

**YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNDÜKSİYONLU AKIŞKAN ISITICILARDA AKIŞ PARAMETRELERİNİN  
ISITICI VERİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet YÜKSEL**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı**

**EYLÜL 2016**



**YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNDÜKSİYONLU AKIŞKAN ISITICILARDA AKIŞ PARAMETRELERİNİN  
ISITICI VERİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet YÜKSEL**

**145103002**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ümit ÜNVER**

**EYLÜL 2016**



YALOVA Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 145103002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet YÜKSEL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**İNDÜKSİYONLU AKIŞKAN ISITICILARDA AKIŞ PARAMETRELERİNİN ISITICI VERİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** Yrd. Doç. Dr. Ümit ÜNVER  
Yalova Üniversitesi



**Jüri Üyeleri :** Yrd. Doç. Dr. Ümit ÜNVER  
Yalova Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Mehmet DİREK  
Yalova Üniversitesi  
Prof. Dr. Ömer KAYNAKLI  
Uludağ Üniversitesi



**Teslim Tarihi :** 26 Ağustos 2016

**Savunma Tarihi :** 28 Eylül 2016



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitiminin boyunca yol gösteren ve teşvik eden danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ümit ÜNVER'e ve eş danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. H. Murat ÜNVER'e tez çalışmamda vermiş oldukları destek ve yardımlarından dolayı şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın hazırlanması esnasında maddi-manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve her zaman destekleriyle yanımda olan başta babam ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Fikret YÜKSEL olmak üzere sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans tez çalışmam sürecinde beni destekleyen Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü hocalarıma ve Enerji Sistemleri Mühendisi Alper KELEŞOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir.

Eylül 2016

Ahmet YÜKSEL  
(Makine Mühendisi)





## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xix</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xx</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 İndüksiyonlu Isıtıcıların Tarihçesi ve Literatür Araştırması .....	2
1.2 Tezin Amacı .....	8
1.3 İndüksiyonlu Hava Isıtıcılarının Çalışma Prensibi.....	9
1.3.1 Elektromanyetik indüksiyon .....	9
1.3.2 Dalma derinliği (Deri etkisi) .....	10
1.3.3 İndüksiyonlu ısıtıcılarda enerji dağılımı .....	11
1.3.4 İndüksiyonlu ısıtıcılarda ısı transferi mekanizmaları .....	12
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>13</b>
2.1 İndüksiyonlu Hava Isıtma Sisteminin Teorik Analizi .....	14
2.2 İndüksiyonlu Hava Isıtma Sisteminin COMSOL Programı Analizi .....	19
2.2.1 Sonlu hacimler yöntemi ve HAD programlarının çalışma algoritması.....	19
2.2.2 İndüksiyonlu hava ısıtıcısında COMSOL simülasyon tekniği adımları....	22
2.3 Belirsizlik Analizi.....	27
<b>3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>29</b>
3.1 İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Deneysel Sistemi ve Ölçüm Aletleri .....	30
3.2 K-1 Tipi İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Bulguları ve Analizi .....	34
3.2.1 K-1 prototipi COMSOL analizi.....	38
3.3 K-2 Tipi İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Bulguları ve Analizi .....	42

3.3.1 K-2 prototipi COMSOL analizi.....	48
3.4 K-3 Tipi İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Bulguları ve Analizi .....	55
3.4.1 K-3 prototipi COMSOL analizi.....	61
3.5 K-4 Tipi İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Bulguları ve Analizi .....	67
3.5.1 K-4 prototipi COMSOL analizi.....	72
3.6 İndüksiyonlu Hava Isıtıcısında Akış Parametrelerinin Genel Etkisi.....	79
3.7 İndüksiyonlu Hava Isıtıcısında Belirsizlik Analizi.....	84
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>87</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>91</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>99</b>



## KISALTMALAR

<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>3D</b>	: Üç Boyut
<b>K-0</b>	: 45 mm çıkış çapına sahip stub-end
<b>K-1</b>	: 60 mm çıkış çapına sahip stub-end
<b>K-2</b>	: 90 mm çıkış çapına sahip konik redüksiyon
<b>K-3</b>	: 114 mm çıkış çapına sahip konsantrik redüksiyon
<b>K-4</b>	: Kovandan Doğrudan Çıkış





## SEMBOL LİSTESİ

$\varepsilon$	: Yüzeyin Yayıcılığı
$\dot{Q}_{hava}$	: Havaya Aktarılan Isıl Güç
$\dot{Q}_m$	: Malzemede Isıya Dönüşen Güç Miktarı
$\dot{Q}_{taşınım}$	: Doğal Taşınım İle Isı Transferi
$\dot{Q}_{ışınım}$	: Işınım İle Isı Transferi
$\dot{Q}$	: Isı Akısı
$\mu_r$	: Malzemenin Manyetik Geçirgenliği
$A$	: Havanın Geçtiği Kesit Alanı
$A_s$	: Isı Transferi Yüzey Alanı
$C_D$	: Boşaltma Kayıp Katsayısı
$c_p$	: Özgül Isı
$D$	: Çap
$dE_{sis}$	: Sistemdeki Enerji Değişimi
$e$	: Malzemede İndüklenen Gerilim
$E_i$	: Sisteme Giren Enerji
$E_{ind}$	: İndüksiyon ile Sisteme Giren Enerji
$E_o$	: Sistemden Çıkan Enerji
$f$	: Sürtünme Faktörü
$f_a$	: Frekans
$g$	: Yerçekimi İvmesi
$h$	: Isı Taşınım Katsayısı
$I$	: Akım
$k$	: Isı İletimi Katsayısı
$L$	: Uzunluk
$\dot{m}$	: Kütleli Debi
$N$	: Bobin Sargı Sayısı
$Nu$	: Nusselt Sayısı
$P_{bobin}$	: Bobinden Alınan Güç
$P_d$	: Malzemenin Özdirenci
$P_{DL}$	: Boşaltma Kaybı
$P_{el}$	: Elektrik Gücü
$P_{K,s}$	: Sürtünme Yük Kaybı
$P_{K,y}$	: Yerel Yük Kaybı
$P_{KE}$	: Kinetik Enerji
$Pr$	: Prandtl Sayısı
$P_{şebeke}$	: Şebekeden Alınan Güç
$Ra_D$	: Rayleigh Sayısı
$R_{eş}$	: Eşdeğer Direnç
$t$	: Zaman
$T_ç$	: Ortam Sıcaklığı veya Havanın Sisteme Giriş Sıcaklığı

$T_o$	: Havanın Sistemden Çıkış Sıcaklığı
$T_s$	: Yüzey Sıcaklığı
$V$	: Gerilim
$\nu$	: Kinematik Vizkozite
$V_i$	: Havanın Sisteme Giriş Hızı
$V_o$	: Havanın Sistemden Çıkış Hızı
$\beta$	: Hacimsel Genleşme Katsayısı
$\delta$	: Dalma Derinliği
$\eta_{el}$	: Elektriksel Verim
$\eta_I$	: I. Kanun Verimi
$\eta_{termal}$	: Termal Verim
$\rho_{hava}$	: Havanın Yoğunluğu
$\sigma$	: Stefan-Boltzman Sabiti



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Simülasyonda kullanılan materyallerin özellikleri .....	24
Çizelge 2.2 : Ağ yapısının özellikleri .....	26
Çizelge 3.1 : Bobin ve cam elyafın spir özellikleri .....	32
Çizelge 3.2 : Ölçü aletlerinin özellikleri ve hassasiyetleri .....	33
Çizelge 3.3 : K-1 prototipi deney sonuçları .....	36
Çizelge 3.4 : K-1 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı analiz sonuçları .....	36
Çizelge 3.5 : K-0 ve K-1 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı parametreleri.. .....	37
Çizelge 3.6 : K-2 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısından elde edilen deneysel veriler..	44
Çizelge 3.7 : K-2 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı analiz sonuçları .....	45
Çizelge 3.8 : Yalıtımsız K-1 ve K-2 prototiplerinden elde edilen deney parametreleri. .....	48
Çizelge 3.9 : K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı deney verileri. ....	56
Çizelge 3.10 : K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının analiz sonuçları. ....	57
Çizelge 3.11 : K-2 ve K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcıları parametreleri.....	58
Çizelge 3.12 : K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı deney verileri. ....	68
Çizelge 3.13 : K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı analiz sonuçları .....	69
Çizelge 3.14 : K-3 ve K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı parametreleri .....	70
Çizelge 3.15 : K tipi ısıtıcıların ısı verimlerinde ki belirsizlik oranları.....	85
Çizelge 4.1 : K tipi indüksiyonlu hava ısıtıcılarından elde edilen sonuçlar .....	87





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : 3 diskli prototipe ait 3D model, Ünver (2016)'dan uyarlanmıştır.....	7
Şekil 1.2 : Elektromanyetik indüksiyonun çalışma prensibi, Çetin (2005)'den uyarlanmıştır.....	10
Şekil 1.3 : Histerezis kayıpları, Haimbaugh (2001)'den uyarlanmıştır. ....	12
Şekil 2.1 : İndüksiyonlu hava ısıtıcının şematik görünümü.....	13
Şekil 2.2 : İndüksiyonlu hava ısıtıcının şematik sistem görünümü. ....	13
Şekil 2.3 : HAD basamakları, Duygu (2014)'ten uyarlanmıştır. ....	20
Şekil 2.4 : Geometrinin aksisimetrik boyuta indirgenmesi.....	22
Şekil 2.5 : İndüksiyonlu hava ısıtıcısının geometrisi.....	23
Şekil 2.6 : İndüksiyonlu ısıtıcı modelinin seçilen giriş şartları görüntüsü. ....	24
Şekil 2.7 : İndüksiyonlu ısıtıcı modelinin seçilen çıkış şartları görüntüsü. ....	25
Şekil 2.8 : Çıkış kesitine ait ağ (mesh) yapısı.....	26
Şekil 3.1 : K-1 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı deney sistemi görüntüsü.....	31
Şekil 3.2 : K-1 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı görüntüsü. ....	31
Şekil 3.3 : (a) Termometre. (b) Anemometre (c) Termal Kamera (d) Pensampermetre.....	32
Şekil 3.4 : K-1 prototipinin çıkış kapağı görüntüsü.....	35
Şekil 3.5 : Akış düzeltici konik plaka. ....	35
Şekil 3.6 : Geçici rejimde K-1 prototipinden havanın çıkış sıcaklıkları.....	35
Şekil 3.7 : K-0 ve K-1 prototiplerinde doğal taşınım ve ışınım ile ısı kayıpları.....	38
Şekil 3.8 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının çıkış hız profili. ....	38
Şekil 3.9 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının çıkış sıcaklık profili. ....	39
Şekil 3.10 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının iç cidarında oluşan sıcaklık dağılımı. ....	39
Şekil 3.11 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcı cidarının hız akım çizgileri.....	40
Şekil 3.12 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının hız konturu.....	40
Şekil 3.13 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının sıcaklık konturu.....	41
Şekil 3.14 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının basınç konturu.....	41

<b>Şekil 3.15</b> : COMSOL ve termal kamera ile elde edilen dış cidar sıcaklık dağılımları. ....	42
<b>Şekil 3.16</b> : K-2 prototipinin çıkış kapağı (konik redüksiyon) görüntüsü. ....	43
<b>Şekil 3.17</b> : K-2 prototipinin sürekli rejim şartlarındaki örnek termal kamera görüntüsü. ....	43
<b>Şekil 3.18</b> : K-2 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısından elde edilen güç değerleri. ....	46
<b>Şekil 3.19</b> : K-2 prototipinde sürtünme ve kinetik enerji değişiminden kaynaklanan kayıplar. ....	46
<b>Şekil 3.20</b> : K-2 prototipinde doğal taşınım ve ışınım ile meydana gelen ısı kayıpları. ....	47
<b>Şekil 3.21</b> : Yalıtımsız K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız profili. ....	48
<b>Şekil 3.22</b> : Yalıtımlı K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız profili. ....	49
<b>Şekil 3.23</b> : Yalıtımsız K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu. ....	49
<b>Şekil 3.24</b> : Yalıtımlı K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu. ....	50
<b>Şekil 3.25</b> : Yalıtımsız K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız akım çizgileri. ....	50
<b>Şekil 3.26</b> : Yalıtımlı K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız akım çizgileri. ....	51
<b>Şekil 3.27</b> : Yalıtımsız K-2 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili. ....	51
<b>Şekil 3.28</b> : Yalıtımlı K-2 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili. ....	52
<b>Şekil 3.29</b> : Yalıtımsız K-2 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu. ....	52
<b>Şekil 3.30</b> : Yalıtımlı K-2 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu. ....	53
<b>Şekil 3.31</b> : Yalıtımsız K-2 prototipinden iç cidar sıcaklık dağılımı. ....	53
<b>Şekil 3.32</b> : Yalıtımlı K-2 prototipinden iç cidar sıcaklık dağılımı. ....	54
<b>Şekil 3.33</b> : Yalıtımsız K-2 prototipinde basınç konturu. ....	54
<b>Şekil 3.34</b> : Yalıtımlı K-2 prototipinde basınç konturu. ....	55
<b>Şekil 3.35</b> : K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının çıkış kapağı (konsantrik redüksiyon) görüntüsü. ....	55
<b>Şekil 3.36</b> : K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının sürekli rejim şartlarındaki örnek termal kamera görüntüsü. ....	56
<b>Şekil 3.37</b> : K-2 ve K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcılarında ısıl güç değerleri. ....	59
<b>Şekil 3.38</b> : K-2 ve K-3 tipi yalıtımsız sistemlerde doğal taşınım ve ışınım kaybı. ..	60
<b>Şekil 3.39</b> : K-2 ve K-3 tipi yalıtımlı sistemlerde doğal taşınım ve ışınım kaybı. ....	60
<b>Şekil 3.40</b> : Yalıtımsız K-3 tipi ısıtıcının çıkış hız profili. ....	61
<b>Şekil 3.41</b> : Yalıtımlı K-3 tipi ısıtıcının çıkış hız profili. ....	61
<b>Şekil 3.42</b> : Yalıtımsız K-3 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu. ....	62
<b>Şekil 3.43</b> : Yalıtımlı K-3 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu. ....	62
<b>Şekil 3.44</b> : Yalıtımsız K-3 tipi ısıtıcıdan geçen havanın hız akım çizgileri. ....	63
<b>Şekil 3.45</b> : Yalıtımlı K-3 tipi ısıtıcıdan geçen havanın hız akım çizgileri. ....	63

