

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAPALI HACİMLERDE İŞINIMLA ISI GEÇİŞİ İLE ENERJİ ETKİNLİĞİNİN  
ARTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Özgür IŞIK**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Isı Akışkan Programı**

**HAZİRAN 2013**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAPALI HACİMLERDE İŞİNİMLA ISI GEÇİŞİ İLE ENERJİ ETKİNLİĞİNİN  
ARTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÖZGÜR İŞİK  
(503111124)**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Isı Akışkan Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU**

**HAZİRAN 2013**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111124 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Özgür IŞIK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KAPALI HACİMLERDE IŞINIMLA ISI GEÇİŞİ İLE ENERJİ ETKİNLİĞİNİN ARTIRILMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. İsmail Cem PARMAKSIZOĞLU**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. İsmail TEKE**      .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **03 Mayıs 2013**

**Savunma Tarihi :**      **03 Haziran 2013**



## ÖNSÖZ

Kapalı hacimler içerisindeki ışınlama ile ısı geçişi konusunda deneysel ve sayısal çalışmaların yapıldığı bu çalışma, İ.T.Ü Makina Fakültesi bünyesinde Prof. Dr. Seyhan Onbaşıoğlu yürütücülüğünde kurulan ‘Yüksek Sıcaklıklarda Isı Geçişi Laboratuvarı’ bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Lisans bitirme projesinden itibaren içerisinde bulunduğum bu ortamda, ülkemizde ne yazık ki çok fazla örneğini göremediğimiz bir araştırma ortamını bana sağlayan sayın Prof. Dr. Seyhan Onbaşıoğlu’na minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Bu projeye kaynak sağlayan TÜBİTAK ve Arçelik Pişirici Cihazlar A.Ş ‘ne, ve tez çalışmaları süresince Arçelik A.Ş merkez arge bünyesinde desteklerini esirgemeyen Dr. Aslı Kayıhan, Dr. Bekir Özyurt’a ve teknisyen Mehmet Maraşlı’ya desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmasının başından beri hem iyi bir arkadaş hem de iyi bir çalışma ortağı olarak her zaman birlikte olduğumuz Orkun Temel’e, laboratuvar ortamında yoğun temposuna rağmen ihtiyaç duyduğumuz her konuda yardımımıza koşan ve güler yüzüyle her daim yüzümüzü güldüren sayın Teknisyen Selman Benli’ye, çalışmam boyunca bana her zaman destek olan dostlarıma ve aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Mayıs 2013

Özgür IŞIK  
Makina Mühendisi





# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti .....	2
1.2 Işınım İle Isı Geçişine Dair Temel Kavramlar .....	3
1.3 Kapalı Hacimler İçerisinde Işınım İle Isı Geçişİ .....	7
1.3.1 Siyah yüzeyler arasındaki ısı geçişİ.....	9
1.3.2 Gri yüzeyler arasındaki ısı geçişİ .....	10
1.3.2.1 Net- ışınım yöntemi .....	10
1.3.2.2 Elektrik devre benzeşimi.....	12
1.4 Gaz ışınımıyla ilgili temel kavramlar .....	14
<b>2. DENEYSEL TESİSAT .....</b>	<b>19</b>
<b>3. MEVCUT DENEYSEL HACİM ÜZERİNDE YÜZEY İŞİNİMİYLE İLGİLİ</b>	
<b>ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>23</b>
3.1 Işınım İle Isı Akısı Sayısal Hesaplamaların Deneysel Olarak Doğrulanması.....	23
3.2 Fırın Kavitesinin Boş Olması Durumu .....	26
3.3 Tuğlalı Durum İçin Yüzey Işınımı .....	28
3.4 Şekil Faktörü İncelemeleri.....	30
3.4.1 Kavite hacmi değiştirilmiş fırın üzerinde yapılan çalışmalar .....	31
3.4.2 Yük konumu.....	33
3.5 Yayma Oranı İle İlgili Çalışmalar .....	41
3.5.1 Düşük yayma oranlı fırın üzerinde yapılan çalışmalar .....	41
3.5.2 Isıtıcı yüzeylerin siyah boya ile boyanması .....	48
3.6 Kapalı Hacmin Duvarlarında V-Oluklu Yüzey Kullanımı .....	51
<b>4. MEVCUT DENEYSEL HACİM ÜZERİNDE GAZ İŞİNİMİYLE İLGİLİ</b>	
<b>ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>59</b>
4.1 Özgün Fırın İçerisindeki Gaz Işınımının Mertebesi.....	60
4.2 S2S - DO Sayısal Model Karşılaştırması.....	64
4.2.1 Deney düzeneği .....	65
4.2.2 Sayısal modelleme .....	66
4.2.3 Karşılaştırma .....	69
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>76</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>79</b>



## **KISALTMALAR**

<b>CFD</b>	: Computational Fluid Dynamics
<b>DO</b>	: Discrete Ordinates
<b>DT</b>	: Discrete Transfer
<b>EN</b>	: English 2002 ISO 639-1
<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>MCRT</b>	: Monte Carlo Ray Tracing
<b>PID</b>	: Proportional – Integral – Derivative Algorithm
<b>RIM</b>	: Radiosity Irradiosity Method
<b>RTD</b>	: Elektrik Direnç Termometresi
<b>S2S</b>	: Surface to Surface



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : Standart enerji tüketimi deneylerinde ölçülmesi gereken büyüklükler ve sapma aralıkları.....	20
<b>Çizelge 3.1</b> : Deneysel düzenek için şekil faktörleri .....	24
<b>Çizelge 3.2</b> : Özgün fırın içerisine yerleştirilen standart tuğla için şekil faktörleri ...	28
<b>Çizelge 3.3</b> : Tek satırlı ve kolonlar ortalanmış çizelge .....	32
<b>Çizelge 3.4</b> : Dar pano fırın içerisine yerleştirilen standart tuğla için şekil faktörleri .....	32
<b>Çizelge 3.5</b> : Deneysel çalışma sırasında tuğla pozisyonu .....	34
<b>Çizelge 3.6</b> : Tuğla pozisyonu enerji tüketim sonuçları .....	34
<b>Çizelge 3.7</b> : 4. Yerleşim için şekil faktörleri .....	37
<b>Çizelge 3.8</b> : 1. Yerleşim için şekil faktörleri .....	38
<b>Çizelge 3.9</b> : Referans pozisyon-1. Ve 4. Yerleşim tuğla yüzeyine olan ışıma şiddetleri karşılaştırması.....	40
<b>Çizelge 3.10</b> : Paslanmaz çeliğin termofiziksel özellikleri.....	42
<b>Çizelge 3.11</b> : Özgün fırın-düşük yayma oranlı fırın ışıma şiddetleri karşılaştırması (ön ısıtma sonu).....	45
<b>Çizelge 3.12</b> : Düşük yayma oranlı fırında Q ışıma şiddeti (W) ön ısıtma sonu karşılaştırma. ....	46
<b>Çizelge 3.13</b> : Alt ve üst yüzeyleri boyalı deney hacmi enerji tüketimi sonuçları.....	50
<b>Çizelge 3.14</b> : V-Oluklu yüzey kullanımının enerji tüketimine olan etkisi .....	57
<b>Çizelge 4.1</b> : Sayısal çalışmalardan elde edilen su buharı kütle derişikliği.....	63
<b>Çizelge 4.2</b> : Su buharı için yayma katsayısı değerlerinin hesaplanması .....	64
<b>Çizelge 4.3</b> : Fırın içerisindeki su buharının oluşturduğu gaz ışımasını.....	64



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Elektromanyetik dalga tayfi. ....	5
Şekil 1.2 : Yarı geçirgen bir yüzey üzerinde gerçekleşen ışınım ile ısı geçişi. ....	6
Şekil 1.3 : Siyah cisimler arasındaki ışınım. ....	9
Şekil 1.4 : Siyah yüzeylerden oluşan kapalı bir hacim içerisindeki ışınım ile ısı geçişi. ....	10
Şekil 1.5 : Bir cisim üzerinde enerji dengesi. ....	11
Şekil 1.6 : Paralel levhalar arasındaki ışınım ile ısı geçişi için elektrik devre benzeşimi. ....	13
Şekil 1.7 : n adet yüzeyden oluşan bir devre için ışınım akı dengesi. ....	14
Şekil 1.8 : Işınım demetinin yutulması. ....	15
Şekil 2.1 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi. ....	20
Şekil 3.1 : Kapalı bir hacim elde edilmesi amacıyla oluşturulan deney düzeneği. ....	24
Şekil 3.2 : Isı akısı sensörü. ....	25
Şekil 3.3 : Işınım akısı deneysel – sayısal karşılaştırma. ....	26
Şekil 3.4 : Özgün fırın boş hal için kavite yüzeylerinden olan ışınım ile ısı akıları. ....	27
Şekil 3.5 : Tuğlalı durum için yüzey notasyonları. ....	28
Şekil 3.6 : Tuğlalı durum için kavite yüzeylerinden olan ışınım gücü. ....	29
Şekil 3.7 : Tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddeti. ....	30
Şekil 3.8 : Dar pano / özgün fırın kavite iç hacim ölçüleri karşılaştırması. ....	31
Şekil 3.9 : Dar pano tuğlalı durum için tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddetleri. ....	33
Şekil 3.10 : 4 Numaralı yerleşim tuğla dikine kesit. ....	35
Şekil 3.11 : 4 numaralı yerleşim tuğla boyuna kesit. ....	35
Şekil 3.12 : 1 numaralı yerleşim tuğla enine kesit. ....	36
Şekil 3.13 : 1 numaralı yerleşim tuğla boyuna kesit. ....	36
Şekil 3.14 : 4. Yerleşim için tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddetleri. ....	39
Şekil 3.15 : 1. Yerleşim için tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddetleri. ....	39
Şekil 3.16 : Referans pozisyon tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddeti. ....	40
Şekil 3.17 : Paslanmaz çelik kaviteden üretilen prototip fırın. ....	41
Şekil 3.18 : Özgün fırın – düşük yayma oranlı fırın ısıtıcı ve merkez sıcaklıkları karşılaştırması. ....	42
Şekil 3.19 : Özgün fırın – düşük yayma oranlı fırın yan, arka ve kapak yüzey sıcaklıkları karşılaştırması. ....	43
Şekil 3.20 : Düşük yayma oranına fırın boş hal yüzey ışınım şiddetleri. ....	44
Şekil 3.21 : Düşük yayma oranına sahip fırın için 180 K standart tuğlalı enerji tüketimi esnasında yüzeylerden olan ışınım şiddeti. ....	46
Şekil 3.22 : Tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddeti. ....	47
Şekil 3.23 : Düşük yayma oranına sahip fırınla özgün fırın arasındaki ışınım etkinliği karşılaştırması. ....	48
Şekil 3.24 : Alt ve üst yüzeyleri siyah boya ile boyanan deneysel hacim. ....	50

<b>Şekil 3.25</b> : Alt- üst boyalı – tüm yüzeyler parlak - tüm yüzeyler siyaha boyalı merkez kavite sıcaklıkları karşılaştırması. ....	51
<b>Şekil 3.26</b> : V-oluklu bir yüzeyin şematik gösterimi. ....	52
<b>Şekil 3.27</b> : Işın demetinin izlediği olası bir rota. ....	53
<b>Şekil 3.28</b> : V-oluklu yüzeylerde oluk açısı ve yayma oranına göre görünür yayma oranı. ....	54
<b>Şekil 3.29</b> : Galvanizli sac için emisivitenin dalgaboyuna göre üç farklı sıcaklıkta değişimi. ....	55
<b>Şekil 3.30</b> : V-oluklu yüzey – özgün fırın yan duvar sıcaklık dağılımları ....	56
<b>Şekil 4.1</b> : Su buharı için ortalama yayma katsayıları.....	61
<b>Şekil 4.2</b> : Ph20 Le değeri için düzeltme katsayısı .....	61
<b>Şekil 4.3</b> : 140 K deneyi sırasında kaviteye verilen su buharı miktarı.....	62
<b>Şekil 4.4</b> : Deney düzeneği üzerindeki termoeleman yerleşimi. ....	66
<b>Şekil 4.5</b> : Rayleigh sayısının zamana bağlı değişimi.....	67
<b>Şekil 4.6</b> : Sayısal hesaplamalarla deneysel sonuç arasındaki karşılaştırma.....	69
<b>Şekil 4.7</b> : DO-S2S yöntemi sıcaklık dağılımı karşılaştırma t=120 s. ....	70
<b>Şekil 4.8</b> : DO-S2S yöntemi sıcaklık dağılımı karşılaştırma t=120 s. ....	71
<b>Şekil 4.9</b> : DO-S2S yöntemleri $x=0.05$ m hız bileşenleri karşılaştırması. ....	71



## SEMBOL LİSTESİ

<b>c</b>	: Elektromanyetik dalganın hızı [m/s]
<b>c<sub>0</sub></b>	: Vakum ortamındaki ışık hızı [m/s]
<b>n</b>	: Ortamın kırılma indeksi
<b>v</b>	: Dalga frekansı [Hz]
<b>ω</b>	: Dalganın açısal frekansı [s <sup>-1</sup> ]
<b>λ</b>	: Dalga boyu [m veya A=10 <sup>-10</sup> m]
<b>ρ</b>	: Yansıtma oranı
<b>α</b>	: Yutma oranı
<b>τ</b>	: Geçirme oranı
<b>ε</b>	: Yayma oranı
<b>J</b>	: Yüzeyden olan ışınım akısı [W/m <sup>2</sup> ]
<b>F<sub>12</sub></b>	: Şekil faktörü
<b>σ</b>	: Stefan Boltzman sabiti
<b>A</b>	: Alan [m <sup>2</sup> ]
<b>K<sub>λ</sub></b>	: Sönme katsayısı
<b>λ<sub>0</sub></b>	: Vakum şartlarındaki dalga boyu [m]
<b>Le</b>	: Eşdeğer gaz tabakası kalınlığı [m]
<b>Q<sub>toplam</sub></b>	: Toplam ısı geçişi [W]
<b>Q<sub>iletim</sub></b>	: İletimle olan ısı geçişi [W]
<b>Q<sub>ışınım</sub></b>	: Işınım ile olan ısı geçişi [W]
<b>ε<sub>g</sub></b>	: Gazın ortalama yayma oranını
<b>P</b>	: Kısmi buhar basıncı



## KAPALI HACİMLERDE IŞINIMLA ISI GEÇİŞİNİ İLE ENERJİ ETKİNLİĞİNİN ARTIRILMASI

### ÖZET

Literatürde üzerinde çok fazla çalışma yapılmayan bir konu olan ışınlama ısı geçişi, bilhassa yüksek sıcaklıklara çıkıldığında baskın bir mekanizma haline gelmekle birlikte, özellikle enerji verimliliğinin azaltılması açısından önemli bir bileşen durumundadır. Bu çalışma kapsamında, kapalı hacimler içerisindeki ışınlama ısı geçişi hakkında yapılan teorik arka plan araştırması ışığında geliştirilen modeller uygulama alanı olan ev tipi ankastre fırınlar üzerinde incelenmiştir.

Tez çalışmasının ilk bölümünü oluşturan giriş bölümü boyunca ışınlama ısı geçişini oluşturan temel kavramlar tanıtılmıştır. Yüzey ışınlamıyla ilgili olarak sunulan kavramsallaştırmalar ideal yüzeyleri tanımlamakta kullanılan siyah cisimleri tarif ettikten sonra, gerçek (gri) yüzeyler üzerinde durmuştur. Gri yüzeyler arasındaki yüzey ışınlamını çözümlenmekte kullanılan yöntemlerden bazıları sıralandıktan sonra, gaz ışınlamı mekanizması ile ilgili temellerden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde ise çalışmaların yürütüldüğü laboratuvar olan ‘Yüksek Sıcaklıkta Isı Geçişi Laboratuvarı’ bünyesinde yürütülen 111M048 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında yapılan çalışmalarla eş zamanlı olarak yürütülen tez çalışması esnasında ele alınan uygulama olan ev tipi ankastre fırının standart hale getirilmiş enerji tüketim deneylerinin yapıldığı tesisat tanıtılmıştır.

Bölümü takiben, mevcut ev tipi fırın üzerinde yüzey ışınlamı etkinliği incelenmiştir. Yapılan inceleme ilk olarak fırının boş olması durumunda, sonrasında ise standart deneylerde yiyeceği modelleyen tuğlalı hal için sunulmuştur. Bu incelemeler mevcut fırında yapılacak iyileştirmeler için zemin oluşturmaktadır. İlerleyen iki alt başlık kapsamında ışınlama ısı geçişini doğrudan etkileyen iki parametre olan şekil faktörü ve yayma oranı incelenmiştir. Şekil faktörü incelemeleri esnasında ilk olarak kavite hacmi üzerinde değişiklik yapılmış fırın ele alınmış ve enerji tüketimi değerleri ile ışınlama ısı geçişi performansı ilişkilendirilmiştir. Sonrasında ise, standart deneylerde merkezde yer alan tuğla farklı pozisyonlara yerleştirilerek sıcak yüzeyler ile yük arasındaki etkileşim mercek altına tutulmuştur.

Yayma oranı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar ilk olarak literatürde de üzerinde sıkça durulan ‘düşük yayma katsayılı fırın’ üzerinde yoğunlaşmıştır. Destekçi kuruluş tarafından temin edilen bir prototip üzerinde yapılan incelemeler göstermiştir ki düşük yayma oranına sahip fırın yüzey sıcaklıklarını düşürmekte ve dolayısıyla ısı kayıplarının önüne geçmektedir. Bu bölümde yapılan incelemeler ışığında elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde düşük yayma katsayılı fırın tasarımına eleştirel olarak bakılmasının önünü açmıştır. Yapılan analizler sonucunda ışınlama yayan yüzeylerin yüksek, ışınlama toplayan yüzeylerin ise düşük yayma katsayısına sahip olduğu hibrid tasarımların performansı artıracığı öngörülmüştür. Yapılan öngörüler tasarlanan deney düzeneğinde test edilmiş ve öngörülerle paralel sonuçlar elde edilmiştir.

Tez çalışmasının son bölümünde ise içeriğinde su buharı bulunduran bir ortam olan kavite hacmi içerisindeki gaz ışınlı mekanizmasının etkileri üzerinde durulmuştur. İlk olarak ortalama yayma katsayısını belirleyen mühendislik yaklaşımı sayesinde fırın içerisindeki gaz ışınlının mertebesi ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar bu mertebenin hiç de azımsanamayacak düzeyde olduğunu göstermektedir. Son olarak ise, gaz ışınlı mekanizmasını göz önüne alan bir sayısal model olan Discrete Ordinates (DO) yöntemi ile yüzey ışınlını gözetken Surface to Surface (S2S) sayısal modelleri nemli hava içeren bir kapalı hacim içerisindeki doğal taşınımın modellenmesinde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar arasında karşılaştırmaya gidilmiştir.

# UTILIZATION OF RADIATION HEAT TRANSFER FOR IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY IN ENCLOSURES

## SUMMARY

Radiation heat transfer, even though is not a popular subject in literature, is a dominant heat transfer mechanism especially in high temperatures thereby improving energy efficiency. In this study, models provided by theoretical background on radiation heat transfer in enclosures applied on household built-in ovens.

In the first section of the thesis, the main concepts that constitute radiation heat transfer is introduced. Surface radiation has been divided into two sections: at first idealized surfaces that called 'black body' than the real ones (gray surfaces). Here, the methods that are used to solve surface radiation between gray surfaces before mentioning fundamentals about gas radiation.

The second section is referred to the application of the study and the experimental setup in 'High Temperature Heat Transfer Laboratory' that the studies carried with the 1001 project 111M048 supported by TUBITAK.

Afterwards, the surface radiation in the original oven is investigated. At first, the cavity set empty, then the brick is placed in the center to be studied to provide the basis for improvements. In the following two subtitle, the radiation exchange factor and emissivity are determined as parameters. At first, the prototype that the size of the cavity is changed is investigated to determine the effect of exchange factor relationship. Moreover, the standard position of the test brick is set to different locations to link energy consumption of the oven and position of the brick.

As it is noticed that the energy resources of our planet is alarming, the researches have started to give their attention to decrease the consumptions. For that purpose, the household appliances are one of the important field to focus. Thanks to these studies, the efficiency levels are improving. During 90's the energy efficiency of a domestic oven was in approximately 12-13%, nowadays the levels are lift up to 25%. Nevertheless, the standardization of the energy consumption experiments has become to be identified more detailed by the committees. European Committee for Electrotechnical Standardization (CELENEC) has announced in 1996 and, give its final version in 2005 as EN 50304 for the energy consumption experiments for domestic ovens.

The complexity of analytical solution of radiation problems have paved the way for numerical solutions beside them. Radiosity Irradiosity Method (RIM), Discrete Transfer Method (DTM), Discrete Ordinate Method (DOM), Finite Volume Method and Monte Carlo Method are some of the most popular numerical methods in radiation problems. Monte Carlo Method, which is used in this study, is a statistical method that models a physical problem. Markov chain and random numbers set a base for this method which gives rapid results. Monte Carlo approach has been adapted to radiation problems by Howell. These models have been used oftenly in industrial cases. These studies and a large literature summary are present in. On the

other hand, numerical studies in domestic ovens have been conducted by various studies including the effects of radiation in addition to natural convection.

In the present work, such an analysis including the effects of radiation and convection in domestic ovens has been performed by the means of S2S radiation model and k-epsilon turbulence model. Three different enclosure models have been designed in a built-in oven in order to improve the efficiency of radiation. The main goal was to improve efficiency by improving the contribution of view factor effect. The experimental study has been carried out in order to compare the models from the view points of energy consumption and cooking time. By the way, the computational study focused on the mechanism of heat transfer in cavity.

During the study on the emissivity of the oven the concept 'low emissivity oven' examined at first. The studies carried on a prototype supplied by supporter firm that showing reducing emissivity reduces temperature gradient thus decreasing heat loses. The results obtained by this section pave the way for a critical view on the concept. Therefore, it has been stated as a projection that the emitter plates should be high and collector plates should have low emissivity. The projection has been validated by experimental results that the energy consumption can be reduced so.

Finally, in the last section of the thesis, the effect of moist air in the cavity on the gas radiation mechanism is being searched. Firstly, by the view of engineering aspect the order of the gas radiation in the oven is stated. Results have shown that gas radiation cannot be neglected. Secondly, two different numerical models one considering gas radiation (Discrete Ordinates) the other only surface radiation (S2S) are compared for a cavity that filled with moist air.

Due to many engineering applications, like ovens, combustion chambers, condensers etc. there are many researches devoted to coupled heat and mass transfer in enclosures. For high temperature applications, radiative heat transfer should be taken into account hence there are also some paper covered heat/mass transfer with radiation. However, it is possible to claim that radiative heat transfer plays a non-negligible role in heat transfer even in very low temperature differences. In addition to computational studies, including radiative heat transfer or not, it is also an important factor that whether radiation is treated as a surface phenomenon or a whole-domain phenomenon.

A numerical study on this issue has shown that it is possible to obtain completely different results by using different treatments. Therefore, for the ones who are willing to conduct a numerical study on the radiation phenomena, it is vital to determine which type of treatment would be sufficient to obtain an agreement between experimental and numerical results. Briefly the object of this study is to investigate the coupled heat/mass transfer with radiation in an enclosure and proposing a limitation for participating medium assumption with a comparative study on two radiation models.

In this study, the governing equations are solved by means of finite-volume approach with a commercial CFD program (FLUENT). All equations are temporally discretized by first order implicit time integration method. An implicit scheme may provide unconditionally stable numerical solution, however the time-steps are selected under the consideration of turbulent temporal scales. Previous studies in turbulent buoyant flows in enclosures have shown that under convenient

discretization methods and grid resolutions, it is possible to obtain satisfying numerical results which are in agreement with experimental results. Therefore, a realizable  $k$ - $\epsilon$  turbulence model is chosen for the modeling of turbulence. Convective terms of transport equations are discretized by upwind scheme whereas the diffusion terms are discretized by standard central differencing. Velocity and pressure are coupled by the means of SIMPLE method. Ideal gas formulation has been used for the variation of density.

For modeling of radiation, two different models have been used. One of them is well-known Radiosity - Irradiosity Method (RIM) which can be used to account radiation exchange in an enclosure with gray surfaces. Radiation exchange with surfaces is accounted by a geometric function "view factor" which can be determined by a ray tracing or a hemicube method. In this study, RIM method has been implemented on the basis of view factors calculated by ray tracing method. However, when the medium is participating, RIM model, which treats radiation as a surface phenomena, fails to provide a numerical result that would be validated by experimental results. Therefore, Discrete Ordinates Method (DO) which considers the fluid within the cavity as radiation exchanging domain. RTE is solved by means of finite volume techniques. RTE can be solved by using finite volume discretizations not only for structured meshes but also for unstructured meshes. In this study, radiation intensity field is obtained on a structured mesh.





## 1. GİRİŞ

Her ne kadar literatürde taşınım ve iletimle ısı geçişine oranla daha az üzerinde durulsa dahi, ışınlama ısı geçişi, özellikle mühendislik uygulamalarında en az diğer iki mekanizma kadar önemli ve bir o kadar da etkin bir ısı geçişi mekanizması olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklara çıkıldığında etkinliği artmasına rağmen, ışınlama ısı geçişinin oda koşullarında dahi önemli olduğu yapılan bazı çalışmalarda gösterilmiştir [1]. Bu nedenle bilhassa endüstride karşılaşılan ev tipi ve endüstriyel fırınlar, yanma odaları, buharlaştırıcılar, motorlar gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında ışınlama ısı geçişinin dikkatle analiz edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde hem teorik hem de deneysel olarak üzerinde pek de durulmayan ışınlama ısı geçişi mekanizmasını etkileyen faktörler üzerinden parametrik olarak yürütülen tez çalışması kapsamında, ışınlama ısı geçişine dair temel kavramlara yaslanacak şekilde tasarım değişiklikleri öngörülmesi, öngörülen değişiklikler ise uygulama ürünü olan ev tipi bir ankastre fırın üzerinde denenmiştir.

Çalışma kapsamında ilk olarak mevcut fırın üzerinde yapılan incelemeler yardımıyla fırının ışınlama ısı geçişi performansı ortaya konmuştur. Sonrasında ışınlama ısı geçişi mekanizmasını etkileyen temel parametrelerden olan şekil faktörü, yayma katsayısı, yüzey geometrisi, nem oranı gibi etkenler değişken olarak belirlenmiş, deneysel ve sayısal incelemeye tabi tutulmuştur.

Yapılan inceleme ışığında, bu parametreler üzerinden mevcut sistem üzerinde yapılan değişikliklerin fırının performansını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmış, elde edilen sonuçlar ilerleyen çalışmalarda derinleştirilebilecek bir potansiyele basamak oluşturmuştur.

## 1.1 Literatür Özeti

Kapalı hacimler içerisindeki ışınlama ısı geçişi incelenmeye başlandığında, ilk ayrımlardan biri olarak karşımıza yüzey ışınlama ve ortamda yer alan polar olmayan moleküllü gazların katkısıyla gerçekleşen gaz ışınlama mekanizması çıkacaktır. Temelleri 19. yüzyıl başlarında atılan yüzey ışınlama için teorik arka plan, mühendislik bakış açısıyla yüzyıl ortalarından itibaren ele alınmaya başlamıştır. Bu çalışmalar arasında Hottel tarafından ortaya atılan net-ışınlama yöntemi [2] ve Gebhart tarafından geliştirilen benzer bir yöntemden söz edilebilir [3]. Oppenheim ise yaptığı çalışmayla elektriksel devre benzeşimi kavramını ışınlama ısı geçişi problemlerine uygulayarak problemlerin zorluklarına kolaylaştırıcı bir bakış açısıyla yaklaşmayı sağlamıştır [4]. Günümüzde ise ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD-CFD) uygulamalarında yüzeyden-yüzeğe ışınlama (surface to surface, S2S) olarak kullanılan yöntemin uygulamalarına sıklıkla rastlanmaktadır [5,6].

Yüzeyler arasındaki ışınlama ısı geçişine dair yapılan analizler, ne kadar sıcak yüzeylerin yaydıkları ya da üzerlerine düşen ışınlama akılarına dair fikir verse dahi, bilhassa kapalı hacimlerin içerisinde ışınlama saçan ya da yutan gazların olması durumunda gaz ışınlama göz önüne alan çözüm yöntemleri geliştirilmelidir. Gaz ışınlama inceleyen analizler özellikle son yıllarda üzerinde ciddi anlamda durulan güncel çalışmalar haline gelmişlerdir. Bu analizler arasında, bölge yöntemi (zone method), Monte Carlo ışın izleme yöntemi (MCRT), ayrık transfer yöntemi (DT), ayrık ordinat yöntemi (DO), sonlu hacimler yöntemi yer almaktadır [7].

Bu yöntemler arasında, tez çalışması kapsamında da incelenen model olan DO yöntemi ise gaz ışınlama etkin olduğu koşullarda elverişli bir yöntemdir. Yöntem, çözüm ekonomisi ve hassasiyet arasında kurduğu denge nedeniyle özellikle son dönemde tercih edilmektedir [8]. Geleneksel DO yöntemi Carlson and Lathrop [9], Fiveland [10], Jamaluddin and Smith [11], ve Baekt ve arkadaşları [12] tarafından geliştirilmiştir.

DO yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar arasında; Sakami ve arkadaşlarının yöntemi üç boyutlu karmaşık geometrilere uyguladıkları [13], Nevin Selcuk ve Nuray Kayakol'un yöntemi kapalı bir yanma odasında kullandıkları [14] çalışmalar örnek gösterilebilir.

Monte Carlo Işın İzleme (MCRT) ise ışınlama ısı geçişi problemlerinin analitik çözümlerinde karşılaşılan zorluklara karşı geliştirilen ışınlama problemlerine de adapte

edilmiş bir yöntem olup olasılık dağılımı prensibine dayanmaktadır. Konu ile ilgili çalışmalar 60'lı yılların ortalarında Howell J. R'in yaptığı çalışmalarla başlamış [15], ve sonrasında ışınlama ısı geçişi problemlerinde sıklıkla kullanılmıştır. Yöntem yüzey ışınlama çözümlerine uygulanırken, şekil faktörü hesaplamalarında [16, 17] ve karmaşık geometrilere yüzey ışınlama problemlerine uygulanmıştır [18]. Aynı zamanda tersine tasarım (inverse design) problemlerine de uygulanabilen yöntem, bir yüzeye ya da elemana uygulanması istenen ışınlama akısına göre ısıtıcı tasarımları yapan araştırmalarda da kullanılmaktadır [19]. Lif esaslı yalıtım malzemeleri içerisindeki ışınlama ısı geçişi mekanizmasının incelenmesi, lif çapı, yerleşimi gibi parametreler üzerinden değişiklikler yaparak yeni yalıtım malzemeleri tasarımları yapılmasına dair çalışmalar ise güncel konular arasında yer almaktadır [20,21,22].

