer bölgeleri görece soğuktur. Yaklaşık 30-35 K'lik sıcaklık farkları göze çarpmaktadır. Bu sonuç panelin kendi ısıl özellikleriyle ısıyı homojen dağıtma ve ekipmanları soğutmada oldukça yetersiz olduğunu göstermektedir. Sonraki adımda Şekil 1.2'de gösterilen ısı boruları ile analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar her iki ısı borusu dizilimi için de Şekil 1.5'te verilmiştir [5].

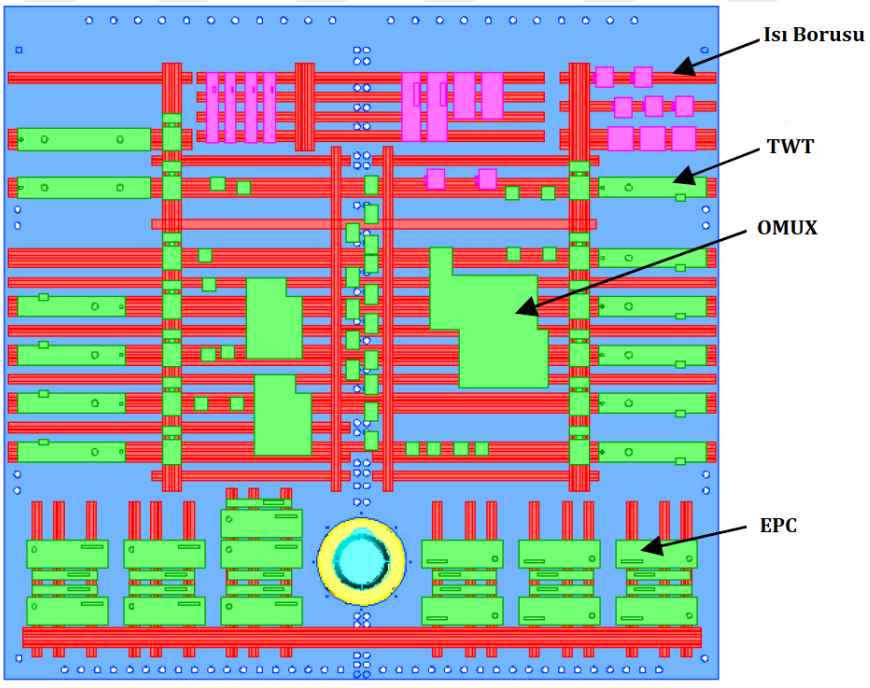


Şekil 1.5 Isı borusu dizilimi 1 ve 2 - Panel sıcaklık dağılımı en kötü soğuk durum [5]

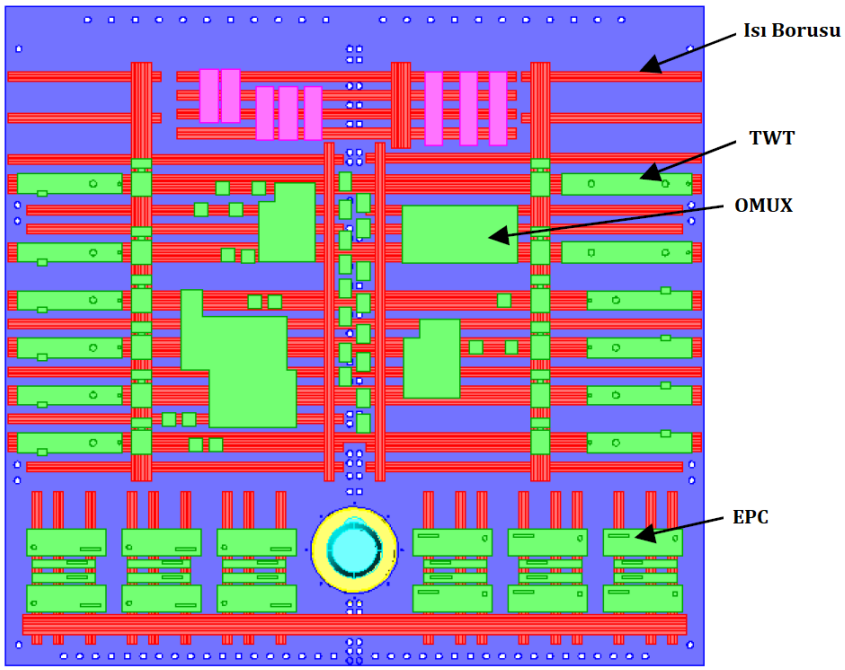
Sonuçlara göre her iki dizilim de ekipmanları sıcaklık limitleri içinde tutma konusunda sorunsuz görünmektedir. Fakat ısı borusu 1 dizilimi diğerine göre daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Buna ek olarak ısı borusu sayısı da diğer çözüme göre daha azdır. Bu da ısıl sistemin kütlesinde azalma sağlayacaktır.

Sonuç olarak ısı borusu 1 dizilimi 4 radyatör alanlı panel için optimize edilmiş dizilimdir. Verimli bir şekilde ısıyı atabilmektedir [5].

Nedim Sözbir ve Murat Bulut 2009 yılında yapmış oldukları çalışma Türk uydu projesinin ilk aşamasındaki ısıl kontrol sistemi bilgilerine yer vermişlerdir. Verilen bilgilere göre ısıl kontrol sisteminde aktif ve pasif ısıl donanımlar kullanılmıştır. Kullanılan aktif kontrol sistemi, ısıtıcılar ve sıcaklık sensörlerinden; pasif kontrol sistemi ise ısı boruları, çok katmanlı yalıtım battaniyeleri, optik solar yansıtıcılar, boyalar ve yüzey işlemelerinden oluşmaktadır. Isı boruları, optik solar yansıtıcılar ekipmanların ürettiği atık ısıları derin uzaya atabilmek için kuzey ve güney panellere yerleştirilmiştir. Kuzey ve güney görev yükü panellerinin görselleri Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de verilmiştir [6].



Şekil 1.6 Türk uydusu kuzey görev yükü ekipman ve ısı borusu yerleşimi [6]



Şekil 1.7 Türk uydusu güney görev yükü ekipman ve ısı borusu yerleşimi [6]

Matematiksel modellemede geçici durum, iletim ve radyasyon terimleri içeren enerji denklemi yürütücü denklem olarak kullanılmaktadır. Genel ısıl denge denklemi bir i ve j elamanı için aşağıdaki gibi verilmiştir: [6]

$$(Mc)_i \frac{dT_i}{dt} = Q_i^d + (\alpha^s A^s q^s + \alpha^s A^A q^A + \varepsilon A^E A^E)_i - \sum \Im_{ij} A_i^r (\sigma T_i^4 - \sigma T_{jr}^4) - \sum K_{ij} (T_i^4 - T_{jr}^4) \quad (1.1)$$

Denklemin sol tarafında ısıl kapasitans bulunmaktadır. Sağ taraftaki ilk terim çalışma sırasındaki ısıl yükleri; ikinci terim emilen net radyatif akı; üçüncü terim radyasyonla atılan ısı miktarı ve son terim ise iç iletimdir. Bu eşitliği temel alan bir ısıl matematiksel model oluşturulmuş ve ısıl analizler yapılmıştır. Isıl model kuzey ve güney yapısal panellerden oluşmaktadır. Düğüm sayısı 392, iletim bağlantısı sayısı 963 ve radyasyon bağlantısı sayısı 75'tir. Analiz senaryoları için dış ısıl yükleri ESARAD yazılımı ile hesaplatılmıştır. Isıl matematiksel modelin projenin başından itibaren ThermXL yazılımı ile oluşturulmuş ve sürekli güncellenmiştir [6].

Projenin ön tasarım fazında paneller için seçilen en kötü sıcak ve soğuk durumların analizleri bu ısıl matematiksel model ile yapılmış ve sonuçları Tablo 1.3'te verilmiştir [6].

Tablo 1.3 Analiz sonuçları [6]

Modül	Ekipman	Kalifikasyon Sıcaklığı (°C)		Hesaplanan Sıcaklıklar (°C)		Belirsizlikler Sonrası Sıcaklılar (°C)	
		Tmin	Tmaks	Tmin	Tmaks	Tmin	Tmaks
Kuzey Görev Yükü	EPC	-15	65	-7.15	39.24	-11.82	42.69
	CAMP	-15	65	-6.87	39.2	-11.36	42.69
	TWT	-15	85	11.83	46.4	8.15	49.45
	OMUX	10	80	13.54	45	9.78	47.98
	TCR	-30	65	3.05	33.79	0.39	38
Güney Görev Yükü	EPC	-15	65	-7.01	37.83	-11.64	41.05
	CAMP	-15	65	-6.49	37.78	-11.17	41.04
	TWT	-15	85	11.72	48.49	7.92	51.59
	OMUX	10	80	12.46	47.31	8.61	50.34
	TCR	-30	65	-0.18	35.02	-3.79	37.61

Sonuçlara göre ekipmanlar verilen sıcaklık limitleri aralığında kalmıştır. Projenin ilk aşamasında gerçekleştirilen bu analizler kararlı durum için yapılmıştır. Sonraki aşamalarda radyatör yüzeyi optimizasyonu yapılarak detaylı modele eklenmesi planlamıştır. Bununla birlikte daha genişletilmiş detaylı bir model ile zamana bağlı analizleri yapılması hedeflenmiştir [6].

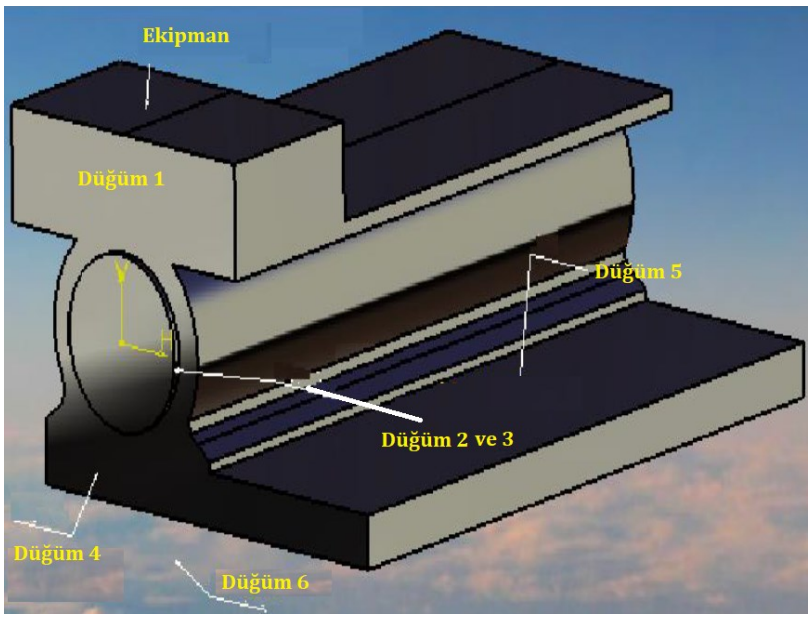
Erkam Arslantaş, Murat Bulut ve Nedim Sözbir 2017 yılında yaptıkları çalışmada [7] bir yer sabit uyduda ekipmanları istenilen sıcaklıklarda tutmak için yapılan ısıl analizleri göstermişlerdir. Analizlerde; emicilik, yayınım katsayısı ve görüş faktörü gibi değerlerin etkileri incelenmiş ve bununla beraber malzeme seçiminin önemini vurgulanmıştır [7].

Isıl tasarım fazı sırasında göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerden biri de belirsizliklerdir. Belirsizliklerin birçok kaynağı vardır. Bu nedenle sıcaklık belirsizlik marjları en kötü senaryolar düşünülerek hesaba katılmalıdır. Bazı belirsizlik içeren parametreler; görüş faktörü, yüzey özellikleri, ısıl ortam, yüzey iletimi vb.dir [7].

Isıl simülasyon modeli oluşturulurken kullanılan tanım ve formüller:

- İki düğüm arasındaki iletim için:
  HFC = Cij * (Tj-Ti) [W]
  C= İletim değeri (W/K)
  i ve j düğüm numaralarıdır.
- İki düğüm arasındaki ışınım ısı geçişi için:
  HFR = (Rji *Tj^4)- (Rji *Ti^4)
  Rji Işınım ısı geçiş katsayısı (W/K) [7]

Isıl model 5 düğümden oluşmuştur (Şekil 1.8). 1 düğüm de derin uzayı temsil etmektedir. Modelin görselleri Şekil 1.8'te verilmiştir. Düğüm 1: ekipman, düğüm 2: ısı borusu buharlaştırıcı kısmı, düğüm 3 yoğuşturucu kısmı, düğüm 4: panelin ışınım dış yüzeyi, düğüm 5: panelin diğer ışınım yüzeyi ve düğüm 6: derin uzay sıcaklığı 4 K'dir [7].



Şekil 1.8 Isıl modelin gösterimi [7]

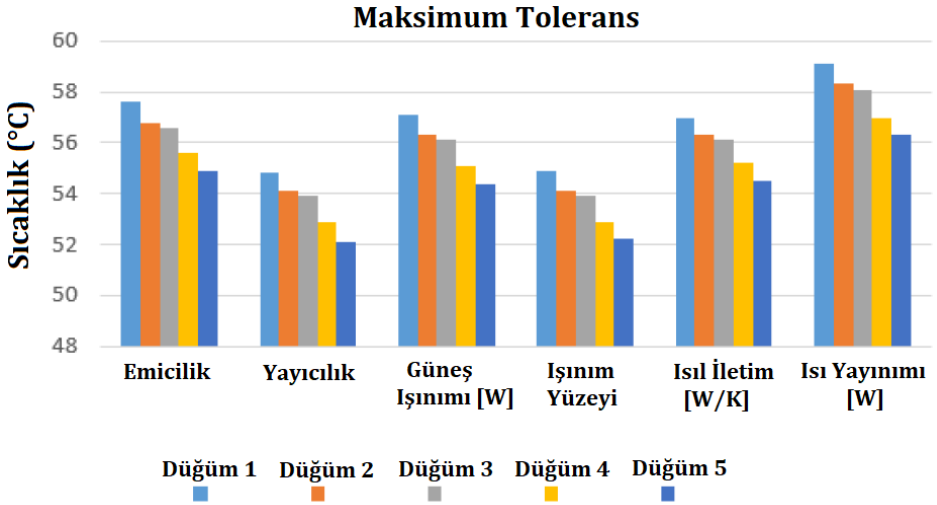
Çevresel parametreler; Güneş ışınımı, fiziksel parametreler; emicilik, ışınım yüzeyi, ısı iletimi ve ısı yayınımıdır. Verilen bu ısıl parametrelerin değerleri ECSS standartlarında verilen toleransları ile hesaplanmış ve

Tablo **1.4**'te verilmiştir [7].

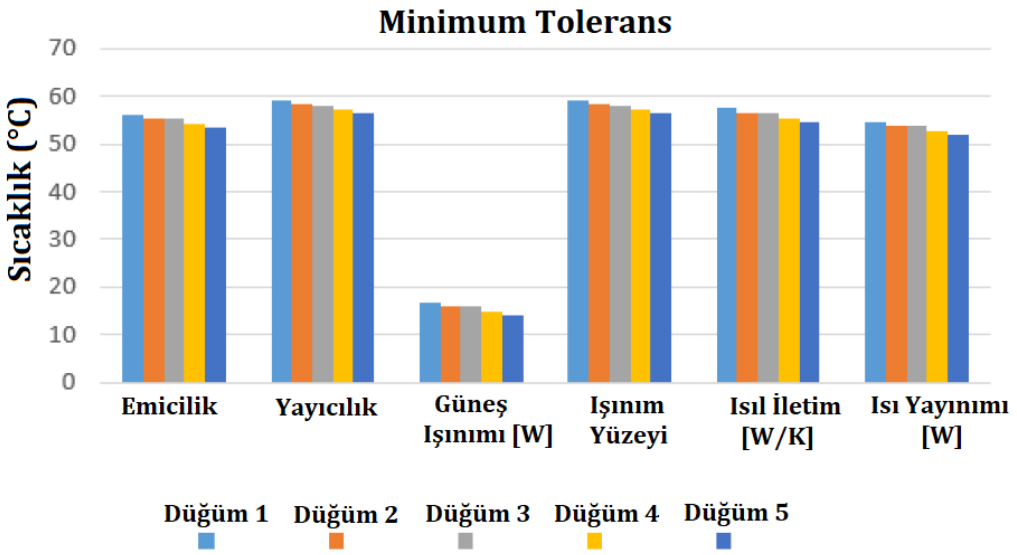
Tablo 1.4 ECSS standartlarında verilen tolerans değerleri [7]

Parametre	Minimum	Nominal	Maksimum
Emicilik	0.3589	0.37	0.3811
Yayınım Katsayısı	0.7566	0.78	0.8034
Güneş Işınımı [W]	1397	1418	1439
Işınım Yüzeyi	0.0475	0.05	0.0525
Isıl İletim [W/K]	18	20	22
	27	30	33
	36	40	44
	135	150	165
Isı Yayınımı [W]	28.5	30	31.5

Toleranslar göz önünde bulundurularak yapılan analizlerden elde sonuçlar sırasıyla maksimum değerler için Şekil 1.9 ve minimum değerler için Şekil 1.10'da verilmiştir [7].



Şekil 1.9 Maksimum tolerans değerlerindeki sıcaklık sonuçları [7]

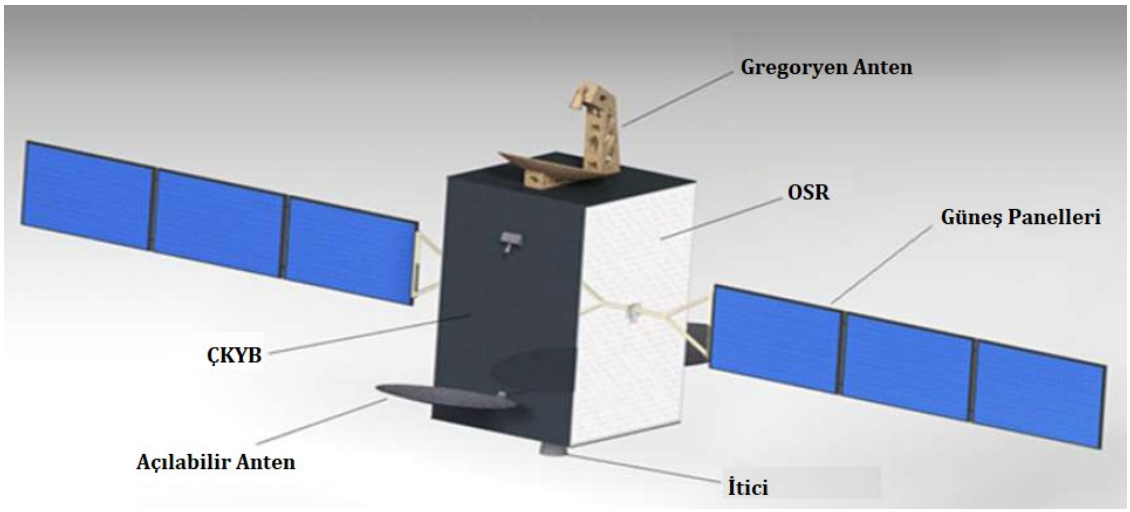


Şekil 1.10 Minimum tolerans değerlerindeki sıcaklık sonuçları [7]

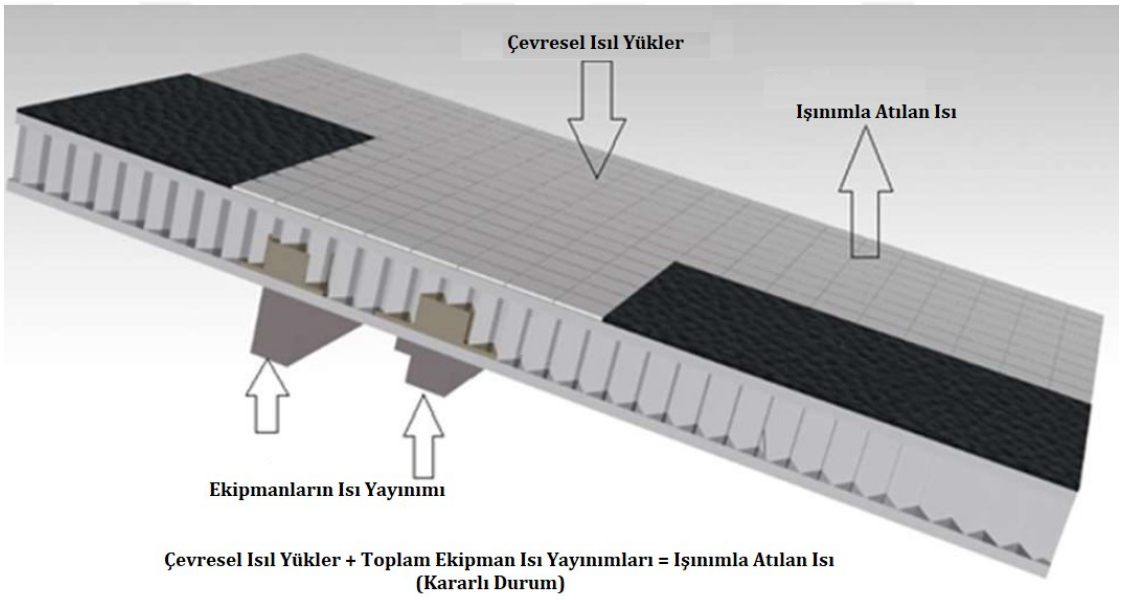
Sonuçlara göre, emicilik ile doğru orantılı olarak yüzey sıcaklığının arttığı görülmüştür. Yayınım katsayısı ile ise ters orantılı olarak yüzey sıcaklığı düşmektedir. Yine Güneş akısıyla doğru orantılı olarak yüzey sıcaklığı artmakta; ışınım yüzeyi ve ısıl iletim ile ters orantılıdır. Ayrıca yüzey sıcaklığı, ısıl yayınım değerleri ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu çalışmada uydu tasarımında doğru malzeme seçiminin maliyet, performans, zaman açısından önemli olduğu görülmüştür [7].

Murat Bulut ve Nedim Sözbir'in bir diğer çalışmasında bir yer sabit uyduda platform panellerinin radyatör yüzeylerinin boyutlandırılması amacıyla kullanılan optimize edilmiş bir analitik çözüm ortaya koymuşlardır. Bu çalışmayı yaparken en kötü soğuk, sıcak durumlar ve malzemelerin ömür başı/ömür sonu özelliklerini göz önünde bulundurmuşlardır [8].

Gregoryan anten, açılabilir anten, güneş panelleri, ana yapı ve iticiden oluşan yer sabit uydunun görseli Şekil 1.11'de verilmiştir Radyatör yüzeyindeki enerji dengesi kurularak hesaplamalar yapılmıştır. Radyatör yapısını ve enerji dengesi Şekil 1.12'de gösterilmiştir [8].



Şekil 1.11 Yer sabit uydunun görseli [8]



Şekil 1.12 Radyatör enerji dengesi [8]

Radyatör boyutlandırma yapılırken Güneş izleme modu soğuk, yörünge yönelim modu sıcak ve soğuk ve yer sabit yörünge soğuk senaryo olarak belirlenmiş ve bu 4 senaryo ile hesaplamalar yapılmıştır [8].

Sonuçlara gelecek olursak radyatör yüzey alanı 0,9 m²'den 1.1 m²'ye kadar değiştirilerek radyatör yüzey sıcaklıkları hesaplanmıştır. Kuzey panelde 0.9 m² için sırasıyla en yüksek sıcaklık 20.81 °C ve en düşük sıcaklık -39.84 °C olarak yörünge yönelim modu-sıcak durum ve yörünge yönelim modu-soğuk durumda hesaplanmıştır. 1.1 m² için ise için sırasıyla en yüksek sıcaklık 16.65 °C ve en

düşük sıcaklık -48.45 °C olarak yörünge yönelim modu-sıcak durum ve yörünge yönelim modu-soğuk durumda hesaplanmıştır [8].

Güney panelde 0.9 m^2 için sırasıyla en yüksek sıcaklık 37.7 °C ve en düşük sıcaklık -17.29 °C olarak yörünge yönelim modu-sıcak durum ve yer sabit yörüngede hesaplanmıştır. 1.1 m^2 için ise için sırasıyla en yüksek sıcaklık 31.22 °C ve en düşük sıcaklık -29.81 °C olarak yörünge yönelim modu-sıcak durum ve yörünge yönelim modu-soğuk durumda hesaplanmıştır [8].

Sonuçlardan elde edilen çıktılara göre kuzey panelde 1.1 m^2 radyatör yüzey alanında en düşük sıcaklık -48.45 °C olarak görülmüştür. Buna göre bu panelde ekipmanların sıcaklık limitlerinde kalması için daha fazla ısıtıcı gücü kullanılmalıdır. En yüksek sıcaklık ise güney panel 0.9 m^2 radyatör yüzey alanında hesaplanmıştır [8].

Ataer ve diğerleri gerçekleştirdiği çalışmada haberleşme uydularında gömülü ve yüzey monteli ısı borularının ısıl kontrol açısından karşılaştırılmasını yapmışlardır. Bu iki ayrı durum için geometrik ve ısıl matematiksel modeller hazırlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Modellerde çalışma sıcaklık aralığı belirtilmiş olan ekipmanın ısıl kontrolündeki ısı borularının performansları analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma ile elde edilen bilgiler ısıl tasarım çalışmaları için faydalar ve kısıtlamalar içermektedir [9].

Ataer ve diğerleri [10] gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada farklı geometrilerdeki haberleşme uydularının ısı atım kapasitelerinin hesaplanması ve karşılaştırılmasını yapmışlardır. Çalışmadan yer sabit yörüngede görev yapması planlanan uydu için iki farklı geometri göz önünde bulundurularak panellerin ısı atım kabiliyetleri belli kabuller yapılarak hesaplanmıştır. Hesaplar sırasında kullanılan panellerin uzayı görüş faktörleri ve dış ısı akı akılarının belirlenmesi için THERMICA V.4.8.2 yazılımında modelleme çalışması yapılmıştır. Modelleme çalışmasına TWT'lerin panelleri gölgelemesinin ısı atım kabiliyetine etkisi de dahil edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre analiz edilen iki modelin kuzey ve güney panellerinin ısı atım kapasitelerinin, geometrilerinden bağımsız olarak alanlarıyla doğru orantılı olduğu görülmüştür. Uydunun doğu ve batı panellerinin ısı atım

kabiliyetleri de benzer şekilde geometrilerinden bağımsız olarak TWT kanatçıkları ile anten geometrisinin doğrultusunun görüş faktörüne etkisinden ve bu bileşenlerin ısıl-optik özelliklerinden dolayı değişmektedir. Bu değişimin her bir TWTA kanatçığı için yaklaşık 1.5-2 Watt'lık bir ısı atım kabiliyeti azalması anlamına geldiği hesaplanmıştır [10].

Keleş ve diğerleri [11] yaptıkları çalışmada bir haberleşme uydusunun ısıl analizini aşamalarına ve sonuçlarına yer vermişlerdir. Çalışmada bir örnek haberleşme uydusunun ısıl modelleme yöntemi ve aşamaları paylaşılmıştır. Oluşturulan ThermXL modeli 392 düğüm, 936 iletim ve 75 ışınım ısıl bağlantısı içermektedir. Elde edilen sonuçlara göre yapılan analizlerin ön tasarım fazı için yeterli olduğu değerlendirilmiştir [11].

Bulut ve diğerleri [12] yaptıkları çalışmada bir haberleşme uydusunda güneş algılayıcının ısıl kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Isı yayınımı düşük olan bu ekipman için güneşten gelen ısı akısından etkilendiği için bir ısıl analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde güneş algılayıcı ısı yayınımı 0 W ve güneşten gelen ısı akısı değerini 1418 W/m^2 olarak alınmıştır. Isıl analizler en sıcak ve en soğuk durumlara göre yapılmıştır. Isıl analiz yöntemi olarak analitik hesaplamalar kullanılmış olup sonuçlara göre ekipman istenilen sıcaklık limitleri arasında kalmıştır [12].

Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak bir yer sabit uydunun ısıl olarak modellenmesini içeren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yukarıda verilen çalışmalardan farklı olarak bu tez çalışmasında bir yer sabit uydunu görev yükünün sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmesi yapılmış ve kullanılan çözüm ağı yapılarında bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ek olarak simülasyonda kullanılan bazı parametrelerin değişiminin etkisini görmek amacıyla bazı analizler yapılmıştır. Sonuç olarak çözüm ağ yapıları ve simülasyon parametrelerinin uydu proje aşamaları ile ilişkilendirmesi yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında haberleşme görevi yapan bir yer sabit uydunun ön ısıl tasarım aşamalarının yanı sıra geometrik ve matematiksel modellemesinin yapılması planlanmıştır. Analitik hesaplamalarla başlanan ısıl tasarım çalışmaları, sonlu elemanlar metodu temelli bir paket yazılım kullanılarak ısıl geometrik ve matematiksel modellerin oluşturulması ile devam edilmiştir. Tasarım çalışmalarının son adımında belirlenen kritik yörünge senaryolarına göre ısıl analizler gerçekleştirilmiştir.

Tezin ana amacı; yer sabit yörüngede görev yapan bir haberleşme uydusunun ısıl modelinin sonlu elemanlar metoduna dayalı bir yazılımda oluşturulması, en uygun ağ yapısı ve simülasyon parametrelerinin belirlenmesi ve bu ağ yapılarının uydu projelerinin farklı fazlarında kullanımı ile ilgili değerlendirmeler ve öneriler verilmesidir.

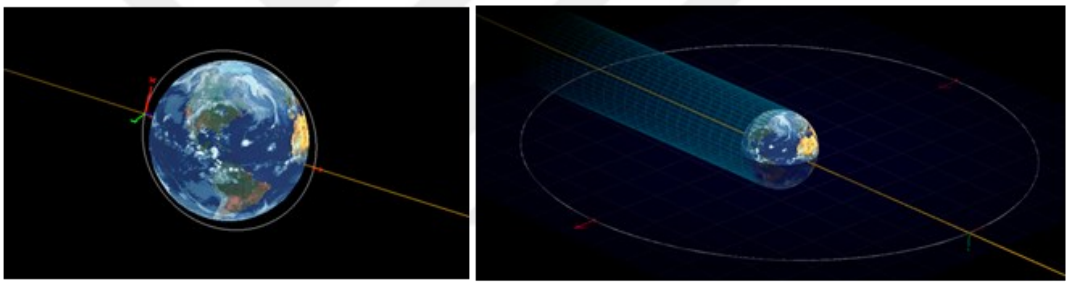
1.3 Hipotez

Literatür araştırmalarında yer sabit uyduların ısıl modellenmesi ve analizi ile ilgili sınırlı sayıda çalışmalar bulunmuştur. Bu çalışmaların çoğunda ısıl modelleme yöntemi olarak analitik metotlar veya sonlu farklar metoduna dayalı yazılımlar kullanılmıştır. Literatürde yer sabit uydularla ilgili sonlu elemanlar yaklaşımına dayanan ısıl modelleme ve analizler içeren çalışmalara rastlanmamıştır. Bu çalışmada gelişen teknolojiler ile birlikte günümüzde gittikçe artan bir öneme sahip olan haberleşme uydularının ön ısıl tasarımına ilişkin bilgiler derlenerek sonlu elemanlar metodunda dayalı bir paket yazılımla ısıl modelleme ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Modelleme çalışmalarında farklı çözüm ağı yapısı ve bazı simülasyon parametrelerinin etkisi incelenmiş ve farklı modellerin analiz sonuçları karşılaştırılarak uydu projelerinin farklı fazlarında kullanımı için öneriler verilmiştir.

2
UYDU ISIL ORTAMI

2.1 Uzay Ortamı

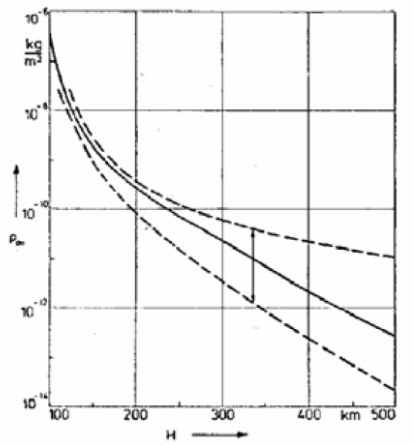
Uydular kendilerine atanan görevleri yerine getirmek için dünyanın atmosferinden dışarı gönderilmekte ve 160 km'den 35786 km'ye kadar değişen yörüngelere yerleştirilmektedir. Yaygın olarak; alçak dünya yörüngesi (160-1000 km) ve yer sabit yörünge (35786 km) kullanılmaktadır (Şekil 2.1). Uydular, bu yörüngelerde çeşitli durumlarda ve zamanlarda farklı ısıl yüklere maruz kalırlar. Bu ısıl yükler uzay ortamında hava akımı olmadığı için ışınım ile transfer edilmektedir [13].



Şekil 2.1 Alçak dünya yörüngesi ve yer sabit yörünge

2.1.1 Atmosfer

Alçak dünya yörüngesinde 600 km üzerinde hava yoğunluğu ve basıncı çok düşüktür. Şekil 2.2'de atmosferik basıncın yörünge uzaklığına göre değişimi gösterilmektedir [13].

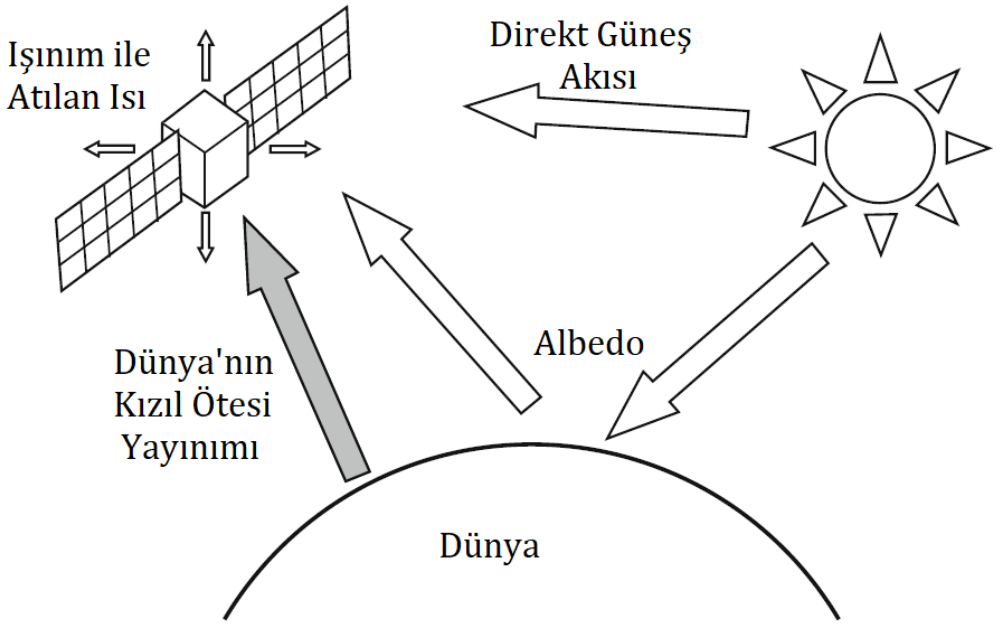


Şekil 2.2 Atmosfer basıncının yörünge uzaklığına göre değişimi [13]

Hava yoğunluğu ve basıncının bu denli düşük olması taşınım ile ısı geçişinin ihmal edilebileceği anlamına gelir [13]. Bu irtifadan sonraki yörüngelerde uydu sadece ışınım ile ısıl yüklere maruz kalmaktadır (Şekil 2.3). Bu yükler;

- Güneş Radyasyonu
- Albedo Radyasyonu
- Dünya'nın Kızıl Ötesi Radyasyonu

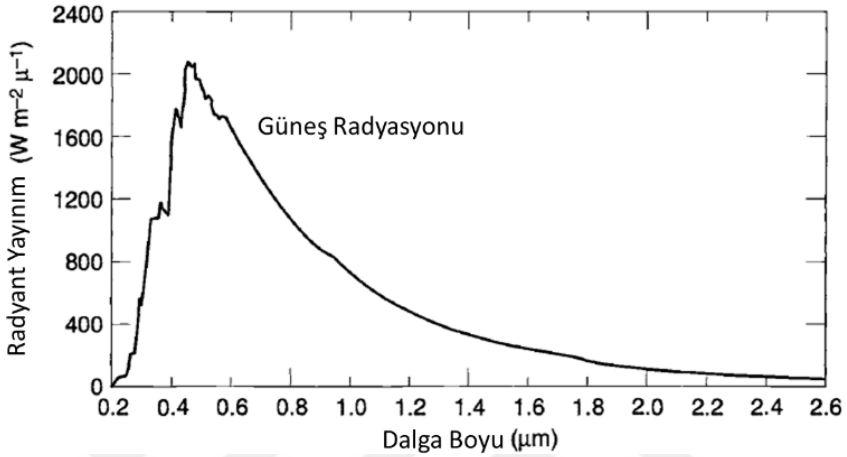
Güneş sisteminde bulunan diğer gezegenler ve gök cisimlerinin etkileri ihmal edilebilecek kadar düşüktür [14].



Şekil 2.3 Uydu ısıl ortamı [14]

2.1.2 Güneş Radyasyonu Spektrumu

Güneş radyasyonunun yoğunluğu dalga boyunu bir fonksiyonu olarak değişir (Şekil 2.4). Enerji dağılımı yaklaşık olarak %7 ultraviyole, %46 görünür ve %47'si kızıl ötesine yakındır. Güneşten gelen toplam ısı akısı; yörüngenin en uzak noktasında (aphelion) 1322 W/m², yörüngenin en yakın noktasında (perihelion) 1414 W/m²'dir [15].



Şekil 2.4 Güneş radyasyonu spektrumu [15].

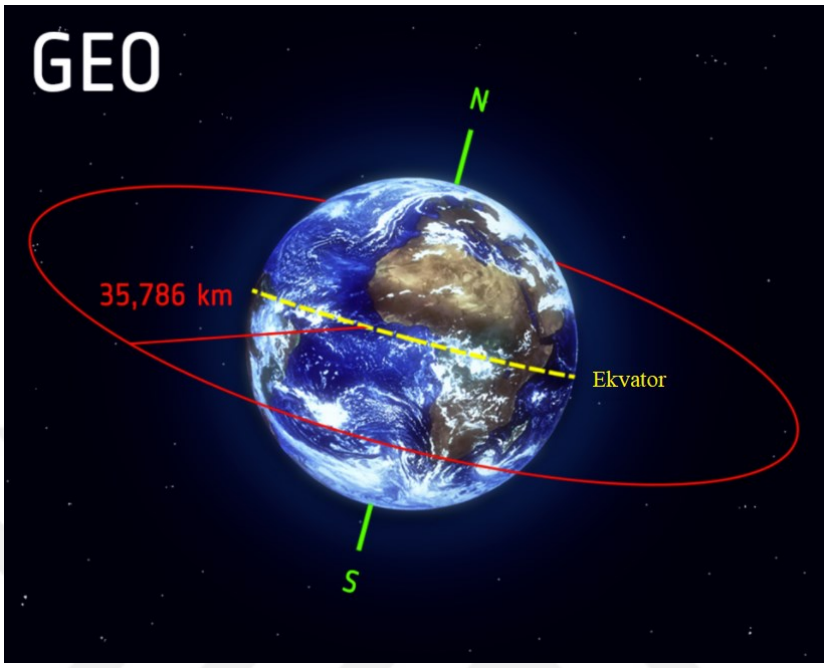
2.2 Yer Sabit Yörünge ve Yörüngesel Isıl Ortam

Fırlatmanın ardından uydular dünya çevresinde farklı yörüngelere yerleştirilirler veya gezegenler arası bir yolculuğa gönderilerek Mars veya Jüpiter gibi başka bir gezegenin yörüngesine yerleştirilirler. Uydunun hangi yörüngede kullanılacağına karar vermek için uydunun hangi amaçla tasarlandığı, hangi görevi yapacağı gibi birçok faktör değerlendirilmektedir [16]. Bu çalışmada ısıl modeli ve analizleri yapılan uydu yer sabit yörünge görev yapması planlanan bir uydudur. Bu nedenle aşağıda yer sabit yörünge ile ilgili bilgiler verilmiştir.

- **Yer Sabit Yörünge (GEO-Geostationary Orbit):**

Yer sabit yörüngede uydular ekvatorun üzerinde dünyanın dönüşünü batıdan doğuya doğru takip ederek bir daire çizerler. Bu dönüş 23 saat 56 dakika ve 4 saniye sürmektedir. Bu süre, dünyanın kendi ekseni etrafında dönüş periyodunun tam olarak aynısıdır. Bu da yer sabit uyduların dünyanın üzerinde bir konumda sabitlenmiş gibi kalmasını sağlamaktadır. Dünyanın dönüş hızıyla mükemmel bir

şekilde eşleşmesi için yer sabit uyduların hızı 35786 km irtifada, saniyede 3 km olmalıdır. Bu irtifa birçok uydu tipine kıyasla dünya yüzeyinden oldukça uzak bir mesafedir [16]. Yer sabit yörüngenin bir gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 Yer sabit yörünge [16]

Genellikle, haberleşme uyduları yer sabit yörüngeye yerleştirilir. Bu tip uydular, dünya üzerinde belirli bir noktada sabit kalmalıdır. Bu şekilde sabit bir noktada kalan uyduya yönlendirilmiş sabit bir anten dünya yüzeyine yerleştirilebilmektedir. Ayrıca yer sabit yörüngeye hava gözlem uyduları da yerleştirilebilir ve sürekli olarak belirli bölgelerdeki hava hareketlerinin nasıl değiştiği gözlemlenebilir [16].

Yer sabit yörüngedeki uydular dünya yüzeyine oldukça uzak olduğu için oldukça geniş bir kapsama alanına sahiptir. Öyle ki 3 tane eşit aralıkla yerleştirilmiş yer sabit uydu neredeyse dünyanın tamamını kapsayabilir [16].

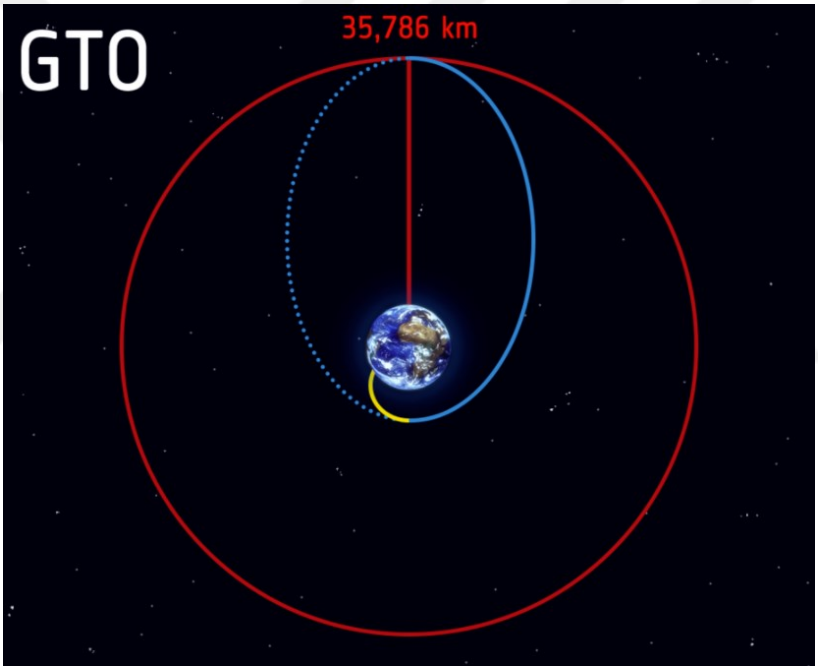
- **Transfer Yörüngeleri ve Yer Sabit Transfer Yörüngesi (GTO-Geostationary Transfer Orbit)**

Transfer yörüngeleri, bir yörüngeden diğerine geçmek için kullanılan özel bir yörünge türüdür. Uydular Dünya'dan uzaya fırlatıldığında genellikle doğrudan

son yörüngelerine yerleştirilmezler. Çoğu zaman, ilk olarak bir transfer yörüngesine yerleştirilir. Bu yörünge, kendi üzerindeki motorlar ile nispeten az enerji kullanarak uydu veya uzay aracının bir yörüngeden diğerine hareket edebildiği bir yörüngedir.

Bu, bir uydunun, örneğin GEO gibi yüksek irtifalı bir yörüngeye, fırlatma aracının bu irtifaya kadar gitmesine ihtiyaç duymadan ulaşmasını sağlar ki bu da zaten çok çaba gerektirir. GEO'ya bu şekilde ulaşmak, yer sabit transfer yörüngesi (GTO) olarak adlandırılan en yaygın transfer yörüngelerinden birine bir örnektir [16].

Şekil 2.6'da fırlatma ve derin uzaya geçiş sarı çizgi ile yer sabit transfer yörüngesi mavi çizgi ile ve yer sabit yörünge kırmızı çizgisi ile gösterilmiştir [16].



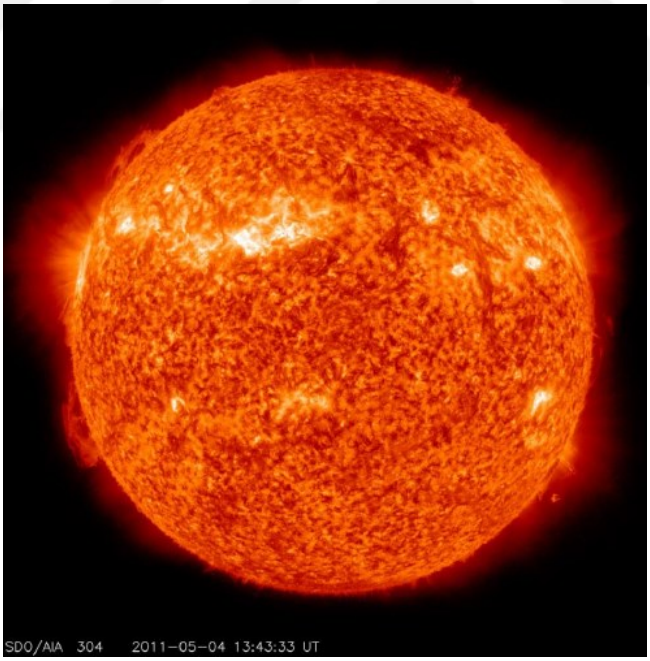
Şekil 2.6 Yer sabit transfer yörüngesi [16]

Kalkıştan sonra, bir fırlatma aracı şekilde sarı çizgiyle gösterilen bir yolu izleyerek uzaya doğru yol alır. Hedef varış noktasında roket yer sabit transfer yörüngesinin başlangıcında bırakır. Uyduyu Dünya'dan daha uzağa taşıyan (mavi çizgiyi izleyerek) eliptik bir yörünge transfer yörüngesidir. Mavi eliptik yörüngede Dünya'dan en uzak noktaya yeröte, en yakın noktaya yerberi denir [16].

Uydu, 35.786 km yer sabit yörünge irtifasında zirveye ulaştığında motorlarının ayarlanmaları ile dairesel GEO yörüngesine girer ve orada kalır.

2.2.1 Direkt Güneş Radyasyonu

Güneş ışınları, Dünya yörüngesindeki uydulara etki eden en büyük ısı kaynağıdır (Şekil 2.7). Neyse ki güneş oldukça sabit bir enerji kaynağıdır. 11 yıllık solar döngüde Güneş'ten yayılan radyasyon sadece %1'lik bir salınımla neredeyse sabit kalmaktadır. Fakat Dünya'nın yörüngesinin eliptik olmasından dolayı Dünya'ya ulaşan Güneş ışınlarının yoğunluğu Dünya'nın Güneş'ten uzaklığına bağlı olarak yaklaşık ±3.5%'luk bir değişime sahiptir. Yaz gündönümünde (21 Haziran), Dünya Güneş'ten en uzak konumdadır. Güneş'ten gelen ısı akısı 1322 W/m² olarak minimum değerindedir. Kış gün dönümünde ise Güneş'ten gelen ısı akısı 1414 W/m² olarak maksimum değerine ulaşır. Güneş'ten gelen ısı akısı Dünya'nın Güneş'ten ortalama uzaklığına (1 Astronomik Birim (AU)) göre hesaplanırsa solar sabit elde edilir ve bu değer 1367 W/m²'dir [15].



Şekil 2.7 Güneş'in NASA tarafından çekilen fotoğrafı [17]

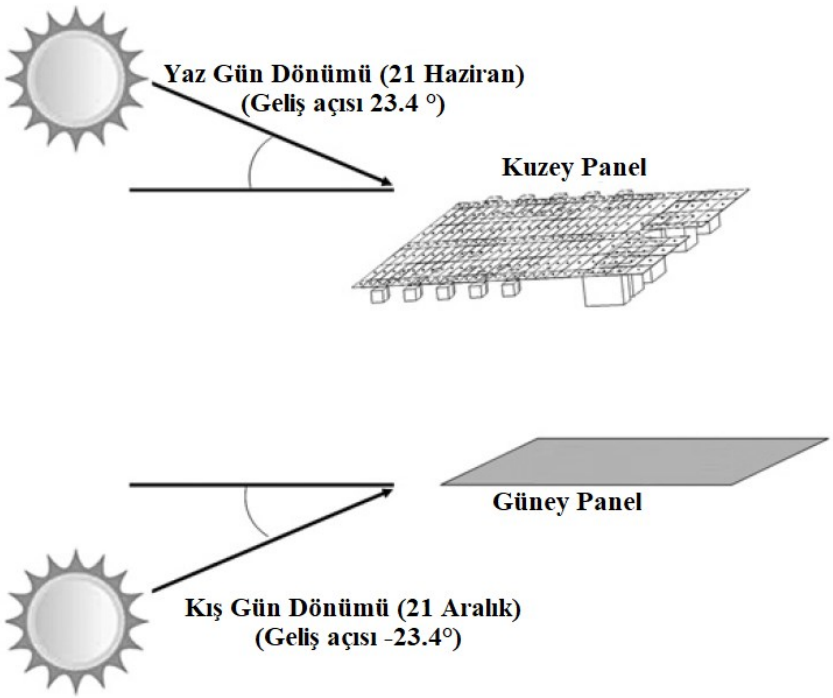
Yukarıda verilen değerler Davos/İsviçre'deki Dünya Radyasyon Merkezi tarafından önerilmiştir ve bu değerlerin 0.4%'lük bir sapma ile doğru olduğu belirtilmektedir [15].

Yer Sabit yörüngedeki Güneş Radyasyonu:

Yer sabit yörüngede görev yapan uyduların çoğu 3 eksenli bir koordinat sistemine göre görev yapmaktadır. Uydunun bir yüzü sürekli sabit bir şekilde Dünya'ya dönüktür. Bu şekilde kalmaya devam ettiği müddetçe uydunun kuzey ve güney yüzleri en düşük maksimum Güneş akısına maruz kalır. Çünkü Güneş'in kuzey ve güney yüze geliş açısı maksimum 23.4 ° olabilir. Uydu yörüngede hareket ettikçe gün içinde bu yüzeylere Güneş'in geliş açısı sabit kalır. Bu açı yaz gün dönümünde +23.4° ve kış gün dönümünde -23.4° olur ve yıl içinde bu iki değer arasında kalır (Şekil 2.8). Diğer 4 yüzeye geliş açısı gün içinde sürekli olarak değişmektedir. 23.4°'lik açıdan dolayı kuzey ve güney yüzeylerin güneşi görüş faktörü:

$$\sin(23.4°)\text{x}(1 - \text{Güneş Görüş Faktörü}) = 0.4 \text{ Güneş Görüş Faktörü} \qquad (2.1)$$

Diğer yüzeylerde ise Güneş görüş faktörü gün içinde 0'da 1'e kadar değişim gösterir. Bu davranıştan dolayı yer sabit yörüngede görev yapan uydular yüksek ısı yayınımı yapan ekipmanlar kuzey ve güney yüzeylere yerleştirilmektedir. Bu şekilde Güneş'ten daha az (0.4 oranında) ısı kazanımı ve dolayısıyla daha kolay ısı atımına elverişli ortam oluşturulmaktadır [15].



Şekil 2.8 Yer sabit uydularda Güneş'in kuzey ve güney panele geliş açıları [5]

2.2.2 Albedo Radyasyonu

Dünya ve Ay'dan yansıyan Güneş ışınları "Albedo" olarak adlandırılır. Bir gezegenin albedosu genellikle gezegenin uzaya geri yansıttığı Güneş ışınlarının gelen Güneş ışınlarına oranı ile ifade edilir ve oldukça değişken bir değere sahiptir. Genellikle kıtaların bulunduğu bölgelerde yansıtıcılık okyanus bölgelerine oranla daha fazladır. Yine yansıtıcılık, Güneşin yükseliş açısının azalması ve bulutluluk oranının artması ile artmaktadır. Kutup bölgelerinin kar ve buz kaplı olması, Güneş yükseliş açısının azalması ve bulutluluk oranının fazla olması gibi nedenlerden dolayı, albedo enlemin artması ile artış eğilimindedir. Bu değişimler, bir termal analiz için en iyi albedo değerinin seçimini oldukça belirsiz hale getirir ve endüstride farklı değerlerin kullanımına neden olur.

Diğer bir değişim ise uydulara ulaşan albedo ısı akısı uydunun yörünge boyunca hareketi ve Zenith noktasından uzaklaşması ile gerçekleşmektedir. Albedo oranı sabit kalsa bile uydunun Zenith noktasından (Güneş'in en tepede olduğu nokta) uzaklaşması albedo ısı akısının düşmesine neden olur. Uydu Zenith noktasından uzaklaştıkça Dünya yüzeyine düşen Güneş enerjisi aradaki açının kosinüsü ile azaldığı için gün batımı çizgisi üzerinde albedo oranı 1.0 olsa bile gelen ısı akısı 0'a yaklaşacaktır [15].

Albedo ısı akısı LEO uyduların ısıl tasarımında göz önünde bulundurulması gerekirken GEO uydularının irtifasının Dünya yüzeyine oldukça uzak olması nedeniyle güneşten gelen ısı akısına kıyasla çok küçük kaldığından bu tip uydularının ısıl tasarım aşamalarında kolaylıkla ihmal edilebilir.

2.2.3 Dünya'nın Kızıl Ötesi Yayınımı

Güneş'ten Dünya'ya gelen bütün Güneş ışınlarının tamamı yansıtılmaz. Bir kısmı emilir ve sonra da kızıl ötesi yayınımla uzaya geri gönderilir. Yıl içinde Dünya yüzeyinden yayılan kızıl ötesi yoğunluk ortalaması oldukça dengeliyken, aslında bölgenin sıcaklığı ve bulutlu olup olmaması gibi faktörlere bağlı olarak değişim gösterir. Yüksek sıcaklığa sahip bölgeler soğuk bölgelerden daha fazla kızıl ötesi yayınım yapar. Genellikle en yüksek kızıl ötesi yayınım çöller ve tropikal bölgelerde görülür. Buna bağlı olarak enlem artıkça yani kutuplara yaklaştıkça

kızıl ötesi yayınım düşüyor diyebiliriz. Yine bulutlu bölgelerde kızıl ötesi yayınım bulutlu olmayan diğer bölgelere göre düşüktür. Çünkü bulutlar yer yüzeyinden oldukça yüksekte yer alır ve yüzeyden düşük sıcaklığa sahiptir. Ayrıca yeryüzünü gölgeleyerek ısıl yayınım yapmasını engeller. Bu yerel değişimler önemli olmakla beraber albedo'daki yayınımların değişimi kadar fazla değildir.

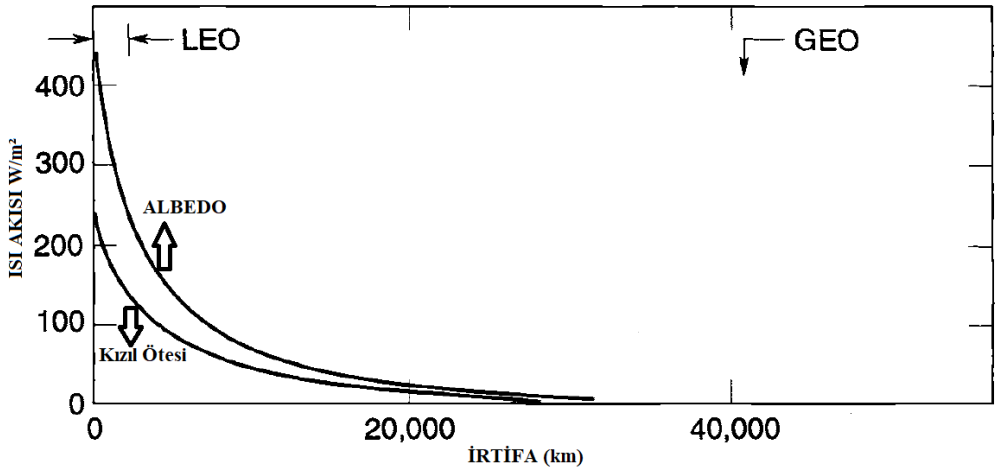
Dünya'dan yayılan kızıl ötesi enerji ortalama -18°C'de efektif bir değere sahiptir. Bu yayınımın dalga boyu uyduların kızıl ötesi yayınımı ile yaklaşık aynıdır. Fakat yaklaşıl 5500 °C sıcaklıkta Güneş'ten yayılan enerjinin dalga boyundan çok daha büyüktür. Kısa dalga boyuna sahip Güneş enerjisinin aksine Dünya'dan yayılan kızıl ötesi yayınım uydulardan özel bir ısıl kontrol kaplama malzemesi ile yansıtılamaz. Çünkü eğer bu tür kaplamalar atık ısının uydudan atılmasını da engelleyecektir. (Yansıtma oranı yüksek olursa, yayınım katsayısı düşük olacaktır.).