Şekil 3.46 : Yalıtımsız K-3 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.....	64
Şekil 3.47 : Yalıtımlı K-3 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.....	64
Şekil 3.48 : Yalıtımsız K-3 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu. ....	65
Şekil 3.49 : Yalıtımlı K-3 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu.....	65
Şekil 3.50 : Yalıtımsız K-3 prototipinde iç cidar sıcaklık dağılımı. ....	66
Şekil 3.51 : Yalıtımlı K-3 prototipinde iç cidar sıcaklık dağılımı. ....	66
Şekil 3.52 : Yalıtımsız K-3 prototipinde basınç konturu. ....	67
Şekil 3.53 : Yalıtımlı K-3 prototipinde basınç konturu. ....	67
Şekil 3.54 : K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının sürekli rejim şartlarındaki örnek termal kamera görüntüsü. ....	68
Şekil 3.55 : K-3 ve K-4 tipi yalıtımsız ısıtıcılarda doğal taşınım ve ışınm kayıpları. ....	71
Şekil 3.56 : K-3 ve K-4 tipi yalıtımlı ısıtıcılarda doğal taşınım ve ışınm kayıpları. ....	72
Şekil 3.57 : Yalıtımsız K-4 tipi ısıtıcının çıkış hız profili. ....	72
Şekil 3.58 : Yalıtımlı K-4 tipi ısıtıcının çıkış hız profili.....	73
Şekil 3.59 : Yalıtımsız K-4 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu. ....	73
Şekil 3.60 : Yalıtımlı K-4 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu. ....	74
Şekil 3.61 : Yalıtımsız K-4 tipi ısıtıcıda havanın çıkış hız akım çizgileri. ....	74
Şekil 3.62 : Yalıtımlı K-4 tipi ısıtıcıda havanın çıkış hız akım çizgileri. ....	75
Şekil 3.63 : Yalıtımsız K-4 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.....	75
Şekil 3.64 : Yalıtımlı K-4 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.....	76
Şekil 3.65 : Yalıtımsız K-4 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu. ....	76
Şekil 3.66 : Yalıtımlı K-4 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu.....	77
Şekil 3.67 : Yalıtımsız K-4 prototipinde iç cidar sıcaklık dağılımı. ....	77
Şekil 3.68 : Yalıtımlı K-4 prototipinde iç cidar sıcaklık dağılımı. ....	78
Şekil 3.69 : Yalıtımsız K-4 prototipinde basınç konturu. ....	78
Şekil 3.70 : Yalıtımlı K-4 prototipinde basınç konturu. ....	79
Şekil 3.71 : Protokol çalışmasında havanın çıkış sıcaklıkları.....	80
Şekil 3.72 : Yalıtımsız prototiplerde debi ve hava çıkış sıcaklığı ilişkisi.....	80
Şekil 3.73 : K-3 sisteminin yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarında havanın çıkış sıcaklığı. ....	81
Şekil 3.74 : K tipi indüksiyonlu hava ısıtıcılarında doğal taşınım ve ışınm kayıpları. ....	82
Şekil 3.75 : K-2, K-3 ve K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcılarında kinetik enerji değişimleri ve süretünme kayıpları. ....	83
Şekil 3.76 : K tipi indüksiyonlu hava ısıtma sistemleri termal verim ifadeleri. ....	84



## İNDÜKSİYONLU AKIŞKAN ISITICILARDA AKIŞ PARAMETRELERİNİN ISITICI VERİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

### ÖZET

Isıtma işlemleri, günlük yaşamda ve endüstride yaygın olarak kullanılan uygulamaların içerisinde yer almaktadır. Konfor şartlarını sağlamak ve metallerin işlenmesini kolaylaştırmak gibi çeşitli sektörlerde bu tür uygulamalardan faydalanılmaktadır. Metal işlemeden, akışkan ısıtmaya kadar geniş uygulama alanı olan elektromanyetik indüksiyon da bu uygulamalardan birisidir. İndüksiyonlu hava ısıtma sistemi hastanelerde, seralarda vb. diğer şartlandırılmış hava gereksinimi olan yerlerin ihtiyacını karşılaması için tasarlanmış, yeni ve inovatif bir teknolojidir.

Bu tez çalışmasında; indüksiyonlu hava ısıtma sisteminin enerji performansını belirlemek üzere termodinamik analizler yapılmıştır. Havanın iş akışkanı olarak kullanıldığı sistemde, ısı kayıplarının en aza indirilmesi ve ısıl verimin artırılması hedeflenmiştir. Analizlerde termodinamiğin I. kanunu kullanılmıştır. Deneysel bulgu doğruluklarının belirlenmesinde, COMSOL programı ve belirsizlik analizlerine başvurulmuştur.

Kullanılan prototiplerde, çıkış kesit çapı ve debideki artış ile toplam enerji kayıplarının ve havanın çıkış sıcaklığının azaldığı, ısıl verimin arttığı gözlemlenmiştir. Prototiplerin yalıtımlı durumları da değerlendirilmiş ve yalıtımlı prototiplerin veriminde artış gözlemlenmiştir. Bulgulara göre en yüksek ısıl verim, çıkış kesit çapının ve debinin en yüksek olduğu, yalıtımlı K-4 prototipde elde edilmiştir (%95,49). En yüksek hava çıkış sıcaklığı (95,4°C) ise; en küçük çıkış kesit çapına sahip yalıtımlı K-3 prototipine en düşük debinin uygulandığı deneyde elde edilmiştir.

## **INVESTIGATION OF THE EFFECTS ON HEATING EFFICIENCY OF FLOW PARAMETERS IN INDUCTION FLUID HEATER**

### **SUMMARY**

Heating operation is located in the applications which are widely used in daily life and industry. In various industries as to ensure comfort conditions and to facilitate the processing of metals is utilized from these types of applications. From metal processing to fluid heating, electromagnetic induction heating has a wide application range. Induction air heating system is designed to meet the needs in hospital, greenhouse etc. other requirements that air-conditioned place, is new and innovative technology.

In this thesis; thermodynamic analysis was performed to determine the energy performance of the induction air heating system. Minimizing heat losses and increasing thermal efficiency was aimed for the system which used air as a working fluid. First law of thermodynamic was used in the analysis. To determine the accuracy of the experimental findings, COMSOL and uncertainty analysis were consulted.

It was obtained that with increasing outlet cross-section diameter and mass flow rate, the total energy loss and outlet temperature of air was decreased, the thermal efficiency was increased for the prototypes. Insulated case of prototypes was evaluated and increased efficiency of insulated prototypes was observed. Based on the findings, the highest thermal efficiency were obtained for insulated K-4 which has the highest cross sectional outlet diameter and flow rate (%95,49). Maximum air temperature (95,4°C) was obtained in experiments in which insulated K-3 prototype with the smallest exit sectional diameter and the lowest flow rate.







## 1. GİRİŞ

Isıtma ve iklimlendirme işlemleri, günlük yaşantıda ve endüstride her geçen gün daha sık kullanılan uygulamalardır. İnsanoğlu, gerek konfor şartlarını sağlayarak yaşamlarını devam ettirmek, gerekse metal ısıtma gibi bir takım endüstriyel işlemleri gerçekleştirmek için bu uygulamalardan faydalanmaktadır. Hayatımızda bu denli yer etmiş olan iklimlendirme uygulamalarını gerçekleştirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de elektromanyetik indüksiyonlu ısıtma yöntemidir. Metal işlemeden, akışkan ısıtmaya kadar geniş uygulama alanı olan bu yöntem, ülkemizde yeni gelişen yöntemlerin içerisinde yer almaktadır.

Enerjinin günden güne önem kazanması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine yönelik araştırmaların artması, enerji kullanan makine ve araçlarda tasarruf yöntemlerinin önemini de artmıştır (Banos ve diğ., 2011). Dolayısıyla, indüksiyonlu ısıtma sistemi, ısı kayıplarının diğer ısıtma yöntemlerine oranla daha az olması ve çevre dostu olmasıyla da dikkat çekmektedir (Callebaut, 2011).

İndüksiyonlu ısıtma sistemlerinin avantajları şu şekilde sıralanabilir (Ünver, 1997b,2003) (Rudnev, 2013);

- 1) Ekonomiktir,
- 2) Uygulama süresi kısadır,
- 3) Isı kayıpları diğer sistemlere oranla çok daha azdır,
- 4) Yer sınırlaması olan seri üretim alanlarında kullanılmaya elverişli kompakt bir yapıya sahiptir,
- 5) Metal ısıtma uygulamalarında parça, yüksek sıcaklıkta dahi her noktasında aynı ısı kaliteye sahip olmaktadır,
- 6) Yüksek sıcaklık hassasiyetiyle istenildiği kadar çok sayıda parça üst üste işlenebilmektedir,
- 7) İşlenecek parçaya alev temas etmediğinden çarpılma, leke ve bozulma gibi istenmeyen durumlar olmamaktadır,

- 8) İşlem sıcaklığı elektriksel gücün ayarlanmasıyla birkaç dakika içerisinde değiştirilebilir,
- 9) Isı, malzeme içerisinde üretildiğinden, yüksek verimlilikte ve tasarruflu olmaktadır,
- 10) Yanma, alevlenme, parlama, basınçlı gaz tüpleri ve patlayıcı-yanıcı madde kullanılmadığı için oldukça güvenilirdir ve çevre dostudur,
- 11) Bakım onarım maliyetleri düşüktür,
- 12) Kullanımı kolay olduğu için çalışacak personelin kalifiye olmasına gerek bırakmamaktadır ve işçilik giderlerini en aza indirmektedir.

Avantajları sebebiyle indüksiyonlu ısıtma sistemleri, yakıt ön ısıtma, şartlandırılmış hava elde etme gibi çeşitli gaz ısıtma uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabilen değerlendirmektedir.

### **1.1 İndüksiyonlu Isıtıcıların Tarihçesi ve Literatür Araştırması**

Elektromanyetik indüksiyonla ısıtma ilk olarak 1831 yılında Michael Faraday tarafından ortaya atılmıştır. Faraday yaptığı deneylerde, iki adet kabloyu karşılıklı şekilde bir demir nüvenin etrafına sararak iki ayrı bobin elde etmiş ve bu bobinlerin bir tanesine alternatif akım geçirdiğinde diğer bobinin üzerinde gerilim indüklendiğini gözlemlemiştir. Daha sonraları Nikola Tesla'nın geliştirmiş olduğu motorlarda, jeneratörlerde, transformatörlerde ve radyo iletişimde Faraday'ın ortaya atmış olduğu bu prensipten faydalandığı bilinmektedir. Tesla'nın indüksiyon makinelerinde elektromanyetik etkileşim sonucu metal üzerinde meydana gelen ısının, direnci arttırdığından dolayı sistemin verimini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Lenz ve Neumann indüklenen gerilim şiddeti ile ilişkili olarak ısınma etkisi gösteren akımların, kendisine ters yönde bir akıya (Eddy Akımları) sebep olduğu ve bu akımın frekans ile doğrusal etkilendiğini göstermiştir. 19.yy'ın sonlarına doğru Foucoult, Eddy akımlarının karakteristiği üzerine yapmış olduğu çalışmalar sonucu, Eddy akımlarının malzemenin özellikleri ile olan ilişkisini açıklamıştır. Foucoult'un çalışmalarını takip eden Heaviside (1884)'nin "The Induction of Currents in Cores" adlı makalesini yayınlaması ile indüksiyonlu ısıtma sistemlerine ilişkin ilk akademik çalışmalar oluşmaya başlamıştır. Heaviside makalesinde alternatif akımın bobin etrafında oluşturduğu elektromanyetik alan ile demir nüveye aktarılan enerjinin oluşum ilkelerini ortaya koymuştur. Heaviside'nin makalesinden sonra indüksiyonlu

ısıtmanın temelleri bilinir hale gelmiş ise de o yıllarda gerekli gücü sağlayacak sistemler mevcut olmadığı için ortaya atılan ilkelerin uygulaması yapılamamıştır (Ünver, 1996, 1997a, 1997b).

19.yy'ın ikinci yarısında bobinler vasıtasıyla indüksiyonlu ısıtma sistemleri pratikte kullanılmaya başlanmıştır. İndüksiyonlu ısıtma ile ilgili ilk patenti Ferranti 1897'de almıştır. İlk olarak 1900'lü yılların başında İsviçre, İtalya ve Fransa'da orta frekans bölgesinde eritme işlemleri için indüksiyon fırınları kurulmuştur. Ticari anlamda ilk uygulamaları ise; 20. yüzyılın ilk yıllarında İsveç'de ve Almanya'da (çelik ergitme ocaklarında) gerçekleştirilmiştir.

İlerleyen tarihlerde İsviçre başta olmak üzere Avrupa ülkelerinde şebeke frekansından daha yüksek frekanslarda çalışan indüksiyon fırınları yapılmaya çalışılmış, bu çalışmalarda bobinin oluşturduğu reaktif gücü kompanze etmek için firmanın güç kaynağına ek olarak kondansatörlerin bağlanması gerektiği anlaşılmıştır. 20.yy'da Princetown Üniversitesinde Prof. Northrup metal ergitmeye yönelik orta frekans kullanan nüvesiz indüksiyon fırını geliştirmiştir. Fakat artırılan frekansa karşılık ortaya çıkan kondansatör ihtiyacının o yıllardaki kapasitesinin yeterli olmamasından dolayı, orta frekansta çalışan indüksiyon fırınları ticarileştirilememiştir. Kâğıt kondansatörlerin geliştirilmesi ile kompanzasyon sorunu çözümlenmiş ve bobinin üretmiş olduğu reaktif güç orta frekansa çıkıldığında bu sayede dengelenmiştir. İlk orta frekans ergitme ocağı 1927 yılında Sheffield'de "Electric Furnace Company (EFCO)" tarafından yapılmış ve ticarileştirilmiştir. Bu tarih itibariyle metallerin ısıl işlemlerinin çoğunda ve paslanmaz çelik üretiminde indüksiyonlu ısıtma sistemleri kullanılmaya başlanmıştır (Çetin,2005).

Otomotiv endüstrisinin gelişimi ile yüzey sertleştirme gibi ısıl işlemin önemi artmış ve çalışmalar hız kazanmıştır. Geliştirilen radyo frekansında çalışan ısıtıcıların dalma derinliği etkisiyle işlemlerin takip edilebilirliği artırılmış ve kontrollü ısıtma işlemleri gerçekleştirilebilmiştir. Seri üretim ve yüzey sertleştirme işlemleri için gayet kullanışlı olan indüksiyonlu ısıtıcılar zamanla daha geniş alanlarda kullanılmaya başlanmıştır (Çetin,2005).

#### *İndüksiyonla metallerin ısıtılması*

İndüksiyonlu ısıtıcılar metal endüstrisinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Ünver ve Aydemir, 2004). Bu nedenle akademik çalışmaların bir

çoğu bu doğrultuda yönelmiştir [1]. Özellikle Rudnev ve diğ. (2008b, 1999, 2000), bir çok çalışmada metallerin indüksiyonla ısıtılmasını araştırmışlardır. Aung ve diğ. (2008), yüzey sertleştirme işlemlerinde kullanılan indüksiyon sisteminin inverter devresini ve ısıtma bobini modellemişlerdir. Alüminyum malzemelerin ekstrüzyon işlemlerini gerçekleştiren sistemlere indüksiyonlu ısıtıcıların da dahil edilerek kombine sistem oluşturulmasının, makinelerin kapladığı alanlardan tasarruf ve firmalarda ekonomiklik sağladığı savunulmaktadır (Beer ve Günter, 2012). Bermúdez ve diğ. (2009), indüksiyonlu ısıtma fırınlarında, sınır elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemini birleştirerek matematiksel modelleme oluşturmuşlardır. Courtessole ve Etay (2013), indüksiyonlu ocaklarda işlenen yarı sıvı metallerde meydana gelen kütle transferini simüle etmişlerdir. Chatterjee ve Ramanarayanan (1992), indüksiyonlu ısıtıcı bobinlerinin bilgisayar destekli olarak tasarımını yapmışlardır. Codrington ve diğ. (2009), özel olarak tasarladıkları indüksiyonlu ısıtıcı ile ısıttıkları malzemelerin termomekaniksel özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Durukan (2007) yapmış olduğu tez çalışmada, indüksiyonlu ısıtma değişkenlerinin iş parçası sıcaklığına etkilerini analiz etmiştir. Boyutları bilinen çelik malzemeden üretilmiş çubukları indüksiyonlu ısıtıcıda ısıtmış, ısıtma işlemi sırasında farklı güç, taşıyıcı hızı ve bobin çapı uygulayarak etkilerini araştırmıştır. Jiang ve diğ. (2007), alüminyum malzemelerde üniform yapı elde etmek için homojen sıcaklık dağılımı gerektiğini ve bunu yarı katı haldeki malzemeye tekrar ısıl işlem uygulanarak yapılabileceğini belirtmiştir. İndüksiyonlu ısıtma sistemini ikincil ısıtma işlemi için daha uygun görerek, tasarlamışlardır. Kang ve diğ. (2003), indüksiyonlu metal ısıtma sistemlerinde bobin tasarımları adına kolaylık sağlaması amacıyla dikkat edilmesi gereken prosedürler ortaya koymuştur. Kütük ve bobin uzunluğu arasındaki nicel ilişkiyi, sıcaklık dağılımına tahmin yürütmek amacıyla ANSYS programı kullanarak indüksiyonlu ısıtma sisteminin sayısal analizini, bobin tasarımı için bir optimizasyon tekniği ve en uygun bobin tasarımının malzemede iyi bir mikroyapı elde etmek için uygulanması gerektiğini vurgulamıştır. Karcher ve Kolesnikov (2005), indüksiyonlu ısıtıcılarda konvektif ısı kayıplarını dış manyetik alan kullanımı ile azaltmaya çalışmışlardır. Lin ve diğ. (2012), deneysel olarak ve simülasyon uygulaması kullanarak indüksiyonun ısıtma kapasitesini tespit ve kontrol etmek amacıyla farklı bobin tasarımları ve kalıp boşlukları uygulamışlardır. Bu şekilde dışarıdan sarımlı bobinin indüksiyonda ısıtma etkisini incelemişlerdir. Tek karbonlu çeliği iş parçası olarak kullanan Luo ve Shih (2005), yaptıkları çalışmada indüksiyonlu ısıtıcının

ürettiği ısı akısını malzemeden yola çıkararak bulmuşlardır. Nian ve diğ. (2014), indüksiyonlu ısıtıcıyı kalıp yüzeyini ısıtmak için kullanmışlardır. Çakışan manyetik alanları ayırmak için ferrit malzeme kullanarak indüksiyonlu ısıtıcıda üniform sıcaklık dağılımını sağlayabilmışlerdir. Pleshivtseva ve diğ. (2008), indüksiyonlu ısıtma işlemini metallerde sıcak şekillendirme işleminden önce ön ısıtma işlemi için kullanımını incelemişlerdir. Popa ve Radu (2012), indüksiyonlu enerji dönüşüm sisteminde bobinlerin etkisini araştırmıştır. Stefanov ve diğ. (2011), indüksiyonlu ısıtıcıda bakır iş parçası kullanarak sıcaklık, enerji ve verimlilik analizleri yapmışlardır. Tavakoli ve diğ. (2009, 2011), indüksiyonlu ısıtmada iş parçası boyutlarının ısıtmaya etkisi incelenmiştir. Ünver ve Ünver (2013), yaptıkları çalışma ile endüstriyel fırınların doğalgazlı ve indüksiyonlu olanları arasındaki farkları ortaya koymuşlardır.