Son olarak tez çalışması kapsamında incelenen uygulama olan ev tipi ankastre fırınlarda ışınlama ısı geçişine dair yapılan iyileştirme çalışmalarına değinmekte fayda vardır. B. M. Shaughnessy ve M. Newbrough 90'lı yılların sonlarında yaptıkları çalışmalarla düşük yayma katsayılı (low- $\epsilon$ ) fırın kavramını ortaya atmış ve oluşturdukları prototiplerle ev tipi fırınlarda ışınlama ısı geçişi etkinliğini daha verimli hale getirmişlerdir [23]. Chhanwal ve arkadaşları ise elektrikli bir fırın üzerinde yaptıkları sayısal çalışmada üç farklı ışınlama modelini (S2S, DTRM, DO) kullanarak nem içeren bir pişirme ortamında elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır ve DO modelinin nem içeren bir ortamda çözümleme için uygun olduğu sonucuna varmışlardır [24].

## **1.2 Işınlama Isı Geçişine Dair Temel Kavramlar**

Herhangi bir cisimden yayılan ısı ışınlama temel olarak iki ana bakış açısıyla ele alınmaktadır. Bunlardan ilki olan kuantum teorisine göre, bir cisimden yayılan ısı ışınlama enerjisi, kütsüz olduğu kabul edilen foton paketleri aracılığıyla taşınmaktadır. Bir diğer teori olan elektromanyetik dalga teorisine göre ise cisimler sıcaklıklarıyla orantılı olarak molekül ve ya atomlarının titreşimleri aracılığıyla çevrelerine ısı ışınlama yayarak enerji kaybederler.

Isı ışınlama mekanizmasının gerçekleşmesi için, diğer ısı geçişi mekanizmalarında olduğu gibi herhangi bir ortama ihtiyaç duyulmaz. Bununla birlikte, cisimlerden yayılan elektromanyetik dalgalar ortamda ışık hızı olarak adlandırılan bir hızla yayılırlar.

Bir vakum ortamında yayılan ışık hızı  $c_0$  olarak gösterilmekle birlikte evrensel bir sabit olan 2,9979 m/s değerine eşittir. Buna göre herhangi bir ortamda yayılan elektromanyetik bir dalğanın hızı:

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (1.1)$$

olacaktır. Burada  $n$  ile gösterilen ifade ise ortamın kırılma indeksini göstermektedir.

Bir cismin yaydığı elektromanyetik dalga, dalga frekansı  $\nu$  [Hz] , dalga boyu  $\lambda$  [m veya  $A=10^{-10}$  m], dalğanın açısal frekansı  $\omega$  [ $s^{-1}$ ] ile tanımlanmaktadır. Bu ifadeler arasındaki bağıntı ise:

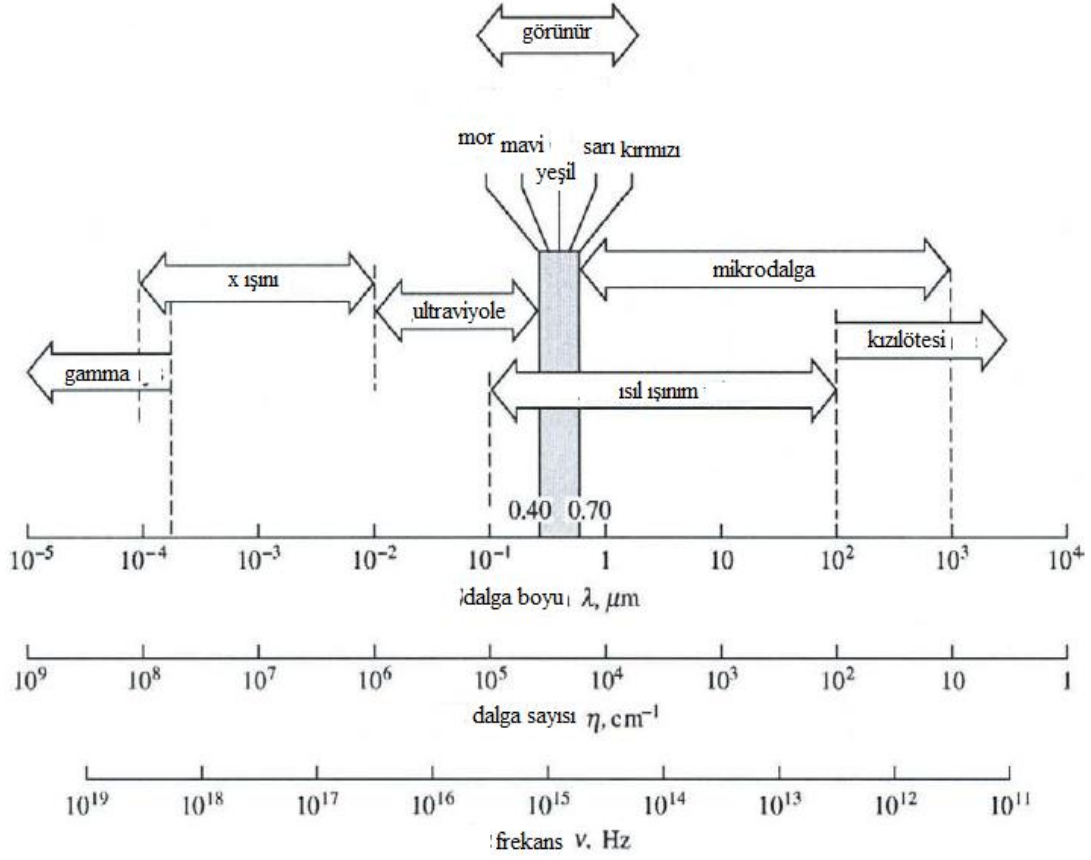
$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sıcaklıkla birlikte ısınan cisimlerin yaydıkları dalgaların frekansları artarken, dalga boyu küçülür. Cisimlerin moleküler ölçekteki titreşimlerinin artmasıyla birlikte ısı ışınım da artış gösterir.

Cisimlerin yaydığı dalgaların taşıdığı enerjinin miktarı, ışınlama ısı geçişini tanımlamak amacıyla geliştirilen teorilerin uygulamada daha doğru sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Farklı dalga boylarına sahip elektromanyetik dalgalar, dalga boylarına göre oldukça farklı karakteristikler göstermektedirler. Bu amaçla cisimlerin yaydığı elektromanyetik dalgalar belli bir spektrum üzerinde karakteristiklerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılmışlardır.

ışınlama ısı geçişi katı, sıvı ya da gaz fazında bulunan cisimlerde meydana gelirken özellikle yüksek sıcaklıklara çıktığında baskın bir ısı geçişi mekanizması haline gelmektedir. Bununla beraber, sıvı ya da gaz içerisinde yer alan taneciklerin de ısı ışınım yayma özellikleri mevcuttur.

Katı veya sıvı cisimlerde meydana gelen ısı ışınım mekanizması, maddelerin  $1 \mu\text{m}$  yüzeylerinde bulunan moleküller tarafından meydana getirilmektedir. Zira, yüzeyden derinlere inildikçe oluşturulan ısı ışınım diğer moleküller tarafından yutulmaktadır. Ancak, sıvı ya da gaz içerisinde bulunan tanecikler tarafından üretilen ısı ışınım hacimsel bir olgudur.



**Şekil 1.1 :** Elektromanyetik dalga tayfı.

Elektromanyetik bir dalga bir katı, sıvı ya da gaz bir ortam içerisinde hareket ederken bir kısmı yansır, bir kısmı yutulur ve bir kısmı da bu ortamdan geçer. Dalganın tamamının yutulması durumunda o cisim opak, tamamının ortamdaki geçmesi durumunda o cisim geçirgen (transparant), bir kısmının yutulup bir kısmının geçmesi durumunda ise yarı-geçirgen olarak tanımlanacaktır.

Üzerine düşen ışınım demetlerinin hiçbir kısmını yansıtmayan yüzeylere mükemmel yutucu ya da bilinen adıyla siyah cisim adı verilir. Tez çalışmasının ilerleyen kısmında da değinileceği üzere siyah cisim diğer ışınım yayma özelliklerinin incelemesi bakımından diğer cisimlere referans sağlamaktadır.

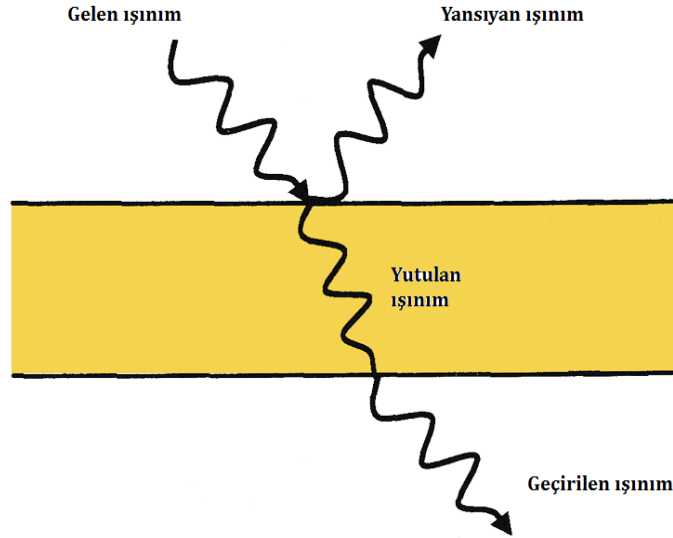
En iyi yutucu olma özelliğiyle birlikte siyah cisim en iyi yansıtıcı olma özelliğini de taşımaktadır. Yüzeyleri siyah cisimden oluşan ve eş sıcaklıkta olan vakum koşullarında olan kapalı bir çerçeve düşünelim. Bu hacim içerisine sıcaklığı kapalı hacimden farklı olan başka bir siyah cisim yerleştirelim. Bir süre sonra kapalı çerçeveyi oluşturan yüzeylerle siyah

cismin aynı sıcaklığa geldiği görülecektir. Buradan yola çıkarak siyah bir cismin yuttuğu kadar ışınım enerjisini yansıttığı söylenebilir.

Bunun ispatı için ise denge koşullarının ortadan kalktığı bir durumun düşünülmesi yeterli olacaktır. Çerçeve içerisinde oluşan eş sıcaklık durumunda yüzeylerden yayılan ve yutulan ışınım akısının birbirine eşit olduğu ortadadır. Zira eğer yutulan ve yansıtılan ışınım akıları arasında bir farklılık olsaydı cisimler arasında bir sıcaklık farkı olması ya da termodinamiğin ikinci yasasına aykırı şekilde eş sıcaklıktaki cisimler arasında ısı geçişi gerçekleşmeliydi.

Bu doğrultuda, siyah cisimlerden oluşan kapalı bir hacimdeki ışınım ile ısı geçişinin yönden bağımsız olduğu, kapalı hacim içerisindeki her noktada ışınım yoğunluğunun aynı olduğu eş yönlülük (izotropi) durumundan söz edilebilecektir.

Siyah cisimlerden sonra yarı geçirgen cisimlerin incelenmesine geçilebilir. Yarı geçirgen bir yüzey üzerine düşen ışınım demetlerinin bir kısmı yansır, bir kısmı tabaka tarafından yutulur, bir kısmı ise tabakadan geçer (Şekil 1.2).



**Şekil 1.2 :** Yarı geçirgen bir yüzey üzerinde gerçekleşen ışınım ile ısı geçişi.

Bu tabakayı sistem olarak kabul eder ve termodinamiğin 1. Kanununa göre enerji dengesini yazarsak;

$$G_{\lambda} = G_{\lambda,yansıyan} + G_{\lambda,yutulan} + G_{\lambda,geçirilen} \quad (1.3)$$

Enerji dengesini oluşturan bileşenler, gelen toplam ışınım oranlanırsa aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\rho = \frac{G_{\lambda, \text{yansiyen}}}{G_{\lambda}} \quad (1.4)$$

$$\alpha = \frac{G_{\lambda, \text{yutulan}}}{G_{\lambda}} \quad (1.5)$$

$$\tau = \frac{G_{\lambda, \text{geçirilen}}}{G_{\lambda}} \quad (1.6)$$

Bu bağıntılar (1.3) bağıntısında yerlerine konulduğunda ise aşağıdaki eşitliğe ulaşılabilir:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1.7)$$

Ortamın donuk olması durumunda ise geçen ışınım olmayacağından dolayı;

$$\rho + \alpha = 1 \quad (1.8)$$

elde edilir. Aynı zamanda kapalı hacimler için geçerli olan Kirchoff yasasına göre;

$$\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{\alpha_2} = \dots = 1 \quad (1.9)$$

Buna göre kapalı çerçeve içersindeki her bir yüzey için

$$\varepsilon = \alpha \quad (1.10)$$

bağıntısı kullanılabilir. (1.10) bağıntısı belli kabuller ve kısıtlamalar altında yazılmıştır. Buna göre, cisim üzerine gelen ışınımın tamamını yutan siyah cisim olarak kabul edilmiştir. Aynı zamanda, dalgaboyu ve spektral yöne olan bağımlılık göz ardı edilmiştir. Siyah cismin ideal bir cisim olduğu göz önüne alınırsa, gerçek cisimler için bağıntı şu şekilde yazılabilir.

$$\varepsilon_{\lambda, \theta} = \alpha_{\lambda, \theta} \quad (1.11)$$

### 1.3 Kapalı Hacimler İçerisinde Işınımın Isı Geçişi

Bu bölümde, kapalı bir hacim içersindeki ışınımın ısı geçişinin incelenmesi sırasında bir önceki bölümde tanımlanan bazı temel kavramlara atıfta bulunarak yüzeyler arasındaki net ışınım akılarının hesaplanması için geliştirilen yöntemlerden bahsedilecektir. Yapılan incelemeyi iki alt başlığa ayıracak olan sınırlama ise kapalı çerçeveyi oluşturan yüzeylerin siyah ya da siyah olmayan- gri yüzeyler olması olacaktır.

Kapalı bir çerçeveyi oluşturan yüzeylerin her birinin siyah olması durumu göz önüne alındığında, siyah cisim tanımından yola çıkılarak yüzeylerin üzerlerine gelen tüm ışınım akılarını yuttukları ve hiçbir şekilde geri yönlü bir yansımaya izin vermedikleri söylenebilir. Burada yola çıkılarak, bir yüzeyden yayılan ışınım şiddetinin, yüzeylerin siyah cisimden oluşması durumunda, yönden bağımsız olduğu tespiti kolaylıkla yapılabilir.

Ancak bu noktada yapılan analizin mühendislik uygulamalarında da karşımıza çıkan haliyle gerçek yüzeyler için genişletilmesi gerekmektedir. Gerçek (gri) yüzeylerin siyah yüzeylerden farkı ışınımı neşretmeleridir. Gri cisimlerde ise yöne bağlı spektral yayma ve yutma katsayılarının yön ve dalga boyunun fonksiyonu olmadığı söylenebilir. Uygulamalardaki sıcaklık farkına göre sadece sıcaklık yayma oranını etkileyen bir etken olarak hesaba katılabilir.

Gerçek yüzeylerden oluşan kapalı hacimler içerisinde yüzeylerden yayılan ya da yutulan ışınım ile ısı akısını hesaplarken yapılan birtakım kabullerden de bu noktada bahsetmekte fayda vardır. Bu kabullerin ilki kapalı hacmi bir bütün olarak değil hesaplamalarda kolaylık sağlayacak şekilde tekil parçalara ayırmaktır. Bunun haricinde ayrılan her bir parça için yüzey sıcaklıkları değişken ya da sabit olarak kabul edilebilir. Buradaki sınırlama ise çözüm kolaylığı ve çözüm için gereken zaman olarak belirtilebilir. İlk olarak geometriyi ne kadar çok parçaya ayırırsak her bir yüzeyin bir diğeri ile olan etkileşimini ortaya koyan şekil faktörü hesaplamaları giderek karmaşıklaşacak ve zorlaşacaktır. İkinci olarak ise, birbiriyle etkileşen yüzey sayısının artmasıyla ışınım akılarının belirlenmesi için geliştirilen denklemlerdeki ifadeler kalabalıklaşarak çözüm zamanında bir artışa yol açacaktır. Dolayısıyla bu noktada yapılması gereken, özellikle uygulamalardaki çözümler için problemin karmaşıklığı ve ışınım ile ısı geçişindeki kritik bölgelerin tespit edilmesi arasında bir optimizasyon yapılmasıdır. Bahsi geçen tarzda bir optimizasyonun yapılabilmesi için uygulamadaki geometri üzerinde deneysel ya da sayısal olarak yapılacak çalışmalardan elde edilecek sonuçlar dikkatli analiz edilmeli ve ihtiyaç duyulan seviyede zorlukta bir çözüm yöntemi benimsenmelidir.

Bunun haricinde kapalı bir hacim içerisindeki ışınım ile ısı geçişini incelerken yapılan basitleştirmeler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir:

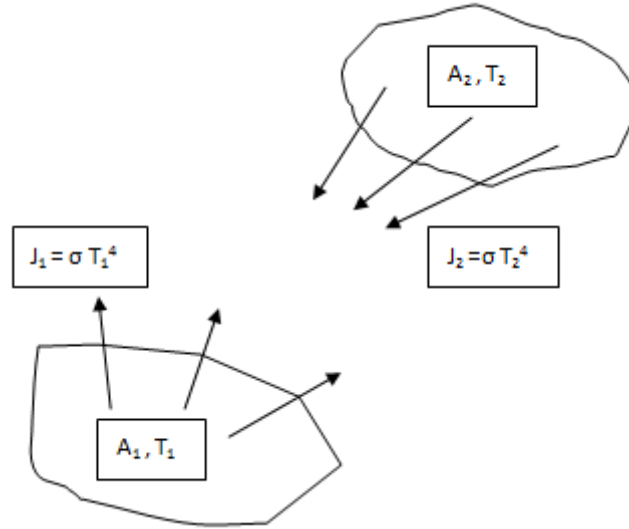
- Tekil yüzeyler üzerinde eş sıcaklık dağılımı olduğu



- Yüzeysel özelliklerinin yüzey üzerindeki her noktada aynı olduğu
- Gri cisimlerde ise yöne bağlı spektral yayma ve yutma katsayılarının yön ve dalga boyunun fonksiyonu olmadığı
- Toplam enerjinin tümünün yayıldığı ya da yutulduğu
- Tekil yüzeyler üzerinde yayılan ya da yutulan ışınım akısının eş dağılımlı olduğu

### 1.3.1 Siyah yüzeyler arasındaki ısı geçişi

Herhangi siyah iki cisim arasındaki ısı geçişi sırasında siyah bir cisim üzerine düşen tüm ışınımı yuttuğu ve yansıtma olmadığı göz önüne alınmalıdır. İki siyah cisim arasındaki ışınım ile ısı geçişi aşağıdaki şekildeki gibi ifade edilebilir.



**Şekil 1.3 :** Siyah cisimler arasındaki ışınım.

Buna göre, yüzeylerden yayılan toplam ışınım enerjisi sırasıyla şöyle yazılabilir:

$$J_1 = \sigma T_1^4 \quad (1.12)$$

$$J_2 = \sigma T_2^4 \quad (1.13)$$

İki yüzey arasındaki ışınım ile ısı geçişini yazmak istediğimizde ise:

$$q_{1-2} = F_{12} A_1 J_1 = F_{12} A_1 \sigma T_1^4 \quad (1.14)$$

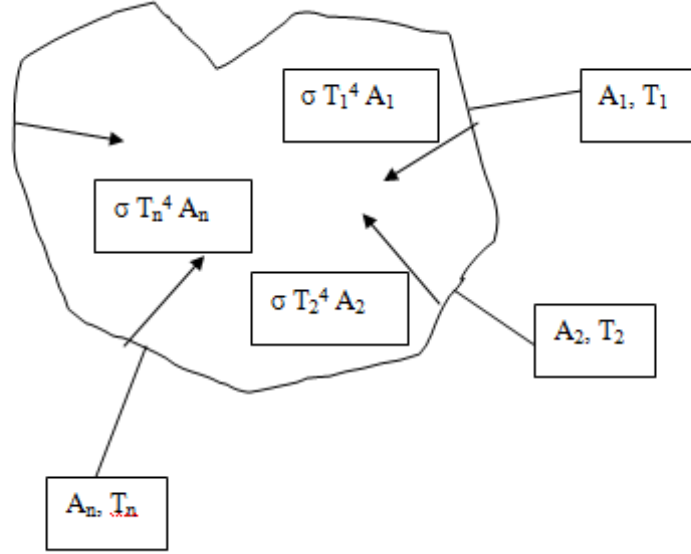
$$q_{2-1} = F_{21} A_2 J_2 = F_{21} A_2 \sigma T_2^4 \quad (1.15)$$

olarak bulunabilir. Birinci yüzeyden ikinci yüzeye olan net ışınım akısını bulmak için ise

$$q_{12} = q_{1-2} - q_{2-1} \quad (1.16)$$

eşitliğinden faydalanılabilir. Buna göre kapalı bir hacim içerisinde her bir tekil yüzeyden bir diğerine olan net ışıınım akısı ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$q_1 = \sum_{i=1}^n F_{1i} A_i (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.17)$$



**Şekil 1.4 :** Siyah yüzeylerden oluşan kapalı bir hacim içerisindeki ışıınımla ısı geçişi

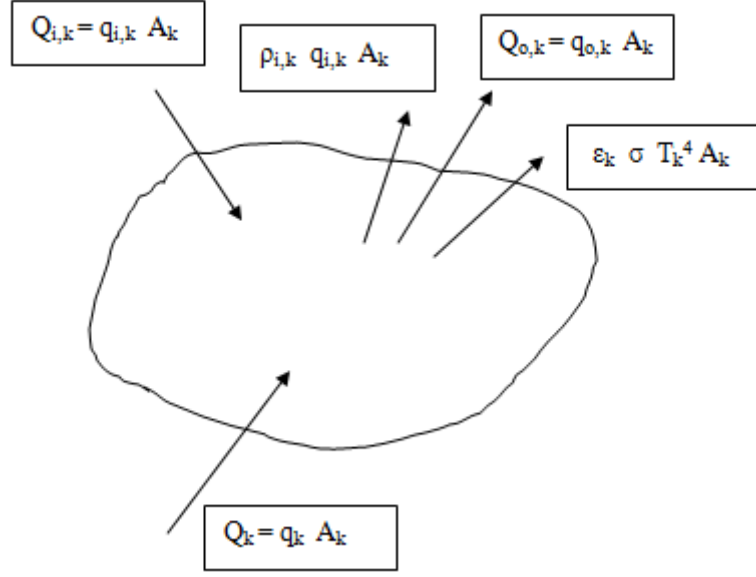
### 1.3.2 Gri yüzeyler arasındaki ısı geçişi

Kapalı bir hacim içerisindeki ışıınımla ısı geçişi esnasında bazı yüzeyler ışıınımı neşrederken, diğer yüzeylerin ışıınımı yuttuğunu söyleyebiliriz. Buna göre bir yüzeyden ayrılan ışıınım demeti bir diğer yüzeye ulaşır, bu yüzeyde bir kısmı yutulur, bir kısmı ise tekrardan başka bir yönde yansiyarak yoluna devam eder. Kapalı bir hacimdeki ışıınımla ısı geçişinin temel mekanizmasını oluşturan bu tarz bir yaklaşımın analiz edilmesi ise oldukça zor ve karmaşıktır. Bu amaçla tez çalışmasının bu bölümünde özellikle ışıınımla ısı geçişinin mühendislik yaklaşımıyla analiz edilmesinde kullanılan yöntemlerden ‘net-ışıınım yöntemi’ ve elektriksel devre benzeşimi üzerinde durulacaktır.

#### 1.3.2.1 Net- ışıınım yöntemi

Literatürde bu konuda ilk olarak bahsedilebilecek olan yöntem, yüzeyler arasındaki toplam ışıınımla ısı geçişi miktarını göz önüne alan ve ilk olarak Hottel tarafından ortaya atılan [2] ve daha sonra Gebhart tarafından geliştirilen [3] ‘net-ışıınım yöntemi’dir.

Bu yöntemin izlediği yolu açıklayabilmek için kapalı bir hacmin  $A_k$  yüzey alanına sahip k. Elemanın üzerinde durulabilir. Eleman üzerine düşen ışınım  $q_{i,k}$ , elemandan yayılan ışınım ise  $q_{o,k}$  olarak tanımlansın. Ayrıca eleman üzerine diğer ısı geçişi mekanizmalarıyla (örneğin iletim) birlikte aktarılan enerji ise  $q_k$  olarak ifade edilsin.



**Şekil 1.5 :** Bir cisim üzerinde enerji dengesi.

Bahsi geçen yüzey için olan enerji dengesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q_k = q_k A_k = (q_{o,k} - q_{i,k}) A_k \quad (1.18)$$

Gri yüzey için yutma ve yayma katsayılarının eşit olduğu kabulü ile cisimden yayılan enerji aşağıdaki gibidir.

$$q_{o,k} = \epsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{i,k} = \epsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - \alpha_k) q_{i,k} = \epsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - \epsilon_k) q_{i,k} \quad (1.19)$$

Eşitlik 1.19'de  $q_{i,k}$  olarak tanımlanan terim 'giden ışınım' olarak ifade edilmektedir. Bu noktadan sonra kapalı hacmi oluşturan yüzeylerin birinden çıkan ışınım akısının diğer yüzeyler üzerine düşen ışınım akısını oluşturduğu, yani yüzeyden yayılan toplam ışınım akısının hacim içerisinde paylaşıldığı düşünülerek eşitlik (1.20) yazılabilir.

$$A_k q_{i,k} = A_1 q_{0,1} F_{1-k} + A_2 q_{0,2} F_{2-k} + \dots + A_n q_{0,n} F_{n-k} \quad (1.20)$$

Kapalı hacmi oluşturan yüzeyler arasındaki şekil faktörü etkileşiminin yüzey alanları ile olan ilişkisi ise şöyle ifade edilecek olursa:

$$A_1 F_{1-k} = A_1 F_{k-1}; A_2 F_{2-k} = A_2 F_{k-2}; \dots; A_n F_{n-k} = A_n F_{k-n} \quad (1.21)$$

Dolayısıyla kapalı hacim için gelen-giden ışınm dengesi tüm yüzeyler için ifade edilirse eşitlik (1.22) elde edilir.

$$q_{i,k} = \sum_{j=1}^n F_{k-j} q_{0,j} \quad (1.22)$$

Eşitlik (1.19) yeniden ifade edilecek olup giden ışınm terimi eşitlik (1.22)'de ifade edilen değer ile eşitlenecek olursa çözüm için  $q_{i,k}$  elimine edilebilecektir.

$$\frac{Q_k}{A_k} = q_k = \frac{\varepsilon_k}{(1 - \varepsilon_k)} (\sigma T_k^4 - q_{0,k}) \quad (1.23)$$

$$\frac{Q_k}{A_k} = q_k = q_{0,k} - \sum_{j=1}^n F_{k-j} q_{0,j} = \sum_{j=1}^n F_{k-j} (q_{0,k} - q_{0,j}) \quad (1.24)$$

Olarak bulunabilir. Kapalı bir hacim için eşitlik (1.24) tüm yüzeyler için yazılacak olursa, bilinmeyen sayısı denklem sayısına eşit olacağından dolayı her bir yüzeyden olan ışınm akısı tek tek hesaplanabilecektir.

### 1.3.2.2 Elektrik devre benzeşimi

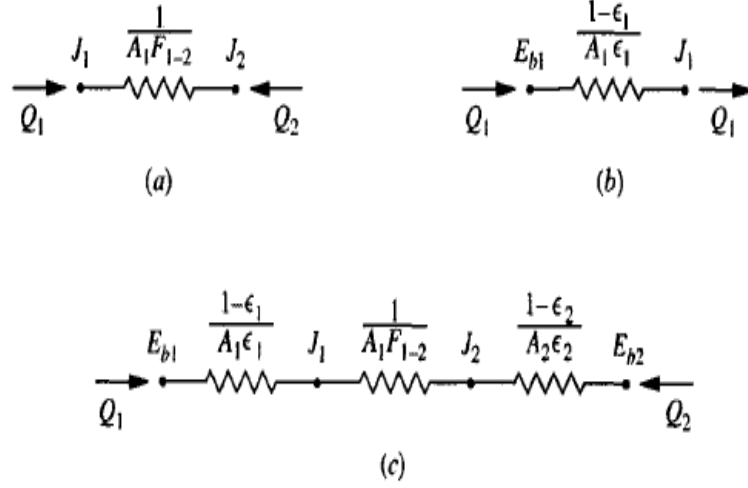
İletimle ısı geçişinde sıklıkla kullanılan elektrik devre benzeşimi yöntemi düğüm noktaları ve bu düğüm noktaları aralarında tanımlanan elektrik dirençleri yardımıyla yüzeyler arasındaki ışınmıla ısı aktarımını hesaplamakta kullanılabilir. Oppenheim tarafından 1956 yılında ortaya atılan yöntem [4] yardımıyla ilk olarak iki adet paralel levha arasındaki ışınmıla ısı geçişini ifade edilebilir.

Temelinde net-ışınm yönteminden farklı olmayan devre benzeşimine göre eşitlik (1.25)'de gelen-giden ışınm dengesi şu şekilde ifade edilebilir.

$$Q_1 = A_1 q_1 = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{1-2}}} = -Q_2 \quad (1.25)$$

Dolayısıyla eşitlik (1.25)'de yer alan giden ışınm terimleri potansiyel,  $1/A_1 F_{1-2}$  terimi ise elektrik direnci olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla bu iki düğüm noktası arasındaki potansiyel

fark da ışı nım akısı olan  $Q$  ile ifade edilecektir. Elektrik direncini oluşturan iki bileşenler ise şekil (1.5)'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.6 :** Paralel levhalar arasındaki ışı nımla ısı geçi şi için elektrik devre benzeşimi.

Şekil (1.5) a'da ifade edilen elektrik direnci yüzeyler arasındaki boşluk direnci, şekil (1.5) b 'de ifade edilen yüzey direnci, şekil (1.5) c'de ifade edilen ise bu iki direncin toplamı olarak devrenin bütünü nü ifade eder.

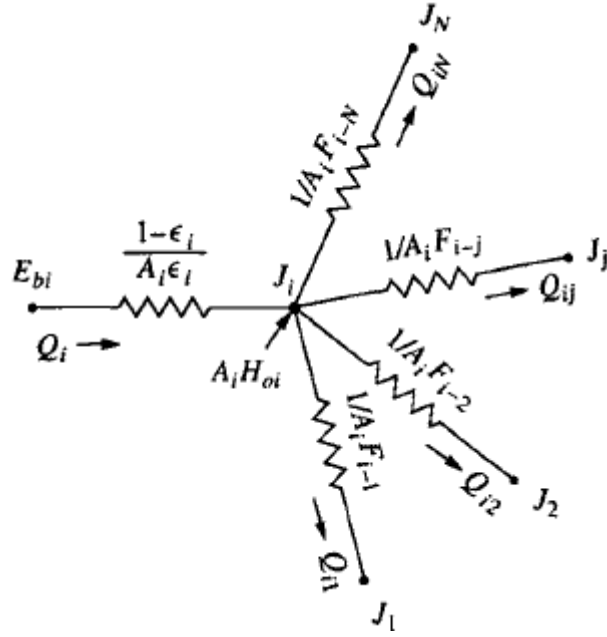
Bu noktadan sonra iki paralel levha için yapılan analiz,  $n$  adet yüzeye sahip kapalı bir hacim için de genişletilebilecektir. Bir düğüm noktasından  $n$  adet düğüm noktasına açılacak şekilde bir elektrik devre benzeşimi şekil (1.6)'da gösterilmiştir.