Bu sebepten dolayı, Dünya'nın kızıl ötesi yayınımı özellikle alçak irtifa yörüngelerinden görev yapan uydular için ciddi bir ısı yükü oluşturabilir [15].

- **Albedo ve Dünya'nın Kızıl Ötesi yayınımının Yer sabit uydu için değerlendirilmesi:**

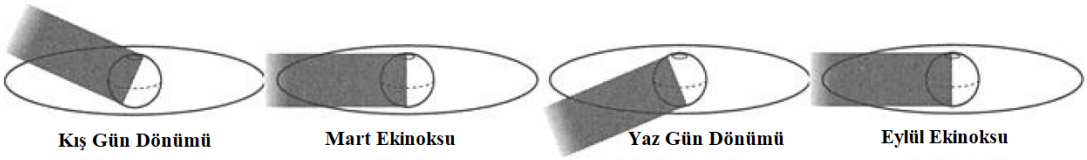
Tez çalışması kapsamında tasarlanan uydunun yer sabit yörüngesinde görev yapması nedeniyle bu bölümde yer sabit yörüngedeki albedo ve Dünya'nın kızıl ötesi yayınımın değerlendirmesi yapılmıştır.

Yörüngenin irtifası yükseldikçe Dünya'dan gelen kızıl ötesi ve albedo yükleri hızlı bir şekilde düşmektedir. Şekil 2.9'da verilen grafik siyah bir plakanın zenith noktasında Dünya'dan uzaklaştıkça değişen yük miktarları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi uzay araçları yer sabit yörüngeye yaklaştıkça albedo ve Dünya'nın kızıl ötesi yayınımı çoğu ısıl tasarım analizi için önemsiz hale gelmektedir. Bu duruma istisna olarak kriyojenik sistemler gösterilebilir. Bu sistemler oldukça düşük sıcaklıklarda çalışırlar ve Dünya'dan gelen düşük ısı yüklerinden bile önemli derecede etkilenebilirler [15].



Şekil 2.9 Albedo ve kızıl ötesi yayınımın irtifa ile değişimi [15]

Dünya kaynaklı düşük ısı yükleri nedeniyle yer sabit yörüngedeki tek önemli çevresel ısı yükü Güneş'ten gelen ısı enerjisidir. Bu yörüngede uzay araçları çoğu zaman -neredeyse sürekli- Güneş'ten gelen ısıl radyasyona maruz kalmaktadır. Sadece tutulma zamanlarında 24 saatlik bir dönüşte maksimum 72 dakika Güneş'i görmemektedir. Çoğu yer sabit yörüngede 4°'den daha düşük bir düzlemsel eğiklik olduğu için tutulmalar sadece ilkbahar ve sonbahar ekinokslarında ve bu tarihlere yakın zamanlarda gerçekleşir. Yaz ve kış mevsimlerinde Güneş'in geliş açısı nedeniyle Dünya'nın gölgesi yer sabit yörüngenin altında veya üstünde kalmaktadır (Şekil 2.10) [15].



Şekil 2.10 Mevsimlere göre Güneş'in geliş açısının değişimi

2.2.4 Uydu Isı Üretimi

Uyduların ısıl tasarım aşamasında, çevreden gelen ısı kazanımlarının yanında kendi ürettiği ısı enerjisi de önemli bir rol oynamaktadır. Üretilen ısı enerjisinin kaynağı, uydunun görevini yerine getirmeye yarayan çeşitli ekipmanlardır. Bu ekipmanlar, uydu görevinin farklı aşamalarında, yörüngede veya yörüngeye giderken farklı zamanlarda farklı miktarlarda ısı yayabilirler.

Yer sabit yörüngelerde görev yapan haberleşme uydularında genellikle TWT, ONET, EPC, HPI vb. yüksek güç tüketimi ve yüksek ısı yayınıma sahip ekipmanlar, uyduda üretilen ısı enerjisinin büyük kısmını oluşturur. Bu gibi ekipmanlar kuzey ve güney yüzeylere yerleştirilerek fazla ısı enerjisi bu yüzeylerden uzaklaştırılır.

2.2.5 Uydu Isı Yayınımı

Yörüngelerinde görev yapan uydular 0 K'den daha yüksek bir sıcaklığa sahip oldukları için derin uzaya kızıl ötesi dalga boyunda ışınım yaparlar. Buna ek olarak uydu iç ortamında paneller ve ekipmanlar birbirlerine ışınım yaparak ısı transferi gerçekleştirirler [18].

Uydu içerisinde üretilen fazla ısı, Güneş'ten, Dünya'dan gelen ısı enerjisi ile birlikte uydunun görevini yerine getirmek için çalışan ekipmanları belli bir sıcaklık aralığından tutacak şekilde derin uzaya atılmaktadır. Bu ısı transfer mekanizmasının gerçekleşmesi büyük ölçekte yüzeyler ısıl-optik özelliklerine bağlıdır [18]. İlerleyen bölümlerde ısıl kontrol sistemi ekipmanları anlatılırken yüzey özellikleri ile ilgili daha detaylı bilgiler verilecektir.

2.3 Isı Geçiş Mekanizmaları

Bu bölümde, ısıl analiz ve kontrol mekanizmalarının karmaşıklığına geçiş yapmadan önce ısı transfer mekanizmalarının temelleri ile ilgili bilgiler paylaşılmış ve mekanizmaların uydularda gerçekleştiği durumlara örnekler verilmiştir.

Isı, sıcaklık farkından dolayı bir sistemden diğerine geçiş yapan bir enerji türüdür. Bir termodinamik analizi bir sistemden diğerine geçen ısının miktarı ile ilgilenirken ısı transferi geçen ısının hızı ile ilgilenir. Termodinamiğin 2. Kanunun da bildiğimiz gibi ısı transferini yönü yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğrudur ve iki sıcaklık eşitlenene kadar devam eder. Bunun aksi gerçekleşemez [19].

Isı transferi üç yolla gerçekleşir. Sonraki bölümde kısaca açıklamaları verilmiştir.

2.3.1 Işınım ile Isı Geçişi

Işınım maddenin atomlarda veya moleküllerde meydana gelen değişiklikler sonucunda elektromanyetik dalgalar şeklinde yaydığı enerjidir. İletim ve taşınım yoluyla ısı geçişinin aksine ışınım ile enerji transferi için herhangi bir ortamın varlığı gerekmemektedir. Aslında ışık hızında gerçekleştiği için en hızlı enerji transfer yoludur ve vakum ortamında herhangi zayıflama yaşanmaz. Güneş ışınları bu sayede Dünya'ya ulaşır [19].

Isı transfer çalışmalarında, maddelerin sahip olduğu sıcaklıktan dolayı yaymış olduğu ısıl ışınım konusu ele alınmaktadır. Isıl ışınım sıcaklıkla alakası olmayan X-ışınları, gama ışınları mikrodalga, radyo dalgaları gibi elektromanyetik dalgalardan farklıdır. Mutlak sıfırın üzerinde sıcaklığa sahip olan her madde ısıl ışınım yapmaktadır [19].

Isıl ışınım hacimsel bir oluşumdur. Katılar, sıvılar ve gazlar farklı sıcaklıklarda ışınım ile yayınım yapar, emer ve üzerinden geçirir. Fakat genellikle katılar için yüzeysel bir oluşum olarak değerlendirilir. Çünkü aslında metaller, kayalar gibi katı maddelerin iç bölgelerinde de gerçekleşen ışınım asla yüzeye ulaşamaz ve bu maddelere gelen ışınım yüzeyden sadece birkaç mikron derinlik içerisinde hemen emilir [19].

Bir yüzeyden belirli bir T_s sıcaklığında yayılan maksimum ısıl ışınım hızı Stefan-Boltzmann kanunu olarak tanımlanır:

$$\dot{Q}_{Yayılan,maks} = \sigma . A_s . {T_s}^4 \qquad (W) \tag{2.1}$$

$\sigma = 5.67x10^{-8}\, W/m^2 . K^4$ (Stefan-Boltzmann sabiti)

Bu maksimum hızda ışınım yapan ideal yüzeye siyah cisim adı verilir. Gerçek cisimler siyah cisimden daha az bir hızla ışınım yapmaktadır ve bu hız aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$\dot{Q}_{Yayılan} = \varepsilon . \sigma . A_s . {T_s}^4 \qquad (W) \tag{2.2}$$

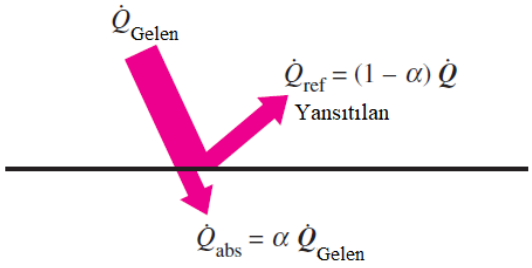
$\varepsilon =$ Yayınım Katsayısı

Yayınım katsayısı $0 \leq \varepsilon \leq 1$ arasındadır. Bir yüzeyin siyah cisme ne kadar yakın olduğunun ölçüsüdür. Çeşitli yüzeylerin yayınım değerleri kitaplardan ve internet sitelerinden ulaşılabilir[19].

Diğer önemli ışınım özelliği ise α emiciliktir. Bu özellik yüzey tarafından emilen radyasyonun gelen radyasyona oranıdır. Aynı yayınım katsayısı özelliği gibi $0 \leq \alpha \leq 1$ 'dir. Siyah cisim ideal emicidir. Yani siyah cisim için $\alpha = 1$'dir.

Genellikle hem yayınım hem de emicilik yüzey özelliği sıcaklığa ve ışınım dalga boyuna bağlıdır. Kirchhoff'un ışınım yasasına göre belirli bir sıcaklık ve dalga boyunda bir yüzeyin yayınım ve emicilik özelliği eşittir. Bir yüzeyin ışınım ile soğurduğu birim zamandaki ısı miktarı aşağıdaki ifade ile hesaplanır [19]:

$$\dot{Q}_{Absorb} = \alpha . \dot{Q}_{Gelen} \quad (W) \tag{2.3}$$



Bir opak yüzey gelen radyasyonun bir kısmını soğururken kalan kısmını yansıtır.

Bu durumda yüzeyin yaydığı ışınım ile yüzeyin soğurduğu ışınımın farkı net ışınım olarak tanımlanır. Eğer soğurulan ışınım miktarı yayılandan fazla ise yüzey enerji kazanıyor demektir. Tam tersi durumda ise yüzey enerji kaybediyor diyebiliriz.

Genellikle iki yüzey arasındaki ışınım ile gerçekleşen net ısı geçiş miktarı; yüzeylerin ısıl-optik özelliklerine, birbirlerine göre konumu ve yüzeyler arasındaki ortam ile radyasyon etkileşimlerine bağlıdır.

Yayınım katsayısı ε ve yüzey alanı A_S olan ve belli bir T_S sıcaklığında olan bir yüzeyin etrafının tamamen bir siyah cisimle kaplı olduğunu düşünelim. Siyah cismin sıcaklığı $T_{Çevre}$'dir. Bu durumda net ışınım ısı transferi aşağıdaki ifade ile hesaplanır:

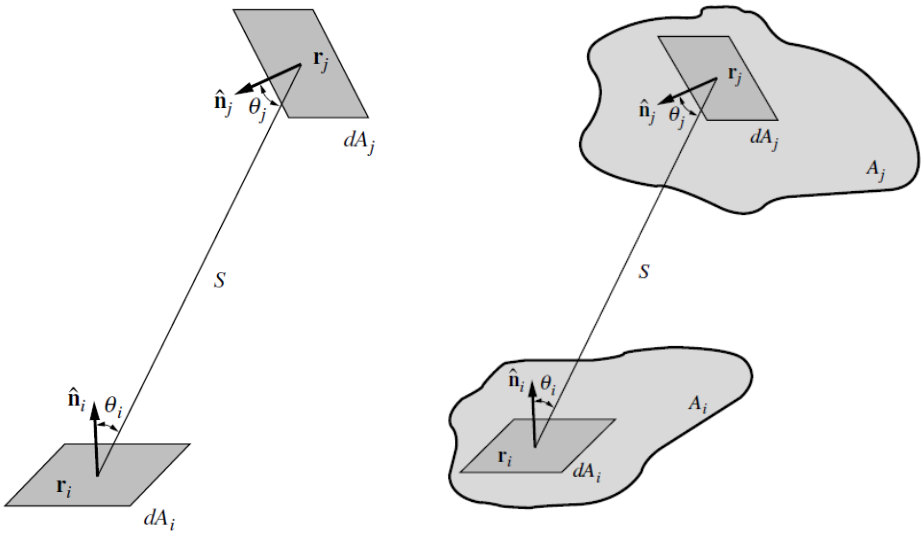
$$\dot{Q}_{Rad} = \varepsilon . \sigma . A_s . (T_s{}^4 - T_{çevre}{}^4) \quad (W) \tag{2.4}$$

Bu özel durumda çevreleyen yüzeyin yayınım ve soğurma değerlerinin net ısı geçişine bir etkisi yoktur.

Uzay araçlarının görev yaptığı ortam düşünülürse radyasyon ile ısı transferi, ısıl tasarımında rol oynayan en kritik ısı transfer mekanizmasıdır [19].

Bir yüzeyden diğerine ışınımla geçen ısı miktarı yüzeyin ısıl-optik özellikleri ve sıcaklığının yanı sıra yüzeyin şekline ve konumuna da bağlıdır. Yüzeyler arası ışınımla geçen ısı miktarının bulunması için yüzeylerin boyutu, birbirinden uzaklığı, birbirine göre konumu gibi bilgilerin yardımıyla hesaplanabilen görüş faktörü değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Görüş faktörünün genel bir ifadesini göstermek için Şekil 2.11'de verilen gelişi güzel yerleştirilmiş iki yüzeyden faydalanabiliriz [20].



Şekil 2.11 İki yüzey arasındaki görüş faktörü [20]

A_i yüzeyinden yayılan ve A_j yüzeyine düşen ışınım miktarı:

$$dQ_{ij} = I_i \cos\theta_i \, dA_i dw_{j-i} \tag{2.5}$$

I_i=A_i yüzeyine dik ışınım yoğunluğu,

dw_{j-i}= A_j tarafından karşılanan katı açıdır.

Katı açı tanımından gidilirse:

$$dQ_{ij} = I_i \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \tag{2.6}$$

Bu durumda A_i'den A_j'ye düşen ışınım miktarı:

$$Q_{ij} = I_i \iint_{A_i A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \tag{2.7}$$

Görüş faktörünün tanımı yüzeyden ayrılan ışınım ile diğer yüzeye düşen ışınım miktarı kullanılarak yazılacak olursa:

$$F_{ij} = \frac{Q_{ij}}{I_i A_i} \tag{2.8}$$

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \tag{2.9}$$

Yukarda verilen integral iki alanlı veya dört katlı bir integraldir. Ne yazık ki, analitik çözümler sadece basit geometriler için kullanılabilmektedir.

Bu ifadeler A_i'den A_j'ye düşen ışınım miktarı için yazılırsa:

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \iint_{A_i A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \tag{2.10}$$

Ve sonuç olarak elde edilen ifadelerle görüş faktörünün en önemli kuralı olan karşılıklı olma durumu aşağıdaki gibi ifade edilir:

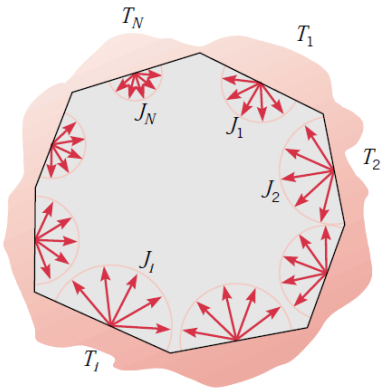
$$A_{ij} F_{ij} = A_{ji} F_{ji} \tag{2.11}$$

Bunun anlamı iki yüzeyin birbirine göre görüş faktörleri her zaman aynıdır [20].

Görüş faktörü için diğer bir önemli kural ise toplam kuralıdır. Şekil 2.12'de verilen kapalı hacim zarfını düşünelim: bir yüzeyden diğer bütün yüzeylere giden görüş

faktörlerinin toplamı her zaman 1'e eşittir. Aynı karşılıklı olma kuralından dolayı bu yüzeye gelen bütün görüş faktörlerinin toplamı da 1'e eşit olmak zorundadır [21].

$$\sum_{j=1}^{N} F_{ij} = 1 \tag{2.12}$$



Şekil 2.12 Görüş faktörü toplam kuralı [21]

Görüş faktörü birkaç farklı yolla hesaplanabilmektedir:

- Direkt İntegral Alma Yöntemi: görüş faktörü integralinin analitik veya sayısal yöntemleri
- İstatistiksel Hesaplama: Monte-Carlo yöntemiyle istatistiksel örnekleme
- Özel Yöntemler: Cebirsel görüş faktörü hesaplama, çapraz dizeler yöntemi, birim küre metodu, küre içi metodu vb.

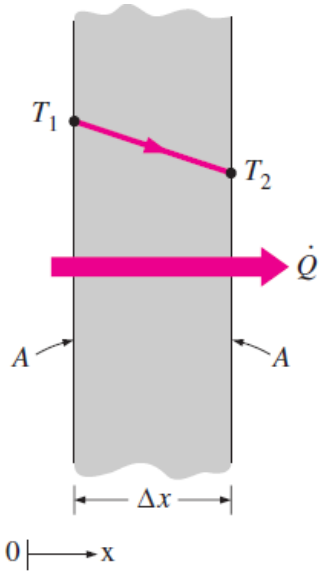
Uzay aracı ısıl tasarımında genellikle Monte-Carlo yöntemi kullanılmaktadır. Antenler, reflektörler, yıldız izlerler, sensörler, güneş panelleri gibi karmaşık geometriler sebebiyle diğer yöntemler yetersiz kalmaktadır [20].

Monte-Carlo metodunda bir yüzeyden rasgele bir şekilde her yöne doğru ışınlar gönderilmektedir. Diğer bir yüzeye ulaşan ışınların sayısının, yüzeyden gönderilen toplam ışın sayısına oranı görüş faktörünü vermektedir. Uydu ısıl analizlerinde görüş faktörleri, Güneş'ten ve Dünya'dan gelen ısı akıları için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Ayrıca uydu dış ekipmanları ile paneller ve uydu içi ekipmanları arasında gerçekleşen ısıl ışınım için de hesaplatılmaktadır.

2.3.2 İletim

İletim, bir maddenin daha enerjik parçacıklarından, parçacıklar arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak daha az enerjiye sahip komşu parçacıklara enerji aktarımıdır [21]. İletim katılarda, sıvılarda ve gazlarda gerçekleşebilir. Gaz ve sıvılarda iletim, moleküllerin rasgele hareketi sonucu çarpışma ve difüzyon yoluyla gerçekleşir. Katılarda ise, bir kafes yapısı içindeki moleküllerin titreşimleri ve serbest elektronlar tarafından enerji taşınması ile gerçekleşir[19].

İletim ile ısı transfer hızı; geometriye, kalınlığa, malzeme özelliklerine ve sıcaklık farkına bağlıdır. Şekil 2.13'te gösterildiği gibi, $\Delta x=L$ kalınlığında ve A alanlı büyük bir düzlem duvar boyunca sabit ısı iletimini düşünelim. Duvar boyunca sıcaklık farkı $\Delta T=T_2 - T_1$'dir. Deneyler, duvar boyunca sıcaklık farkı T veya ısı transferi yönüne dik A alanı iki katına çıkarıldığında, duvar boyunca ısı transfer hızının iki katına çıktığını, ancak duvar kalınlığı L iki katına çıkarıldığında yarıya indiğini göstermiştir. Böylece, bir düzlem tabaka boyunca ısı iletim hızının, tabaka ve ısı transfer alanı boyunca sıcaklık farkıyla orantılı olduğu, fakat tabakanın kalınlığı ile ters orantılı olduğu sonucuna varıyoruz [19].



Şekil 2.13 Δx kalınlığında ve A alanına sahip bir levhadan iletimle geçen ısı [19]

İletim ile ısı transfer hızı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{\text{İletim}} = k.A.\left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta x}\right) = -k.A.\frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \tag{2.13}$$

Bu denklemde k, bir malzemenin ısıyı iletme kabiliyetini gösteren iletim katsayısıdır. Bu denklemde Δx →0'a gittiğinde yukardaki denklem diferansiyel bir form alır:

$$\dot{Q}_{\text{İletim}} = -k.A.\frac{dT}{dx} \quad (W) \tag{2.14}$$

Bu denklem Fourier'in iletim ısı geçişi kanunudur. Burada dT/dx sıcaklık gradyenidir ve x boyunda sıcaklığın değişimini ifade eder. Sıcaklığın x artıkça azalması sebebiyle sıcaklık değişimi negatif olur. Negatif işaret, pozitif x yönünde ısı geçiş miktarının pozitif olduğunu gösterir [19].

Uyduların ısıl tasarımında yapısal paneller, ekipmanlar, destek elemanları vb. yapılarda iletimle ısı transferi gerçekleşir. Isının panellere homojen bir şekilde yayılmasını, fazla ısının uzaklaştırılması ve doğru malzemelerin seçilmesi gibi konularda yapılan iletim hesaplamaları kritik öneme sahiptir.

2.3.3 Taşınım

Taşınım ısı transferi katı bir yüzey ile üzerinden geçen akışkan arasında gerçekleşen ısı geçiş mekanizmasıdır. Yoğunluk ve/veya basınç farkından kaynaklanan doğal ve zorlanmış akış yoluyla gerçekleşebilir. Newton'un soğuma yasasına göre taşınım ısı geçişi yüzey ile akışkanın sıcaklık farkı ile doğru orantılı olarak gerçekleşir[21]:

$$\dot{Q}_{taşınım} = h.A.(T_s - T_\infty) \quad (W) \tag{2.15}$$

Deneysel veya analitik olarak belirlenen h katsayısı ise taşınım ısı transfer katsayısıdır ve birim W/m². K'dir. T_∞ akışkanın sıcaklığıdır [21].

Uydu ısıl analizlerinde taşınım çoğunlukla kullanılmaz. Sadece yer yüzünde gerçekleşen operasyonlarda ve ısı borularının iç kısmındaki akışkan kaynaklı hesaplamalarda kullanılmaktadır [18].

2.3.4 Kombine Isı Geçiş Mekanizmaları

Isı transferinin üç yolla gerçekleştiğinden bahsedilmişti. Fakat bu, üç yolun üçü de aynı ortamda gerçekleşemez. Örneğin, ısı transferi opak katılarda sadece iletimle, yarı saydam katılarda iletim ve radyasyonla olur. Bu nedenle, bir katı iletim ve radyasyon içerebilir, ancak konveksiyon içermez. Bununla birlikte, bir katı, bir sıvıya veya diğer yüzeylere maruz kalan yüzeylerinde taşınım ve/veya radyasyon yoluyla ısı transferini içerebilir. Örneğin, soğuk bir kaya parçasının dış yüzeyleri, konveksiyon (havadan) ve radyasyon (güneşten veya daha sıcak çevreleyen yüzeylerden) yoluyla ısı kazanımının bir sonucu olarak daha sıcak bir ortamda ısınacaktır. Ancak bu ısı iletim yoluyla kayanın iç bölgesine aktarıldığından kayanın iç kısımları ısınacaktır [18].

3
YER SABİT UYDULARDA ISIL KONTROL SİSTEMİ

Bu bölümde ısıl kontrol sisteminde kullanılan donanımlara ve bazı önemli özelliklerine yer verilmiştir.

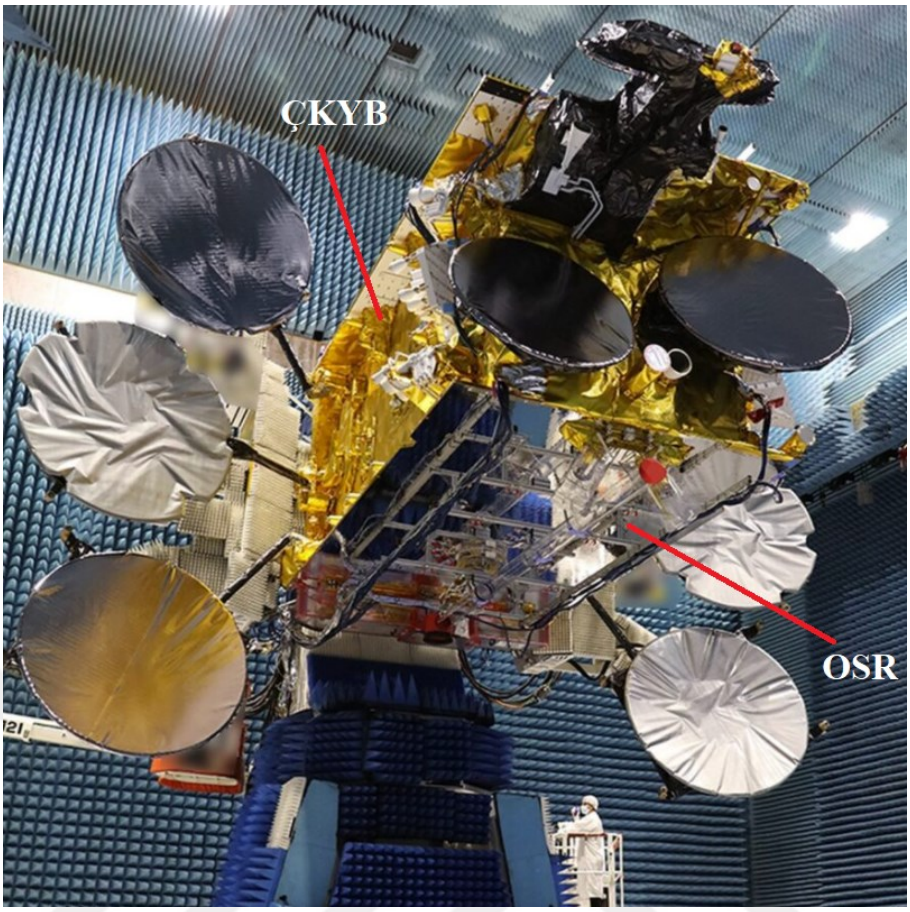
3.1 Yer Sabit Uydularda Isıl Kontrol Sistemi Donanımları

Uydu ekipmanlarının görevleri sırasında sorunsuz çalışabilmeleri için belirli sıcaklık aralıklarında tutulması gerekir. Belirli ısıl kontrol metotları ve donanımları kullanılarak ekipmanların sıcaklık limitlerinde kalması sağlanmaktadır. Isıl mühendisler maliyet, kütle ve güç kısıtlarını düşünerek ısıl donanımları seçmeli ve uygulamalıdır.

Isıl kontrol metotları temel olarak pasif ve aktif kontrol olarak ikiye ayrılır.

3.1.1 Pasif Isıl Kontrol

Pasif bir ısıl kontrol sistemler, tanımı gereği otonom sistemlerdir, yani çalışmak için herhangi bir enerji girdisine ihtiyaç duymazlar. Pasif ısıl kontrol için uygulanan teknikler arasında yüzey kaplamaları, çok katmanlı yalıtım battaniyeleri (ÇKYB), Güneş kalkanları, ışıma kanatçıkları ve ısı boruları yer alır. Örnek olarak; çok katmanlı yalıtım battaniyeleri (ÇKYB) ısının geçişini önlemek için kullanılırlar. Isıyı uydu içerisinde tutmak veya uydunun bazı sıcak bölgelerini soğuk derin uzaydan izole etmek için kullanılabilirler. Pasif kontrol donanımlarına başka bir örnek olarak Optik Solar Reflektörler (OSR), düşük solar soğurma katsayıları sayesinde Güneş'ten gelen ultraviyole ışınımı büyük oranda geri yansıtırlar. Ayrıca yüksek kızıl ötesi yayınım katsayıları sayesinde uydu içerinde ısı üretimi yapan ekipmanların fazla ısılarının da uzaya atılmasına yardımcı olurlar [22]. Şekil 3.1'de Airbus tarafından geliştirilen TURKSAT 5A uydusu üzerinde ÇKYB ve OSR donanımlarını gösterilmektedir.



Şekil 3.1 TURKSAT 5A uydusu [23]

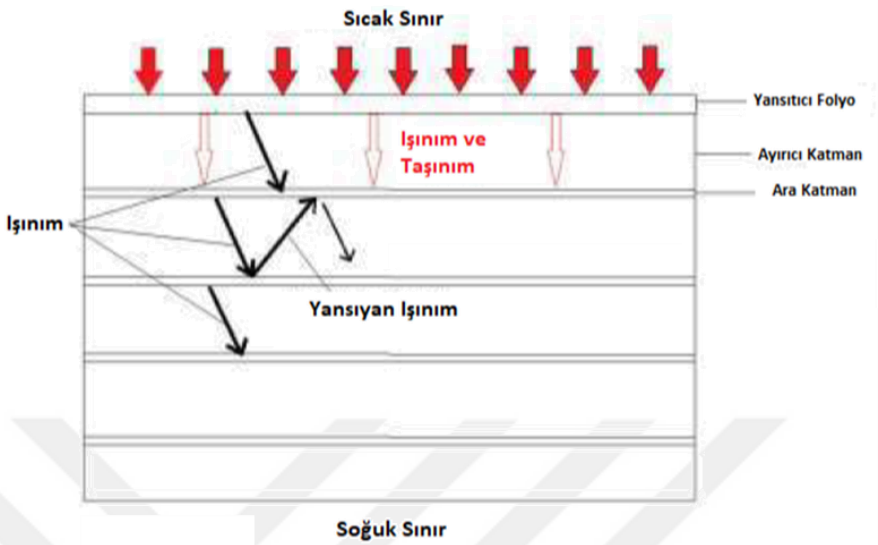
3.1.1.1 Yalıtım

Yalıtım donanımları vakum ortamında ısı geçişini minimize etmek için kullanılır. Isıl yalıtım donanımları; bir radyasyon bariyeri olarak davranır ve fazla ısı yayınımın atılmasını engeller. Çok katmanlı yalıtım battaniyeleri (ÇKYB-MLI) en sık kullanılan ısıl yalıtım donanımlarıdır.

Çok katmanlı yalıtım battaniyeleri adından da anlaşılacağı üzere çok sayıda katmandan ve ara katmanlardan oluşmaktadır. Katmanlar için, yüksek yansıtıcı özellikteki malzemeler seçilmektedir. Genellikle bu malzemeler metal kaplamalı KAPTON ve MYLAR'dır. Ara katmanlar ise düşük iletim ısı transfer katsayısına sahip filelerden oluşmaktadır.

Katmanlar, ışınım ısı transferini bir kalkan gibi engellemektedir. Her bir katman bir miktar ışınım geri yansıtarak bir sonraki katmana her seferinde daha az ışınım geçmesini sağlamaktadır (Şekil 3.2). Ara katmanlar ise katmanların bir birbirine

en az teması sağlamak için kullanılırlar ve düşük ısı iletim katsayısına sahip olmaları en önemli özelliklerindendir [24]. Şekil 3.3'te bir çok katmanlı yalıtım battaniyesi görseli verilmiştir.



Şekil 3.2 Çok katmanlı yalıtım battaniyesinin genel yapısı [24]



Şekil 3.3 Çok katmanlı yalıtım battaniyesi görseli [25]

Çok katmanlı yalıtımlarda kullanılan katman sayıları ve katman malzemeleri:

Düşük Sıcaklık (T<150 °C)

- İç katman olarak; alüminize MYLAR, alüminize KAPTON veya siyah KAPTON,
- Ayırıcı katman olarak; polyester

Orta Sıcaklık (T<250 °C);

- İç katman olarak; alüminize MYLAR, alüminize KAPTON veya siyah KAPTON
- Ayırıcı katman olarak; polyester, doku camı veya kabartma

Yüksek Sıcaklık (T<350 °C)

- İç katman olarak alüminize KAPTON veya siyah KAPTON
- Ayırıcı katman olarak polyester, doku camı (cam elyafı) veya kabartma kullanılmaktadır [26].

Çok katmanlı yalıtımların verimi: Etkin Yayınım

Çok katmanlı yalıtım battaniyelerin verimi etkin yayınım ile ifade edilir. Etkin yayınım teorik olarak vakum ortamında aşağıdaki hesaplanmaktadır [26]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}\left(\frac{1}{N+1}\right) \tag{3.1}$$

Burada ε_1, en iç taraf yayınım katsayısını; ε_2, en dış taraf yayınım katsayısını; N, katman sayısını ifade etmektedir.

Etkili yayınım uygulama ise ısıl vakum testlerinde aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\varepsilon = \frac{Q}{A\sigma(T_H^4 - T_C^4)} \tag{3.2}$$

Burada T_H ve T_C sıcak ve soğuk sınır sıcaklıklarını (K); A çok katmanlı yalıtımın yüzey alanını (m^2); Q, net ısı geçişi (W); σ, STEFAN-BOLTZMANN katsayısını ($W/m^2\ K^4$) ifade etmektedir.

Verime etki eden faktörler genel olarak;

- Katman sayısı
- Katmanın malzemesi
- Fiziksel büyüklük vb. dir [26].

Tek katmanlı yalıtım (TKY) (Şekil 3.4) uydularda kullanılan diğer bir ısıl yalıtım donanımıdır. Aslında ÇKYB'lerin bir alt formu gibidir. Basit, daha az maliyetli fakat düşük verime sahip bir yalıtımdır. Tek katmanlı yalıtımlar genellikle yüksek bir

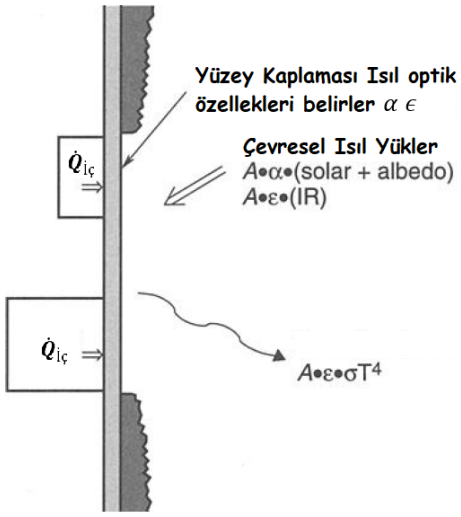
yalıtım performansı gerektirmeyen yerlerde kullanılır. ÇKYB'lerden oldukça az maliyetli olduğu gibi üretimi de ÇYKB'lere kıyasla çok daha basittir. Uyduların görev yaptığı yörüngeye göre gerekli özellikleri karşılayan altın ve siyah renkli olabilir [27].



Şekil 3.4 Tek katmanlı yalıtım görseli [27]

3.1.1.2 Yüzey Kaplamaları ve Bitirme İşlemleri

Yüzeyler belli oranlarda ısı atmak ve soğurmak için özelleştirilebilir. Isıl kontrol kapmaları genel olarak; güneş yansıtıcıları, düz kaplamalar, güneş soğurucuları ve düz soğurucular olarak sınıflandırılabilir. Yaygın kullanılan Optik Güneş Yansıtıcıları ultraviyole dalga boyunda düşük soğurma oranına ve kızıl ötesi dalga boyunda yüksek yayınım katsayısına sahip olmaları radyatör olarak kullanılmalarına imkân tanır. Çünkü Güneş'ten gelen radyasyonu yansıtabilir ve uydu içerisinde ekipmanların ürettiği fazla ısıyı derin uzaya atarlar (Şekil 3.5). Bu sebeple uydunun dış yüzeylerinde kullanılırlar [15].



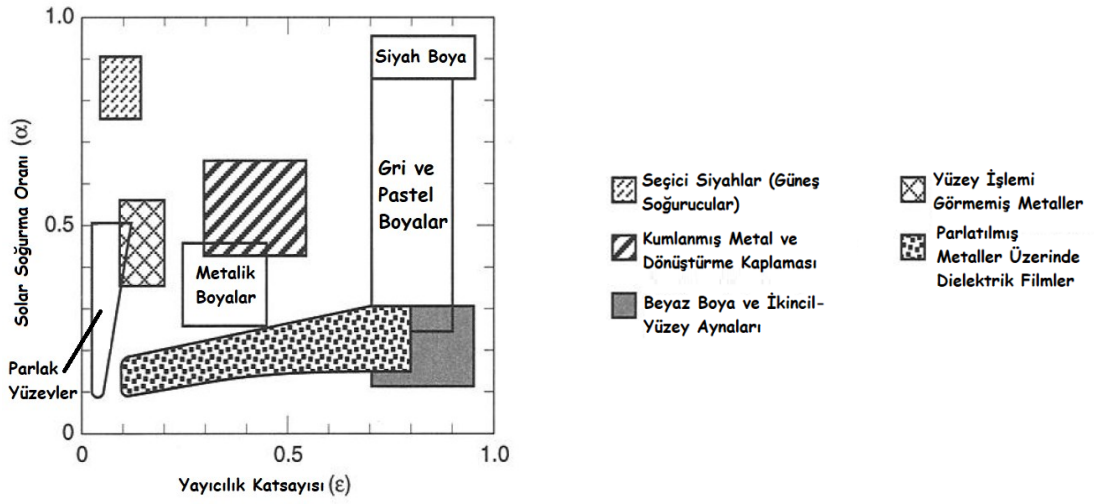
$$Çevresel\ Isıl\ Yükleri + \sum \dot{Q}_{iç} = Uzaya\ Atılan\ Isı$$

(Kararlı durum)

Şekil 3.5 Radyatör yüzeyinde enerji dengesi [15]

Diğer yaygın kullanılan yüzey kaplama işlemi olan siyah boya genellikle uydu iç yüzeyleri ve iç ekipmanların yüzeylerinde kullanılırlar. Bu sayede ekipmanlar fazla ısılarını yüzeylerinden daha soğuk olan uydu iç yüzeylerine atabilirler.

Uydu üzerinde neredeyse bütün yüzeylere ısıl kontrol için bir yüzey işlemi uygulanır. Uzay kalifiye boyalar geniş bir renk skalasına sahiptir. Fakat en yaygın kullanılanlar siyah ve beyaz boyalardır. Isıl kontrolde bazen özel yüzey kaplamaları de kullanılır. Farklı tipte yüzey kaplamalarının ısıl optik özellikleri Şekil 3.6'da verilmiştir[15].



Şekil 3.6 Farklı tipte yüzeyleri ısıl optik özellikleri [15]

3.1.1.3 Radyatörler

Optik Solar Yansıtıcılar (Optik Solar Reflektör (OSR)):

Optik solar yansıtıcılar yer sabit uydularda sıklıkla radyatör olarak kullanılan önemli bir yüzey kaplama çeşididir. Bu bölümde bazı OSR'lerin ısıl optik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Bazı OSR tiplerinin ısıl-optik özellikleri [15]

Yüzey Kaplaması	α-Soğurma Katsayısı (Ömür Başlangıcı)	ε-Yayınım Katsayısı
Optik Solar Reflektörler		
8-mil Quartz Aynalar	0.05'ten 0.08'e	0.80
Quartz Aynalar (Difüze)	0.11	0.80
2-mil Gümüş Teflon	0.05'ten 0.09'a	0.66
5-mil Gümüş Teflon	0.05'ten 0.09'a	0.78
2-mil Alüminize Teflon	0.10'dan 0.16'a	0.66
5-mil Alüminize Teflon	0.10'dan 0.16'a	0.78

Isıl-optik özelliklerinin bozulma oranlarının az olması nedeniyle yer sabit yörüngede görev yapan uydularda genellikle quartz aynalar kullanılırlar [28].

3.1.1.4 Isı boruları

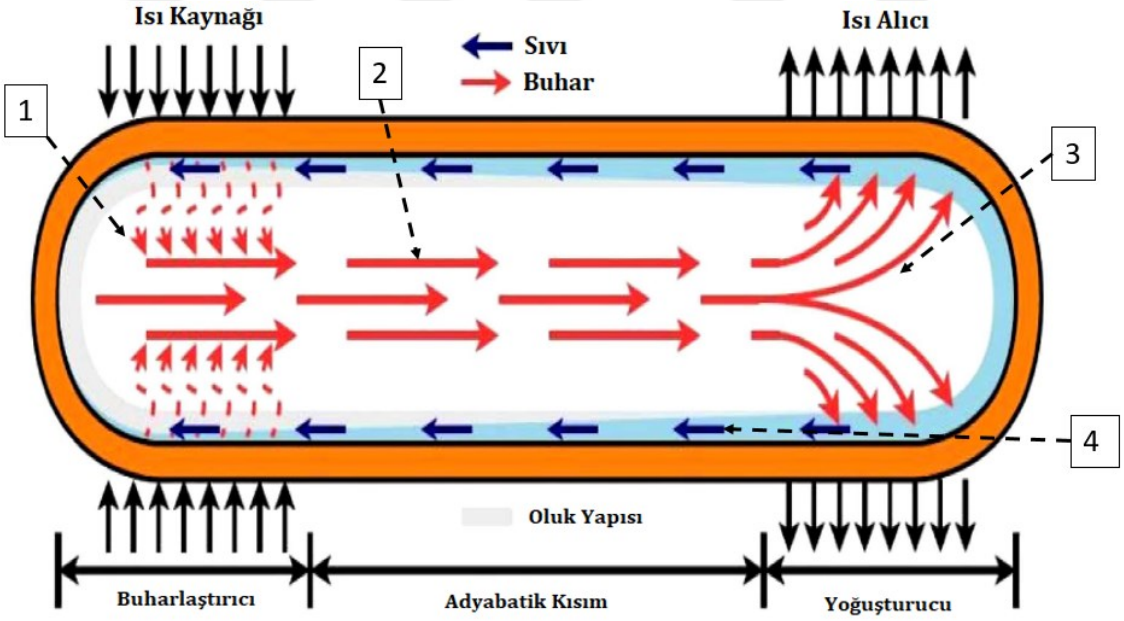
Isı boruları kılcallık etkisi ile çalışan 2 fazlı ısı transfer donanımlarıdır. Özellikle küçük sıcaklık farklarında çok miktarda ısı enerjisini taşıyabilmektedirler. Bir ısı borusu tamamen kapalı bir boru ve içinde iş yapan bir akışkandan oluşmaktadır. Borunun içi yüzeyinde akışkanın soğuk taraftan sıcak tarafa taşınmasını sağlayan eksenel oluklar bulunmaktadır (Şekil 3.7) [29].



Şekil 3.7 Isı borusunun iç kısmındaki oluk yapısı [30]

Isı borusunda ısıl çevrim Şekil 3.8'de de şematik olarak gösterildiği gibi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

1) Akışkan buharlaştıcı bölgesinde ısıyı alarak sıvı halden buhar haline geçer.
2) Buhar boru ortasındaki boşluktan daha soğuk olan bölgeye hareket eder.
3) Buhar oluk yapısı içerisinde ısıyı dışarı atarak sıvı haline geri döner.
4) Sıvı haldeki akışkan oluklar içerisinden daha yüksek sıcaklıktaki bölgeye doğru hareket eder [31].

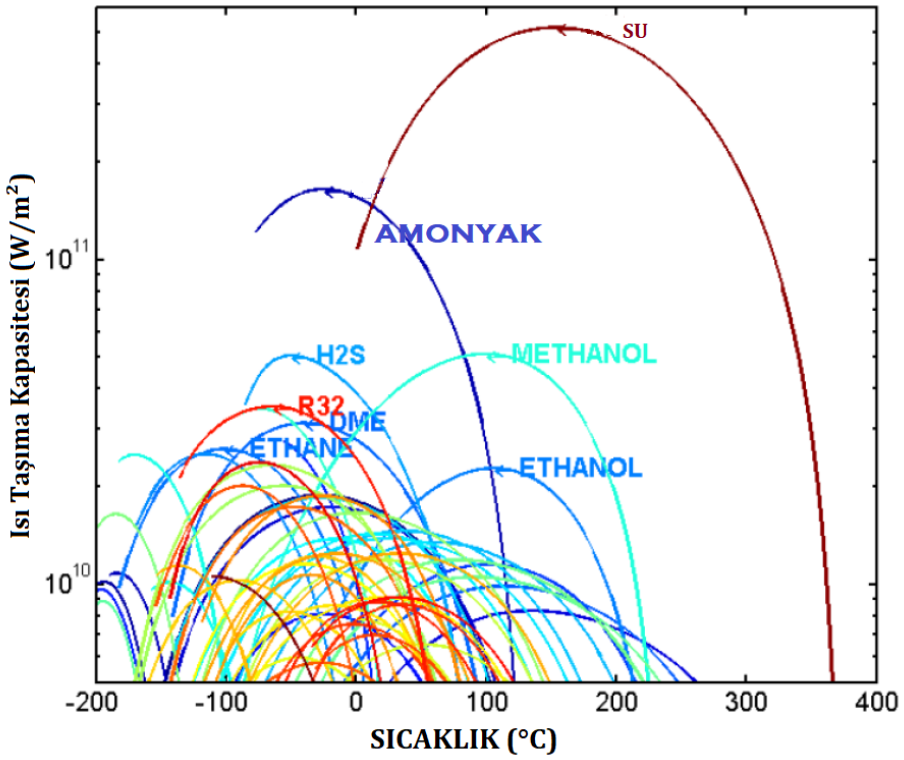


Şekil 3.8 Isı borusunun çalışma prensibinin şematik gösterimi [31]

Uzay endüstrisinde ısı borularında iş akışkanı olarak genellikle amonyak kullanılır. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi amonyak 200-300K sıcaklık aralığında en yüksek ısı

taşıma kapasitesine sahiptir. Su ise 300-500K sıcaklık aralığında daha iyi bir ısı taşıma performansı gösterir. Uyduların ilk çalışma periyodunda donma riskine karşın yüksek sıcaklıkta çalışan bölgeler için su dolu ısı borusu kullanımı araştırılmaya devam etmektedir [29].

Uydularda ısı boruları ısı yükünün yoğun olduğu görev yükü, servis, pil panelleri gibi bölgelerde ısıyı panellere mümkün olduğunca homojen yaymak ve/veya radyatör yüzeyine sahip olmayan ekipmanların fazla ısılarını radyatörlere taşımak için kullanılabilmektedir. Genel kullanımda ısı boruları yapısal panellerin içine gömülü veya yapısal panellerin yüzeyine monte edilerek kullanılabilir.



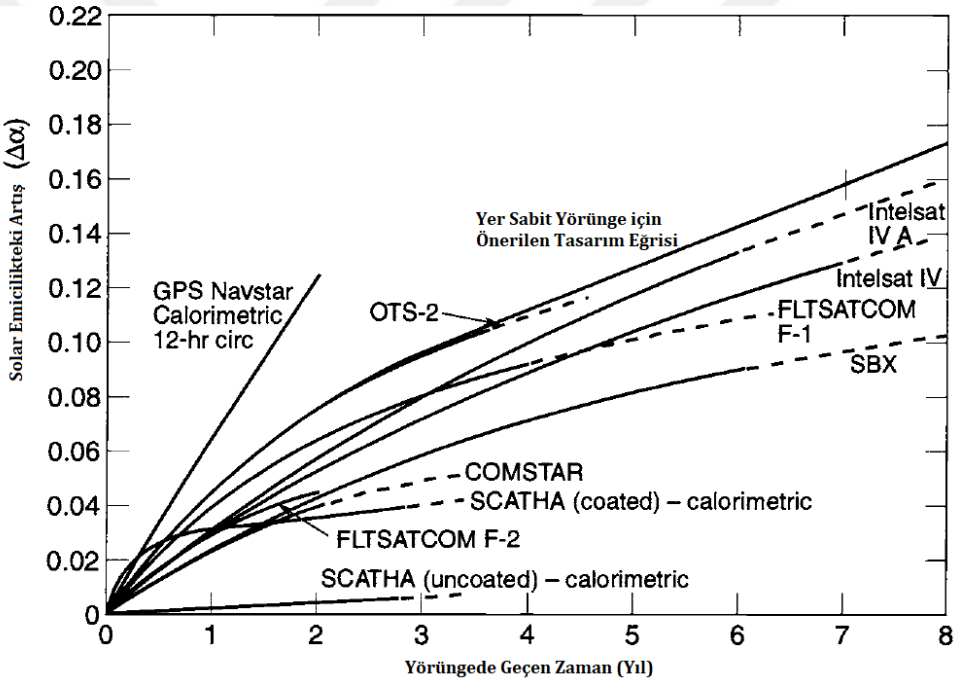
Şekil 3.9 Isı borusu için 80 muhtemel akışkanın ısı taşıma kapasiteleri [29]

3.1.1.5 Malzemelerin Bozunması

Uzay araçlarından yüzey kaplamalarının özellikleri zamanla bozunurlar. Bozunmaya; ultraviyole radyasyon, yüksek vakum, yüklü parçacıklar ve atık filmler neden olurlar. Bu bozunma sonrası genellikle solar emicilik değerinde artış gerçekleşir ve kızıl ötesi yayınım özelliğinde ise değişim görülmez [15].

Bozunma aslında ısıl kontrol sistemi açısından istenmeyen bir durumdur. Çünkü ısıl kontrol sistemi uydunun görev sonundaki ısıl optik özelliklerine göre tasarlanmalıdır. Bu da uydunun ilk görev yıllarında gereğinden fazla radyatör kullanılmasına sebep olur. Uydu görevinin ilk yıllarında tasarlanan sıcaklıkların oldukça altında çalışmaya devam edecektir. Bu soğuk durumlarda ekipmanları alt sıcaklık limitinden yukarda tutmak için gereğinden fazla ısıtıcı gücü kullanılacağı anlamına gelmektedir [15].

Şekil 3.10'da yörüngelerinde bazı uyduların görevleri sırasında quartz aynalarının bozunma miktarları gösterilmiştir. Ayrıca bir tasarım eğrisi de verilmiştir. Tasarım eğrisine bakıldığında 8 yılın sonunda quartz aynanın solar emicilik özelliğinin yaklaşık 0.18 artığı görülmektedir.



Şekil 3.10 Yer sabit yörüngede quartz aynaların bozunması [15]

3.1.2 Aktif Isıl Kontrol

Aktif ısıl kontrolde ısıtıcılar, peltier soğutucular gibi donanımlar kullanılır. Bu donanımlar güç tüketen donanımlar olduğu için yörüngede hata çıkarma ihtimalleri pasif ısıl kontrol donanımlara göre daha yüksektir ve bu yüzden daha az güvenilir donanımlardır. Aktif ısıl kontrol donanımları, pasif ısıl kontrolün tek başına yeterli olmadığı durumlarda kullanılmalıdır [18].

3.1.2.1 Isıtıcılar

En basit yapıya sahip ve uydularda en sık kullanılan aktif ısıl kontrol donanımları ısıtıcılardır. Isıtıcılar radyatörlerin görevinin tersini yaparak ekipman sıcaklıklarının izin verilen alt sıcaklık limitlerinin altına düşmesini önlemektedirler [18]. Uydularda uzay kalifiye ısıtıcılar kullanılmakta ve ısıtıcıların yedekleri bulunmaktadır.

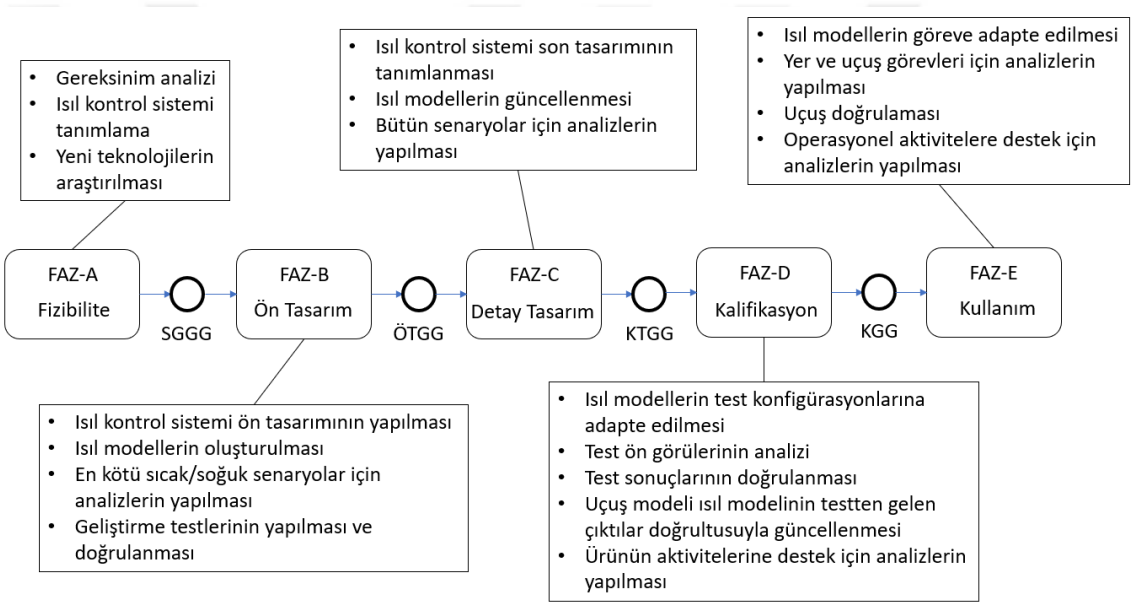
Gerekli ısıtıcı güçleri uydunun her bir paneli için olası en soğuk durum düşünülerek hesaplanmalıdır. Bulunan ısıtıcı gücü değeri ısıtıcı hatlarına dağıtılarak ısıtıcı tasarımları yapılır ve yapısal paneller/braketler vs. üzerlerinde uygun bölgelere konumlandırılırlar. Belirlenen ısıtıcı hatları için bir kontrol noktası seçilir. Bu kontrol noktalarına yerleştirilen bir termostat veya termistör belirlenen sıcaklarda ısıtıcının devreye girmesini ve devreden çıkmasını sağlar.

Isıtıcı seçimi, kontrol noktalarının seçimi, belirlenen çalışma çevrim oranının ayarlanması işlemleri hassas bir çalışma ve detaylı analizler gerektiren önemli de bir zaman alan kritik işlemlerdir.

4
UYDU PROJELERİNDEKİ FAZLAR

Uydu projeleri genel olarak konsept tanımlaması, doğrulama, tam kapsamlı geliştirme ve operasyon fazlarından oluşur. Projeden projeye gerçekleşen aktiviteler değişiklik gösterebilmektedir[15]. Bu bölümde proje olgunlaştıkça bir ısıl mühendisin rolü hakkında genel bir fikir verilmesi amaçlanmıştır.

Şekil 4.1'de uydu projelerindeki tipik ısıl modelleme ve analiz aktiviteleri gösterilmiştir [35].



*SGGG: Sistem Gereksinimleri Gözden Geçirme

*ÖTGG: Ön Tasarım Gözden Geçirme

*KTGG: Kritik Tasarım Gözden Geçirme

*KGG: Kalifikasyon Gözden Geçirme

Şekil 4.1 Proje fazlarında ısıl modelleme ve analiz aktiviteleri [35]

4.1 FAZ A-Fizibilite Fazı (Konsept Tasarım Fazı)

Konsept tasarım fazı normal olarak mühendislik desteğine ihtiyaç duyulan ilk fazdır. Bu faz genellikle konsept tasarıma uygun birkaç farklı yaklaşımın fizibilitesinin yapıldığı aşamadır. Isıl mühendisler bu fazda seçilen birkaç farklı yöntem için tanımlamalar, analizler gerçekleştirmektedir. Bunu yaparken bütün diğer alt sistemlerin ısıl gereksinimlerini düşünmek zorundadırlar [15].

Konsept tasarım fazında gerçek çaba; boyut, ağırlık, güç gereksinimleri veya geliştirme karmaşıklığından kaynaklanan sistem düzeyinde önemli etkilere sahip olan ısıl kontrol sisteminin öğeleri etrafında toplanır. Örnek olarak; yüksek kapasiteli piller için ısı borusu sistemleri, açılabilir radyatör panelleri, yüksek güç yoğunluklu ekipmanları soğutmak için kullanılacak olan cihazlar vb. sistemler verilebilir [15].

Isıl mühendisler genellikle bu aşamayı atlayıp doğrudan nokta atış bir tasarıma geçiş eğilimindedir. Bunu yapmak pek akıllıca değildir. Çünkü projenin bu aşamasında ısıl kontrol sistemini doğrudan etkileyecek birçok parametre çok sık değişebilmektedir [15].

Bu proje aşamasında ısıl mühendisler yaptıkları hesaplamalar ile ısıl kontrol alt sisteminin yeterliliğini kontrol etmelidir. Örneğin, verilen uydu boyutlarının yeterli radyatör alanına sahip olup olmadığı ısı atım kabiliyeti hesapları ile kontrol edilmektedir. Yeterli radyatör alanına sahip olmayan bir panel için genişlemeler, katlanabilir radyatör alanları gibi alternatifler değerlendirilmektedir. Ek olarak gerekli ısıtıcı gücü hesabı yapılarak ısıtıcı bütçeleri çıkarılmaktadır. Bu aşama sırasında diğer alt sistemlerden kaynaklanan birçok girdi değişebildiği için hesaplamalar sıklıkla tekrarlanabilmektedir.