#### *İndüksiyonla sıvıların ısıtılması*

Metal endüstrisinin yanında sıvı ısıtıcılarında da kullanım alanı bulunan indüksiyonlu ısıtıcılar, rezistanslı sıvı ısıtıcıları ile rekabet halindedir (Manuel ve Khan, 2008). Curran ve Featherstone (1988), kurdukları kapalı çevrim sistemi ile indüksiyonun, metal ısıtma işlemlerinin yanısıra sıvı ısıtma uygulamaları için de kullanılabileceğini göstermişlerdir. Kolesnikov ve Andreev (1997), içerisinden sıvı metal geçirdikleri halka şeklindeki bir kanala manyetik alan uygulayarak ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Altıntaş ve diğ. (2012), indüksiyonlu ısıtma prensibi ile çalışan mikro kontrol denetimli bir sıvı ısıtıcısı tasarlamışlardır. Deneysel çalışmalarında örnek modelleri ile; 1 lt/dk debide suyu 30°C'den 64°C'ye, 0,5 lt/dk debide 30°C'den 94°C'ye ulaştırmışlardır. Ayrıca bir başka çalışmalarında indüksiyonlu sıvı ısıtıcısını havuz ve yüzer tip olmak üzere ikiye ayırarak sınıflandırmışlardır. Isıtma aparatı olarak kullanılacak geometrik modelleri ortaya koymuşlardır (Altıntaş ve diğ., 2015). Bernarz ve diğ. (2005), oluşturulan güçlü manyetik alanın kübik muhafaza içerisinden geçirilen paramanyetik sıvının doğal konveksiyona etkisini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Daly ve diğ. (1983), rüzgar enerjisinden elde edilen enerjinin indüksiyonda kullanılarak ısıya dönüştürülebileceği ve depolanan bir miktar suyun bu enerji ile ısıtılabilceğini göstermişlerdir. Formalik ve diğ. (2006), süper iletken bir silindir boru şeklindeki mıknatıs içerisinden, paramanyetik sıvı geçirerek akış analizi yapmışlardır. Kaneda ve diğ. (2003), yaptıkları indüksiyon tasarımını, motor egzoz gazlarını temizlemek için sıcak su üretiminde, kızgın buhar jeneratöründe ve

metal katalizör ıstımda kullanmıştır. Li ve diğ. (2013), dolaylı indüksiyon ıstıma sistemi içeren bir gaz akışlı reaktör sistemi tasarlamışlar ve indüksiyonun etkili bir ıstıma yöntemi olduğunu kanıtlamışlardır. Nakabori ve diğ. (1994), düzlemsel bobin kullanarak, inverter üzerinde yoğunlaşmış ve indüksiyonlu ıstıcıdan su ıstımak için faydalanmışlardır. Nakaharai ve diğ. (2007), Manyetik alanı yatay ve dikey olarak oluşturarak türbölanslı akışın olduğu bir indüksiyonlu akışkan ıstıcısını incelemişlerdir. Nakarnizo ve diğ. (1999), elektromanyetik indüksiyon tabanlı sıvı ıstıcısı prototipi kurmuşturlar. Sadakata ve diğ. (2002), paslanmaz çelikten imal edilmiş spiral şeklindeki indüksiyonlu ıstıcı tasarımını sıcak su üreten bir ısı eşanjöründe kullanmışlardır. Kuzmichev ve Tsybulsky (2011), yaptıkları tasarım ile sıvıların buharlaştırılmasında indüksiyonlu akışkan ıstıma sistemi kullanmışlardır. Tomita ve diğ. (2009), buhar jenaratöründe ıstılan havayı, ikincil olarak indüksiyonlu ıstıcıdan geçirerek kızgın buhar haline gelmesinde kullanmıştır. Yıldız ve Alan (2006), indüksiyonlu sıvı ıstıma yöntemlerinin tekniklerini ele almışlardır.

#### *Evsel indüksiyonlu ıstıma sistemleri*

İndüksiyonlu ıstıcılar endüstri uygulamalarının yanında evsel uygulama alanlarına da sahiptirler (Acero ve diğ., 2010). Acero ve diğ. (2006), mutfak uygulamalarında, iki düzlem arasına yerleştirdikleri indüksiyonla güç tüketimi ile ilgili eş direnci iyileştirmiş ve karakterize etmişlerdir. etin (2005), yaptığı tez çalışmasında mutfak tipi bir fazlı indüksiyonlu ıstıma sistemi tasarlamış ve analizlerini gerçekleştirmiştir. Sarnago ve diğ. (2013), evsel uygulamalarda kullanılan indüksiyonlu ıstıcıların güç dönüştürücülerinde verimliliğin artışı adına çalışma yapmıştır. Waeckerle ve diğ. (2006), kendi kendine sıcaklığı ayarlayabilen ocak kavramını indüksiyonlu ıstıma sistemi ile mümkün kılmışlardır. Bu durum ile aşırı ısınmanın önlenmesi ve ısı kayıplarının azaltılması sağlanmıştır.

#### *Diğer indüksiyon uygulamaları*

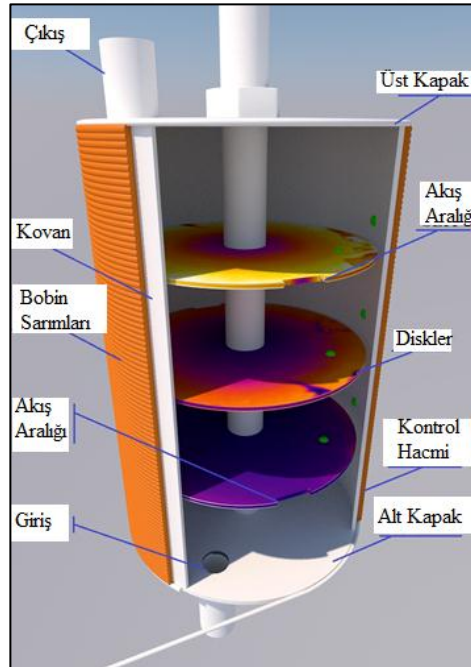
Liu ve diğ. (2010), gözenekli beton asfaltın gözeneklerini elik elyaf ve elik yün gibi malzemelerle doldurarak indüksiyonlu ıstıma tabi tutmuşlardır. Çalışma ile iletken betonun dolaylı olarak çekme dayanımını incelemiş ve indüksiyonla ıstılabileceğini kanıtlamışlardır. Dilip ve diğ. (2011), indüksiyonu dizel yakıtın yakılması için kullanarak uygulama alanlarına başka bir boyut kazandırmışlardır. Johnson ve Pitchumani (2003), reçine viskozitesinin yerel olarak azalmasında, düşük

geçirgenlik bölgelerinin etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla yenilikçi bir indüksiyonlu ısıtıcı tasarlamışlardır. Pérez-Camacho ve diğ. (2015), rüzgar ve indüksiyonlu ısıtıcısı kullanarak sentez gazlarının sentetik biogaza dönüşümünü sağlamışlardır. Yıldız ve Alan (2009), 2.2 kW'lık indüksiyonlu sıvı ısıtıcısı prototipi üzerinden, kalorifer tesisatı için sıcak akışkan temini sağlamışlardır.

Verilen çalışmalar ek olarak; yapıştırıcı polimerizasyonunda (Lucia ve diğ., 2014), cerrahi aletlerin imalat ve sterilizasyonun işlemlerinde (Makimura ve diğ., 2009), ağır yağ veya bitüm ısıtılması (Bera ve Babadağlı, 2015) gibi pek çok işlemde, indüksiyonlu ısıtıcıların kullanım alanı bulunmaktadır.

Literatürler araştırmasında, henüz indüksiyonlu hava ısıtıcısının termodinamik analizinin yapılmadığı görülmektedir. Bu güne kadar yapılan çalışmalar, elektriksel verim ve elektrik analizleri üzerine olmakla beraber termal inceleme sadece ürün sıcaklığının değerlendirilmesi ile sınırlı kalmıştır.

İndüksiyonlu hava ısıtıcısının ilk prototipi, Ünver (2016) tarafından tasarlanmıştır. Prototipte, kovan içerisine 2 disk, 3 disk ve 5 disk yerleştirilerek disksiz uygulama ile kıyaslamıştır. 3 diskli indüksiyonlu ısıtıcı tasarımının 3D modeli Şekil 1.1'de verilmiştir.



**Şekil 1.1 :** 3 diskli prototipe ait 3D model, Ünver (2016)'dan uyarlanmıştır.

Disklerin kovana koyulması ile havanın kovan içerisinde daha fazla sürede bulunup bu süre zarfında kovandan daha fazla ısı kazanarak termal verimin artırılmasını amaçlayan Ünver, havanın sıkıştırılabilir bir akışkan olmasından dolayı disk sayısının artışıyla termal verimin azaldığını gözlemlemiştir. Disksiz, 2 diskli, 3 diskli ve 5 diskli deneylerinde sırasıyla; %29.09, %23.34, %20.41 ve %16.06 termal verimlerini elde etmiştir (Ünver, 2016). İlerleyen bölümlerde Ünver'in yapmış olduğu bu çalışmanın prototipi K-0 olarak adlandırılmış ve sonuçları bu tez kapsamında geliştirilen prototiplerle karşılaştırılmıştır.

## 1.2 Tezin Amacı

Endüstride bilhassa metal ısıtma işlemlerinde kullanılan indüksiyonlu ısıtma sistemleri, akışkan ısıtma uygulamalarında da kullanılabilir. Son zamanlarda bilim insanlarının yaptığı çalışmalar içerisinde büyük oranda elektriksel araştırmalar (Uchida ve diğ., 2013) ve indüksiyon verim analizleri (Ünver, 2016) bulunmaktadır.

İndüksiyonlu akışkan ısıtma sistemi, yeni gelişmekte olan bir sistem olduğu için literatürde ısı verimi ile ilgili çalışmalar bulmak mümkün değildir. Bu nedenle bu tez kapsamında; hastanelerde, alışveriş merkezlerinde, seralarda vb. diğer şartlandırılmış ortam gerektiren yerlerde kullanılmak üzere tasarlanmış, yeni ve inovatif bir teknoloji olan indüksiyonlu hava ısıtma sisteminin enerji performansını belirlemek üzere termodinamik analizler yapılmıştır. Bu yönüyle indüksiyonlu akışkan ısıtıcılarının termal analiz boşluğunun doldurulması amaçlanmıştır. İş akışkanı olarak hava kullanılan bu çalışmada, indüksiyonlu hava ısıtma sisteminin ısı kayıplarının en aza indirilmesi ve ısı veriminin artırılması hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda, analiz ve değerlendirmeler termodinamiğin I. kanunu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçların doğruluğunun belirlenmesi amacıyla, teknolojinin gelişimi ile beraber kullanımı oldukça yaygınlaşan bilgisayar destekli simülasyon programına (COMSOL) başvurulmuştur.

İndüksiyonlu hava ısıtma sisteminde termal verimin; debi artışıyla, çıkış çapının genişlemesiyle ve yalıtım uygulamasıyla arttığı sonucuna varılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarla kıyaslandığında, sonuçların tutarlı ve benzer olduğu görülmektedir (Ünver, 2016). Deneysel bulgulardan yola çıkarak, maksimum termal verimi %95,49 olarak hesaplanan indüksiyonlu hava ısıtıcısının günümüzde



kullanılabilen hava ısıtıcı sistemlere iyi bir alternatif olacağı ve yeni bilimsel konseptlere klavuzluk yapacağı düşünülmektedir.

### 1.3 İndüksiyonlu Hava Isıtıcılarının Çalışma Prensibi

İndüksiyonlu hava ısıtıcıları, elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülerek havaya aktarımını sağlayan bir ısıtma sistemidir. Sistemde kovan adı verilen içerisinde akışkanın geçirildiği ve üzerinde bobinin sarılı halde olduğu bir sistem elemanı vardır. Elektrik akımı bobinden geçirildiğinde, bobin etrafında manyetik alan oluşur. Manyetik alan içerisinde kalan iletken malzeme (kovan) üzerinde gerilim indüklenir. Kovan üzerinde indüklenen gerilim, malzemede Eddy akımları oluşturur. Eddy akımları malzemenin elektriksel direncine bağlı olarak, Joule kanunu gereği malzemeyi ısıtır.

İndüksiyonlu ısıtma sistemlerinin çalışma prensibi, bir transformatörün çalışma prensibi ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, indüksiyonlu ısıtma ideal bir transformatör gibi modellenmektedir. İdeal bir transformatör; eşdeğer devresinde histerezis kayıplarının, kaçak akımların ve reaktansının ihmal edilmesiyle oluşur. İndüksiyonlu ısıtıcının ideal transformatörden farkı, ısıtıcıda bir nüvenin bulunmaması ve sekonder sarım sayısının bir olmasıdır. Malzeme üzerine aktarılmış olan güç Joule kanunu doğrultusunda ısı enerjisine dönüşür. Joule kanunu doğrultusunda ısıya dönüşen enerji denklem (1.1) ile bulunmaktadır.

$$Q_m = I^2 R_{eş} \quad (1.1)$$

Burada;

$Q_m$  : Malzemede ısıya dönüşen güç miktarı (W),

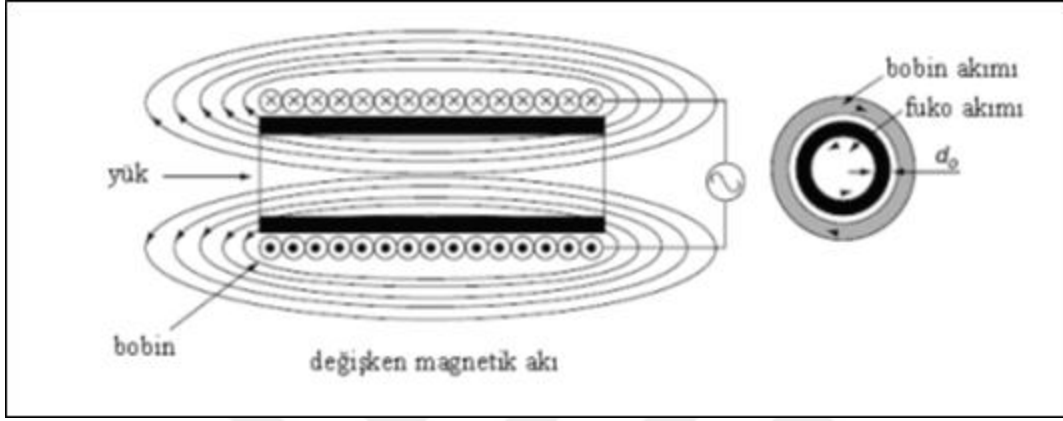
$I$  : Malzemedeki geçen akımı (A),

$R_{eş}$  : Malzemenin eşdeğer direncini ( $\Omega$ ) göstermektedir.