Devre benzeşimi yardımıyla  $i$ . Düğüm noktası için ısı ışı nımı şu şekilde ifade edilebilir:

$$q_i = \frac{E_{s,i} - J_i}{(1 - \epsilon_i) / (\epsilon_i A_i)} \quad (1.26)$$

Aynı zamanda eşitlik (1.26)'da ifade edilen  $i$ . Düğüm noktası ile diğ er düğüm noktaları arasındaki ısı ışı nım şu şekilde belirtilebilir:

$$q_i = \sum_{j=1}^n \frac{J_i - J_j}{1 / (F_{i,j} A_i)} \quad (1.27)$$



Şekil 1.7 : n adet yüzeyden oluşan bir devre için ışıınım akı dengesi.

Eşitlik (1.26) ve eşitlik (1.27) arasında yazılacak bir eşitlik yardımıyla n adet bilinmeyene sahip n adet denklemden oluşan bir sistem aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
 a_{11}J_1 + a_{12}J_2 + \dots + a_{1n}J_n &= C_1 \\
 a_{21}J_1 + a_{22}J_2 + \dots + a_{2n}J_n &= C_2 \\
 a_{31}J_1 + a_{32}J_2 + \dots + a_{3n}J_n &= C_3 \\
 \dots & \\
 a_{n1}J_1 + a_{n2}J_2 + \dots + a_{nn}J_n &= C_n
 \end{aligned} \tag{1.28}$$

Elde edilen denklem sistemi bir matris sistemiyle ifade edilecek olursa:

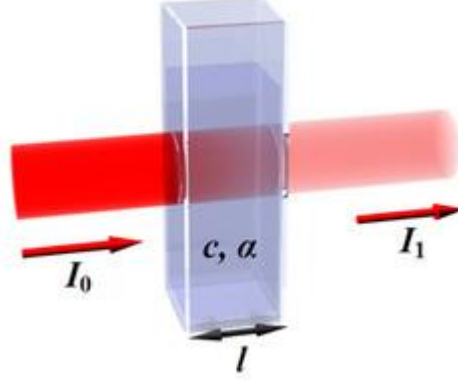
$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} \tag{1.29}$$

Bu şekilde elde edilen denklem sistemi Gauss-Seidel ya da eleminasyon yöntemi ile çözülerek yüzeylerden olan ışıınım akıları hesaplanabilecektir.

#### 1.4 Gaz ışıınımıyla ilgili temel kavramlar

İlk olarak bir gaz ortamı ya da yarı geçirgen bir sıvı içerisinde geçen ve  $i_\lambda$  ışıınım şiddetine sahip bir ışıınım demetinin gaz ortamı tarafından yutulması üzerinde durulabilir. ışıınım

demeti  $dS$  kalınlığında bir eleman üzerinden geçerken Şiddeti yutma ve saçma nedeniyle azalacaktır (Şekil 1.7).



Şekil 1.8 : IŞınım demetinin yutulması.

$$d_{i\lambda} = -K_{\lambda} i_{\lambda} dx \quad (1.26)$$

IŞınım yoğunluğundaki bu azalma deneysel olarak lülebilmekle birlikte  $K_{\lambda}$  olarak adlandırılan yöne bağlı sönme katsayısıdır ve birimi  $1/m$  'dir.  $K_{\lambda}$  , Sıcaklık, basınç, konsantrasyon oranı ve dalga boyunun bir fonksiyonudur.

EŞitlik (1.26)'nın kalınlık  $dS$  boyunca integre edilmesiyle birlikte Bourger yasası olarak da adlandırılan eşitlik (1.27) elde edilecektir.

$$\int_{i_{\lambda}=0}^{i_{\lambda}=S} \frac{di_{\lambda}}{i_{\lambda}} = -\int_0^S K_S(S^*) dS^* \quad (1.27)$$

$$i_{\lambda}(S) = i_{\lambda}(0) \exp\left[-\int_0^S K_S(S^*) dS^*\right] \quad (1.28)$$

Sönme katsayısı olarak adlandırılan  $K_{\lambda}$  'yı oluşturan iki bileşen yutma ve saçma katsayıları olan  $\alpha_{\lambda}(\lambda, T, P)$  ve  $\alpha_{s,\lambda}(\lambda, T, P)$  'dır.

$$K_{\lambda}(\lambda, T, P) = \alpha_{\lambda}(\lambda, T, P) + \alpha_{s,\lambda}(\lambda, T, P) \quad (1.29)$$

EŞitlik (1.27)'de ifade edilen  $\int_0^S K_S(S^*) dS^*$  integral ifadesi önemli bir boyutsuz parametre olan optik kalınlık olarak tarif edilmektedir. Optik kalınlık  $K_S(S^*)$  , verilen bir  $S$  yolu

boyunca ışınım demetinin seyrelmesinin bir ölçüsü olmakla beraber, optik kalınlığın artmasıyla ışınım seviyesindeki azalma da artmaktadır.

$K_s(S^*)$  teriminin 1'den büyük olması durumunda ( $K_s(S^*) \gg 1$ ) gaz ortamı optik olarak kalın, ( $K_s(S^*) \ll 1$ ) ise gaz ortamı optik olarak ince yani ışınımın neşretme oranı gaz ortamının yutma oranından çok büyük olmakta ve ışınım demeti gaz ortamını önemli bir yutuma uğramadan geçebilmektedir.

Bazı gaz ortamlarında (gaz taneciklerinin ışınımına katkıda bulunmadığı ortamlarda) saçınma teriminin ihmal edilmesi söz konusu olabilir. Bu durumda sönme katsayısı olan  $K_\lambda$  değerinin yutma katsayısı olan  $\alpha_\lambda$  değerine eşit olacağı söylenebilir ( $K_\lambda = \alpha_\lambda$ ). Bu durumda Bourguer yasasını ifade eden Eşitlik 1.28 aşağıdaki hali alacaktır:

$$i_\lambda(S) = i_\lambda(0) \exp\left[-\int_0^S \alpha_\lambda(S^*) dS^*\right] \quad (1.30)$$

Elektromanyetik dalga teorisinden ışınım şiddetindeki azalma ile yutma katsayısı arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilecektir:

$$\alpha_\lambda(\lambda_0) = \frac{4 \Pi \kappa \lambda}{\lambda_0} \quad (1.31)$$

Bu eşitlikte ifade edilen  $\lambda_0$  değeri vakum şartlarındaki dalga boyudur. Eşitlik (1.31) mühendislik uygulamaları için kullanışlı bir ifade olmakla birlikte yutma katsayısının dalga boyu ile olan ilişkisini vermektedir.

Yukarıdaki ifade ve eşitliklerden de anlaşıldığı üzere kapalı bir hacim içerisinde yer alan bir gaz hacminin yuttuğu, yansıttığı ve saçtığı ışınım miktarı yöne bağlı bir olgudur. Ancak, mühendislik uygulamalarında bazı basitleştirmelere gitmek amacıyla yöne bağlılığı ortadan kaldırmaya yönelik bazı tanımlamalardan da burada bahsedilebilir.

Karmaşık biçimli her gaz kütesinin etrafını çevreleyen kapalı çerçeveye yaydıkları toplam ışınım enerjisini taban ortasındaki birim hacme yayacak yarı küre şeklinde düşünülebilir.

Bu yarı kürenin çapı ise eşdeğer tabaka kalınlığı olarak ifade edilmektedir. Gazı çevreleyen geometrinin şekline göre farklı değerler almakla birlikte eşdeğer tabaka kalınlığı yaklaşık olarak:



$$L_e = 3,6 \frac{V}{L} \quad (1.32)$$

olarak ifade edilebilir.

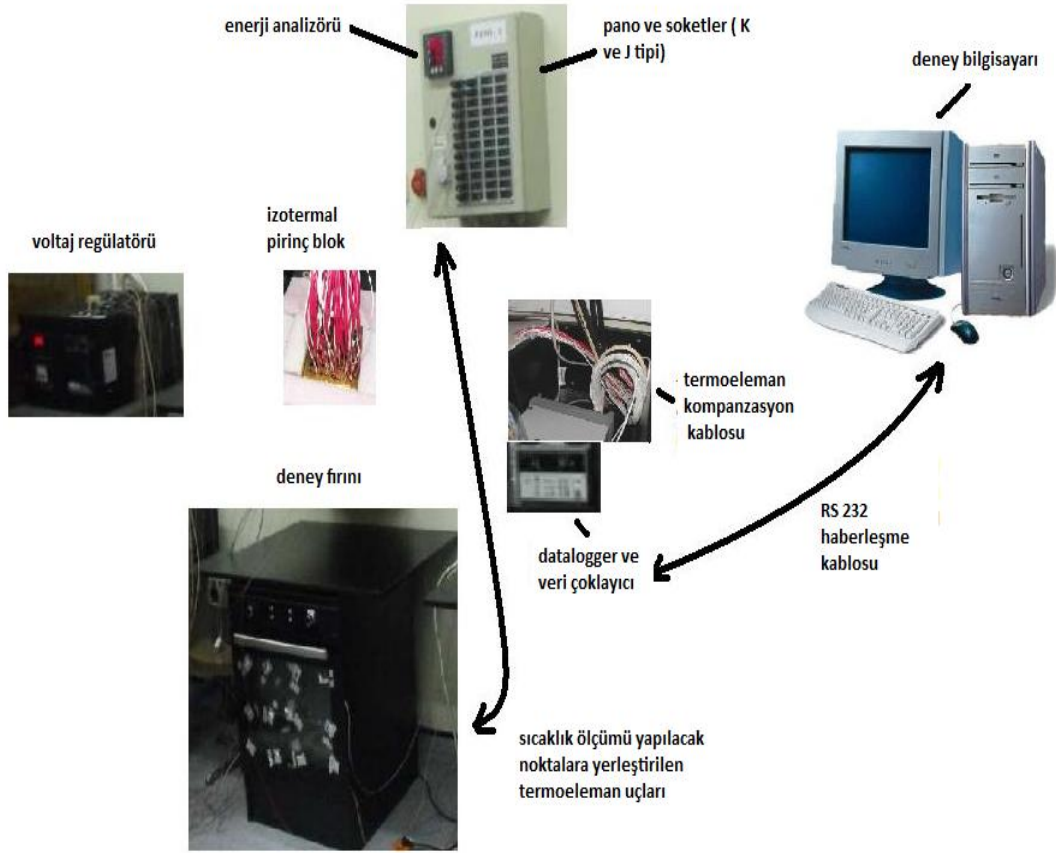


## 2. DENEYSEL TESİSAT

Deney düzeneği, deney panosu üzerinde yer alan termoeleman soketleri sayesinde sıcaklık, enerji analizörü sayesinde ise enerji ölçümü yapabilmektedir. Deney panosu üzerinde yer alan eksi soketlere bağlanan artı soketler, termoeleman kablolarının ‘artı’ ve ‘eksi’ uçlarını birbirine temas ettirmektedir. Artı soketlerden ayrılan termoeleman uçları ölçüm yapılacak bölgeye temas etmektedir. ‘Artı’ ve ‘eksi’ uçlar birbirine göre farklı ısıl iletkenlikleri olan metalleri sembolize etmektedir. Farklı ısıl iletkenliği olan iki metal uç birbirine bağlanıp sıcaklığa maruz bırakıldığında ‘Seebeck etkisi’ adı verilen bir sebepten dolayı belli bir potansiyel fark oluşmaktadır. Bu potansiyel fark belli aralıklarda doğrusal bir değişim göstermekte ve korelasyonlar yardımıyla sıcaklığa çevrilmekte ve bu sayede sıcaklık ölçümü yapılabilmektedir. Deney düzeneği üzerinde 0 – 300 °C arasında çalışan ve demir-konstantan ikilisinden oluşan ‘J tipi’ ve daha yüksek sıcaklıklarda ( 0 – 1000 °C) ölçüm yapılmasına olanak veren ve kromel- alümel ikilisinden oluşan ‘K tipi’ termoeleman bulunmaktadır.

Pano üzerinde yer alan dişi soketler ise termoeleman kompanzasyon kablosuna bağlanmaktadır. Kompanzasyon kablosu pano içerisinden devam ederek ikiye ayrılmaktadır. Konstantan uçlar doğrudan doğruya veri toplamayı sağlayan ‘datalogger’ cihazına bağlanmaktadır. Bakır uçlar ise veri çoklayıcıdan gelen konstantan uçlarla birleşerek ölçüm işleminde referans gerilim değerini sağlayan izotermal pirinç bloğa girmektedir. Pirinç bloğun özelliği eş sıcaklık havuzu oluşturarak her sıcaklık ölçümü sırasında, pirinç bloğun ortasından ölçüm alan RTD cihazının aldığı ölçümü bilgisayara aktarmasıdır. Bu sayede bu referans gerilim sıcaklık ölçümü yapılan gerilimden çıkartılır ve bilgisayara datalogger sayesinde iletilir. Bu cihaz topladığı verileri RS 232 haberleşme kablosu yardımıyla bilgisayara iletmektedir.

Enerji analizörü ise voltaj regülatörü sayesinde  $230 \pm \% 1$  V aralığında tutulan kaynaktan beslenen cihazlardan aldığı gerilim, akım, güç ve enerji tüketimi verilerini akım çevirici bir cihaz (converter) yardımıyla bilgisayara aktarmaktadır. Deney tesisatının şematik gösterimi Şekil 2.1’de sunulmuştur.



**Şekil 2.1** : Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Enerji tüketim deneyleri sırasında ölçülmesi gereken büyüklükler ilgili standartta (EN 50304) belirtilmiştir. Bunlar gerilim (V), akım (A), güç (W) ve enerji tüketimi (Wh)'dir. Bu büyüklüklerin sapma aralıkları Çizelge 2.1'de belirtilmiştir. Bilgisayar üzerinde yer alan bir arayüz programı sayesinde bu büyüklükler ölçülmekte ve kaydedilmektedir.

**Çizelge 2.1** : Standart enerji tüketimi deneylerinde ölçülmesi gereken büyüklükler ve sapma aralıkları.

Veri	Birim	Sapma aralığı
Gerilim	V	(230) ± % 1
Akım	A	± % 1
Frekans	Hz	± % 1
Sıcaklık	°C / K	± 1 °C / K
Zaman	sn	± 5 sn

Deney düzeneğinde yer alan elemanlardan sıcaklık ölçümlerinde kullanılan J ve K tipi termoelemanların belirsizliği üretici firma olan OMEGA tarafından ± 1.1 °C olarak

belirtmekle birlikte, multimetre için bu değer  $\pm 1$  °C olarak saptanmıştır. Dolayısıyla sıcaklık ölçümlerindeki toplam belirsizlik şu formülden belirlenebilir:

$$B_J = \left[ \sum_{i=1}^n (B_i)^2 \right]^{0.5} \quad (2.1)$$

Dolayısıyla sıcaklık ölçümlerindeki belirsizlik 1,486 °C olarak bulunmuştur. Ayrıca ışınım şiddeti için doğrulama deneyleri sırasında kullanılan ısı akısı sensörü için üretici firma tarafından belirtilen toplam belirsizlik değeri de  $\pm \% 5$  olarak belirtilmiştir.



### **3. MEVCUT DENEYSEL HACİM ÜZERİNDE YÜZEY IŞINIMIYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR**

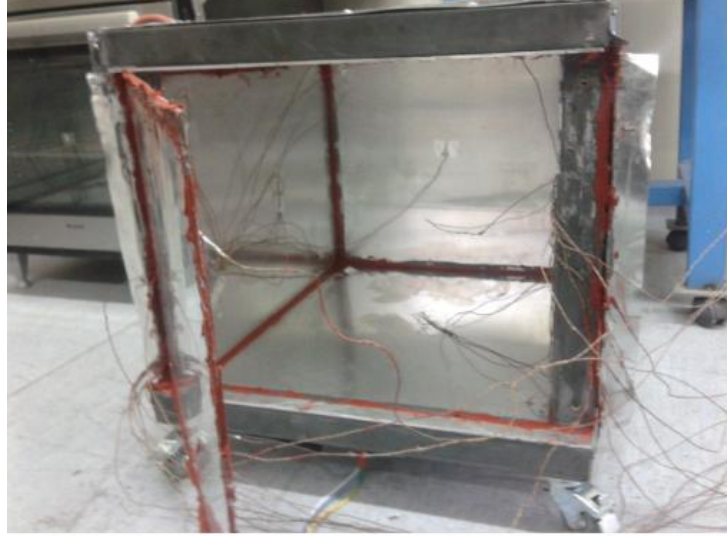
Bu bölümde ev tipi ankastre bir fırında yüzey ışıınımlı mekanizması üzerinde durulacak ve fırın duvarlarında yüzeyden yüzeye olan ısı ışıınımlı (S2S) veren sonuçlar değeriendirecektir. Yüzey ışıınımlı etkileyen en önemli faktörler arasında yer alan şekil faktörü ve yayma katsayısının sırasıyla inceleneyeği bu alt başlık kapsamında yapılacak çalışmalar ilk olarak fırın kavite merkezinde yük olmadığı durum için sunulacak daha sonra ise kavite merkezinde tuğla yerleştirilmesi için genişletilecektir. Sonrasında fırın iç kavitesinde yapılacak değerişikliğin fırının ışıınımlı etkinliğine olan etkisi ortaya konulacaktır. Ayrıca, fırın merkezinde yer alan ve yiyeceği modelleyen tuğlanın konumu üzerinde yapılan değerişikliklerin tuğla üzerine düşen ışıınımlı şiddetine olan etkisi ve dolaylı olarak enerji tüketimi değerişlerine olan yansıması belirlenecektir.

Sonrasında ise yapılan çalışmalar fırın iç kavitesini oluşturan malzemenin yayma katsayısı üzerinde yoğunlaşacak, literatürde de sıkça rastlanan ‘düşük yayma katsayılı fırın’ üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar yardımıyla, hibrid bir tasarım örneğinde bulunulacaktır.

#### **3.1 Işıınımlı ısı Akısı Sayısal Hesaplamaların Deneysel Olarak Doğrulanması**

İlk olarak yüzey ışıınımlı incelemek için kullanılan yöntemle elde edilen sonuçların deneysel verilerle olan uyumlulukları gözden geçirilecektir. Bu amaçla kapalı bir dikdörtgenler prizması şeklinde tasarlanan, alt ve üst yüzeylerinde elektrikli ısıtıcılar bulunan ve etrafı yalıtılmış bir deney düzeneğinde alınan ölçümlerden faydalanılacaktır. Oluşturulan deney düzeneği aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

Deney düzeneğini oluşturan duvarlar 3 mm kalınlığında ve 0,2 yayma oranına sahip alüminyumdan oluşmaktadır. Deney düzeneğinin iç ölçüleri tez çalışmasında ele alınan ankastre fırınla aynı olup 370 x 430 x 470 mm'dir.



**Şekil 3.1** : Kapalı bir hacim elde edilmesi amacıyla oluşturulan deney düzeneği.

Alt yüzeyde yer alan 1200 W ve üst yüzeyde yer alan 2000 W gücündeki elektrik rezistansları, harici bir PID kontrolörü tarafından istenilen sıcaklığa ayarlanmaktadır. PID kontrol cihazına bağlı bir termoeleman deney düzeneğinin ortasından aldığı sıcaklık ölçümünü baz alacak şekilde ısıtıcı gücünü kontrol etmektedir.

Elektriksel devre benzeşimi yardımıyla hesaplanacak olan yüzey ışıınımı için ilk olarak alüminyum duvarlardan oluşan geometrinin şekil faktörü hesaplamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Birbirini dik kesen ve paralel olan yüzeyler için olan şekil faktörleri basit şekilde literatürde olan ifadeler yardımıyla şu şekilde hesaplanmıştır:

**Çizelge 3.1** : Deneysel düzenek için şekil faktörleri.

	sol	arka	sağ	ön	üst	alt
sol	0	0,178	0,191	0,178	0,227	0,227
arka	0,195	0	0,195	0,159	0,226	0,226
sağ	0,191	0,178	0	0,178	0,227	0,227
ön	0,195	0,159	0,195	0	0,226	0,226
üst	0,195	0,178	0,195	0,178	0	0,254
alt	0,195	0,178	0,195	0,178	0,254	0

Işınım ile olan ısı geçişine dair yapılan hesaplamaları doğrulamak amacıyla fırın sol duvarı üzerinde toplam ısı akısını ölçen bir sensör yerleştirilmiştir. Yerleştirilen ısı akısı sensörü



OMEGA HFS-04 tipi olup 150 °C'ye kadar ölçüm alabilmektedir. Ölçümlerde kullanılan film tipi ısı akısı sensörü şekilde gösterilmiştir. (Şekil 3.2).



**Şekil 3.2** : Isı akısı sensörü.

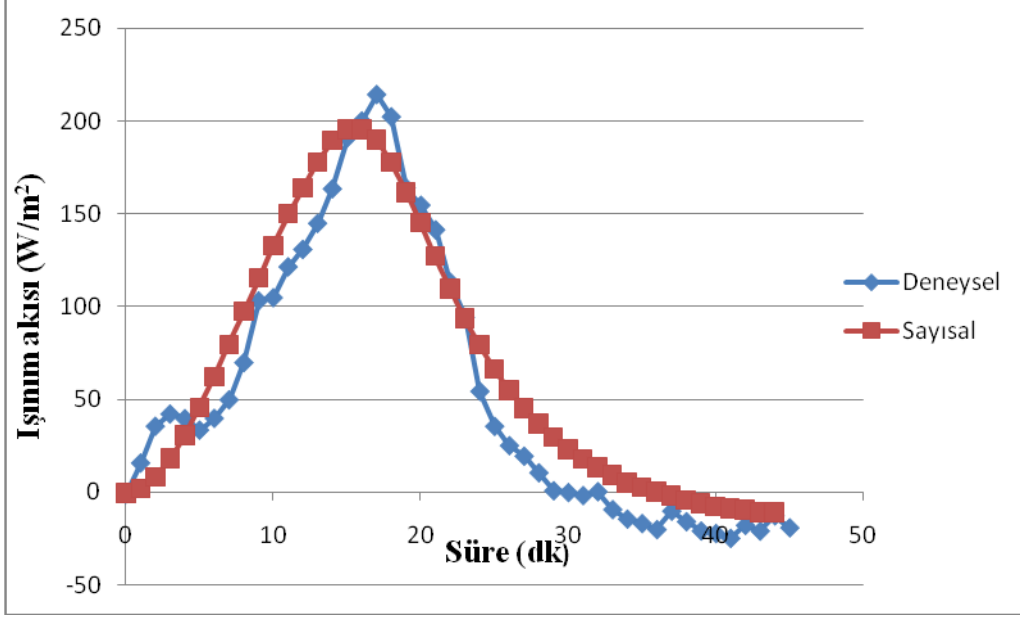
Kullanılan ısı akısı sensörü film tipi olup Kapton adı verilen polimer ince bir filmin altına ve üstüne yerleştirilen termoelemanlar arasında oluşan potansiyel farkın ısı akısına dönüştürülmesi prensibine göre ölçüm yapmaktadır. Ölçümler sırasında, ısı akısı sensörünün oluşturduğu potansiyel fark bir veri toplama cihazı yardımıyla ölçülmekte ve üretici firmanın kalibrasyon tutanağında belirttiği değer olan 1,6 mV/W/m<sup>2</sup> ile çarpılmaktadır. Bu sayede ısı akısı sensöründen geçen toplam ısı akısı W/m<sup>2</sup> cinsinden ölçülebilmektedir. Ölçümler sırasında deneysel hacim merkez sıcaklığı 110 °C'ye ayarlanmış olup ölçümler hacmin sol duvarından alınmaktadır.

Işınım ile olan ısı geçişinin doğrulanması amacıyla toplam ısı akısı ölçümüne ilave olarak iletimle ısı akısının da hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla sol duvar yüzeyi ve yüzeyin 2 mm üzerindeki ortam havasını ölçecek şekilde J tipi 2 adet termoeleman yerleştirilmiştir.

Bu sayede ısı akısı sensöründen ölçülen toplam ısı akısı değerinden deneysel olarak ölçülen iletimle ısı akısı değeri çıkartılarak ışınlı olan ısı geçişi değeri bulunacak ve doğrulama amacıyla kullanılacaktır. Doğrulama amacıyla yüzeyde enerji dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$Q_{\text{toplam}} = Q_{\text{iletim}} + Q_{\text{ışınım}} \quad (3.1)$$

Isı akısı hesaplamalarından elde edilen sonuçların deneysel olarak yapılan ölçümlerle olan karşılaştırması şekil (3.3)'de sunulmuştur.



Şekil 3.3 : Işınım akısı deneysel – sayısal karşılaştırma.

Şekil (3.3)'den de görüldüğü gibi elektriksel devre benzeşimi yardımıyla hesaplanan ışınım ısı akıları ile deneysel olarak ölçülen değerler arasında uyumluluk görülmektedir. Bu uyumluluk tez çalışmasının 1.3 numaralı alt başlığında ifade edilen varsayımlar altında yapılan analiz çalışmasının kabul edilebilir sonuçlar verdiğini göstermekle birlikte çalışmanın diğer başlıklarında da güvenilebilir bir yöntem olduğu sonucunu vermektedir.

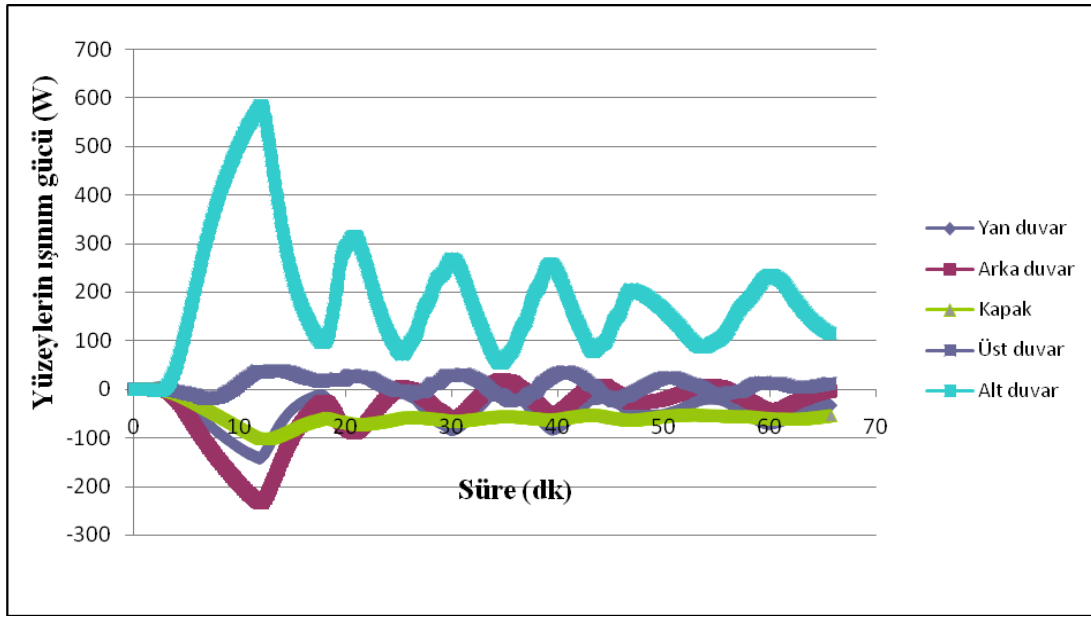
### 3.2 Fırın Kavitesinin Boş Olması Durumu

Fırın kavitesinin boş olması durumunda kapalı hacmi oluşturan yüzeyler pişirme fonksiyonunu gerçekleştirecek şekilde ısı potansiyellerini yönlendirecek bir elemanla karşılaşamayacaklarından sadece kendi aralarında bir etkileşime gireceklerdir. Her ne kadar bu etkileşim kendi aralarında kalsa dahi fırın içerisindeki ışınım ile ısı geçişinin toplam ısı akısı içerisindeki oranını görmek açısından analiz faydalı olacaktır.

Destekçi firma olan Arçelik A.Ş tarafından temin edilen ETI 9657 tipi ankastre fırın kavitesi 0,6 mm kalınlığında emaye kaplamalı çelik sacdan oluşmaktadır. Emaye kaplamalı çelik sacın yayma katsayısı yine destekçi kuruluş tarafından 0,85 olarak bildirilmekle birlikte, fırın kapağında kullanılan 'low-e' olarak da adlandırılan camın yayma katsayısı 0,2'dir.

Bu belirlemeler ışığında fırın içerisinde yük olmaması durumu için fırın termostat sıcaklığı 205 °C'ye ayarlanmış ve ön ısıtma ve aç-kapa çevrim evrelerini tamamlayacak şekilde, j tipi termoelemanlar yardımıyla fırın iç duvarlarından sıcaklık ölçümü alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar kullanılarak yüzey ışınlamını incelemek amacıyla çözümleme yapılmış, bu esnada çizelge (3.1)'de sunulan şekil faktörlerinden faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil (3.4)'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.4 :** Özgün fırın boş hal için kavite yüzeylerinden olan ışınlama ile ısı akıları.

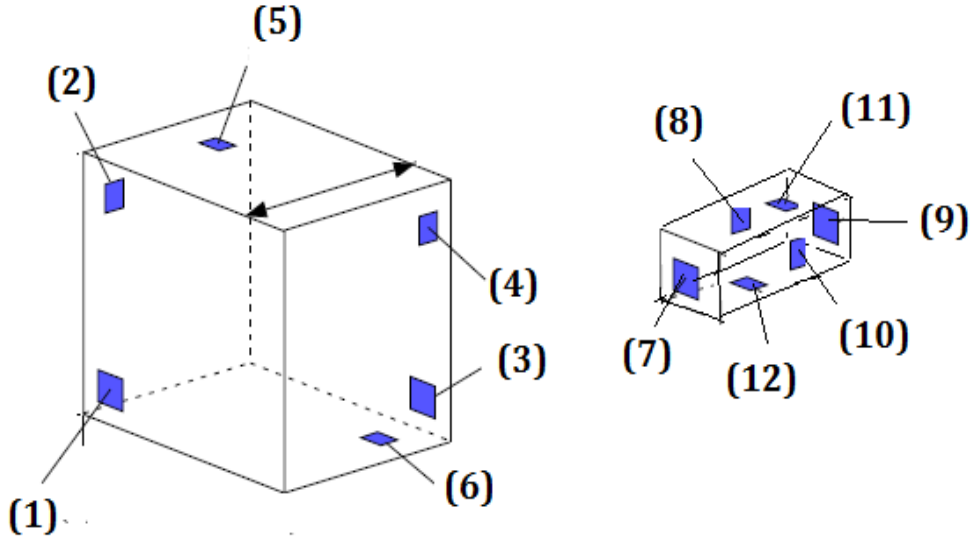
Şekil (3.4) incelendiğinde özgün fırın içerisinde ışınlama ile ısı geçişine kaynak oluşturan yüzeyin alt yüzey olduğu kolaylıkla fark edilebilir. Diğer yüzeyler arasında üst yüzeyin bir miktar ışınlama yayma özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Arka yüzey ise tüm yüzeyler arasında en büyük ışınlama toplayan yüzey olarak göze çarpmaktadır.