4.2 FAZ B-Ön Tasarım Fazı

Ön tasarım fazı konsept tasarım fazından daha fazla detay içermektedir. Bu aşamada uydu tasarımı oldukça esnektir. Konseptler bir önceki fazda belirlenmiş olmasına rağmen uydu yerleşimi, görev yükü, alt sistem tasarımlarında önemli derecede büyük değişiklikler beklenebilir. Ön tasarım fazı gözden geçirme

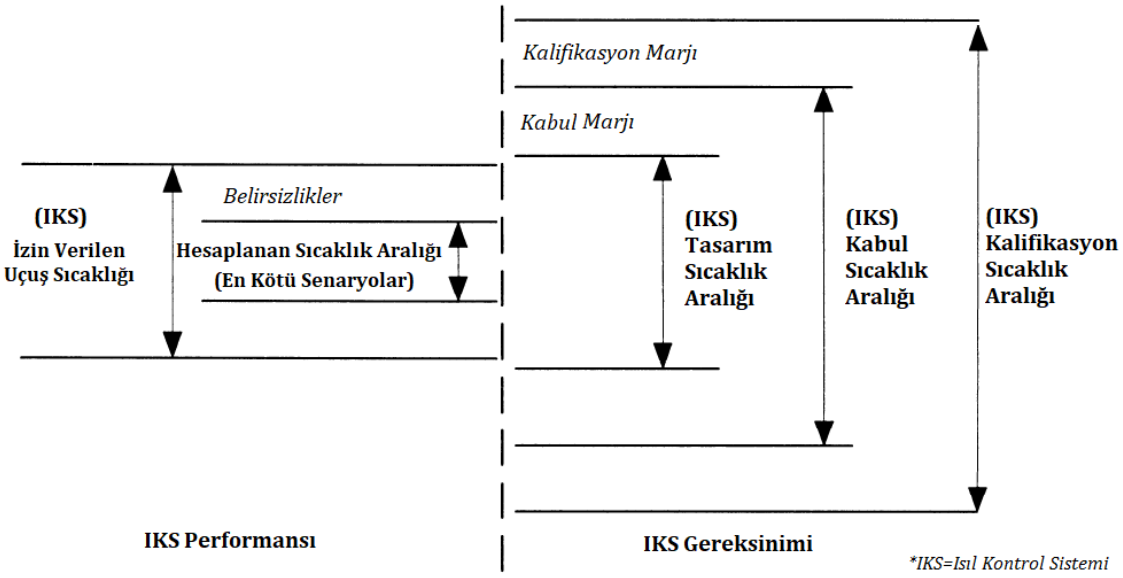
kilometre taşı öncesinde sistem mühendisleri ile birlikte çalışılarak bir referans model tanımlanması yapılmaktadır. Referans model detay tasarım öncesi birçok alt sistemin temel olarak tanımlandığı ve tasarlandığı modeldir. Bu aşamada ısıl mühendisler belirlenen ısıl kontrol alt sisteminin tasarımını yapar ve uydu ısıl modellerini oluştururlar. Belirlenen en kötü sıcak/soğuk durumlar için ısıl modelde analizler gerçekleştirilmelidir. Isıl kontrol alt sisteminde veya bu sistemi etkileyen yeni geliştirilen bir teknoloji kullanılıyorsa bu teknolojilerin testlerini gerçekleştirme ve/veya testlere katılım sağlama işleri yapılmalıdır [35].

Ön tasarım fazında ısıl kontrol sisteminde kullanılan bütün ısıl donanımların tasarımları yapılmalıdır. Örneğin; ısı borularının ve ısıtıcılarının boyutları, çeşitleri belirlenmelidir. Daha önce de belirtildiği gibi bu aşamada ısıl kontrol alt sistemini etkileyecek önemli değişiklikler gerçekleşebilmektedir.

Ön tasarım fazında ısıl modelleme çalışmalarının başladığını belirtmiştik. Bu aşamada kullanılan sıcaklık marjlarından da bahsetmek anlamlı olacaktır.

4.2.1 Sıcaklık Marjları

Isıl kontrol sisteminin ekipmanların sıcaklık limitlerini; ekipmanın çalışma ve çalışmama durumu göz önünde bulundurarak kontrol etmesi gerekmektedir. Ekipmanların izin verilen uçuş sıcaklıkları üzerine bir belirsizlik marjı eklenerek analizlerde geçilmemesi gereken sıcaklık limitleri belirlenmektedir. Avrupa uzay ajansının önerdiği sıcaklık limitlerinin şeması Şekil 4.2'de gösterilmiştir [36].



Şekil 4.2 Isıl kontrol sistemi sıcaklık marjları [36]

Şekil 4.2'de gösterilen terimlerin anlamları yine ECSS-E-ST-31C'de aşağıdaki gibi verilmiştir.

- Kalifikasyon Marjı: sistem yetkilisi tarafından beklenmedik değişlikler için alınan marjdır.
- Kabul marjı: sistem yetkilisi ve ısıl kontrol sistemi arasında el sıkışılan ısıl kontrol alt sistemi ile ilgili ön görülemeyen değişiklikler için kullanılan marjdır.
- Kabul Sıcaklık Aralığı: kalifikasyon sıcaklıklarından kalifikasyon marjları çıkarıldığında elde edilen sıcaklık aralığıdır. Tanımlanan bütün görev fazlarında bir ekipmanın ulaşabileceği ve asla geçmeyeceği en uç sıcaklık limitidir.
- Hesaplanan Sıcaklık Aralığı: bir ekipmanın çalışma ve çalışmama durumu için analiz veya farklı hesaplamalarla elde edilen sıcaklık aralığıdır. En kötü sıcak ve soğuk durum senaryoları göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Şekil 4.2'de de gösterildiği gibi izin verilen uçuş sıcaklık alt ve üst sınırlarındaki belirsizlikler çıkarılarak belirlenir. Bu belirsizlikler ısıl modellemeden, sayısal hesaplamalardan, yapılan kabullerden vs. kaynaklanan belirsizlikleri içermektedir [36].

Isıl kontrol sistemi pasif yöntemle kontrol edilen ekipmanlar için 5 °C ve aktif yöntemle kontrol edilen ekipmanlar için 2.5 °C belirsizlik marjı kullanmaktadır.

4.3 FAZ C-Detay Tasarım Fazı

Bu proje fazında ısıl kontrol sistemi detaylı bir şekilde tasarlanmalıdır. Ön tasarım fazında oluşturulan ısıl modellerin hepsi detaylı bir şekilde güncellenmelidir [35]. Bu süre zarfında, müşteri ile yakın temasta çalışılmalı ve olası herhangi bir ısıl tasarım eksikliğinin önüne geçilmelidir.

Detay tasarım fazında uydunun ve tüm bileşenlerinin en kötü durumdaki sıcak ve soğuk koşullar altında kapsamlı ayrıntılı ısıl analizi yapılmalıdır. Detay seviyesi hakkında bir farkındalık olması açısından örnek verecek olursak Hubble Uzay Teleskobunun ısıl analiz sonuçlarının olduğu özet rapor 500 sayfadan daha uzundur. Ayrıca detay tasarım fazında kritik bileşenler için destek analizleri ve testleri de yapılıp doğrulanmalıdır [15].

Detay tasarım fazı bir gözden geçirme kilometre taşı toplantısı ile sonlanır ve bir sonraki aşama olan kalifikasyon aşamasına geçilir.

4.4 FAZ D-Kalifikasyon Fazı

Bu aşamada detay tasarım fazının tamamlanması ile üretilen uydunun testlerle doğrulanması yapılmaktadır. Isıl mühendislerin bu aşamada aşağıdaki faaliyetleri yapması beklenmektedir:

- Isıl modellerin test konfigürasyonlarına uyarlanması
- Test ön görüleri için analizler yapılması
- Isıl vakum testlerine katılım sağlanması
- Test sonuçlarının doğrulanması
- Uçuş modeli ısıl modelinin testten gelen çıktılar doğrultusunda güncellenmesi [35]

5
ANALİTİK HESAPLAMALAR VE ISIL MODELLEMENİN TEMELLERİ

Tez çalışmasında ısıl modeli ve analizleri yapılacak olan yer sabit uydunun ısıl tasarımı için yapılacak ilk adım ön hesaplamalar ile uydunun verilen boyutlarda hangi sıcaklıklarda kalacağı hakkında fikir sahibi olmaktadır. Verilen gerekli bilgiler ışığında (ekipman ısı yayınımlar, ekipman çalışma sıcaklık aralıkları vb.) yapılan ilk hesaplamalar, büyük efor gerektiren bir ısıl modelleme ve simülasyon sirkülasyonu öncesi ısıl yeterlilik açısından önem taşımaktadır.

Bu bölümde ön hesaplamalar yapılarak uydunun ısıl yeterliliğinin nasıl kontrol edileceği anlatılmaktadır.

5.1 Uydu Enerji Dengesi

Uydunun bulunduğu uzay ortamında enerji dengesi eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}_{Gelen} + \dot{E}_{\text{Üretilen}} = \dot{E}_{Giden} + \dot{E}_{Depolanan} \tag{5.1}$$

Taşınım ısı geçişinin olmadığı uzay ortamında uydunun kazandığı ısı enerjisinin çok büyük bir kısmı güneş kaynaklıdır. Kaybettiği enerji ise ışınım ile derin uzaya bıraktığı ısı enerjidir. Dünya'nın etkisi de göz önünde bulundurulursa enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$(Mc)\frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{\text{Güneş}} + \dot{Q}_{Albedo} + \dot{Q}_{\text{Dünya_IR}} + \dot{Q}_{EY} - \dot{Q}_{Uydu \rightarrow Uzay} \tag{5.2}$$

Kararlı durumda uydunun ısıl dengesi; uyduya gelen ısı miktarı ve uydu içerisinde üretilen ısı miktarının toplamı ile uydunun uzaya bıraktığı ısı miktarı eşit olduğunda gerçekleşir. Bu durumda sıcaklık değişimi olmayacağından $(Mc)\frac{dT}{dt}$ terimi sıfıra eşit olur ve enerji dengesi aşağıdaki gibi bir hal alır [13]:

$$\dot{Q}_{Gelen} + \dot{Q}_{EY} = \dot{Q}_{Giden} \tag{5.3}$$

$$\dot{Q}_{Güneş} + \dot{Q}_{Albedo} + \dot{Q}_{Dünya_IR} + \dot{Q}_{EY} = \dot{Q}_{Uydu \rightarrow Uzay} \tag{5.4}$$

Bu denklemdeki terimlere baktığımızda:

$$\dot{Q}_{Güneş} = \alpha_{Solar}.A_{Uydu}.I_{Güneş} \tag{5.5}$$

$$\dot{Q}_{Albedo} = \alpha_{Solar}.A_{Uydu}.VF_{Dünya \rightarrow Uydu}.(0.34).I_{Güneş} \tag{5.6}$$

$$\dot{Q}_{Dünya_IR} = \alpha_{IR}.A_{Uydu}.VF_{Dünya \rightarrow Uydu}.I_{Dünya} \tag{5.7}$$

$$\dot{Q}_{Uydu \rightarrow Dünya} = \varepsilon_{IR}.A_{Uydu}.VF_{Dünya \rightarrow Uzay}.\sigma.(T_{Uydu}{}^4 - T_{Dünya}{}^4) \tag{5.8}$$

olarak ifade edilir. Bu eşitliklerde:

$\dot{Q}_{EY}$=Ekipman ısı yayınımları [W]

α_{Solar}= Ultraviyole soğurma katsayısı [-]

A_{Uydu}= Isı kazanan veya kaybeden yüzey alanı [m²]

$I_{Güneş}$=Güneşten gelen ısı akısı [W/m²]

VF=Görüş Faktörü [-]

$I_{Dünya}$=Dünya'dan gelen ısı akısı [W/m²]

α_{IR}=Kızıl ötesi dalga boyunda soğurma katsayısı [-]

ε_{IR}= Kızıl ötesi dalga boyunda yayınım katsayısı [-]

$\alpha_{IR} = \epsilon_{IR}$ (Aynı dalga boyunda oldukları için – Kirchhoff'un ışınım yasası)

σ= Stefan-Boltzmann Sabiti [W/m².K⁴]

Verilen bu enerji dengesi denklemi ile uydunun belirli bölgelerindeki radyatör alanlarının ekipman ısı yayınımlarını uzaklaştırmak için yeterli olup olmadığı hakkında bir ön fikir sahibi olabilir.

Tez çalışmasında üzerinde çalışılan uydu, bir yer sabit uydu (GEO) olduğu için bölüm 2.2.3'te de belirtildiği üzere Dünya ile etkileşimi Güneş ile olan

etkileşiminden çok çok düşüktür. Başka bir deyişle bir yer sabit yörünge uydusu Dünya'dan gelen albedo ve kızıl ötesi yayınımlarından ihmal edilebilecek derecede az etkilenir. Bu nedenle bu çalışmada yapılacak hesaplamalarda ihmal edilebilir. Bu durumda bir ön hesaplama için:

$$\dot{Q}_{Güneş} + \dot{Q}_{EY} = \dot{Q}_{Uydu \rightarrow Uzay} \tag{5.9}$$

$$\alpha_{Solar}.A_{Uydu}.I_{Güneş} + \dot{Q}_{EY} = \varepsilon_{IR}.A_{Uydu}.VF_{Uydu \rightarrow Uzay}.\sigma.(T_{Uydu}{}^4 - T_{Uzay}{}^4) \tag{5.10}$$

ifadesi kullanılabilir.

5.2 Malzeme ve Yüzey Özelliği Tanımlamaları

Uyduların dış yüzeyleri uzay ortamı ile temas halindedir ve uzaydan gelen ısıl yüklere maruz kalırlar. Ayrıca uydu ekipmanlarında üretilen fazla ısı enerjisi bu yüzeylerden dışarı atılırlar. Uzay ortamı ile ışınım yolu ile olarak doğrudan etkilenen uydu dış yüzeylerinin ısıl-optik özellikleri önem arz etmektedir. Bir önceki bölümde verilen enerji dengesi ifadesinde görüldüğü α_{Solar} (Ultraviyole Soğurma oranı) ve ϵ_{IR} (Kızıl ötesi yayınım katsayısı) denklemin iki tarafında da doğrudan etkilidir. Bu sebepten dolayı istenilen sıcaklık limitlerinde enerji dengesini sağlamak için malzeme özellikleri bu doğrultuda seçilmelidir. Çeşitli malzemelerin fiziksel ve yüzey özellikleri bölüm 4'te detaylı bir şekilde verilecektir.

Uydu yapısalları genel olarak (fırlatma maliyetlerini göz önünde bulundurarak) dayanımı yüksek ve hafif malzemelerden oluşur. Uydu panellerinde genel olarak Alüminyum alaşımlar kullanılır. Uydu kütlesini taşıyacak Alüminyum bloklar çok ağır olacağı için panel yapıları genel olarak sandviç şeklindedir ve iki Alüminyum plaka arası bal peteği yapısı ile bağlanmıştır. Bazı panellerde yükleri karşılamak için karbon fiber tabanlı malzemeler kullanılır. Alüminyum plakaların ısı iletim katsayısı ısıl kontrol alt sistemine yardımcı olacak kadar iyiyken karbon fiber malzemeler daha kötü ısı iletim katsayılarına sahiptir.

5.3 Sıcaklık Dengesi

Bu bölümde sürekli rejim halinde sıcak dengesi ile ilgili hesaplamalar verilmiştir. Enerji dengesi denkleminden yer sabit uydu için yüzey sıcaklığını çekersek:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\alpha_{Solar}.A_P.I_{Güneş} + \dot{Q}_{EY}}{\varepsilon_{IR}.A_P.\sigma.VF_{Uydu \rightarrow Uzay}} + T_{Uzay}{}^4} \tag{5.11}$$

Uydu görev halinde ekipmanlar nominal ısı yayınımları ürettiği sürece bu denklemi radyatör ve ısıtıcı boyutlandırmaları veya radyatörlerin ısı atım kabiliyetlerinin kontrolü için kullanabiliriz. Bu tez çalışmasında çalışılan konsept yer sabit uydu için görev yükü panellerinin boyutlarının uygun radyatör alanına sahip olup olmadığını kontrol etmek için kullanılacaktır.

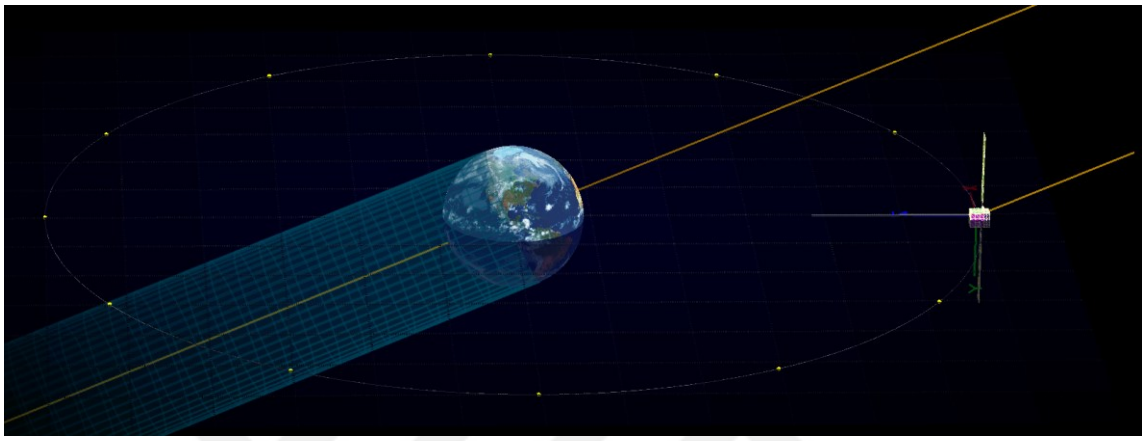
Uydu ısıl kontrolünün ana amacı: uydunun bilinen ve kabul edilen çevre şartlarında ekipmanların sıcaklık limitlerinde kalması sağlamaktır. Bu doğrultuda yapılan hesaplama ve analizlerin amacı radyatör, ekipman vb. sıcaklık bilgilerini elde etmektir. İlk olarak bilinmesi gerekenler ekipmanların çalışma sıcaklık limitleri ve ürettikleri ısı miktarlarıdır.

Ekipmanların alt ve üst sıcaklık limitleri göz önünde bulundurularak yörüngede görev sırasında oluşabilecek en kötü sıcak ve en kötü soğuk duruma göre radyatör ve ısıtıcı boyutlandırılması yapılmalıdır.

5.3.1 En Kötü Sıcak Durum

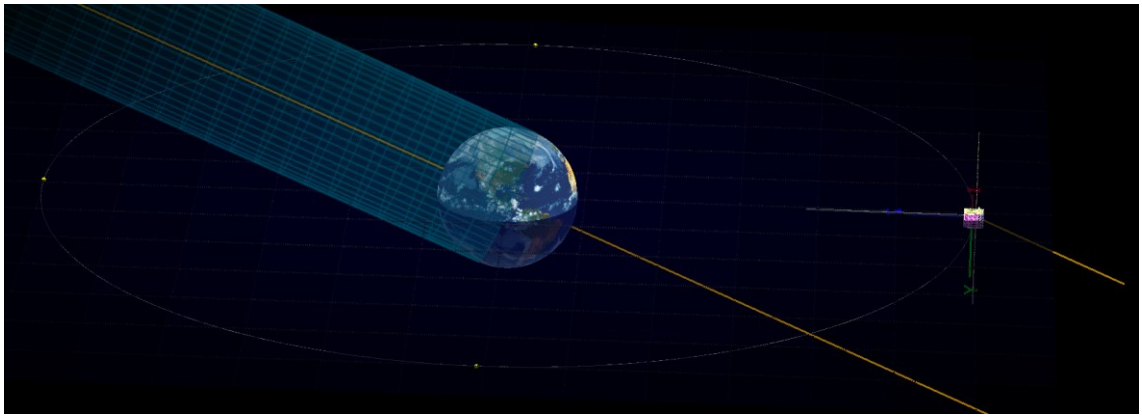
Yer sabit uydular nominal görevleri sırasında ekvatoral düzlemde dünya ile aynı hızla döndüğünden dolayı Dünya'da gerçekleşen mevsimsel etkiler uydu üzerinde de benzer olarak gerçekleşir. Örneğin haziran, temmuz ve ağustos aylarında Güneş ışınları kuzey yarım küreye dik gelirken yaz mevsimi yaşanır. Benzer şekilde uydunun da kuzey panelleri maksimum oranda güneş ısı akısına maruz kalır. Bu aylarda güney yarım kürede ise kış mevsimi yaşanır. Yine benzer şekilde bu aylarda uydunun güney paneline güneş ışınları düşmez ve güney panel görece daha soğuktur.

Kuzey paneller için nominal bir çalışma durumunda en kötü sıcak durum yaz gündönümü 21 Haziran'dır. Yılın bu tarihinde Dünya'nın Kuzey yarım küresine maksimum güneş ısı akısı gelirken uydunun kuzey panelleri de maksimum oranda güneşe maruz kalırlar. Bu nedenle kuzey panellerinin ısıl yeterliliği 21 Haziran düşünülerek kontrol edilir. 21 Haziran gün dönümü yörünge üzerindeki gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir. Güneş'in geliş açısı turuncu vektör ile gösterilmiştir.



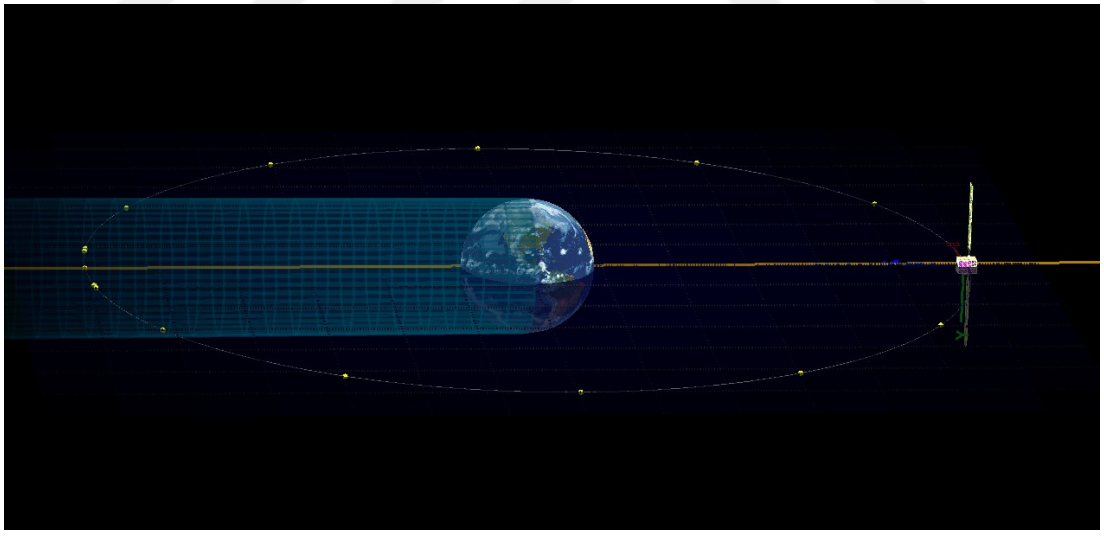
Şekil 5.1 21 Haziran gün dönümü

Güney paneller için ise nominal bir çalışma durumunda en kötü sıcak durum kış gündönümü 21 Aralık'tır. Yılın bu tarihinde Dünya'nın Güney yarım küresine maksimum güneş ısı akısı gelirken uydunun Güney panelleri de maksimum oranda güneşe maruz kalırlar. Bu nedenle Güney panellerinin ısıl yeterliliği 21 Aralık düşünülerek kontrol edilir. 21 Aralık gün dönümü yörünge üzerindeki gösterimi Şekil 5.2'de verilmiştir. Güneş'in geliş açısı turuncu vektör ile gösterilmiştir.

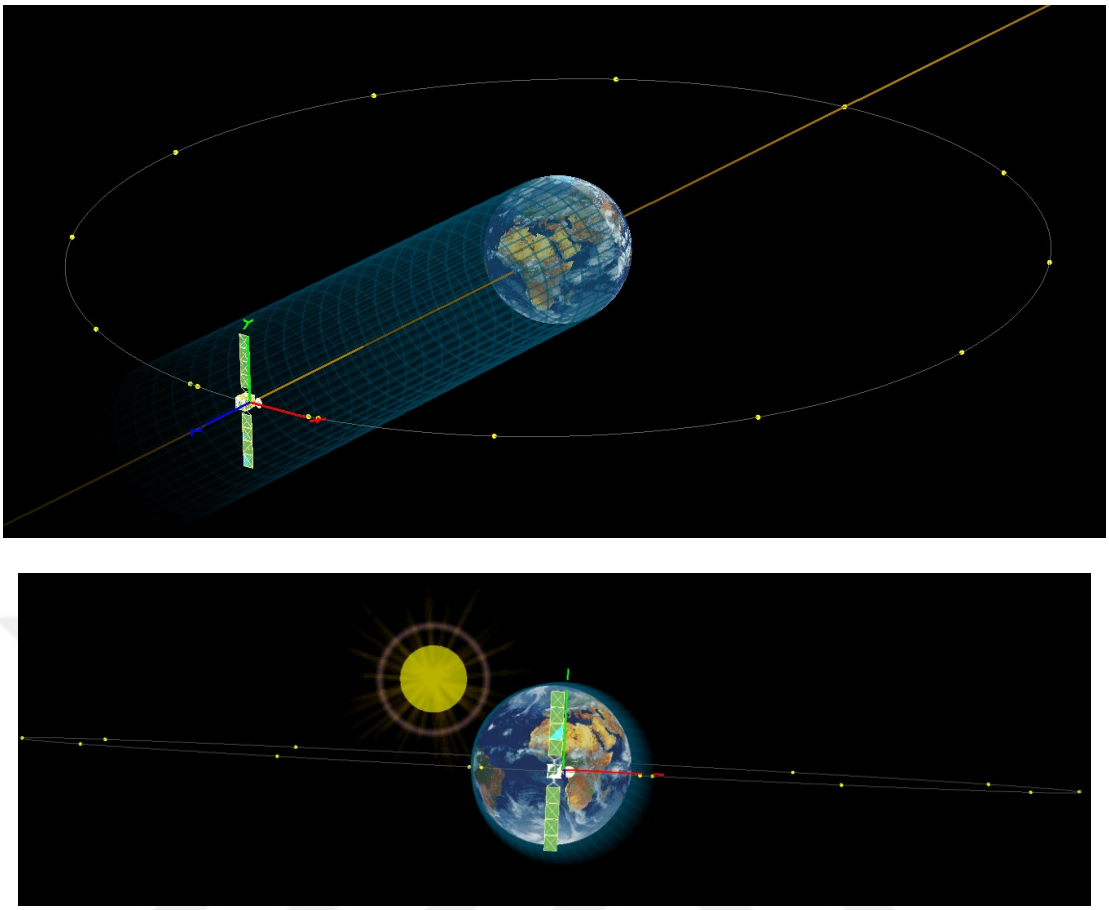


Şekil 5.2 21 Aralık gün dönümü

Radyatörleri kuzey veya güney yönde yerleştirilen pil gibi özel ekipmanlar için ise istisnai durumlar söz konusudur. Uydu pilleri, nominal görev sırasından uydu güneş panelleri güneşi gördüğü ve güneş enerjisinden güç ürettiği müddetçe çalışmazlar ve bekleme konumunda hazır beklerler. Hassas ısıl kontrol gerektiren pillerin yüksek ısı yayınımına sahip olduğu zaman dilimi uydunun tutulma evresidir. Bu evrede güneş panelleri güç üretemezken piller devreye girer ve uydunun görevinin devamı için güç sağlarlar. Bu süre zarfında pillerin ısı yayınımı maksimuma ulaşır ve fazla ısının derin uzaya atılması gerekir. Bu nedenle pil panelleri için en sıcak durum ekinoks tarihlerinde meydana gelen maksimum tutulma zaman periyodudur. Tutulma, Dünya üzerinde gece gündüz eşitliği yaşanan ekinoks gün dönümlerine yakın zamanlarda yaşanır. Maksimum tutulma 72 dakika sürer ve bu olay 21 Mart/23 Eylül tarihlerinde gerçekleşir. Bu zaman aralığında yüksek ısı yayınımı yaptıklarından dolayı piller için en kötü sıcak durum bu periyotta gerçekleşir. Ekinoks gündönümü ve tutulma ile ilgili yörünge görselleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir. Güneş'in geliş açısı turuncu vektör ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Ekinoks gün dönümü



Şekil 5.4 Ekinoks gün dönümünde tutulma evresi

Kuzey ve güney paneller ısıl yeterlilikleri düşünülürken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta ise mevsimsel Güneş ısı akısı farkıdır. Kuzey yarım kürede yaşadığımızdan dolayı genel olarak dünyanın yaz aylarında daha fazla güneşe maruz kaldığını düşünürüz. Fakat gerçekte kış gün dönümünde (21 Aralık) dünyaya yaz mevsiminden daha fazla güneş ısı akısı ulaşır. Çünkü Dünya'nın yörüngesi tam olarak bir çember değildir ve elips şeklindedir. 21 Aralık'ta Dünya kendi yörüngesinde Güneş'e en yakın noktadan geçer. Bu da 21 Aralık'ta Dünya'ya maksimum güneş akısı gelmesine neden olur. (21 Aralık'ta Güneş akısı: 1414 W/m^2 ve 21 Haziran'da Güneş akısı: 1323 W/m^2'dir.)

Burada ısıl kontrol açısından dikkat edilmesi gereken nokta şudur: eğer aynı ısı yükü ve aynı boyutta radyatör alanına sahip paneller kuzey ve güney yönlerinde yer alıyorsa güney panelin 21 Aralık gün dönümündeki durumu en kötü senaryo olacaktır. Eşitlik 5.10 kullanılarak radyatör yüzeyi sıcaklığı hesaplanabilir.

5.3.2 En Kötü Soğuk Durum

Uyduda görev yapan ekipmanların en düşük sıcaklık limitlerinin altına düşmemesi için ısıtıcılar kullanılabilir. Isıtıcı güçlerinin belirlenmesi için en soğuk durumlar düşünülmeli ve hesaplamalarda göz önünde bulundurulmalıdır. Yine burada mevsimsel benzetmeyi düşünerek çıkarımda bulunacak olursak 21 Haziran'da güney panellere; 21 Aralık'ta ise kuzey panellere güneş akısı düşmez. Bu tarihlerin sırasıyla güney ve kuzey panel için soğuk durum olduğunu düşünebiliriz. Fakat burada dikkat edilmesi gereken nokta ise ekipmanların çalışma durumlarıdır. Eğer bu tarihlerde ekipmanlar nominal görevini sürdürüyorsa üzerinde bulundukları panellere ısı atarak bu panellerin sıcaklıklarını yükseltecektir. Fakat eğer ekipmanların çalışmadığı bir acil durum senaryosu gerçekleşirse güneş akısına maruz kalmayan paneller soğumaya başlayacaktır. Bu durumda yine bir soğuk durum gerçekleşir fakat 21 Haziran ve 21 Aralık'ta sırasıyla kuzey ve güney panellere güneş akısı geldiğinden dolayı en soğuk durum değildir. Bu paneller için en soğuk durum 21 Mart ve 23 Eylül tarihlerinde gerçekleşen ekinoks gündönümlerinde ortaya çıkar. Çünkü bu tarihlerde güneş akısı kuzey panellere de güney panellere de düşmez. Dolayısıyla bu tarihlerde gerçekleşecek bir acil durum senaryosu en soğuk durum olacaktır. Yine de farklı panellerde ekipmanların çalışma durumları kontrol edilerek en soğuk durum seçilmelidir. Örneğin acil durum senaryolarında çalışan ve uydunun nominal çalışma periyotlarında çalışmayan ekipmanlar ile dolu bir panel için ekinoks tarihlerinde gerçekleşen bir acil durum en soğuk durum olmayabilir.

En soğuk durum seçildiğinde ısıtıcı gücü enerji dengesinden:

$$\dot{Q}_{Isıtıcı} + \dot{Q}_{EY} = \dot{Q}_{Uydu \rightarrow Uzay} \tag{5.12}$$

$$\dot{Q}_{Isıtıcı} = \varepsilon_{IR} . A_{Uydu} . VF_{Uydu \rightarrow Uzay} . \sigma . \left({T_{Uydu}}^4 - {T_{Uzay}}^4 \right) - \dot{Q}_{EY} \tag{5.13}$$

olarak hesaplanır ve radyatör yüzey sıcaklığı:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\dot{Q}_{Isıtıcı} + \dot{Q}_{EY}}{\varepsilon_{IR}.A_P.\sigma.VF_{Uydu \rightarrow Uzay}} + T_{Uzay}{}^4} \quad (5.14)$$

olur. Bu denklem ile ısıtıcı güçlerinin, ekipmanları alt sıcaklık limitlerinin altına düşmesini engellemek için yeterli olup olmadığı hakkında bir öngörü elde edilebilir. Fakat ısıtıcıların seçimi, ısıtıcı hatlarının yerleşimi, kontrol sıcaklıklarının belirlenmesi gibi prosesler, detaylı analizler ve testler gerektiren oldukça karmaşık işler bütünüdür.

5.4 Geometrik ve Isıl Matematiksel Modelleme

Analitik metotlarla basit geometriler için kesin çözümler bulunabilmektedir. Fakat gerçek hayatta karşılaşılan problemler genellikle basit geometrilere sahip değildirler ve analitik yöntemlerle bu problemleri çözmek oldukça zordur. Burada mühendislerin yardımına problemin çözümü basitleştirerek kesin çözüme yakın sonuçlar verebilen sayısal yöntemler koşmaktadır.

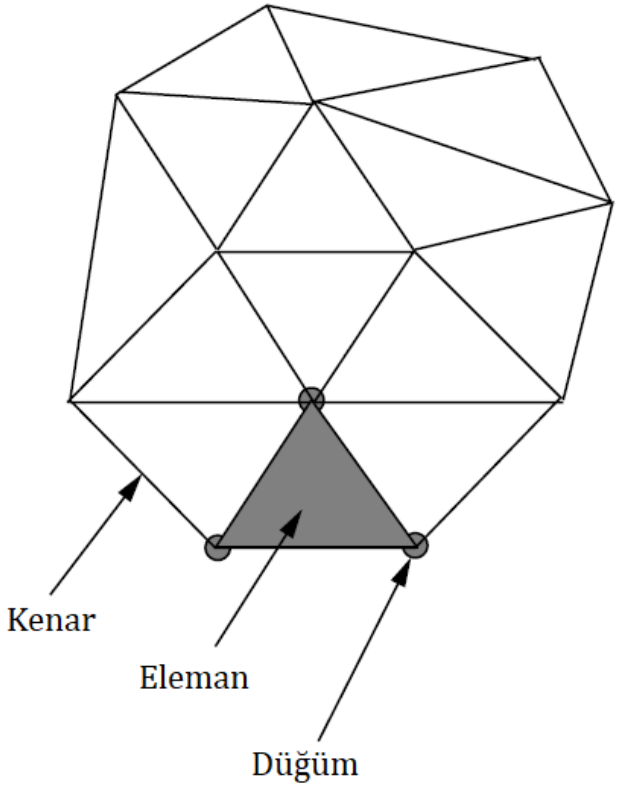
Yıllar geçtikçe birçok sayısal yöntem geliştirilse de en sık kullanılan teknikler; sonlu farklar, sonlu hacimler ve sonlu elemanlar metotlarıdır.

Sonlu farklar, konsept olarak daha basit ve noktasal yaklaşımlar ile yöneten denklemleri çözmeye yarayan yöntemdir [32]. Uzaya aracı ısıl tasarımlarında kullanılan ve sonlu farklar metodu yaklaşımına dayanan en yaygın paket yazılımlardan bazıları SYSTEMA/THERMICA, ESATAN-TMS ve THERMAL DESKTOP'tır.

5.4.1 Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method)

Sonlu elemanlar yöntemi geniş kapsamlı mühendislik problemlerinde kullanılan ve çözüm için yaklaşık sonuçlar veren bir sayısal araçtır. Bu yöntemde de sonlu farklar metodunda benzer şekilde problemin eleman adı verilen temsili geometrilere bölünmesiyle başlar. Elemanlar üçgen, dikdörtgen gibi farklı şekillerde olabilir. Burada sonlu farklar metodundan farklı olarak elemanların düğümleri köşelerinde yer almaktadır ve eleman bu düğümlerle birbirlerine

bağlıdırlar. Şekil 5.5'te bir ağ yapısı üzerinde eleman, düğüm ve eleman kenarları gösterilmiştir [32].



Şekil 5.5 Eleman, düğüm ve eleman kenarlarını içeren ağ yapısı örneği [32]

Sonraki adımda eleman üzerinde dağılımı hesaplamak için interpolasyon fonksiyonu seçilmektedir. Düğüm sayısı bir elemanı şekillendirir. Her düğümdeki bilinmeyenlerin sayısı ve özellikleri elemanlar içindeki değişkenlerin tesir ettikleri alanları belirlemektedir.

Üçüncü adımda formülasyon aşamasına geçilmektedir. Bu adımda elemanların özelliklerini içeren matris eşitlikleri yazılmalıdır. Tipik bir matris eşitliği ve yük vektörü aşağıda verilmiştir:

$$[K]_e = \frac{Ak}{l}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

$$\{f\}_e = \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{Bmatrix} \tag{5.16}$$

Eşitliklerde e bir elemanı; Q toplam ısı geçişini, k ısı iletim katsayısını, l bir boyutlu bir elemanın uzunluğunu, i ve j elemanı şekillendiren düğümleri göstermektedir. Düğümler üzerinde bilinmeyen değişken sıcaklıktır.

Dördüncü adımda sistemin bütünde eş zamanlı çalışacak eşitliklerin bulunması için elemanların eşitlikleri hazırlanmaktadır. Problemin belirli bir bölgesindeki çözüm ağının bir bütün olarak davranması için tüm elemanların matris eşitliklerinin uygun bir yöntemle birleşimi yapılmalıdır. Bütün elemanların birleşimi yapıldıktan sonra sınır koşulları tanımlanmalıdır. Global matris eşitliği aşağıdaki gibi yazılır:

$$[K]\{T\} = \{f\} \tag{5.17}$$

$[K]=$ Global sol taraf matrisi

$\{f\}=$Global yük matrisi

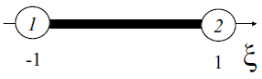
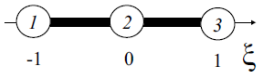
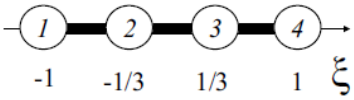
$\{T\}=$Global bilinmeyenler matrisi

Bu adımdan sonra sistem eşitliklerin çözümü yapılmaktadır. Örneğin yukarıdaki eşitlikte bilinmeyenlerin düğümsel değerleri bulunabilir. Bu örneğin sıcaklık verisi olabilir.

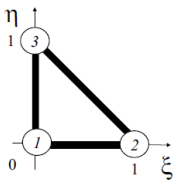
Son olarak ikincil veriler hesaplanmaktadır. Örneğin sıcaklık verilerinden uzaydan gelen ısı akıları hesaplanabilmektedir [32].

En sık kullanılan 1 ve 2 boyutlu elemanların şekilleri ve interpolasyon fonksiyonları sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de verilmiştir. ξ ve η referans elemanların koordinat sistemindeki eksenleri göstermektedir. $\xi = x$ ve $\eta = y$ eksenine eşdeğerdir [33].

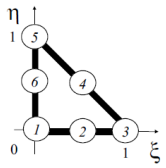
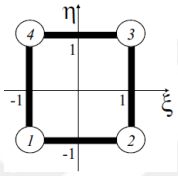
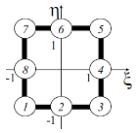
Tablo 5.1 Sık kullanılan 1D elemanların şekilleri ve interpolasyon fonksiyonları

Tip	Geometri	İnterpolasyon Fonksiyonu
2 Düğümlü Lineer Eleman		$N_1(\xi) = \frac{1-\xi}{2}$ $N_2(\xi) = \frac{1+\xi}{2}$
3 Düğümlü 2. Dereceden Eleman		$N_1(\xi) = \frac{1}{2}\xi(\xi-1)$ $N_2(\xi) = 1-\xi^2$ $N_3(\xi) = \frac{1}{2}\xi(\xi+1)$
4 Düğümlü Kübik Eleman		$N_1(\xi) = \frac{9}{16}(\xi-1)\left(\frac{1}{9}-\xi^2\right)$ $N_2(\xi) = \frac{27}{16}(\xi^2-1)\left(\xi-\frac{1}{3}\right)$ $N_3(\xi) = \frac{27}{16}(1-\xi^2)\left(\xi+\frac{1}{3}\right)$ $N_4(\xi) = \frac{9}{16}(\xi+1)\left(\xi^2-\frac{1}{9}\right)$

Tablo 5.2 Sık kullanılan 2D elemanların şekilleri ve interpolasyon fonksiyonları

Tip	Geometri	İnterpolasyon Fonksiyonu
3 Düğümlü Lineer Eleman (Üçgen)		$N_1(\xi,\eta) = 1-\xi-\eta$ $N_2(\xi,\eta) = \xi$ $N_3(\xi,\eta) = \eta$

Tablo 5.2 Sık kullanılan 2D elemanların şekilleri ve interpolasyon fonksiyonları (devamı)

6 Düğümlü 2. Dereceden Eleman (Üçgen)		$N_1(\xi,\eta) = -\alpha(1-2\alpha)$ $N_2(\xi,\eta) = 4\xi\alpha$ $N_3(\xi,\eta) = -\xi(1-2\xi)$ $N_4(\xi,\eta) = 4\xi\eta$ $N_5(\xi,\eta) = -\eta(1-2\eta)$ $N_6(\xi,\eta) = 4\eta\alpha$ (with $\alpha = 1-\xi-\eta$)
4 Düğümlü Lineer Eleman (Dörtgen)		$N_1(\xi,\eta) = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)$ $N_2(\xi,\eta) = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)$ $N_3(\xi,\eta) = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)$ $N_4(\xi,\eta) = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)$
8 Düğümlü 2. Dereceden Eleman (Dörtgen)		$N_1(\xi,\eta) = -\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(1+\xi+\eta)$ $N_2(\xi,\eta) = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta)$ $N_3(\xi,\eta) = -\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(1-\xi+\eta)$ $N_4(\xi,\eta) = \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2)$ $N_5(\xi,\eta) = -\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(1-\xi-\eta)$ $N_6(\xi,\eta) = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta)$ $N_7(\xi,\eta) = -\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(1+\xi-\eta)$ $N_8(\xi,\eta) = \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2)$

Bu tez çalışmasında ısı boruları içindeki akış düğümü için 1 boyutlu lineer; geriye kalan parçalar (yapısal paneller, ekipmanlar, vb.) için 2 boyutlu lineer dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Bazı ekipman modellerinin iç kısımlarında geometrisi olmayan 0D (Sıfır boyutlu) elemanlar da bulunmaktadır.

6
YER SABİT UYDUNUN ISIL MATEMATİKSEL MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Yer sabit uydular genellikle haberleşme amaçlı kullanılırlar. Bu görevi yerine getiren ekipmanlar genellikle yüksek ısı yayınımı yaparlar ve çalışma sıcaklık aralıklarında kalabilmeleri için ısıl kontrol gereklidir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi bu tür yüksek ısı yayınımına sahip ekipmanlar uydunun görev yükü dediğimiz, kuzey ve güneyde yer alan panellere yerleştirilirler. Bu nedenle bu panellerin ısıl kontrol tasarımları oldukça kritik önem taşımaktadır. Panel üzerinde yer alan ekipmanların fazla ısı yüklerini panele homojen olarak yaymak ve bir radyatör yüzeyinden uzaya göndermek temel amaçlardandır. Ayrıca uzaydan gelen ısı yüklerinden de (büyük oranda güneş enerjisi) minimum oranda etkilenmek amaçlanmaktadır. Bu yaklaşımları gerçekleştirmek için ısıl kontrol ekipmanları kullanılır. Isıyı homojen olarak panele yaymak için ısı boruları; ısıyı uzaklaştırmak ve güneş ışınlarını geri yansıtmak için OSR (Optik Solar Reflektör) gibi ısıl kontrol donanımları kullanılır.

Bu bölümde tanımlanan konsept uydu tasarımında görev yükü panellerinin ısıl yeterliliği aşağıdaki adımlar izlenerek kontrol edilecektir:

- El hesaplaması ile uydu görev yükü panellerinin ısıl yeterliliğinin kontrol edilmesi
- Panel radyatör alanlarının yeterli olduğunun ön görülmesi durumda, panellerin ısıl geometrik ve matematiksel modellerinin oluşturulması
- Ekipmanların indirgenmiş ısıl geometrik ve matematiksel modellerinin oluşturulması ve ana modele eklenmesi
- Yörünge analizleri için simülasyon modelinin oluşturulması

6.1 Uydu Görev Yükü Tanımlaması ve El Hesabı ile Isı Atım Kabiliyeti Kontrolü

Tez çalışmasında ısıl kontrol tasarımı yapılacak olan uydu bir konsept haberleşme uydusudur. Görev yükü panelinin boyutları 2 m x 1.85 m olarak belirlenmiştir. Görev yükünde kritik ekipmanlardan TWT, ONET, EPC, PIU ve HPI'lar konumlandırılmıştır. Ekipmanlar ile ilgili olarak yaklaşık ısı yayınım bilgilerine Tablo 6.1'de ve çalışma sıcaklık limitlerine Tablo 6.2'te yer verilmiştir.

Tablo 6.1 Ekipmanların yaklaşık ısı yayınımları

Ekipman	Ekipman Isı Yayınımı [W]	Çalışan Ekipman Sayısı (Güney Panel için)	Toplam Isı Yayınımı [W]
TWT	30	8	240
HPI	4	8	32
ONET	18	8	144
RF Kayıpları	21	8.4	176.4
Dual EPC	32	4	128
PIU	30.6	1	30.6
Yüksek Güç Kabloları	44.2	1	44.2
Güneş Paneli Sürüş Mekanizması	20	1	20
TOPLAM			815.2

Tablo 6.2 Ekipmanların çalışma sıcaklık limitleri

Ekipman	ON Durumunda Min. Sıcaklık [°C]	ON Durumunda Maks. Sıcaklık [°C]	OFF Durumunda Min. Sıcaklık [°C]	OFF Durumunda Maks. Sıcaklık [°C]
TWT	2.5	70	-25	80
HPI	2.5	70	-25	80
ONET	-7.5	60	-25	70
Dual EPC	-7.5	55	-20	65
PIU	-7.5	60	-20	70

Tabloda verilen değerler analizde görülmesi gereken hedef sıcaklık değerleridir. İzin verilen uçuş sıcaklık üst limitinden 5 °C çıkarılarak alt limitine 2.5 °C eklenerek hesaplanmıştır. Bu değerler Bölüm 4.2.1'de belirtilen belirsizlik marjlarıdır.

Elimizde bilgileri bulunan güney görev yükü panelinin ısı atım kabiliyetini bazı varsayımlar yaparak hesaplayalım. Daha önce belirtildiği gibi yer sabit uydular için albedo ve Dünya'nın kızıl ötesi yayınımı ihmal edilirse enerji dengesi ifadesi aşağıdaki gibi olur:

$$\dot{Q}_{Güneş} + \dot{Q}_{EY} = \dot{Q}_{Rad \rightarrow Uzay} \tag{6.1}$$

$$\alpha_{Solar}.A_{Rad}.I_{Güneş} + \dot{Q}_{EY} = \varepsilon_{IR}.A_{Rad}.VF_{Rad \rightarrow Uzay}.\sigma.(T_{Rad}{}^4 - T_{Uzay}{}^4) \tag{6.2}$$

$\dot{Q}_{EY}$=815.2 W

α_{Solar}=0.25

A_{Rad}=2.8 m² (%20 Radyatör Marjı, %10 Yapısal Marj düşülmüştür.)

$I_{Güneş} = 1414\,[W/m^2] \cdot \sin(23.4) = 561.6\,W/m^2$

$\varepsilon_{IR} = 0.78$

$VF_{Uydu \rightarrow Uzay} = 0.94$

$\alpha_{Solar} . A_{Rad} . I_{Güneş} = 154.78$ W (Kış Gün Dönümü + Güneş panellerinden yansıyan)

Bu eşitlikle panel radyatör alanının sıcaklık limitleri verilen ekipmanlar için yeterli olup olmadığı hakkında bilgi sahibi olmayı hedeflemekteyiz. Bunun için T_{Rad} radyatör yüzeyi sıcaklığının kontrol edeceğiz.

Tablo 6.2'te sıcak durum için en düşük sıcaklık limitine sahip olan EPC ekipmanı panel radyatör sıcaklığı için belirleyici olacaktır. İzin verilen EPC sıcaklığının maksimum 55 °C olduğu düşünülürse panel radyatör sıcaklığı bu değerden düşük olmalıdır. Panel bal peteği yapısı düşünülürse ekipman ile radyatör yüzeyi arasında 5 °C bir fark olacağı kabulü yapılmıştır. Bu kabul ile ortalama radyatör sıcaklığının maksimum $T = 55\text{-}5 = 50$ °C olabileceği varsayılmıştır.

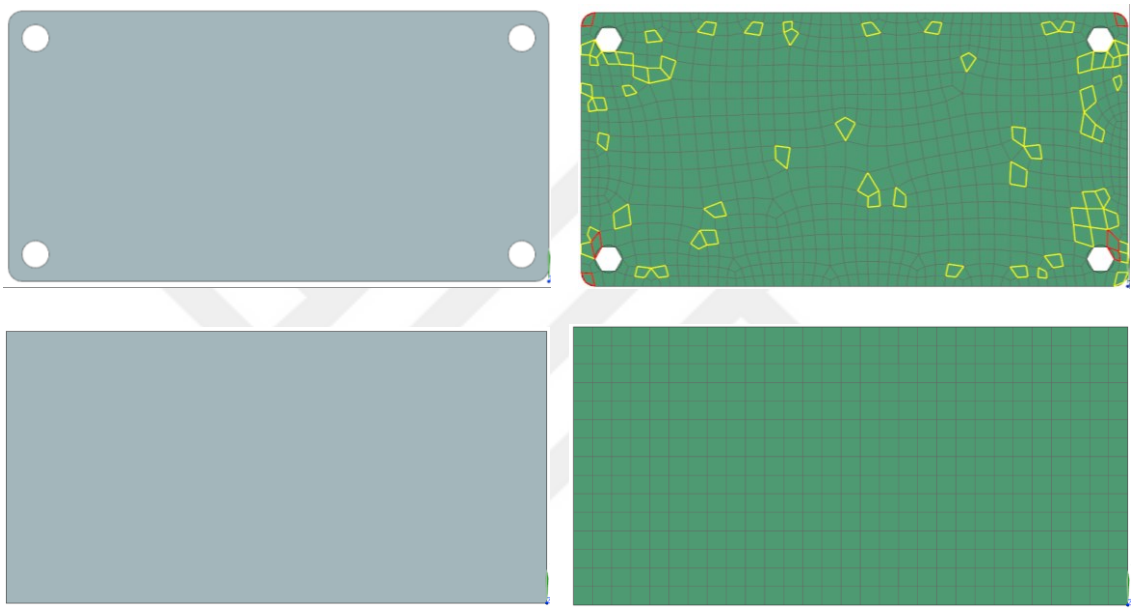
Eldeki bilgiler eşitlikte yerine konulursa $T_{Rad} = 48.0$ °C olarak bulunur. Bu hesapla güney panelin radyatör alanının ekipmanları sıcaklık limitlerinde tutacak kadar ısıyı atmak için yeterli olduğu ön görülmüştür.

(Not: Kuzey Panelin yaklaşık aynı miktarda ısı yayınımı sahip olması ve kış gün dönümünde uyduya gelen güneş akısı daha fazla olduğundan dolayı Güney Panelin yeterliliği kontrol edilmiştir.)

6.2 Basitleştirilmiş CAD Model

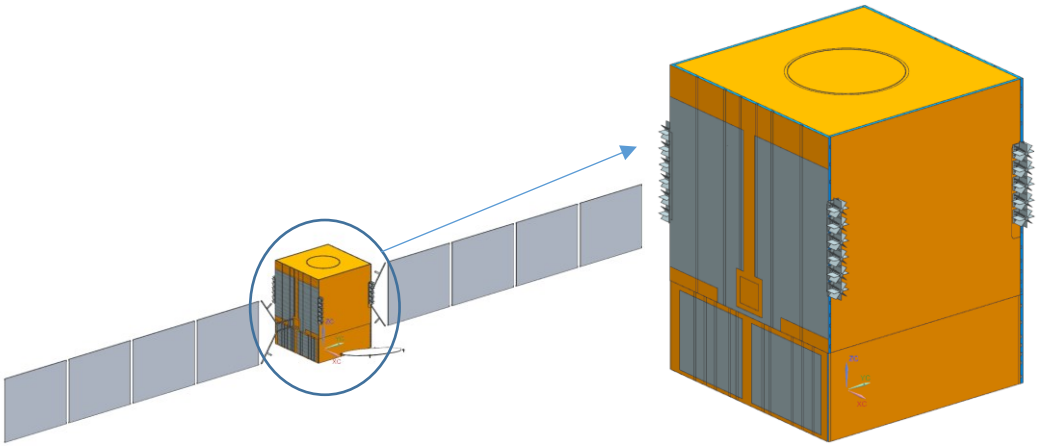
Panel ısı atım kabiliyetinin basit el hesabı ile kontrolü sonrası ısıl modelleme aşamasına geçilmiştir. Isıl modellemenin ilk adımı olarak uydu CAD modelinin basitleştirilmesi işlemi yapılmıştır. Bu işlemin amacı ağ yapısı oluşturulacak sonlu elemanlar modellerinde ağ kalitesi kriterlerine uygun elemanlar oluşturabilmektir. Basitleştirme işlemlerinde yüzeyler üzerindeki küçük oval yapılar, delikler vb. yok edilir ve mümkün olduğunca basit geometrilerle (dikdörtgen, üçgen) model hazırlanır. Bu basitleştirme işlemi hesaplamaların doğruluğu ve hesaplama sürelerinin uzunluğu açısından önemlidir. Şekil 6.1'de

gerçek CAD model ile basitleştirilmiş CAD modellerin üzerinde oluşturulan ağ yapılarının bir karşılaştırılması verilmiştir. Gerçek CAD model ağ yapısı üzerinde görülen sarı ve kırmızı elemanlar ağ kalitesi kriterlerine göre sırasıyla uyarı limitinde ve hatalı olarak nitelendirilmektedir. Buna göre bu ağ yapısı üzerinde yapılacak simülasyonlarda yerel olarak hatalı sonuçların çıkabileceği anlaşılmaktadır. Öte yandan gerçek modelin, basitleştirilmiş ağ yapısı modeline kıyasla daha fazla eleman sayısına sahip olduğu görülmektedir. Bu da radyasyon ve iletim hesaplamalarının daha uzun süreceğini anlamına gelmektedir.



Şekil 6.1 Gerçek CAD model ile basitleştirilmiş CAD model üzerindeki ağ yapılarının karşılaştırılması

Yukarıda verilen basitleştirme işlemi oluşturulan uydu CAD modeli üzerinde uygulanmış ve mümkün olduğunca daha az karmaşık bir model elde edilmeye çalışılmıştır. Basitleştirilmiş uydu CAD modelinin bir görüntüsü Şekil 6.2'de verilmiştir. Bu basitleştirme işlemi ekipman modellemeleri sırasında da ekipman indirgenmiş ısıl matematiksel model dokümanlarında belirtilen şekilde yapılmıştır.



Şekil 6.2 Uydu basitleştirilmiş CAD modeli

6.3 Uydu Global Sonlu Elemanlar Modelleri

Uydu geometrik matematiksel modelleme (GMM) çalışmaları NX Space Systems Thermal yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılımda sonlu elemanlar metoduna dayalı modelleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu nedenle çalışmada oluşturulan bütün modeller sonlu elemanlar metoduna dayalı modellerdir.

Bu çalışmadaki geometrik matematiksel modellemelerde 0, 1 ve 2 boyutlu elemanlar kullanılmıştır. Panel ve ekipman yüzeyleri için 2 boyutlu ağ yapısı kullanılmış ve kalınlık bilgisi girilerek gerçek yapısının simülasyonu yapılmıştır. Isı borularının iç akış modellemesi için 1 boyutlu akış düğümleri oluşturulmuş ve tedarikçi firmanın sağlamış olduğu özellikler bu düğüme tanımlanmıştır. Isı borusu yüzeyleri 2 boyutlu olarak modellenmiştir. Son olarak bazı ekipmanların indirgenmiş ısıl matematiksel model dokümanlarında belirtilen bazı düğümler için 0 boyutlu elemanlar oluşturulmuş ve bu elemanlara sadece ısıl kapasitans bilgisi tanımlanmıştır.