#### 1.3.1 Elektromanyetik indüksiyon

Elektromanyetik indüksiyon, bir iletken malzeme içerisinde gerilimin nasıl indüklediğini açıklamaktadır. Gerilim indüklenmesi birbirinden tamamen farklı, iki mekanizma ile gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan ilki indüksiyonlu ısıtıcı

devresinin sabit olduğu durumda, üretmiş olduğu manyetik alanın içerisinde geçen hareketli iletken malzemenin üzerinde indüklenen gerilimdir. Burada, oluşan sabit manyetik alan içerisinde geçen hareketli iletken malzeme üzerinde değişen manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak gerilim indüklenir. Diğer yöntem ise değişen manyetik alan sayesinde hareketsiz malzeme üzerine indüklenen gerilimdir. Bu durum ve sonucunda oluşan Eddy (Fuko) akımları Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 1.2 :** Elektromanyetik indüksiyonun çalışma prensibi, Çetin (2005)’den uyarlanmıştır.

Malzeme üzerine indüklenen gerilim denklem (1.2)’de gösterildiği gibi bulunur.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.2)$$

$e$  : Malzeme üzerinde indüklenen gerilimi (V),

$N$  : Bobinin sargı sayısını,

$\phi$  : Zamanla değişen ısı akısını ( $W/m^2$ ) ifade etmektedir.

Denklem (1.2)’de bulunan negatif işaret, bobinden akan akımın yönüyle malzeme üzerinde oluşan eddy akımlarının yönünün ters olmasından kaynaklanmaktadır.

### 1.3.2 Dalma derinliği (Deri etkisi)

İndüksiyonlu ısıtma elektriksel olarak iletken bir malzemenin içerisinde Eddy akımlarının indüklenmesiyle oluşur. İndüksiyonlu ısıtma işlemi bobine verilmiş olan elektrik akımının frekans değeriyle, malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerine bağlı olarak indükleyebileceği Eddy akımlarının oluşum bölgeleri saptanarak verimli hale getirilebilmektedir. İndüksiyonlu ısıtmanın doğası gereği üretilen eddy akımları,

malzemenin dış katmanlarında meydana gelir (Rudnev, 2008a). Bu sebepten dolayı üretilen ısı enerjisi malzemenin merkezine nazaran dış katmanında daha yoğun olacak şekilde meydana gelmektedir. Bu etkiye *dalma derinliği* veya *deri etkisi* adı verilmiştir.

Dalma derinliği, indüksiyonlu sistemlerin karakteristiğini belirleyen en önemli etmenlerden biridir [2]. Buna göre malzeme üzerinde indüklenen akım bobine en yakın mesafede ve bobin uzunluğunun orta noktasında maksimum değerine ulaşmaktadır (Çelik, 2005). Dalma derinliği, bobine gelen akımın frekansına, malzemenin özdirencine ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır **(1.3)**.

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho_d}{\mu_r f_a}} \quad (1.3)$$

$\delta$  : Dalma derinliğini (m),

$\rho_d$  : Malzemenin özdirenci ( $\Omega.m$ ),

$\mu_r$  : Malzemenin manyetik geçirgenliği ( $N/A^2$ ),

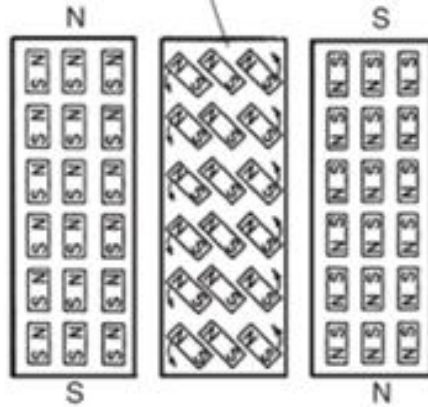
$f_a$  : Akımın frekansını (Hz) ifade etmektedir.

Burada belirtilen malzemenin özdirenci sıcaklığa bağlı parametredir. Denklem **(1.3)** göz önüne alındığında; dalma derinliğinin frekansla ve malzemenin manyetik geçirgenliğiyle ters orantılı, malzemenin özdirenciyle ve dolayısıyla artan sıcaklıkla doğru orantılı olduğu sonucuna varılmaktadır (Rudnev, 2015).

### 1.3.3 İndüksiyonlu ısıtıcılarda enerji dağılımı

İndüksiyonlu ısıtma sistemlerinde enerji dağılımı, iki mekanizmaya dayanmaktadır. Bunlar Joule ısınmasından dolayı olan enerji kayıpları ve manyetik histerezise olarak atfedilen enerji kayıplarıdır. Burada bahsedilen Joule enerjisi manyetik olmayan malzemelerde ısı üretimi için gerçekleşen tek mekanizma, ferromanyetik malzemelerde ısı üretimi için gerçekleşen birincil mekanizmadır. Ferromanyetik malzemelerde indüksiyonlu ısı üretimi için ikincil mekanizma histerezis kayıplarıdır. Bu kayıplar Şekil 1.3'te görüldüğü gibi malzeme içerisinde bulunan manyetik dipolleri uygulanan manyetik alan vasıtasıyla aynı yöne yönlendirmek için gereken enerji kayıplarını temsil etmektedir. Histerizis kayıpları, moleküllerin dönел sürtünmesinden dolayı meydana gelmektedir. Malzemenin göstermiş olduğu bu etki sonucu ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır.

### Malzeme bünyesindeki manyetik dipollerin manyetik alanla değişimi



Şekil 1.3 : Histerezis kayıpları, Haimbaugh (2001)'den uyarlanmıştır.

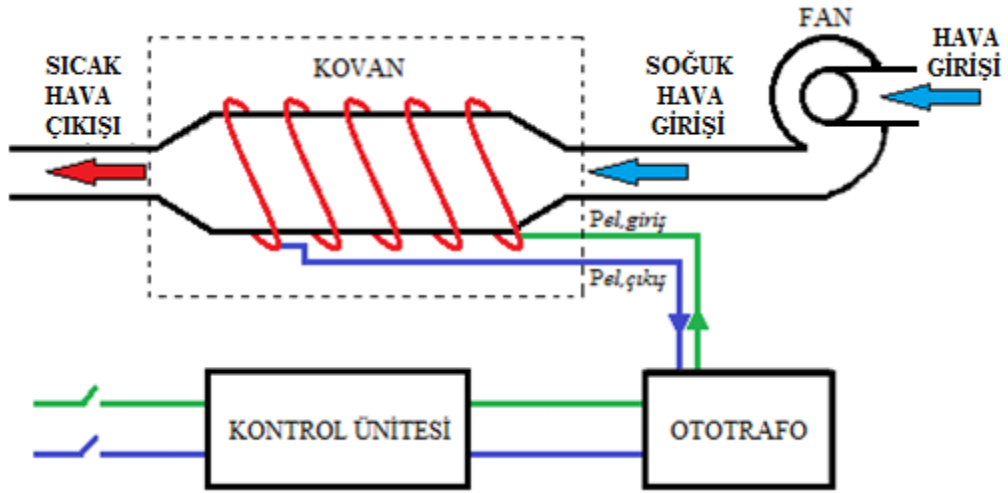
Ferromanyetik malzemelerin indüksiyonla ısıtılmasında birincil enerji kaynağı olan Joule ısıtmasının temelini Eddy akımları oluşturur, histerezis kayıpları ise genelde eddy akımlarının %7'sinin altında bir değere sahip olduğu için tasarım aşamasındaki sistemlerin hesaplarında ihmal edilebilmektedir (Zinn, 1988).

#### 1.3.4 İndüksiyonlu ısıtıcılarda ısı transferi mekanizmaları

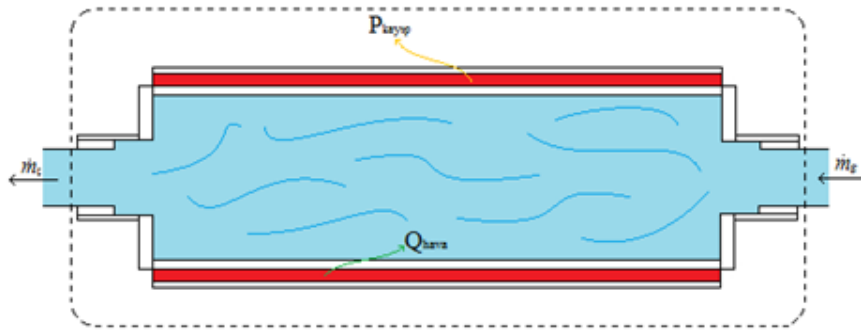
Malzemede gerçekleşen ısı transferi aşamaları; geçici ısı depolama aşaması, sabit hızda sıcaklık artışı ve soğurma zamanı olmak üzere üç ana bölüme ayrılmaktadır. Geçici ısı depolama aşamasında, kovan malzemesine indüklenen akım sonucu ilk önce malzemenin yüzeyi ısınmaktadır. Malzemenin yüzeyinde bulunan moleküller kendi bünyelerinde ısıyı absorbe ettikten sonra alt katmanlarda bulunan moleküllere iletim yoluyla ısı geçişini sağlamaktadırlar. Sabit sıcaklık yükselişi aşamasında, malzeme artık molekülleri arası ısıl doygunluğa ulaştığı için indüksiyonla enerji verilmeye devam edildiği takdirde, malzeme boyunca sıcaklık artışı eşit olarak gerçekleşecektir. Daha sonra malzemenin işleme tabii tutulması için malzeme üzerinde oluşan ısının malzeme tarafından soğurulması gerekmektedir. Yani ısı, malzeme iç yapısında her noktaya ulaşmalıdır. Aksi takdirde malzemenin yüzeyi ile merkezi arasında yüksek sıcaklık farkı oluşacaktır (Çetin, 2005).

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

İndüksiyonlu ısıtma sisteminde, şebekeden çekilen elektrik enerjisi kontrol ünitesinden geçerek ototrafo bölümüne gelir. Ototrafo, gerilim değerini alçaltıp yükselterek, verimi ölçüsünde güç aktarımında bulunur [3]. Bobinlere gelen enerji burada manyetik alana dönüştürülerek, alan içerisinde kalan ferromanyetik malzemenin Eddy akımları sayesinde ısınması sağlanır. Isıtılan malzeme, kendisi ile etkileşimde bulunan iş akışkanına ısıyı transfer eder (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : İndüksiyonlu hava ısıtıcının şematik görünümü.



Şekil 2.2 : İndüksiyonlu hava ısıtıcının şematik sistem görünümü.

İndüksiyonlu akışkan ısıtma sistemleri termodinamik açıdan açık sistemlerdir (Şekil 2.2). Çalışma boyunca yapılan analizlerde bu durum göz önüne alınmıştır.

Bu tez kapsamında, iş akışkanı olarak havanın kullanıldığı, bir indüksiyonlu akışkan ısıtıcısında akış parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Verimlilik artışı ve kayıpların azaltılması adına yapılan yenilikçi müdahaleler ile sistem gelişimi sağlanmıştır. COMSOL paket programı ile deneysel ve teorik olarak analiz edilen sistemin doğruluğu incelenmiştir.

## 2.1 İndüksiyonlu Hava Isıtma Sisteminin Teorik Analizi

İndüksiyonlu akışkan ısıtıcısına beslenen elektrik enerjisi, ısı enerjisiye dönüştürken ve dönüştükten sonra çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıpların en aza indirilmesi ile enerjinin ısı formuna dönüşümü arttırılacaktır. Bu nedenle enerji dönüşüm analizleri kadar, enerji kaybı analizleri de oldukça önemlidir.

Analizi yapılan indüksiyonlu ısıtma sistemlerinde, termodinamiğin I. Kanunu ele alınarak enerji denkliği kurulmuştur (2.1). Enerji denkliğinden yola çıkarak, harcanan elektrik enerjisinin hangi formlara dönüştüğü ve meydana gelen kayıpların tespiti yapılmıştır.

$$E_{ind} + E_i - E_o = dE_{sis} \quad (2.1)$$

$E_i$  : Hava ile sisteme giren enerjisi (J),

$E_o$  : Hava ile sistemden çıkan enerjisi (J),

$E_{ind}$  : İndüksiyon ile sisteme giren enerjisi (J)

$dE_{sis}$  : Sistemdeki enerji değişimini (J) temsil etmektedir.

İndüksiyon sisteminde sisteme giren elektrik enerjisi, geçici rejim durumunda kovan malzemesi tarafından ısı formunda biriktirilir. Kovan, ısı anlamında yeterli doygunluğa ulaştıktan sonra üzerine gelen ısıyı doğrudan akışkana veya dış ortama aktarır. Bu nedenle, sürekli rejim şartlarına ulaşan sistemde  $dE_{sis}$ , sıfıra eşit olur<sup>[4]</sup>.

Termodinamikte; sıcaklık değişimi, akışkanın yoğunluğuna yansımaktadır. Hesaplamalarda kullanılan birçok ifadenin kapsamında bulunan yoğunluk değeri, debi hesaplamalarında da kullanılmaktadır (2.2). Sürekli rejim şartlarına ulaşan

havanın çıkış sıcaklığına karşılık gelen yoğunluk değeri, gerekli termodinamik tablolarından<sup>[4][5][6][7]</sup> elde edilmiştir.

$$\dot{m} = \rho_{hava} V_o A \quad (2.2)$$

- $\dot{m}$  : İş akışkanının (hava) kütleli debisini (kg/s),  
 $\rho_{hava}$  : Havanın yoğunluğunu (kg/m<sup>3</sup>),  
 $V_o$  : Havanın sürekli rejimde sistemden çıkış hızını (m/s),  
 $A$  : Havanın geçtiği kesit alanını (m<sup>2</sup>) temsil etmektedir.

Debi miktarı hesaplanan havanın, çıkış sıcaklığına bağlı olarak özgül ısı ( $c_p$ ) termodinamik tablolarından<sup>[4][5][6][7]</sup> okunmuştur. Sistemden havaya transfer edilen ısı miktarının hesaplanmasında, havanın sisteme girmeden önceki ve girdikten sonraki sıcaklık değerleri göz önünde bulundurulmuştur (2.3).

$$\dot{Q}_{hava} = \dot{m} c_p (T_o - T_ç) \quad (2.3)$$

- $\dot{Q}_{hava}$  : Havaya aktarılan ısı gücü (W),  
 $c_p$  : Havanın çıkış sıcaklığına ait özgül ısı değerini (J/kg.°C),  
 $T_o$  : Sürekli rejimde havanın sistemden çıkış sıcaklığını (°C),  
 $T_ç$  : Ortam sıcaklığını veya havanın sisteme giriş sıcaklığını (°C) temsil etmektedir.

İndüksiyonlu hava ısıtma sisteminde gerçekleşen ısı kayıplarından birisi doğal taşınım ile meydana gelen ısı kaybıdır. Doğal taşınım ile ısı transferi miktarı denklem (2.4) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{taşınım} = h A_s (T_s - T_ç) \quad (2.4)$$

- $\dot{Q}_{taşınım}$  : Doğal taşınım ile meydana gelen ısı kaybını (W),  
 $h$  : Isı taşınım katsayısını (W/m<sup>2</sup>.°C),  
 $A_s$  : Isı transferinin gerçekleştiği yüzeyin alanını (m<sup>2</sup>),  
 $T_s$  : Isı transferinin gerçekleştiği yüzeyin sıcaklığını (°C) temsil etmektedir.