Yüzeyler arasındaki ışınlama ile ısı geçişinin fırın çalışma süresince olan değişimine göz atıldığında ise ön ısıtma evresi boyunca yayılan (ve dolayısıyla toplanan) ışınlama şiddetinin doğrusal bir şekilde artış gösterdiği ve ön ısıtma sonunda en yüksek mertebeye ulaştığı görülmektedir. Ön ısıtma evresi fırın içerisinde yer alan bileşenlerin sıcaklık depoladıkları, sıcaklık gradyanlarının yüksek olduğu bir evre olması bu sonuçla paraleldir. Ön ısıtma evresinin bitip, fırın termostatının aç-kapa evresine geçtiği noktadan sonra ise fırın içerisindeki sıcaklık gradyanları azalmakta ve fırın kararlı evreye (steady state) geçmektedir. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkları mertebelerinde yaşanan bu azalma Stefan- Boltzman

yasası uyarınca ışınlama alan ısı akılarını belli bir rejim evresine sokmaktadır. Hatta, şekil (3.4) dikkatle incelendiğinde aç-kapa evresinin ilerleyen bölümlerinde ışınlama alan yüzeyler olan yan ve arka yüzeyin bir miktar ışınlama yapan yüzey haline geldiği de görülebilecektir. Ancak düşük yayma katsayısına sahip camdan oluşan kapak, fırın pişirme evresinin tamamı boyunca ışınlama kaynaklık etmektedir.

### 3.3 Tuğlalı Durum İçin Yüzey Işınlama

Destekçi kuruluş Arçelik A.Ş tarafından temin edilen ve ‘özgün fırın’ olarak adlandırılan 9657 ETI marka fırın içerisine, enerji tüketim deneylerinde kullanılan standart tuğlanın yerleştirilmesi sonucu elde edilen geometri ve notasyon takımı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



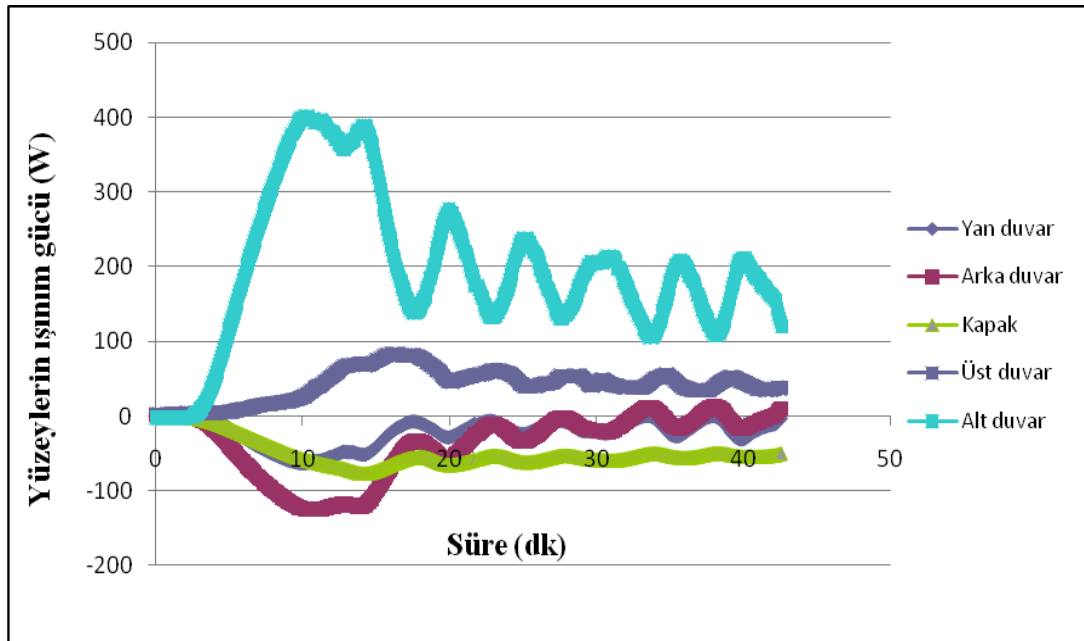
Şekil 3.5 : Tuğlalı durum için yüzey notasyonları.

Yukarıda gösterilen yüzey notasyonları ve geometrik ölçülere göre geliştirilen Monte Carlo şekil faktörü hesaplama programı elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.

**Çizelge 3.2 :** Özgün fırın içerisine yerleştirilen standart tuğla için şekil faktörleri.

Ölçüler	430 cm	370 cm	470 cm												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Toplam (tuğla)	Toplam	
1	0	0,183	0,139	0,183	0,206	0,206	0,035	0,007	0	0,007	0,011	0,011	0,071	0,988	
2	0,171	0	0,171	0,131	0,214	0,214	0,002	0,052	0,002	0	0,001	0,001	0,058	0,959	
3	0,139	0,183	0	0,183	0,206	0,206	0	0,007	0,035	0,007	0,011	0,011	0,071	0,988	
4	0,171	0,131	0,171	0	0,214	0,214	0,002	0	0,002	0,052	0,001	0,001	0,058	0,959	
5	0,181	0,163	0,181	0,163	0	0,213	0,018	0,003	0,018	0,003	0,056	0	0,098	0,999	
6	0,181	0,163	0,181	0,163	0,213	0	0,018	0,003	0,018	0,003	0	0,056	0,098	0,999	

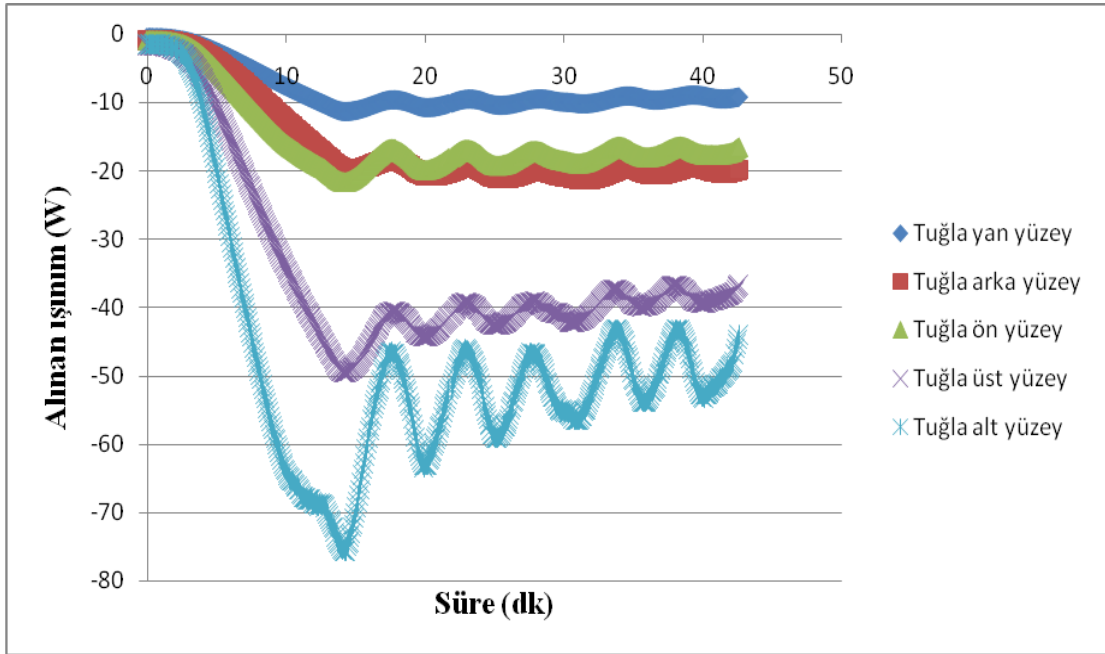
Çizelge (3.2)'de sunulan şekil faktörleri yardımıyla fırın içerisindeki yüzeylerden ve tuğla yüzeylerinden olan ışınlama ısı akılarını hesaplanmış ve yüzeylerden olan ışınlama şiddetleri için elde edilen değerler şekil (3.6)'da sunulmuştur.



**Şekil 3.6 :** Tuğlalı durum için kavite yüzeylerinden olan ışınlama gücü.

Şekil (3.6)'dan görülebileceği üzere, fırın kavite merkezinde tuğlanın yer alması durumunda boş duruma göre yüzeylerden yayılan ışınlama şiddetlerinde bir azalma tespit edilmektedir. Bu azalmanın nedenleri arasında ilk olarak kavite merkezinde gölgeleme etkisi yaratan tuğlanın sıcak yüzeylerin birbirleri arasındaki şekil faktörü etkileşimini azaltması gösterilebilir. Ancak, bu azalmanın merkeze yerleşen ve sıcaklığı düşük olan tuğla ile giderilebileceği düşünülse dahi tek başına bu yeterli bir açıklama olmamaktadır.

Bu noktada, nem içeriği yüksek olan ve fırın kavitesi merkezine su buharı geçişine kaynaklık eden tuğladan kaynaklanan nemli kavite havasının gaz ışınımına olan katkısından bahsetmek gerekmektedir. Nem içeriği yüksek olan havanın içerisindeki su buharı tanecikleri, yüzeylerden yayılan ışınım akısını yutarak bünyesine hapsetmekte ve bu sayede ışınım geri kazanımı (reradiation) olarak adlandırılan mekanizmanın önüne geçilmesini sağlamaktadır. Tuğla yüzeyine düşen ışınım şiddetleri ise şekil (3.7)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddeti.

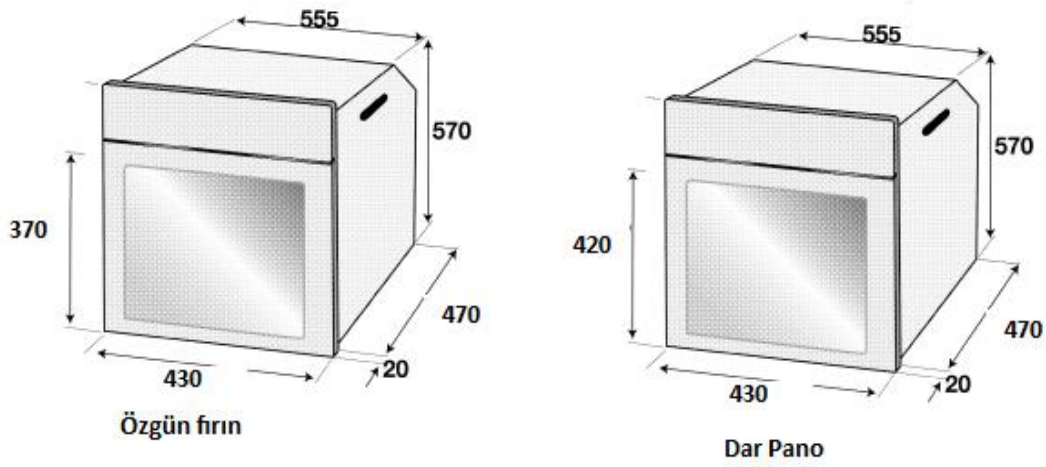
Şekil (3.7) incelendiğinde tuğla alt ve üst yüzeylerine düşen ışınım şiddetlerinin en yüksek olduğu, diğer yüzeylerin ise birbirlerine yakın oranlarda ışınımı bünyelerine aldıkları görülecektir.

### 3.4 Şekil Faktörü İncelemeleri

Şekil faktörü iki cismin birbirine göre konumu ve geometriye bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişim göstermektedir. Buna göre sıcak yüzeyler ya da ısıtıcılarla, kavite merkezinde yer alan tuğla arasındaki şekil faktörü etkileşiminin artırılması ışınım etkinliğine olumlu yönde yansiyacaktır. Tez çalışmasının bu alt başlığı kapsamında ilk olarak fırın iç kavitesinde yapılacak bir değişiklik incelenecek, sonrasında ise yapılan analiz tuğla konumu üzerinde yoğunlaşacaktır.

### 3.4.1 Kavite hacmi değiştirilmiş fırın üzerinde yapılan çalışmalar

Kavite iç hacminde yapılacak değişikliğin bir yandan fırın geometrisini değiştirerek şekil faktörlerine etkide bulunacağı, bu sayede fırının ışınlama ısı geçişi performansını etkileyeceği ortadadır. Tez çalışmasının bu bölümünde kavite iç hacmi değiştirilmiş bir ankastre fırın üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu amaçla destekçi kuruluş Arçelik A.Ş tarafından temin edilen fırın ölçüleri aşağıdaki şekilde özgün fırın ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.8 :** Dar pano / özgün fırın kavite iç hacim ölçüleri karşılaştırması.

Şekil (3.8)'de gösterildiği üzere, dar pano fırınının geometrik olarak özgün fırından tek farkı kavite iç yüksekliğinin 50 mm fazla olmasıdır. Bu kısımda geometrik tasarımda yapılan bu değişikliğin fırının sıcaklık haritası, enerji tüketimine yaptığı etki üzerinde durulacaktır. Tez çalışmasının ilerleyen kısımlarında ise geliştirilen Monte Carlo ile şekil faktörü hesaplama algoritmasayesinde bu değişikliğin şekil faktörlerine olan etkisi incelenecek, hesaplanan şekil faktörleri üzerinden dar pano fırınının ışınlama ısı geçişi performansı incelenebilecektir.

EN 50304 standart enerji tüketim deney sonuçları, statik modda üç farklı sıcaklık için yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

**Çizelge 3.3 :** Dar pano standart enerji tüketim deney sonuçları.

Deney adı	Tuğla kuru ağırlık (g)	Tuğla yaş ağırlık (g)	Tuğla son ağırlık(g)	Pişirme süresi (dk)	Enerji tüketimi (Wh)
140 K Statik	904,8	1960,3	1840,8	52,8	802
140 K Statik	895	1942,5	1846,8	50,6	780
180 K Statik	903,9	1949,6	1842,9	44,5	892
180 K Statik	890,5	1941,3	1818,1	44,4	927
220 K Statik	904,8	1925,6	1778,1	39,4	1043
220 K Statik	904,8	1943,1	1808,6	39,8	1040

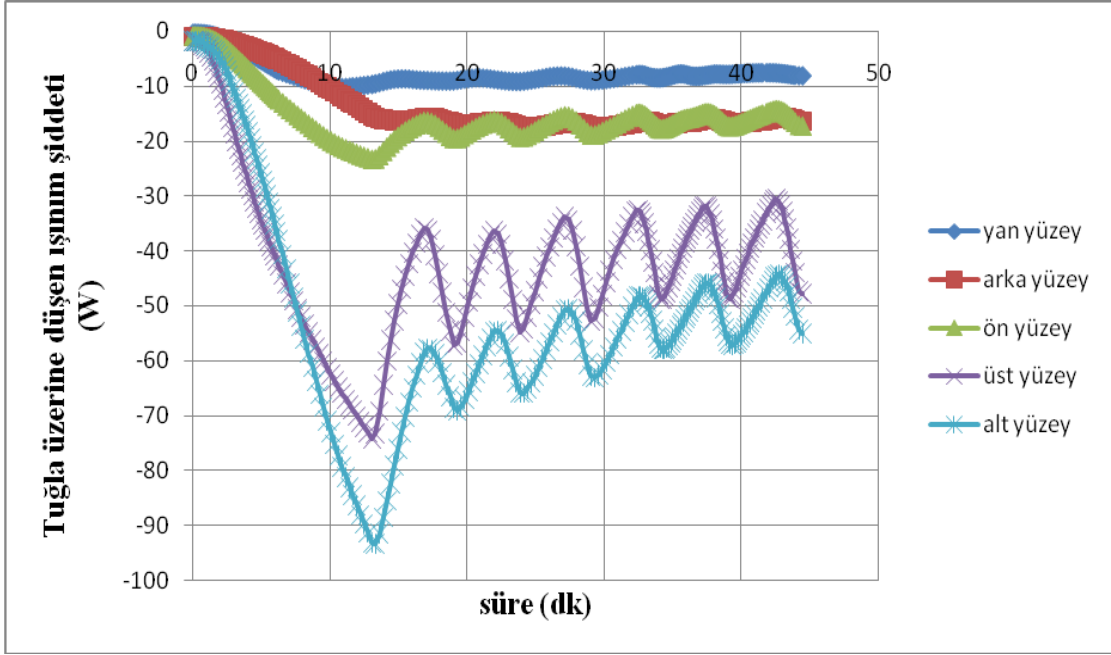
Elde edilen deney sonuçları özgün fırın ile karşılaştırıldığında enerji tüketimi değerlerinin ortalama olarak sırasıyla 140 K , 180 K , 220 K için 30 wh, 40 wh ve 25 wh daha az olduğu, pişirme süresinde ise 2.4 dk , 2.6 dk ve 2.4 dk artış olduğu söylenebilir. Enerji tüketimi ve pişirme süresinde bir miktar iyileştirme sağlanan dar pano fırını için bu noktada ışınlama ısı geçişi performansı üzerinden özgün fırın ile bir karşılaştırma yapılacaktır. Monte Carlo sayısal çalışması yukarıda verilen ölçülere göre dar pano fırın için de tekrarlanmış olup, aşağıda bu sonuçlar tablo halinde sunulmuştur.

**Çizelge 3.4 :** Dar pano fırın içerisine yerleştirilen standart tuğla için şekil faktörleri.

Dar Pano															
Ölçüler	430 cm	420 cm	470 cm												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Toplam (tuğla)	Toplam	
1	0	0,191	0,154	0,191	0,189	0,189	0,032	0,007	0	0,007	0,012	0,012	0,07	0,984	
2	0,173	0	0,173	0,168	0,191	0,191	0,002	0,051	0,002	0	0,011	0,011	0,077	0,973	
3	0,154	0,191	0	0,191	0,189	0,189	0	0,007	0,032	0,007	0,012	0,012	0,07	0,984	
4	0,173	0,168	0,173	0	0,191	0,191	0,002	0	0,002	0,051	0,011	0,011	0,077	0,973	
5	0,173	0,191	0,173	0,191	0	0,182	0,015	0,002	0,015	0,002	0,051	0	0,085	0,995	
6	0,173	0,191	0,173	0,191	0,182	0	0,015	0,002	0,015	0,002	0	0,051	0,085	0,995	

Elde edilen sonuçlar yardımıyla 180 K tuğlalı enerji tüketimi deneyi sırasında tuğla yüzeylerine düşen ışınlama şiddetleri hesaplanmış olup aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.





**Şekil 3.9 :** Dar pano tuğlalı durum için tuğla yüzeylerine düşen ışıının şiddetleri.

Dar panoda tuğlalı durum için elde edilen sonuçların özgün fırınla karşılaştırılması durumunda tuğla alt ve üst yüzeylerine düşen ışıının miktarında az miktarda bir artış (10 W) olsa dahi bunun enerji tüketimine bir katkısının bulunmayacağı ortadadır. Bu artışın kaynağı olarak yalıtıma yapılan müdahaleden kaynaklı ısıl kaçaklar ya da enerji tüketimi deneylerinde yaşanan sapma gösterilebilir. Son olarak kavite hacminin yüksekliğinde yaşanan artışın doğal taşınım mekanizmasını değiştireceği göz önüne alınarak yapılacak başka bir çalışmada incelenmelidir.

### 3.4.2 Yük konumu

Yük konumu ve raf konumu üzerinden yapılan değişiklikler fırın üzerinde yer alan farklı standart raf konumları için yapılmıştır. EN 50304 standartlarında yer alan merkez konumda yer alan tuğla, çalışma kapsamında üç farklı raf konumu ve üç farklı yatay pozisyonda hareket ettirilmiştir. Fırın alt kavitesinden yukarıya doğru çıkıldıkça 1'den 5'e kadar artacak şekilde numaralandırılan raf konumları, standart yerleşim için 2. Raf ve simetrik pozisyonda yer almaktadır. Tuğlanın, deneysel çalışmada tuğlanın yerleştirildiği pozisyonlar aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

**Çizelge 3.5 :** Deneysel çalışma sırasında tuğla pozisyonu.

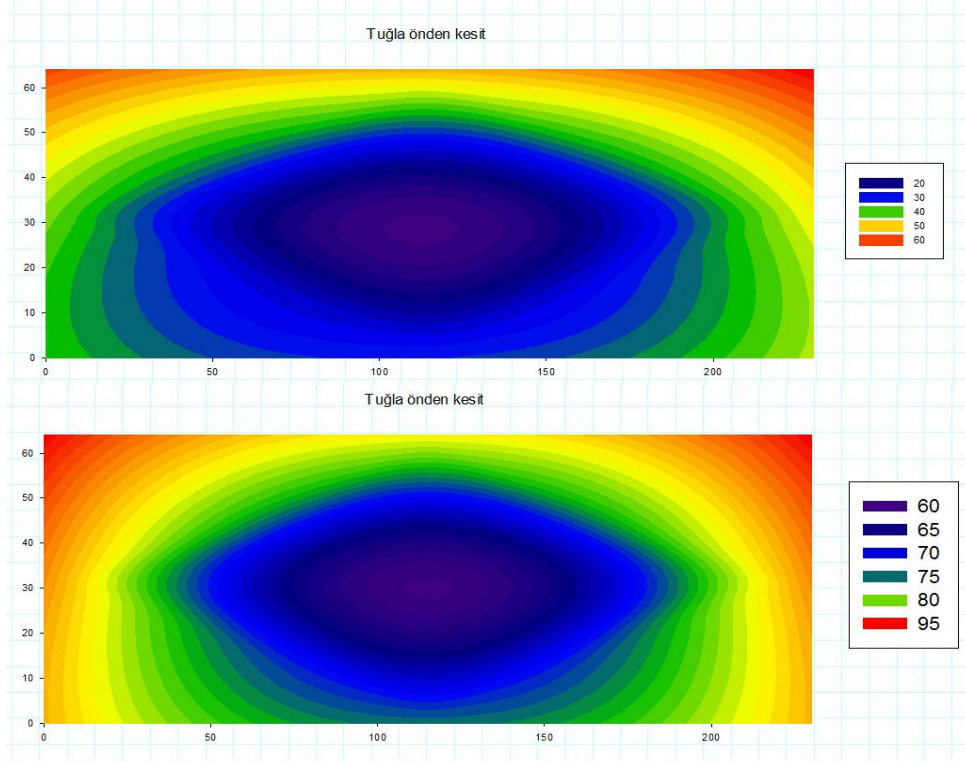
	Raf konumu	Yatay konum
1.Yerleşim	1.Raf	Simetrik
2.Yerleşim	1.Raf	Merkezden 5 cm kaydırılmış
3.Yerleşim	2.Raf	Merkezden 5 cm kaydırılmış
4.Yerleşim	5.Raf	Simetrik
5.Yerleşim	5.Raf	Merkezden 5 cm kaydırılmış

Yapılan standart enerji tüketimi deneylerinden ise elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.

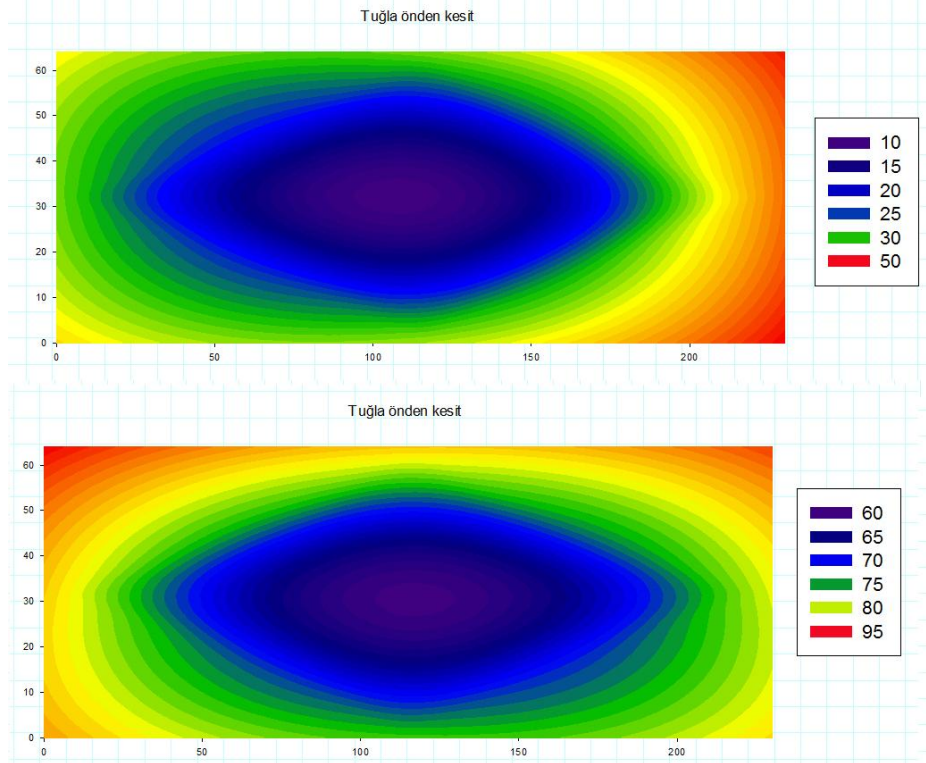
**Çizelge 3.6 :** Tuğla pozisyonu enerji tüketimi sonuçları.

Tuğla pozisyonu	Enerji tüketimi (Wh)	Pişirme süresi (dk)
Referans pozisyon	947	41,8
1.Yerleşim	902	41,8
2.Yerleşim	890	42,6
3.Yerleşim	930	40,1
4.Yerleşim	898	40,4
5.Yerleşim	902	42,3

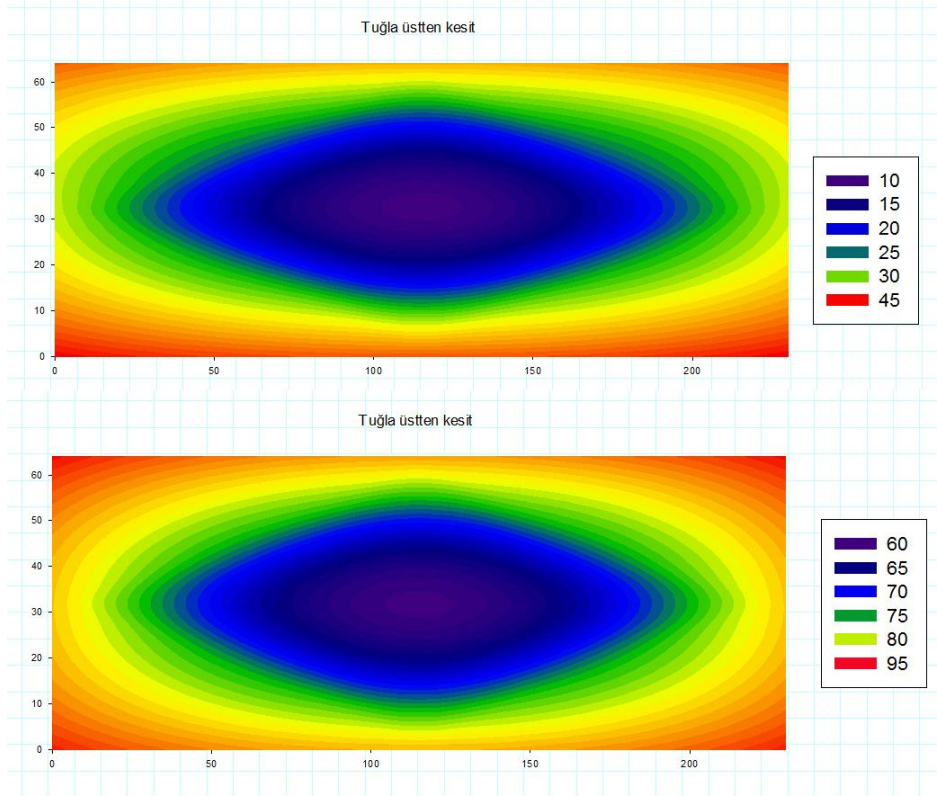
Çizelge (3.4) incelendiğinde tuğla pozisyonunda yaşanan değişikliklerin enerji tüketimine bir miktar olumlu yansımalarının olduğu gözlemlenebilir. Bu olumlu yansıma, özellikle tuğlanın ısıtıcı yüzeylere yakın olduğu, raf konumunun en alt ve en üstte olduğu durumlarda dikkate değer olmaktadır. Işınım ile ısı geçişi açısından incelendiğinde bunun en önemli nedeninin sıcak yüzeylerle olan şekil faktörü etkileşimi olduğunu söyleyebiliriz. Paralel yüzeyler arasındaki şekil faktörü etkileşimi bilindiği gibi aradaki mesafe azaldıkça artacağından dolayı, özellikle tuğlanın en geniş olan alt ve üst yüzeyinin sıcak yüzeylerle olan etkileşiminin artacağı söylenebilir. Bunun somut göstergesi, tuğla yüzey sıcaklıklarında olan artıştır. Tuğla yüzeyinden 2 mm derinlikte açılan delikler yardımıyla, bu pozisyonlara yerleştirilen termoelemanlar yardımıyla tuğla yüzeyi sıcaklıkları ölçülmüş ve 1. ve 4. Yerleşimler için aşağıdaki gibi görselleştirilmiştir (Şekil 3.10 -3.13).



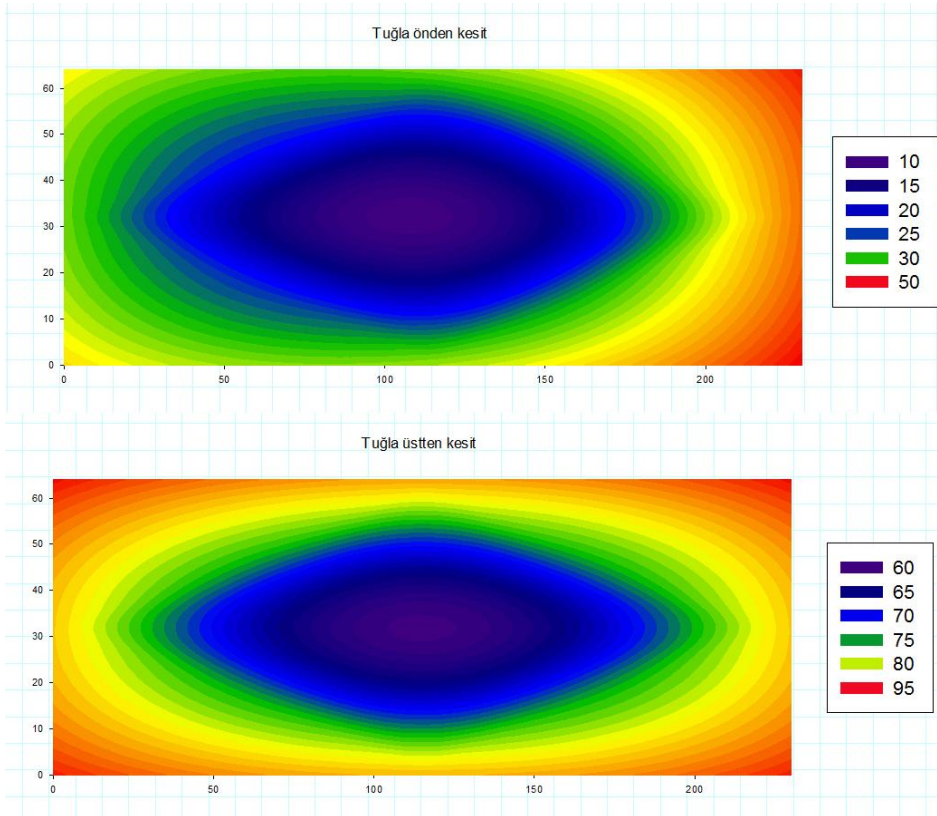
Şekil 3.10 : 4 Numaralı yerleşim tuğla dikine kesit.