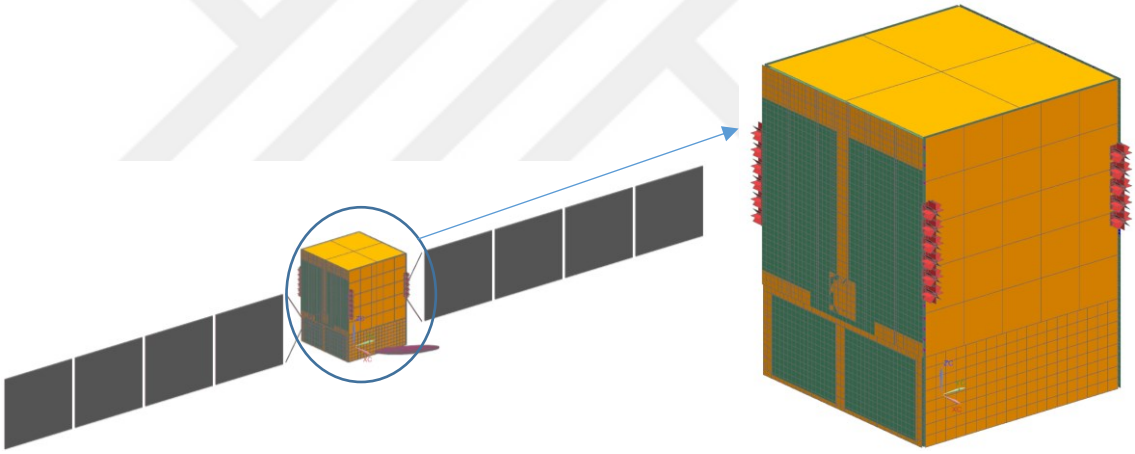
Sonlu elemanlar modeli için malzeme özellikleri GMM oluşturma aşamasında ilgili elemanlara tanımlanmaktadır. Uydu global modelinde kullanılan malzemelerinin özellikleri Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3 Uydu global modelinde kullanılan malzemelerinin özellikleri

	Malzeme	Isıl İletim Katsayısı [W/m.K]	Öz Isı [J/kg.K]	Yoğunluk (kg/m³)
Yapısal* Paneller	Al 2024	157	870	2770
Isı Boruları*	Al 6063	201	900	2690
Bal Peteği	Al 5056	108	904	50

*Değerler ASM Handbook kitabının Alüminyum alaşımları ile ilgili kısmından alınmıştır [37].

Uydu geometrik matematiksel modelinin bir görseli Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3 Uydu geometrik matematiksel modeli

Bu bölümde oluşturulan uydunun global sonlu elemanlar modelleri basitten karmaşığa doğru sıralanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde en karmaşık yapıya sahip paneller olan olan görev yükü panellerinin özelliklerini içeren bilgiler Tablo 6.4'te verilmiştir. Tablodaki kıyaslama görev yükü panel yüzeylerinde elaman boyutları ve sayıları üzerinden yapılmıştır. Görev yükü panelinin ısıl matematiksel modelinin prosedürü takip edilerek ve/veya tedarikçilerden gelen modeler birleştirilerek uydu global matematiksel modeli oluşturulmuştur.

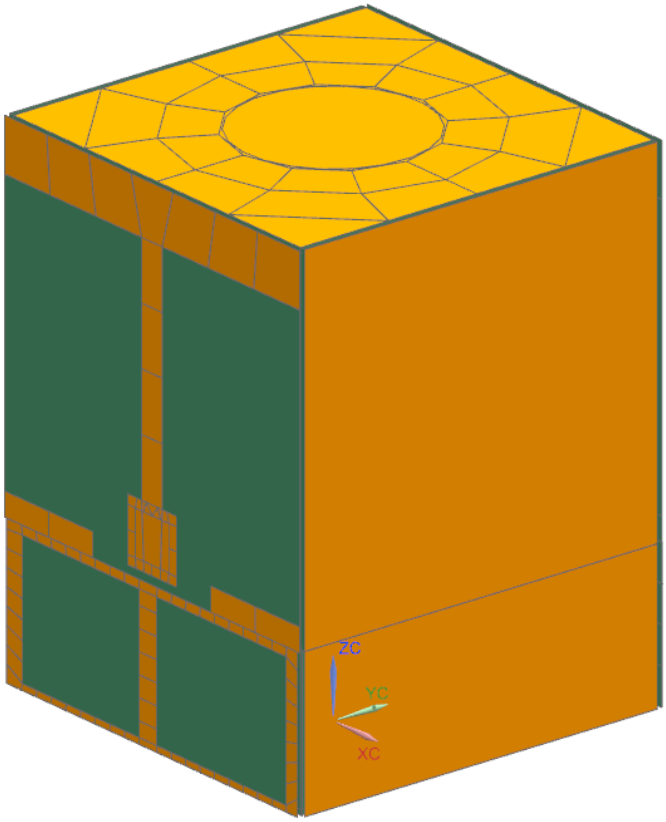
Tablo 6.4 Görev yükü panelinin bir yüzeyindeki elemanların özellikleri

	MODEL A	MODEL B	MODEL C	MODEL D	MODEL E
Eleman Boyutu [mm] x [mm]	1850x2000	619x666	50x50	40x40*	20x20
Eleman Sayısı	1	9	1480	2542	9300
Düğüm Sayısı	4	16	1558	2642	9494
Uyarı limitindeki Eleman Sayısı	0	0	0	35	0

*Model D diğer modellerden farklı olarak ekipman taban alanlarının izdüşümlerine göre düzenlendiği için eleman baz boyutlarında 40 x 40 [mm x mm]'den farklılaşmalar olmuştur. Bu düzenlemede ağ yapısı oluşturma işlemi ekipman taban alanları altındaki bölgelerden başlandığı için bazı bölgelerde eleman kalite kriterlerine göre uyarı limitinde olan elemanlar ortaya çıkmıştır. Sayısı paneldeki eleman sayısına oranla oldukça az olduğu için analizler sırasında kayda değer bir hata olmayacağı öngörülmektedir.

6.3.1 MODEL A-Tek Eleman Modeli

İlk olarak yapılan analitik hesaplamaların tutarlığını görmek, panellere gelen ısı yüklerini, panellerin ısı atım kabiliyetleri hakkında fikir sahibi olmak adına her panelin tek bir eleman olduğu basit bir GMM oluşturulmuştur. Bu modelde ön görülen çok katmanlı yalıtım battaniyesi gelen ısı yükün doğruluğu için kabaca modellenmiştir. Modelde ekipman ve diğer ısıl donanımlar (ısı borusu vb.) bulunmamaktadır. Oluşturulan bu tek elaman modelinin bir görseli Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4 Uydu tek eleman modeli

6.3.2 Çoklu Eleman Modelleri

Bu kısımda farklı sonlu eleman modellemelerinin basitten karmaşığa doğru analiz sonuçlarına etkilerinin incelenmesi hedeflenmiş ve bu doğrultuda 4 farklı GMM oluşturulmuştur.

Yapılan bu modellemelerde incelenen kriterler:

- Kritik ekipmanların sıcaklıkları
- Radyatör yüzeylerinin ortalama sıcaklıkları
- Analiz süreleri
- Ortalama tahmini sıcaklık hatalarıdır.

Bu karşılaştırmalardan alınan sonuçlara göre hangi modelleme stratejisinin uydu projesinin hangi aşamasında kullanılmasının yeterli ve efektif olacağı hakkında fikir sahibi olunması hedeflenmektedir.

6.3.2.1 MODEL B-Kaba Ağ Yapısı

Model-B olarak adlandırdığımız bu modelde panellerin üzerindeki ağ yapıları yazılımın hesapladığı, geometriye göre mümkün olan en büyük eleman boyutları ile oluşturulmuştur. Bu modelde görev yükü ekipmanlarının indirgenmiş ısıl modelleri ve ısı boruları da yer almaktadır. Modelin oluşturulmasının amacı, kaba bir ağ yapısında ekipman sıcaklıkları hakkında bilgi sahibi olmaktır. Eleman boyutları büyük olsa da panel üzerindeki ısı yayılımını sağlamak amacıyla ısı boruları da eklenmiştir.

Eleman boyutu için yazılımda kullanılan hesaplama yöntemi belirli birkaç kritere dayanmaktadır. 2 boyutlu ağ yapısı için hesaplamanın detayları aşağıdaki gibidir:

- İlk olarak seçilen her yüzeyin alanı ve bu alanların ortalamaları hesaplanmaktadır.
- Ardından bazı diğer faktörler değerlendirilmektedir. Bu faktörler; yüzeylerdeki kenar sayıları, ağ noktalarının sayısı ve düğüm sayılarıdır. Ayrıca bu değerlendirme, yüzeyin düz olup olmaması gibi geometri tipinin değerlendirilmesini de içerir.
- Sonrasında yazılım, seçili geometride ağ yapısı oluşturmak için gerekli eleman sayısı için bir ilk değerini tahmini yapmaktadır.
- Daha sonra, ortalama alan ve tahmini eleman sayısı bilgilerini kullanarak bir elemanın yaklaşık kenar uzunluğunu hesaplamaktadır.

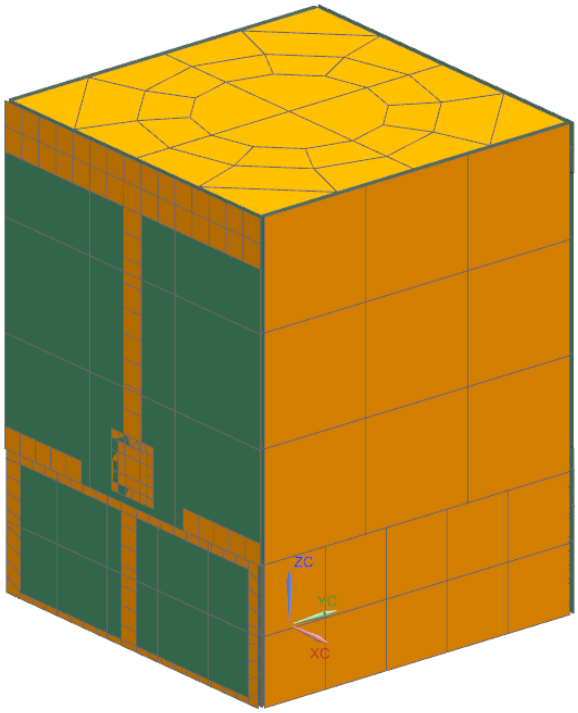
Bir elemanın yaklaşık kenar uzunluğu, toplam yüzey alanın tahmini eleman sayısına bölümünün karekökü dür [38]:

$$\sqrt{\frac{Toplam\ Yüzey\ Alanı}{Tahmini\ Eleman\ Sayısı}} \tag{6.3}$$

Son olarak, yazılım hesaplanan eleman boyunu doğrular:

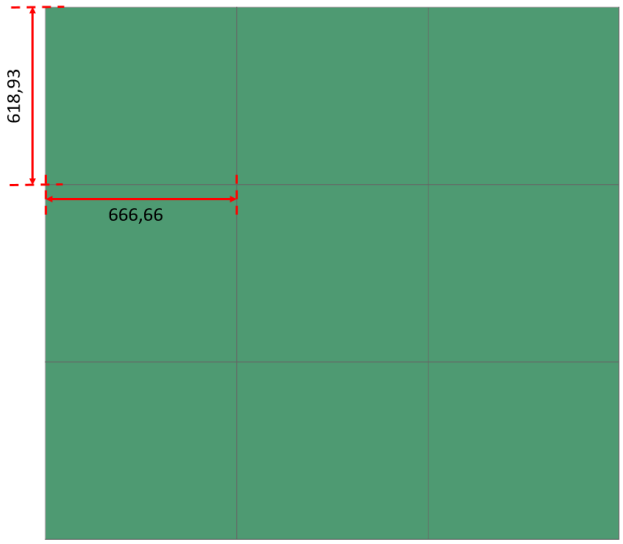
- $>1.5*$(Belirlenmiş Snap toleransı)
- $<0.5*\sqrt{En\ Küçük\ Alan}$

Bu hesaplamalar doğrultusunda mümkün olan en büyük eleman boyutu ile oluşturulan Model-B'nin sonlu elemanlar model (FEM) görüntüsü Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5 Model-B FEM modeli

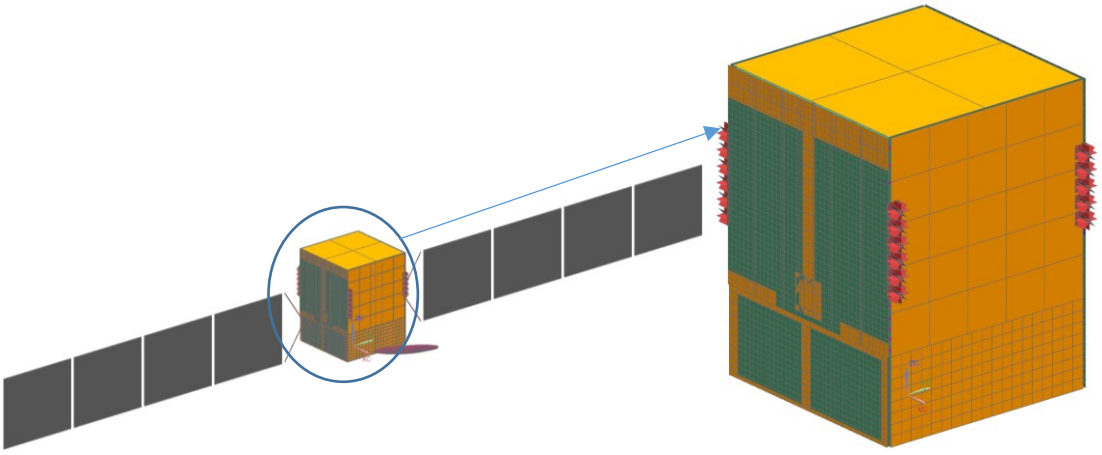
Görev yükü panelinin bir yüzeyinin bu doğrultuda oluşturulan FEM modeli 9 adet 2 boyutlu eleman içermektedir. Eleman baz boyutu 609 mm olarak hesaplanmıştır. Yazılım bu boyutu baz alarak ve diğer geometrik sınırlar, eleman kalitesi vb. özellikleri de göz önünde bulundurarak bir eleman boyutlarını hesaplamaktadır. Görev yükü panelinde 609 olarak hesaplanan baz boyutu modelin üzerinden kontrol edildiğinde eleman boyutlarının 666,66 [mm] x 618,93 [mm] olarak belirlendiğini görülmektedir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Model-B görev yükü paneli eleman boyutları

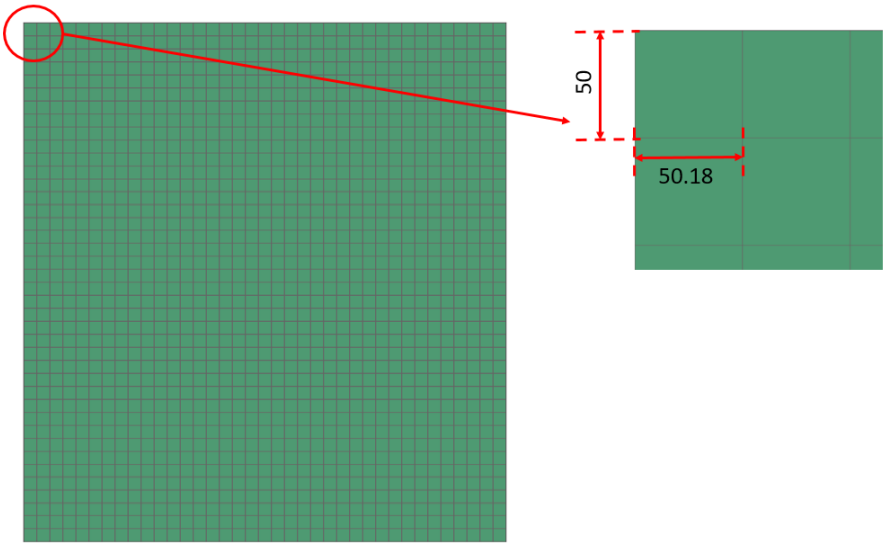
6.3.2.2 MODEL C-Detaylı Ağ Yapısı

Model-C olarak isimlendirdiğimiz bu modelde, panellerin ağ yapılarında kullanılan elemanlar, ekipman taban alanlarındaki elemanların boyutlarına yakın boyutta olması için 50 mm baz boyut kullanılarak simetrik bir şekilde oluşturulmuştur. Bu baz boyutla eleman boyutları yaklaşık olarak 50 [mm] x 50.18 [mm] olarak oluşturulmuştur ve her bir panel üzerindeki eleman boyutları kendi içinde değişiklik göstermemektedir. Model-C sonlu elemanlar modelinin (FEM) bir görseli Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7 Model-C FEM modeli

Görev yükü panellerin 50 mm baz eleman boyutu ile oluşturulan FEM modelinin görüntüsü Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8 Model-C görev yükü paneli eleman boyutları

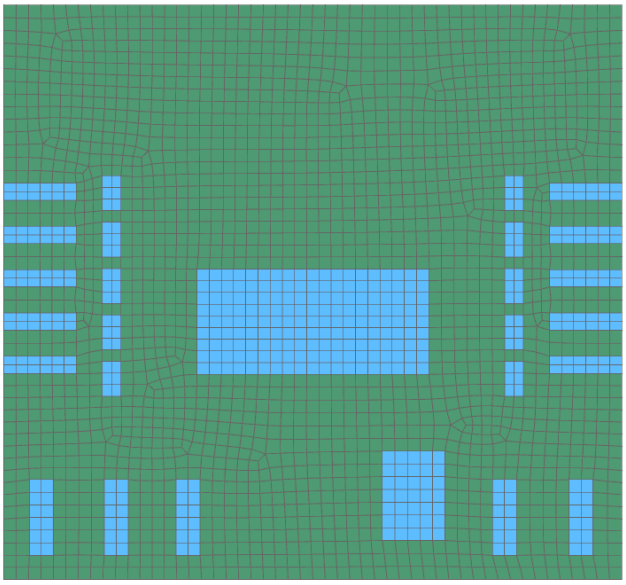
Bu modelde görev yükü panelinin bir yüzündeki eleman sayısı 1480 ve düğüm sayısı 1558'dir.

6.3.2.3 MODEL D-Detaylı Ağ Yapısı- Ekipmanlara Göre Düzenlenmiş

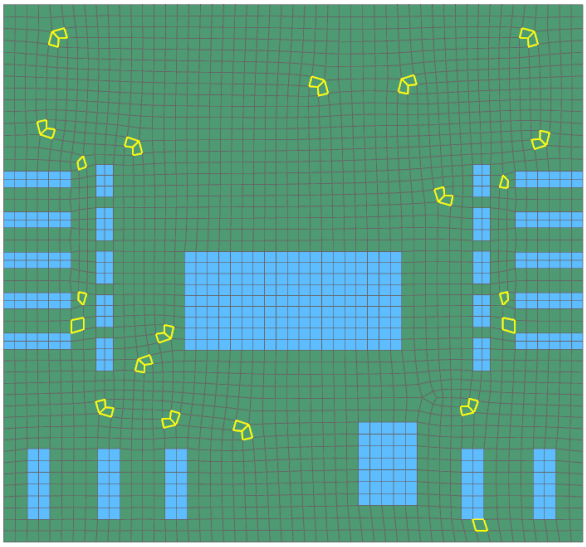
Model-D olarak adlandırdığımız bu modelde Model-C'den farklı olarak güney görev yükü panelinin ağ yapısı ekipman yerleşimlerine göre oluşturulmuştur. Yani panel üzerinde ekipmanların bulunduğu bölgelerdeki eleman boyutları, ekipman taban alanlarına göre ayarlanmış ve geriye kalan bölgelerdeki elemanlar bu boyutlara yakın bir baz boyutla otomatik olarak oluşturulmuştur. Daha önceki modellerden farklı olarak panel üzerindeki eleman dağılımı simetrik değildir ve boyutlar farklılık göstermektedir. Bu modelin oluşturulmasındaki amaç, panel ve ekipmanlar için simülasyonda tanımlanan bağlantıların üst üste örtüşmesini sağlamak ve daha önceki modellerde tam olarak üst üste örtüşmeyen bağlantılardan gelen hesaplamalarla önemli bir fark olup oluşturup oluşturmadığını incelemektir. Bunun yanı sıra analiz sürelerinin karşılaştırılması da yapılacaktır.

Model-D'de ekipman yerleşimine göre oluşturulan güney görev yükü paneli sonlu elemanlar modelinin (FEM) görseli Şekil 6.9'da verilmiştir. Model oluşturulurken panel üzerinde ekipman bölgeleri sınırları belirlenerek ayrılmış ve bu bölgelerde simetrik bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Geriye kalan ve ekipman bulunmayan bölgelerde baz boyut 40 mm seçilerek otomatik bir şekilde ağ yağısı oluşturulmuştur. Ekipman bulunmayan bölge sınırları girintili çıkıntılı olduğundan farklı şekil ve boyutlarda elemanlar oluşmuştur. Eleman kalitesi kontrol edildiğinde uyarı limitleri içinde olan 35 adet eleman olduğu görülmüştür (Şekil 6.10).

Bu modelde görev yükü panelinin bir yüzündeki eleman sayısı 2542 ve düğüm sayısı 2642'dir.



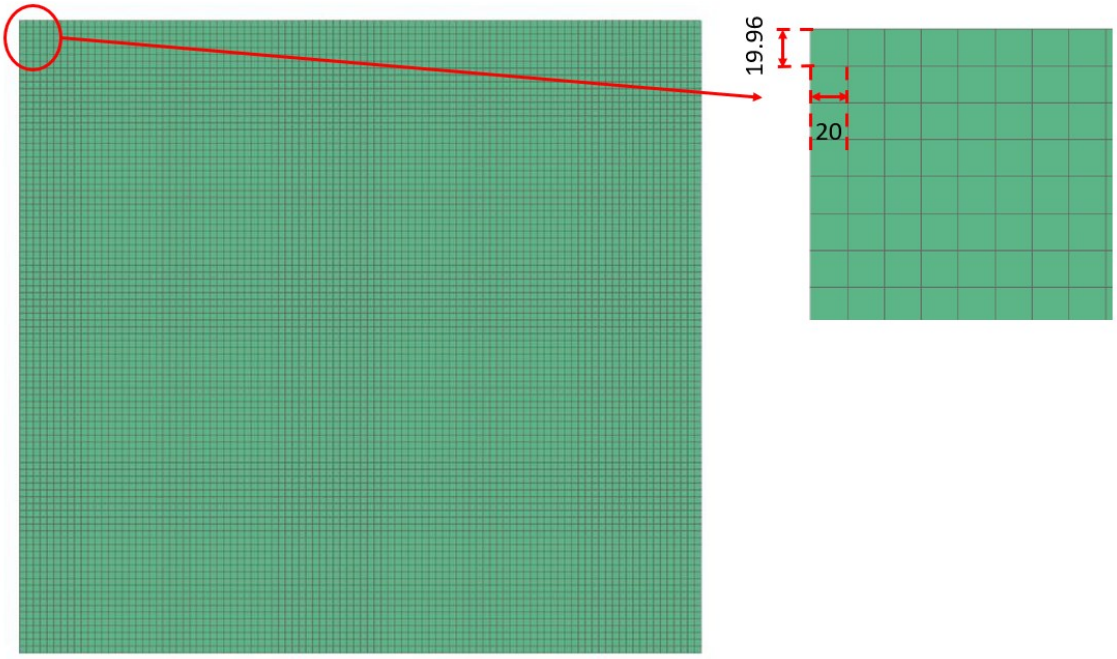
Şekil 6.9 Model-D görev yükü paneli eleman boyutları



Şekil 6.10 Model-D görev yükü paneli FEM modelinin eleman kalite kontrolü

6.3.2.4 MODEL E-Çok Detaylı Ağ Yapısı

Model-E olarak adlandırdığımız bu modelde Model-C'nin devamı olarak güney görev yükü FEM modeli eleman boyutları simetrik olacak şekilde 20 x 20 [mm x mm] seçilmiştir. Bu ölçüler, panel içerisinde kullanılan ısı borularının eleman boyutlarına yakındır. Panelin bir yüzeyinde oluşturulan 2 boyutlu eleman sayısı 9300'dür. Bu sayı Model C ve Model D eleman sayılarının sırasıyla yaklaşık 6.3 ve 3.7 katıdır. Bu modelde panel üzerinde daha yüksek çözünürlükte sıcaklık dağılımı elde etmek ve bunun ekipman sıcaklıklarına etkisi görülmek istenmiştir. Bunlara ek olarak analiz çözüm süresi ve çıktı olarak alınan sonuç dosyalarının boyutları da karşılaştırılacaktır. Model E'deki güney görev yükü panelinin ağ yapısı Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11 Model-E görev yükü paneli eleman boyutları

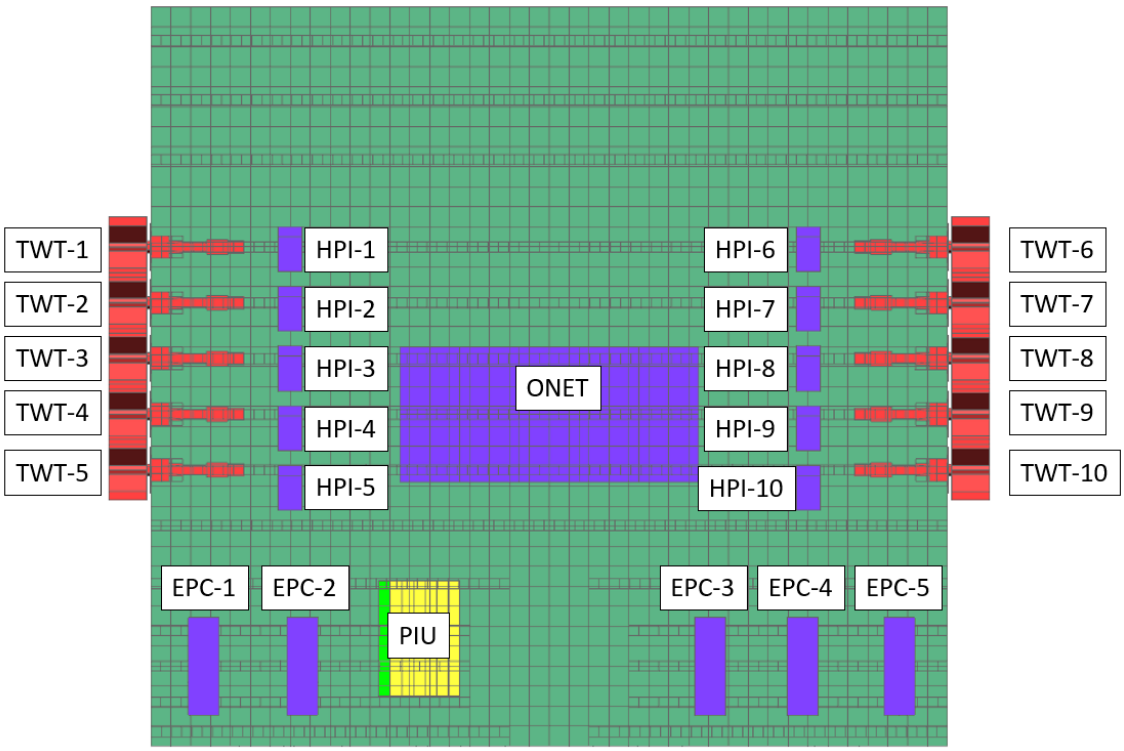
6.4 Ekipman ve Donanım Modellemeleri

Bu bölümde uydu üzerindeki ekipmanlar ve ısıl modelleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ekipmanlar genel olarak haberleşme görevini yerine getiren ekipmanlar ile bunlara yardımcı olan ekipmanlar ve ısıl kontrol donanımları olarak iki alt başlığa ayrılmıştır.

6.4.1 Uydu Haberleşme Görev Yükü Ekipmanları

Görev yükü panellerinde uydunun haberleşme görevini gerçekleştiren ve bu ekipmanlara yardımcı olan (güç sağlayan, gücü düzenleyen, aşırı yüklenmelerden koruyan vb.) ekipmanlar yer almaktadır. Bunların en önemlileri Yürüyen Dalga Tüpü TWT (Travelling Wave Tube), ONET (Output Network), EPC (Electric Power Conditioner), HPI (High Power Isolator), PIU (Payload Interface Unit) gibi ekipmanlardır. Bu ekipmanlar görevlerini yerine getirirken yüksek miktarlarda ısı atımı yaparlar. Fazla ısının uzaklaştırılabilmesi için yüksek ısı yayınımı olan bu ekipmanlar kuzey ve güney görev yükü panellerine yerleştirilirler.

Tez çalışmasında üzerinde çalışılan uydu modelinin güney görev yükündeki ekipmanların panel üzerine yerleşimleri Şekil 6.12'de verilmiştir.



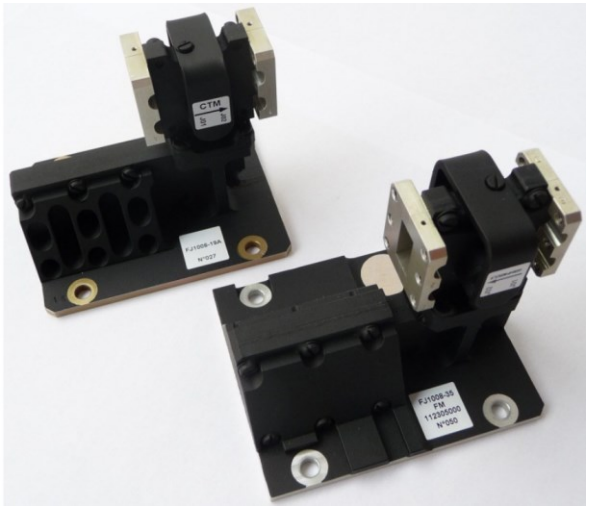
Şekil 6.12 Güney görev yükünde ekipmanların yerleşimi

Bu ekipmanlardan ışınımsal TWT (Şekil 6.13) dışındakiler ürettikleri atık ısıyı doğrudan iletimle panele, kendi yüzeylerinden ışınımla uydu iç ortamındaki diğer yüzeylere atmaktadır. Işınımsal TWT'ler çalışmaları sırasında diğer ekipmanlara göre oldukça yüksek ısı yayınımı oluşturmalarından ve taban yüzey alanlarının bu yayınıma göre küçük boyutlu olmasından dolayı ısılarının büyük bir kısmını doğrudan uzaya atarlar. Bunun için bu ekipmanın uydu dışında kalan kısmında kanatçıklar bulunmaktadır. Kanatçıklar yüzey alanını artırarak ışınımla uzaya atılan ısı miktarını artırmaktadır. Buna ek olarak panele temas eden taban alanından da iletimle panele ve iç kısımda kalan yüzeylerinden uydu iç panellerine ışınımla ısı atmaktadır. Görev yükü panellerinde tamamen uydu içerisinde kalan kanatçığa sahip olmayan TWT'ler de kullanılmaktadır. Bu tip TWT'ler atık ısılarını doğrudan panele ve az bir miktarını da uydu iç panellerine attığı için ışınımsal TWT'lere göre daha az tercih edilmektedir.



Şekil 6.13 Işınımsal TWT ve EPC ikilisi [39]

EPC'ler (Şekil 6.13) doğrudan TWT'lere bağlı ve elektriksel şartlandırmaları için çalışan kritik ekipmanlardır. HPI'lar (Şekil 6.14) ise TWT'lerin hata durumlarında aşırı yüklenmelerini engellenmek için kullanılan izolatörlerdir [40]. Nominal ısı yayınımları diğer ekipmanlara göre düşüktür fakat hata durumlarında ısı yayımları yaklaşık 10 veya daha fazla katına çıkabilmektedir. ONET (Şekil 6.15) Ku-bant sinyalinin tanımlanan frekanslar ve bant genişlikleri için kanal birleştirme ve anahtarlama işlemini yapmaktadır [41]. PIU Görev yükü ara yüz birimi, uydu bilgisayarı tarafından gönderilen komutların ilgili Ku-Bant ve X-Bant Faydalı Yük ekipmanının ara yüzüne çevrilerek gönderilmesi ve telemetrilerinin alınarak uydu bilgisayarına iletilmesi işlevi yerine getirmektedir [42].



Şekil 6.14 HPI yüksek güç izolatörleri [40]



Şekil 6.15 Ku-bant ONET [41]

Ekipmanlar ile ilgili gerekli bilgiler ekipmanı tedarik eden firma veya alt birimden temin edilmektedir. Uydu ısıl modeli içinde önemli yer tutan bu ekipmanlar en son aşamada oluşturulan uydu global modelinin bir parçası olmak zorundadır. Modele eklenebilmesi için ekipman ile ilgili gerekli bilgileri içeren bir doküman veya model bilgisi edinilmelidir. Endüstride genel işleyiş ekipman tedarikçisinin, ekipmanın test ile doğrulanmış ısıl analiz modelinin indirgeyerek uydu global modelini oluşturacak ekibe sağlaması şeklindedir. Ekipman indirgenmiş ısıl modelinin gerçek ve detaylı ısıl modeli temsil edecek doğrululukta olmalıdır. Bu doğruluğun kontrol edilmesi için ECSS-E-HB31-03A'da [Space Engineering Thermal Analysis Handbook] indirgeme kriterleri tanımlanmıştır. Kriterlerin detayları aşağıdaki gibidir:

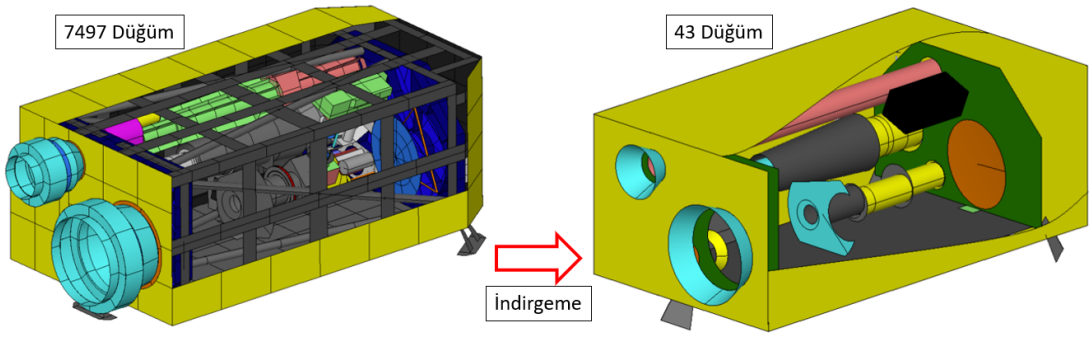
a) Detaylı ve indirgenmiş modeller arasındaki sıcaklık farkları aşağıdaki gibi olmalıdır:
    1. Ekipmanların ve sıcaklık kontrolü olan elemanlarda referans sıcaklık noktaları:
        - Ortalama <2K
        - Sıcaklık noktalarındaki farklar <3K

2. ÇKYB olmayan dış yüzeyler<3K
3. ÇYKB olmayan yapısal elemanlar <3K
4. ÇKYB üzerinde<15K

b) Sıcaklıklardaki standart sapma <3K, 1 σ hesaba katılır.

c) Isıtma ve soğutmada birim zamanda geçen ısı miktarları arasındaki farklar:
1. İletimle ısı geçişi olan ara yüzlerde <5%
2. Işınımla ısı geçişi olan ara yüzlerde <5%
3. Uzay aracından ve uzay aracına geçen ısı akısı <10%
4. Isıtıcı güç tüketimleri <10% [35]

Ignacio Torralbo ve arkadaşları yapmış oldukları "görev yükü ekipmanlarının ısıl matematiksel modellerinin korelasyonu için yeni bir yöntem" adlı çalışma bir ekipman ısıl modelinin indirgenmesi aşamalarına değinmişlerdir. Üzerinde çalışılan ekipmanın Avrupa Uzay Ajansı'nın Solar Orbiter görevinde kullanılan bir optik ekipmandır. ESATAN-TMS yazılımı kullanılarak oluşturulan detaylı ısıl model 7497 düğüm içerirken indirgenme işlemleri sonrasında ısıl modeli 43 düğüme indirgenmiştir. İndirgeme işleminde detaylı ve indirgenmiş ısıl geometrik modeller Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Oluşturulan indirgenmiş model 39 adet lineer bağlantı içermektedir [43].



Şekil 6.16 Detaylı ve indirgenmiş ısıl geometrik modeller [43]

Literatürde indirgeme işlemleri için belirli kriterler olmadığından dolayı oluşturulan detaylı indirgenmiş modellerin korelasyonu için Avrupa Uzay Ajansının yukarıda da verilen ECSS standartlarında önerilen kriterlere başvurulmuştur.

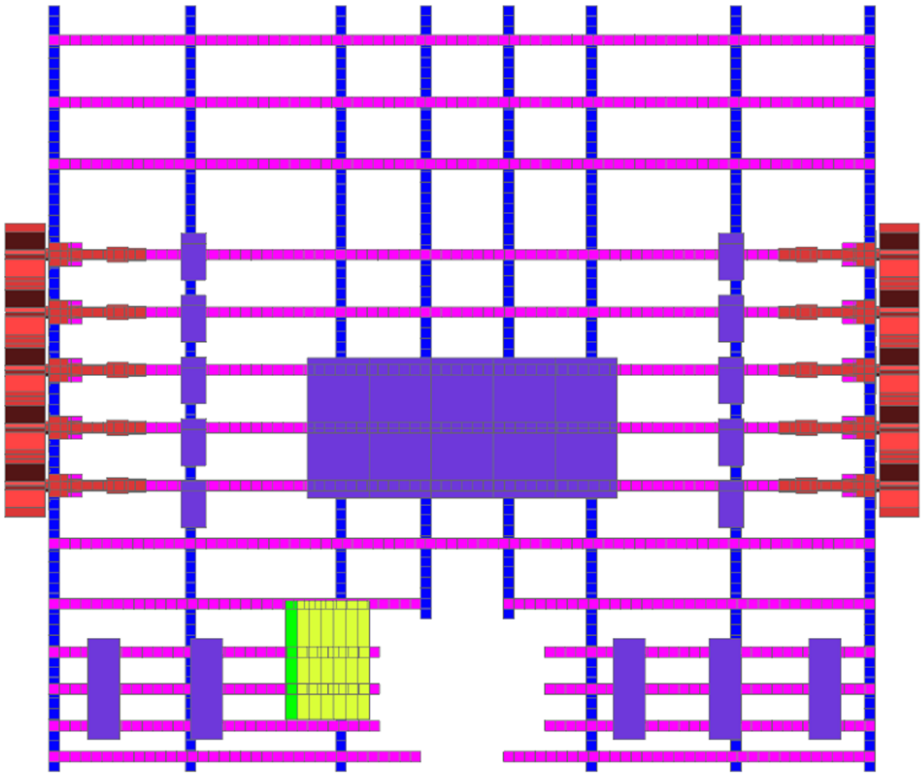
Sonuç olarak detaylı model yukarıda verilen kriterlere uygun olarak indirgenmiş ve uydu global modellerinde kullanılmıştır [43].

Tez çalışmasında kullanılan ekipmanların indirgenmiş ısıl matematiksel modelleri tedarikçi firma verilerinde oluşturulmuştur. Verilen tanımlamalara göre indirgenmiş modeller oluşturulmuştur. Dokümanlarda verilen test senaryosunda elde edilen sıcaklık ve ısı akısı verileri ile indirgenmiş model karşılaştırılmıştır. Kriterlere uygun olduğu görülmüş ve uydu global modeline eklenmiştir. TWT, EPC gibi ekipmanların indirgeme işlemlerine ait bilgiler tedarikçi firmaların gizlilik şartlarından dolayı bu çalışma içinde yer verilmemiştir. Bunun yerinde yukarıda literatürden alınmış bir indirgeme işlemi örneğinin bir özeti verilmiştir.

6.4.2 Isıl Donanımlar

6.4.2.1 Isı Boruları

Görev yükü panellerinin içerisine gömülü yatay ve dikey konumlu ısı boruları mevcuttur. Bu ısı boruları ekipmanların tabanlarından panele yaydıkları ısı enerjisini panele dağıtarak lokal olarak panel üzerinde sıcak bölgeler oluşmasını engellemektedir. Konsept uydu ısıl tasarımında görev yüklerinde kullanılan ısı boruları yatay olanlar iç yüzeye (ekipmanların değdiği yüzey) dikey olanlar ise radyatör yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Isı borularının yerleşimi ekipman konumları ile birlikte Şekil 6.17'de gösterilmiştir.



Şekil 6.17 Görev yükü paneli ısı borusu ve ekipman konumları

Oluşturulan uydu global sonlu elemanlar modelinde, ısı boruları 2 boyutlu olarak modellenmiştir. Kalınlık bilgisi içerisindeki akış alanı düşünülerek eşdeğer olarak hesaplanmıştır. Al 6063 malzemeden üretilen ısı borusunun içerisinde akışın simülasyonu için 1 boyutlu bir akış düğümü oluşturulmuştur. Akış düğümü değerleri tedarikçi firma tarafından verilmiştir. Isı boruların sonlu elemanlar modelini bir görseli Şekil 6.18'de verilmiştir.

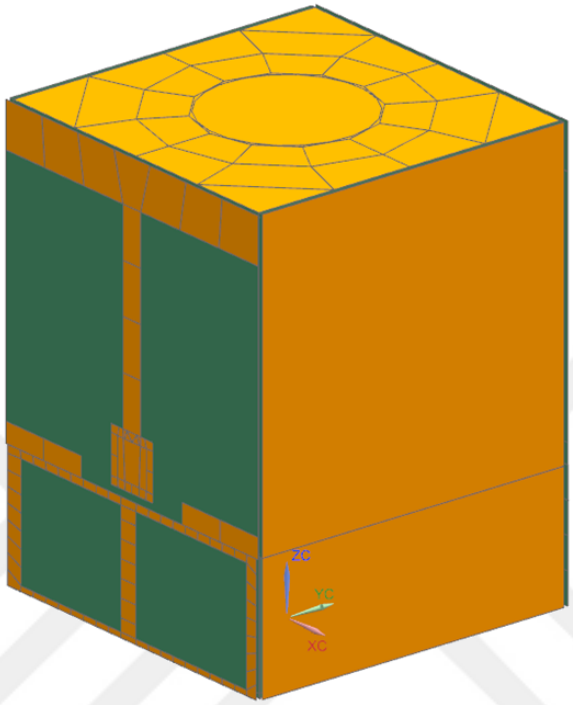


Şekil 6.18 Isı borusu sonlu elemanlar modeli

6.4.2.2 Çok Katmanlı Yalıtım Battaniyeleri

Uydu global modelinde kuzey ve güney radyatör panelleri dışındaki paneller çok katmanlı yalıtım ile kaplanmıştır (Şekil 6.19). Paneller üzerinde yer alan çok katmanlı yalıtımlar 2 boyutlu olarak modellenmiştir. ÇKYB'nin dış yüzeyinde yer

alan katmanın (siyah KAPTON) ısıl-optik özellikleri bu 2 boyutlu elemanlara tanımlanmıştır. Burada yalıtım etkisi, Bölüm 4.1.1'de verilen etkin yayınım katsayısı kullanılarak tanımlanan ısıl bağlantılar ile oluşturmuştur. ÇKYB'nin sonlu elemanlar modelinin bir görseli şekilde verilmiştir.



Şekil 6.19 ÇKYB sonlu elemanlar modeli (turuncu renkte)

6.4.2.3 Optik Solar Reflektörler (OSR)

Uydu global sonlu elemanlar modelinde OSR'ler, kuzey ve güney panellerinin dış yüzeyine ısıl-optik özellikler tanımlanarak temsil edilmektedir. Isıl-optik özellikler bölüm 3.1.1.3'teki bilgilerden seçilmiştir.

6.5 Simülasyon Modeli- Isıl Bağlantılar, Radyasyon Hacim Zarfları ve Yörüngesel Isınma Tanımlamaları

Bu bölüm çalışmada kullanılan yazılım için simülasyon modeli aşağıda sınıflandırılmış temel tanımlamaları içermektedir:

- İletim ısı transferi hesaplamalarını yapan ısıl bağlantı tanımlamaları

- Işınım ısı transferinin simülasyonu için ışınım ortamının tanımını içeren bağlantı (uydu iç ışınımı, uydunun uzaya yaptığı ışınım)
- Uydunun yörüngede maruz kaldığı; güneş ultraviyole ışınımını, gezegen kızılötesi ışınımı, gezegenden yansıyan güneş ışınımı (albedo) vs. ısıl yükleri içeren yörüngesel ısınmanın tanımlaması

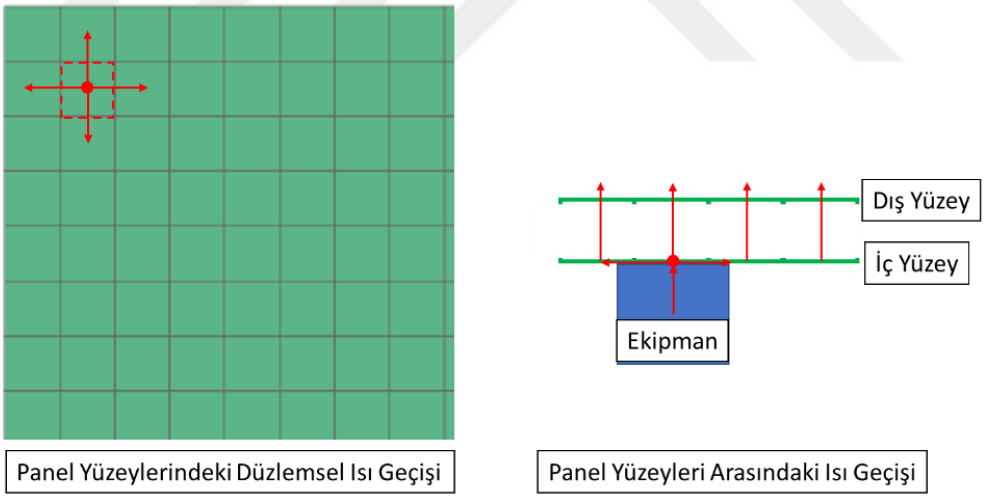
Bu bölümde bahsedilen temel tanımlamalar sonraki bölümlerde daha detaylı açıklanacaktır.

6.5.1 İletim Isı Transferinin Modellenmesi

Uydu global sonlu elemanlar modelinde iletim ısı transferi:

- Yapısal panellerde düzlemsel yönlerde (yatay ve dikey)
- Yapısal paneller ve ekipmanlar arasında
- Yapısal paneller ve ısı boruları arasında
- Ekipmanların içerisindeki komponentler arasında gerçekleşmektedir.

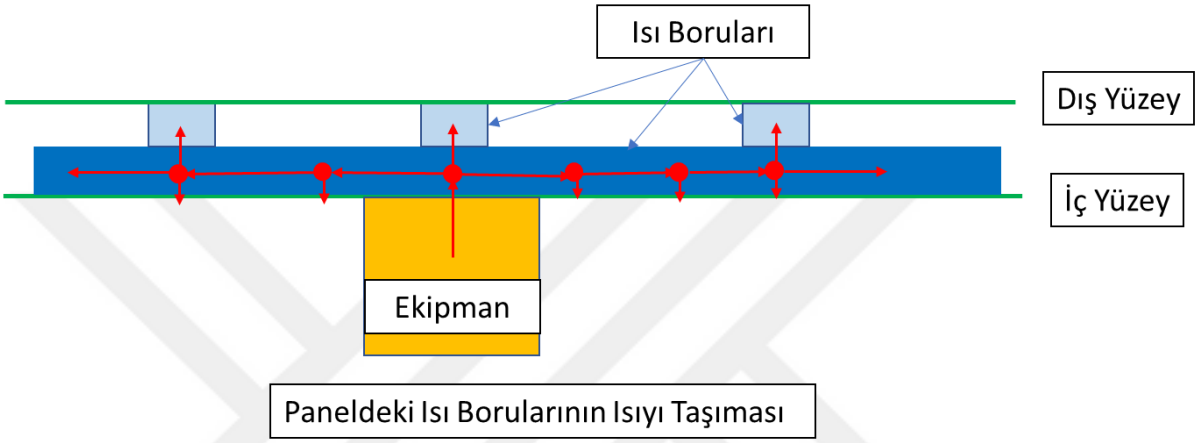
Panellerdeki iletim ısı geçişlerinin temsili bir gösterimi Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.20 Paneldeki ısı iletimi temsili gösterimi

Paneldeki düzlemsel ısı geçişi 2 boyutlu elemanlara tanımlanan ısıl iletim katsayısı ve kalınlık bilgisinden hesaplanmaktadır. Panel yüzeyleri arasındaki ısı geçişi ise bal peteği yapısı da göz önünde bulundurularak hesaplanan ısı iletim katsayısı bir ısıl bağlantı tanımlanarak yazılıma hesaplatılmaktadır. Benzer şekilde ekipman ve

panel arasında alandan bağımsız bir ısı transfer katsayısı (W/m².K) ile bir ısıl bağlantı oluşturulmaktadır. Bu bağlantıda temas eden yüzey alanlarını, tanımlanan özellikler sayesinde yazılım otomatik olarak hesaplamaktadır. Benzer bağlantı ısı boruları ve panel yüzeyleri arasında da tanımlanmaktadır. Bu bağlantılarda kullanılan değerler tedarikçi firmalar tarafından testlerle doğrulanmış değerlerdir. Isı borularının panel yüzeylerinde ısıyı taşımasını gösteren temsili resim Şekil 6.21'de verilmiştir.



Şekil 6.21 Isı borularının ısıyı taşıması temsili gösterim

Ekipmanların indirgenmiş ısıl modellerinde iç bileşenler arasında gerçekleşen iletim ısı geçişi katsayıları, uydu global simülasyon modelinde ilgili elemanlara tanımlanmaktadır.

6.5.2 Işınım Isı Transferinin Modellenmesi

Işınım ısı transferinin modellenmesi uydu ısıl modeli ve yörünge simülasyonu açısından oldukça önemlidir. Uzay ortamında bir akışkan ortamının olmadığı, derin uzayın sıcaklığının yaklaşık 4 K ve güneşin yüzey sıcaklığının yaklaşık 5778 K [44] olduğu düşünülürse ışınım ısı transferinin doğru modellenmesinin ne kadar kritik olduğu çıkarılabilir. Daha çarpıcı bir örnek olması açısından bir benzetim yapacak olursak; Güneş'e en yakın gezegen olan Merkür'ü düşünelim. Merkür'ün etrafını Dünyamız gibi çevreleyen etkili bir atmosferi yoktur ve Güneş'e bu kadar yakın olmasının bir sonucu olarak Güneş gören yüzünün sıcaklığı yaklaşık 430 °C'dir [45]. Karanlıkta kalan yüzü ise etkili bir atmosferin yokluğu nedeniyle gece

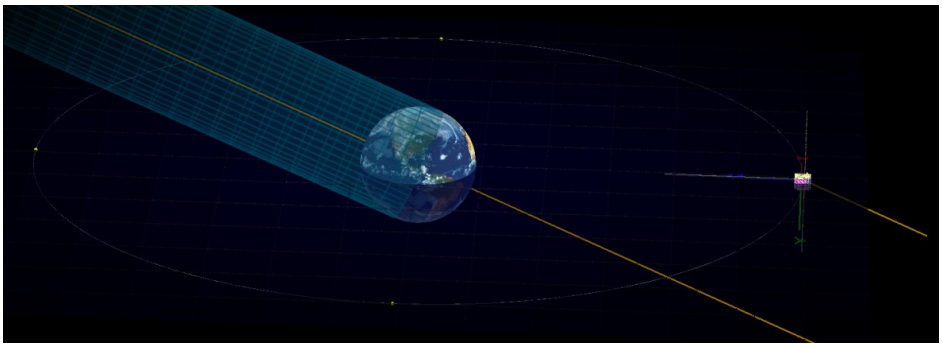
-180 °C'ye kadar düşmektedir [45]. Merkür kadar Güneş'e yakın olmasa da Dünya yörüngelerinde görev yapan bir uydunun üzerinde ısıl kontrol olmasaydı Güneş'i gören ve görmeyen yüzeyler arasında yüzlerce derece sıcaklık farkı görülebilirdi.

Uydunun global modelinin simülasyonu sırasında ışınım ortamı üç ana adımda tanımlanır:

- Uydunun yörüngesel ısınması
- Uydunun uzaya ışınımla attığı ısı- Dış Işınım
- Uydu iç yüzeyleri, ekipman yüzeyleri arasındaki ışınım ısı geçişi-İç Işınım

Yörüngesel ısınmanın tanımlanması için bir yörünge tanımı oluşturulmalıdır. Paket yazılım içerisinde seçilebilen yer sabit, güneş eş zamanlı hazır yörüngeler mevcut iken bazı veriler girerek özel bir yörünge de tanımlanabilir.

Bu çalışmada üzerinde çalışılan güney görev yükü paneli için en kötü sıcak durum senaryosu olan Kış Gündönümü 21 Aralık tarihindeki yörünge oluşturulmuştur (Şekil 6.22). Uydu, Dünya'ya bakan yüzü, kuzey ve güneyde kalan yüzleri ayarlanarak yer sabit yörüngeye yerleştirilmiştir. Yörünge üzerinde yörüngesel ısı yükü hesabı için 12 adet çözüm noktası seçilmiştir. Bu noktalarda Güneş'ten ve Dünya'dan gelen ısı akıları Güneş panellerinin ve antenlerin konumlarına göre Monte-Carlo ışın izleme yöntemi ile hesaplanmaktadır. Çözüm için seçilen zaman adımları bu 12 noktadan çok daha fazladır (Bir yörünge için 360 adet). Bu nedenle arada kalan değerler yazılım tarafından interpolasyon ile hesaplanmaktadır.



Şekil 6.22 Yörüngesel ısınma

Uydunun uzaya ışınımla attığı ısı için bir dış ışınım (Şekil 6.23) tanımlaması yapılmaktadır. Bu tanımlama uydunun dış yüzeylerindeki elemanların uzayı görüş

faktörleri hesaplanarak yapılmaktadır. Isıl optik özellikleri ile birlikte uzaya attıkları ısı miktarları ortaya çıkmaktadır. Yörüngesel ısınmaya benzer şekilde oluşturulan uydu global ısıl modelinde yörünge üzerinde 12 adet noktada dış ışınım hesabı yapılmaktadır. Nokta sayısı değiştirilebilir. Burada uzayı görüşü kısmı olarak engelleyen güneş panelleri, anten ve dış ekipmanlar sebebiyle bu tanımlama da oldukça kritiktir. Temelde kullanılan eşitlik:

$$\dot{Q}_{Atılan\ Isı} = \varepsilon_{IR}.A_{Radyatör}.VF_{Uydu\rightarrow Uzay}.\sigma.(T_{Uydu}{}^4 - T_{Uzay}{}^4) \qquad (6.4)$$

dir.

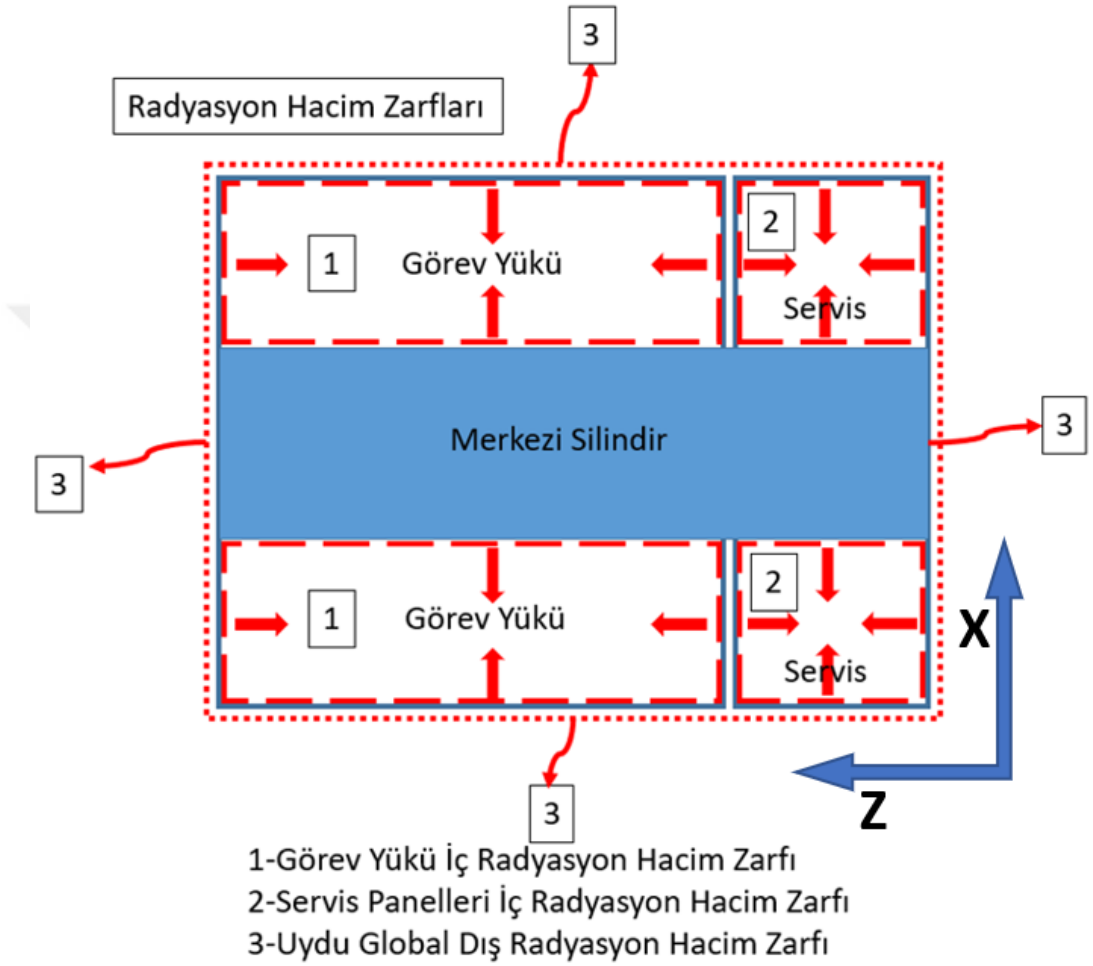
Uydu iç panelleri ve iç ekipmanların yüzeyleri arasında da ışınımla ısı transferi gerçekleşmektedir. Şekil 6.23'te görev yükü (1) ve servis panelleri (2) için iç ışınım hacim zarfları şematik olarak gösterilmiştir. İç ışınım için yazılımda bütün iç yüzeyler seçilerek bir tanım oluşturulur. Bu tanım yardımıyla yüzeyler arasındaki görüş faktörlerinin hesaplanması ile yüzeyler arasındaki ısı geçiş miktarları belirlenir. Yüzeylerin sıcaklıkları da burada diğer etki eden değişkendir. İç ışınım bir panelin uzaya ısı atması kadar etkin olmasa atık ısının uzaklaştırılmana katkı sağlar. Bu nedenle genelde uydu iç panellerinin ve ekipman yüzeylerinin siyah boya ile boyanması istenmektedir. Örneğin; 21 Haziran'da maksimum miktarda Güneş enerjisine maruz kalan kuzey görev yükü paneli, ısısın bir kısmını kesme panelleri ve merkezi silindir yardımıyla o tarihte hiç güneş akısı almayan güney panellere atabilmektedir. Bu da ekipman sıcaklıklarının düşmesine yardımcı olmaktadır.