Taşınım katsayısının ( $h$ ) bulunabilmesi için, Nusselt sayısının ( $Nu$ ) bilinmesi gerekmektedir (2.6). Nusselt sayısının değeri ise Rayleigh sayısının ( $Ra_D$ ) bulunması

ile elde edilir (2.5). Bu değerler bilindikten sonra denklem (2.7) ile taşınım katsayısı elde edilir ve sistemde meydana gelen doğal taşınım miktarı hesaplanır<sup>[6]</sup> (2.4).

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_c)D^3}{\nu^2} Pr \quad (2.5)$$

- $Ra_D$**  : Rayleigh sayısını,  
 **$g$**  : Yerçekimi ivmesini ( $m/s^2$ ),  
 **$\beta$**  : Hacimsel genleşme katsayısını ( $1/^\circ C$ ),  
 **$T_c$**  : Ortam sıcaklığını ( $^\circ C$ ),  
 **$D$**  : Hesaplama yapılan geometrinin çapını (m),  
 **$\nu$**  : Havanın kinematik vizkozitesini ( $m^2/s$ )  
 **$Pr$**  : Prandtl sayısını temsil etmektedir.

$$Nu = \left(0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right)^2 \quad (2.6)$$

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad (2.7)$$

- $Nu$**  : Nusselt sayısını,  
 **$k$**  : Isı iletim katsayısını ( $W/m.^\circ C$ ) ifade eder.

İndüksiyonlu ısıtma sisteminde ısı kayıpları, doğal taşınımın yanında ışınm yoluyla da meydana gelmektedir<sup>[6]</sup> (2.8).

$$\dot{Q}_{ışınm} = \varepsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_c^4) \quad (2.8)$$

- $\dot{Q}_{ışınm}$**  : Işınım ile meydana gelen ısı kaybını (W),  
 **$\varepsilon$**  : Yüzeyin yayıcılığı (Yalıtımsız durumda; 0.7, Yalıtımlı durumda; 0.5 olarak alınmıştır.),  
 **$\sigma$**  : Stefan-Boltzmann sabitini ( $5,67.10^{-8} W/m^2.K^4$ ) temsil etmektedir.

İndüksiyonlu hava ısıtıcısında enerji kayıplarını oluşturan diğer parametreler; kinetik enerji değişimi, sürtünme ve boşaltma kayıplarıdır. Bu ifadeler, sistemimizin boyutu



gereği çok küçük değerlere sahip olsa da büyük tesislerde, enerji kayıplarının fazla olmasına neden olabilmektedir.

$$\Delta P_{KE} = \frac{1}{2} \dot{m} (V_o^2 - V_i^2) \quad (2.9)$$

$\Delta P_{KE}$  : Havanın kinetik enerji değişimini (W),

$V_o$  : Havanın sistemden çıkış sıcaklığını ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$V_i$  : Havanın sisteme giriş sıcaklığını ( $^{\circ}\text{C}$ ) temsil etmektedir.

Sıcaklığı artan havanın yoğunluğunda düşüş meydana gelir. Borularda çap daralması, içinden gelen sıkıştırılabilir akışkanın sıkışmasına ve yoğunluk değişimine sebep olur. Akışkan, sahip olduğu enerjinin bir kısmını kinetik enerji olarak barındırmaktadır. Yoğunluktaki artış ve azalışlar, akışkanın hızında ve sahip olduğu kinetik enerjide değişimler meydana getirmektedir. Bu nedenle enerjinin bir kısmı kinetik enerji formuna dönüşmektedir. Kinetik enerjide ki değişim, denklem (2.9) ile hesaplanır.

Sistemde, ısı transferi mekanizmasının temeli, katı yüzeyin ısıtarak akışkana ısı aktarımıdır. Akışkan katı yüzey ile temas ettiğinde, katı yüzeyin direncine maruz kalmaktadır. Yüzeyin pürüzlülük katsayısına bağlı olarak akışkana aktarılan ısı miktarı artmaktadır. Ancak katı yüzeyin direnci, akışkan hareketini kısıtlamaktadır. Bu kısıtlama sisteme, sürtünme kaybı olarak yansımaktadır<sup>[5]</sup> (2.10).

$$\Delta P_{K,S} = \rho \cdot g \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g} \quad (2.10)$$

$\Delta P_{K,S}$  : Sürekli meydana gelen sürtünme yük kaybını (W),

$f$  : Sürtünme faktörünü,

$L$  : Boru parçasının uzunluğunu (m) temsil etmektedir.

Sürtünme kayıplarına ek olarak, giriş-çıkış kapakları gibi parçaların bağlantı noktalarında ve kesit değişiminin meydana geldiği bölgelerde kısmi olarak kayıplar meydana gelir. Bu tür kayıplar yerel kayıp olarak adlandırılır ve denklem (2.11) ile hesaplanır.

$$\Delta P_{K,y} = \rho \cdot g \sum_j C_{D,j} \frac{V_j^2}{2g} \quad (2.11)$$

$\Delta P_{K,y}$  : Yerel yük kaybını (W),

$C_D$  : Boşaltma kayıp katsayısını ifade etmektedir.

Boşaltma kaybı olarakta adlandırılan toplam yük kayıpları, sürtünme ve yerel kayıpların toplamını teşkil etmektedir<sup>[5]</sup> (2.12).

$$\Delta P_{DL} = \rho \cdot g \left\{ f \frac{L}{D} + C_D \right\} \frac{V^2}{2g} \quad (2.12)$$

$\Delta P_{DL}$  : Boşaltma kayıplarını (W) temsil etmektedir.

İndüksiyonlu akışkan ısıtıcısında, bobinin oluşturduğu manyetik alan, malzeme üzerinde elektrik gücü üretir. Bu elektrik gücünün değeri denklem (2.13) ile hesaplanır (Ünver, 2016 ve Ünver, 1997-b).

$$P_{el} = I \cdot V \cdot \text{Cos}(\varphi) \quad (2.13)$$

$P_{el}$  : Elektrik gücünü (W),

$V$  : Gerilimi (Volt),

$\text{Cos}(\varphi)$ : Güç faktörünü temsil etmektedir.

Şebekeden alınan elektrik enerjisi, bobine ulaşana kadar çeşitli kayıplara uğramaktadır. Isıtma işlemi, bobin vasıtasıyla sağlandığı için şebekeden alınan enerji miktarının ısıtma hesaplarında kullanımı doğru olmayacaktır. Bu nedenle sistemin elektriksel veriminin hesaplanması gerekir. Elektriksel verim, denklem (2.14)'te verilen ifade ile hesaplanır.

$$\eta_{el} = \frac{P_{bobin}}{P_{\text{şebeke}}} \quad (2.14)$$

Burada;

$\eta_{el}$  : Elektriksel verimi (%),

$P_{bobin}$  : Bobinden çekilen elektrik gücünü (W),

$P_{şebeke}$  : Şebekeden çekilen elektrik gücünü (W) temsil etmektedir.

Sistem genel olarak değerlendirildiğinde; şebekeden alınan elektrik enerjisinin, akışkanda ısı enerjisine dönüştürülen miktarı arasındaki ilişki, I. kanun verimi olarak ifade edilmiştir (2.15).

$$\eta_I = \frac{Q_{Hava}}{P_{şebeke}} \quad (2.15)$$

$\eta_I$  : I. kanun verimini (%) ifade etmektedir.

Şebekeden alınan elektrik enerjisinin daha önce de belirtildiği gibi çeşitli kayıplara uğrayarak bobine geldiği düşünülürse; bobinden alınan elektrik enerjisinin, ısı güce dönüşümü arasındaki ilişki de, denklem (2.16) ile verildiği gibi termal verim olarak ifade edilmiştir.

$$\eta_{termal} = \frac{Q_{Hava}}{P_{bobin}} \quad (2.16)$$

$\eta_{termal}$ : Termal verimi (%) temsil etmektedir.

## 2.2 İndüksiyonlu Hava Isıtma Sisteminin COMSOL Programı Analizi

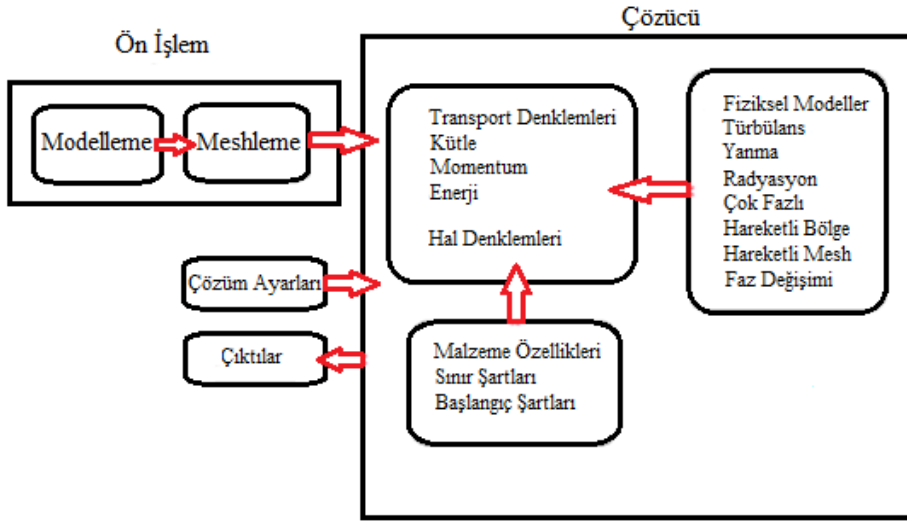
İndüksiyonlu hava ısıtma sistemi üzerinde yapılan teorik ve deneysel analizlerin doğruluğunun tespiti amacıyla, farklı analizler ile kıyaslanması gerekmektedir. COMSOL paket program ile indüksiyonlu ısıtma işleminin, gerekli parametreler girilerek simülasyonu uygulanmıştır. Programın temelini oluşturan parametreler ve denklemler bu başlık altında verilecektir.

### 2.2.1 Sonlu hacimler yöntemi ve HAD programlarının çalışma algoritması

Sonlu hacimler yönteminin temeli, sistem geometrisini küçük parçalara ayırarak girilen denklem takımlarının üzerinde uygulanmasıdır. Analizi yapılan geometrinin parçaları, daha sonra tekrar birleştirilerek sonuçlar elde edilmektedir. Analiz işlemlerinde ilk olarak, çalışılacak bölge uygun ağ yapısı ile parçalara ayrılır.

Sırasıyla momentum, süreklilik denklemleri ve diğer istenen denklemlerin çözümü uygulanır. Çözülen denklemler iteratif çözücü ile daha doğru değerlere yakınsanır. Daha sonra çözümün yakınsaklığı kontrol edilerek sonuca ulaşılır (Duygu, 2014).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kapsamında oluşturulmuş COMSOL programında çözüm; sonlu elemanlar, sonlu farklar, sonlu hacimler ve sınır elemanlar yöntemleriyle ulaşılmaktadır. HAD programlarının çalışma algoritması, Şekil 2.3'de gösterildiği gibi özetlenmektedir (Duygu, 2014).



Şekil 2.3 : HAD basamakları, Duygu (2014)'ten uyarlanmıştır.

HAD programlarının kullandığı denklemler;

- ❖ Manyetik alan fiziği için: Maxwell-Amper kanunu denklemi,

$$(j\omega\sigma_e - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r)A_m + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}B) - \sigma v \times B = J_e \quad (2.17)$$

$j$ : z-koordinatı vektörünü,

$\omega$ : Açısal frekansı (Hz),

$\sigma_e$ : Elektriksel iletkenliği (s/m),

$\epsilon_0$ : Vakumun dielektrik sabitini (F/m),

$\epsilon_r$ : Malzemenin bağıl dielektrik sabitini (F/m),

$A_m$ : Manyetik alan şiddetini (Wb/m),

$\nabla$ : Diverjans operatörünü,

$\mu_0$ : Vakumun manyetik geçirgenliğini (H/m),

- $\mu_r$ : Malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğini (H/m),  
 $B$ : Manyetik akı yoğunluğunu (T),  
 $v$ : İletkenin hızını (m/s),  
 $J_e$ : Akım Yoğunluğunu ( $A/m^2$ ) temsil etmektedir (2.17).

❖ Isı transferi fiziği için: Isı transferi denklemleri

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (2.18)$$

- $\rho$ : Yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),  
 $c_p$ : Sabit basınçta özgül ısıyı (J/kg.K),  
 $T$ : Sıcaklığı (K),  
 $t$ : Zamanı (s),  
 $u$ : Hız vektörünü,  
 $k$ : Isı iletim katsayısını (W/m.K),  
 $Q$ : Viskoz ısıtma harici diğer ısı girişini ( $W/m^3$ ) temsil etmektedir (2.18).

❖ Türbülanslı akış fiziği için: Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) denklemleri

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U}) + \nabla \cdot \left( \mu T (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) - \frac{2}{3} \mu T (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right) \\ = -\nabla P + \nabla \cdot \left( \mu (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right) + \mathbf{F} \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\mu T = f(k_t, \epsilon) \quad (2.20)$$

- $U$ : Zaman ortalamalı hızı (m/s),  
 $P$ : Zaman ortalamalı basıncı (Pa),  
 $\nabla$ : Diverjans operatörünü,  
 $\rho$ : Yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),  
 $\mu T$ : Türbülans viskozitesini ifade etmektedir (2.19).

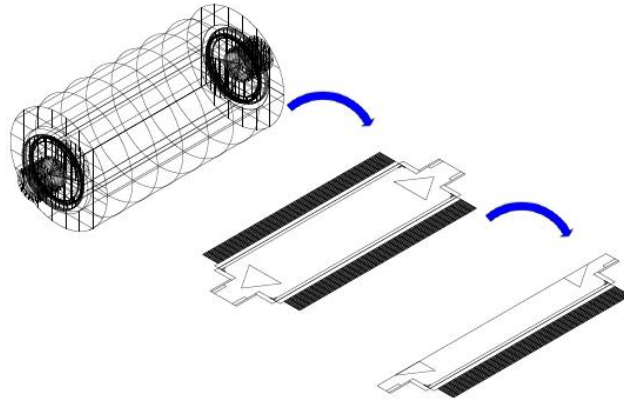
Türbülans vizkozitesi, türbülans kinetik enerjisine ve türbülans enerji kayıp katsayısına bağlı bir parametredir (2.20).

### 2.2.2 İndüksiyonlu hava ısıtıcısında COMSOL simülasyon tekniği adımları

COMSOL paket programının model sihirbazı takip edilerek, gerekli işlemin gerekli yerde uygulanması sağlanmıştır. Program ile yapılan simülasyon uygulamasında sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir;

- Çalışılacak sistem boyutları belirlenir ve programda geometri oluşturulur,
- Programa gerekli materyallerin girdisi yapılır,
- Çalışılacak fizik koşulları belirlenir ve sınır şartları belirlenir,
- Ağ (mesh) yapısı oluşturulur ve girilen parametreler çözdürülür.

İndüksiyonlu hava ısıtıcı modeli ilk defa yapılan bir uygulamadır. Bu nedenle literatürde bire bir modeli bulunmamaktadır. Ancak akış geometrisi açısından benzerlik gösterebilecek çalışmalar dikkate alınmıştır. Bu yolda, ısıtıcı modelinin iki boyutlu aksisimetrik boyutta yapılmasına daha önce yapılan çalışmalar ile karar verilmiştir (Lim ve diğ. 2011), (Şekil 2.4). Programda hazır halde bulunan modüllerin içerisinde ısı transferi modülü ve daha sonra indüksiyonlu ısıtma fiziği seçilmiştir. İndüksiyonlu ısıtma fiziği, manyetik alan fiziği ve katılarda ısı transferi fiziği olarak ikiye ayrılmıştır. Bu fiziklere ek olarak, türbülanslı akışta hava akımını tasvir etmesi adına k-ε takım denklemleri de tanımlanmalıdır. Denklem analizleri için programda tüm fiziklerin arasında bağlantı olması gerekir. Bu bağlantılar ancak multifizik şartlar ile sağlanmaktadır.