Şekil 3.11 : 4 numaralı yerleşim tuğla boyuna kesit



Şekil 3.12 : 1 numaralı yerleşim tuğla enine kesit.



Şekil 3.13 : 1 numaralı yerleşim tuğla boyuna kesit

Şekil 3.10 ve 3.11 incelendiğinde tuğlanın alt kaviteye yakın olduğu 4. Raf konumundaki durumunda üst yüzey sıcaklığının alt yüzeye oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Tuğlanın alt yüzeye yakın olduğu 1. Raf konumunda ise üst yüzeyle alt yüzey sıcaklıkları arasındaki bu fark kapanmaktadır. Üst raf konumundayken ön ısıtmada 20 °C olan bu fark, alt raf konumundayken 10 °C'ye inmektedir.

Tuğla yüzeylerine düşen ışınım akılarını incelemek yaşanan bu değişimin nedenini irdelemekte faydalı olacaktır. Tuğla yüzeyleri üzerine düşen ışınım şiddetlerinin belirlenebilmesi için ilk olarak farklı tuğla pozisyonları için şekil faktörü etkileşimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çizelge (3.7) ve (3.8)'de sırasıyla 1. ve 4. yerleşimler için şekil faktörleri bulunmaktadır.

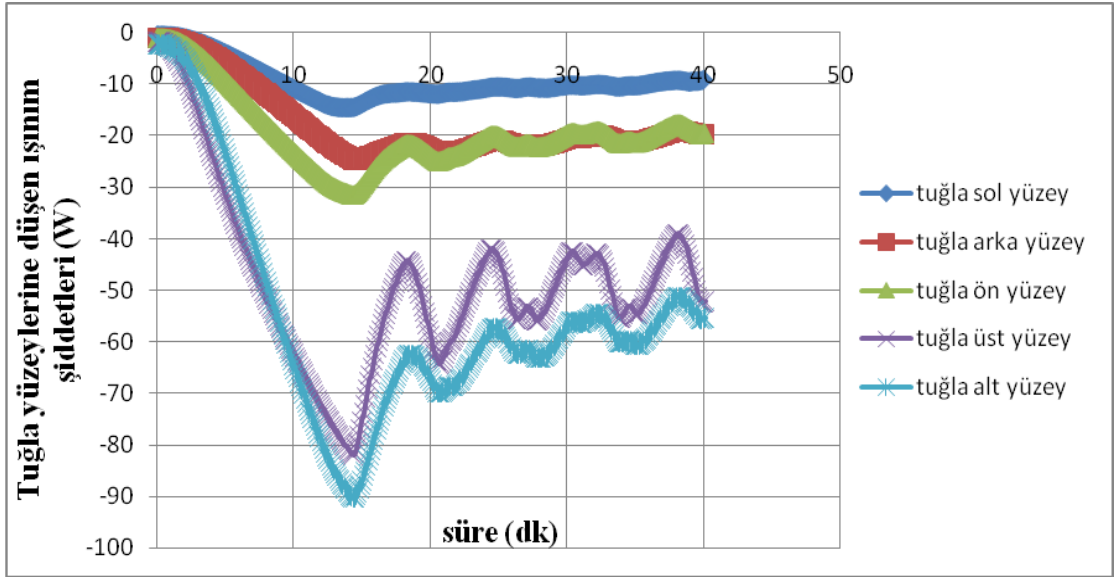
**Çizelge 3.7 : 4. Yerleşim için şekil faktörleri.**

Üst orta		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Toplam
	1	0	0,188	0,150	0,188	0,217	0,217	0,026	0,007	0	0,007	0,0004	0,0004	1,000
	2	0,173	0	0,173	0,178	0,220	0,220	0,003	0,038	0,003	0	0,0004	0,0004	1,008
	3	0,150	0,188	0	0,188	0,217	0,217	0	0,006	0,026	0,008	0,0004	0,0004	1,001
	4	0,173	0,178	0,173	0	0,220	0,220	0,003	0	0,003	0,038	0,0004	0,0004	1,008
	5	0,135	0,174	0,135	0,174	0	0,218	0,035	0,009	0,035	0,009	0,073	0	0,998
	6	0,174	0,187	0,174	0,187	0,203	0	0,001	0,002	0,001	0,005	0	0,04	0,972
	7	0,700	0,075	0,000	0,075	0,075	0,075	0	0	0	0	0	0	1,000
	8	0,055	0,780	0,055	0,000	0,055	0,055	0	0	0	0	0	0	1,000
	9	0,000	0,075	0,700	0,075	0,075	0,075	0	0	0	0	0	0	1,000
	10	0,055	0	0,055	0,780	0,055	0,055	0	0	0	0	0	0	1,000
	11	0,010	0,010	0,010	0,010	0,950	0	0	0	0	0	0	0	1,000
	12	0,200	0,200	0,200	0,200	0	0,600	0	0	0	0	0	0	1,000

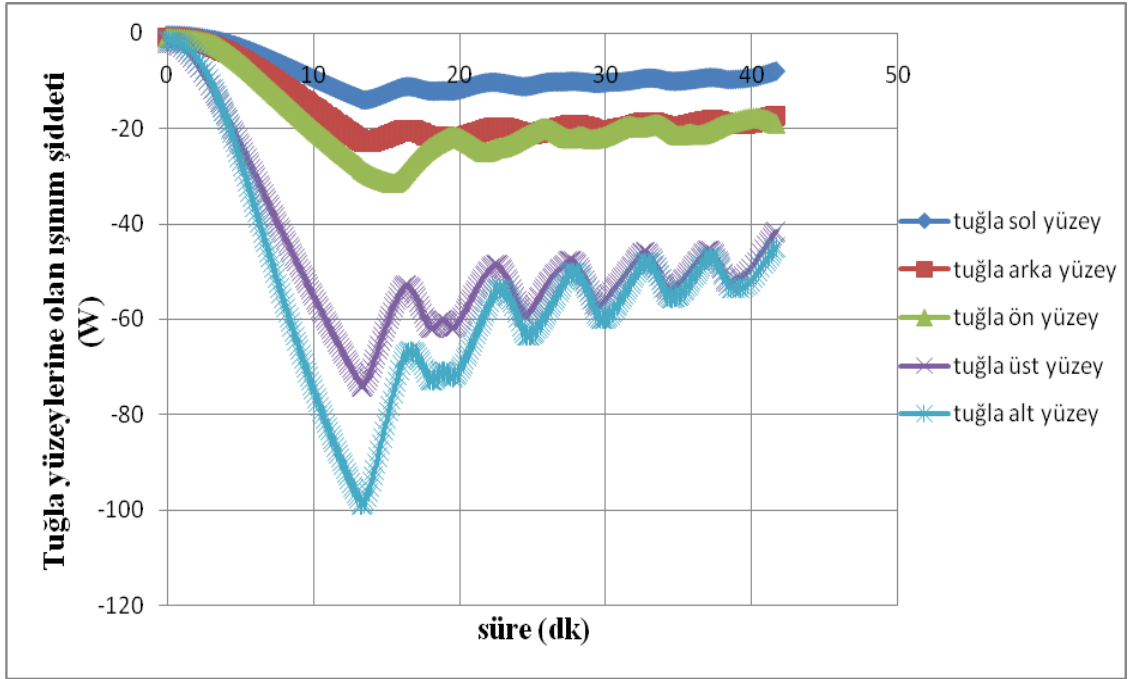
**Çizelge 3.8 : 1. Yerleşim için şekil faktörleri.**

Alt orta		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Toplam
	1	0	0,184	0,150	0,192	0,220	0,214	0,026	0,006	0	0,008	0,00008	0,0006	0,999
	2	0,177	0	0,169	0,178	0,223	0,216	0,004	0,038	0,001	0	0,00004	0,0006	1,006
	3	0,150	0,188	0	0,188	0,217	0,217	0	0,006	0,026	0,008	0,0004	0,0004	1,001
	4	0,173	0,178	0,173	0	0,220	0,220	0,003	0	0,003	0,038	0,0004	0,0004	1,008
	5	0,174	0,187	0,174	0,187	0,000	0,203	0,002	0,001	0,005	0,000	0,0400	0	0,971
	6	0,135	0,174	0,135	0,174	0,218	0	0,035	0,009	0,035	0,009	0	0,073	0,998
	7	0,700	0,075	0,000	0,075	0,075	0,075	0	0	0	0	0	0	1
	8	0,055	0,780	0,055	0,000	0,055	0,055	0	0	0	0	0	0	1
	9	0,000	0,075	0,700	0,075	0,075	0,075	0	0	0	0	0	0	1
	10	0,055	0	0,055	0,780	0,055	0,055	0	0	0	0	0	0	1
	11	0,200	0,200	0,200	0,200	0,6	0,000	0	0	0	0	0	0	1
	12	0,010	0,010	0,010	0,010	0,000	0,950	0	0	0	0	0	0	1

Şekil (3.14-15)'de ise 1. ve 4. raf konumları için tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddetleri gösterilmiştir.



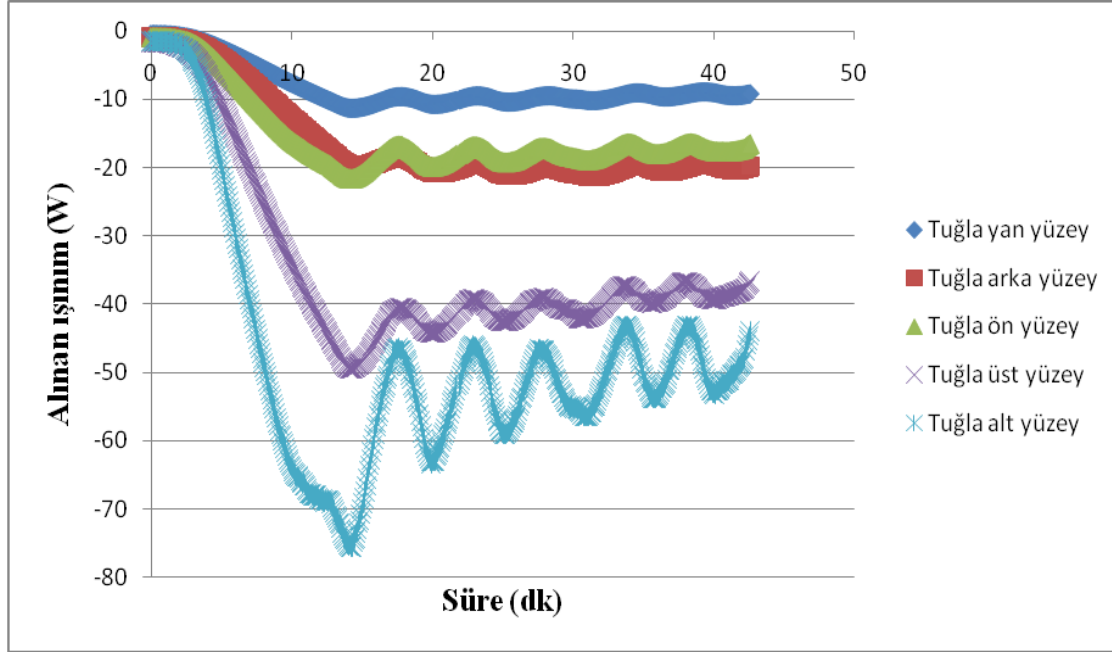
Şekil 3.14 : 4. Yerleşim için tuğla yüzeylerine düşen ışıma şiddetleri.



Şekil 3.15 : 1. Yerleşim için tuğla yüzeylerine düşen ışıma şiddetleri.

Şekil (3.14) ve (3.15) incelendiğinde tuğlanın alt ısıtıcıya yakın olduğu 4. Numaralı yerleşimde yüzeyine düşen toplam ışıma akısının 1. Numaralı yerleşime göre bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir (Ön ısıtmada 10 W). Bunun nedeni ise kavite içerisinde yer alan ve kavite merkezine bakan üst ısıtıcının varlığıdır. Tuğla pozisyonu alt yüzeye yaklaştıkça, alt yüzeyden alınan ışıma şiddetinin ise arttığı iki grafik karşılaştırıldığında görülmektedir.

Son olarak çizelge 3.4'den de görülen enerji tüketimindeki olumlu yansımanın ışınlama ısı geçişi açısından incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, referans pozisyonda yer alan tuğla üzerine düşen ışınlama şiddetleri 1. Ve 4. Yerleşimlerle karşılaştırılacaktır. İlk olarak referans pozisyon için tuğla yüzeyine düşen ışınlama şiddetleri şekil (3.16)'de belirtilmiştir.



**Şekil 3.16 :** Referans pozisyon tuğla yüzeylerine düşen ışınlama şiddeti.

Tuğlanın alt ve üst ısıtıcıya yakın olduğu durumlarda yüzeylerine düşen ışınlama şiddetlerinin referans pozisyonla olan karşılaştırmaları ise çizelge (3.9)'da sunulmuştur.

**Çizelge 3.9 :** Referans pozisyon – 1. Ve 4. Yerleşim tuğla yüzeyine olan ışınlama şiddetleri karşılaştırması.

	Yan yüzey	Arka yüzey	Ön yüzey	Üst yüzey	Alt yüzey	Toplam
Referans pozisyon	-12,7	-19,8	-21,2	-49,8	-75,5	179
1. Yerleşim	-13,9	-22,7	-28,6	-74,2	-98,9	238
4. Yerleşim	-14,4	-24,7	-31,4	-82,1	-90,2	242

Çizelge (3.9)'dan tuğla yüzeylerine olan ışınlama şiddetleri incelendiğinde raf konumunda yaşanan değişikliğin tuğla üzerine olan ışınlama akılarına olan etkisi görülebilecektir. Referans pozisyona göre yaşanan artış, tuğlanın alt raf konumunda olduğu 1. Yerleşim için % 24 iken, tuğlanın üst raf konumunda olduğu 4. Yerleşim için %26 olmaktadır. Sonuç olarak ise, tuğla pozisyonunda gerçekleşen



değişimlerden kaynaklı, tuğla yüzeyine düşen ışınım şiddetinin enerji tüketimine olan yaklaşık 30 Wh'lik olumlu yansıması olduğu görülmektedir (Çizelge 3.6).

### 3.5 Yayma Oranı İle İlgili Çalışmalar

Tez çalışmasının bu bölümünde, çalışmalar esnasında incelenen kapalı hacim olan ev tipi ankastre fırın iç yüzeyini oluşturan malzemenin yayma oranı üzerinden değişikliklere gidilmiş ve yayma oranı katsayısının önemi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sırasında ilk olarak literatürde de 'düşük-yayma oranlı fırın' olarak anılan çalışmalardan da esinlenilerek yayma oranı 0,2 olan paslanmaz çelik kavite iç yüzeylerinde kullanılarak üretilen prototip üzerinde durulmuştur. Düşük yayma oranına sahip prototip üzerinde yapılan çalışmalardan yapılan çıkarımlar sonucu, ardından alt ve üst ısıtıcı yüzeyleri siyaha boyalı deney hacmi tasarlanmış ve bu deney hacmi incelenmiştir.

#### 3.5.1 Düşük yayma oranlı fırın üzerinde yapılan çalışmalar

Fırın iç kavitesinde emaye kaplamalı çelik sac yerine, yayma oranı 0,2 mertebesinde olan paslanmaz çelik sac kullanılmasıyla üretilen prototip fırın şekil (3.17)'de gösterilmiştir.



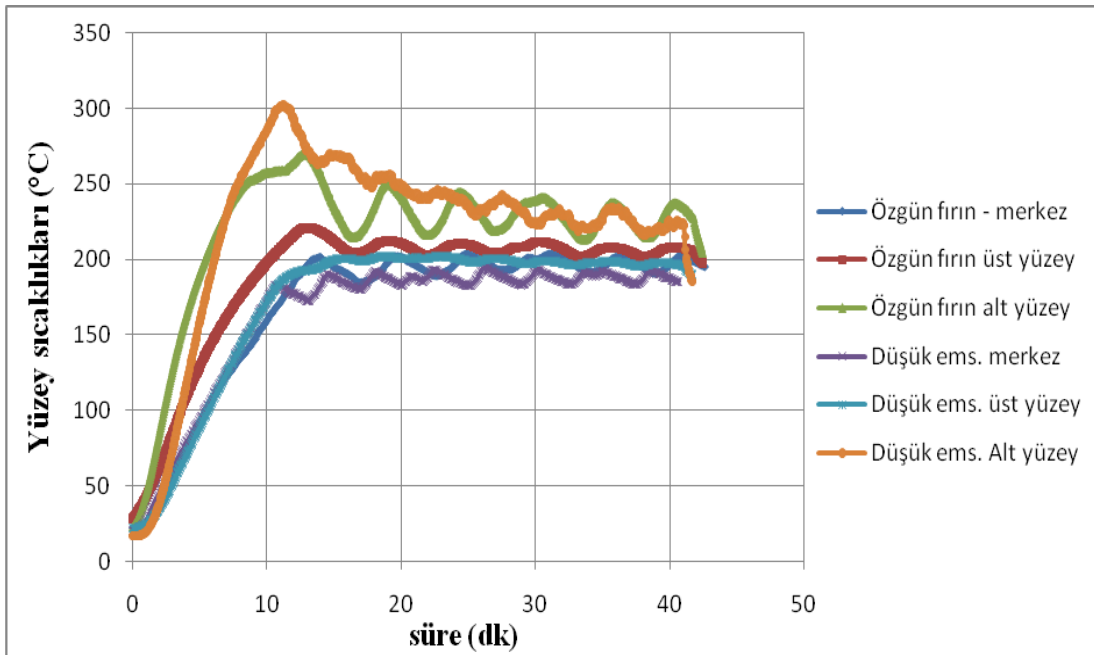
Şekil 3.17 : Paslanmaz çelik kaviteden üretilen prototip fırın.

Fırın kavitesinde kullanılan paslanmaz çeliğin termofiziksel özellikleri aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.

**Çizelge 3.10** : Paslanmaz çeliğin termofiziksel özellikleri.

	Isı iletim katsayısı (W/mk) (Oda sıcaklığında)	Yayma oranı	Özgül ısı (j/kgK)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Emaye sac	10,96	0,85	518	7503
Paslanmaz çelik	16	0,2	500	7800

Düşük yayma oranına sahip paslanmaz çelikten imal edilen kavite hacmine sahip prototip fırın üzerinde yapılan incelemede fırınların ısıtım etkinliklerini karşılaştırmakta fayda vardır. İlk olarak düşük yayma oranlı fırınla özgün fırın yüzey sıcaklıkları karşılaştırılacaktır.



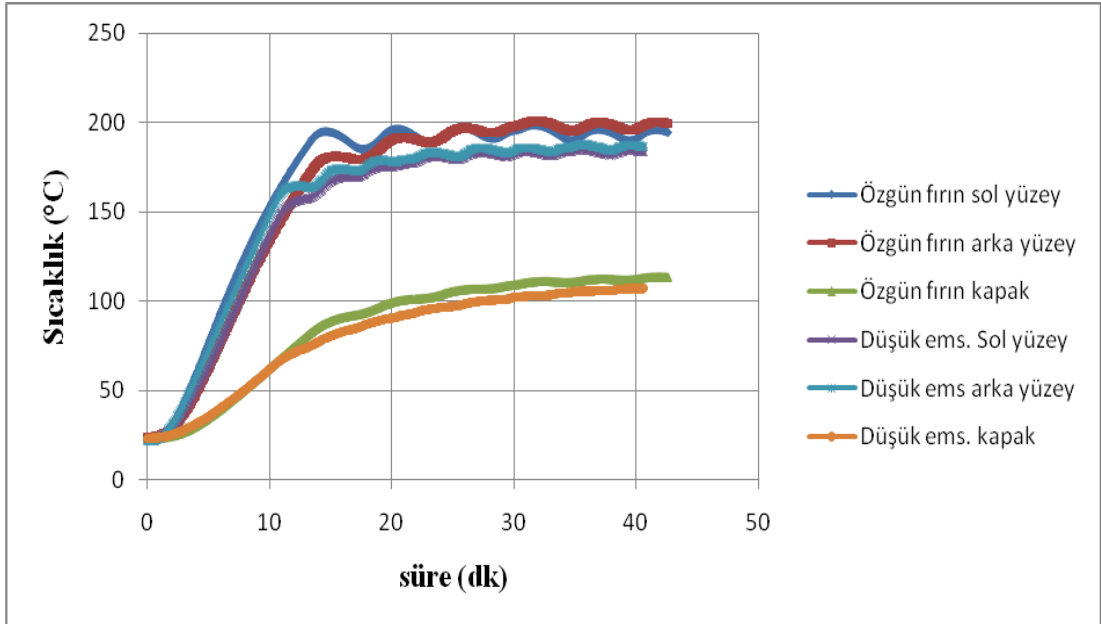
**Şekil 3.18** : Özgün fırın – düşük yayma oranlı fırın ısıtıcı ve merkez sıcaklıkları karşılaştırması.

Şekil (3.18) incelendiğinde düşük yayma oranına sahip fırının alt yüzey sıcaklığının ön ısıtma evresinin bittiği nokta olan 600 s civarında özgün fırına göre 50 °C daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Alt yüzey sıcaklığında meydana gelen bu artışın üst yüzey sıcaklığında gözlemlenmediği, özgün fırının üst yüzey sıcaklığının ön ısıtma evresinin sonunda düşük yayma oranlı fırına göre 20 °C daha fazla olduğu görülmektedir. Merkez sıcaklıkları karşılaştırıldığında ise düşük yayma oranlı fırın kavite merkezinin ısıtıcı termostatının kapandığı nokta olan ön ısıtma sonunda özgün fırına göre 25 °C daha düşük olduğu grafikten görülmektedir. Ön ısıtma evresinin bitip, ısıtıcıların aç-kapa evresine geçmesiyle birlikte, yüzey sıcaklıkları arasındaki

farkın kapandığı ve değerlerin birbirine yakın ortalamalarda salınma geçtiği tespit edilmektedir.

Fırının asal ısıtıcı kaynağı olan alt ısıtıcı sıcaklığında yaşanan artışın fırın kavite merkez sıcaklığının artış hızına etkide bulunmaması üzerinde durulmaya değer bir noktadır. Zira bu sonuç, fırın ısıtıcısının sıcaklığı artmasına rağmen fırın kavite merkezine doğru olan momentum ve ısı yayılımında bir artış olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Bunun nedeni ise, alt ve üst ısıtıcının her ne kadar daha yüksek sıcaklıklara çıksalar dahi düşük yayma oranına sahip olduklarından dolayı ışıyım yayma kapasitelerinin düşük olmasıdır.

Bununla beraber, ısı kayıpların yoğun olduğu fırınların yan, arka ve kapak yüzeylerinin sıcaklıklarının da incelenmesi gerekmektedir (Şekil 3.19).

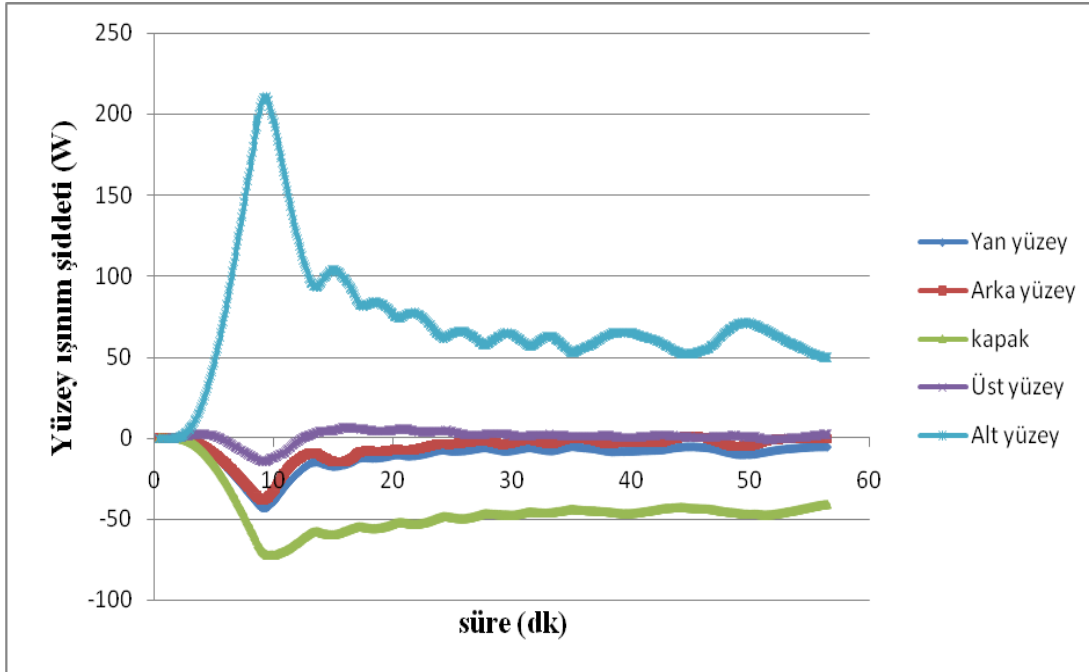


**Şekil 3.19 :** Özgün fırın – düşük yayma oranlı fırın yan, arka ve kapak yüzey sıcaklıkları karşılaştırması.

Şekil 3.19'dan da görülebileceği üzere fırınların diğer yüzey sıcaklıklarının eğilimin birbirine oldukça paralel olmakla birlikte özellikle ön ısıtma sonunda düşük yayma oranına sahip fırın yüzey sıcaklıklarının özgün fırına oranla daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil (3.18) ve (3.19) incelendiğinde düşük yayma oranına sahip fırının göze çarpan en büyük özelliği tez çalışması kapsamında incelenen fırının asal ışıyım kaynağı olan alt yüzeyi sıcaklığında olan dikkate değer artıştır. Bununla birlikte üst yüzey sıcaklığının bir miktar düştüğü gözlemlenmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken husus, tez çalışması kapsamında yapılan incelemeler

sırasında kavite hacmine bakan üst ısıtıcının bir ışınım kaynağı olarak dahil edilememesidir. Bunun nedeni ise sıcaklık ölçümleri için termal görüntüleme teknikleri kullanılamamasıdır. Dolayısıyla yapılan karşılaştırmada düşük yayma oranına sahip fırının üst yüzey sıcaklığının düşük olması, üst ısıtıcıdan kaynaklanan ışınım akısının azaldığı anlamına geldiği çıkarımını yapmak doğru olmayacaktır.

Yüzey sıcaklıkları üzerinden yapılan bu incelemelerden sonra düşük yayma oranlı fırının yüzeylerinden ışınım ile olan ısı akısı incelenecektir. Bu inceleme ilk olarak fırın merkezinde tuğla olmadığı durum için yapılacaktır. Şekil (3.20)'de fırın merkezi boşken düşük yayma oranına sahip fırına ait yüzey ışınım şiddetleri görülmektedir.



Şekil 3.20 : Düşük yayma oranına fırın boş hal yüzey ışınım şiddetleri.

Şekil (3.20)'den de görüldüğü gibi düşük yayma oranına sahip fırında da ana ışınım kaynağı üst yüzeydir. Diğer yüzeyler arasında özellikle üst yüzeyin neredeyse nötr bir karakter oluşturduğu söylenebilir. Düşük yayma oranına fırın ile özgün fırın arasında boş hal için ön ısıtma evresinin sonundaki ışınım şiddetleri arasındaki oran aşağıdaki tabloda belirtilmiştir (Çizelge 3.11).

**Çizelge 3.11** : Özgün fırın – düşük yayma oranlı fırın ışı nım şiddetleri karşı laştırması (ön ısı tma sonu).

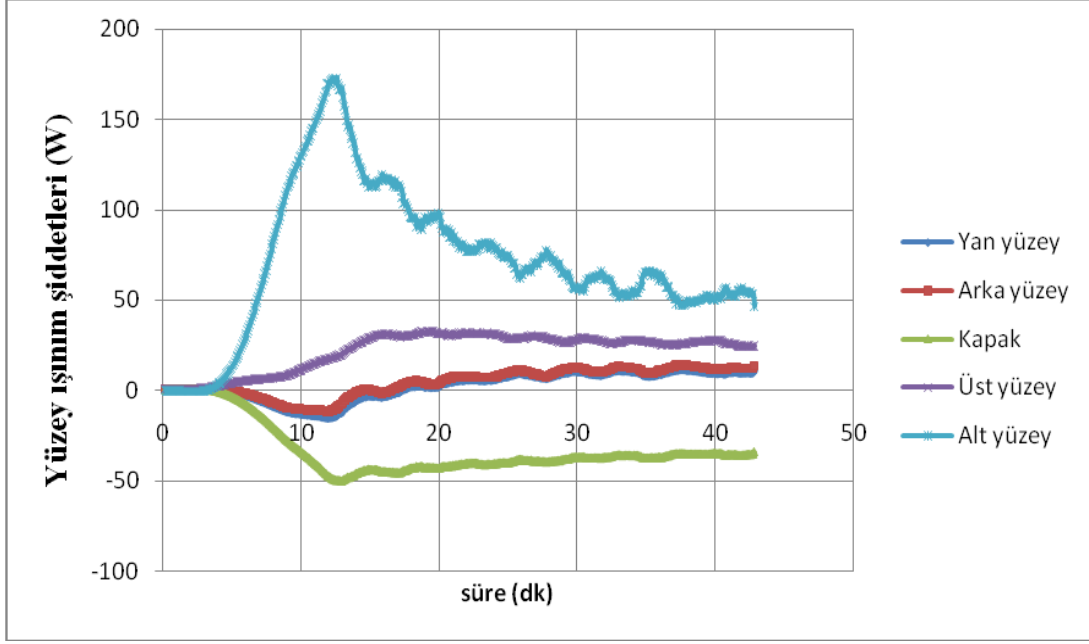
	Özgün fırın	Düşük yayma oranlı fırın
	Q ışı nım (W)	
Yan yüzey	-133,9	-33,6
Arka yüzey	-229,1	-24,8
Ön yüzey	-102,1	-70,6
Üst yüzey	33,8	-10,1
Alt yüzey	566,4	172,6

Çizelge 3.11'den görülebildiği gibi, düşük yayma oranına sahip fırın yüzeylerinden olan ışı nım şiddetleri, emaye kaplı çelikten üretilen ve 0,85 yayma oranı katsayısına sahip özgün fırına oranla oldukça düşük mertebede kalmaktadır. Asal ışı nım kaynağı olan alt yüzey için bu oran 1'e 3,2'ye tekabül etmektedir.