Bu tez çalışmasında yapılan ısıl modellemede de iç yüzeylerin siyah boya ile boyandığı varsayılmış ve bu yüzeylerin yayınım katsayısı 0.8 [46] olarak tanımlanmıştır.

Sadece kızıl ötesi dalga boyunda gerçekleşen bu ısı transferinde bir yüzeyin attığı ısı miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Atılan\ Isı} = \varepsilon_{IR}.A_1.\sigma.[&VF_{1\rightarrow 2}.\left(T_1{}^4 - T_2{}^4\right) + VF_{1\rightarrow 3}.\sigma.\left(T_1{}^4 - T_3{}^4\right) \\ &+ VF_{1\rightarrow 4}.\sigma.\left(T_1{}^4 - T_4{}^4\right) + \cdots\end{aligned} \qquad (6.5)$$

Elle hesaplaması oldukça zor ve zaman alıcı olan bu işlem için, yazılım iç yüzeylere tanımlanan elemanlardan gördüğü bütün elemanlara bir görüş faktörü hesaplamaktadır. Bu işlem uzaya olan görüş faktörünü hesaplamaktan daha fazla zaman alan işlemdir ve genelde çözüm süresini kayda değer miktarda artırmaktadır.



Şekil 6.23 Uydu içi ve dışı radyasyon tanımlaması

6.5.3 Tahmini Sıcaklık Hatasının Hesaplanması

Tahmini sıcaklık hatası oluşturulan ağ yapısından kaynaklı iletim ısı geçişi sırasında oluşan tahmini hesaplama hatasıdır. Elemanlar bazında maksimum sıcaklık hatası ϵ_T aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\epsilon_T = maks\left|T_{BE} - f_{BE}(T_1, T_2, T_3, \ldots . T_N)\right| \tag{6.6}$$

T_{BE}=Hesaplanan komşu eleman sıcaklıkları

f_{BE}= Şekil fonksiyonu (Düğüm sıcaklıklarını komşu elemanlara interpole eder.)

N= Düğüm sayısı

T_i=N adet düğümün sıcaklığı

Bu hesaplama her düğüm ve her eleman için yapılmaktadır. İletim ısı geçişinde tahmini hesaplama hataları hakkında bilgi vererek ağ yapısında düzenleme yapmak için değerlendirme yapma fırsatı vermektedir [47].

7
ANALİZ SONUÇLARI

7.1 Farklı Boyutta Elemanlara Sahip Panel Ağ Yapılarının Analizleri

Bu bölümde 6.3 bölümünde anlatılan farklı eleman boyutları ile ısıl matematiksel modelleri oluşturulmuş görev yükü panellerine sahip global uydu modelinin ısıl analiz sonuçları paylaşılmıştır. Model B, Model C, Model D ve Model E'nin sonuçlarının karşılaştırılması güney görev yükü panelleri üzerinde yapılmıştır.

7.1.1 MODEL A-Tek Eleman Modeli

İlk olarak panellerin tek eleman olduğu Model A'nın en kötü soğuk durum olan kış gün dönümü analizleri yapılmış, el hesabıyla elde edilen radyatör yüzeyi sıcaklığının doğruluğu kontrol edilmiştir. 6.4.1 bölümünde verilen enerji dengesi hesaplamasını hatırlayacak olursak T_{Rad} =48.0 °C bulunmuştu. Bu modelde iç ışınımın hesaba katılmadığı belirtilmektedir.

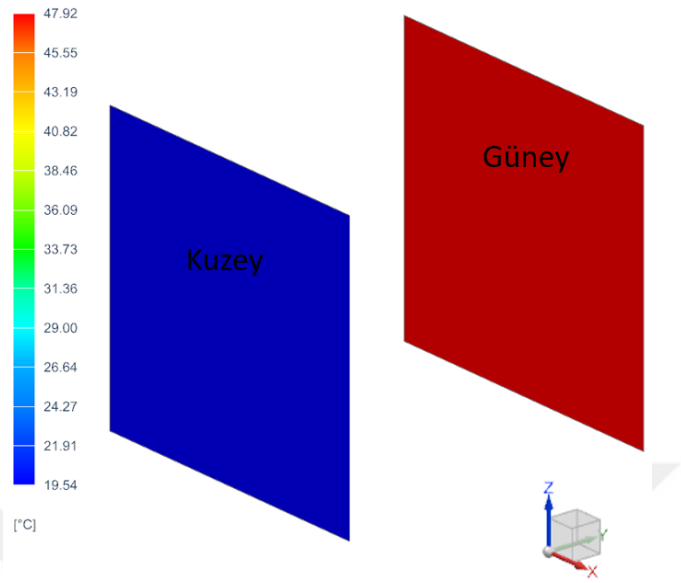
Model A aşağıda verilen özelliklerle çözdürülmüştür:

- Ekipmanların modelleri yer almamaktadır.
- Toplam ısı yayınımları panele uygulanmıştır.
- Isı boruları modelde yer almamaktadır.
- Güneş panelleri ve anten analize dahil edilmiştir.
- İç ışınım etkisi hem yokken hem de varken çözdürülmüştür.
- Yörüngede hesaplama noktası sayısı=12
- Yörünge Sayısı=3
- Zaman Adımları=240 sn=4 dk
- Başlangıç Sıcaklığı=20 °C
- Kış Gündönümü

7.1.1.1 MODEL A-İç Işınım Hesabının Dahil Edilmediği Durum

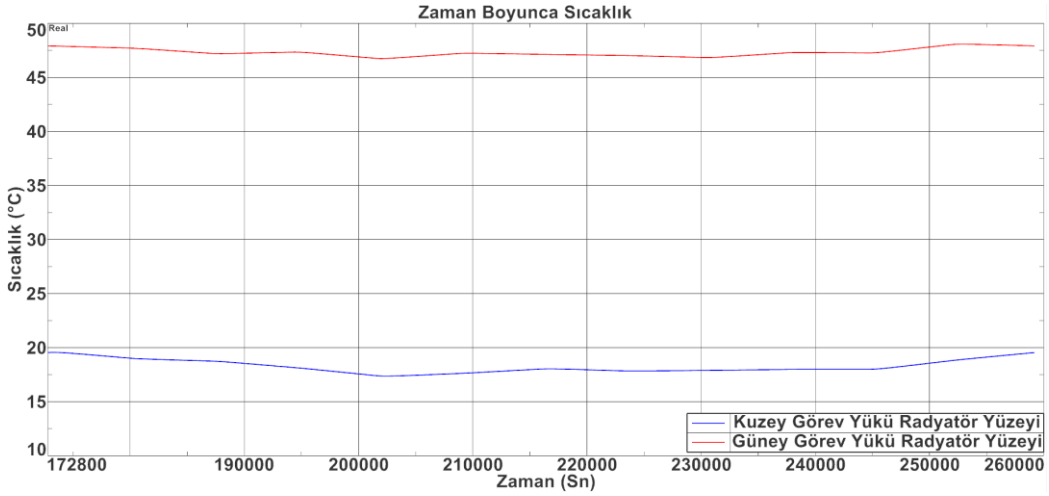
Yörünge analizi sonucunda elde edilen maksimum radyatör yüzeyi sıcaklıkları Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Güney radyatör paneli sıcaklığının maksimum değeri

47.9 °C çıkmıştır. Bu senaryo için kuzey panelin radyatör paneline güneş enerjisi gelmediği için sıcaklığının maksimum 19.5 °C olduğu görülüyor.



Şekil 7.1 Model A maksimum radyatör sıcaklıkları

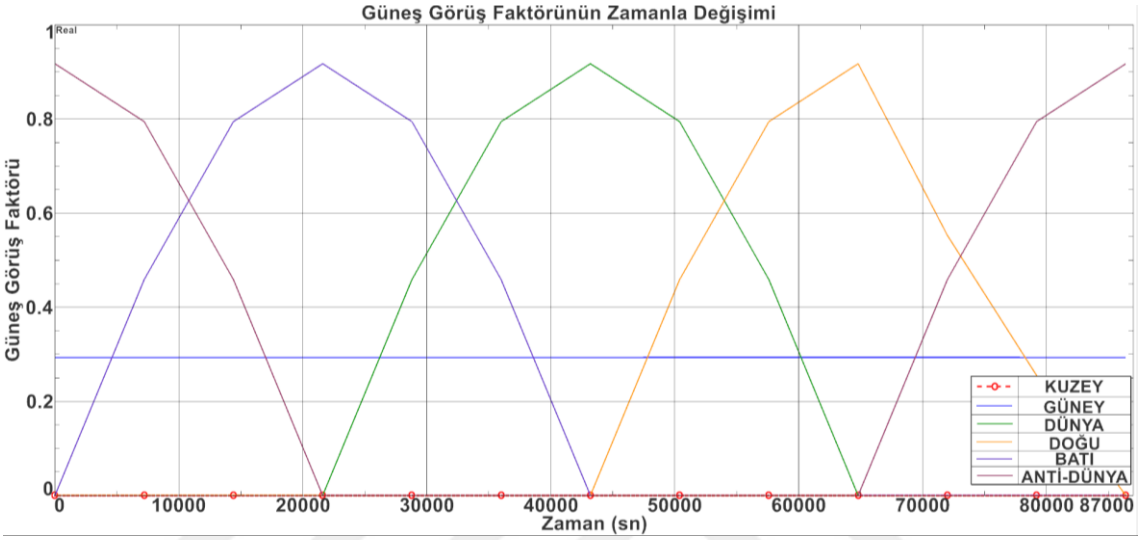
Ayrıca Şekil 7.2'de radyatör sıcaklıklarının yörünge boyunca sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Model üzerinden herhangi bir ekipman olmadığı ve paneller tek eleman olduğu için oldukça düşük seviyelerde değişim gözlenmiştir.



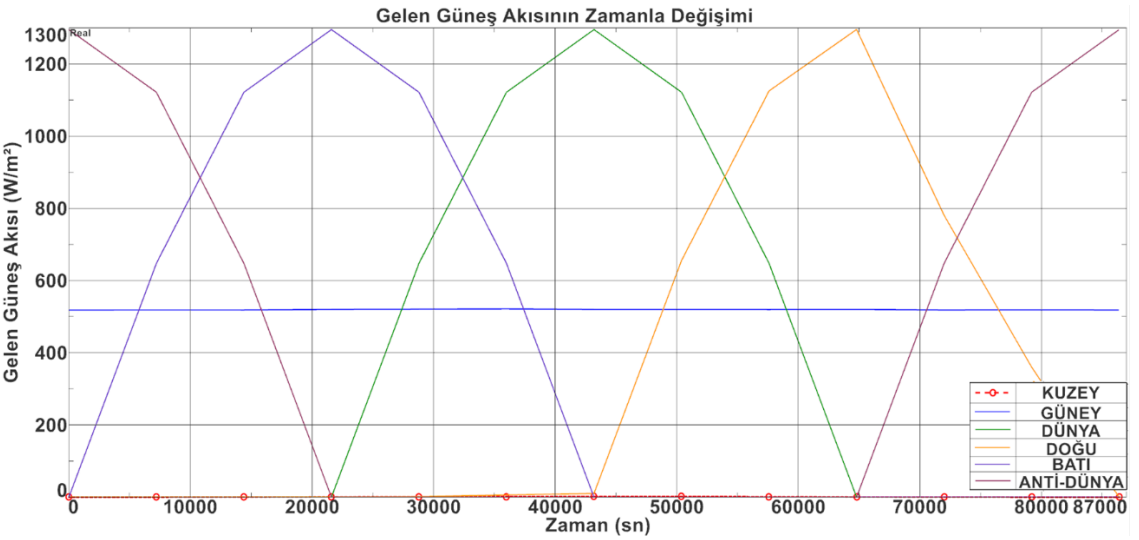
Şekil 7.2 Model A yörünge boyunca sıcaklık değişimi

Kış gündönümü 21 Aralık yörüngesi boyunca panellerin güneş görüş faktörleri ve gelen güneş akılarının grafikleri sırasıyla Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te verilmiştir.

Grafikleri incelediğimizde Doğu, Batı, Dünya ve Anti-dünya panellerine gelen güneş akılarının gün içinde yaklaşık 1300 W/m²'lik bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu durum, bu panellerde sıcaklık kontrolü yapmanın güçlüğünü ortaya koymaktadır. Bu yüksek miktardaki değişimden olabildiğince az etkilenmek için bu panellerin büyük kısımları çok katmanlı yalıtım battaniyesi ile kaplanmaktadır.



Şekil 7.3 Model A Güneş görüş faktörlerinin yörünge boyunca değişimi



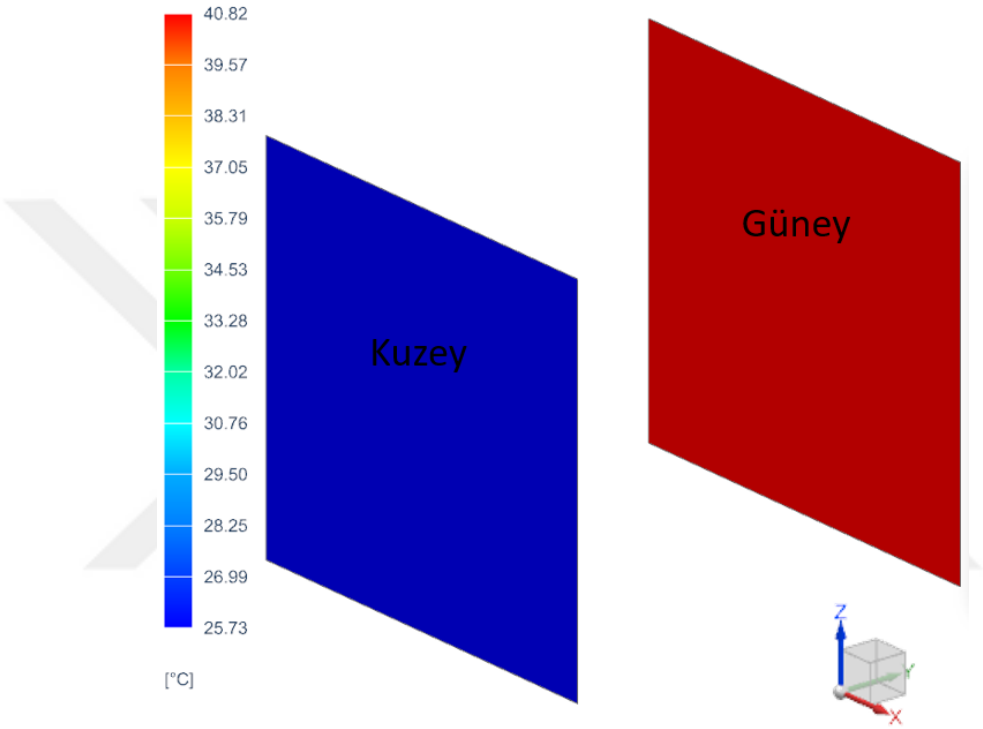
Şekil 7.4 Model A gelen Güneş akılarının yörünge boyunca değişimi

7.1.1.2 MODEL A-İç Işınım Aktif

Bir önceki analiz senaryosunda iç radyasyon etkisi aktif hale getirildiğinde ise elde edilen panel sıcaklıkları Şekil 7.5'te verilmiştir.

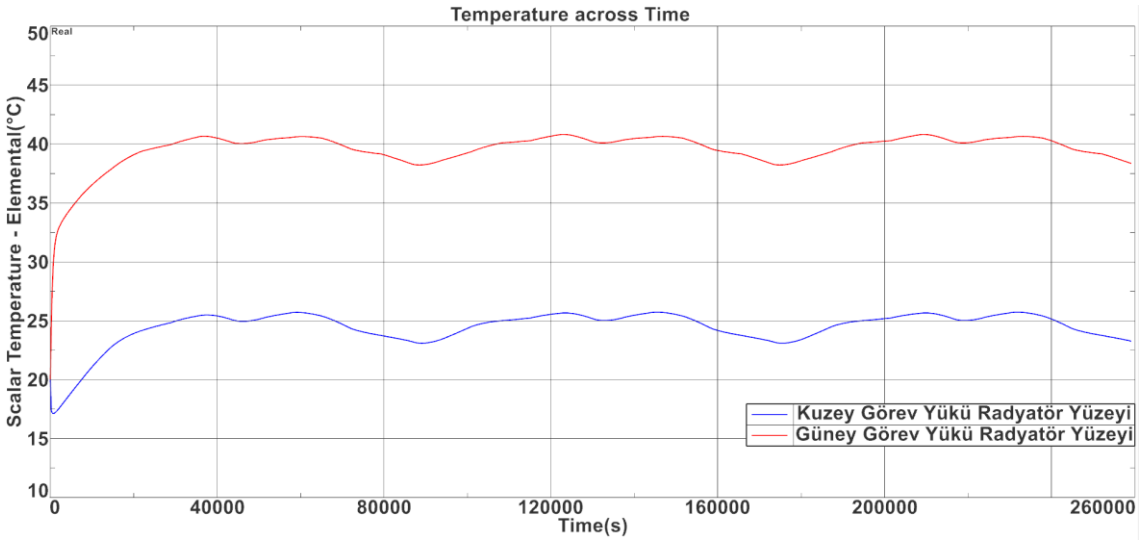
İç ışınım etkisi:

- 47.9-40.8=7.1 °C Güney radyatör sıcaklığında düşüş.
- 25.7-19.5=6.2 °C Kuzey radyatör sıcaklığında artış.



Şekil 7.5 Model A maksimum radyatör sıcaklıkları-İç ışınım aktif

Ayrıca Şekil 7.6'da radyatör sıcaklıklarının yörünge boyunca sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. İç ışınım etkisiyle doğu, batı, dünya ve anti-dünya panellerinden etkilenen kuzey güney panellerde sıcaklıkların yaklaşık 2-3 °C mertebelerinde salınım gösterdiği görülmektedir.



Şekil 7.6 Model A yörünge boyunca sıcaklık değişimi-İç ışınım aktif

7.1.2 MODEL B-Kaba Ağ Yapısı

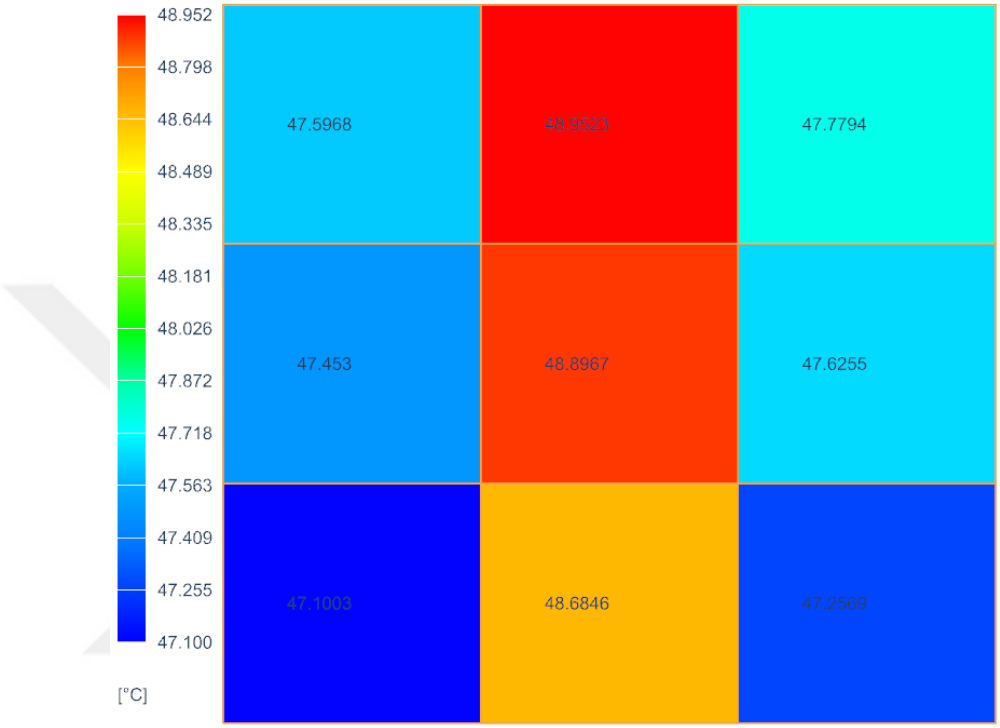
6.3.2.2 bölümünde anlatıldığı üzere Model-B'de mümkün olan en büyük eleman boyutları ile ağ yapısı oluşturulmuştur. Ayrıca Model-A'dan farklı olarak görev yükü ekipmanlarının indirgenmiş ısıl modelleri ve ısı boruları da modele eklenmiştir. Bu modelde ekipman sıcaklıkları hakkında bilgi sahibi olunması hedeflenmiştir.

Model B aşağıda verilen özelliklerle çözdürülmüştür:

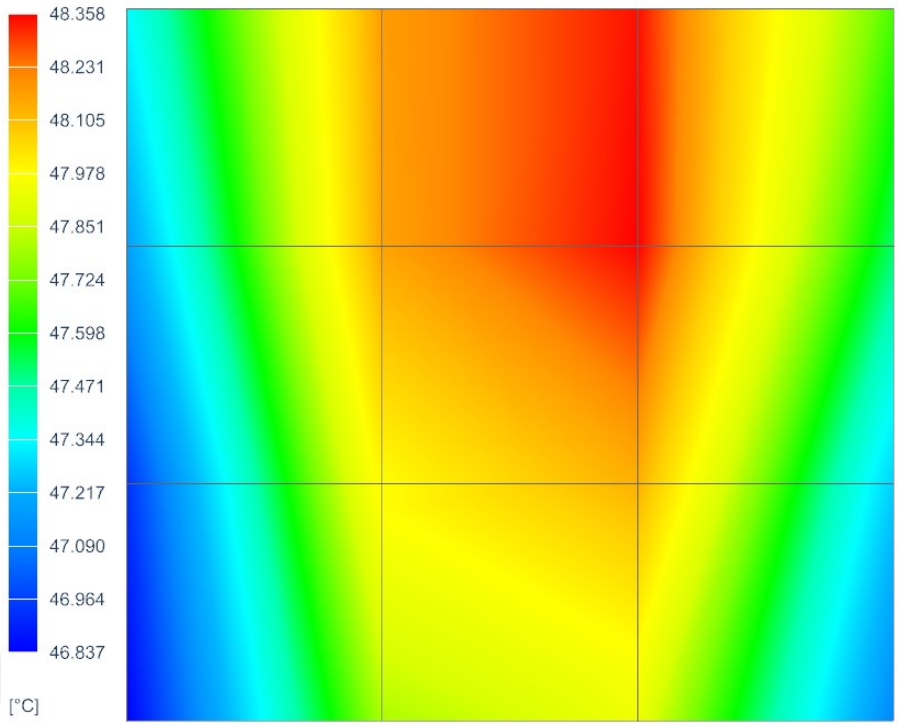
- Ekipmanların modelleri yer almaktadır.
- Kablo/RF/SADM ısı yayınımları panele eşit olarak yayılmıştır.
- Isı boruları modelde yer almaktadır.
- Güneş Panelleri-Anten yer almaktadır
- İç radyasyon etkisi hem yokken hem de varken çözdürülmüştür.
- Yörüngede hesaplama noktası sayısı=12
- Yörünge Sayısı=3
- Zaman Adımları=240 sn=4 dk
- Başlangıç Sıcaklığı=20 °C
- Kış Gündönümü

7.1.2.1 MODEL B-İç Işınım Hesabının Dahil Edilmediği Durum

İlk olarak iç ışınımın dahil edilmediği 21 Aralık senaryosu çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar bu bölümde paylaşılmıştır. Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de güney görev yükü radyatörünün en yüksek olduğu andaki yüzey sıcaklıklarının dağılımı verilmiştir.

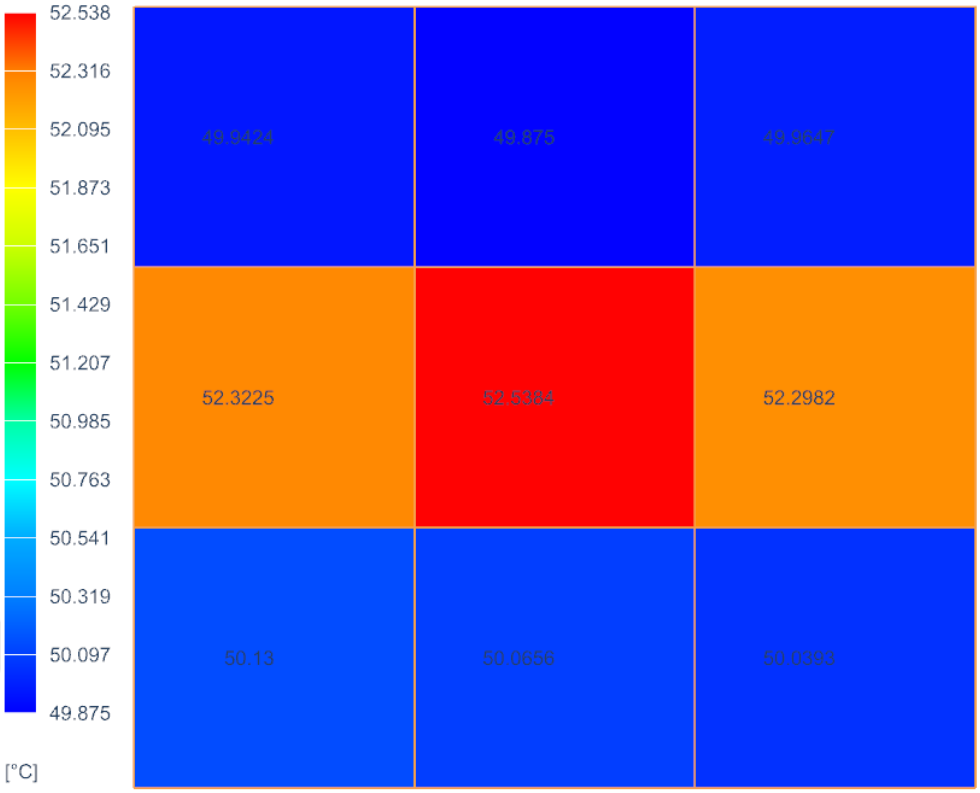


Şekil 7.7 Model B güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=181440sn)

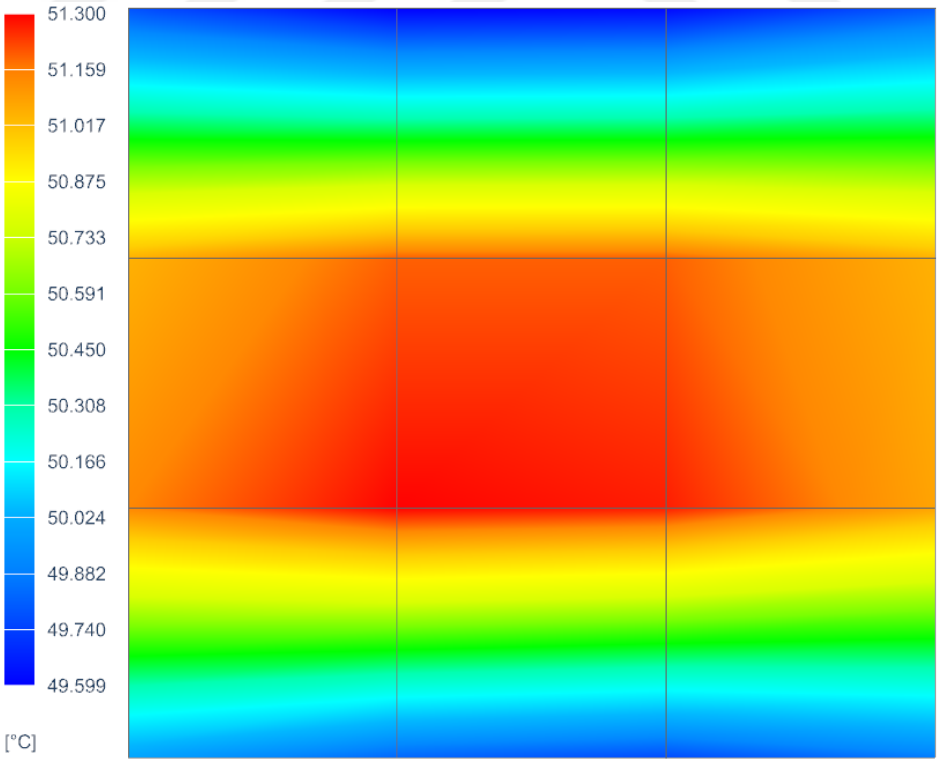


Şekil 7.8 Model B güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=181440sn)- Düğüm gösterimi

Ortalama radyatör sıcaklığının 47.8 °C olduğu görülmektedir. Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da ise sırasıyla güney görev yükü paneli iç yüzeyinin en yüksek olduğu andaki (t=181440sn) eleman ve düğüm bazında sıcaklık dağılımları verilmiştir. Panel iç yüzeyinin sıcaklık ortalamasının 50.8 °C olduğu görülmüştür. Genel ortalamada panel iç ve dış yüzü arasında yaklaşık 3 °C fark olduğu görülse de ısı yayınımın en yoğun olduğu TWT bölgesinde yaklaşık 4.5 °C olduğu görülmektedir. EPC bölgesinde ise iç yüzey ile dış yüzey arasında yaklaşık 2.5 °C fark görülmüştür.

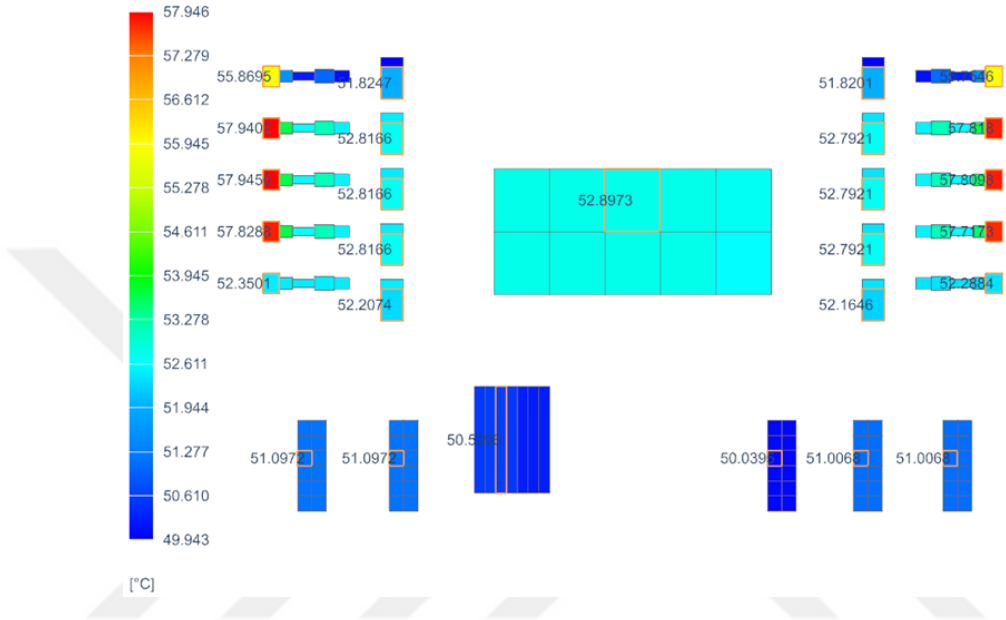


Şekil 7.9 Model B güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=181440sn)



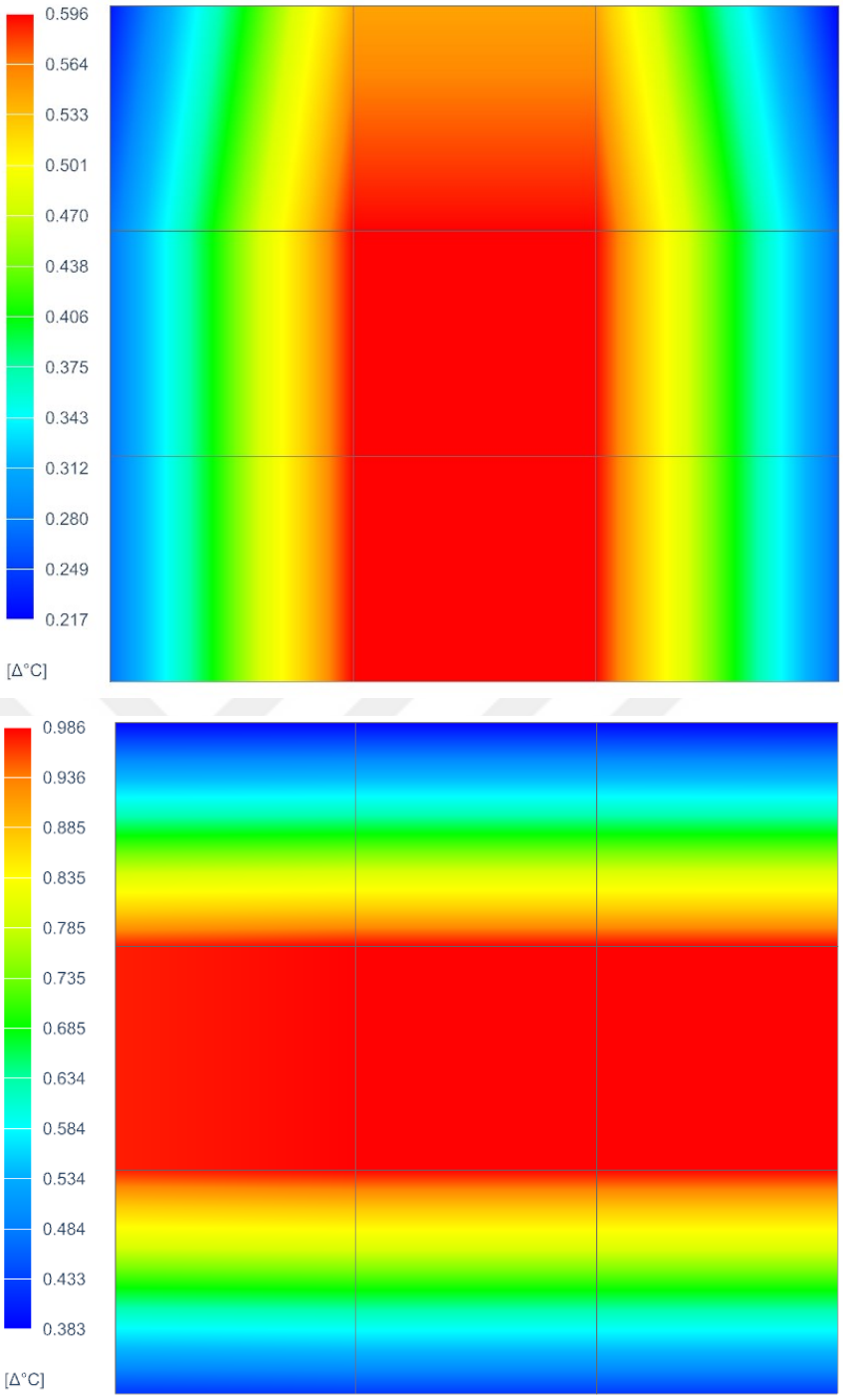
Şekil 7.10 Model B güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=181440sn)

Şekil 7.11'de ekipmanların taban alanlarının en yüksek sıcaklıkları verilmiştir. İşaretli sıcaklıklar ekipmanları Sıcaklık Referans Noktalarıdır (SRN). En yüksek sıcaklığa ulaşan ekipmanlar TWT'ler yaklaşık 57.9 °C iken düşük sıcaklık limiti nedeniyle panel için belirleyici olan EPC'lerin en yüksek sıcaklığının yaklaşık 51.1 °C olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre bütün ekipmanların Tablo 6.2'de verilen sıcaklık limitlerine uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 7.11 Model B güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları

Şekil 7.12'de ağ yapısında bulunan ekipmanların şekilleri, ısıl bağlantı yazılan ekipmanların konumları vb. sebepler ile hesaplamalarda oluşan tahmini sıcaklık hatalarının görselleri verilmiştir. Verilen görseller panel radyatör ve iç yüzeylerine aittir. Görselleri incelediğimizde iç yüzeyde ısı yayınımın yoğun olduğu bölgelerde maksimum 0.986 °C tahmini sıcaklık hatası olduğu görülmektedir.

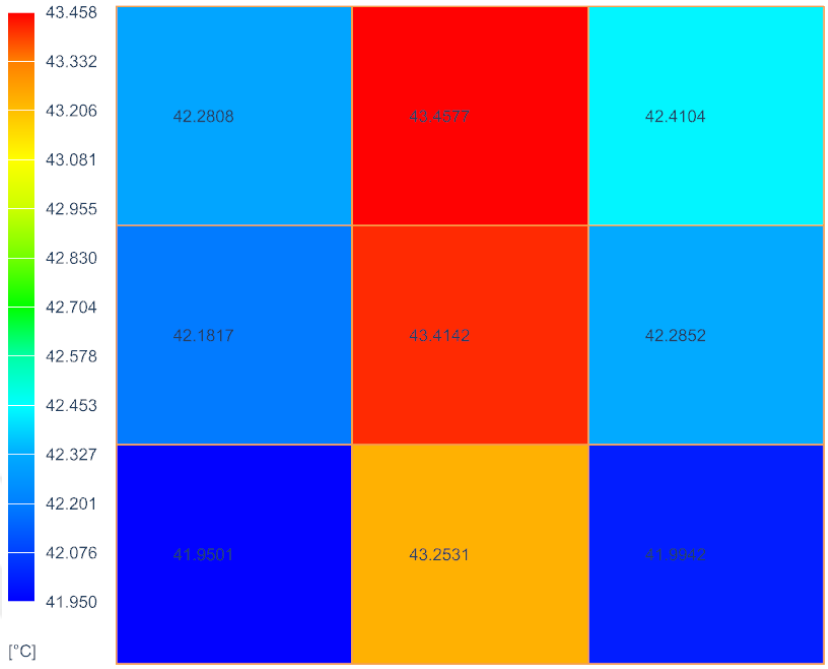


Şekil 7.12 Model B güney radyatör paneli ve iç yüzeyi tahmini sıcaklık hatası

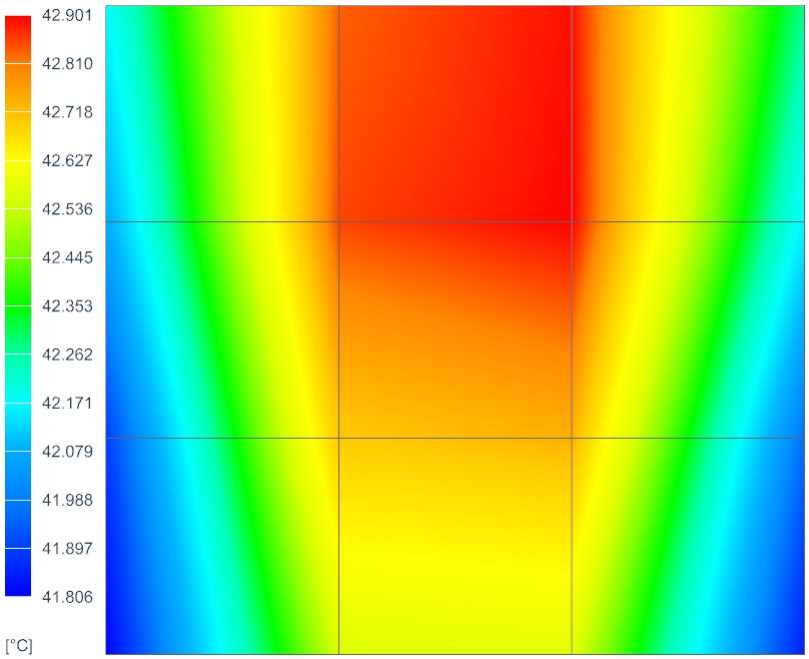
7.1.2.2 MODEL B-İç Işınım Aktif

Bir sonraki analizde panellerin iç yüzeylerine bir iç ışınım tanımlanmıştır ve bu bölümde iç ışınımın aktif olduğu analizin sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 7.13 ve

Şekil 7.14'te güney görev yükü radyatörünün en yüksek olduğu andaki yüzey sıcaklıklarının dağılımı verilmiştir.

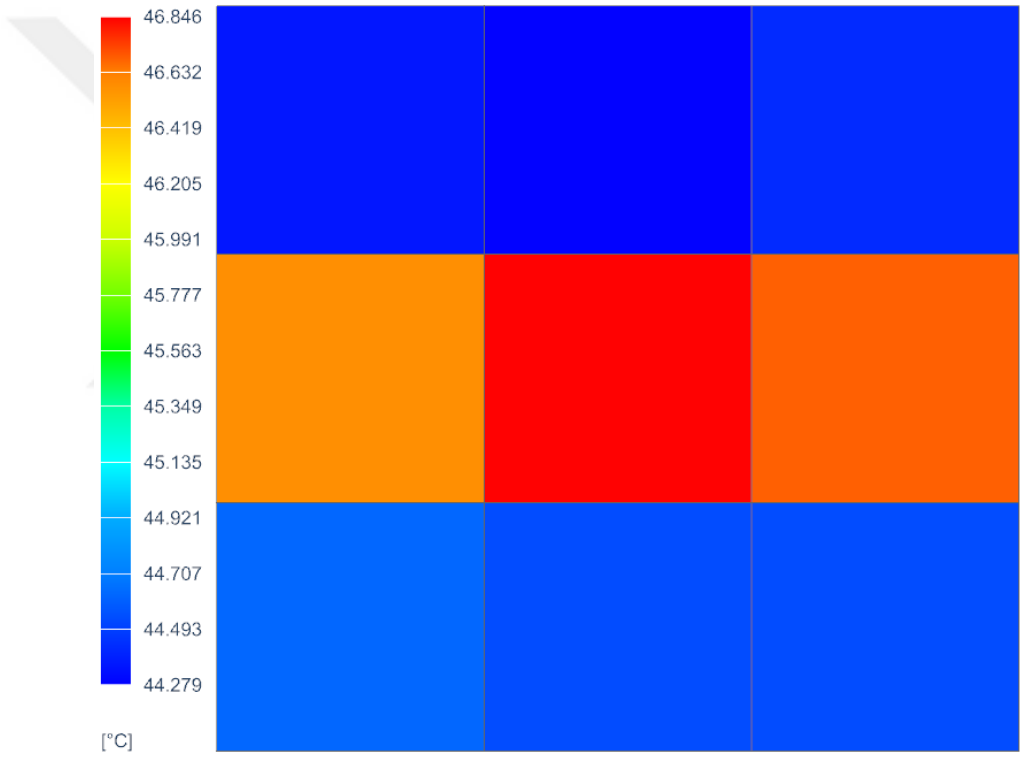


Şekil 7.13 Model B güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları-(t=235920sn) İç ışınım aktif

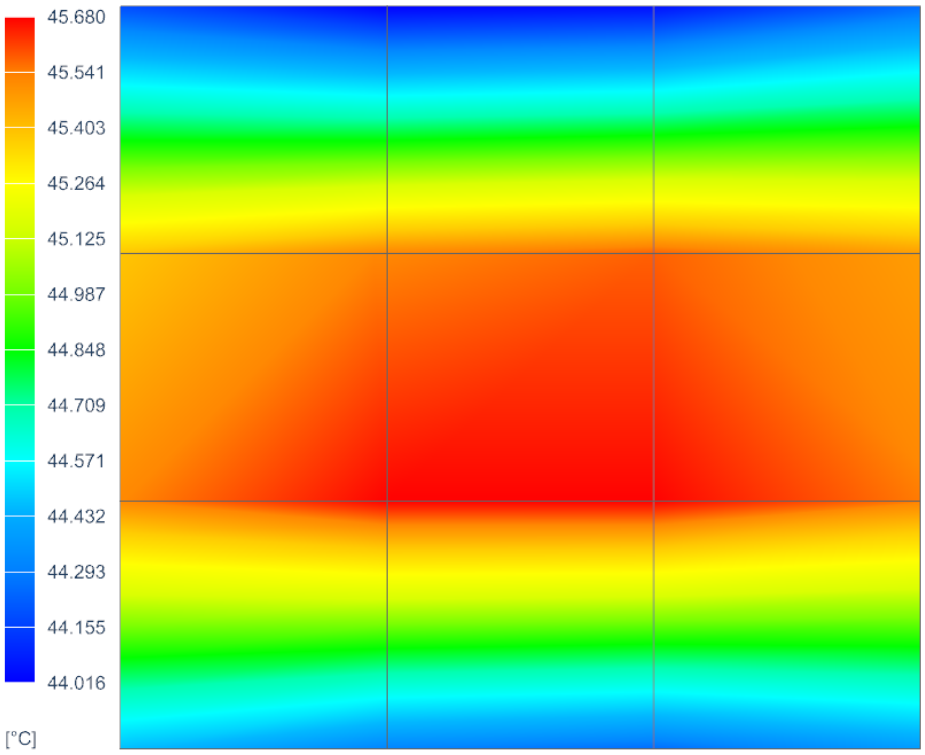


Şekil 7.14 Model B güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları-(t=235920sn)-İç ışınım aktif-Düğüm gösterimi

Ortalama radyatör sıcaklığının 42.6°C olduğu görülmektedir. Bu değer iç radyasyonun dahil edilmediği analizden 5.3 °C daha düşüktür. Kış gündönümü senaryosunda görece daha sıcak olan güney panel diğer panellere iç yüzünden ışınımla ısı kaybetmiştir. Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da panel iç yüzeyinin en yüksek olduğu anda (t=253920sn) sırasıyla eleman ve düğüm bazında sıcaklık dağılımları verilmiştir. Panel iç yüzeyinin sıcaklık ortalamasının 45.2°C olduğu görülmüştür. Genel ortalamada panel iç ve dış yüzü arasında yaklaşık 2.6 °C fark olduğu görülse de ısı yayınımın en yoğun olduğu TWT bölgesinde yaklaşık 4.1°C olduğu görülmektedir. EPC bölgesinde ise iç yüzey ile dış yüzey arasında yaklaşık 2.1 °C fark görülmüştür.

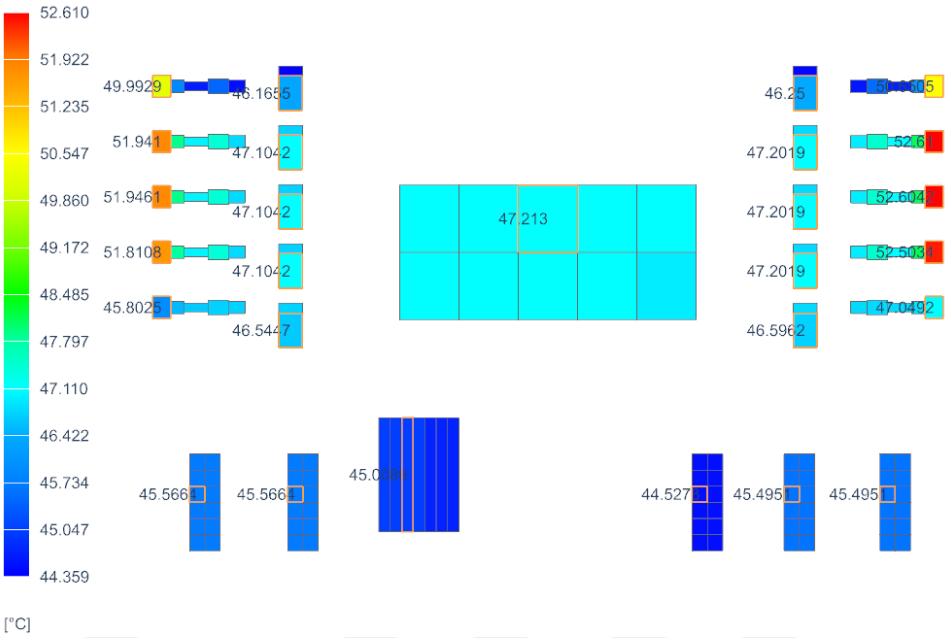


Şekil 7.15 Model B güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=235920sn)-İç ışınım aktif



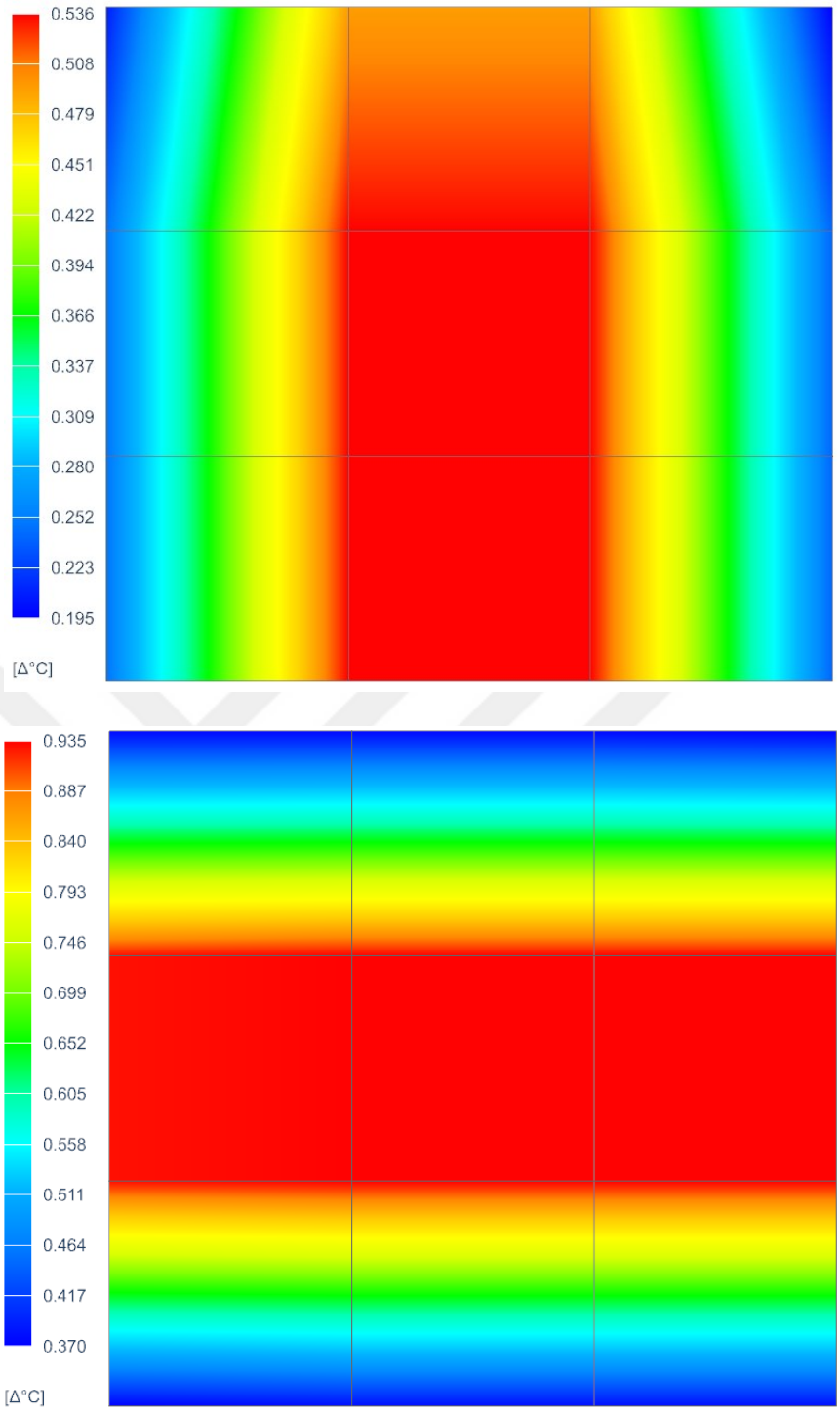
Şekil 7.16 Model B güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=235920sn)-İç ışınım aktif (Düğüm gösterimi)

Şekil 7.17'de ekipmanların taban alanlarının en yüksek sıcaklıkları verilmiştir. İşaretli sıcaklıklar, ekipmanların Sıcaklık Referans Noktalarındaki (SRN) sıcaklıklardır. En yüksek sıcaklığa ulaşan ekipmanlar TWT'ler yaklaşık 52.6 °C iken düşük sıcaklık limiti nedeniyle panel için belirleyici olan EPC'lerin en yüksek sıcaklığı 45.6°C olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre bütün ekipmanların Tablo 6.2'de verilen sıcaklık limitlerine uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 7.17 Model B güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları-İç ışınım aktif

Şekil 7.18'de ağ yapısında bulunan ekipmanların şekilleri, ısıl bağlantı yazılan ekipmanların konumları vb. sebepler ile hesaplamalarda oluşan tahmini sıcaklık hatalarının görselleri verilmiştir. Verilen görseller panel iç yüzeyi ve radyatör yüzeylerine aittir. Görselleri incelediğimizde ısı yayınımın yoğun olduğu bölgelerde maksimum 0.94 °C tahmini sıcaklık hatası olduğu görülmektedir (6.5.3'te anlatılan hesaba göre). Radyatör yüzeyinde ise maksimum 0.54°C sıcaklık hatası görülmektedir.



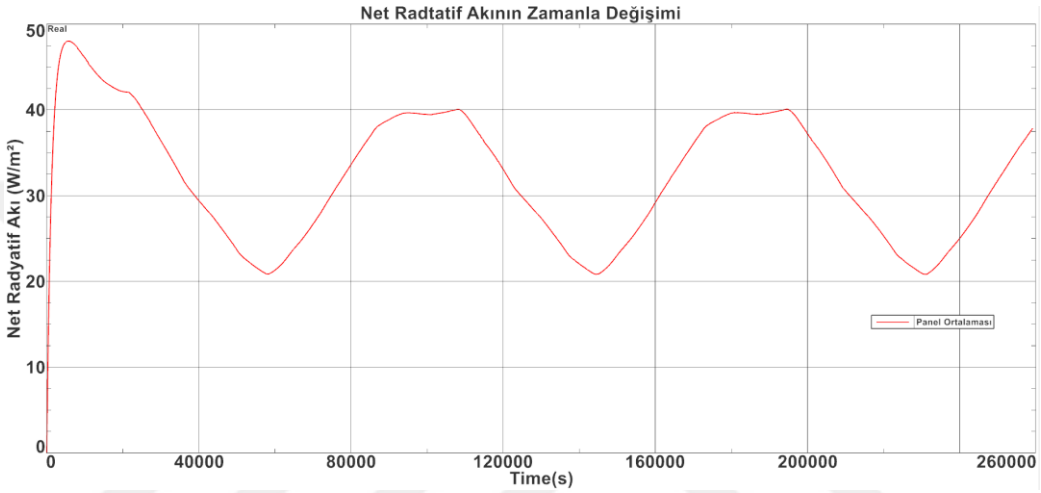
Şekil 7.18 Model B güney radyatör paneli ve iç yüzeyi tahmini sıcaklık hatası-İç ışınım aktif

İç ışınım etkisi:

- 47.9-42.6=5.3 °C Güney radyatör sıcaklığında düşüş.

- 51.1-45.6=5.5 °C Maksimum EPC Sıcaklığında Düşüş

Güney görev yükü panelinin iç yüzünden diğer panellere giden net ışınım akısının ortalama değerini veren grafik Şekil 7.19'da verilmiştir. Panel iç yüzey alanını yaklaşık 2.8 m^2 olduğunu biliyoruz. Grafiğe baktığımızda net ışınım akısının minimumda 20 W/m^2 olduğu görüyoruz. Yani en düşük değerinde iç panelden yaklaşık 56 W ısı atılmaktadır. Ortalamada ise yaklaşık 30x2.8=84 W ısı atmaktadır.