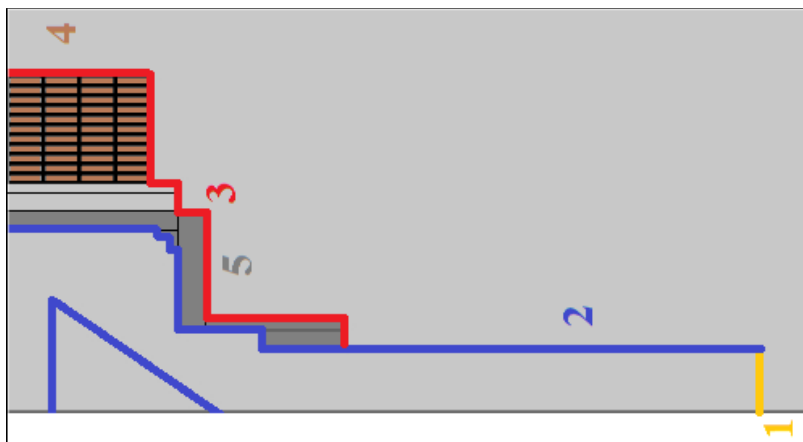
Şekil 2.4 : Geometrinin aksisimetrik boyuta indirgenmesi.



**Çizelge 2.1** : Simülasyonda kullanılan materyallerin özellikleri.

Malzeme	Bakır	Cam Elyaf	Akrilik Plastik	St-52
Bağlı Manyetik Geçirgenlik	1	1	1	35
Özgül ısı (kJ/kg.K)	385	700	1470	434
Isı İletim Katsayısı (W/m.K)	400	0,04	0,18	45
Bağlı Dielektrik Sabiti	1	1	1	1
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	8700	150	1190	8131
Referans Özdirenç (Ω.m)	1,72E-08	-	-	1,61E-07
Referans Sıcaklık Katsayısı (1/K)	0,0039	-	-	0,0041
Referans Sıcaklık (K)	293,15	293,15	293,15	293,15
Elektriksel İletkenlik (S/m)	6,00E+07	0	0	6,20E+06

Referans sıcaklıktaki malzeme özellikleri Çizelge 2.1 ile verilmiştir. İş akışkanı olarak kullanılan havanın özellikleri COMSOL tarafından belirlenmektedir. Çözümlenelerde yer alan materyallerin herhangi bir sıcaklıkta özelliklerinin bilinmeyle hata miktarında %3,6 civarında azalma sağlandığı bilinmektedir (Kranjc ve diğ., 2010).



**Şekil 2.6** : İndüksiyonlu ısıtıcı modelinin seçilen giriş şartları görüntüsü.





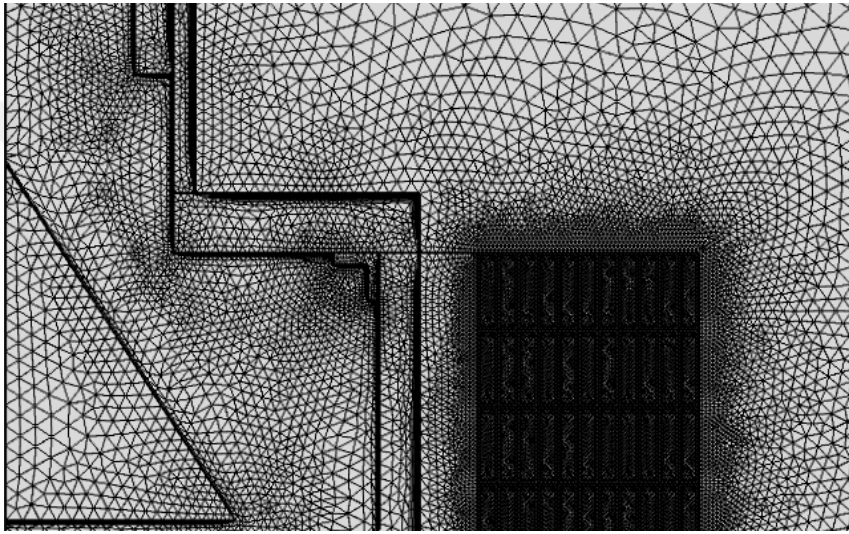
Şekil 2.7 : İndüksiyonlu ısıtıcı modelinin seçilen çıkış şartları görüntüsü.

Sistemin sınır şartlarının programa tanıtılması için daha önce yapılan benzer çalışmalar ve analiz programının kütüphanesi göz önünde bulundurulmuştur. Geometrinin küçüklüğü sebebiyle sistem giriş ve çıkış kısımları olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır (Şekil 2.6 ve 2.7). Kovanın orta kısımda kalan sınır şartları, giriş ve çıkış sınır şartları ile aynı olduğu için verilmemiştir. Daha önce bahsedilen manyetik alanlar fiziki geometrinin her bölümünde geçerlidir. Şekil 2.6 ve 2.7’de gösterilen bobinin bulunduğu kısma (4 numaralı bölüm), sınır şartı olarak her bir bobinin geometrisinin alanı  $29,875 \text{ mm}^2$  olarak tanıtılmıştır. Her prototip için deneysel olarak ölçülen güç değerleri girilmiştir.

Şekil 2.6 ve 2.7 ‘de akım indüklenen 4 ve 5 numaralı çelik kısımlara Amper kanunu uygulanmıştır. Amper kanunu sınır şartında, malzemenin özdirencinin sıcaklığa bağlı olduğunu göstermek için özdirenç sekmesi altında lineerleştirilmiş özdirenç sekmesi seçilmiştir. Geometride her bölüm katılarda ısı transferi fizikine uygundur. 1 ve 6 numaralı sınırlar hava olarak tanıtılmıştır ve katılarda ısı transferi sekmesi altındaki sıvılarda ısı transferi kısmı ile çözümlenmiştir. Çıkış sınır şartı, ısı transferinin sonlanacağı 6 numaralı sınır üzerinden girilmiştir. Yüzeylerden meydana gelen ışıma ile ısı kayıpları 3 numaralı sınır ile tanımlanmış, yüzey yayılım katsayısı 0.7, ortam sıcaklığı 294.65 K olarak girilmiştir. Taşınım ile meydana gelen kayıpların girdileri için 3 numaralı bölüm seçilmiş ve doğal taşınım sınır şartları tanımlanmıştır. 1 ve 6 numaralı sınırlardan akışkan giriş ve çıkışı sağlandığı için bu sınırlar arasında kalan alana k-ε denklem takımı tanıtılmıştır. 1 numaralı giriş alanına havanın 8.77 m/s hıza sahip olduğu, 6 numaralı çıkış alanında ise 0 Pa basınç farkı değeri ve ısı transferinin sona erdiğini belirten ‘Outflow’ sınır şartı girilmiştir.

Sınır şartları belirlenen geometride analizin devamı için ağ (mesh) yapısının oluşturulması gerekmektedir. Bu anlamda mesh yapısı çözümler için büyük önem taşımaktadır. En uygun mesh yapısı, geometriye uygun şekilde uygulamanın

barındırdığı simetrik ağ yapısıdır. Bu nedenle analizlerde COMSOL programının otomatik atadığı oldukça iyi seviyedeki mesh yapısı kullanılmıştır (Şekil 2.8). Ek olarak manyetik alan çözümlemesinin daha iyi olması için bobin sınırındaki ağların sayıları arttırılmıştır (Çizelge 2.2). Malzemelerin üzerindeki dalma derinliğini gözlemlemek amacıyla katı geometrilere 0.1 mm kalınlığında sınır tabakası eklenmiştir. Bu sınır tabaka sayesinde kovan ve diğer katı geometrilerdeki dalma derinliği görselleştirilmiştir. Son olarak çözüme gidilmeden önce, programın frekans değerini otomatik olarak 1MHz aldığı kısım, deneysel ölçümlerle belirlenen 50 Hz ile değiştirilmiştir.



Şekil 2.8 : Çıkış kesitine ait ağ (mesh) yapısı.

Çizelge 2.2 : Ağ yapısının özellikleri.

Parametre	Değer
Minimum Element Kalitesi	0,01554
Ortalama Element Kalitesi	0,9341
Üçgen Element Sayısı	169954
Dörtgen Element Sayısı	4164
Kenar Element Sayısı	26394

### 2.3 Belirsizlik Analizi

İndüksiyonlu hava ısıtma sistemi üzerine yapılan bu tez kapsamında, deneysel ve teorik anlamda çalışmalar yapılmıştır. Belirsizlik başlığı altında; dataların analizinde meydana gelen hataları, hassasiyeti ve deneysel ölçümlerin geçerliliğini tespit etme hususunda izlenmesi gereken yöntemler verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda ölçüm ve belirsizliklerden dolayı hatalar meydana gelir. Bazı hatalar, işin doğası gereği rastgele şekilde meydana gelirken, bazı hatalar deneyi yapan kişilerden kaynaklanır. Deneyler yapıldıktan sonra beklenen sonuçlara yakın değerler elde edildiği takdirde hata olup olmadığını anlamak oldukça zordur. Bu nedenle ideal ve tutarlı bir deney sonucu elde etmek isteyen bilim insanı, başlıca data analizlerini yapmalıdır.

Deneysel hataların çoğu deneylerin tekrarlanmamasından kaynaklanmaktadır. Ancak ölçüm cihazında ortaya çıkabilecek hata durumu sonuçların, çoklu deney uygulamasına rağmen hatalı çıkmasına neden olacaktır. Deneysel datalardaki gerçek hatalar, daima üstü kapalı bir şekilde anlaşılmayacak şekildedir ve kuşku duyulmasına neden olur. Belirsiz koşullarda bir gözlemin nasıl olabileceği, belirsizlik analizleri ile belirlenir. Deneysel belirsizliğin makul bir tanımı, bir hatanın olabileceği mümkün olan bir değeri seçerek yapılabilir. Bu belirsizlik, deney şartlarına bağlı olarak birçok ilişkiyle ilgili olabilir. Pratik hayatta her iki terimde kullanılmaktadır, ancak her iki terim arasındaki anlam farkı ve birbiri ile arasındaki etkileşimi bilinmelidir (Holman, 2011).

Sağduyu ana prensibi ile hata analizinde, hata oranları bilinen ölçüm cihazlarından ölçülen değerler gerekli denklemde yerine konur. Nominal değer bulunmasının ardından, '±' belirsizlik değerleri göz önünde bulundurularak maksimum ve minimum sonuçlar elde edilir ve aradaki fark belirsizliği ifade eder.

Deneysel sonuçlarda ki belirsizliğin tahmin edilmesinde daha hassas bir metot ise, Kline and McClintock tarafından sunulmuştur (Holman, 2011).

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

Denklem (2.21) ile belirsizliğin tahmin edilmesinde yaygın şekilde kullanılan ifade verilmiştir. Bu tez çalışmasında da belirsizlik değerleri denklem (2.21) ile ifade edildiği gibi bulunacaktır.



### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tezde, sıkıştırılabilen akışkan ısıtma amaçlı olarak geliştirilen ilk indüksiyonlu hava ısıtıcı prototipi üzerinde akış parametrelerinin enerji verimine etkisi üzerinde durulmuştur. İndüksiyonlu akışkan ısıtıcılarında verimin arttırılmasına yönelik metod geliştirilmesi amaçlanmıştır. Verimlerin hesaplanması ve doğrulanması için sistemde meydana gelen kayıplar tespit edilmiştir.

İndüksiyonlu akışkan ısıtıcısının temel prensibi, manyetik alan sayesinde ferro-manyetik ısıtıcı bir malzeme ile akışkana ısı transferinin sağlanmasıdır. Esasen, çalışma prensibi açısından, indüksiyonlu akışkan ısıtıcılar, günlük hayatta sıklıkla kullandığımız saç kurutma makinelerinin endüstriyel ve büyük ölçekli olanlarına benzetilebilir. İndüksiyonlu ısıtma sistemlerinde temel ısı kayıpları, doğal taşınım ve ışınım kayıplarıdır. Bu kayıplara ek olarak; havanın ısınması ile meydana gelen kinetik enerji değişimi kaybı, havanın hareketi sonucu meydana gelen sürtünme ve boşaltma kayıpları da söz konusudur. Kinetik enerji değişimi, sürtünme kaybı ve boşaltma kaybının, taşınım ve ışınım ile meydana gelen kayıplara kıyasla miktarı düşüktür.

Isı kayıpları ve termal verimin üzerinde yüzey alanının büyük etkisi bulunmaktadır. İndüksiyonlu hava ısıtıcısı sisteminde akışkan giriş kapağı, kovan ve çıkış kapağına temas ederek geçer. Sistem yüzeyinde meydana gelen ısı kayıplarının hesaplamalarında, kovan ve kapaklar ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu şekilde ısıtma görevi üstlenen her parçada kayıpların maksimum olduğu noktalar tespit edilmiştir. Yaptığımız çalışmada, indüksiyonlu hava ısıtıcısı sisteminde debi ve kapak geometrileri değiştirilerek, yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarından elde edilen bulgular analiz edilmiştir. Çalışmanın bazı bölümlerinde debi değerleri, kolaylık sağlaması açısından miktarına göre;

$$\dot{m}_1: 0,01 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_2: 0,02 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_3: 0,03 \text{ kg/s}$$

şeklinde ifade edilmiştir.

İndüksiyonlu akışkan ısıtıcısı deney sisteminde, çıkış geometrilerine göre K tipi olarak tanımlamalarda bulunulmuştur. Bunlar;

*K-0* : 45 mm çıkış çapına sahip stub-end (Ünver, 2016),

*K-1* : 60 mm çıkış çapına sahip stub-end,

*K-2* : 90 mm çıkış çapına sahip konik redüksiyon,

*K-3* : 114 mm çıkış çapına sahip konsantrik redüksiyon,

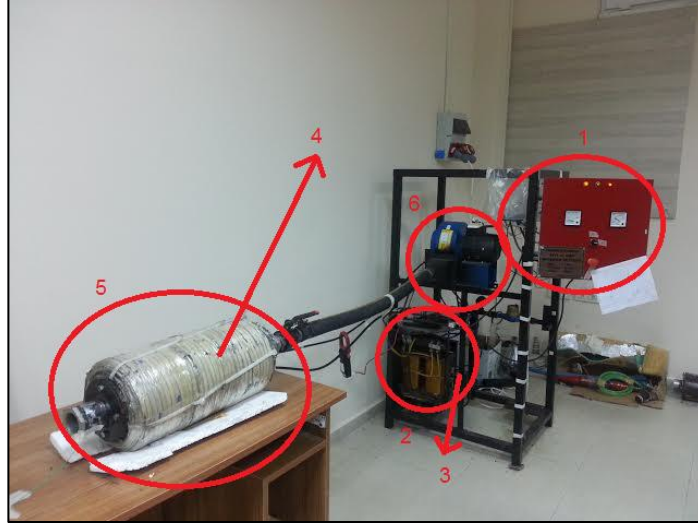
*K-4* : Çıkış kapağı bulunmayıp, hava çıkışının doğrudan kovandan sağlandığı (140 mm) geometridir.

### 3.1 İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Deney Sistemi ve Ölçüm Aletleri

İndüksiyonlu hava ısıtıcısı deney sistemi, 6 ana kısımdan oluşmaktadır. Şekil 3.1’de gösterilen numaralandırmaların karşılıkları;

- 1) Elektrik enerjisinin bobinlere gönderilmeden önce regüle edildiği kontrol ünitesi,
- 2) Şebekeden çekilen gücü, bobin uçlarına yüksek akım ve düşük gerilimle gönderen oto transformatör,
- 3) Bobinin yaratmış olduğu reaktif gücün kompanzasyonu için sisteme paralel bağlı kondansatörler,
- 4) Manyetik alan kaynağı bobin,
- 5) İndüksiyonlu hava ısıtıcı prototipi ve
- 6) Havanın kovandan geçmesini sağlayan radyal fan şeklindedir.