Bu noktada yüzey sıcaklıkları üzerinden yapılan, alt ve üst ısı tıcının yüzey sıcaklıklarının yüksek olmasına rağmen, bu artışın yüzeylerden yayılan ışı nım şiddetine yansımadağı rahatlıkla söylenilir.

Ancak, yüzey ışı nım şiddetlerinin düşük mertebede kaldığını söylemek ışı nım etkinliği açısından iki tasarım arasında bir karşı laştırmaya gitmek için yeterli değildir. Bunun nedeni, fırın boş durumdayken fırın kavitesi merkezinde yüzeylerden yayılan ışı nım akılarını toplayacak bir elemanın bulunmayışıdır. Fırınlar arasında ışı nım etkinlikleri üzerinden bir karşı laştırma yapabilmek için tuğlalı durumda yüzeylerden olan ışı nım miktarını incelemek gereklidir.

Bu amaçla EN 50304 standartlarına göre gerçekleştirilen 180 K statik mod, tuğlalı enerji tüketimi deneyleri esnasında düşük yayma oranına sahip fırın içerisinden kavite ve tuğla yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve yapılan analiz ışığında yüzeylerden olan ışı nım şiddetleri tespit edilmiştir. Tuğlalı hal için düşük yayma oranına sahip fırın yüzeylerinden olan ışı nım şiddetleri aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 3.19).



**Şekil 3.21 :** Düşük yayma oranına sahip fırın için 180 K standart tuğlalı enerji tüketimi esnasında yüzeylerden olan ışıma şiddeti.

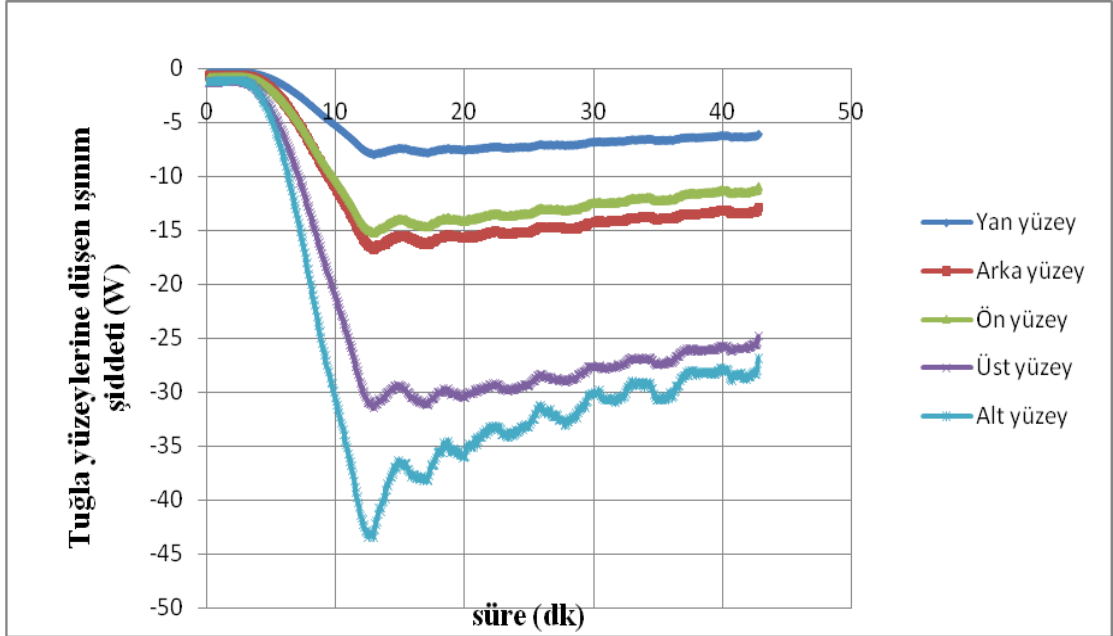
Boş durumla tuğlalı durum arasında yüzey ışımları karşılaştırıldığında, tuğlalı durum için, yüzey ışımlarının bir miktar düştüğü gözlemlenebilir. Boş durumla tuğlalı durum arasındaki bu karşılaştırma çizelge (3.12)'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.12 :** Düşük yayma oranlı fırında Q ışıma şiddeti (W) ön ısıtma sonu karşılaştırma.

	Boş durum	Tuğlalı durum
Yan yüzey	-33,6	-13,0
Arka yüzey	-24,8	-8,2
Kapak	-70,6	-49,9
Üst yüzey	-10,1	19,5
Alt yüzey	172,6	166,8

Tuğlalı durum için yüzey ışıma şiddetlerinde olan azalma iki farklı şekilde açıklanabilir. İlk olarak, şekil faktörü etkileşimi yüksek olan sıcak yüzeyler arasındaki etkileşim kavite merkezine tuğlanın yerleştirilmesi ile bir miktar düşmektedir. Dolayısıyla bu azalma net-ışıma yöntemine göre elde edilen ışıma şiddeti değerlerine etkide bulunmaktadır. Bir diğer önemli etken ise, tuğlalı durumda fırın kavite merkezinde bulunan nemli havanın oluşturduğu gaz ışıma mekanizmasıdır. Yüzey ışıma hesaplamalarında her ne kadar göz önüne alınmasa dahi, fırın kavitesinde bulunan su buharı içeriği yüksek nemli hava yüzeylerden yansıtılan ışıma akılarını yutmaktadır.

Bu noktada tuğla yüzeyine düşen ışınım akılarına göz atmak düşük yayma oranlı fırının ışınım etkinliğini incelemek amacıyla faydalı olacaktır. Monte Carlo yöntemi ile hesaplanan, yüzeyler arasında gölge etkisi oluşturan bir eleman olan tuğla için şekil faktörleri kullanılarak tuğla yüzeyine düşen ışınım akıları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar şekil (3.22)'de gösterilmiştir.

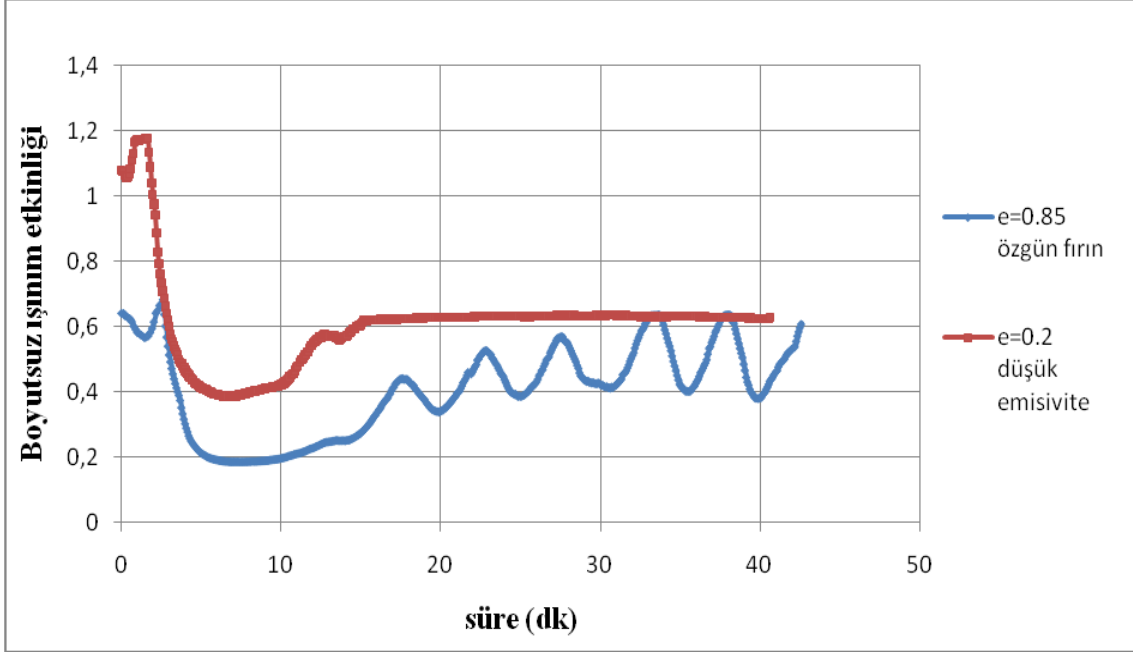


Şekil 3.22 : Tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddeti.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, tuğla yüzeyleri arasında, alt ve üst ısıtıcılarla olan şekil faktörü etkileşimi de göz önüne alınarak, en fazla ışınım şiddeti alan yüzeyler alt ve üst yüzeylerdir. Arka ve ön yüzeyler yaklaşık olarak benzer miktarda ışınım şiddeti alırken, yan yüzeyler en düşük miktarda ışınım maruz kalmaktadırlar. Geline aşamada düşük yayma oranlı fırın için tuğla yüzeylerine düşen ışınım şiddetleri de elde edildiğine göre özgün fırın ile ışınım etkinlikleri karşılaştırılabilecektir. Yüklü bir fırın içerisindeki ışınım etkinliği tuğla yüzeyine düşen ışınım şiddetinin, diğer tüm yüzeylerden yayılan (ya da yutulan) ışınım şiddetlerinin toplamına olan orandır ve şöyle ifade edilebilir:

$$q^* = \frac{q_{tuğla}}{\sum q_{diğer}} \quad (3.4)$$

Yukarıda belirtilen 1.2 ifadesi yardımıyla düşük yayma oranlı fırın ve özgün fırın için ışınım etkinliklerinin pişirme süresine göre değişimleri şekil (3.23)'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.23 :** Düşük yayma oranına sahip fırınla özgün fırın arasındaki ışıma etkinliği karşılaştırması.

Şekil 3.23 şimdiye kadar yukarıda yapılan analizin, fırın merkezinde yer alan ve yiyeceği modelleyen tuğlanın merkeze alınarak genişletilmesi gerektiğini göstermektedir. Daha önce yapılan belirlemelerden düşük yayma oranına sahip fırında yüzeylerden olan ışıma şiddetlerinin özgün fırına oranla daha düşük olduğu tespitinde bulunulmuştu. Buna rağmen şekil (3.23)'den de görüldüğü gibi yüzeylerden yayılan toplam ışıma gücü daha düşük olmasına rağmen, düşük yayma oranlı fırın için, tuğla yüzeylerine yönlendirilen ışıma şiddetinin, diğer yüzeylere yönlendirilen toplam ışıma şiddetine olan oranının, neredeyse pişirme süresinin tamamında, daha yüksek olduğu tespiti yapılabilir.

### 3.5.2 Isıtıcı yüzeylerin siyah boya ile boyanması

M. Newbrough ve Shaughnessy tarafından literatüre kazandırılan düşük emisiviteli fırın, yazarların 1999 yılında yaptıkları çalışmada da özetledikleri gibi yüksek ışıma etkinliğine sahip olması bakımından yüksek emisiviteli fırınlara nazaran olumlu performanslar göstermektedir [23]. Tez çalışması kapsamında da incelenen bu konuda Şekil (3.23)'den de görülebileceği gibi benzer bir çıkarım yapılmıştır. Düşük emisiviteli fırınların yüzey sıcaklıklarını düşürdüğü, dolayısıyla daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlayarak ısı kayıplarını azalttığı yine yapılan tespitler arasındadır.



Ancak, düşük emisiviteli fırın üzerinde yapılan yüzey ışıını incelemleri, özellikle ısıtıcıların bulunduğu yüzeylerin sıcaklıklarının, özgün fırına göre daha yüksek sıcaklıklara çıkmalarına rağmen yaydıkları ışıını şiddetinin bu oranda artış göstermediğidir. Dolayısıyla, fırın merkez kavite sıcaklığında da istenen artışın sağlanamamaktadır.

Yukarıda, düşük emisiviteye sahip fırın için belirtilen olumlu ve olumsuz özellikler teorik arka plan ışığında tekrardan gözden geçirilmeye değerdir. Düşük emisiviteye sahip yüzeyler daha az miktarda enerji yaymakla birlikte Kirchoff yasasından da hatırlanacağı gibi (eşitlik 1.8) kapalı bir çerçevede yüzeylerin yayma ve yutma katsayıları birbirlerine eşit olacaktır. Dolayısıyla düşük miktarda enerji yayan yüzeyler, daha düşük miktarda enerjiyi bünyelerinde yutacaklardır.

Şekil 5.6'dan da hatırlanacağı üzere fırın içerisindeki yüzeylerin bir kısmı ışıını yayarken (giden ışıını > gelen ışıını), bir diğer kısmı ise ışıını bünyelerine toplamaktadır (gelen ışıını > giden ışıını). Dolayısıyla fırın yüzeylerinin ışıını özellikleri arasındaki bu farklılıktan da yola çıkılarak yüksek performansa sahip bir fırın tasarımında farklı yüzeylerin emisivitesi hakkında şu ara tespitte bulunulabilir:

- ışıını bünyesinde toplayan yüzeyler olan yan ve arka yüzeyler ve kapak bir yandan da ısı kayıplar açısından engel oluşturmaktadır. Üzerlerine düşen ışıını şiddetinin düşük olması ısı kayıplarını azaltarak enerji tüketimine olumlu yansıyacaktır. Bu nedenle düşük emisiviteye sahip olmaları (dolayısıyla düşük yutma katsayısına sahip olmaları) tercih edilmelidir.
- ışıını yayan yüzeylerin yaydıkları ışıını şiddetinin artırılması kavite merkezine olan ışıını şiddetini artıracaktır. Bu noktada ısı kaynağı olan yüzeylerin yüksek emisiviteye sahip olmaları yaydıkları ışıını şiddetini artırarak enerji tüketimine olumlu yönde yansıyacaktır.

Yukarıda tespit edilen iki madde ışığında düşük emisiviteye sahip fırın kavramına eleştirel bir bakış açısı geliştirilebileceği görülmektedir. Zira alt ve üst ısıtıcının emisivitesinin düşük olması yaydıkları ışıını şiddetini de azaltmaktadır. Tespit edilen önermeler ışığında farklı karaktere sahip yüzeylerin farklı emisivitelere sahip olacakları kompozit tasarımların oluşturulup etkinliklerinin incelenmesine karar verilmiştir. Bu bağlamda iç yüzeyleri emisivite katsayısı 0,2 olan ticari alüminyum

levhalardan oluşan kapalı deney hacminin, alt ve üst yüzeyleri sıcaklığa dayanıklı siyah boya ile boyanmıştır (Şekil 3.24).



**Şekil 3.24 :** Alt ve üst yüzeyleri siyah boya ile boyanan deneysel hacim.

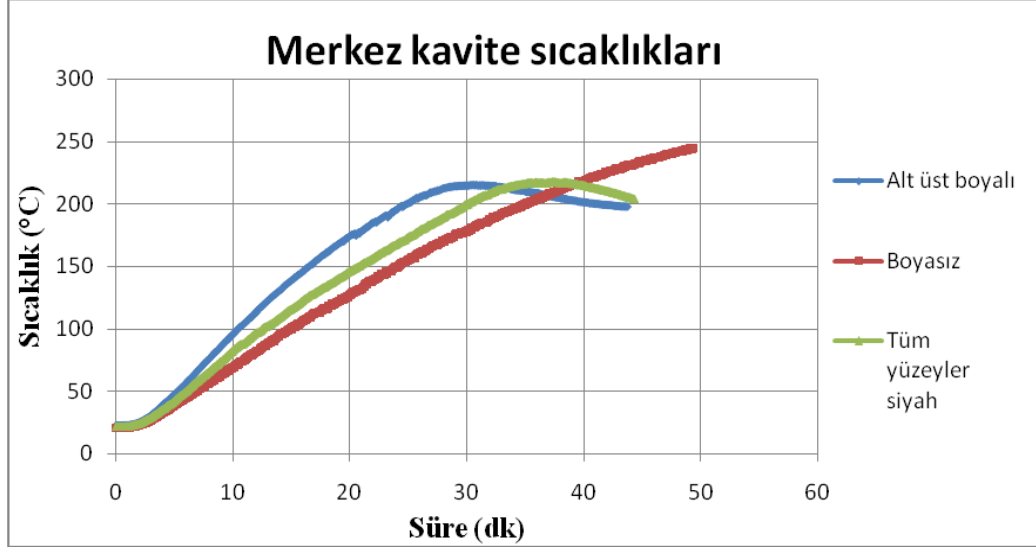
Üst ve alt yüzeyleri siyah boya ile boyalı olan deneysel hacim içerisinde EN 50304 standartlarına göre 180 K sıcaklığında enerji tüketimi deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çizelge (3.13)'de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.13 :** Alt ve üst yüzeyleri boyalı deney hacmi enerji tüketimi sonuçları

	Piştirme süresi (dk)	Enerji tüketimi (Wh)
Alt ve üst ısıtıcı boyalı	43,7	1825
Tüm yüzeyler parlak	49,3	2678

Çizelge 3.13 incelendiğinde alt ve üst ısıtıcısı boyalı deney düzeneğinin, tüm yüzeyleri parlak deney düzeneğine oranla enerji tüketiminin % 30'dan daha fazla az olduğu, piştirme süresinde ise %10'dan fazla azalma elde edildiği görülmektedir. Elde edilen bu iyileştirmenin ardında yatan nedenleri incelemek için iki tasarım arasındaki merkez kavite sıcaklıklarının artışı karşılaştırılabilir.

Şekil 3.25 incelendiğinde alt ve üst yüzeyleri boyalı olan tasarımın merkez kavite sıcaklığının, tüm yüzeyleri parlak olan tasarıma oranla çok daha kısa sürede rejim sıcaklığına ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, tüm yüzeyleri parlak olan durumda ısıtıcı sıcaklığının deney sonunda dahi kararlı rejime ulaşamadığı tespit edilmektedir.



**Şekil 3.25 :** Alt- üst boyalı – tüm yüzeyler parlak - tüm yüzeyler siyaha boyalı merkez kavite sıcaklıkları karşılaştırması.

Buradan çıkarılacak olan sonuç, alt ve üst yüzeyleri siyaha boyalı olan tasarımın ısıyı kavite merkezine çok daha hızlı bir biçimde yönlendirdiğidir. Bu yönlendirme fırın kavitesinde yer alan tuğlaya olan ısı transferini artırarak enerji tüketimi ve pişirme süresinde önemli bir azalmaya neden olmaktadır.

Aynı zamanda iç hacmin tüm yüzeyleri siyaha boyanarak yapılan karşılaştırma da Şekil 3.25’den görülebilir. Buna göre tüm yüzeyleri siyaha boyalı hacmin ısıyı tüm yüzeyleri yayma katsayısına sahip hacimden daha iyi merkeze yönlendirdiği görülmektedir. Bu noktada üzerinde dikkatle durulması gereken ise tez çalışması kapsamında ele alınan hacmi oluşturan levhaların kalınlığının (3 mm) literatürde ele alınan çalışmalara göre (0,6 mm) çok daha fazla olmasıdır. Dolayısıyla iki çalışma arasında iletim – ışıma oranlarında farklılık olmakla birlikte ilerleyen çalışmalarda levha kalınlığının etkisi de göz önüne alınması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır.

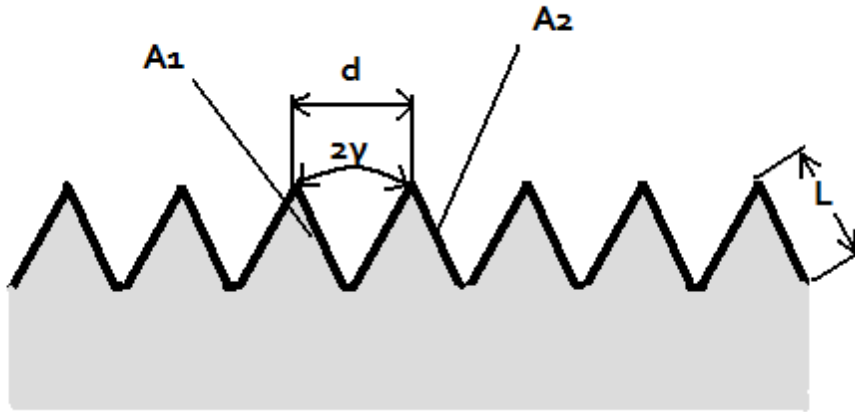
### 3.6 Kapalı Hacmin Duvarlarında V-Oluklu Yüzey Kullanımı

Ev tipi ankastre fırın üzerinde tuğlalı ve boş durum için yapılan analiz çalışmaları ışığında en sıcak iki yüzey olan alt ve üst yüzeylerin kapalı hacim içerisindeki ana ışıma yapan yüzeyler olduklarını söyleyebiliriz. Bununla birlikte sıcaklık haritalarından da anlaşıldığı gibi, yan yüzeylerin doğrudan bir ısıtıcı kaynağından beslenmedikleri halde oldukça yüksek sıcaklıklara çıktıkları söylenebilir. Bu nedenle bu yüzeylerin potansiyel birer ışıma kaynağı oldukları unutulmamalıdır. Ayrıca, yan yüzeyler kavite etrafında sarılı yalıtımla çevrenmekle birlikte, yalıtım üzerinden

olan ısı kayıpları için potansiyel güzergâhlar oluşturmaktadırlar. Oluşturulacak olası bir tasarım yardımıyla yan yüzeyler üzerine düşen ışınım akısının kavite merkezinde tutulması, bu yolla yalıtım üzerinden olan ısı kayıpları da azaltacak, sonuç olarak ışınım ile ısı geçişi etkinliğini de artıracaktır.

Yan yüzeylerin ışınımı toplayan yüzeyler olarak bir yandan kaynak yüzeylerden ışınımı toplamaları diğer yönlerde ise düşük oranda ışınım neşrederek kayıpları azaltmaları ideal bir tasarımın özeti olabilir. Yani, ideal bir toplayıcı yüzey, topladığı yönde yüksek yayma oranına sahip olarak topladığı enerjiyi artırırken, diğer yönlerde düşük yayma oranlarına sahip olarak yansıtımla olan tekrar kayıplarını azaltabilir.

Literatürde bilhassa güneş panelleri için kullanılan v-oluklu yüzeyler bahsi geçen türden bir etki yaratarak enerji verimliliği yüksek panel tasarımlarının önünü açmaktadır. Aşağıda şekli verilen bir v-oluklu yüzey üzerine düşen bir ışınım demeti analiz edilip, düz bir yüzeyle karşılaştırılırsa elde edilen verim formüle edilebilir.



**Şekil 3.26** : V-oluklu bir yüzeyin şematik gösterimi.

Karşılıklı iki yüzey üzerinden tek bir v oluğu incelenecek olursa oluğun kaybettiği ısı akısı şöyle ifade edilebilir:

$$Q = qx2L = q \frac{d}{\sin \gamma} \quad (3.5)$$

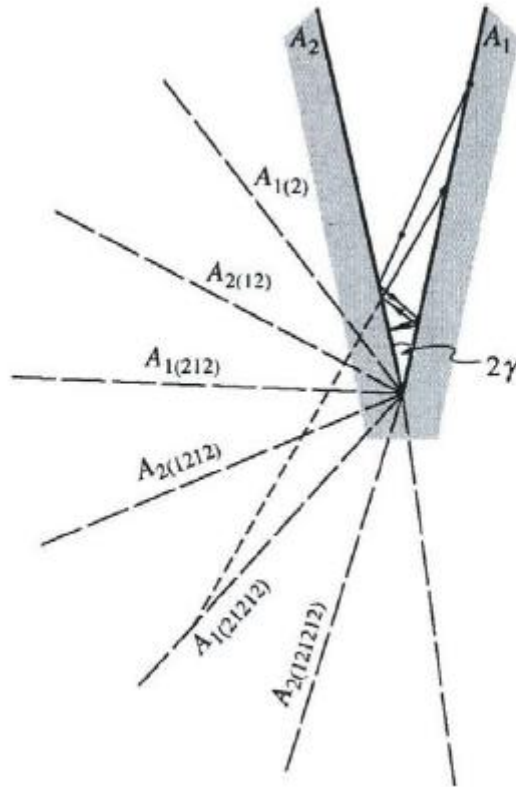
Yüzeyin siyah cisimden oluşması durumunda ise ısı kayıpları aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$Q_b = E_b xd \quad (3.6)$$

V oluklu yüzeyin siyah cismin yarattığı ısı kayıplara oranı ise bize görünür yayılma katsayısı olan  $\varepsilon_a$  'yı verecektir. Kapalı bir çerçeve için yapılan ışınım ısı akısı eşitliği v-oluklu yüzey için yazılacak olup, görünür yayılma katsayısının tanımından hareket edilerek ifade yazılırsa:

$$\varepsilon_a = \frac{Q}{Q_b} = \frac{q}{E_b \sin \gamma} = \frac{\varepsilon [1 - \varepsilon (F_{1-1}^s + F_{1-2}^s)]}{\sin \gamma} \quad (3.7)$$

İncelemeye devam edilecek olursa, bir numaralı yüzeyin iki numaralı yüzey ile olan etkileşimini hesaba katarak v-oluklu yüzeyden olan ısı kaybı için olan ifade detaylandırılabilir. V-oluğu içerisinde bir ışınım demetinin rotası incelendiğinde bir numaralı yüzeyden yola çıktıktan sonra iki numaralı yüzeye ulaştığı sonrasında iki numaralı yüzeyden tekrar yansıyor bir numaralı yüzeye çarptığı ve bu işlemin ışınım demeti oluşu terk edene kadar sürdüğü söylenebilir. Aşağıdaki şekilde demetin izlediği olası bir rota gösterilebilir.



Şekil 3.27 : Işın demetinin izlediği olası bir rota.

Yukarıdaki şekil incelenecek olursa şekil faktörü etkileşiminin düz iki levha arasındaki şekil faktörü etkileşiminden farklılaşarak zenginleştirildiği söylenebilir. Zira ilk yüzeyden çıkan ışınım demeti kısa bir süre içerisinde kayba uğramadan

tekrardan çıktığı yüzeye geri dönebilmektedir. Bu nedenle şekil faktörü etkileşimi, demetin yansıma sayısı kadar terim içerecek şekilde aşağıdaki gibi seriye açılabilir.

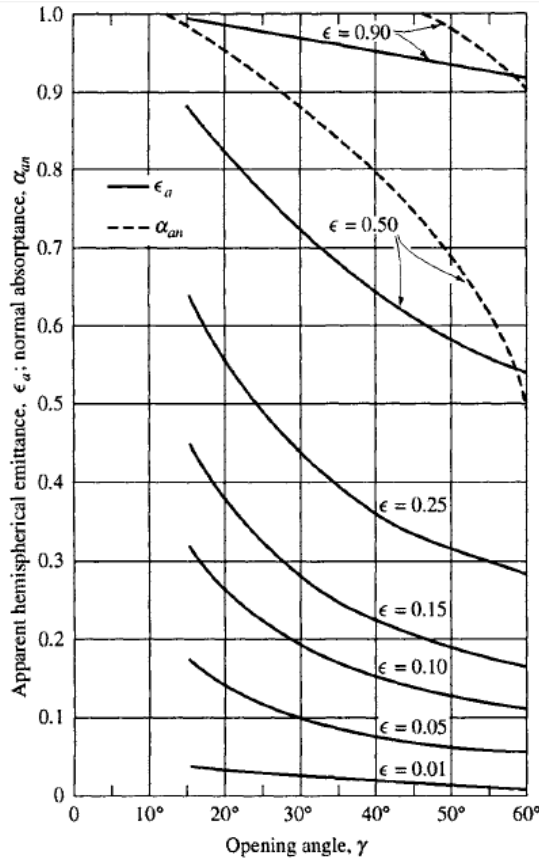
$$F_{1-1}^s = F_{1(2)-1} + \rho^3 F_{1(212)-1} + \rho^5 F_{1(21212)-1} + \dots \quad (3.8)$$

$$F_{2-1}^s = F_{2-1} + \rho^2 F_{2(12)-1} + \rho^4 F_{2(1212)-1} + \dots \quad (3.9)$$

Dolayısıyla iki yüzeyin alanının birbirine eşit olduğu düşünülerek toplam etkileşim şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_{1-1}^s + F_{2-1}^s = F_{1(2)-1} + \rho^2 F_{2(12)-1} + \rho^3 F_{1(212)-1} + \dots \quad (3.10)$$

Bu sayede eşitlik (3.7)'de yazılan eşitlik farklı oluk açıları ve yayılma katsayıları için hesaplanabilecektir. Hollands K. T, yaptığı çalışmada [25] bahsi geçen parametreler için elde ettiği sonuçları aşağıdaki grafikte görselleştirmiştir.



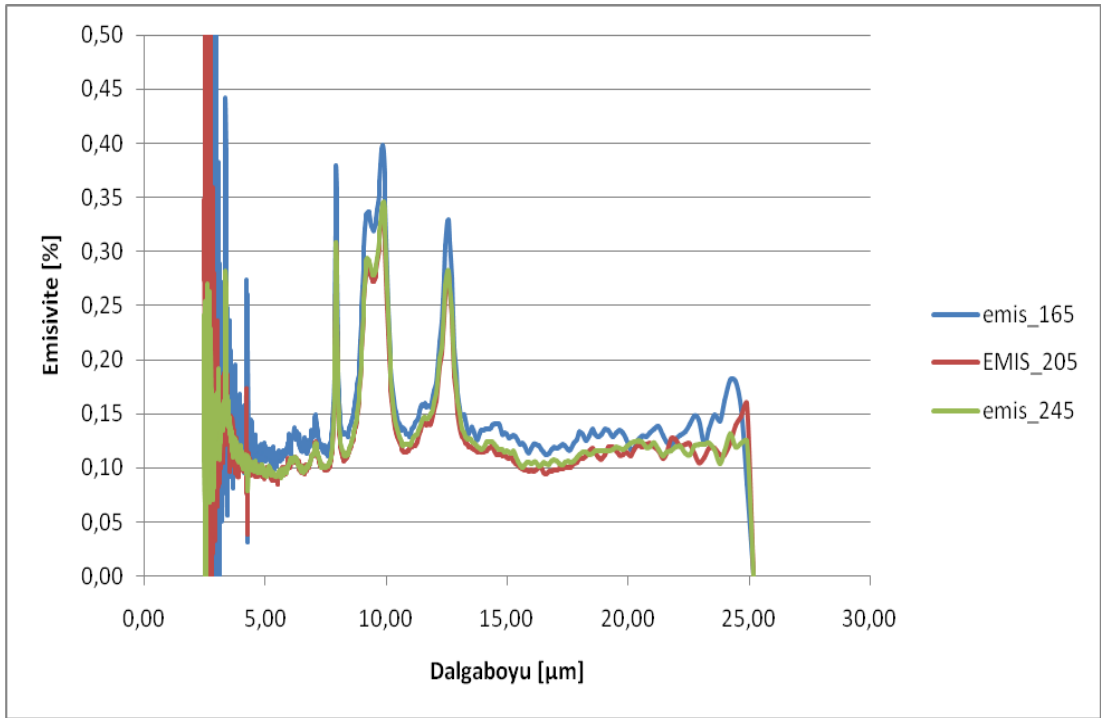
**Şekil 3.28** : V-oluklu yüzeylerde oluk açısı ve yayılma oranına göre görünür yayılma oranı.