Şekil 7.19 Model B güney görev yükü iç yüzünün net ışınım akısı

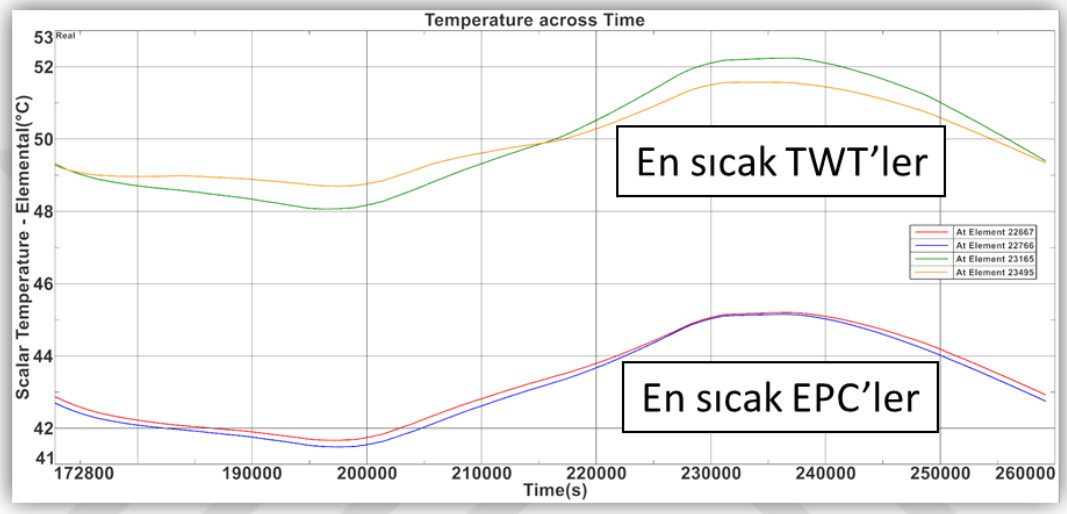
7.1.2.3 MODEL B-Karar Durum Başlangıç Sıcaklığı ile 1 Yörünge

Bu bölümde çözüm sırasında kullanılan yörünge sayısını dolayısıyla çözüm süresi ve sonuç dosyası boyutlarını azaltmak için yapılan analizin sonuçları verilmiştir. Yörünge analizlerinde ekipman sıcaklıklarına verilen başlangıç sıcaklık değerlerinin etkisinin analizlere yansımaması ECSS'te yer aldığı üzere sıcak senaryolarda 3, ısıtıcı kullanılan soğuk senaryolarda ise 5 yörünge kullanılır. Ve genellikle başlangıç sıcaklıkları 20 °C olarak ayarlanır. Bu durum çözüm süresini oldukça uzatmaktadır.

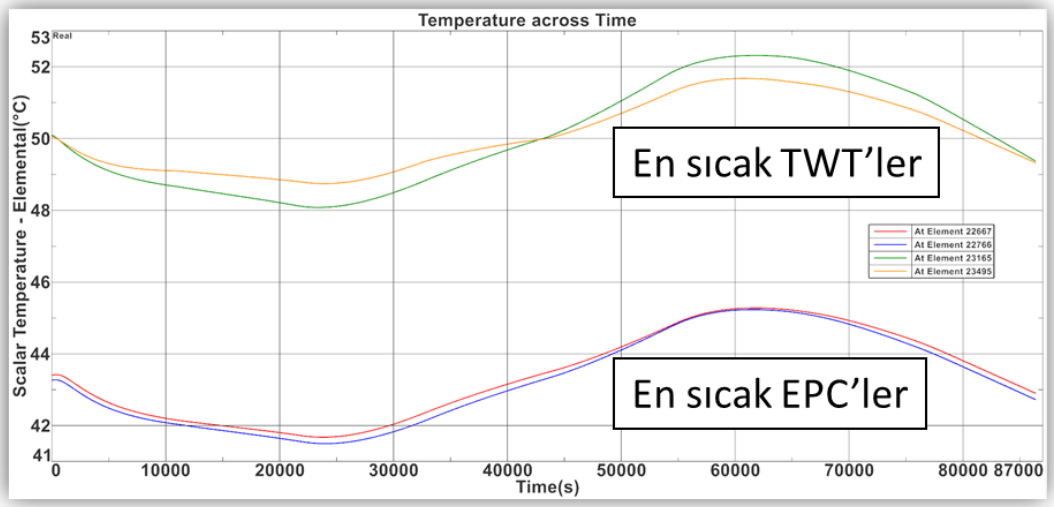
Bunun yerine bu bölümde yeni bir yaklaşım izlenmiştir. Sonuçları tipik olarak kullanılan 3 yörünge analizleri ile karşılaştırılarak kullanımının uygunluğu değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımda paket yazılımda aynı senaryo için bir kararlı durum analizi yapılarak her elemanın dengede hangi sıcaklıkta olacağı

bulunmuştur. Geçici durum analizine geçilirken de başlangıç sıcaklığı olarak kararlı durumda her bir eleman için bulunan sıcaklıklar kullanılmıştır.

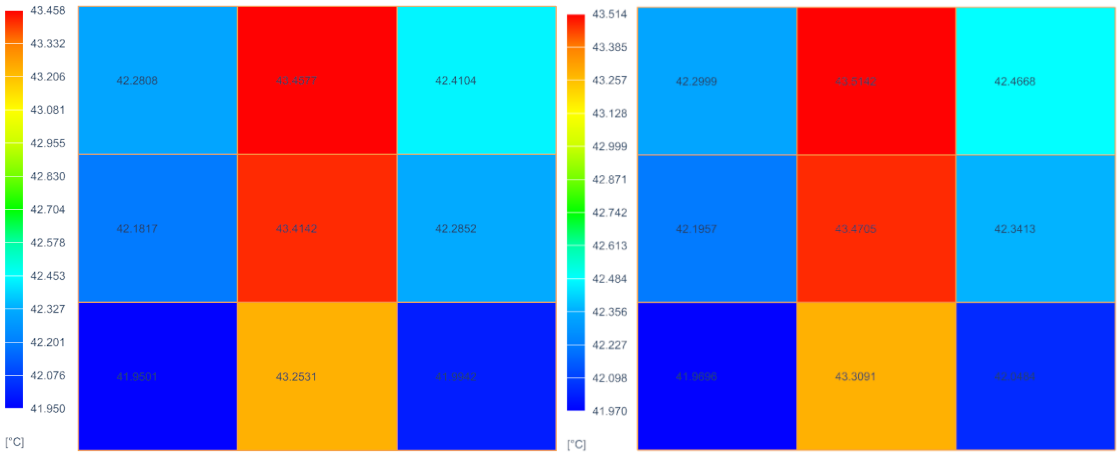
Karşılaştırma için en sıcak ve en kritik ekipmanlar olan TWT ve EPC'ler seçilmiştir. Şekil 7.20 ve Şekil 7.21'de sırasıyla 3 yörünge ve kararlı durum analizi sonrası başlatılan 1 yörünge analizi sonucunda seçilen ekipman sıcaklıkları verilmiştir. Şekil 7.22'de ise radyatör sıcaklıklarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek anlarda 0.1 °C'den yüksek farklılıklar gözlenmemiştir.



Şekil 7.20 Model B-3 yörünge analizi en sıcak en kritik ekipmanlar



Şekil 7.21 Model B-1 yörünge analizi en sıcak en kritik ekipmanlar



Şekil 7.22 Model B-3 yörünge (solda) ve kararlı durum sonrası 1 yörünge (sağda) güney radyatör sıcaklıkları

Yapılan karşılaştırma da kayda değer bir fark görülmemiştir. Buna ek olarak çözüm süreleri ve sonuç dosyalarının boyutlarını kıyasladığımızda Model B için çözüm süresinde kayda değer bir değişiklik olmadığını fakat sonuç dosyalarında 2.36 GB boyutunda düşüş olduğu görülmüştür (Tablo 7.1). Bir sonraki bölümde bu karşılaştırma daha detaylı bir ağ yapısında sahip olan Model-C üzerinden de yapılmıştır.

Tablo 7.1 3 yörünge ve kararlı durum sonrası 1 yörüngenin karşılaştırılması

	3 Yörünge	**Kararlı Durum+1Yörünge**
Çözüm Süresi	25 dk 12 sn	25 dk 26 sn
Kullanılan çekirdek	1	1
Sonuç Dosyaları	3.80 GB	1.44 GB

7.1.3 MODEL C-Detaylı Ağ Yapısı

Bu kısımda ekipman eleman boyutlarına yakın boyutlarda oluşturulan ve daha fazla detay içeren panel ağ yapısına sahip Model-C'nin analiz sonuçları verilmiştir.

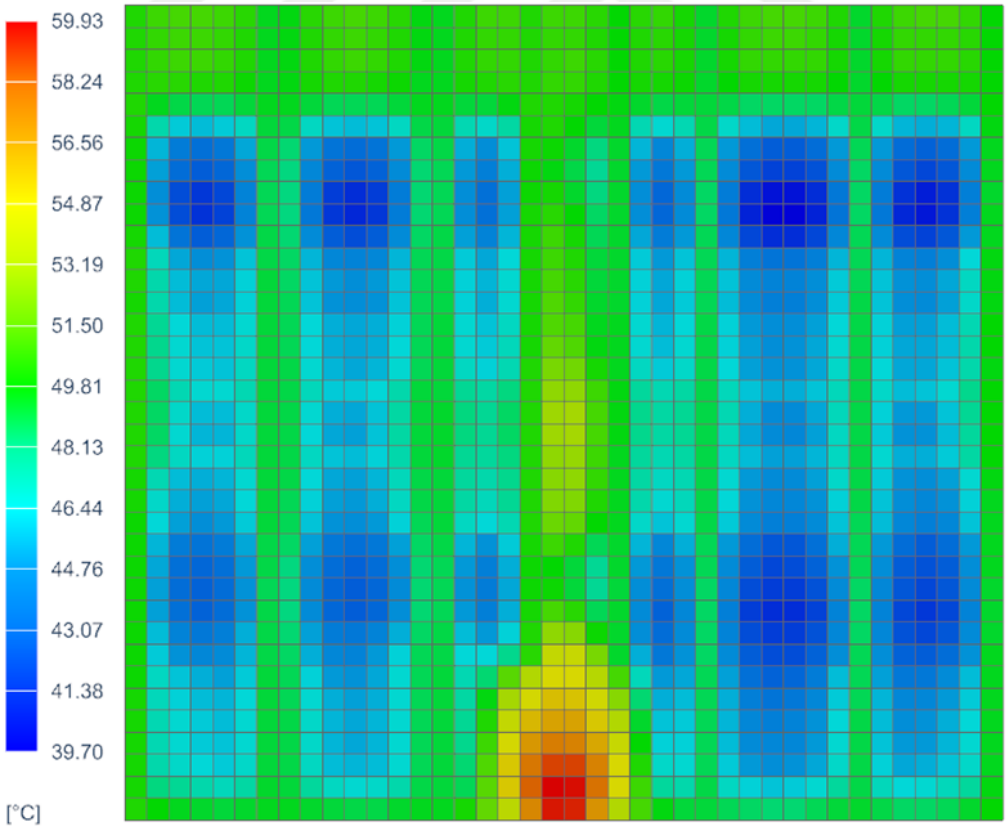
Model C aşağıda verilen özelliklerle çözdürülmüştür:

- Ekipmanların modelleri yer almaktadır.

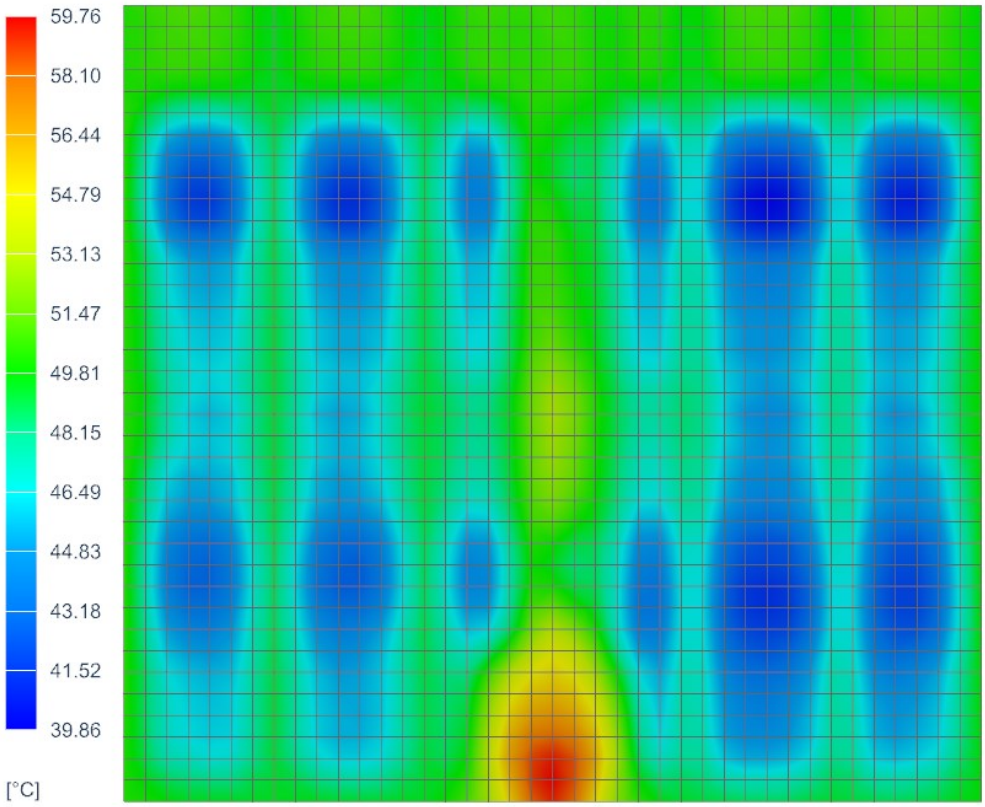
- Kablo/RF/SADM ısı yayınımları panele eşit olarak yayılmıştır.
- Isı boruları modelde yer almaktadır.
- Güneş Panelleri-Anten yer almaktadır
- İç ışınım etkisi hem yokken hem de varken çözdürülmüştür.
- Yörüngede hesaplama noktası sayısı=12
- Yörünge Sayısı=3
- Zaman Adımları=240 sn=4 dk
- Başlangıç Sıcaklığı=20 °C
- Kış Gündönümü

7.1.3.1 MODEL C-İç Işınım Hesabının Dahil Edilmediği Durum

İlk olarak iç ışınımın dahil edilmediği 21 Aralık senaryosu çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar bu bölümde paylaşılmıştır. Şekil 7.23 ve Şekil 7.24'te güney görev yükü radyatörünün en yüksek olduğu andaki yüzey sıcaklıklarının dağılımı verilmiştir.



Şekil 7.23 Model C-3 güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları

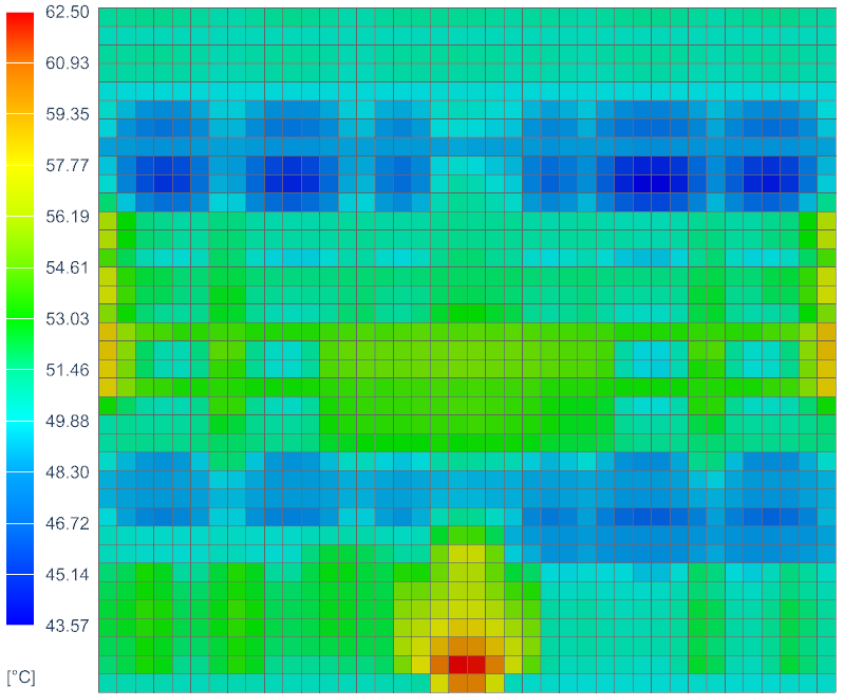


Şekil 7.24 Model C güney panel radyatör yüzey sıcaklıkları (t=253200s)-Düğüm gösterimi

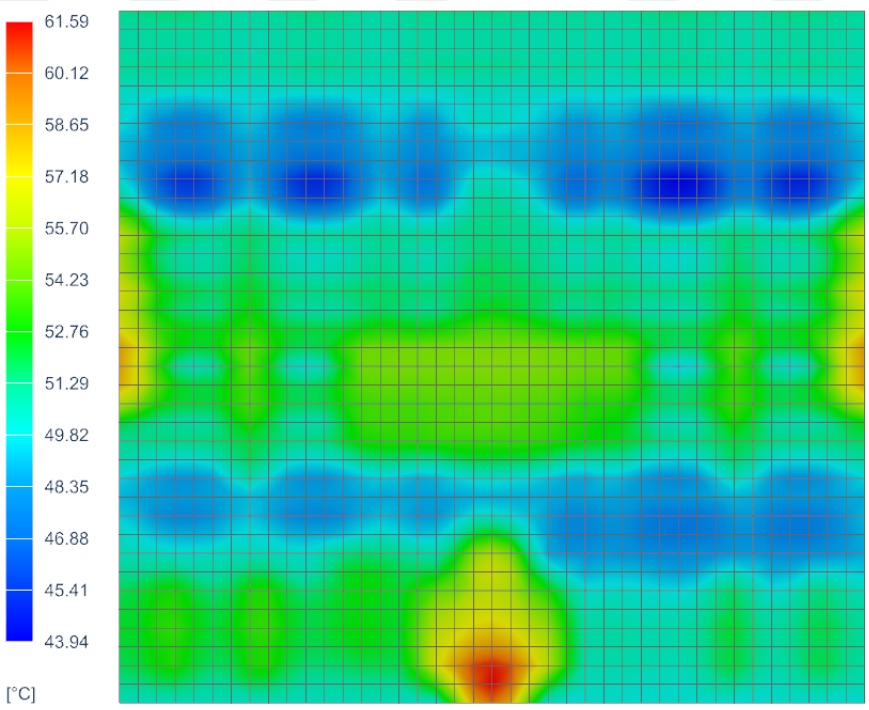
Ortalama radyatör sıcaklığının 47.4 °C olduğu görülmektedir. Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'da ise sırasıyla güney görev yükü paneli iç yüzeyinin en yüksek olduğu anda (t=253200sn) eleman ve düğüm bazında sıcaklık dağılımları verilmiştir. Panel iç yüzeyinin sıcaklık ortalamasının 50.9 °C olduğu görülmüştür. Genel ortalamada panel iç ve dış yüzü arasında yaklaşık 2.5 °C fark olduğu görülse de ısı yayınımın en yoğun olduğu TWT bölgesinde yaklaşık 5 °C olduğu görülmektedir. EPC bölgesinde ise iç yüzey ile dış yüzey arasında yaklaşık 4 °C fark görülmüştür.

Panellerin geneline baktığımız zaman radyatör yüzeyinde (Şekil 7.24) dikey ısı borularının ve ÇKYB'nin olduğu bölgelerde diğer bölgeler göre daha yüksek sıcaklıklar gözlenmiştir. Ekipmanlar bulunan iç yüzeyde (Şekil 7.26) ise yoğun ısı yayınımı olan TWT, ONET bölgesinde diğer bölgelere göre daha yüksek sıcaklıklar görülmüştür. En sıcak bölgeler ÇYKB kaplı olan güneş paneli sürüş mekanizması

(61.59°C) olduğu görülmektedir. Ekipman bulunmayan ve radyatör yüzeyi açık olan bölgelerde ise en düşük sıcaklıklar (43.94°C) gözlenmiştir.

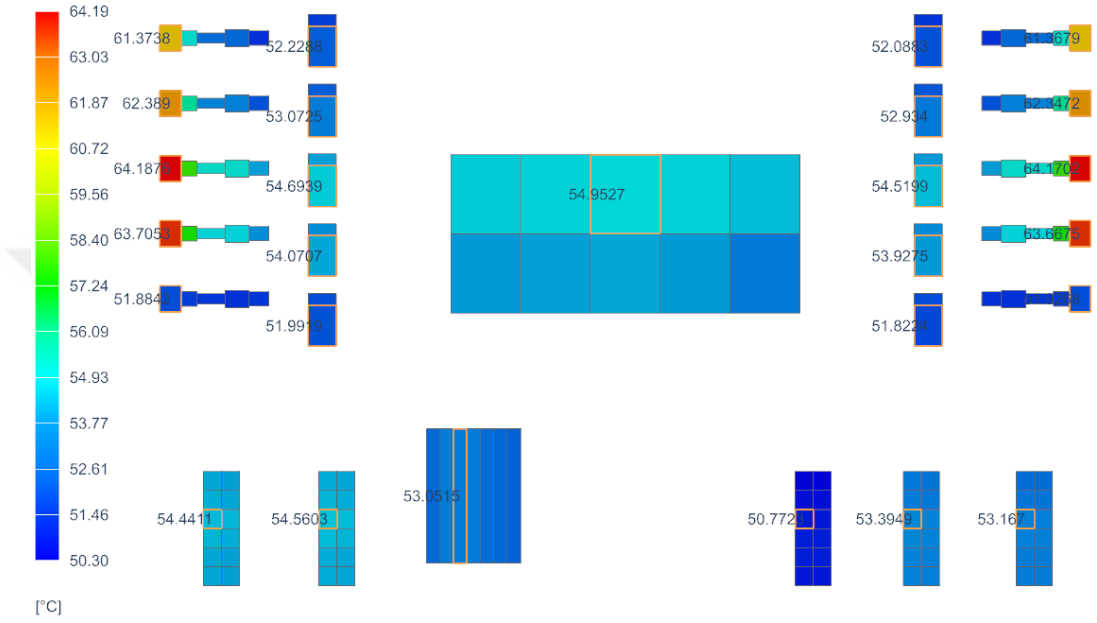


Şekil 7.25 Model C güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=253200s)



Şekil 7.26 Model C güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=253200s)-Düğüm gösterimi

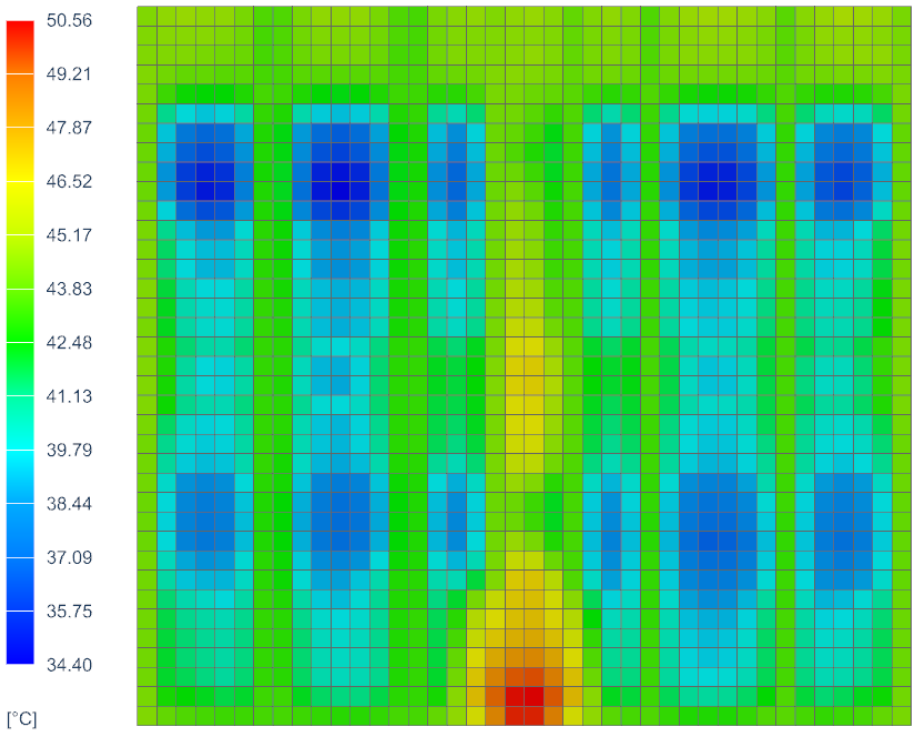
Şekil 7.27'de ekipmanların taban alanlarının en yüksek sıcaklıkları verilmiştir. İşaretli sıcaklıklar ekipmanları Sıcaklık Referans Noktalarıdır (SRN). En yüksek sıcaklığa ulaşan ekipmanlar TWT'ler yaklaşık 64.2 °C iken düşük sıcaklık limiti nedeniyle panel için belirleyici olan EPC'lerin en yüksek sıcaklığının yaklaşık 54.6 °C olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre bütün ekipmanların Tablo 6.2'de verilen sıcaklık limitlerine uygun olduğu görülmüştür.



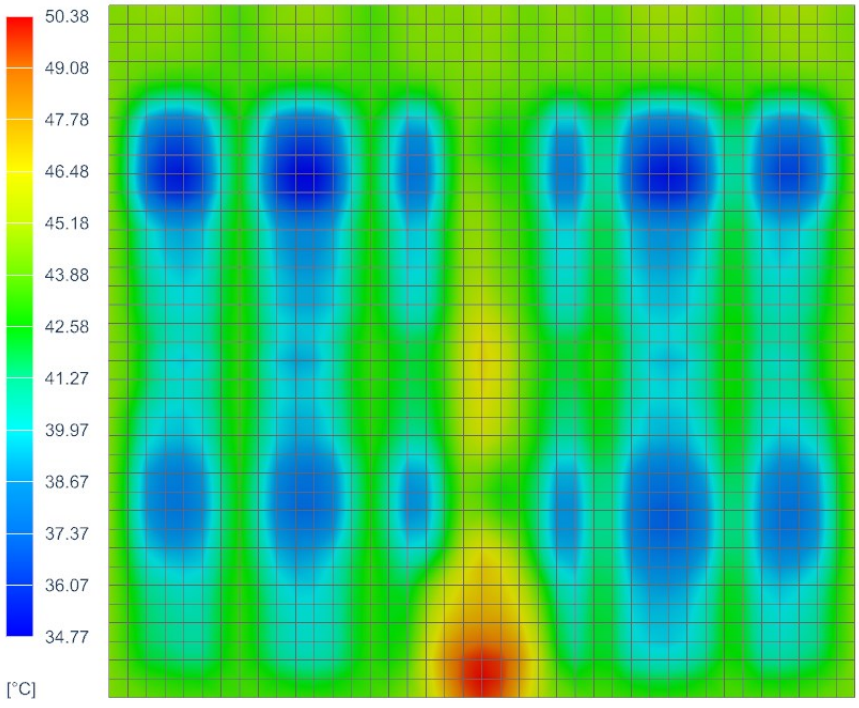
Şekil 7.27 Model C güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları

7.1.3.2 MODEL C-İç Işınım Aktif

Bir sonraki analizde panellerin iç yüzeylerine bir iç ışınım tanımlanmıştır ve bu bölümde iç ışınımın aktif olduğu analizin sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 7.28 ve Şekil 7.29'da güney görev yükü radyatörünün en yüksek olduğu andaki yüzey sıcaklıklarının dağılımı verilmiştir.



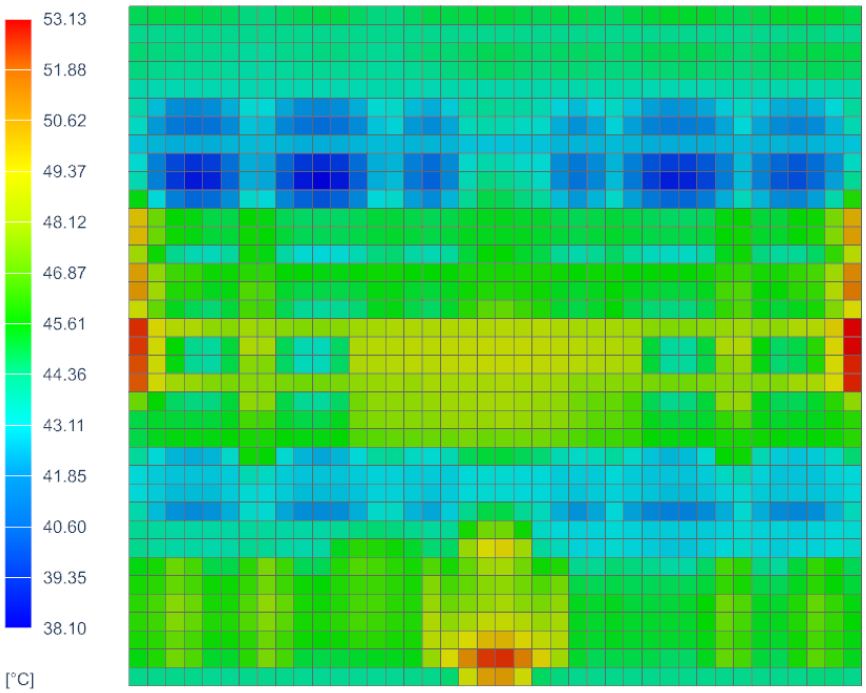
Şekil 7.28 Model C- Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=234240s)-İç Işınım Aktif



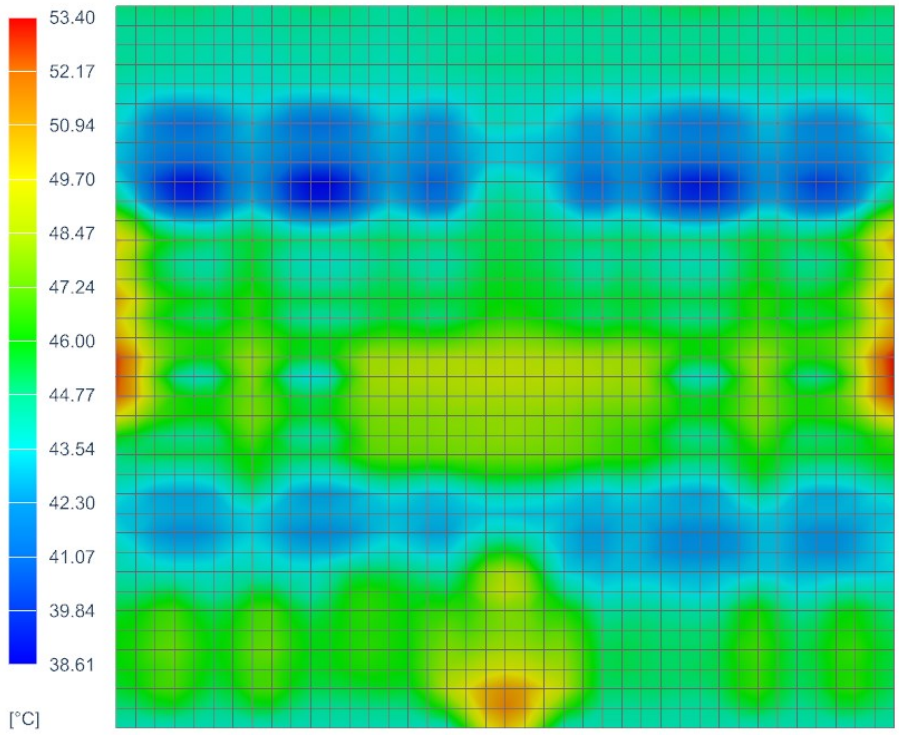
Şekil 7.29 Model C- Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=234240s)-İç Işınım Aktif-Düğüm Gösterimi

Ortalama radyatör sıcaklığının 41.6°C olduğu görülmektedir. Bu değer iç ışınımın dahil edilmediği analizden 5.8 °C daha düşüktür. Kış gündönümü senaryosunda görece daha sıcak olan güney panel diğer panellere iç yüzünden ışınımla ısı kaybetmiştir. Şekil 7.30 ve Şekil 7.31'de paneli iç yüzeyinin en yüksek olduğu anda (t=253200sn) sırasıyla eleman ve düğüm bazında sıcaklık dağılımları verilmiştir. Panel iç yüzeyinin sıcaklık ortalamasının 44.9 °C olduğu görülmüştür. Genel ortalamada panel iç ve dış yüzü arasında yaklaşık 3.3 °C fark olduğu görülse de ısı yayınımın en yoğun olduğu TWT bölgesinde yaklaşık 4.5°C olduğu görülmektedir. EPC bölgesinde ise iç yüzey ile dış yüzey arasında yaklaşık 3.4 °C fark görülmüştür.

Panellerin geneline baktığımız zaman radyatör yüzeyinde (Şekil 7.29) dikey ısı borularının ve ÇKYB'nin olduğu bölgelerde diğer bölgeler göre daha yüksek sıcaklıklar gözlenmiştir. Ekipmanlar bulunan iç yüzeyde (Şekil 7.31)ise yoğun ısı yayınımı olan TWT, ONET bölgesinde diğer bölgelere göre daha yüksek sıcaklıklar görülmüştür. En sıcak bölgeler ÇYKB kaplı olan güneş paneli sürüş mekanizması (53.4°C) olduğu görülmektedir. Ekipman bulunmayan ve radyatör yüzeyi açık olan bölgelerde ise en düşük sıcaklıklar (38.6°C) gözlenmiştir.

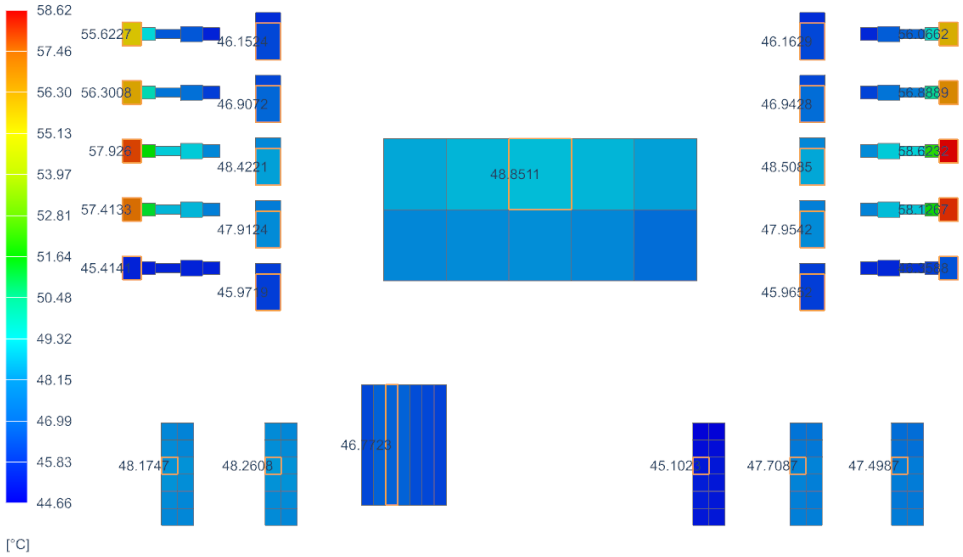


Şekil 7.30 Model C-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=234240s)-İç ışınım aktif



Şekil 7.31 Model C-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=234240s)-İç ışınım aktif-Düğüm gösterimi

Şekil 7.32'de ekipmanların taban alanlarının en yüksek sıcaklıkları verilmiştir. İşaretli sıcaklıklar, ekipmanların Sıcaklık Referans Noktalarındaki (SRN) sıcaklıklardır. En yüksek sıcaklığa ulaşan ekipmanlar TWT'ler yaklaşık 58.6 °C iken düşük sıcaklık limiti nedeniyle panel için belirleyici olan EPC'lerin en yüksek sıcaklığı 48.3 °C olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre bütün ekipmanların Tablo 6.2'de verilen sıcaklık limitlerine uygun olduğu görülmüştür.

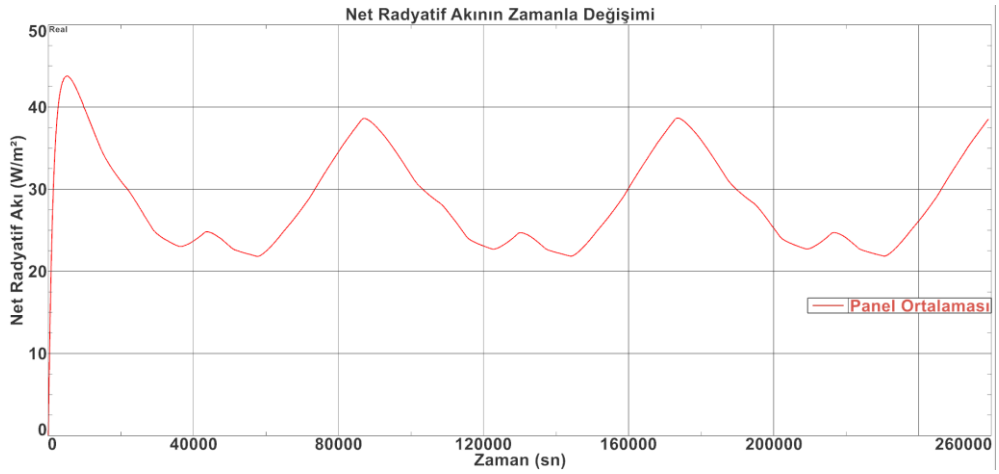


Şekil 7.32 Model C- güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları

İç ışınımın etkisi ile:

- 47.4-41.6=5.8 °C Güney radyatör sıcaklığında düşüş,
- 54.6-48.3=6.3 °C Maksimum EPC sıcaklığında düşüş yaşanmıştır.

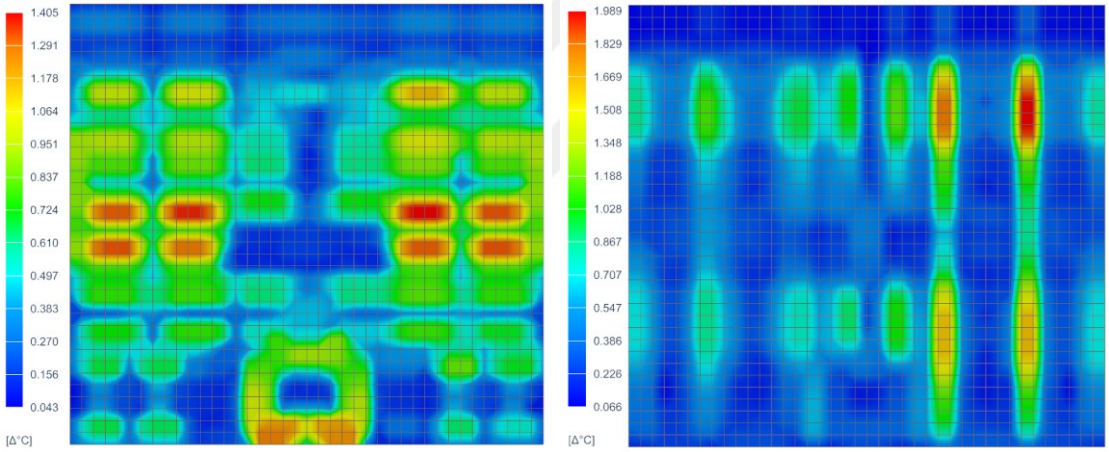
Güney görev yükü panelinin iç yüzünden diğer panellere giden net ışınım akısının ortalama değerini veren grafik Şekil 7.33'te verilmiştir. Panel iç yüzey alanını yaklaşık 2.8 m^2 olduğunu biliyoruz. Grafiğe baktığımız da net ışınım akısının minimumda 22 W/m^2 olduğu görüyoruz. Yani en düşük değerinde iç panelden yaklaşık 61.6 W ısı atılmaktadır. Ortalamada ise yaklaşık 30x2.8=84 W ısı atmaktadır.



Şekil 7.33 Model C güney görev yükü iç yüzünün net ışınım akısı

Model B ve model C'de incelenen iç ışınım etkilerine göre panel iç yüzünden ortalama 84 W kadar ısıyı uydu iç yüzeylerine göndermektedir. Bu da ekipman sıcaklıklarında ortalama 6 °C düşüş sağlamaktadır. Bu kısımdan sonraki detaylı ağ yapısı içeren Model D ve Model E'de iç ışınım aktif edilerek analizler koşturulmuştur.

Şekil 7.34'te ağ yapısında bulunan ekipmanların şekilleri, ısıl bağlantı yazılan ekipmanların konumları vb. sebepler ile hesaplamalarda oluşan tahmini sıcaklık hatalarının görselleri verilmiştir. Verilen görseller panel iç yüzeyi ve radyatör yüzeylerine aittir. Görselleri incelediğimizde ısı yayınımın yoğun olduğu bölgelerde maksimum 1.4 °C tahmini sıcaklık hatası olduğu görülmektedir (6.5.3'te anlatılan hesaba göre). Radyatör yüzeyindeki ise dikey ısı borularının ısıyı radyatöre taşıdığı bölgelerde maksimum 1.99 °C sıcaklık hatası görülmektedir.



Şekil 7.34 Model C güney panel iç ve dış (radyatör) yüzey tahmini sıcaklık hatası

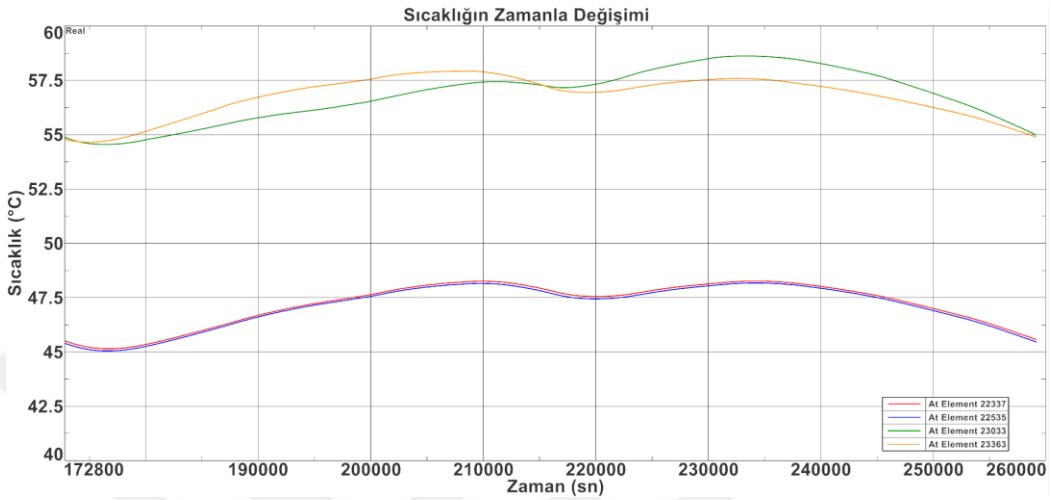
7.1.3.3 MODEL C-Karar Durum Başlangıç Sıcaklığı ile 1 Yörünge

Bu kısımda Model-B analizlerinde yapılan başlangıç sıcaklığının 20 °C ayarlanıp 3 yörünge çözülmesi yerine ilk önce bir kararlı durum analizi yapılıp elde edilen değerlerin başlangıç sıcaklığı olarak kullanılması ve 1 yörünge çözülmesi işlemi sonucunda elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

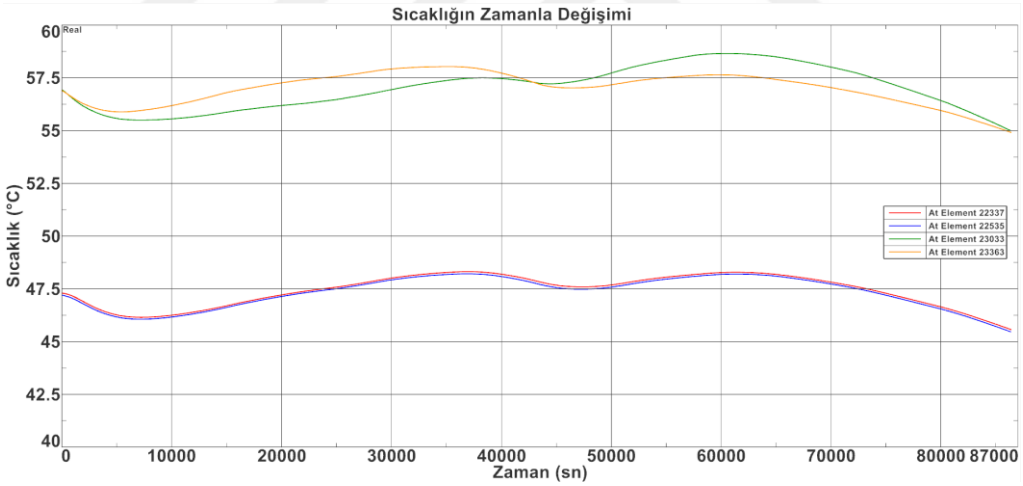
Karşılaştırma için en sıcak en kritik ekipmanlar olan TWT ve EPC'ler seçilmiştir. Şekil 7.35 ve Şekil 7.36'da sırasıyla 3 yörünge ve kararlı durum analizi sonrası

başlatılan 1 yörünge analizi sonucunda seçilen ekipman sıcaklıkları gösterilmiştir. Şekil 7.37'de ise radyatör yüzeylerinin sıcaklık dağılımları verilmiştir.

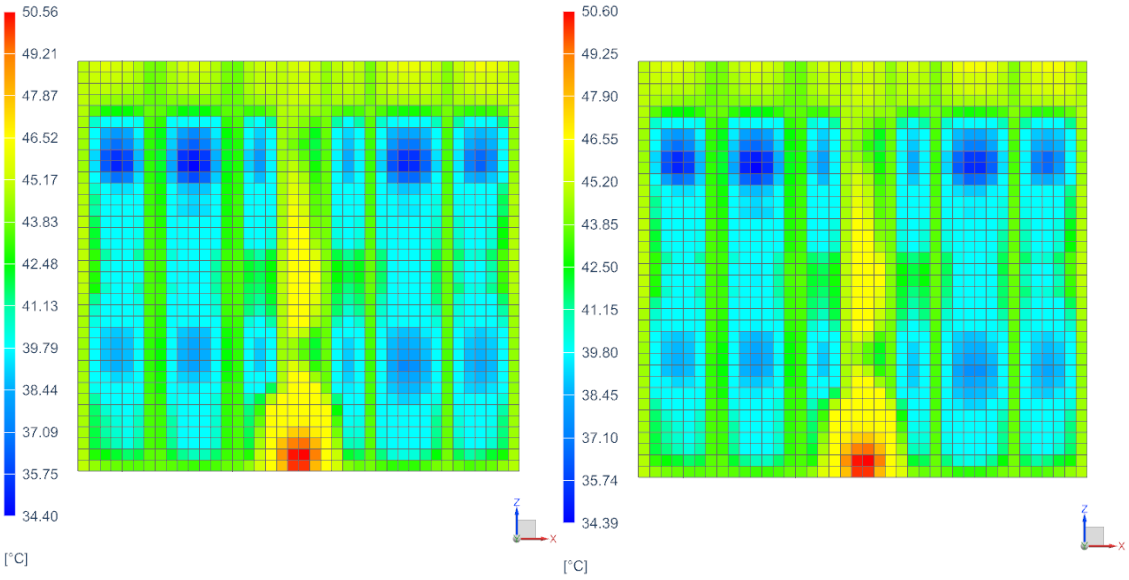
Sonuçlar incelendiğinde en yüksek anlarda 0.1 °C'den yüksek farklılıklar gözlenmemiştir.



Şekil 7.35 Model C 3 yörünge analizi en sıcak en kritik ekipmanlar



Şekil 7.36 Model C-1 yörünge analizi en sıcak en kritik ekipmanlar



Şekil 7.37 Model C-3 yörünge (solda) ve kararlı durum sonrası 1 yörünge (sağda) güney radyatör sıcaklıkları

Model B'de de yapılan bu karşılaştırma daha detaylı olan Model C'de de sıcaklık sonuçları açısından benzerlikler göstermiştir. Fakat daha detaylı olan Model-C'nin tek kararlı durum üzerine 1 yörünge zaman bağlı analizinin 3 yörünge zamana bağlı analize göre çözüm süresi ve dosya boyutları açısından Model B'ye göre önemli derecede düşüş olduğu görülmüştür. Tablo 7.2'de verilen bilgilere göre çözüm süresi 2 saat 24 dk'dan 57 dk'ya düşmüştür. Bunun yanında sonuçların dosya boyutları ise 10.2 GB'dan 4.28 GB'a düşmüştür.

Tablo 7.2 3 yörünge ve kararlı durum sonrası 1 yörüngenin karşılaştırılması

	3 Yörünge	**Kararlı Durum+1Yörünge**
Çözüm Süresi	2 saat 24 dk 30 sn	57 dk 22 sn
Kullanılan çekirdek	6	6
Sonuç Dosyaları	10.2 GB	4.28 GB

Model B ve Model C'de elde edilen sonuçlara göre 3 yörünge yerine kararlı durum sonrası 1 yörünge çözdürülmesinin zaman ve depolama alanı ihtiyacı açısından

kayda değer bir avantaj sağladığı görülmüştür. Bundan sonraki yapılan analizlerde bu yöntemin kullanılmasına karar verilmiştir.

7.1.4 MODEL D-Detaylı Ağ Yapısı-Ekipmanlara Göre Düzenlenmiş

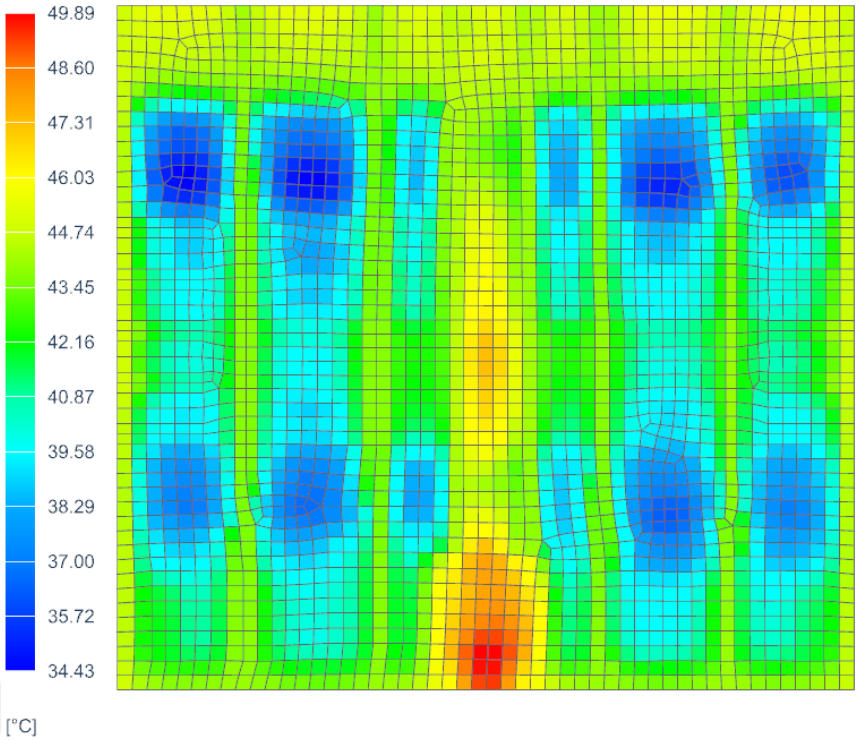
Bu kısımda 6.3.2.3 bölümünde tarif edilen ve Model-C'nin değiştirilerek güney görev yükü panelindeki elemanların ekipman taban alanlarına göre düzenlenmesiyle oluşturulan Model-D'nin analiz sonuçları verilmiştir. Bu modelin amaçlarından birinin sıcaklık hatalarını azaltmaktır.

Model D aşağıda verilen özelliklerle çözdürülmüştür:

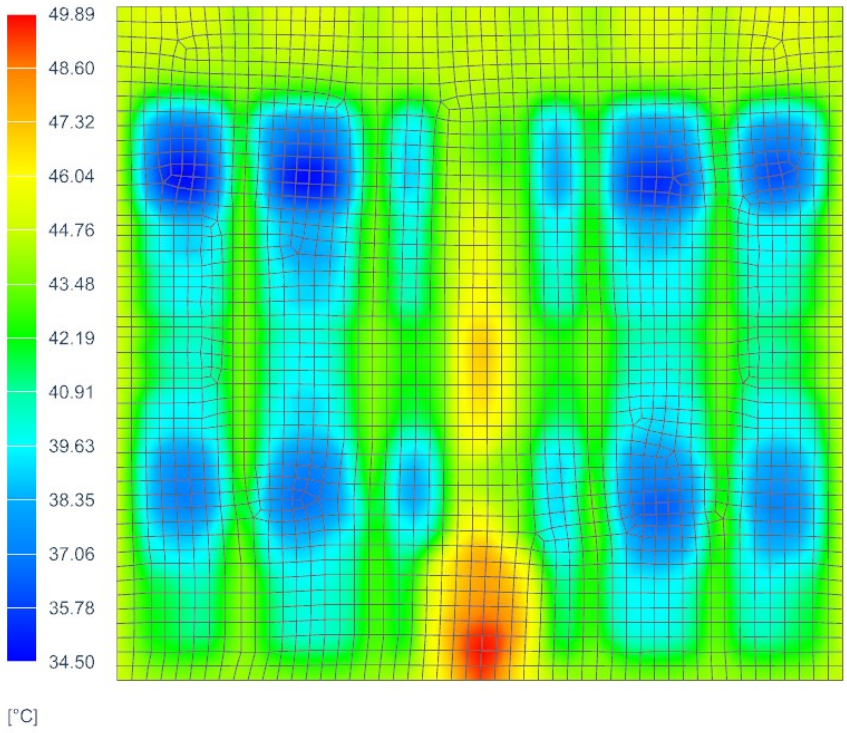
- Ekipmanların modelleri yer almaktadır.
- Kablo/RF/SADM ısı yayınımları panele eşit olarak yayılmıştır.
- Isı boruları modelde yer almaktadır.
- Güneş panelleri ve anten yer almaktadır
- İç ışınım etkisi varken çözdürülmüştür.
- Yörüngede hesaplama noktası sayısı=12
- Yörünge Sayısı=1
- Zaman Adımları=240 sn=4 dk
- Başlangıç Sıcaklığı=Kararlı Durum Analiz Sonrası Elde Edilen Sıcaklıklar
- Kış Gündönümü

7.1.4.1 MODEL D-İç Işınım Aktif

Bu bölümde 21 Aralık senaryosunun koşturulduğu analizin sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 7.38 ve Şekil 7.39'da güney görev yükü radyatörünün en yüksek olduğu andaki yüzey sıcaklıklarının dağılımı verilmiştir.



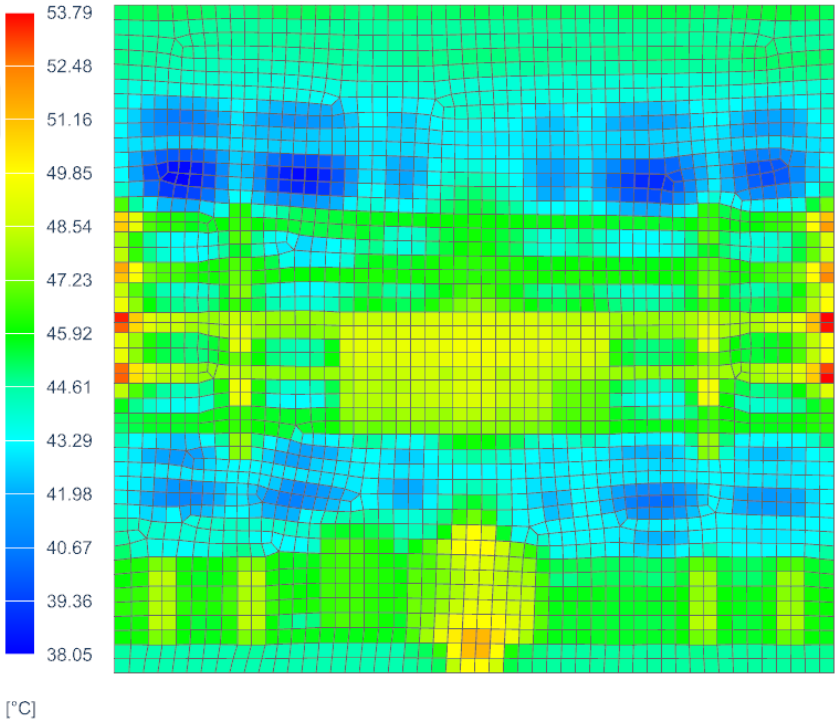
Şekil 7.38 Model D-Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=60480sn)



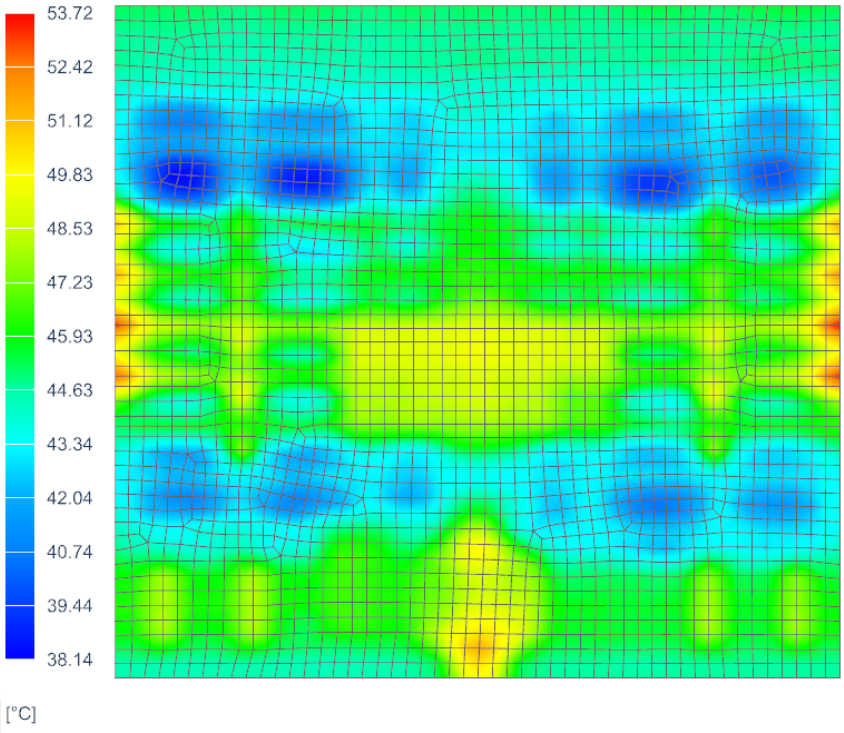
Şekil 7.39 Model D-Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=60480sn)-Düğüm gösterimi

Ortalama radyatör sıcaklığının 41.6°C olduğu görülmektedir. Şekil 7.40 ve Şekil 7.41'de paneli iç yüzeyinin en yüksek olduğu anda (t=60480sn) sırasıyla eleman ve düğüm bazında sıcaklık dağılımları verilmiştir. Panel iç yüzeyinin sıcaklık ortalamasının 44.9 °C olduğu görülmüştür. Genel ortalamada panel iç ve dış yüzü arasında yaklaşık 3.3 °C fark olduğu görülse de ısı yayınımın en yoğun olduğu TWT bölgesinde yaklaşık 4.5°C olduğu görülmektedir. EPC bölgesinde ise iç yüzey ile dış yüzey arasında yaklaşık 3.4 °C fark görülmüştür.