İndüksiyonlu ısıtma sistemi yaklaşık gücü 1100 W civarında ve 50 Hz. şebeke frekansıyla çalışmaktadır. Sisteme enerji bir oto-trafoyla 110 V gerilimle sağlanmaktadır. Oto-trafo, bobin ve 5 kVAr, 400 V, 50 Hz, 12,5 A değerlerine sahip 3x33 (-5+10%)  $\mu$ F gücündeki 3 adet paralel bağlı kondansatör grubu birbirlerine üçgen bağlanmıştır. Deney düzeneğinde havalandırma kanallarındaki akışı benzetmek üzere POBRA 180-70 tipi, 230 V, 50 Hz, 1100 W ve 75 dBa değerlerine sahip 1950 m<sup>3</sup>/h’lik radyal fan kullanılmıştır. Radyal fanlar diğer birçok fan çeşidinde olduğu gibi hacimsel akış elemanıdır. Çıkış kısmına yerleştirilen ventil ile akışkan debisi ayarlanmaktadır.



**Şekil 3.1** : K-1 tipi induksiyonlu hava ısıtıcısı deney sistemi görüntüsü.

İndüksiyonlu hava ısıtıcı deney sisteminin en önemli parçası olan induksiyonlu hava ısıtma prototipi ise 7 kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar giriş uzatması, giriş kapağı, kovan, çıkış kapağı, çıkış uzatması, bobin sargıları ve yalıtım şeklindedir. Bobin sargıları tek sıra 34 spir ve 11 kat olmak üzere toplamda 374 spirden oluşmaktadır. Prototipin bileşenleri Şekil 3.2 ile verilmiştir.



**Şekil 3.2** : K-1 tipi induksiyonlu hava ısıtıcısı görüntüsü.

Şekil 3.2 ile gösterilen numaralandırmalar;

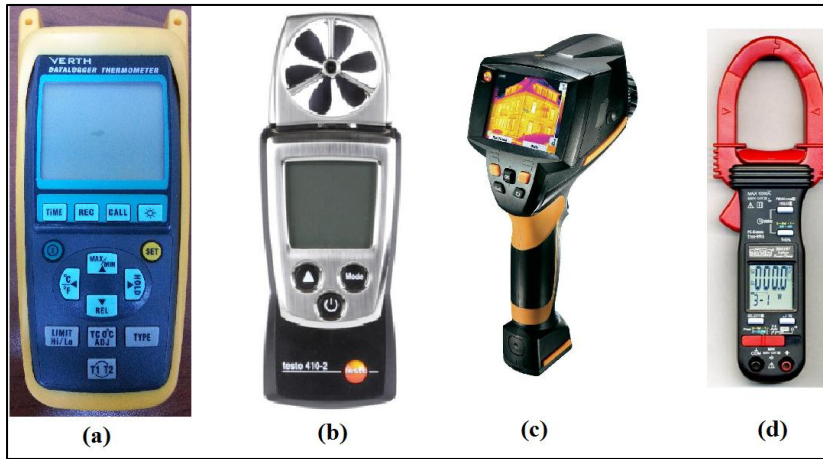
- 1) Çıkış kapağı,
- 2) Sızdırmazlık elemanı (Conta),
- 3) İndüksiyon bobini,
- 4) İzolasyon (Yüksek sıcaklıklara dayanıklı termoplastik),
- 5) İzolasyon (Cam elyafi),
- 6) Kovan,
- 7) Giriş kapağını ifade etmektedir.

Bobini oluşturan her spir bakır kablo ve etrafına sarılı cam elyaftan oluşmaktadır. Her spirin ölçüleri ve kesit teknik resmi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Bobin ve cam elyaftın spir özellikleri.

Bileşen	Kısa Kenar (mm)	Uzun Kenar (mm)	Teknik Resim
Bobin	2,5	11,95	
Cam Elyaf	3,5	12,95	

Yapılan deneyde havanın çıkış hızını ölçmek amacıyla anemometre, ortam sıcaklığını ve çıkış sıcaklığını ölçmek amacıyla termometre kullanılmıştır. Prototipin yüzey sıcaklığı, termal kamera ile gözlemlenmiştir. Şebekeden çekilen aktif gücü ve bobindeki aktif gücü ölçmek amacıyla iki adet pensampermetre kullanılmıştır. Kullanılan ölçü aletlerinin özellikleri ve hassasiyetleri Çizelge 3.2’de, görünüşleri Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3 : (a) Termometre<sup>[8]</sup>. (b) Anemometre<sup>[9]</sup>. (c) Termal Kamera<sup>[10]</sup>. (d) Pensampermetre<sup>[11]</sup>.



**Çizelge 3.2 : Ölçü aletlerinin özellikleri ve hassasiyetleri.**

<b>Ölçüm</b>	<b>Cihaz</b>	<b>Ölçüm Aralığı</b>	<b>Hassasiyet</b>
Giriş noktasında sıcaklık ölçümü.	K tipi termokupllu dört kanallı VERTH-BT-7xxx tipi anlık veri kaydetme özellikli termometre	-100 C ~1300 C (-148 F~2372 F)	± (0,1% rdg + 0,7 °C)
Çıkış noktasında sıcaklık ölçümü	K tipi termokupllu dört kanallı VERTH-BT-7xxx tipi anlık veri kaydetme özellikli termometre	-100 °C ~1300 °C (-148 °F~2372 °F)	± (0.1% rdg + 0,7 °C)
Çıkış noktasında hız ölçümü	TESTO 410-2 Anemometre	80 ~ 4000 ft/dk (0,4 ~ 20 m/s)	(±0.2 m/s ± 2 % m.v.)
Üst yüzey sıcaklık dağılımı ölçümü	TESTO 875 Termal Kamera	0 ~ +280 C	±2 C, ±2 % of m.v.
Bobinin güç ölçümü	BRYMEN BM-157	0 ~ 600 kW	±(4,5% + 6 digits)
Şebekeden çekilen güç ölçümü	BRYMEN BM-157	0 ~ 600 kW	±(4,5% + 6 digits)

Sistem elektriksel olarak şebekeye bağlandıktan sonra sırasıyla fana ve bobine güç verilmiştir. Daha sonra ölçümler her beş dakikada bir anlık ve eş zamanlı olarak alınmıştır. Deneyde anlık olarak prototipin termal kamera görüntüsü çekilmiş, ortam ve çıkış sıcaklığının yanında çıkış hızı ölçülmüş, bobine giden ve şebekeden çekilen güç değerleri okunmuştur.

Deneyde güç ölçümü için iki adet pensampermetre kullanılmıştır. Bunlardan biri bobinin sahip olduğu gücü, diğeri şebekeden çekilen gücü gösterecek şekilde sisteme bağlanmıştır. Bu doğrultuda pensampermetrenin krokodilleri, bobinden ölçüm almak için kontrol ünitesinde bulunan bobinin bağlantı terminallerine, şebeke için ana sigortanın giriş ve çıkış terminallerine bağlanmış, pensampermetrenin kablosuz kısmı ise bobinden ölçüm almak için bobine giden kabloya, şebekede sigortaya giren kabloya asılmıştır. Pensampermetrenin sahip olduğu diferansiyel devre sayesinde güç

değeri ve güç faktörü belirlenen gerilim ve akım değerleri ile anlık olarak hesaplanarak cihazın ekranından okunmuştur.

Ortam sıcaklığını ve havanın prototipten çıkış sıcaklığını ölçmek amacıyla termometre kullanılmıştır. Termometrenin sahip olduğu iki adet termokupoldan biri çıkış uzatmasının ucuna, diğeri ise prototipten çıkan havadan etkilenmemesi için uygun bir yere sabitlenmiştir.

Çıkış hızının ölçümü anemometre ile yapılmıştır. Ölçüm yapılırken anemometre çıkış ağzı etrafında dolandırılarak ortalama bir değer okunmuştur.

Termal kamera görüntüleriyle prototipin sıcaklık dağılımı tespit edilmiştir.

Sistem sürekli rejim şartlarını sağlayana kadar deney ölçümleri 5 dk aralıklarla alınmıştır. Havanın değerlerinde değişim olmayacağı için, sürekli rejime ulaşan sistemden ölçüm alınmamıştır. Deneyler esnasında sistemin sürekli rejim şartlarına uygunluğu denklem (4.1) ile belirlenmiştir.

$$\Delta T_{\varepsilon} = \frac{(T_{i-1} - T_{i-2}) + (T_i - T_{i-1}) + (T_{i+1} - T_i) + (T_{i+2} - T_{i+1})}{4} < 0,3 \quad (4.1)$$

Hesaplamalarda sistemin cidar kalınlığının ince olmasından, kovanın dış yüzey sıcaklık dağılımı ile iç yüzey sıcaklık dağılımı eşit kabul edilmiştir (Shokouhmand ve Ghaffari, 2012). Cidar kalınlığının inceliği kovan malzemesinin içinde meydana gelen iletim ile ısı transferinin de ihmal edilmesini sağlamıştır.

Bu bölümde araştırma bulguları, indüksiyonlu ısıtma sisteminde havanın sistemden çıktığı bölgenin çapına göre, küçükten büyüğe doğru sıralanarak verilecektir.

### 3.2 K-1 Tipi İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Bulguları ve Analizi

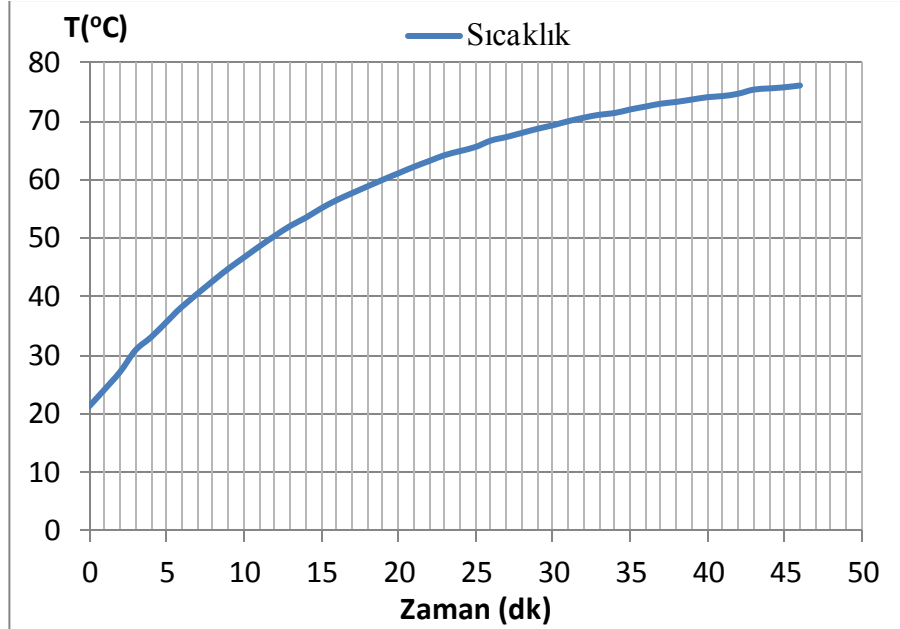
K-1 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı tasarımında, kovanın giriş ve çıkışında 60 mm çapında, stub-end geometrisinde hava geçişinin sağlanacağı kapaklar bulunmaktadır (Şekil 3.4). Şekil 3.5 ile gösterildiği gibi kovan içerisinde, giriş ve çıkışa yakın bölgelerde koni şeklinde akım düzeltici plakalar bulunmaktadır. Isı, havaya kovan ve kapaklardan transfer edilmektedir.



Şekil 3.4 : K-1 prototipinin çıkış kapağı görüntüsü.



Şekil 3.5 : Akış düzeltici konik plaka.



Şekil 3.6 : Geçici rejimde K-1 prototipinden havanın çıkış sıcaklıkları.

K-1 prototipi deneylerinden elde edilen veriler Çizelge 3.3 ile verilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler analiz edilerek Çizelge 3.4 elde edilmiştir. Sadece  $\dot{m}_1$  debi değerinde değerlendirilen sistem, 45 dk'da sürekli rejim şartlarına ulaşmıştır. 45 dakikalık geçici rejim şartlarında havanın sistemden çıkış sıcaklıklarındaki değişim Şekil 3.6 ile gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3 :** K-1 prototipi deney sonuçları.

<b>Parametre</b>	<b><math>\dot{m}_1</math></b> (kg/s)	<b>t</b> (h)	<b>T<sub>çıkış, hava</sub></b> (°C)	<b>V<sub>çıkış, hava</sub></b> (m/s)
<b>Yalıtımsız</b>	0,01	1,5	76,1	9,8

Sistemin sürekli rejime girip girmediğinin gözlemlenebilmesi için son 5 dakikalık bölümde sürekli rejim sıcaklıklarına ulaşılsa da deneye devam edilmiştir. Burada sürekli rejim şartlarından kasıt, havanın çıkış sıcaklık değerlerinde fark olmamasıdır.

**Çizelge 3.4 :** K-1 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı analiz sonuçları.

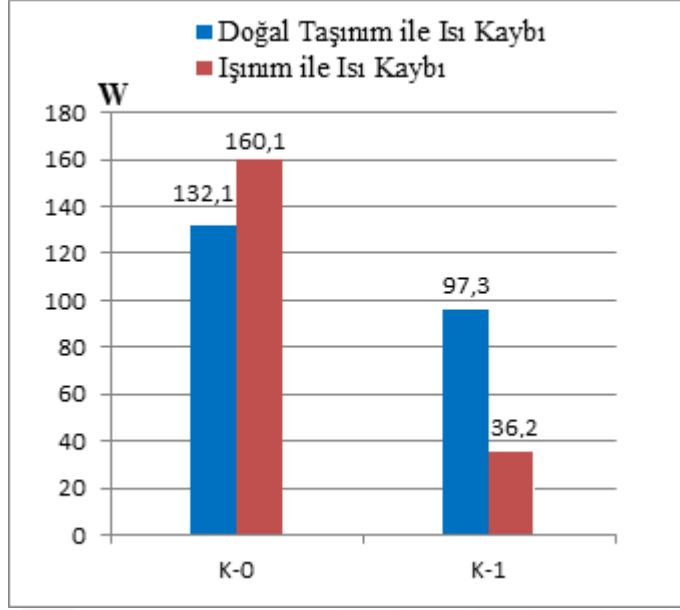
<b>Parametre</b>	<b>Yalıtımsız</b>
<b>P<sub>bobin</sub></b> W	931,6
<b>Q<sub>hava</sub></b> W	524,5
<b>P<sub>taşınım</sub></b> W	97,3
<b>P<sub>ışınım</sub></b> W	36,2
<b><math>\eta_{\text{termal}}</math> %</b>	<b>56,3</b>

**Çizelge 3.5 :** K-0 ve K-1 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı parametreleri.

Parametre		Yalıtımsız	
		K-0 (Disksiz)	K-1
$\dot{m}$	kg/s	0,06	0,01
$t$	h	0,67	0,75
$P_{\text{bobin}}$	W	1200	931,6
$Q_{\text{hava}}$	W	369,2	524,5
$T_{\text{çıkış, hava}}$	°C	61,1	76,1
$V_{\text{çıkış, hava}}$	m/s	10,37	9,8
$\eta_{\text{termal}}$	%	<b>29,09</b>	<b>56,3</b>

Çizelge 3.5'ten de görüldüğü gibi, K-0 sisteminde, debi miktarının ve sisteme verilen elektrik enerjisi miktarının daha fazla olmasına rağmen termal verim, K-1 sisteminden düşük çıkmıştır. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, K-0 tipi prototipin ısı kaybı miktarı, K-1 tipine göre daha fazladır.