Yukarıda özetlenen teorik arka plan uyarınca tasarlanan v-oluklu yüzeyler ankastre fırının yan duvarlarına yerleştirilmiştir. İlk olarak aşağıdaki şekilde teknik detayları

sunulan oluklu yüzeyden beklenen performans Hollands'ın grafiği üzerinden incelenebilir.

Oluk açısı 30 derece olan yüzeylerin üretildiği malzeme olan galvanizli sac için destekçi kuruluş olan Arçelik A.Ş'de bulunan yayılma katsayısı ölçüm cihazı üzerinde 165 °C, 205 °C ve 245 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta emisivite ölçümü yapılmıştır.

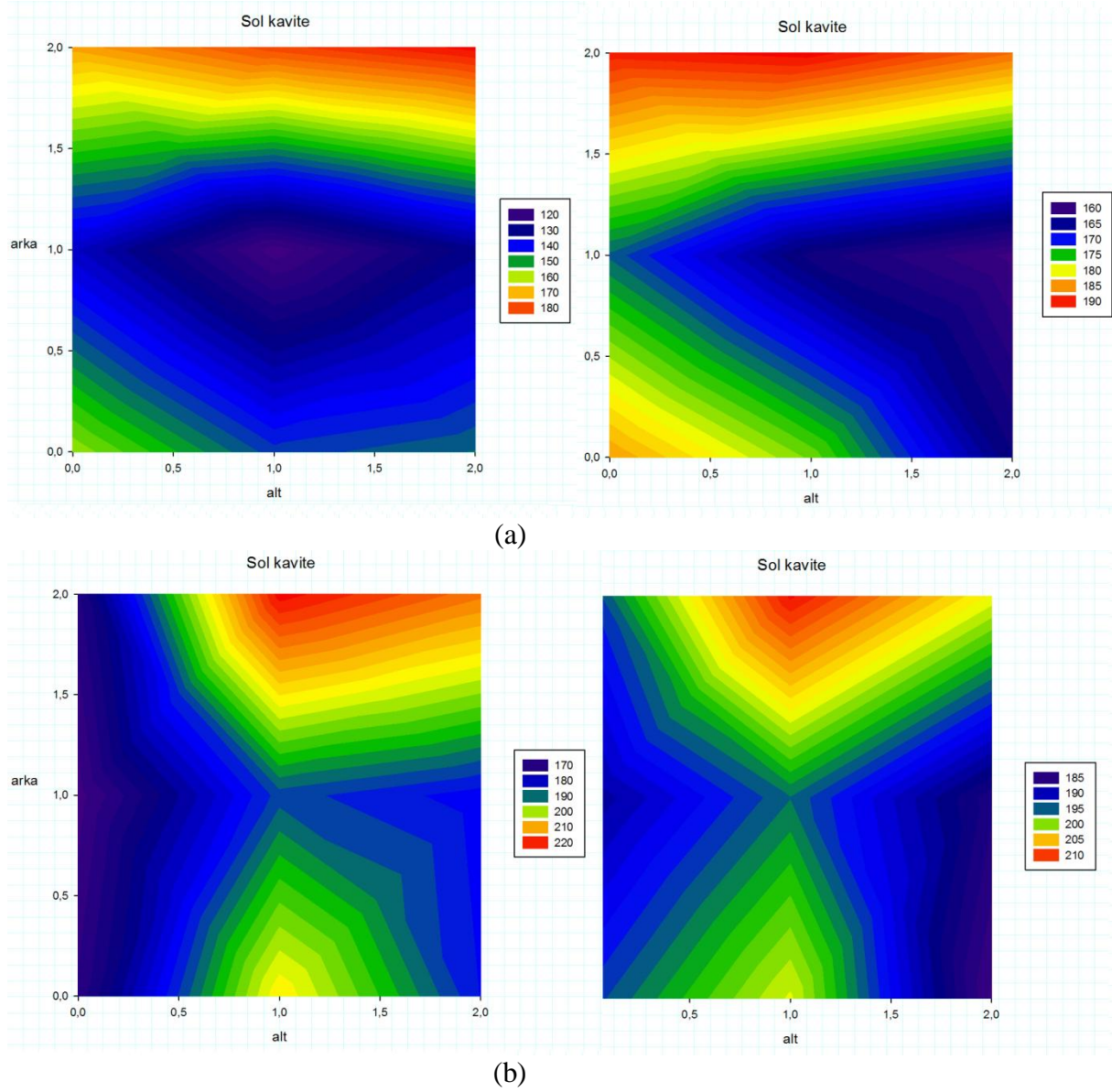
Standart enerji tüketim deneylerinde çıkılan üç farklı sıcaklık için tekrarlanan deneylerde elde edilen sonuçlar grafik halinde sunulmuştur (Şekil 3.24).Görüldüğü gibi, 12 – 22 µm aralığında kararlı sonuçlar veren emisivite değerleri sıcaklıkla birlikte çok değişmemekte ve 0,10 – 0,15 aralığında kalmaktadır. Bu da fırın içerisine yerleştirilen modellerin özgün fırında yer alan galvanizli saca göre oldukça düşük emisiviteye sahip olarak ışıınım etkinliğine katkıda bulunacaklarını göstermektedir.



**Şekil 3.29 :** Galvanizli sac için emisivitenin dalgaboyuna göre üç farklı sıcaklıkta değişimi.

Buna göre Şekil 3.24'den görünür yayılma katsayısı 0.3 olarak okunabilir. Bu değer v-oluklu yüzey kullanılarak ısı kayıplarda % 20'lik bir azalma sağlanabileceğini göstermektedir.

V-oluklu yüzeylerin fırın içerisinde gösterdiği performansı incelemek için ilk olarak ısıl haritalara bakmakta fayda vardır. Buna göre 205 C sıcaklığına ayarlanan ankastre bir fırın içerisinde özgün hal ile v-oluklu yüzey olması durumunda yan duvar sıcaklıkları aşağıdaki grafikteki gibidir.



**Şekil 3.30 :** V-oluklu yüzey – özgün fırın yan duvar sıcaklık dağılımları

Şekil (3.30)'dan da anlaşıldığı üzere v-oluklu yüzeyin varlığı yan duvarlardaki sıcaklıkları önemli ölçüde (yüzey ortalamalarında ön ısıtmada 50 °C ve çevrimde 25 °C) azaltmıştır. Ankastre fırın yan duvarlarındaki ısıl kayıplarda sağlanan bu iyileşmenin fırın enerji tüketimi değerlerine olan yansımalarını görmekte fayda vardır. EN 50304 standartlarına göre yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir.



**Çizelge 3.14** : V-oluklu yüzey kullanımının enerji tüketimine olan etkisi

	<b>140 K</b>		<b>180 K</b>		<b>220 K</b>	
	Enerji Tüketimi (Wh)	Piştirme süresi (dk)	Enerji Tüketimi (Wh)	Piştirme süresi (dk)	Enerji Tüketimi (Wh)	Piştirme süresi (dk)
<i>Özgün hal</i>	835	50,9	947	41,8	1064	37,0
<i>V-oluklu yüzey</i>	808	47,1	917	40,7	1047	36,6

Çizelge (3.14)'den de görülebileceği gibi v-oluklu yüzey kullanımının farklı sıcaklıklar için sırasıyla %3.2, %3,2 ve %1,6 olumlu etkisi olmakla birlikte, piştirme süresinde %7,5, %2,6 ve %1,1'lik bir azalma sağlamaktadır.



#### **4. MEVCUT DENEYSEL HACİM ÜZERİNDE GAZ IŞINIMIYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR**

Polar olan ve farklı moleküllerden oluşan su buharı (H<sub>2</sub>O), CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> gibi gazlar farklı dalga boylarında etkin bir şekilde ısı ışınım mekanizmasına katkıda bulunurlar. Bu gazların ısı ışınımına katkıda bulunduğunun tespit edilmesi son elli yıl içerisinde olmakla beraber özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında gaz ışınımının önemli bir etken olduğunu söyleyebiliriz. Yanma odaları içerisindeki sıcak gazlar, lifli yalıtım malzemeleri, cam üretimi, gözenekli ortamlardaki ısı geçişi, gaz ışınımının dikkatle incelenerek hesaba katılması gereken işlemlerdir.

Yüksek sıcaklıklarda örneğin bir yanma odası içerisindeki gazlardan su buharı ve CO<sub>2</sub> ışınımı yayma ve yutma özelliğine sahipken, aynı zamanda yanma ürünleri arasında yer alan karbon parçacıklarının da ışınım saçma ve yayma özelliği bulunmaktadır.

Gaz ışınımı, kapalı bir hacim içerisine yer alan gaz ortamının her bir noktasında gerçekleştiği gibi yüzey ışınımından farklı olarak hacimsel bir olgu olarak ele alınmalıdır. Bu nedenle çözümleme esnasında bu hacim içerisindeki her noktada ışınım yoğunluğu, sıcaklık alanı, fiziksel özellikler bilinmeli ya da tespit edilmelidir. Ayrıca gaz ışınımı yöne bağlı bir mekanizma olduğundan dolayı ortamda yer alan malzemelerin ışınım özelliklerinin yöne bağlı olarak tespit edilmesi gereklidir. Bu özelliklerin belirlenmesi için ise şartlandırılmış ortamlarda deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Tez çalışmasının bu bölümünde ilk olarak özgün fırın içerisindeki gaz ışınımının mertebesi incelenecek, daha sonra ise sayısal modelleme yardımıyla yüzey ışınımı ve gaz ışınımını gözetten modeller arasında bir karşılaştırmaya gidilecektir.

#### 4.1 Özgün Fırın İçerisindeki Gaz Işınımının Mertebesi

Ev tipi fırınlarda yapılan standart enerji tüketimi deneylerinde kullanılan ve yiyeceği modelleyen poroz yapıdaki tuğlalar pişirme işleminin modellenmesi açısından uygun bir fiziksel araç olarak kullanılmaktadır. Poroz yapıları sayesinde nem tutma özelliğine sahip tuğlalar EN 50304 standartlarında belirtildiği üzere kuru ağırlıkları üzerine  $1050 \pm 50$  gr miktarında su emmektedirler. Pişirme işlemi sırasında bir yandan sıcaklığı artan tuğla bir yandan da kavite merkezine kütle transferinde bulunarak nem kaybetmektedir. Bu sayede kavite merkezinde yer alan kuru havanın ise nem miktarı artmaktadır. Her ne kadar fırın bacası sayesinde nemli hava tahliye edilse dahi nemli tuğla, kavite merkezindeki havaya sabit bir oranda nem kaynağı oluşturmaktadır. Bilindiği üzere su buharı polar bir madde olarak ışıınımı yutan ve neşreden bir madde olarak gaz ışıınımına katkıda bulunmaktadır.

Bahsi geçen nedenlerden dolayı, ev tipi fırınlar ve içerisinde kütle geçişi söz konusu olan kapalı hacimler içerisinde gaz ışıınımının etkisi önemli bir etken olarak inceleme altına alınmalıdır. Tez çalışmasının bu bölümünde tipik bir ev tipi fırın içerisinde gerçekleşen pişirme süresince tuğladan kaynaklanan su buharının gaz ışıınımına olan katkısı incelenecektir.

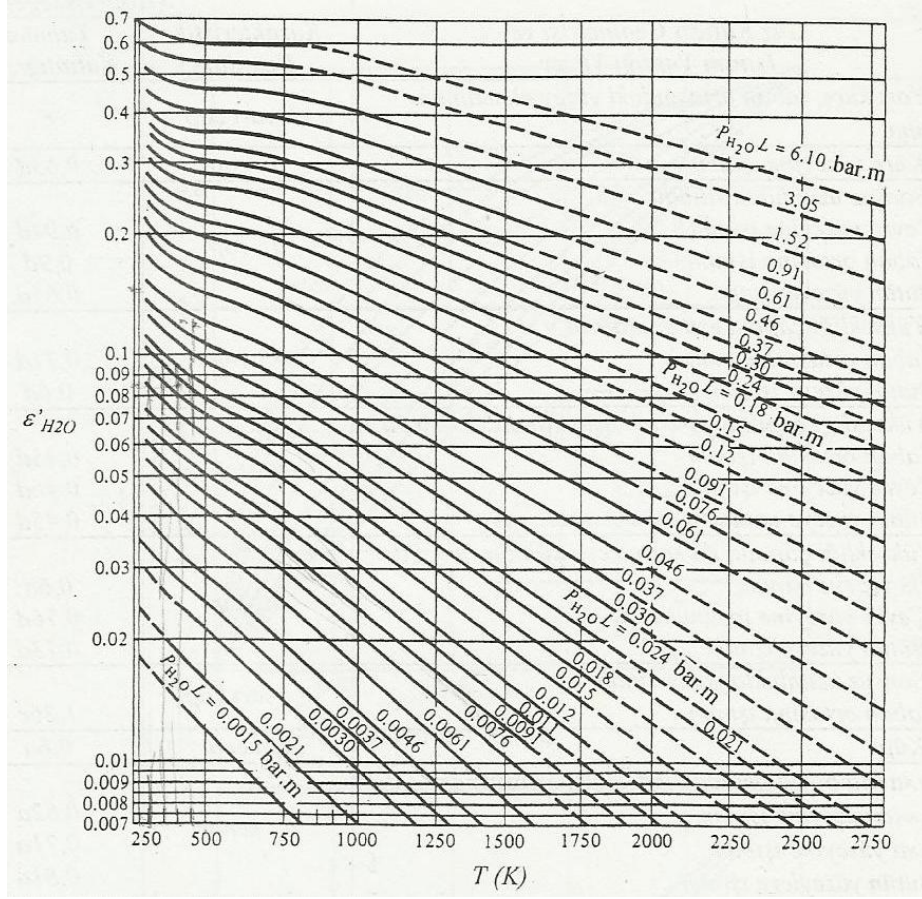
Daha önce de belirtildiği gibi gaz ışıınımı yöne bağlı bir mekanizma olmakla birlikte, yöne bağımlılık bilhassa mühendislik uygulamalarındaki işlemler açısından zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle Hottel tarafından geliştirilen yöntemle yöne bağımlı olmayan yaklaşık bir yöntem geliştirilmiştir. Işınım yapan bir gaz tabakasının komşu yüzeyine yaydığı ışıınım:

$$E_{\underline{g}} = \varepsilon_{\underline{g}} \sigma T_{\underline{g}}^4 \quad (4.1)$$

olarak ifade edilmiştir.

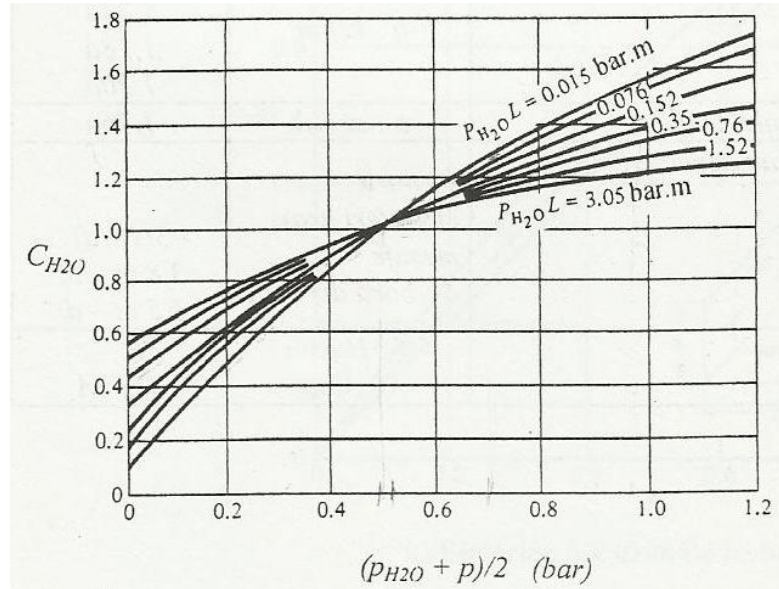
Burada  $\varepsilon_{\underline{g}}$  olarak belirtilen değer gazın ortalama yayma oranını göstermekle beraber toplam basıncın, gazın kısmi basıncının, gaz sıcaklığının ve eşdeğer tabaka kalınlığının bir fonksiyonudur.

Bahsi geçen ortalama yayma oranları değerleri farklı maddeler için sıcaklığın ve  $P_{H_2O} L_e$  değerlerinin birer fonksiyonu olarak grafikler halinde sunulmuştur. Su buharı için hazırlanan grafik aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Su buharı için ortalama yayma katsayıları

Ayrıca, Şekil 4.1'de sunulan ortalama yayma katsayıları su buharının basıncı ve  $P_{H_2O} L_e$  değerine göre tekrardan Şekil 4.2'de gösterilen bir düzeltme çarpanı ile çarpılmalıdır.



Şekil 4.2 : Su buharı için ortalama yayma katsayıları

Bu sayede düzeltme çarpanı yardımıyla elde edilen ortalama yayma katsayısı kullanılarak gri bir ortamı çevreleyen gri yüzeylerden oluşan kapalı hacme iletilen ışınım miktarı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilecektir.

$$Q_g = A \sigma \frac{\varepsilon_o}{1-(1-\varepsilon_o)(1-\alpha_o)} (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_o T_o^4) \quad (4.2)$$

Burada g ile gösterilen indis gaz ortamını, o ile gösterilen indis ise kapalı hacmin cidarlarını ifade etmekle birlikte  $\varepsilon$  ortalama yayma oranı,  $\alpha_o$  gazın  $T_o$  sıcaklığındaki yutma oranını belirtir. Denklem 4.2 mühendislik uygulamalarında aşağıdaki şekilde basitleştirilebilmektedir:

$$Q_g = A \sigma \varepsilon'_o (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_o T_o^4) \quad (4.3)$$

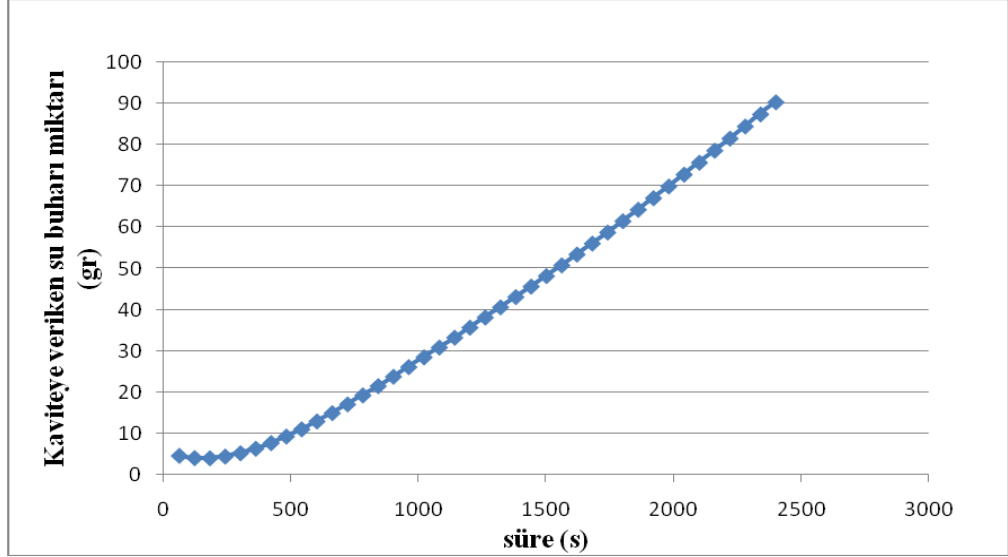
Eşitlik 4.3'de  $\varepsilon'_o$  olarak ifade edilen değer ise  $\varepsilon'_o = \frac{1+\varepsilon_o}{\varepsilon_o}$  olarak bulunabilir.

Yukarıda ifade edilen analitik çözümlene esasları yardımıyla bundan sonra ev tipi ankastre fırınlarda enerji tüketimi ölçümlerinde kullanılan standart deneylerden biri olan 180 K deneyi esnasında su buharı içeriği ile oluşan gaz ortamının ışınım etkisi üzerinde durulabilir.

İlk olarak fırın kavite merkezinde yiyeceği modelleyen tuğlanın nem kaybı ile ilgili olarak yapılan çalışmalara atıfta bulunmakta fayda vardır. S.A. Kayıhan tarafından 2003 yılında yapılan tez çalışması [26] sırasında ev tipi ankastre bir fırında 140 K deneyleri esnasında tuğlanın kütle kaybı zamana bağlı olarak aşağıdaki denklemlerle korele edilmiştir:

$$-65 \cdot 10^{-20} * t^6 + 77 \cdot 10^{-16} * t^5 - 35 \cdot 10^{-12} * t^4 + 79 \cdot 10^{-9} * t^3 - 98 \cdot 10^{-6} * t^2 + 25 \cdot 10^{-3} * t + 1952,5$$

Yukarıda belirtilen denklem yardımıyla kavite merkezine dahil olan nem miktarı aşağıdaki grafikte sunulmuştur.



**Şekil 4.3 :** 140 K deneyi sırasında kaviteye verilen su buharı miktarı

Yukarıda özetlenen denklemler ve grafikler yardımıyla kavite merkezinde yer alan su buharı konsantrasyonu üzerinden gaz ortamının ışıınım miktarı incelenebilir. Ancak, her ne kadar fırın kavitesine verilen su buharı miktarı bilinse dahi fırından tahliye edilen su buharı miktarı hakkında deneysel olarak bir çalışma yapılmadığından dolayı fırın içerisindeki su buharı derişikliği hakkında kesin bir yargıya varmak zordur. Bu nedenle yapılan sayısal çalışmalardan elde edilen değerler gaz ışıınımın mertebesini sunmak amacıyla kullanılacaktır (Çizelge 4.1).

**Çizelge 4.1 :** Sayısal çalışmalardan elde edilen su buharı kütle derişikliği

Süre (s)	Sıcaklık (K)	Kütle oranı (kg su buharı /kg kuru hava)
600	396,08	0,076
1200	462,99	0,171
1800	460,99	0,159
2400	459,43	0,155

Çizelge 4.1'de sunulan değerler kullanılarak ve yukarıda özetlenen işlem adımları izlenerek tipik bir fırın içerisindeki su buharının gaz ışıınımına olan katkısı incelenecektir. Bu işlem adımlarının ilki olarak su buharının yayma katsayısı için hesaplanan değerler çizelge (4.2)'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.2 : Su buharı için yayma katsayısı değerlerinin hesaplanması**

süre	$P_{h20}$ (bar)	$(P_{h20}+p)/2$	$L_{eşdeğer}$	$P_{h20}*Le$	$\epsilon'_{h20}$	$C_{h20}$	$\epsilon_{h20}$
600	0,076	0,538	0,246	0,0187	0,085	1,05	0,08925
1200	0,171	0,5855	0,246	0,04207	0,13	1,06	0,1378
1800	0,159	0,5795	0,246	0,03911	0,125	1,06	0,1325
2400	0,155	0,5775	0,246	0,03813	0,123	1,07	0,13161

Çizelge 4.2’de belirtilen değerler yardımıyla ve eşitlik 4.3 kullanılarak hesaplanan değerler çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3 : Fırın içerisindeki su buharının oluşturduğu gaz ışınmını**

Süre (s)	Q ışınmı (W)
600	109,59
1200	317,32
1800	305,08
2400	298,61

Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi içerisinde su buharı derişikliği yüksek olan hava bulunduran fırın kavitesi içerisindeki gaz ışınmını etkinliği ihmal edilemez bir mertebededir. Bununla beraber, fırın kavitesindeki gaz ışınmını fırın içerisindeki nem miktarının artmasıyla birlikte baskın hale gelmektedir. Bu eğilimin şekil 4.3 incelendiğinde çevrim evresi süresince artış göstereceği ortadadır.

#### **4.2 S2S - DO Sayısal Model Karşılaştırması**

Tez çalışmasının bu bölümünde kapalı bir hacim içerisinde ışınmıyla ısı geçişine dair geliştirilen sayısal modellemeler kullanılarak, hacim içerisinde nem bulunması durumu için çözümler sunulacak ve çözüm yöntemleri karşılaştırılacaktır. Sayısal modellemeler sırasında FLUENT Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programı içerisinde bulunan ve ışınmıyla ısı geçişini hesaba katan iki model olan RIM (Radiosity Irradiosity Method) ve Discrete Ordinates (DO) modelleri incelenecektir.

Kısaca bahsetmek gerekirse, RIM modeli paket program içerisinde yüzey ışınmının hesaplanmasında kullanılan çözüm yöntemine verilen adlandırma olmakla birlikte S2S (surface to surface) olarak belirtilmektedir. Sayısal çözümleme esnasında geliştirilen çözüm ağı için her bir hücreden diğer hücelere olan ışınmıyla ısı akışını hesaplayan modül, giriş bölümünde de incelenen ‘net-ışınm yöntemi’ esasına



dayanmakta olup hücrelerden giden ya da gelen ışınım akılarını hesaplamaktadır. S2S modeli, tez çalışmasındaki yüzey ışınımı çözümlerinde ışınım katsayılarının yönden ve dalga boyundan bağımsız olması kabullerini kullanırken, şekil faktörü hesaplamaları için programın çalıştığı alt klasör içerisinde bir matris oluşturmaktadır. Her bir hücreye ait şekil faktörlerinin tek tek işlendiği bu matristen çekilen şekil faktörleri kullanılarak, enerji denkleminin çözümü yardımıyla her bir hücrenin tek tek sıcaklıklarının belirlendiği çözüm adımı esnasında çözüm ekranında, kapalı çerçeve için toplam ışınımın ‘sıfır’ olması gerekliliği üzerinden yakınsama raporunu belirtmektedir.

Discrete Ordinates (DO) yöntemi ise S2S modelinin aksine hacimde yer alan ve ışınım mekanizmasına dahil olan gaz ortamında çözümlenmeye olanak sağlayan sayısal bir modeldir. Işınımın ısı geçişinde yöne olan bağımlılığı sonlu sayıda ayrıklaştırılmış yönde çözüm sağlayarak gideren yöntem,  $4\pi$ 'lik katı açı etrafında ışınım transport denklemini (RTE) çözmektedir. Işınımı yayan, yutan ve saçan bir ortamda RTE denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{dI}{ds} = \hat{s} \nabla I(r, \hat{s}) = \kappa(r)I_b(r) - \beta(r)T(r, \hat{s}) + \frac{\sigma_s(r)}{4\pi} \int_{4\pi} I(r, \hat{s}') \Phi(r, \hat{s}, \hat{s}') d\Omega' \quad (4.4)$$

Daha sonra RTE denklemi seçilen yönler için yaklaşık olarak ifade edilmekte ve yüzeye ait noktadaki toplam ışınım akısının yutulan ve yansıtılan ışınım akılarının toplamı olduğuna dair tek bir sınır şartı yardımıyla çözüme ulaşılmaktadır. Elde edilen ışınım yoğunluklarından, ilgili yüzeylerdeki gelen ve giden ışınım değerleri hesaplanabilmekte ve enerji denklemine kaynak oluşturacak şekilde FLUENT programında sayısal çözümlenme içerisinde kullanılmaktadır. Tez çalışması esnasında DO ışınım denklemleri  $\theta$  ve  $\phi$  açılarında olmak üzere tek piksel üzerinden ayrıklaştırılmıştır.

#### 4.2.1 Deney düzeneği

Deney düzeneği olarak yüzey ışınım akısı doğrulama deneylerinde de kullanılan, iç yüzeyleri 3 mm kalınlığa sahip alüminyumdan oluşan kapalı hacim kullanılmıştır (Şekil 3.1). Kapalı hacmi oluşturan levhaların birleşim yüzeylerinde kullanılan sıcaklığa dayanıklı sıvı conta yardımıyla sızdırmazlık sağlanmıştır. Deney başlangıç koşullarında deney hacmi içerisine %10 ve % 30 mol su buharı / mol kuru hava mol oranı oluşturacak şekilde su yerleştirilmiştir. Sayısal çalışmalar deney hacmi

içerisinde yer alan suyun tamamen buhar haline geldiğinden emin olduktan sonra kararlı rejim sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Deney esnasında, termoelemanlar yardımıyla kapalı hacmin yüzeylerinden ve kavite merkezinden sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Ayrıca yan duvarlar yüzeyinde yer alan termoelemanların 2 mm üzerinde yer alacak şekilde akışkan sıcaklığını ölçen termoelemanlar yardımıyla ilgili boyutsuz sayılar (örneğin Nusselt ya da Rayleigh sayıları) hesaplanabilmiştir. Bu amaçla yapılan termoeleman yerleşimi şekilde gösterilmiştir.

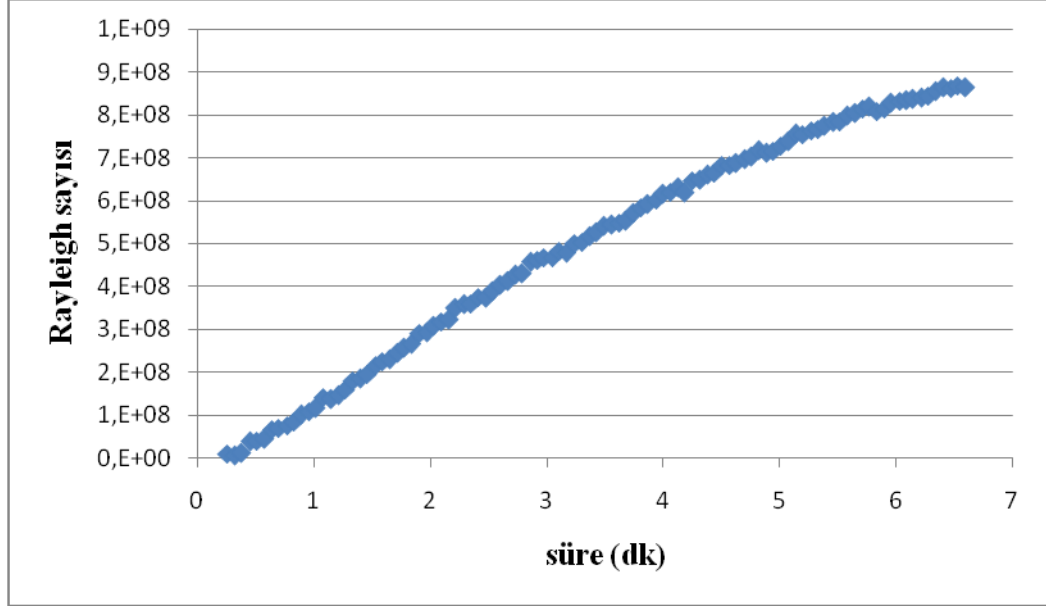


Şekil 4.4 : Deney düzeneği üzerindeki termoeleman yerleşimi.