Panellerin geneline baktığımız zaman radyatör yüzeyinde (Şekil 7.39) dikey ısı borularının ve ÇKYB'nin olduğu bölgelerde diğer bölgeler göre daha yüksek sıcaklıklar gözlenmiştir. Ekipmanlar bulunan iç yüzeyde (Şekil 7.41) ise yoğun ısı yayınımı olan TWT, ONET bölgesinde diğer bölgelere göre daha yüksek sıcaklıklar görülmüştür. En sıcak bölgeler ÇYKB kaplı olan güneş paneli sürüş mekanizması (53.8°C) olduğu görülmektedir. Ekipman bulunmayan ve radyatör yüzeyi açık olan bölgelerde ise en düşük sıcaklıklar (38.0°C) gözlenmiştir.

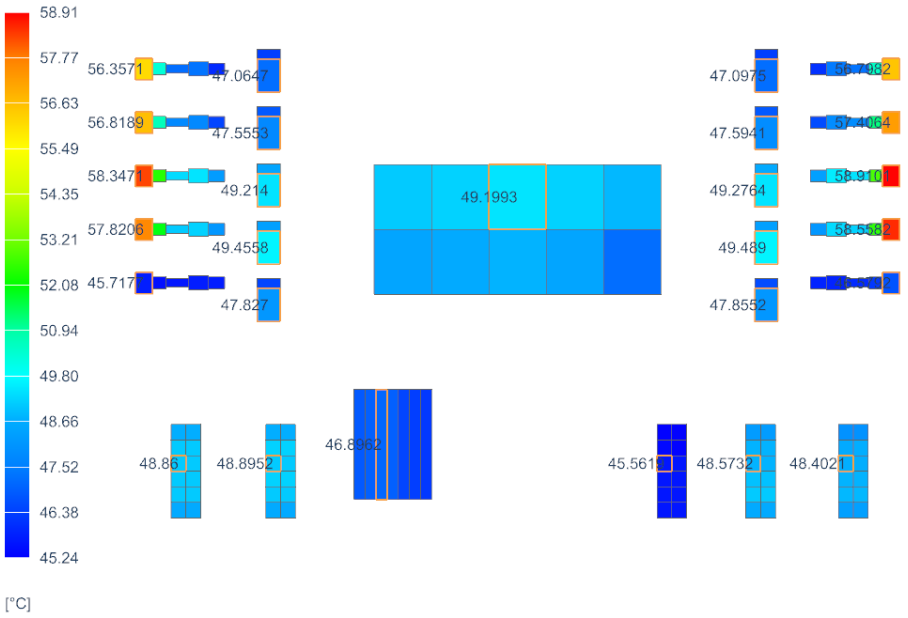


Şekil 7.40 Model D-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=60480s)



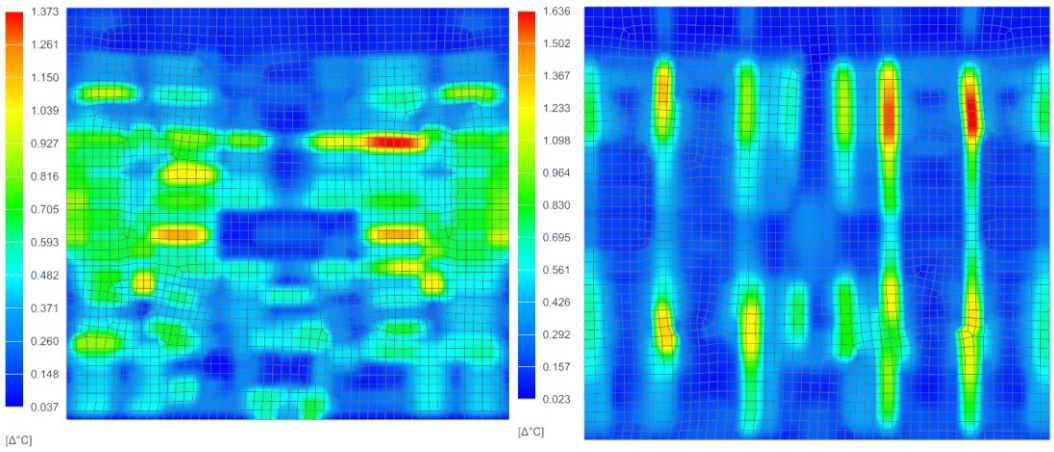
Şekil 7.41 Model D-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=60480s)-Düğüm gösterimi

Şekil 7.42'de ekipmanların taban alanlarının en yüksek sıcaklıkları verilmiştir. İşaretli sıcaklıklar, ekipmanların Sıcaklık Referans Noktalarındaki (SRN) sıcaklıklardır. En yüksek sıcaklığa ulaşan ekipmanlar TWT'lerin en yüksek sıcaklığı 58.9 °C iken düşük sıcaklık limiti nedeniyle panel için belirleyici olan EPC'lerin en yüksek sıcaklığı 48.9°C olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre bütün ekipmanların Tablo 6.2'de verilen sıcaklık limitlerine uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 7.42 Model D-Güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları

Şekil 7.43'te ağ yapısında bulunan ekipmanların şekilleri, ısıl bağlantı yazılan ekipmanların konumları vb. sebepler ile hesaplamalarda oluşan tahmini sıcaklık hatalarının görselleri verilmiştir. Verilen görseller panel iç yüzeyi ve radyatör yüzeylerine aittir. Görselleri incelediğimizde panel iç yüzeyinde ısı yayınımın yoğun olduğu bölgelerde maksimum 1.37 °C tahmini sıcaklık hatası olduğu görülmektedir. Radyatör yüzeyindeki ise dikey ısı borularının ısıyı radyatöre taşıdığı bölgelerde maksimum 1.6 °C sıcaklık hatası görülmektedir (6.5.3'te anlatılan hesaba göre).



Şekil 7.43 Model D Güney panel iç ve dış (radyatör) yüzey tahmini sıcaklık hatası

7.1.5 MODEL E- Çok Detaylı Ağ Yapısı

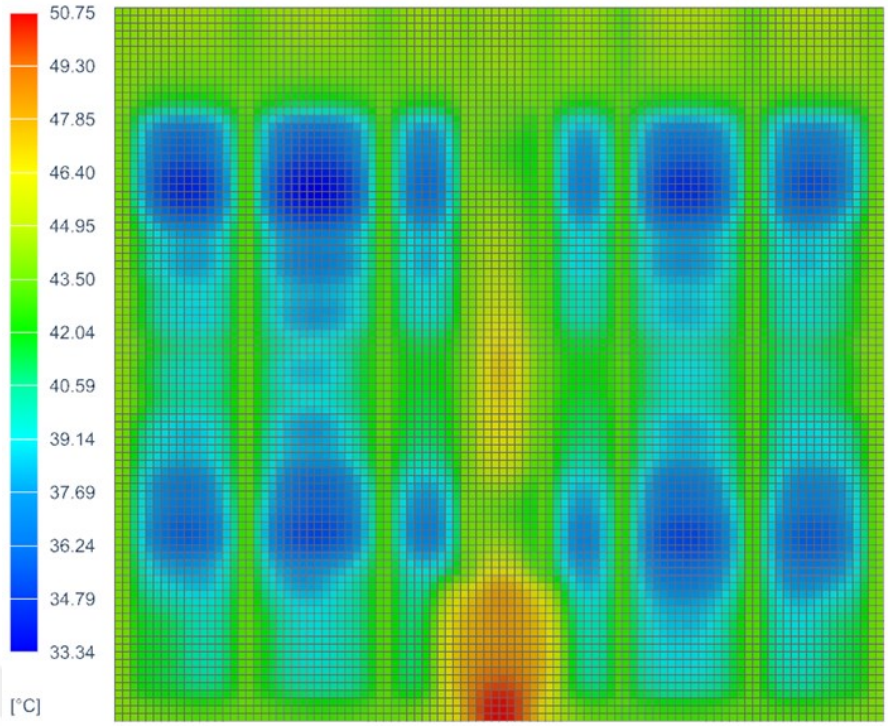
Bu kısımda 6.3.2.4 bölümünde tarif edilen 20x20 [mm] x [mm] boyutlu elemanlara sahip çok detaylı ağ yapısının analizlerinin sonuçları derlenmiştir. En küçük boyutlu elemanlara sahip olan boyutlu olan daha yüksek çözünürlükte sıcaklık dağılımı elde ederek gerçeğe en yakın sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir.

Model E aşağıda verilen özelliklerle çözdürülmüştür:

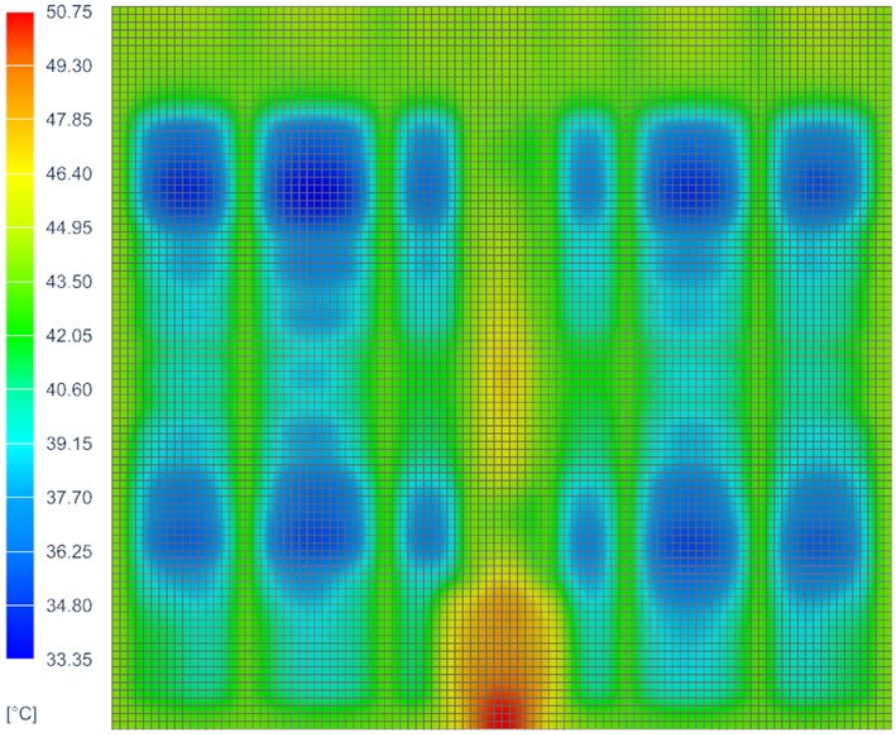
- Ekipmanların modelleri yer almaktadır.
- Kablo/RF/SADM ısı yayınımları panele uygulanmıştır.
- Isı boruları modelde yer almaktadır.
- Güneş panelleri-anten yer almaktadır
- İç radyasyon etkisi varken çözdürülmüştür.
- Yörüngede hesaplama noktası sayısı=12
- Yörünge Sayısı=1
- Zaman Adımları=240 sn=4 dk
- Başlangıç Sıcaklığı=Kararlı Durum Analiz Sonrası Elde Edilen Sıcaklıklar
- Kış Gündönümü

7.1.5.1 MODEL E-İç Işınım Aktif

Bu bölümde 21 Aralık senaryosunun analiz sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 7.44 ve Şekil 7.45'te güney görev yükü radyatörünün en yüksek olduğu andaki yüzey sıcaklıklarının dağılımı verilmiştir.



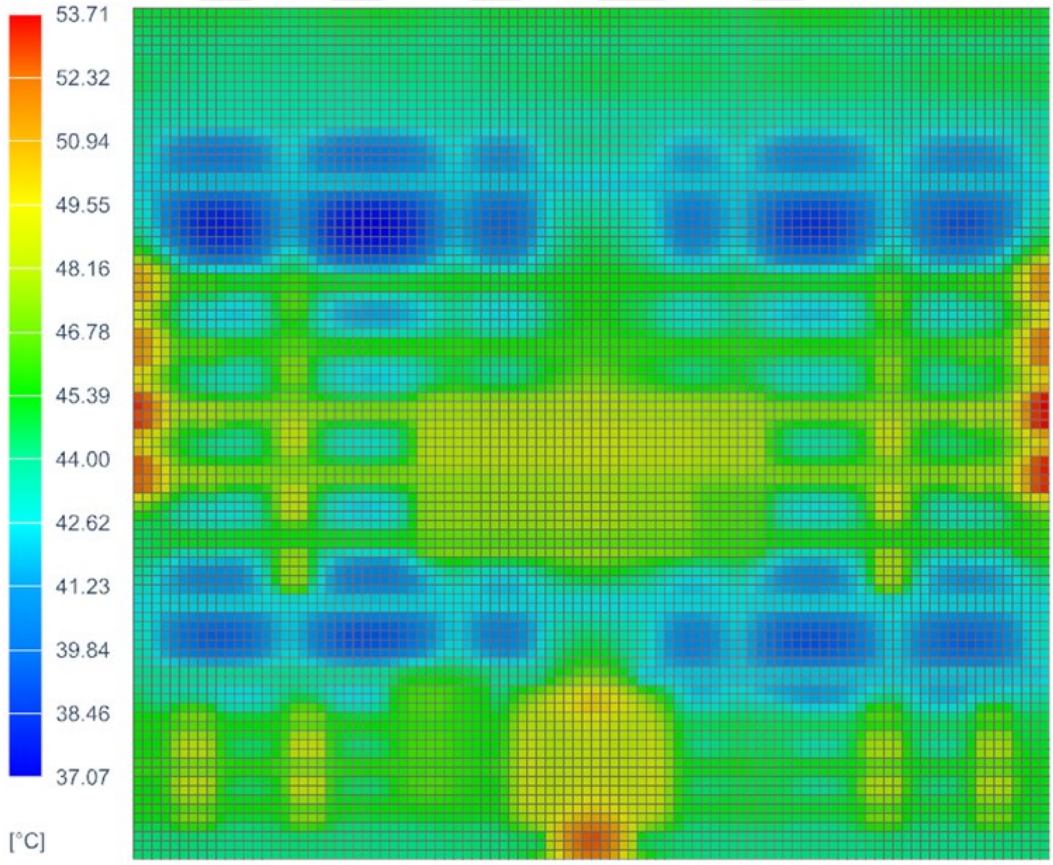
Şekil 7.44 Model D-Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=61680sn)



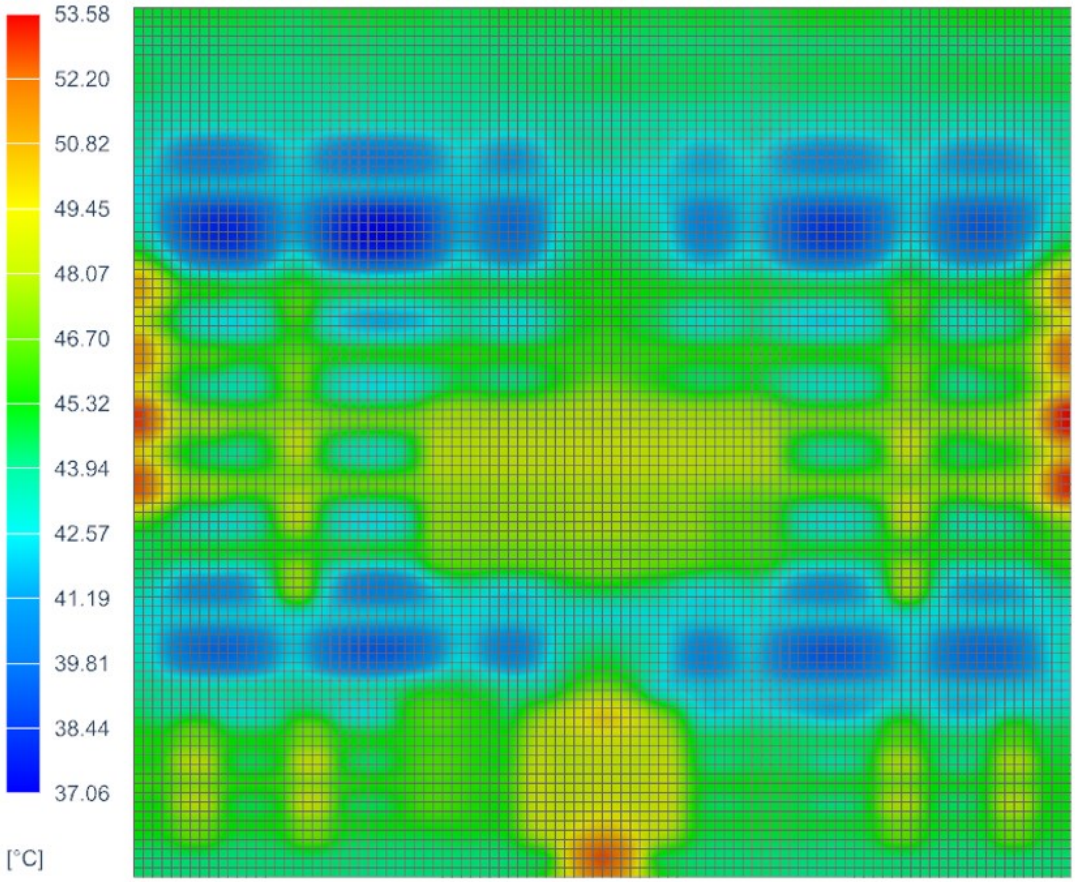
Şekil 7.45 Model E-Güney panel radyatör maksimum yüzey sıcaklıkları (t=61680sn)-Düğüm gösterimi

Ortalama radyatör sıcaklığının 41.1°C olduğu görülmektedir. Şekil 7.46 ve Şekil 7.47'de panel iç yüzeyinin en yüksek olduğu anda (t=61680sn) sırasıyla eleman ve düğüm bazında sıcaklık dağılımları verilmiştir. Panel iç yüzeyinin sıcaklık ortalamasının 44.4 °C olduğu görülmüştür. Genel ortalamada panel iç ve dış yüzü arasında yaklaşık 3.3 °C fark olduğu görülse de ısı yayınımın en yoğun olduğu TWT bölgesinde yaklaşık 4.4°C olduğu görülmektedir. EPC bölgesinde ise iç yüzey ile dış yüzey arasında yaklaşık 3.1 °C fark görülmüştür.

Panellerin geneline baktığımız zaman radyatör yüzeyinde (Şekil 7.45) dikey ısı borularının ve ÇKYB'nin olduğu bölgelerde diğer bölgeler göre daha yüksek sıcaklıklar gözlenmiştir. Ekipmanlar bulunan iç yüzeyde (Şekil 7.47) ise yoğun ısı yayınımı olan TWT, ONET bölgesinde diğer bölgelere göre daha yüksek sıcaklıklar görülmüştür. En sıcak bölgeler ÇYKB kaplı olan güneş paneli sürüş mekanizması (53.7°C) olduğu görülmektedir. Ekipman bulunmayan ve radyatör yüzeyi açık olan bölgelerde ise en düşük sıcaklıklar (37.1°C) gözlenmiştir.

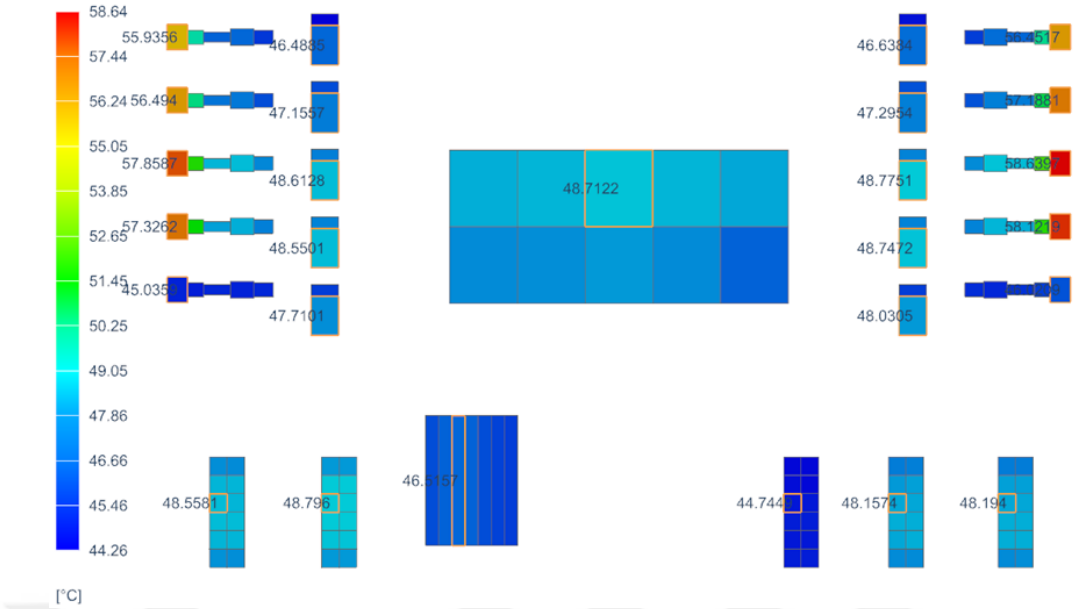


Şekil 7.46 Model E-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=61680sn)



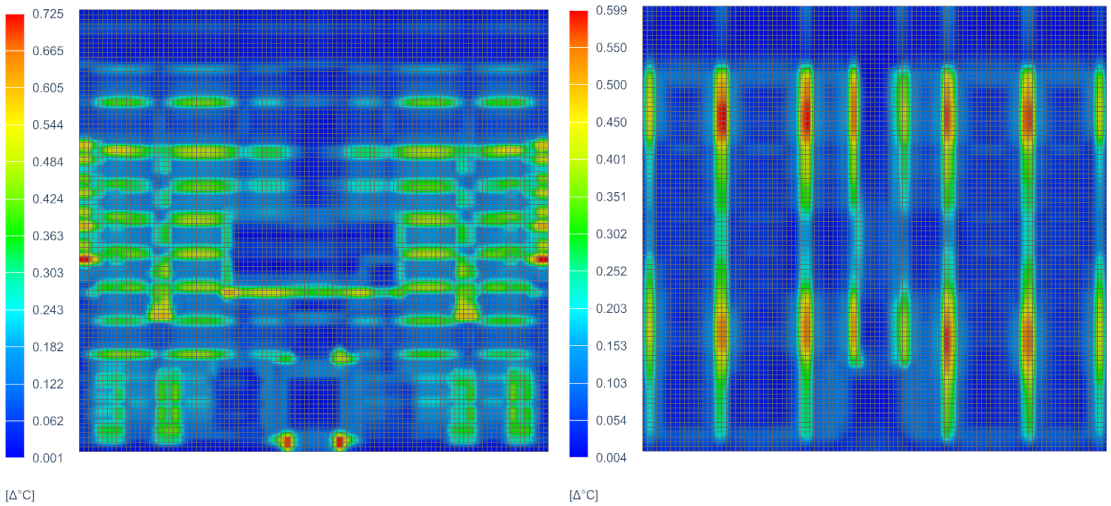
Şekil 7.47 Model E-Güney panel iç yüzey sıcaklıkları (t=61680sn)-Düğüm gösterimi

Şekil 7.48'de ekipmanların taban alanlarının en yüksek sıcaklıkları verilmiştir. İşaretli sıcaklıklar, ekipmanların Sıcaklık Referans Noktalarındaki (SRN) sıcaklıklardır. En yüksek sıcaklığa ulaşan ekipmanlar TWT'lerin en yüksek sıcaklığı 58.6 °C iken düşük sıcaklık limiti nedeniyle panel için belirleyici olan EPC'lerin en yüksek sıcaklığı 48.8°C olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre bütün ekipmanların Tablo 6.2'te verilen sıcaklık limitlerine uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 7.48 Model E-Güney panel ekipman SRN* maksimum sıcaklıkları

Şekil 7.49'da ağ yapısında bulunan ekipmanların şekilleri, ısıl bağlantı yazılan ekipmanların konumları vb. sebepler ile hesaplamalarda oluşan tahmini sıcaklık hatalarının görselleri verilmiştir. Verilen görseller panel iç yüzeyi ve radyatör yüzeylerine aittir. Görselleri incelediğimizde ısı yayınımın yoğun olduğu bölgelerde maksimum 0.73 °C tahmini sıcaklık hatası olduğu görülmektedir. Radyatör yüzeyindeki ise dikey ısı borularının ısıyı radyatöre taşıdığı bölgelerde maksimum 0.6 °C sıcaklık hatası görülmektedir (6.5.3'te anlatılan hesaba göre).



Şekil 7.49 Model E Güney panel iç ve dış (radyatör) yüzey tahmini sıcaklık hatası

7.2 Panel Ağ Yapılarının Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bir önceki bölümde, farklı boyutlarda ağ yapılarına sahip güney görev yükü paneli içeren 5 adet modelin aynı senaryodaki sonuçları basitten karmaşığa doğru verilmişti. Bu bölümde ise analizlerin sonuçlarına göre genel bir karşılaştırma ve değerlendirmeye yer verilmiştir. Karşılaştırmaları bilgileri Tablo 7.3'te paylaşılmıştır.

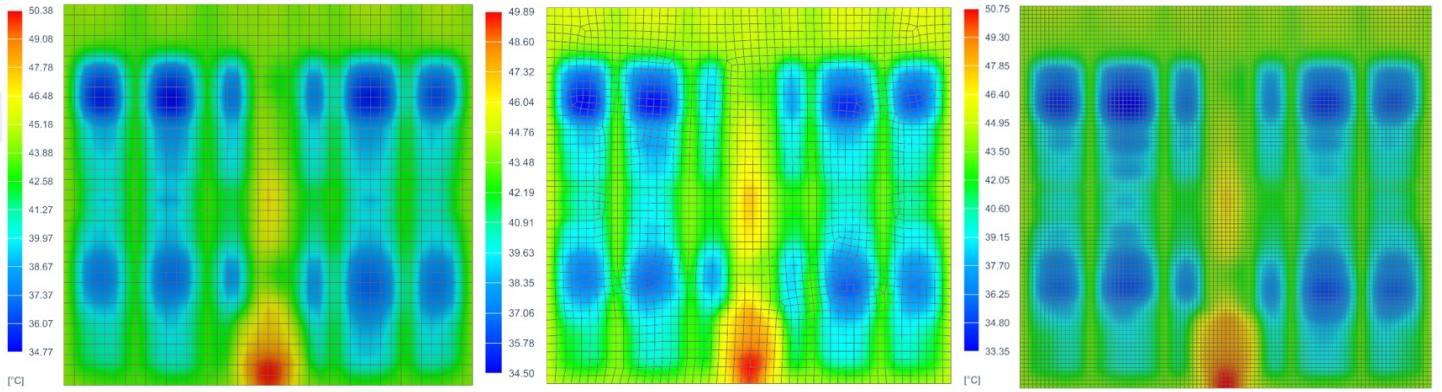
Tablo 7.3 Panel ağ yapılarının analiz sonuçlarının karşılaştırılması

	MODEL A	MODEL B	MODEL C	MODEL D	MODEL E
Analiz Sonuçlar↓	→İç Işınım VAR →3 Yörünge →Başlangıç=20°C	→İç Işınım VAR →1 Yörünge →Başlangıç=Kararlı Durum	→İç Işınım VAR →1 Yörünge →Başlangıç=Kararlı Durum	→İç Işınım VAR →1 Yörünge →Başlangıç=Kararlı Durum	→İç Işınım VAR →1 Yörünge →Başlangıç=Kararlı Durum
Panelin Bir Yüzündeki Eleman Sayısı	1	9	1480	2542	9300
Panelin Bir Yüzündeki Düğüm Sayısı	4	16	1558	2642	9494

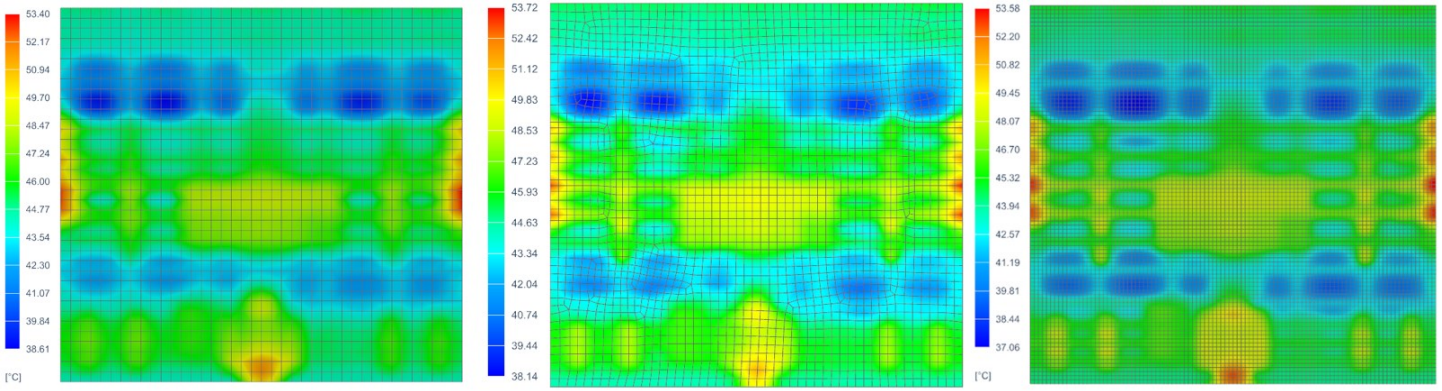
Tablo 7.3 Panel ağ yapılarının analiz sonuçlarının karşılaştırılması (devamı)

Radyatör Yüzeyi Ortalama Sıcaklığı	40.8 °C	42.4 °C	41.7 °C	41.6 °C	41.1 °C
Panel İç Yüzeyi Ortalama Sıcaklığı	45.2 °C	45.2 °C	44.9 °C	44.9 °C	44.4 °C
Radyatör Yüzeyi Maks. Sıcaklık Hatası	0	0.54	1.99	1.6	0.6
Panel İç Yüzeyi Maks. Sıcaklık Hatası	0	0.93	1.4	1.37	0.73
EPC	N/A*	45.6 °C	48.3 °C	48.9 °C	48.8 °C
TWT	N/A*	52.6 °C	58.7 °C	58.9 °C	58.6 °C
Çözüm Süresi	6 dk 57 sn	25 dk 26 sn	57 dk 22 sn	1 saat 15 dk 41 sn	2 saat 58 dk 26 sn
Kullanılan çekirdek Sayısı	1	1	6	6	6
Sonuç Dosyaları Boyutu	0.63 GB	1.44 GB	4.28 GB	4.77 GB	7.72 GB

Model C, Model D ve Model E'nin sırasıyla radyatör yüzeyi sıcaklıkları ve panel iç yüzey sıcaklıkları görsel bir karşılaştırma için Şekil 7.50 ve Şekil 7.51'de verilmiştir.

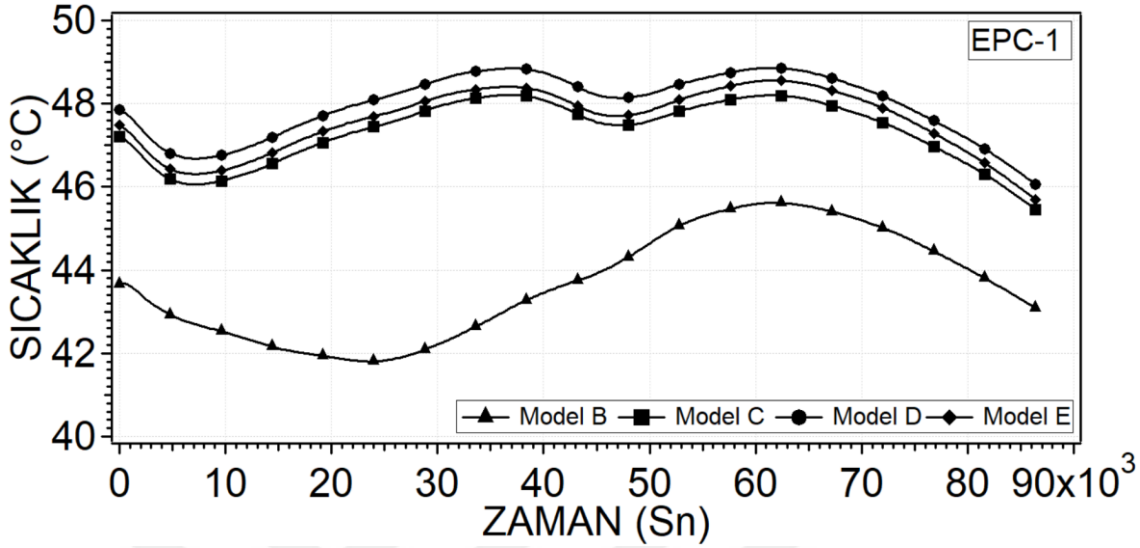


Şekil 7.50 Model C, Model D ve Model E radyatör sıcaklıkları (en sıcak andaki)

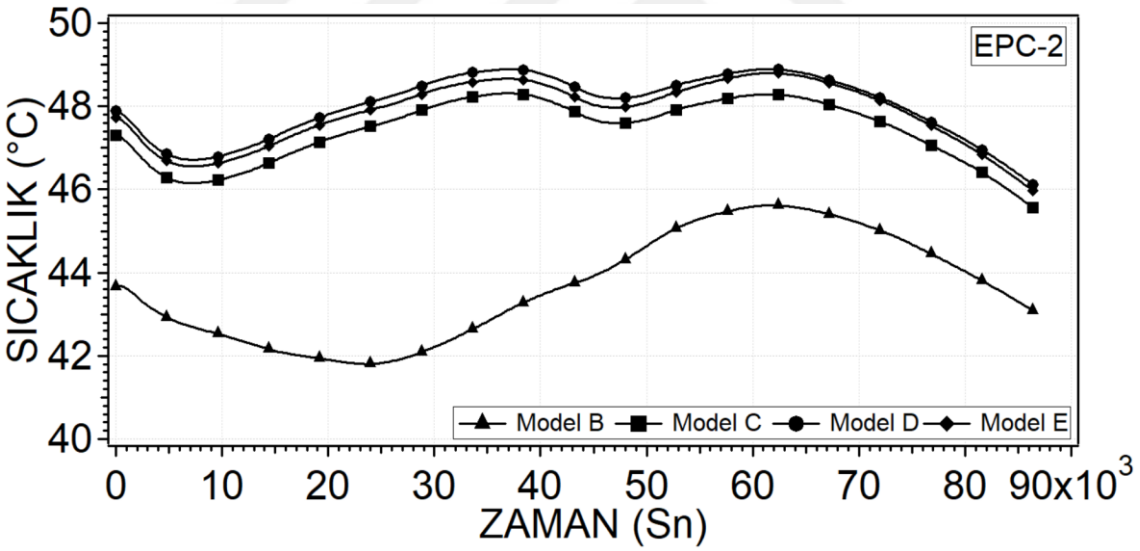


Şekil 7.51 Model C, Model D ve Model E panel iç yüzey sıcaklıkları (en sıcak andaki)

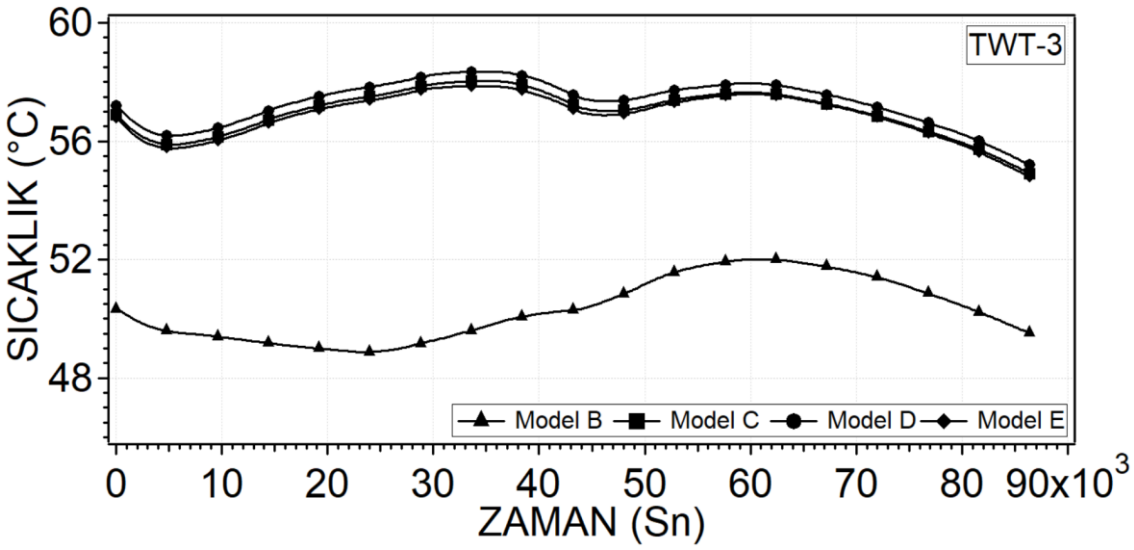
Seçilen kritik ekipmanların (EPC-1, EPC-2, TWT-3 ve TWT-8) Model B, Model C, Model D ve Model E'de zamanla değişen sıcaklıkları sırasıyla Şekil 7.52, Şekil 7.53, Şekil 7.54 ve Şekil 7.55'te verilmiştir.



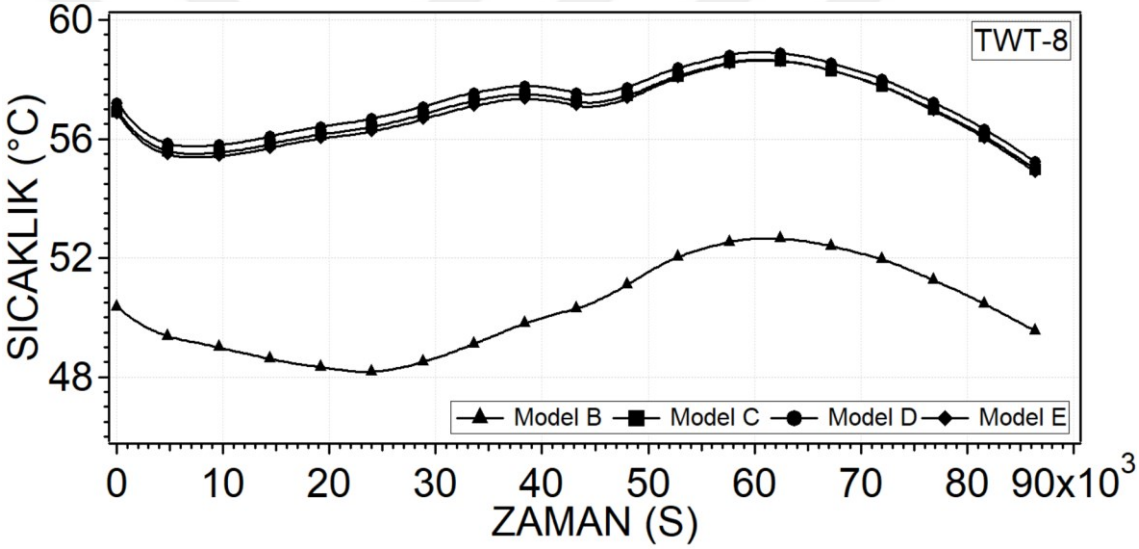
Şekil 7.52 EPC-1 sıcaklığının farklı modellerdeki zamanla değişimi



Şekil 7.53 EPC-2 sıcaklığının farklı modellerdeki zamanla değişimi



Şekil 7.54 TWT-3 sıcaklığının farklı modellerdeki zamanla değişimi



Şekil 7.55 TWT-8 sıcaklığının farklı modellerdeki zamanla değişimi

Genel karşılaştırmaya baktığımızda basitten karmaşık ağ yapısına geçildikçe panel radyatör ve iç yüzey ortalama sıcaklıklarının azalma eğilimde olduğunu görüyoruz. Ağ yapısının çözünürlüğü artıkça görece soğuk ve ortalamaya yakın bölgelerdeki eleman ve düğüm sayılarının artışının buna neden olduğu söylenebilir.

Kritik ekipmanların (TWT ve EPC) sıcaklıklarına baktığımızda kaba ağ yapısına sahip modelde (Model B), panel üzerindeki sıcak bölgelerin çözünürlüğü oldukça düşük olduğu için diğer detaylı modellere göre kritik EPC'de yaklaşık 3 °C ve en

yüksek TWT'de yaklaşık 6 °C düşük sıcaklıklar görülmüştür. Panel ortalaması ile ekipman sıcaklığı arasındaki farkın daha detaylı modellerde artış göstermesi nedeniyle Model B'nin ekipman sıcaklıkları hakkında bilgi vermede oldukça yetersiz kaldığını söyleyebiliriz. Yine de Model B panellere gelen güneş akıları ve panelin ısı atım kabiliyeti hakkında bilgi verebilmektedir. Çözüm sürelerinin kısalığı, dosya depolama alanı ihtiyacının az olması nedeniyle projelerin ilk aşamalarında kullanılması değerlendirilebilir.

Detaylı modeller olan Model C ve Model D'nin panel radyatör ve iç yüzey ortalama sıcaklıklarının neredeyse aynı olduğu görüyoruz. Benzer boyutlarda elemanlara sahip olmaları nedeniyle enerji dengesinden dolayı zaten benzer sonuçlar vermesi beklenmekteydi. Ayrıca kritik EPC'de 0.6 °C ve en yüksek TWT'de 0.2 °C farkla Model D'nin daha sıcak çıktığını görülmektedir. Panel üzerindeki tahmini sıcaklık hatalarının yaklaşık 1 °C olduğu düşünülünce kayda değer bir fark olmasa da ekipmanların bastığı alanlarda yapılan düzenleme ve eleman boyutlarının Model C'ye göre %20 daha küçük olmasından kaynaklı bu farkların görülmesi normal olarak değerlendirilmektedir. Diğer yandan kayda değer bir iyileşme göstermeyen Model D'nin çözüm süresi ve dosya depolama alanı Model C'ye göre fazladır. Ayrıca Model D'nin ekipmanlara göre ayarlanması işlemi zaman almaktadır. Bu nedenle daha kolay hazırlanışı, çözüm süresi ve dosya depolama alanı ihtiyacı bakımından Model C'nin Model D'ye göre daha tercih edilebilir olduğu değerlendirilmektedir.

Daha yüksek çözünürlük ve Model C ile benzer şekilde hazırlanan çok detaylı ağ yapısına sahip güney görev yükü panelleri içeren Model E'de panel ortalama sıcaklıklarının Model C ve Model D'ye göre yaklaşık 0.5 °C daha düşük olduğu görülmüştür. Fakat bu kayda değer bir fark değildir ve yine enerji dengesinden dolayı zaten birbirine yakın ortalama sonuçlar vermesi beklenmekteydi. Kritik ekipman sıcaklıklarına bakıldığında ise EPC'de Model D'den 0.1 °C soğuk, Model C'den ise 0.5 °C daha yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek TWT'de ise MODEL D'den 0.3 °C, Model C'den ise 0.1 °C soğuk olduğu gözlenmiştir. Diğer yandan Model E'nin yaklaşık 3 saat olan çözüm süresi, Model C ve D'nin sırasıyla yaklaşık 3 ve 2.5 katıdır. Ayrıca depolama alanı ihtiyacı da diğer modellerin yaklaşık 2 katı

kadardır. Bu görülen farklar ve dezavantajlar sebebiyle bu detayda bir ağ yapısının, bütün alt sistemlerde çok sayıda değişiklikler yaşanan proje ön tasarım fazında hızlı iterasyon yapılamaması nedeniyle kullanışlı olmadığı değerlendirilmiştir.

Genel çerçevede bakıldığında Model A ve Model B 'nin projenin ilk aşamasında konsept tasarımlar için kullanılması ve yörünge yüklerinin görülmesi amaçları ile kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Ön tasarım fazında kullanılması en uygun görülen modelin Model C olduğuna karar verilmiştir. Projenin, testlerle doğrulamalar yapılan fazı olan kritik tasarım fazında ise gelen detaylı bilgiler ile birlikte Model D ve Model E'nin veya bu iki modelin bir birleşiminin kullanılması değerlendirilebilir. Bu modellerin veya bir birleşiminin test sonrası korelasyon çalışmalarında ve analiz ile test arasındaki farkların daha iyi anlaşılması, çözülmesi ve testin doğrulanması çalışmalarına yardımcı olacağı değerlendirilmektedir.

7.3 Simülasyon Modelinde Bazı Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi

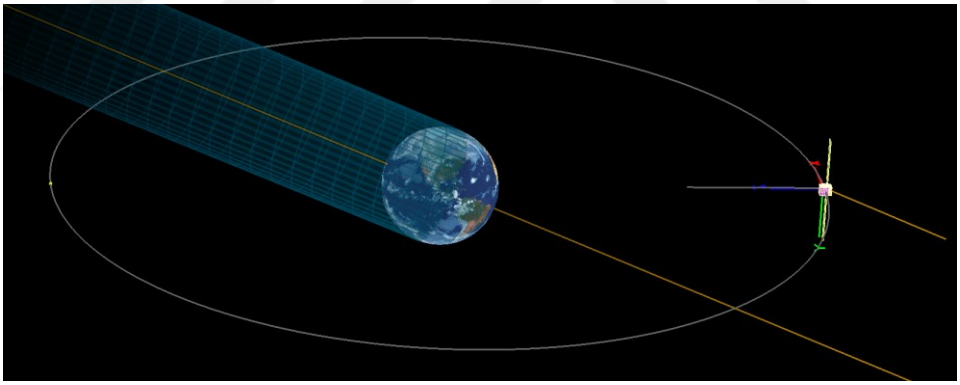
Bu bölümde yapılan ağ yapısı analizlerine ek olarak hesaplamalarda kullanılan; yörüngede ısıl yüklerin ve görüş faktörlerinin hesaplandığı nokta sayısının, zaman adımlarının ve ışınım hesabı için kullanılan Monte-Carlo ışın izleme yönteminde farklı ışın sayılarının sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık farkları, çözüm zamanları ve dosya boyutları açısından karşılaştırma yapılmıştır.

7.3.1 Yörünge Hesaplama Nokta Sayıları Karşılaştırma

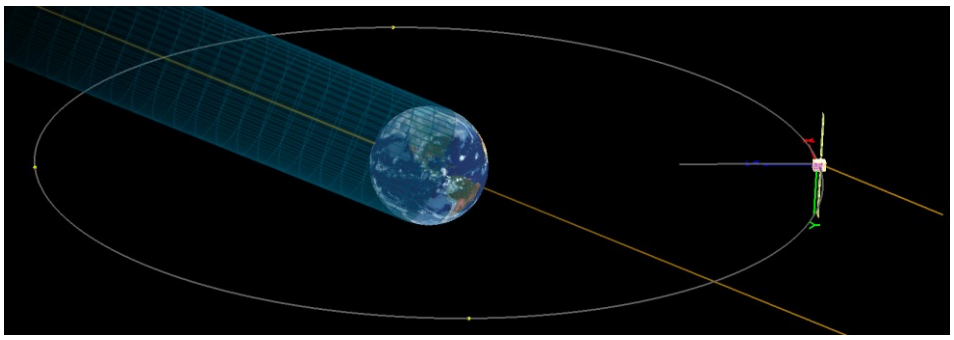
Isıl analizlerde belirlenen kritik senaryolar için tanımlanan çözümlerde bu çözümlere uygun yörünge tanımlaması yapılmaktadır. Yörüngede belirli noktalarda ısıl yükler ve uzay görüş faktörleri hesaplanır. Bu noktalar eşit açı aralıklarında seçilebildiği gibi özel durumları için istenilen noktalarda da hesaplama yapılabilir. Örneğin, tutulmanın yaşandığı ekinoks senaryoları için

tutulmanın başladığı ve bittiği noktalarda hesaplama yaptırılması piller gibi tutulma periyodunda devreye giren ekipmanlar için kritiktir.

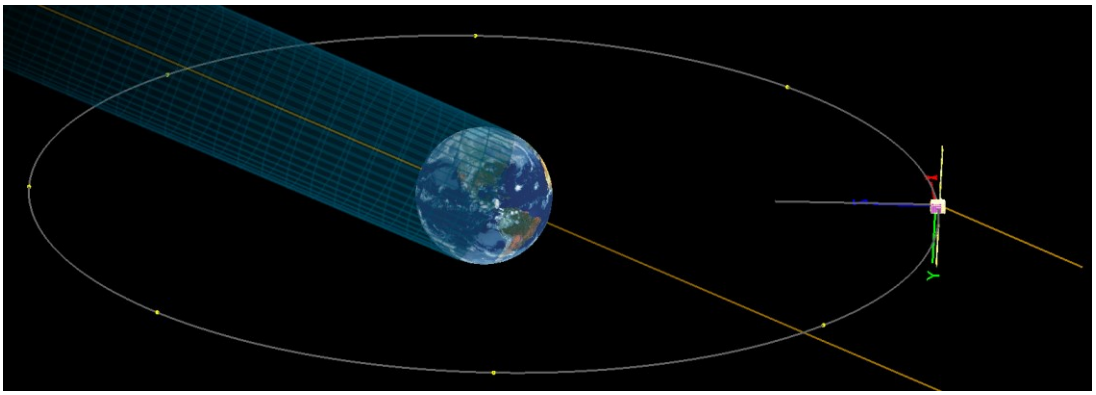
Görüş faktörleri ve ışınım bağlantılarının hesaplanması, iletim ısı transferlerinin hesaplamasına kıyasla oldukça uzun zaman alan bir işlem olduğundan dolayı yörünge üzerindeki hesaplama noktaları genellikle çözümlerin zaman adımlarından az sayıdadır. Örneğin, önceki bölümlerde ağ yapılarının analizleri sırasında ışınım bağlantıları için yörünge üzerinde 12 nokta kullanılırken aynı yörüngede 360 zaman adımı vardır. Bu değerler daha önce edinilen tecrübelere dayanarak seçilmiştir. Yörünge üzerindeki farklı noktalardaki sıcaklık değerlerini incelemenin temel sebeplerinde biri termo-elastik analizlere girdi verilmesidir. Bu bölümde yörüngedeki hesaplama noktaların değişimin güney görev yükü paneli üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sırasıyla 2, 4, 8, 12(önceden kullanılan) ve 24 nokta için analizler yapılmış ve bu bölümde sonuçları paylaşılmıştır. Nokta sayılarının görselleri sırasıyla Şekil 7.56, Şekil 7.57, Şekil 7.58, Şekil 7.59 ve Şekil 7.60'ta verilmiştir.



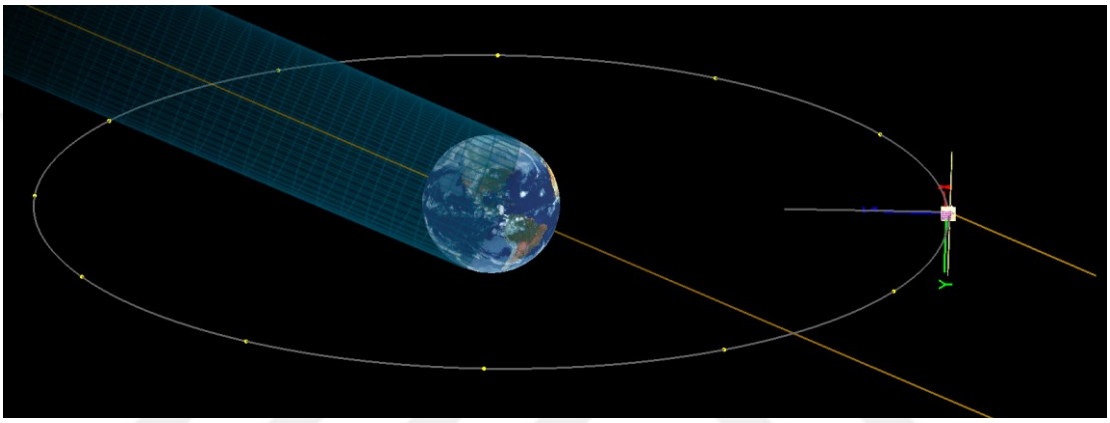
Şekil 7.56 Yörünge üzeri 2 nokta



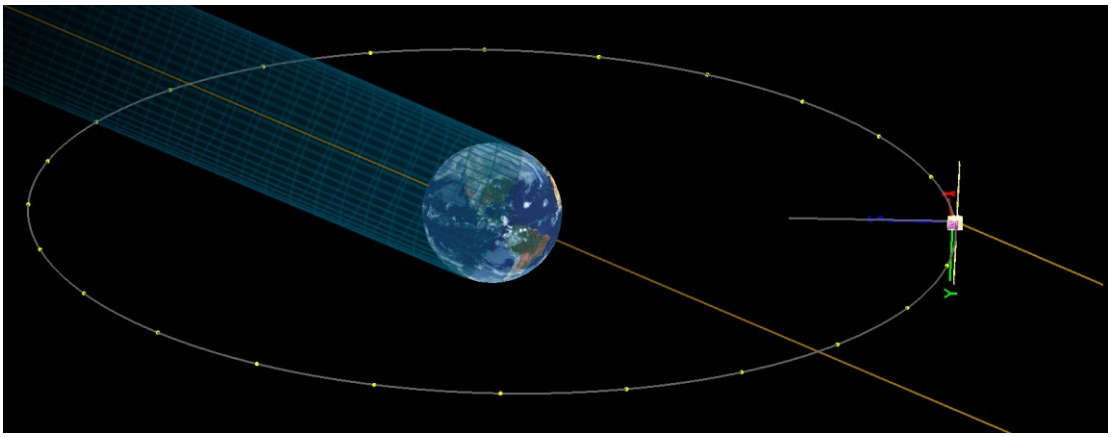
Şekil 7.57 Yörünge üzeri 4 nokta



Şekil 7.58 Yörünge üzeri 8 nokta



Şekil 7.59 Yörünge üzeri 12 nokta



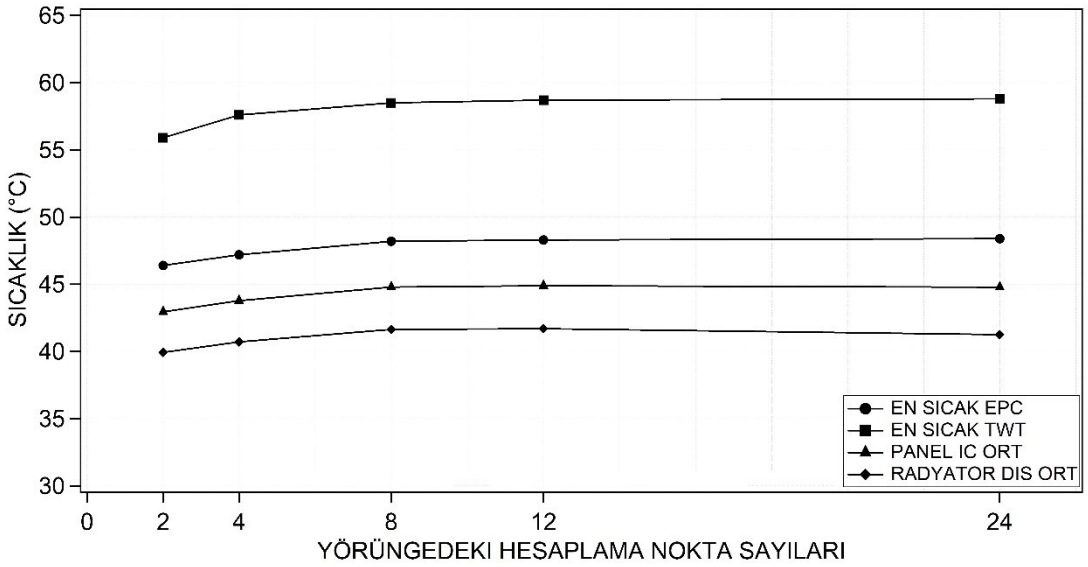
Şekil 7.60 Yörünge üzeri 24 nokta

Model C kullanılarak yapılan 5 adet analizin sonuçları Tablo 7.4'te verilmiştir. 21 Aralık senaryosu için 240 sn zaman adımları kullanılarak çözdürülmüştür.

Tablo 7.4 Yörünge üzerindeki nokta sayısının etkisi

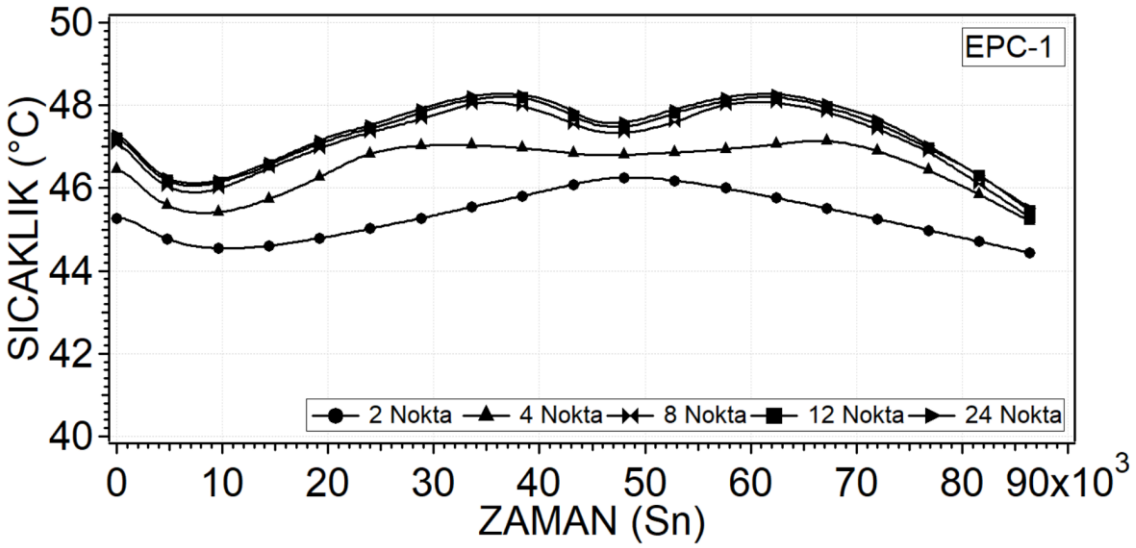
	Yörünge Üzerindeki Nokta Sayısı				
	2	**4**	**8**	**12**	**24**
En sıcak EPC	46.4 °C	47.2 °C	48.2 °C	48.3 °C	48.4 °C
En sıcak TWT	55.9 °C	57.6 °C	58.5 °C	58.7 °C	58.8 °C
Radyatör Dış Ort.	39.94 °C	40.72 °C	41.65 °C	41.7 °C	41.26 °C
Panel İç Ort.	42.96 °C	43.78 °C	44.79 °C	44.9 °C	44.78 °C
Çözüm Süresi	42 dk 46 sn	44 dk 43 sn	52 dk 43 sn	57 dk 22 sn	1 saat 23 dk 24 sn
Sonuç Dosyası Boyutları	3.86 GB	3.94 GB	4.11 GB	4.28 GB	4.78 GB

Yörüngedeki nokta sayısı artıkça sıcaklıkların değişimini veren grafik Şekil 7.61'de verilmiştir.

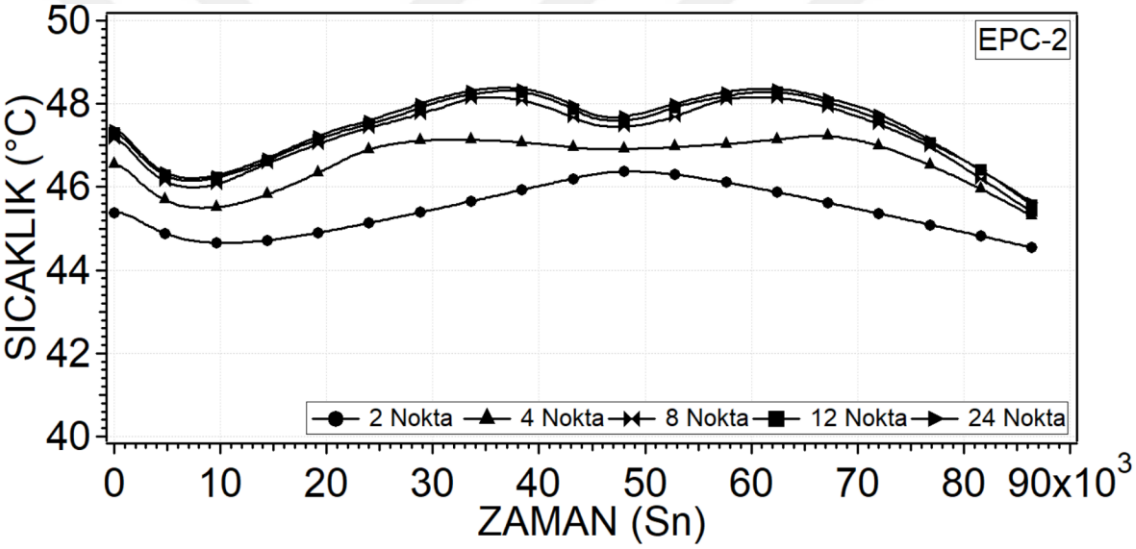


Şekil 7.61 Yörüngedeki nokta sayısı artıkça sıcakların değişimi

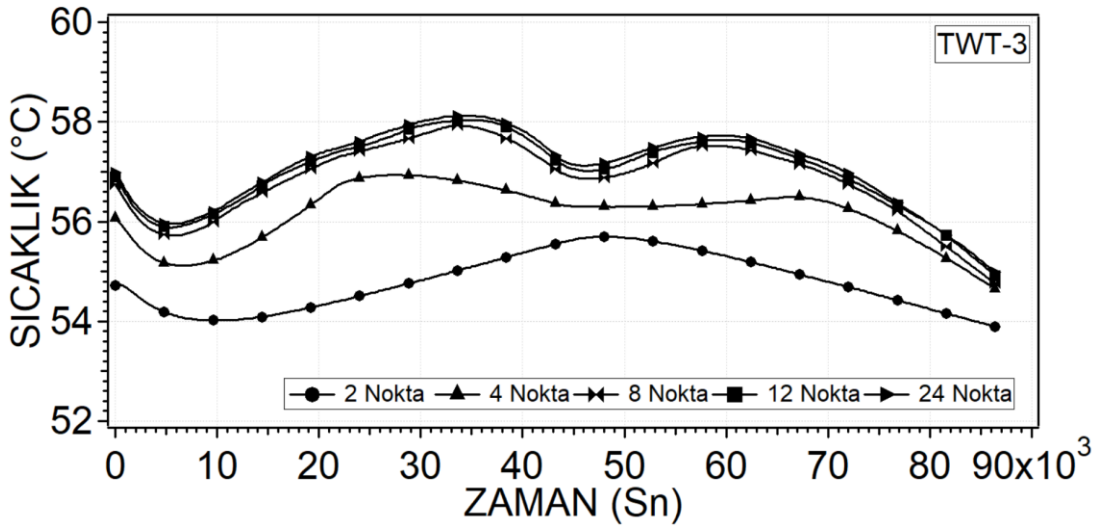
Ayrıca seçilen kritik ekipmanların (EPC-1, EPC-2, TWT-3 ve TWT-8) analizlerde kullanılan yörünge nokta sayısına göre her biri için zamanla değişen sıcaklıkları sırasıyla Şekil 7.62, Şekil 7.63, Şekil 7.64 ve Şekil 7.65'te verilmiştir.



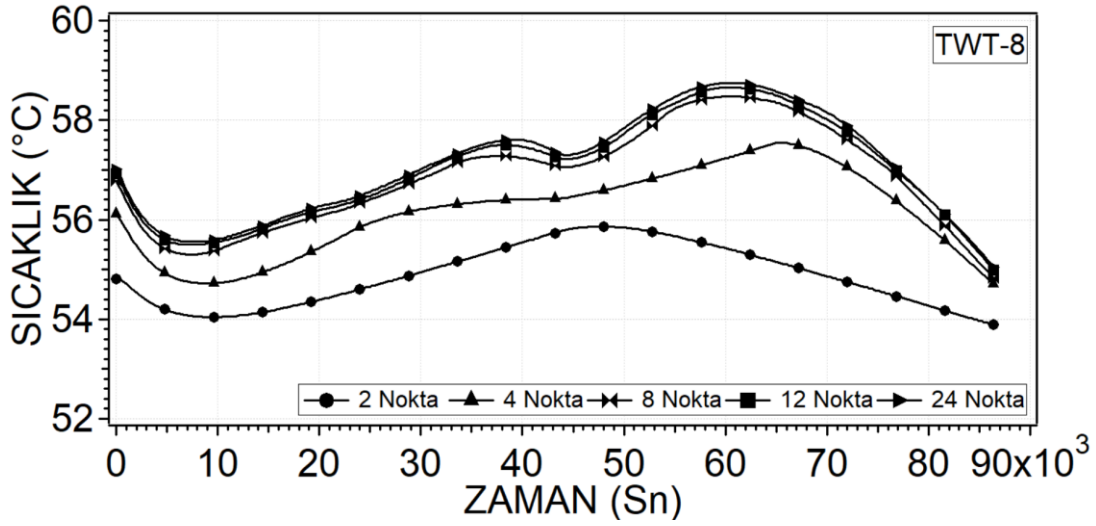
Şekil 7.62 Yörünge nokta sayısına göre EPC-1 sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 7.63 Yörünge nokta sayısına göre EPC-2 sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 7.64 Yörünge nokta sayısına göre TWT-3 sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 7.65 Yörünge nokta sayısına göre TWT-8 sıcaklığının zamanla değişimi

Farklı nokta sayılarında yörünge boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimlerine baktığımızda;

- 2 nokta sayısının ekipman sıcaklıkları hakkında bilgi vermekte yetersiz olduğu görülmektedir. En çok nokta sayısına sahip olan 24 noktadaki sıcaklıklardan; EPC'lerde yaklaşık 2 °C ve TWT'lerde yaklaşık 3 °C soğuk olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık değişim profili de diğer nokta sayılarından farklıdır. 2 nokta sayısının doğu ve batı panellerinde gelen ısı akılarını hesaplamadığı için bir tam yörüngede yetersiz olduğu

görülmektedir. Ek olarak Güneş panellerinin güney radyatör panelini gölgeleme etkisini de doğru yansıtamamaktadır.

- 4 nokta sayısında; kritik ekipman sıcaklıklarına baktığımızda en çok nokta sayısına sahip olan 24 noktadaki sıcaklıklardan EPC ve TWT'lerde yaklaşık 1.2 °C soğuk olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık değişim profili de 2 noktadan daha çok 24 noktaya benzemektedir. Fakat yine de sıcaklık profilleri arasında farklar görülmektedir. Bunun nedeni ise doğu ve batı panele sadece dik açılarda güneşin geldiği anlarda hesaplama yapılmış olmasıdır. 4 Nokta sayısından da ekipman sıcaklıkları hakkında bilgi verme konusunda diğerlerine göre (8, 12, 24) yeterli olduğu söylenemez.
- 8 nokta sayısında kritik ekipman sıcaklıklarına baktığımızda en çok nokta sayısına sahip olan 24 noktadaki sıcaklıklardan EPC ve TWT'lerde yaklaşık 0.3 °C soğuk olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık değişim profili 24 noktaya benzemektedir. Doğu ve batı panellere gelen ısı akılarını daha doğru hesaplayan bu nokta sayısı için 2 ve 4'e göre iyi bir sonuç verdiği görülmektedir. Ekipman sıcaklıkları hakkında doğruya yakın sonuç verdiği söylenebilir.
- 12 nokta sayısı önceki bölümlerde verilen analizlerde kullanılan nokta sayısıdır. Kritik ekipman sıcaklıklarına baktığımızda en çok nokta sayısına sahip olan 24 noktadaki sıcaklıklardan EPC ve TWT'lerde yaklaşık 0.1 °C soğuk olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık değişim profili 24 noktaya çok benzemektedir. Doğu ve batı panellere gelen ısı akıları hakkında daha fazla bilgi veren bu nokta sayısının 24 noktadan neredeyse farksız olduğu görülmektedir.
- 24 noktası yörüngedeki ısıl yükler hakkında en detaylı hesaplamalara sahiptir. 8 ve 12 nokta sayısının yakın sonuçlar vermesi, çözüm süresinin uzun ve sonuç dosyaları boyutunun daha büyük olmasından dolayı tercih edilmeyeceğini söyleyebiliriz.

Genel sonuçlara bakıldığında en sıcak TWT ve EPC sıcaklıklarının değişimi 2'den 8 noktaya kadar yaklaşık 2 °C artarken 8 noktadan sonra 0.3 °C mertebelerinde artış göstermiştir. Çözüm sürelerine baktığımızda sadece 24 noktada diğerlerine

göre dramatik bir artış görünüyor. Ek olarak, eleman sayısı arttıkça hesaplanacak görüş faktörü ve ışınım bağlantılarının sayısı eleman sayısının kendi üssü ile doğru orantılı artacağı için çözüm sürelerine de bu doğrultu da etki edecektir. Çözüm sürelerinin ve sonuç dosyalarının boyutlarının çok yakın olması nedeniyle güney görev yükü paneli analizi için 8 veya 12 nokta seçilebilir.

7.3.2 Hesaplama Zaman Adımları Karşılaştırma

Senaryoların çözümleri yapılırken sıcaklık ve diğer bazı bilgilerin hesaplanması için bir zaman adımı seçilmektedir. Sıcaklık hesaplamaları için genel işleyiş aşağıdaki şekildedir:

- Her elemanın başlangıçtaki sıcaklıkları bilinmektedir.
- Seçilen t zaman adımı sonrası için elemana gelen ve giden ısı enerji miktarları hesaplanır. (İletimle ve/veya ışınımla)
- Hesaplama sonrası kalan enerji miktarı pozitif ise elemanın sıcaklığı artacak, negatifse sıcaklığı düşecektir. Buna göre t zaman sonraki sıcaklık bulunur.
- Sonraki adım için bir önceki adımda sıcaklık bilgisi kullanılarak bir önceki adımdaki gibi hesaplamalara devam edilir.

Hesaplamalardaki zaman adımlarının değişiminin güney görev yükü üzerindeki etkilerini görmek için farklı zaman adımlarında 21 Aralık senaryosunda analizler yapılmış ve sonuçları Tablo 7.5'te paylaşılmıştır.

Tablo 7.5 Zaman adımlarının etkisi

	Zaman Adımları					
	120 sn	240 sn	360 sn	720 sn	30 dk	Otomatik
En sıcak EPC	48.29 °C	48.3 °C	48.27 °C	48.28 °C	48.29 °C	48.29 °C
En sıcak TWT	58.65 °C	58.7 °C	58.64 °C	58.64 °C	58.64 °C	58.66 °C
Radyatör Dış Ort.	41.79 °C	41.7 °C	41.76 °C	41.78 °C	41.52 °C	41.79 °C
Panel İç Ort.	44.94 °C	44.9 °C	44.91 °C	44.93 °C	44.67 °C	44.93 °C

Tablo 7.5 Zaman adımlarının etkisi (devamı)

Çözüm Süresi	1 saat 42 dk 8 sn	57 dk 22 sn	51 dk 3 sn	37 dk	30 dk 33 sn	45 dk 40
Dosya Boyutları	14.2 GB	4.28 GB	5.37 GB	3.16 GB	1.36 GB	4.20 GB

*Otomatik zaman adımı sıcaklıkların değişim eğimlerine göre zaman adımlarını azaltıp artırarak verimli bir çözüm süresinde çözüm yapan bir yöntemdir. Keskin sıcaklık değişimleri olan bir senaryoda çözüm adımlarının çok azaltıp çözümün çok uzun sürmesine neden olabildiği gibi sürekli keskin bir şekilde değişmeyen çözümlerde çözüm süresini verimli bir şekilde azaltabilmektedir [48].

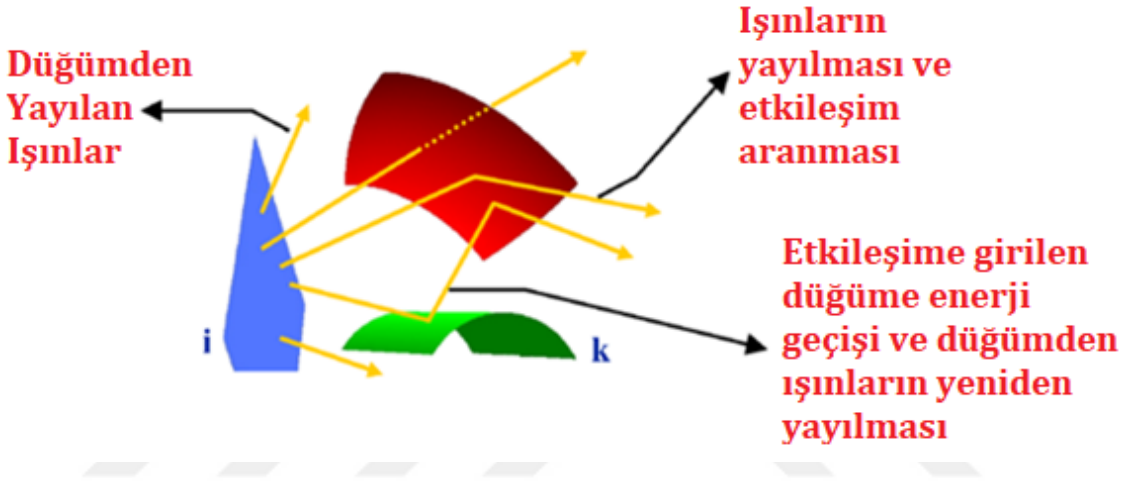
Sonuçları incelediğimizde en küçük zaman adımı ile en büyük zaman adımı 30 dk arasındaki sıcaklık farklarının ekipmanlarda 0.1 °C'den panel ortalamalarında ise 0.3 °C'den az olduğu görülmektedir. Çözüm süreleri ve sonuç dosyası boyutları ise beklenildiği gibi zaman adımı büyüdükçe azalmaktadır. Bu incelemenin sonucunda zaman adımlarına kayda değer bir fark görülmemiştir. Bunun nedenleri aşağıda sıralanmıştır:

- 21 Aralık senaryosunda Güneş'in geliş açısının Güney ve Kuzey Panel için çok fazla değişmemesi (Sadece Güneş panellerinin radyatörü gölgeleme etkisi değişim göstermektedir.)
- 21 Aralık senaryosunda devamlı değişen ısı akılarına maruz kalan doğu batı dünya ve anti-dünya panelinin yalıtımlı olması ve güneş akılarından minimum orandan etkilenmesi
- Ekipman ısı yüklerinin zamana göre değişken olmaması

Zaman adımlarının etkisi ekipman ısı yüklerinin değişken olduğu, ısıtıcıların belli periyotlarla devreye girip çıktığı farklı senaryolara sahip analizlerde daha kritik bir etkiye sebep olacağı değerlendirilmektedir.

7.3.3 Monte-Carlo Işın Sayısının Etkisi

Uzay aracı ısıl modellemelerinde baskın olan ısı geçiş mekanizmasının ışınım olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti. Doğru hesaplanması bu yüzden çok önemlidir. Uzay aracı ısıl simülasyonu yapılan paket yazılımlarında çeşitli ışınım hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan en çok tercih edileni Monte-Carlo ışın izleme yöntemidir. Yöntemde her bir elemandan bir ışın demeti her yöne homojen şekilde gönderilmektedir (Şekil 7.66). Bu yöntemle birçok karmaşık etkileşim modellenebilmektedir.



Şekil 7.66 Monte-Carlo ışın izlemenin işleyişi

Bir elemandan gönderilen ışınlar diğer bir elemana ulaştığında o elemana ulaşan ışın sayısının toplam gönderilen ışın sayısına oranı görüş faktörünü vermektedir. Bu ışınlardan bir kısmı emilmekte; bir kısmı yansıtılmakta ve eğer elamanın geçirgenlik özelliği varsa bir kısmı da elemanın içinden geçip gitmektedir. Elemana kırılma indisi tanımlanmışsa içinden geçen ışın kırılarak gitmektedir. Yansıtma iki şekilde gerçekleşmektedir. Yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı olarak ışınlar ayna şeklinde ve yarım daire şeklinde yansıtılmaktadır [21].

Aynı dalga boyunda gerçekleşen ışınım etkileşiminde yüzey özelliklerinin eşitliği aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\varepsilon = \alpha = 1 - \rho_A - \rho_D - \tau \tag{7.1}$$

ε=Yayınım Katsayısı

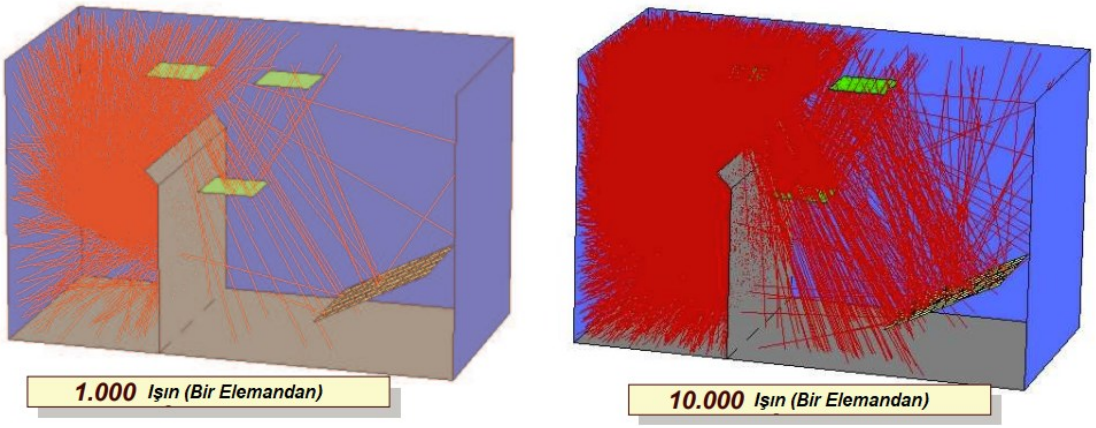
α=Emicilik

ρ_A=Ayna gibi yansıtma

ρ_D=Difüze yansıtma

τ= Geçirgenlik

Bütün bu etkileşimler; güneşten gelen, güneş panellerinden ve diğer dış ekipmanlardan yansıyan ısı akıları, dünyadan gelen kızıl ötesi yayınım, albedo ve uydu iç ortamında gerçekleşen iç ışınımın doğru hesaplanması açısından önemlidir. Monte-Carlo bu açıdan önemli avantajlara sahiptir. Özellikle karmaşık geometriler de oldukça doğru sonuçlar vermektedir. Modelin karmaşıklığına göre elemandan gönderilen ışın sayıları hesaplamalara etki edebilmektedir ve bu ışın sayıları istenilen detaya göre ayarlanabilmektedir. Gönderilen ışın sayısın gösterimi ile ilgili bir örnek Şekil 7.67'de verilmiştir.



Şekil 7.67 Monte-Carlo ışın sayısının etkisi [49]

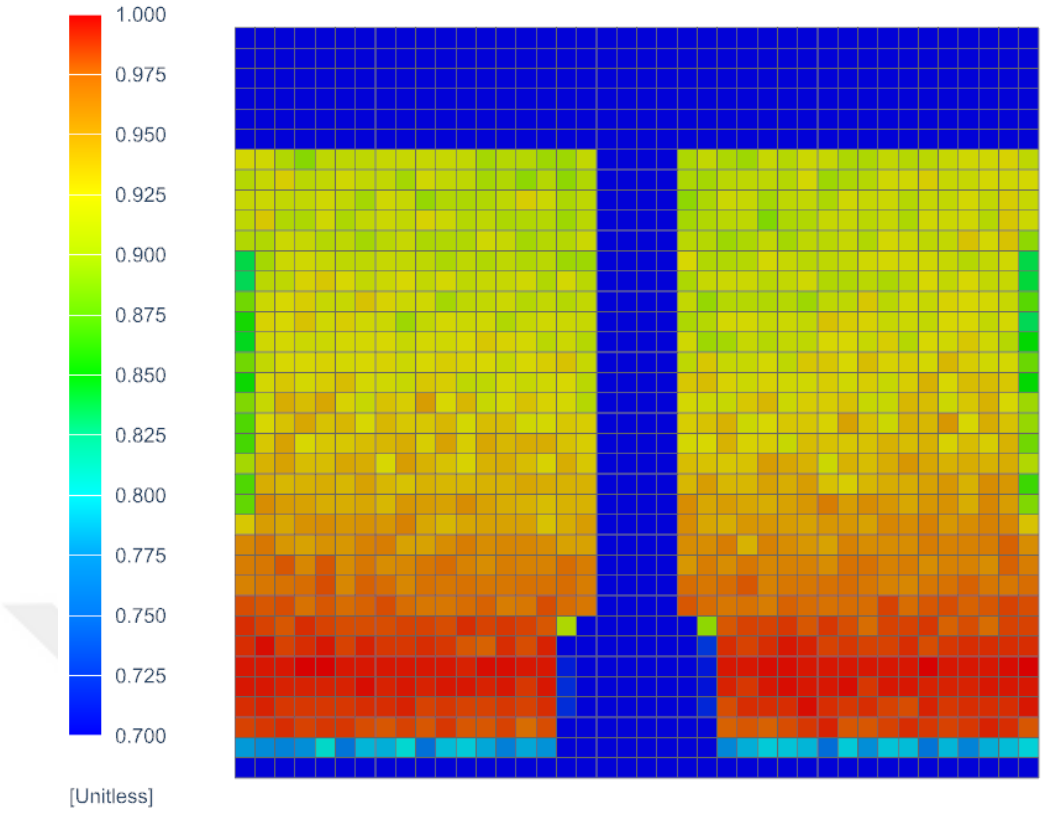
Bu bölümde Monte-Carlo yöntemi ile çözdürülen ışınım hesaplamasında bir elemandan gönderilen farklı miktarlarda ışın sayısının etkisinin araştırılması amacıyla yapılan analizlerin sonuçları verilmiştir. Yapılan analizlerde 1000, 5000 ve 10000 olacak şekilde 3 farklı ışın sayısı kullanılmıştır. Işın sayılarının değişiminin görev yükündeki kritik ekipmanların, radyatör ve panel iç yüzeylerinin sıcaklıklarına etkileri incelenmiştir. Ayrıca çözüm süreleri ve sonuç dosyası boyutları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6 Monte-Carlo ışın sayısının etkisi

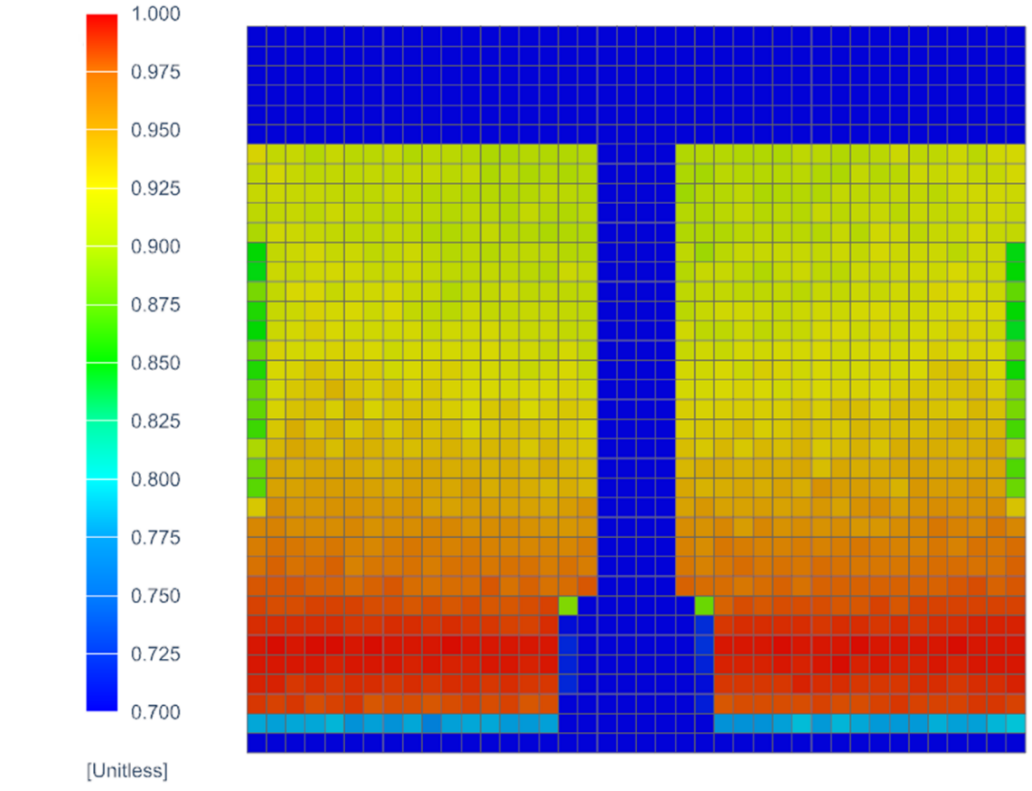
	Monte-Carlo Işın Sayısı		
	1000	**5000**	**10000**
En sıcak EPC	48.3 °C	48.3 °C	48.3 °C
En sıcak TWT	58.6 °C	58.7 °C	58.7 °C
Radyatör Dış Ort.	41.4 °C	41.7 °C	41.7 °C
Panel İç Ort.	44.6 °C	44.9 °C	44.9 °C
Çözüm Süresi	40 dk 28 sn	57 dk 32 sn	1 saat 12 dk 50 sn
Dosya Boyutları	4.19 GB	4.28 GB	4.30 GB

Sonuçlara göre 1000, 5000 ve 10000 ışın sayısı için kritik ekipman sıcaklıkları neredeyse hiç değişim göstermemiştir. Radyatör ve panel içi yüzeyi ortalama sıcaklıkları 5000 ve 10000 ışın sayısı için 1000 ışın sayısından 0.3 °C fazla çıkmıştır. Ayrıca çözüm süreleri ışın sayısı arttıkça yaklaşık 16-17 dk artış göstermiştir. Dosya boyutları da benzer boyutta çıkmıştır.

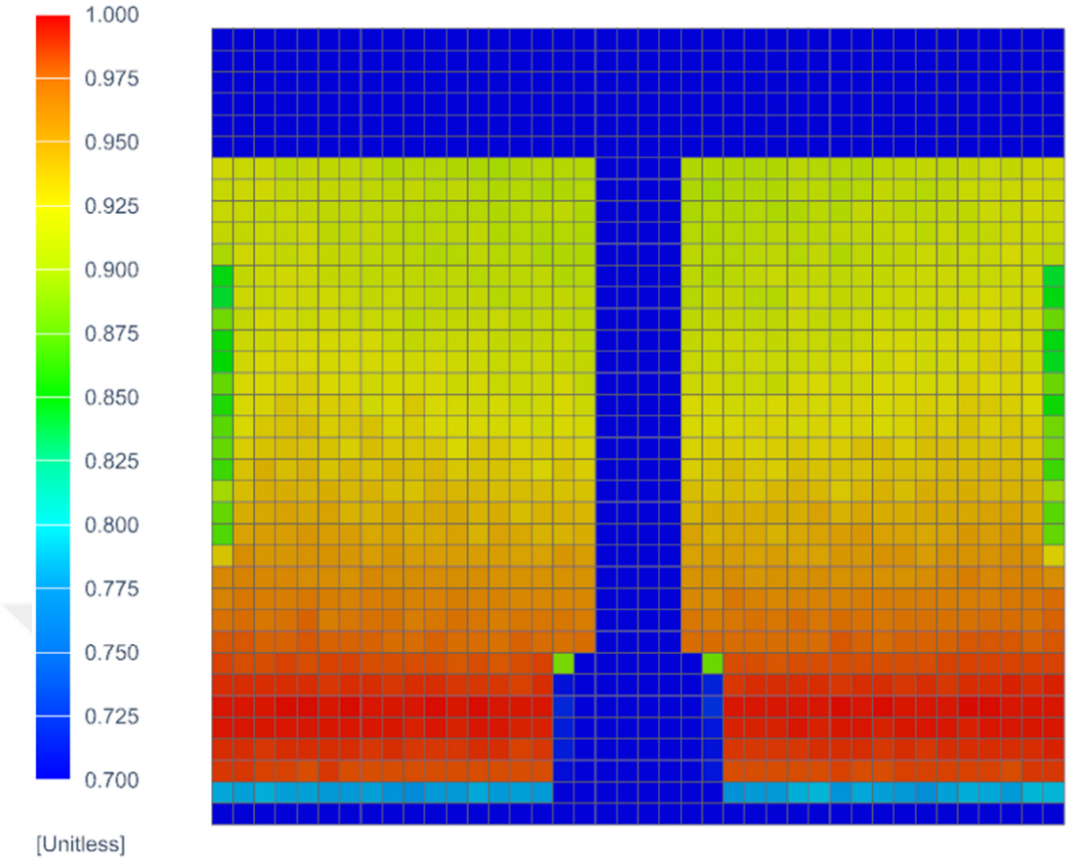
Görev yükü üzerinde yörünge sonundaki çevresel görüş faktörleri (derin uzayı görüş faktörü) sırasıyla 1000, 5000 ve 10000 ışın sayısı için sırasıyla Şekil 7.68, Şekil 7.69 ve Şekil 7.70'te verilmiştir. Görüş faktörlerinin dağılımına bakıldığında 1000 ışın sayısından 10000'e doğru gidildikçe çözünürlüğün arttığı, daha detaylı bir görüş faktörü dağılımı elde edildiği görülmektedir. Ayrıca 5000 ile 10000 ışın sayısı arasında benzerlik göze çarpmaktadır. Derin uzayı görüş faktörlerinin bu andaki ortalamalarına baktığımızda ise 3 ışın sayısı için de yaklaşık 0.94 olduğu görülmüştür.



Şekil 7.68 Monte-Carlo 1000 ışın sayısında güney panelin çevresel görüş faktörü



Şekil 7.69 Monte-Carlo 5000 ışın sayısında güney panelin çevresel görüş faktörü



Şekil 7.70 Monte-Carlo 10000 ışın sayısında güney panelin çevresel görüş faktörü

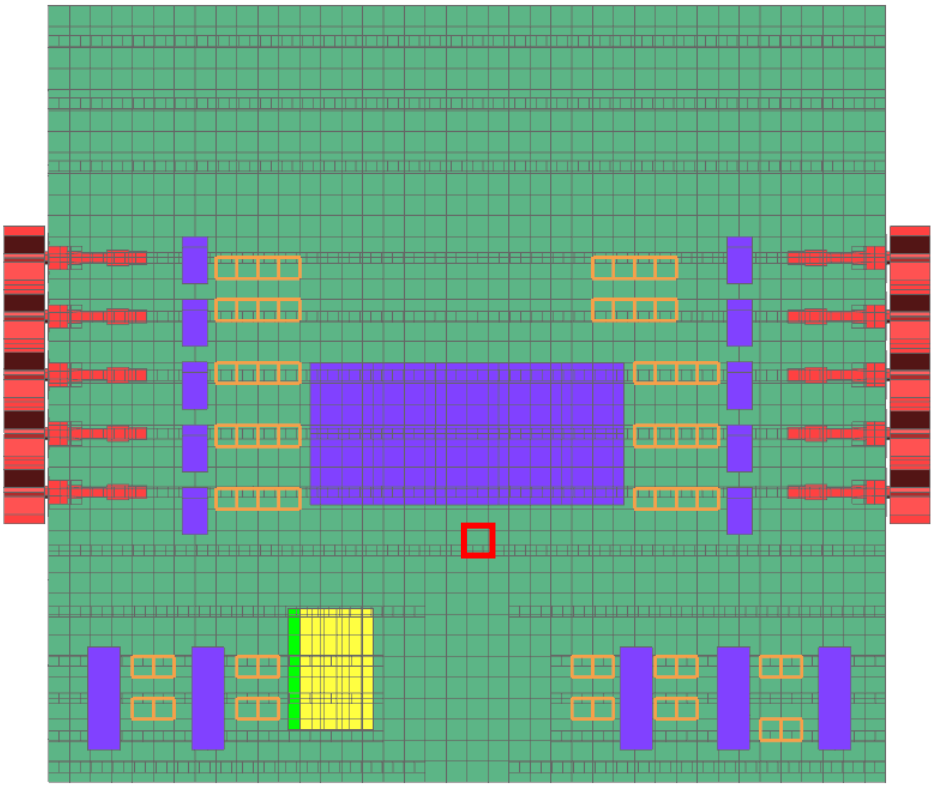
Sonuç olarak çözünürlükte değişimler görülse bile bu değişim kritik ekipman ve panel yüzeyi sıcaklıklarına kayda değer bir şekilde etki etmemiştir. Bu durum, panel üzerinde ışınım etkileşimlerine etki eden girintili çıkıntılı karmaşık geometrilerin olmaması, sadece Güneş panellerinin gölgeleme ve Güneş ışınlarını yansıtma etkilerinin olmasıyla açıklanabilir. Karmaşık yapılı dış ekipmanlar bu panel üzerinde konumlandırılmış olsaydı ışın sayısının etkisinin daha çarpıcı olacağı değerlendirilmektedir.

Projenin ön tasarım fazında güney görev yükü paneli için 5000 ışın sayısının yeterli olduğu ve hatta çözüm sürelerini azaltmak için 1000 ışın sayılarına düşülebileceği görülmüştür. Kritik tasarım fazında karmaşık geometrilere sahip ekipman modellerin eklemesi ile ışın sayısının artırılması ihtiyacı doğabilecektir.

7.4 Önerilen Modelde Yapılan Soğuk Durum Analizlerinin Sonuçları

En sıcak durum analizleri gerçekleştirilerek yapılan model karşılaştırmalarına göre Model C'nin proje ön tasarım fazı için yeterli olduğu değerlendirilmişti. Bu bölümde Model C kullanılarak yapılan en soğuk durum analizi ile bilgiler ve sonuçları verilmiştir. Üzerinde çalışılan uydunun en soğuk durumunun ekinoks tarihlerinde uydunun acil durum moduna geçtiği senaryo olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca bu senaryonun uydunun ömür başında gerçekleşmesi, kaplamaların yüzey özelliklerini henüz bozulmadığı anlamına gelmektedir. Acil durum modunda uydunun haberleşme görevini yerine getiren ana ekipmanları çalışmaz. Görev yükünde sadece bir haberleşme hattı, telemetri telekomend ekipmanlarının sinyallerini iletmek için çalışır. Üzerinde çalışılan uyduda çalışan haberleşme hattı kuzey görev yükü panelindedir. Güney görev yükü panelinde çalışan herhangi bir hat bulunmamaktadır. Yani hiçbir ekipmanın ısı yayınımı bulunmamaktadır. Bu yüzden ısıtıcı güç hesapları ve yerleşimi için bu panel üzerinde çalışılmıştır. Yapılan analitik hesaplamalarda en düşük sıcaklık limitine sahip ekipmanı (-20 °C) limitler içinde tutmak için eşitlik 5.12 kullanılarak toplam ısıtıcı gücü yaklaşık 480 W olarak bulunmuştur. Isıtıcıların %50 çalışma oranına sahip olacağı varsayımıyla analizde uygulanması gereken toplam ısıtıcı gücü 960 W'tır.

Isıtıcıların yerleşimi için ön görülen konumlar Şekil 7.71'de verilmiştir. Isıtıcılar ilk öngörü için tek hat olarak düşünülmüş ve tek kontrol noktası (Şekil 7.71'de kırmızı ile gösterilen eleman) seçilmiştir.

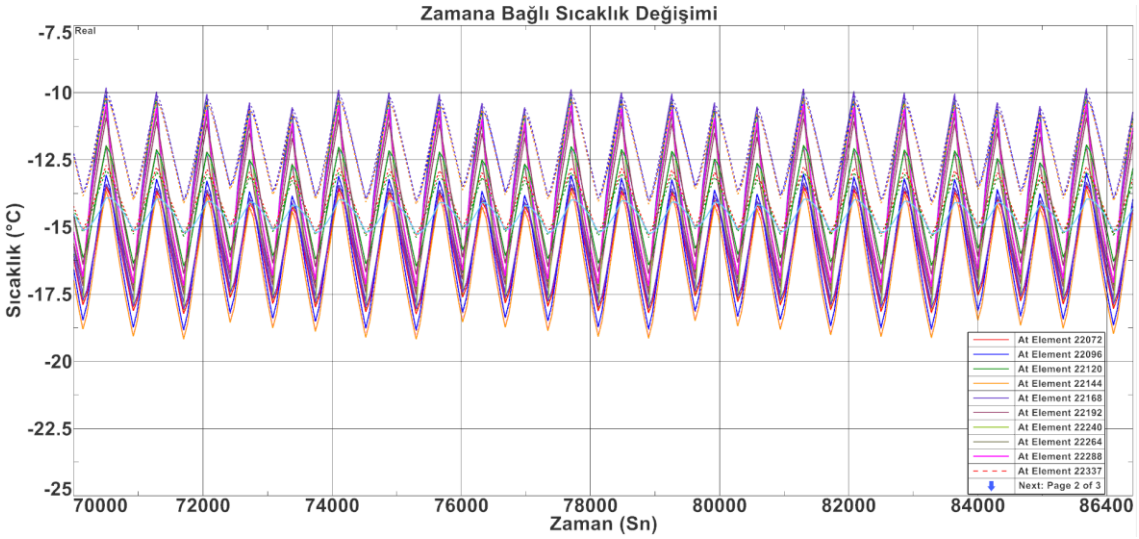


Şekil 7.71 Güney görev yükü panelinde ısıtıcı yerleşimi öngörüsü

Yapılan analizdeki özellikler aşağıda verilmiştir:

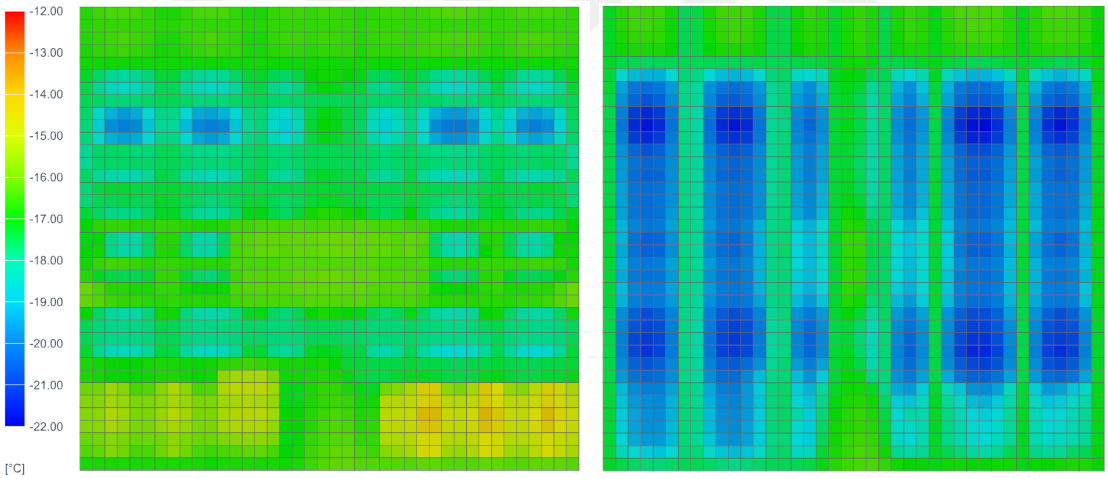
- İç ışınım etkisi varken çözdürülmüştür.
- Yörüngede hesaplama noktası sayısı=12
- Yörünge Sayısı=1
- Zaman Adımları=60 sn=1 dk
- Başlangıç sıcaklığı=Kararlı durum analiz sonrası elde edilen sıcaklıklar
- Acil durum senaryosu-Ekinoks gün dönümü- Ömür başlangıcı

Analiz sonuçlarına göre güney görev yükü ekipmanlarının sıcaklıkları limitler içinde kalmıştır (Bkz: Tablo 6.2). Güney panelde yer alan ekipmanların sıcaklık referans noktaların yörünge sonundaki zamana bağlı değişimleri Şekil 7.72'de gösterilmiştir. Panele uygulanan 960W'lık ısıtıcı gücünün çalışma oranı yaklaşık %55 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.72 Güney görev yükü ekipmanlarının soğuk durumdaki sıcaklık değişimleri

En soğuk durumda güney görev yükü panelinin iç ve dış yüzeyinin sıcaklık dağılımları Şekil 7.73'te verilmiştir. Panel iç yüzey sıcaklık ortalaması 17.0 °C ve dış yüzey (radyatör) sıcaklık ortalaması 18.6 °C'dir.



Şekil 7.73 Güney görev yükü paneli iç ve dış yüzey sıcaklık dağılımları

Gerçekleştirilen analizde ön tasarım fazı için toplam ısıtıcı gücü ve ısıtıcı yerleşim öngörüleri yapılmıştır. Isıtıcı hatlarının detay yerleşimi, kontrol noktalarının ve kontrol sıcaklıklarının ayarlanması detay tasarım fazında hassasiyetle yapılması gereken önemli bir iştir. Bu işin doğruluğu için ekipman ve donanımlar bazında detaylı bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

8
SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında yer sabit uydusunun ısıl kontrol sistemi tasarımına ilişkin bilgiler verilmiştir. Üzerinde çalışılan konsept yer sabit uydu için ilk adımda gerçekleştirilen hesaplamalar ile ısıl yeterlilik kontrolü yapılmıştır. Sonraki adımlarda farklı boyutta elemanlara sahip 5 farklı ısıl model oluşturulup çözüm ağı bağımlılığı incelenmiştir. Yapılan analizlerde; kritik ekipman sıcaklıkları, panel yüzeyi sıcaklıkları, çözüm süreleri ve sonuç dosyaları boyutları karşılaştırma kriterleri olarak seçilmiştir. Sonuçlardan elde edilen verilere göre oluşturulan modellerin uydu projelerinin farklı aşamalarında (ECSS'te belirtilen (Bölüm 4)) kullanımı konusunda öneriler verilmiştir.

Yapılan karşılaştırmalara göre uydu projelerinin konsept tasarım fazında Model A ve Model B modelleri, öncelikli olarak uzay ortamı kaynaklı ısıl yüklerinin yer aldığı yörünge analizlerinde ve radyatör yüzeylerinin yeterliliği hakkında bilgi sahibi olmak için kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Ekipman yerleşimleri ve ısı yayınımlarının değişimi gibi iterasyonlar yaşanabilen ön tasarım fazı için Model C detayında bir ısıl modelin en uygun olduğu değerlendirilmiştir. Model C çözüm süresi, sonuç dosyalarının boyutu, hazırlamak için gereken iş gücü gibi konularda daha detaylı olan Model D ve Model E göre avantajlı bulunmuştur. Buna karşın Model D ve Model E'deki sıcaklık sonuçlarına oldukça yakın sonuçlar vermiştir.

Kritik tasarım ve testlerin doğrulandığı daha sonraki proje aşamalarında Model D ve Model E'nin düzenlenerek kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Daha fazla detay içermeleri nedeniyle test ve analizler arasındaki olası farklılık daha kolay yorumlanabilecektir.

Ek olarak ECSS'te belirtilen ve başlangıç sıcaklıkların (20 °C) etkisinin yok edilebilmesi için yapılan 3 yörünge zamana bağlı analiz yerine kararlı durum analizi yapılması ile elde edilen sıcaklıkların başlangıç sıcaklığı olarak kullanılıp 1

yörünge zamana bağlı analiz yapılmasının çözüm süresi ve sonuç dosyalarının boyutu açısından önemli bir avantaj sağladığı görülmüştür.

Çözüm ağı yapılarına ek olarak bazı simülasyon parametrelerinin değişiminin etkilerini araştırmak için analizler yapılmıştır. Bu analizlerde yörünge nokta sayısı, zaman adımı, Monte-Carlo ışın sayılarının etkileri incelenmiştir.

Yörünge nokta sayısı için yapılan karşılaştırmalarda 2 ve 4 nokta sayısının en detaylı olan 24 nokta sayına göre yetersiz olduğu, 8 ve 12 nokta sayısının ise 24 nokta sayısına yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Analizlerde 8 ve 12 nokta sayısının kullanımının yeterli olabileceği önerilmiştir. Alınan danışmanlıklarda termoelastik analizler için en az 8 noktanın gerekliliği bilinmektedir.

Zaman adımının incelendiği sonuçlara göre seçilen (120 sn'de 30 dk'ya kadar) zaman adımlarında önemli bir fark görülmemiştir. Görev yükü ekipmanlarının sabit ısı yayınımlarına sahip olması nedeniyle sonucun bu şekilde elde edildiği değerlendirilmiştir.

Monte-Carlo ışın sayısının değişimi görev yükü panelinde girintili çıkıntılı bir yapıların olmaması nedeniyle sonuçları kayda değer bir şekilde etkilememiştir. Detaylı dış ekipman modelleri (anten, besleyiciler vb.) ile karmaşık yapıların modele eklenmesi sonrası ışın sayısının etkili olabileceği yorumlanmıştır. Bu durumda ışın sayısının değişiminin incelenmesi önerilmektedir.

Bu çalışma sırasında gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlara göre, tasarımı yapılan ısıl kontrol sistemi Tablo 6.2'te sıcaklık limitleri verilen ekipmanların en kötü şartlarda bile bu limitler içinde kalmasını sağlamaktadır. İlerleyen aşamalarda detaylı bilgilerin edinilmesi ile birlikte ısı borusu yerleşimi, radyatör alanı ve ısıtıcı güçlerinin optimizasyonu gibi detay çalışmalar yapılabilecektir.

KAYNAKÇA

[1] The Atlantic. 2022. The Web, the Media, and Today's 'Vast Wasteland', https://www.theatlantic.com/technology/archive/2011/03/the-web-the-media-and-todays-vast-wasteland/71823/, 24.05.2022.

[2] Sputnik 1- Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1, 24.05.2022.

[3] R. Aslan, N. Sözbir ve İ. Öz, *Uydu Haberleşmesi 101,* 2021.

[4] C. Atar ve M. Aktaş, "Advances in thermal modeling and analysis of satellites," *Gazi University Journal Of Science*, Sayı. 35, s. 42-58, 2021.

[5] K. F. C. Hung Sam ve Z. Deng, "Optimization of a space based radiator," *Applied Thermal Engineering*, Sayı. 31, no. 14–15, s. 2312–2320, 2011.

[6] N. Sözbir ve M. Bulut, "Thermal Control of CM and SM Panels for Turkish Satellite,", s. 2009-01, 2009.

[7] E. Arslantas, M. Bulut ve N. Sozbir, "The effect of uncertainty values of thermal control system on GEO satellites," *8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkey, 2017, s. 253–257.

[8] M. Bulut ve N. Sözbir, "Optimized Analytical Solution of Platform Panel Radiative Area Dimensioning of Geostationary Communications Satellites: A Practical Approach," *Sakarya University Journal of Science,* s. 986–992, 2019.

[9] S. K. Ataer, O. Ö. Çokgezen ve E. Dirgin, "Haberleşme Uydularında Gömülü ve Yüzeye Monteli Isı Borularının Isıl Kontrol Açısından Karşılaştırılması", *6. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK*), 2016.

[10] S. K. Ataer, O. C. Kayaoğlu ve S. Arabacı, "Farklı Geometrilerdeki Haberleşme Uydularının Isı Atım Kapasitelerinin Hesaplanması ve Karşılaştırılması,", *8. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK),* 2020.

[11] A. F. Keleş, Ö.R. Sözbir, M. Bulut ve N. Sözbir, "Haberleşme Uydusunun Isıl Analizi" *7. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK),* 2018.

[12] M. Bulut, N. Sözbir ve Ş. Gülgönül, "Haberleşme Uydusu Güneş Algılayıcısının Isıl Kontrolü," *acperpro*, Sayı. 2, no. 3, s. 460–465, 2019.

[13] S. Czernik, "Design of the Thermal Control System for Compass-1," M.S. thesis, University of Applied Sciences Aachen, Germany, 2004.

[14] M. Macdonald ve V. Badescu, Eds., *The International Handbook of Space Technology*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[15] D. Gilmore, *Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I: Fundamental Technologies.* Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002.

[16] The European Space Agency, Types of Orbits, https://www.esa.int/-Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits, 25.05.2022.

[17] Addison, K., Solar Dynamics Observatory, https://sdo.gsfc.nasa.gov/, 25.05.2022.

[18] K. E. Boushon, "Thermal analysis and control of small satellites in low Earth orbit," M.S. thesis, Missouri University Of Science And Technology, 2018

[19] Y. A. Cengel*, Heat Transfer A Practical App*roach. Boston, MA: McGraw-Hill, Inc., 1998.

[20] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Third Edition. New York: Academic Press, 2013.

[21] F. P. Incropera ve F. P. Incropera, Eds., *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6. Basım, Hoboken, NJ: John Wiley, 2007.

[22] L. M. Alexandre, "Master Thesis Report: Thermal Modeling of Satellite Heat Pipes and Payload of a Spacebus Neo Satellite" M.S. thesis, Kungliga Tekniska Högskolan, 2015.

[23] Savunma Sanayi TÜRKSAT 5A, https://www.savunmasanayi.org/turksat-5a-sali-gunu-firlatilacak/, 25.05.2022.

[24] P. M. Sutheesh ve A. Chollackal, "Thermal performance of multilayer insulation: A review," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., Sayı. 396, s. 012061, 2018.

[25] Multi-layer insulation- Wikipedia*,* https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-layer_insulation, 25.05.2022.

[26] Bulut, M., Kahriman, A. ve Sözbir, N., Uydularda ısıl kontrol, *Termodinamik Dergisi*, Sayı. 209, s.72-78, 2010

[27] V. Still, "Thermal Control Design and Simulation of a Space Mission," M.S. thesis, Luleå University of Technology, 2018.

[28] A. Yao ve Y. Sakurai, 'Thermal design approach of high powered communication satellite', *17th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit,* 2012.

[29] Study of the state of the art of Space Thermal Control Systems, *Innovative Mechanically Pumped loop for Active Antennae, (Impacta),* 2019.

[30] Collins, C., Space, solar panels and air conditioning: 10 uses for heat pipes you never thought of., https://www.etekina.eu/space-solar-panels-and-air-conditioning-10-uses-for-heat-pipes-you-never-thought-of/, 26.05.2022.

[31] K. N. Shukla, "Heat Pipe for Aerospace Applications—An Overview," *JECTC,* Sayı. 05, no. 01, s. 1–14, 2015.

[32] R. W. Lewis, P. Nithiarasu, ve K. N. Seetharamu, *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow: Lewis/Finite Element Method for Heat and Fluid Flow.* Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

[33] J.-M. Bergheau ve R. Fortunier, *Finite Element Simulation of Heat Transfer.* London, UK: ISTE, 2008.

[34] S. Yang et al., "Thermal control of primary mirror of Space Solar Telescope," *Optik*, Sayı. 229, s. 166290, 2021.

[35] ECSS-E-HB-31-03A, "*Space Engineering-Thermal Analysis Handbook"* Nov. 2016

[36] ECSS-E-ST-31C, "*Space Engineering-Thermal Control General Requirements"* Nov. 2016

[37] ASM Handbook Committee, *ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials-Properties of Wrought Aluminum and Aluminum Alloys*-1990

[38] Siemens Support Center-Simcenter 3D Pre/post Documentation, "*Understanding the Automatic Element Size Calculation",* 26.05.2022.

[39] N. R. Robbins, W. L. Menninger, Xiaoling Zhai, ve D. E. Lewis, "Space qualified, 150–300-watt K-band TWTA", *IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC),* Monterey, CA, USA, 2016, s. 1–2.

[40] 300 Watt Ka-Band Isolator, https://artes.esa.int/projects/300-watt-kaband-isolator, 26.05.2022.

[41] Ku-Bant ONET | ASELSAN, https://www.aselsan.com.tr/tr/cozumlerimiz/-uzay-teknolojileri/gorev-yuku-ekipmanlari/kubant-onet, 26.05.2022.

[42] Faydalı Yük Arayüz Birimi | ASELSAN, https://www.aselsan.com.tr/tr/-cozumlerimiz/uzay-teknolojileri/gorev-yuku-ekipmanlari/faydali-yuk-arayuz-birimi, 26.05.2022.

[43] I. Torralbo, J. Pıqueras, I. Perez-Grande, ve A. Sanz-Andres, "A new method to correlate Thermal Mathematical Models of space instruments and payloads.," *8th European Conference For Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS),* 2019, s. 9.

[44] Phillips, K. J. H., *Guide to the Sun,* s. 47–53, 1995

[45] Mercury – NASA Solar System Exploration, https://solarsystem.nasa.gov/-planets/mercury/in-depth/, 26.05.2022.

[46] K. Ramaseshan, M. Viswanathan, ve G. K. M. Thutupalli, "Optical black coatings for space applications," *Bull. Mater. Sci.,* Sayı. 8, no. 5, s. 581–586, 1986.

[47] Siemens Support Center-Simcenter 3D Pre/post Documentation, "Thermal output requests- Temperature Error Estimates*",* 26.05.2022.

[48] Siemens Support Center-Simcenter 3D Pre/post Documentation, “Adaptive time stepping method*”,* 26.05.2022.

[49] T. Soriano, M. Jacquiau, ve P. Cheoux-Damas, “Thermica: Overview and New Features,” *19th European Workshop on Thermal and ECLS Software,* 2005.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Y. Murat ve A. S. Dalkılıç “A Numerical Work for the Optimization of Mesh Sizes and Simulation Parameters regarding with the Preliminary Thermal Design of Geo-Satellites” 2nd International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies (ICENSS 2022), no.1 s. 171 Ankara, Mayıs, 2022