#### 4.2.2 Sayısal modelleme

Sayısal inceleme sırasında korunum denklemlerinden süreklilik, momentum ve enerji denklemleri üç boyutlu olarak ve zamana bağlı şekilde çözülmüştür. Bu denklemlere ilave olarak kapalı hacimdeki doğal taşınımın türbülanslı olup olmadığını incelemek için Rayleigh sayısının yan duvar boyunca olan değişimi incelenebilir.

Şekil 4.5'den de görüldüğü üzere Rayleigh sayısı zamana bağlı olarak  $10^8$  değerini aşmaktadır ve bu nedenle akış türbülanslı olup, modellenmesi gerekmektedir. Sayısal çözümleme esnasında türbülanslı modellemek için, 'realizable k-epsilon' modeli seçilmiştir



Şekil 4.5 : Rayleigh sayısının zamana bağlı olan değişimi.

Realizable k-epsilon modelinin seçilmesinde akışın başlangıçta laminar olan karakteristiğinin türbülanslı olan bölgeye geçişine esneklik tanınması, türbülanslı kinetik enerjinin yok olmasını ( $\epsilon$ ) dinamik bir şekilde ifade etmesi gösterilebilir. Model içerisinde geçen 'Realizable' kelimesinden kasıt ise, Reynolds gerilme tensörünün akış esnasında negatif değerler almasının önüne geçecek türden bir tanımlamaya gidilerek modelin revize edilmesidir. Realizable k- $\epsilon$  modelinin türbülanslı kinetik enerji (k) ve bu enerjinin yok olmasının ( $\epsilon$ ) ifade edilmesi için tanımladığı denklemler şöyle ifade edilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_m \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_1 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\epsilon}} - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (4.6)$$

Denklemlerde yer alan ifadelerden  $C_{1\epsilon}$  ve  $C_2$  sabit değerler olup türbülanslı kinetik enerjinin azalmasını inceleyen standart deneyler yardımıyla tespit edilmişlerdir.  $G_k$  ifadesi, ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülans kinetik enerjinin varlığını ifade ederken,  $G_b$  ise kaldırma

kuvvetleri nedeniyle türbülans kinetik enerji terimidir.  $Y_M$  hacim değişimi (vortex stretching) olayının enerji kaybına etkisini temsil etmektedir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\epsilon$  ise sırasıyla k

ve  $\epsilon$  terimleri için Prandtl sayılarıdır. Eddy viskozitesi ise ‘eddy viskozite hipotezi’ yardımıyla elde edilmektedir.

İncelenen geometrinin basit olması ve dikdörtgen şekilde olması nedeniyle kavite bölgesinde yapılandırılmış quadrilateral hücre, yalıtım bölgesinde ise yapılandırılmamış tetrahedron tipinde hücreler kullanılmakla birlikte toplam hücre sayısı 1218090 adettir.

Belirtilen korunum denklemlerinden basınç ve hız arasında eşleştirme sağlamak amacıyla SIMPLE adı verilen yöntem kullanılmıştır. Korunum denklemlerinden elde edilmeyen basınç alanının elde edilebilmesi amacıyla hız ile basınç arasında köprü oluşturan yöntem, basınç alanı için bir ilk tahmin oluşturmakta, sonrasında ise yüzey akıları elde edilmektedir. Elde edilen yüzey akıları sonrasında düzeltilmekte ve yüzey akıları ile basınç gradyenleri arasında ilişki kurularak basınç alanı elde edilmektedir.

Kapalı hacim içerisinde alt ve üst yüzeylerde yer alan ısıtıcılar sayesinde bu yüzeylerin sıcaklıkları, diğer yüzeylerden oldukça yüksek olmaktadır. Doğal taşınımaya kaynaklık eden bu sıcaklık farkı nedeniyle oluşan kaldırma kuvvetlerinin, sayısal çözümleme esnasında dikkate alınmalıdır. FLUENT paket programı içerisinde bu etkiyi göz önüne almak için ‘full bouyancy effects’ seçeneği devreye sokulmuştur.

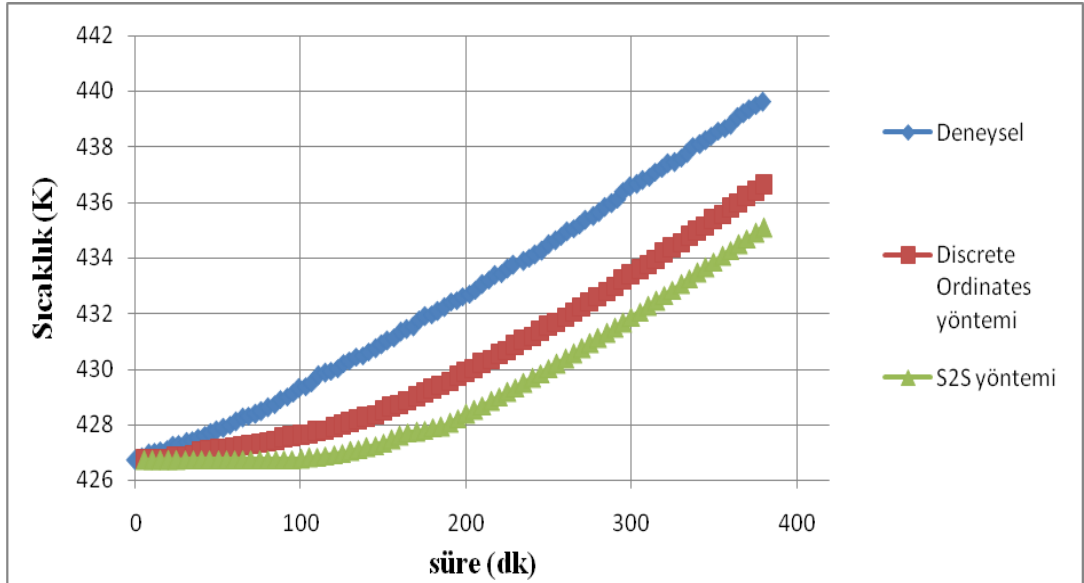
Gradyenler oluşturulurken en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. FLUENT paket programı basınç ve hız alanı çözümlerini oluşturulan hücrelerin merkezinde elde etmektedir. Ancak, yüzeylerden olan akıları hesaplayabilmek amacıyla bu değerlerin interpolasyona tabi tutulması şarttır. Doğal taşınımın etkin olduğu problemlerde paket programda önerilen interpolasyon seçeneği ‘body force weighted’ olmaktadır. Bu çözüm yönteminde basınç ve gövde kuvvetleri arasındaki farkın yüzeylerde sabit olduğu kabul edilmektedir.

Ayrıklaştırma esnasında yoğunluk, enerji, Discrete Ordinates (DO) ve yüzey ışımasını için birinci dereceden ‘upwind’ yöntemi kullanılmıştır. Bununla birlikte, momentum, türbülanslı kinetik enerji ve türbülanslı kinetik enerjinin yayılımı için ikinci dereceden ‘upwind’ yöntemi uygulanmıştır. Her çözüm adımında bir önceki adımdan alınan değerlerin bir bölümünün kullanılmasını ifade eden ‘rahatlatma katsayısı’ değeri, yoğunluk ve gövde kuvvetleri için 0.85, momentum için 0.65,

türbülanslı kinetik enerji ve türbülanslı kinetik enerjinin yayılımı için ise 0.7 alınmıştır. Discrete Ordinates (DO) ve S2S yöntemlerini karşılaştırılacağından ötürü her iki yöntemde de ayrıklaştırma ve rahatlatma katsayısı tercihleri aynı değerler olarak tercih edilmiştir.

#### 4.2.3 Karşılaştırma

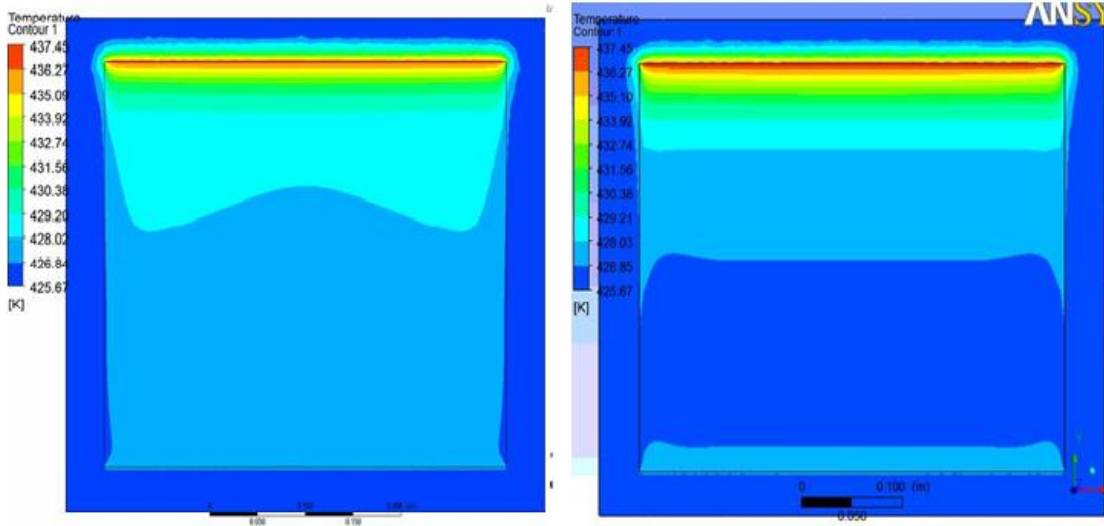
İnceleme esnasında kullanılan kapalı hacim için sayısal çalışma esnasında alt ve üst ısıtıcıların bulunduğu yüzeyler için deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama yüzey sıcaklıkları zamana bağlı olarak her bir adım için kullanıcı tarafından tanımlanan fonksiyon (UDF) olarak tanımlanmıştır. Yalıtımla kaviteyi birleştiren yüzeyleri birbirine bağlayan sınır koşulu olan ‘coupled’ sınır koşulu verilmiştir. Dış yalıtım yüzeyine ise oda koşullarında ve durgun halde bulunan hava için taşınım sınır şartı belirlenmiştir. Sayısal yöntem sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırması amacıyla merkez kavite sıcaklarının sapması aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Sayısal hesaplamalarla deneysel sonuç arasında karşılaştırma.

Sayısal sonuçlarla deneysel sonuç karşılaştırıldığında, DO yöntemiyle elde edilen sonucun S2S yöntemiyle elde edilen sonuca göre deneysel veriye daha uyumlu olduğu söylenebilir. Bu sapma DO yönteminde en yüksek % 4,3 olurken, S2S yönteminde ise % 5,9 mertebesindedir. DO yönteminde merkez kavite sıcaklığının S2S yöntemine göre daha yüksek olması gaz ışınlımının hesaplamalara kaynak olarak eklenmesinden kaynaklanmaktadır. Zira, yüzeylerden yayılan enerji taşıyan ışınım demetleri, gaz ortamında enerjilerinin bir miktarı gaz ortamı tarafından

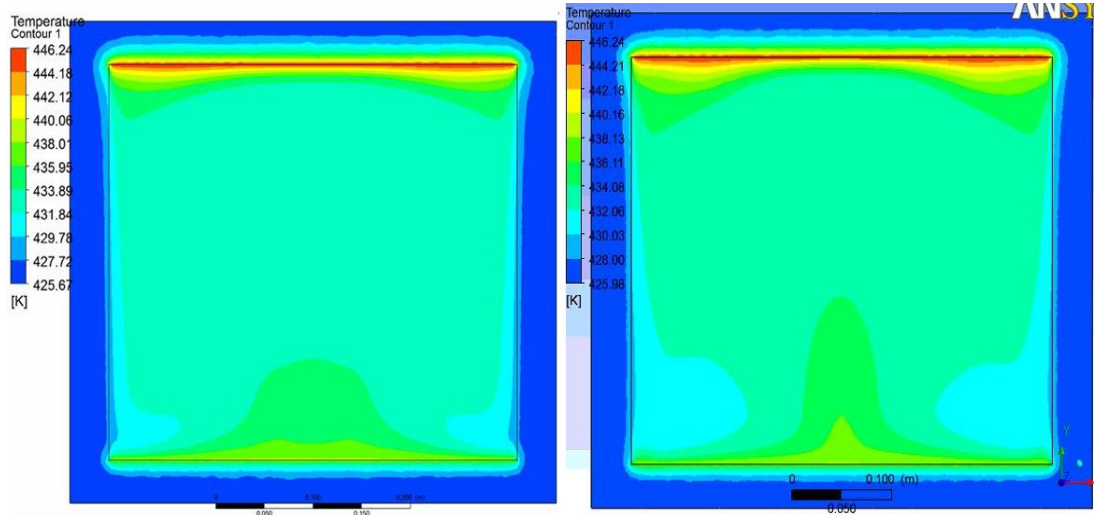
yutulmaktadır. Yutulan ışınım enerjisi, gaz ortamının sıcaklığının yükselmesine sebebiyet vermektedir. Sayısal çözümlerden elde edilen sıcaklık dağılımları incelenecek olursa bu etki daha iyi anlaşılacaktır. Şekil 4.7’de sayısal çözümlere başladıktan 120 s sonra akış alanına ait sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



**Şekil 4.7 :** DO – S2S yöntemi sıcaklık dağılımı karşılaştırma t=120 s.

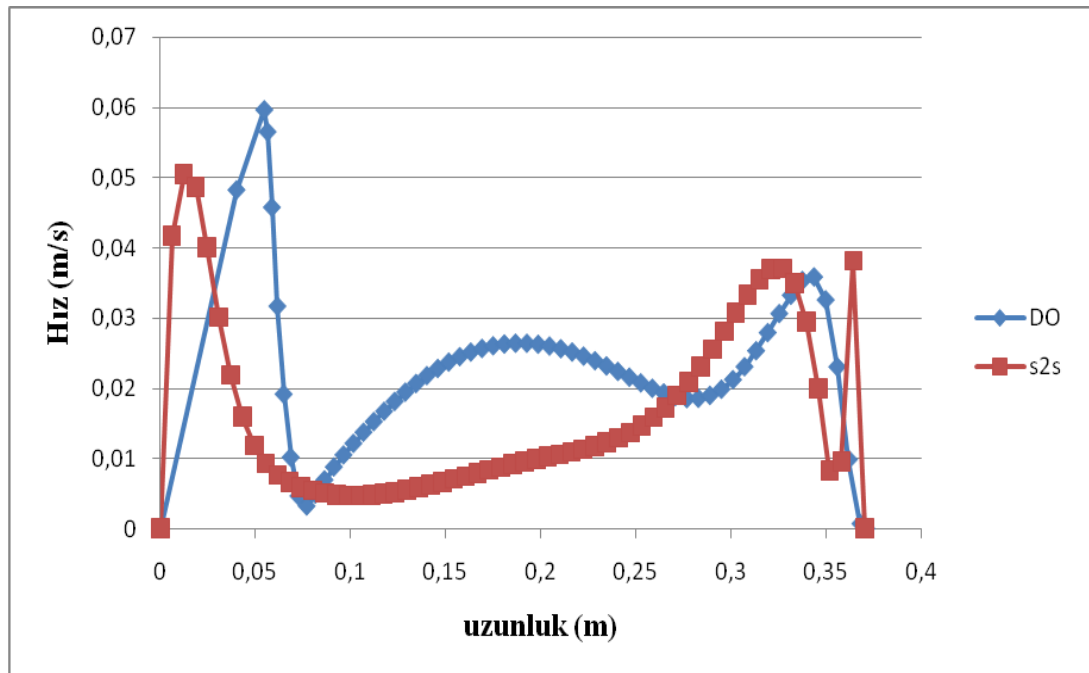
Çözölmeye başlanan 120. Saniyeden itibaren elde edilen sonuçlar incelendiğinde DO yönteminde homojene daha yakın bir sonuç elde edilmektedir. Bununla beraber S2S yöntemiyle elde edilen sonuçta özellikle alt-orta bölgede bir sıcaklık düşümü meydana gelse de bu sonuç fiziksel gerçeklikten uzaktır. Akışın gelişmesiyle birlikte t=300 s’de ise bu etki benzer şekilde görölmeye devam etmektedir. S2S çözümlerinde ise simetrik eksenden yukarıya doğru yükselen bir gaz sütunu dikkat çekmektedir. Sıcaklık gradyeni bu bölgede yerel olarak yüksek mertebelere çıkmakta ve kaldırma kuvvetlerinde ani artışlara sebebiyet vermektedir (Şekil 4.8).

Do yöntemiyle elde edilen sonuçlar göstermektedir ki hacmi dolduran gaz kütesinin ışınımı emen özelliğinin hesaplamalara dahil edilmesi, gaz kütesinin iç enerjisinde artışa sebebiyet vermektedir. Bu artışın hız vektörlerine olan etkisini görmek de kaçınılmaz olacaktır.



Şekil 4.8 : DO – S2S yöntemi sıcaklık dağılımı karşılaştırma t=300 s.

Dikey simetri ekseninin duvara 5 cm uzaklığında doğru boyunca elde edilen hız vektörlerinin büyüklükleri DO ve S2S sonuçları üzerinden karşılaştırıldığında bu etki göze çarpacaktır.



Şekil 4.9 : DO – S2S yöntemleri x=0.05 m hız bileşenleri karşılaştırması.

Şekilden de anlaşıldığı gibi DO yöntemi ile elde edilen sonuçların S2S yöntemiyle elde edilen sonuçlara göre hız bileşenlerinde gözle görülür bir artış söz konusudur.

Sonuç olarak DO yöntemiyle elde edilen sonuçların kapalı bir hacim içerisinde yer alan gaz kütlesi modellemek amacıyla kullanılmasının S2S yöntemine göre daha

gerçekçi sonuçlar verdiği görülmektedir. Gaz kütlesinin ışınmı yutan karakteristiğinin hesaba katılması akış alanını homojenleştirirken, sadece yüzey ışınmı gözetilerek yapılan bir çözümlenin bu etkiyi hesaba katmayarak olayın fiziğine uymayan sıcaklık gradyanlarına sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır. DO sayısal çözümlerinin gaz ışınmını hesaba katması, akış alanının hız vektörlerine de etkide bulunarak daha yüksek hız vektörleri elde edilmesine ve türbülanslı kinetik enerjide artışa yol açmaktadır. Son olarak, çözüm esnasında herhangi bir derişiklik alanı dağılımının göz önüne alınmaması nedeniyle derişiklik hacim boyunca sabit kalmıştır. Bu etki göz önüne alınarak yapılması gereken bir çözümlerde (örneğin tez çalışmasında incelenen kapalı hacim içerisinde pişirme) DO yöntemiyle alınacak sonuçların daha gerçekçi olacağı öngörülebilir.



## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışması, kapalı hacimler içerisindeki ışınlama ısı geçişi mekanizması ile ilgili olarak yapılmış olup bu kapsamda ele alınan konular şu şekilde özetlenebilir:

- Mevcut fırın içerisinde boş hal için yüzey ışınlama incelemesi
- Mevcut fırın içerisinde yüklü (tuğlalı) hal için yüzey ışınlama incelemesi
- Kavite hacminin değiştirilmesinin enerji tüketimi ve ışınlama etkinliğine olan etkisi
- Yük konumunun değiştirilmesinin tuğla yüzeylerine düşen ışınlama akılarına ve dolayısıyla enerji tüketimine etkisi
- Fırın iç kavitesinde kullanılan malzemenin düşük yama oranına sahip olması sonucu enerji tüketimi ve tuğla üzerine düşen ışınlama etkinliğine olan etkisi
- Kavite yüzeyleri farklı yama katsayılarına sahip hibrid tasarımlar üzerinde yapılan incelemeler
- Kavite hacmi içerisinde yer alan nemli havanın gaz ışınlama olan etkisi
- Gaz ışınlama dair geliştirilen DO sayısal modellemesinin nemli bir ortam için yüzey ışınlama çözümlemesi olan S2S modeliyle olan karşılaştırması

Çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar ise şu şekilde özetlenebilir:

- Özgün fırın içerisinde yapılan yüzey ışınlama incelemelerine göre fırın içerisindeki yüzey ışınlama ön ısıtma evresi boyunca baskın bir mekanizma olarak işlev görmektedir. Sıcaklık gradyanlarının azalmaya başladığı ve homojen sıcaklık dağılımının oluşmaya başladığı çevrim evresi boyunca ise

fırın merkezi içerisindeki nem miktarı artış göstermekte ve dolayısıyla gaz ışımasını mekanizması etkin olmaya başlamaktadır.

- Proje kapsamında kavite iç hacminde yapılan değişik kavite yüksekliğinin artırılmasına yönelik olmakla birlikte enerji tüketiminde bir miktar artışa yol açmaktadır. Bununla birlikte ısıtıcı ve tuğla yüzeyleri arasındaki şekil faktörü etkileşimini artırmak amacıyla yüksekliğin azaltıldığı bir tasarımın daha etkin olabileceği düşünülmektedir.
- Kavite yüksekliğinde yapılacak değişikliklerin doğal taşınımına olan etkileri ayrı bir çalışma kapsamında incelenebilir.
- Yük konumunda yaşanan değişiklikler tuğla yüzeylerine düşen ışıma akımlarında artışa sebebiyet vererek pişirmenin daha kısa sürede olmasını sağlamak ve dolayısıyla enerji tüketimini düşürmektedir. Bununla birlikte yüzeylere düşen ışıma şiddeti arasındaki düzensizlik gerçek yiyeceklerin kullanılması durumunda yiyecek yüzeylerinin homojen olmayan şekilde pişmesine sebebiyet verebilir.
- Kavite iç yüzeylerinin yama katsayısının düşürülmesi yüzey sıcaklıklarının ve dolayısıyla sıcaklık gradyanlarının düşmesini sağlayarak ısı kayıplarının düşmesine yol açmaktadır. Bu sayede enerji tüketimi ve pişirme süresinde azalma sağlamaktadır.
- Düşük yama katsayısına sahip fırın ısı kayıpları azaltmakla birlikte ışıma yayan yüzeyler ısıyı kavite merkezine yönlendirmekte güçlük çekmektedir. Tez çalışması kapsamında düşük yama katsayısına sahip fırın kavramı eleştirel olarak ele alınmış olup ısıtıcı yüzeylerin yüksek yama katsayısına, ışıma alan yüzeylerin ise düşük yama katsayısına sahip olduğu hibrid tasarımlar önerilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar bu sayede enerji tüketiminin daha da iyileştirilebileceğini göstermektedir.
- Yüzey ışımasını incelemelerinde iletimle ısı geçişi (levha kalınlığı) da göz önüne alınmalıdır.

- Kavite duvarları içerisinde v-oluklu yüzey kullanımı geri yansımayla kaybedilen ışınım akılarının kavite hacmi içerisinde tutularak ısı kayıplarının azalmasını sağlamaktadır. Bu sayede enerji tüketiminde tasarruf elde edilmektedir.
- Fırın kavitesi içerisinde yer alan nemli ortamın gaz ışınımına katkısı ihmal edilemez mertebededir.
- Gaz ışınımını göz önüne alan sayısal modellemelerle (DO) sadece yüzey ışınımını göz önüne alan (S2S) sayısal modellemelerden daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Akış alanı ve sıcaklık dağılımı incelendiğinde gaz ışınımını göz önüne alan modeller problemin fiziğini daha iyi yansıtmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Gabriel N. S. ve Bruno K.** (1995). Line-by-line calculations of the absorption of infrared radiation by water vapor in a box shaped enclosure filled with humid air'', *Int. Journal of Heat Mass Transfer*. Cilt. 38, no. 17, Sf, 3127- 3134.
- [2] **Hottel, H.C.** (1954). Radiant Heat Transmission, in William H. McAdams (ed), 'Heat Transmission'', McGraw-Hill, New York.
- [3] **Gebhart, B.** (1965). Surface Temperature Calculations in Radiant Surroundings of Arbitrary Complexity- for Gray, Diffuse Radiation, *Int. Journal of Heat Mass Transfer*. Cilt. 3, no. 4, Sf, 341-346.
- [4] **Opfenheim, A. K.** (1956). Radiation Analysis by the Network Method Transactions of ASME, *Journal of Heat Transfer*, Cilt. 78, Sf. 725-735.
- [5] **Eder T. ve diğ.** (2012). A novel estimation of electrical and cooling losses in electric arc furnaces, *Energy* Cilt: 42, Sf: 712-725.
- [6] **Reddy K. S., Sendhil K. N.** (2008). Combined laminar natural convection and surface radiation heat transfer in a modified cavity receiver of solar parabolic dish, *International Journal of Thermal Sciences* 47, Sf 1647–1657.
- [7] **Guillem C. R.** (2006). Numerical methods for radiative heat transfer, Doktora Tezi, Terrassa, Haziran.
- [8] **Coelho P. J.** (2005). Fundamentals of a new method for the solution of the radiative transfer equation, *International Journal of Thermal Sciences* Cilt: 44, Sf: 809–821.
- [9] **Carlson, B. G, Lathrop, K. D.** (1993) Transport theory—the method of discrete ordinates. In: Greenspan H, Kelber CN, Okrent D, editors. Computing methods in reactor physics. London: Gordon and Breach;. Sf. 165–266.
- [10] **Fiveland, W.A.** (1982). A discrete-ordinates method for predicting radiative heat transfer in axisymmetric enclosure. ASME 82-HT-20.
- [11] **Jamaluddin, A. S ve Smith, P. J.** (1988). Predicting radiative transfer in axisymmetric cylindrical enclosures using the discrete ordinates method. *Combust Sci Tech*, Cilt 62, Sf:173–86.
- [12] **Baek, S. W, Kim, T. Y, Lee JS.** (1993). Transient cooling of a finite cylindrical medium in the rared cold environment, *Int J Heat Mass Transfer*, ; cilt 36 Sf:3949–56.

- [13] **Sakami M. ve A. Charette** (1998). Radiative Heat Transfer In Three-Dimensional Enclosures Of Complex Geometry By Using The Discrete-Ordinates Method, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* Cilt. 59, No. L/2, Sf. 117-136.
- [14] **Selcuk N. ve Kayakol N.** (1997) Evaluation Of Discrete Ordinates Method For Radiative Transfer In Rectangular Furnaces , *Int. Journal Of Heat Mass Transfer*. Cilt. 40, No. 2, Sf, 213- 222.
- [15] **Howell, John R.** (1968), Application of Monte Carlo to Heat Transfer Problems, *Advances in Heat Transfer*, Cilt. 5, J. P. Harnett and T. Irvine, eds., Academic Press, San Diego, Sf. 1-54.
- [16] **Mirhosseini M. ve A. Saboonchi** (2011). View factor calculation using the Monte Carlo method for a 3D strip element to circular cylinder, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Cilt 38, 821–826.
- [17] **Maltby, J. D., ve Burns, P. J.** (1991), Performance, Accuracy, and Convergence in a Three-Dimensional Monte Carlo Radiative Heat Transfer Simulation, *Numer. Heat Transfer, Part B*, Cilt. 19, Sf. 191-209.
- [18] **Palmer, Bruce J., Drost, M. Kevin, and Welty, James R.** (1996), Monte Carlo Simulation of Radiative Heat Transfer in Arrays of Fixed Discrete Surfaces Using Cell-to-Cell Photon Transport, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Cilt. 39, No. 13, Sf. 2811-2819.
- [19] **Franca, F., Morales, J. C, Oguma, M., and Howell, J. R.** (1997). Inverse Design of Engineering Systems Dominated by Radiative Transfer," *Radiative Transfer II: Proc. Second Int. Symp. on Radiative Heat Trans..* M. Pinar Menguc, ed., Begell House, New York.
- [20] **Arambakam, R., Hosseini, S.A., Tafreshi, H. V., Pourdeyhimi, B.,** (2011). Monte Carlo simulation of radiative heat through fibrous media: Effects of boundary conditions and microstructural parameters, *International Journal of Thermal Sciences*, Cilt.50, Sf: 935-941.
- [21] **Tahir M. A, Vahedi Tafreshi H., Hosseini S.A, Pourdeyhimi B.** (2010). Modeling the role of microstructural parameters in radiative heat transfer through disordered fibrous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt 53, Sf: 4629–4637.
- [22] **Milandri A., Asllanaj F., Jeandel G., Roche J. R.** (2002). Heat transfer by radiation and conduction in fibrous media without axial symmetry, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 74, Sf: 585–603.
- [23] **Shaughnessy, B. M, Newborough, M.** (2010). Energy performance of a low-emissivity electrically heated oven, *Applied Thermal Engineering*, Cilt 20, Sf. 813-830.
- [24] **Chhanwal N., Anishaparvin A., Indrani D., Raghavarao K.S., Anandharamakrishnal C.** (2010). Computational fluid dynamics (CFD) modeling of an electrical heating oven for bread-baking process, *Journal of Food Engineering* 100, Sf:452–460.

- [25] **Hollands, F. C** (1963). Directional selectivity, emittance, and absorptance properties of v-corrugated specular surfaces, *Solar Energy*, Cilt. 7, no. 3, Sf. 108-116.
- [26] **Kayhan, S.A** , (2011). Nemli Havanın Isıtıldığı Hacimlerde Isı ve Kütle Hareketlerinin Havalandırma ile Optimizasyonu, Doktora tezi, Seyhan Uygur Onbaşıoğlu yürütücülüğünde, İTÜ Makine Fakültesi.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Özgür IŞIK

**Doğum Yeri ve Tarihi:** 19.06.1988 / İSTANBUL - KADIKÖY

**Adres:** Ömer Paşa Cad. Abdülhalik Renda Sok. Ersöz Ap. No:22/2 ERENKÖY  
İSTANBUL

**E-Posta:** isikozg@itu.edu.tr

**Lisans:** İ.T.Ü Makina Mühendisliği – 2011

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Temel O., **İsik O.**, Onbaşıoğlu S. U., Developing A New Design To Improve Radiation Heat Transfer In An Oven-Like Cavity, Heat Transfer Fluid Dynamics And Thermodynamics (HEFAT), Malta, 2012
- **İsik O.**, Temel O., Celik A., Sari T., Onbasioglu S. U., Investigation Of Different Wall Profiles On Energy Consumption And Baking Time In Domestic Oven, EPJ Web Of Conferences, Cilt 45, 2013, Doi: [Http://Dx.Doi.Org/10.1051/Epjconf/20134501044](http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134501044)
- Sari T., Celik A., **Isik O.**, Temel O., Onbasioglu S. U. , Effects Of Insulation Parameters On The Energy Consumption In Domestic Ovens And The Most Efficient Insulation Design, Cilt 45, 2013, Doi :[Http://Dx.Doi.Org/10.1051/Epjconf/20134501019](http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134501019)
- **İsik O.** , Temel O., Onbasioglu S. U., Experimental And Numerical Investigation Of Coupled Heat And Mass Transport In A Participating Medium, Proceedings Of The 7th International Symposium On Radiative Transfer, RAD-13, June 2-8, 2013, Kuşadası, Turkey