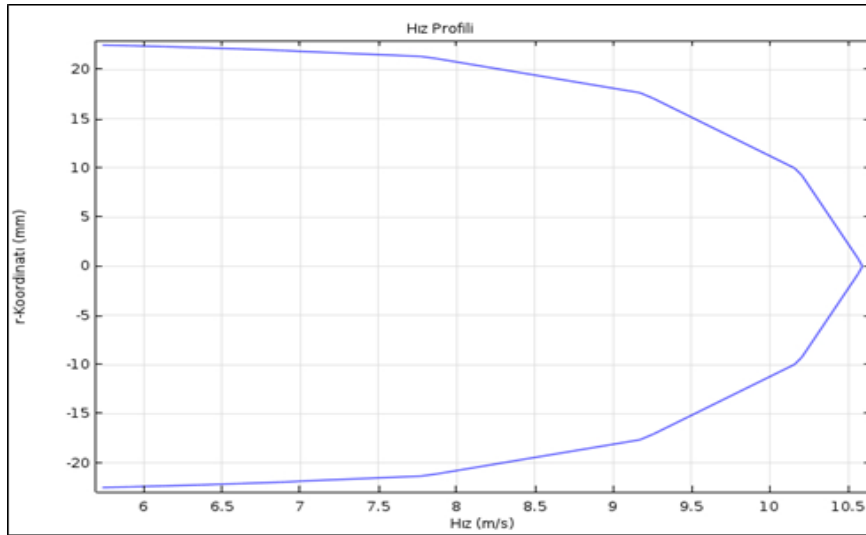
K-1 tipi ısıtıcı modeli, literatürdeki ilk indüksiyonlu akışkan ısıtıcısı olan düşük verimli K-0 modelinin (Ünver, 2016) verimini arttırmak üzere tasarlanmıştır. Her iki prototip karşılaştırılırken, değişken sayısının en aza indirilmesi esas alınmıştır. K-1 deney düzeneğinde kovana disk yerleştirilmemiştir. Bu nedenle, K-0 tipi geometriye sahip tasarımın K-1 tipi ile karşılaştırılmasının sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi için disklerin kullanılmadığı deneyler incelenmiştir. Çizelge 3.5'de K-0 ve K-1 geometrilerinin deneylerinden ve analiz sonuçlarından elde edilen veriler gösterilmiştir. Şekil 3.7'de ise, K-0 ve K-1 geometrilerinin kullanıldığı deneylerde, doğal taşınım ve ışınım ile meydana gelen ısı kayıpları ifade edilmiştir.



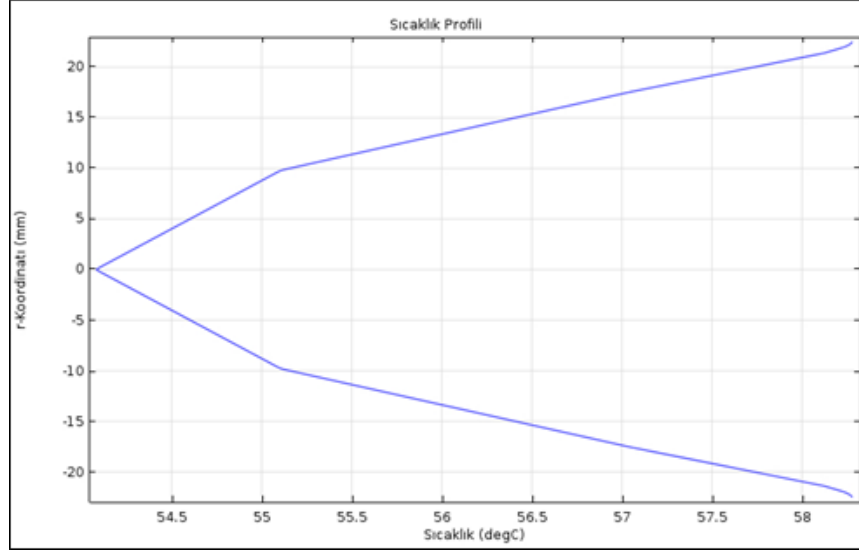
Şekil 3.7 : K-0 ve K-1 prototiplerinde doğal taşınım ve ışınım ile ısı kayıpları.

### 3.2.1 K-1 prototipi COMSOL analizi

COMSOL paket programı ile yalıtımsız sistem özellikleri,  $\dot{m}_3$  debi değerinde göz önüne alınmıştır. Yapılan analizlere göre K-1 tipi indüksiyonlu ısıtıcının havanın çıkış hız profili Şekil 3.8 ile verilmiştir. Şekil 3.9'da ise K-1 prototipinin çıkış sıcaklık profili verilmiştir.

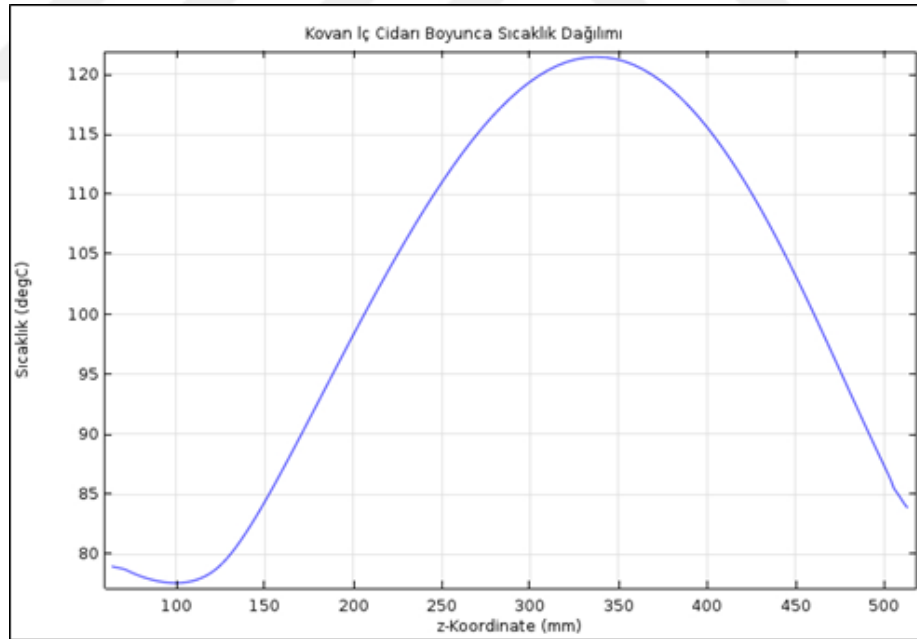


Şekil 3.8 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının çıkış hız profili.



**Şekil 3.9 :** Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının çıkış sıcaklık profili.

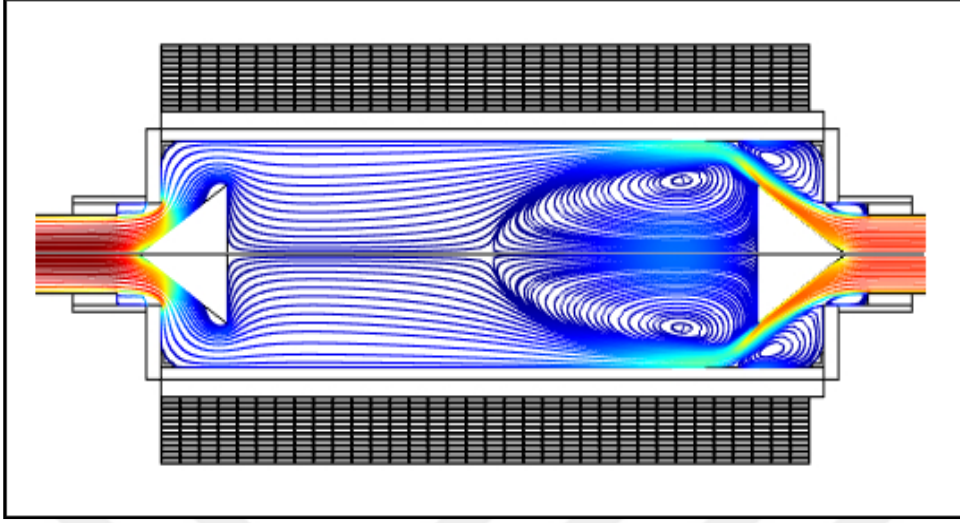
Şekil 3.8'e bakıldığında, r-koordinatında tam orta noktada maksimum hız değerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu durum boru içi laminar akış profili oluştuğunu göstermektedir. Kovanda, giriş ve çıkış kapağında cidarların iç yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 3.10 ile verilmiştir.



**Şekil 3.10 :** Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının iç cidarında oluşan sıcaklık dağılımı.

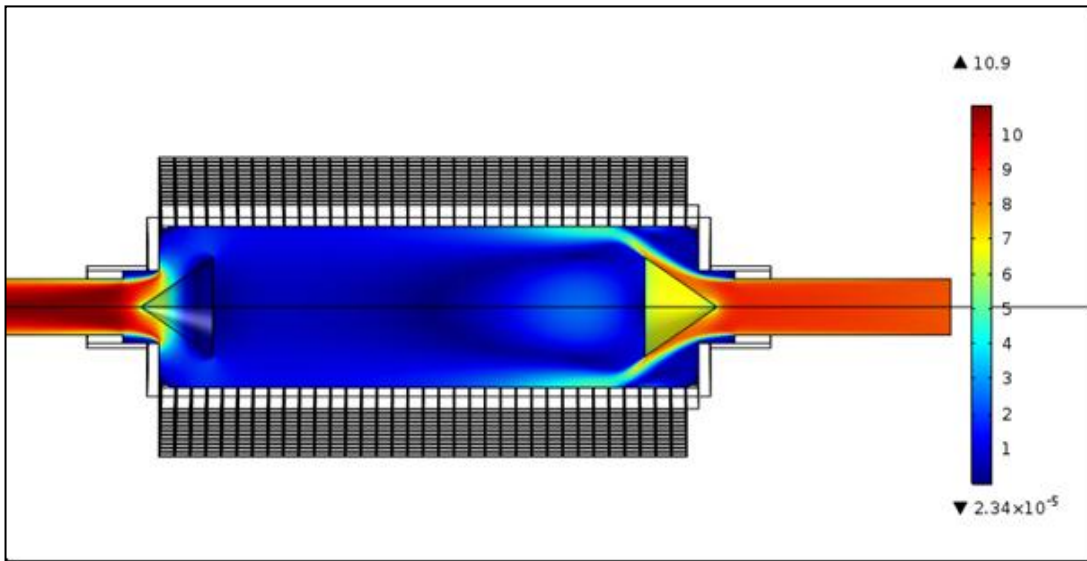
Şekil 3.10'da görüldüğü gibi kovan bölümünde, iç yüzey sıcaklığı maksimum seviyeye ulaşmıştır. Kovanın dış tarafında bobin bulunması, dış yüzey sıcaklığının kapaklara oranla daha düşük sıcaklıkta olmasını sağlamıştır. Benzer şekilde kapaklarda bobin bulunmaması dış yüzey sıcaklığının daha yüksek olarak

gözenmesine neden olmuştur. Asıl ısı transferinin gerçekleştiği iç cidar yüzey sıcaklığını dikkate almak gerekmektedir.



Şekil 3.11 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcı cidarının hız akım çizgileri.

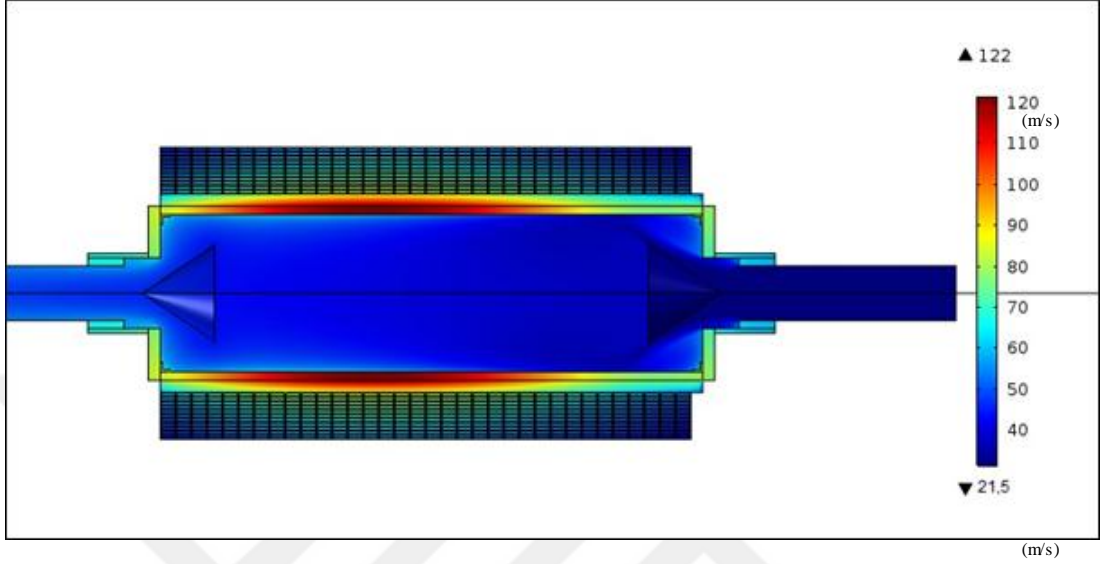
Şekil 3.11 ile Comsol programı ile K-1 tipi ısıtıcı üzerinde yapılan analizlerden ulaşılan hız akım çizgileri fikir vermesi açısından verilmiştir. Giriş bölgesinde meydana gelen vorteksler açık bir şekilde görülmektedir. Bu türbülans bölgelerinde akışkanın daha fazla ısı transferine maruz kalması düşünülse de, meydana gelen kinetik enerji değişimi bu iyileştirmenin azalmasına neden olmuştur. Bu nedenle kovan içerisinde kullanılan konik plakalar diğer K tipi ısıtıcı sistemlerinde kullanılmamıştır.



Şekil 3.12 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının hız konturu.

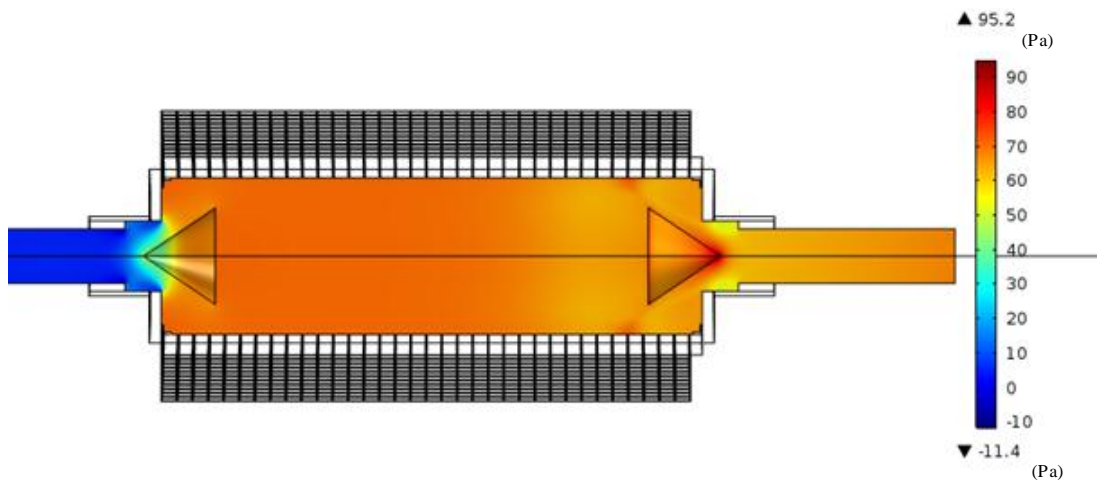


Şekil 3.12'de K-1 ısıtıcısının hız konturuna bakıldığında, sistem giriş ve çıkışında çap daralması nedeniyle hız artmıştır. Havanın kovan içinde ısınması ile yoğunluğunda meydana gelen azalma, çıkıştaki hızın girişe göre daha fazla olmasını sağlamıştır.



Şekil 3.13 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının sıcaklık konturu.

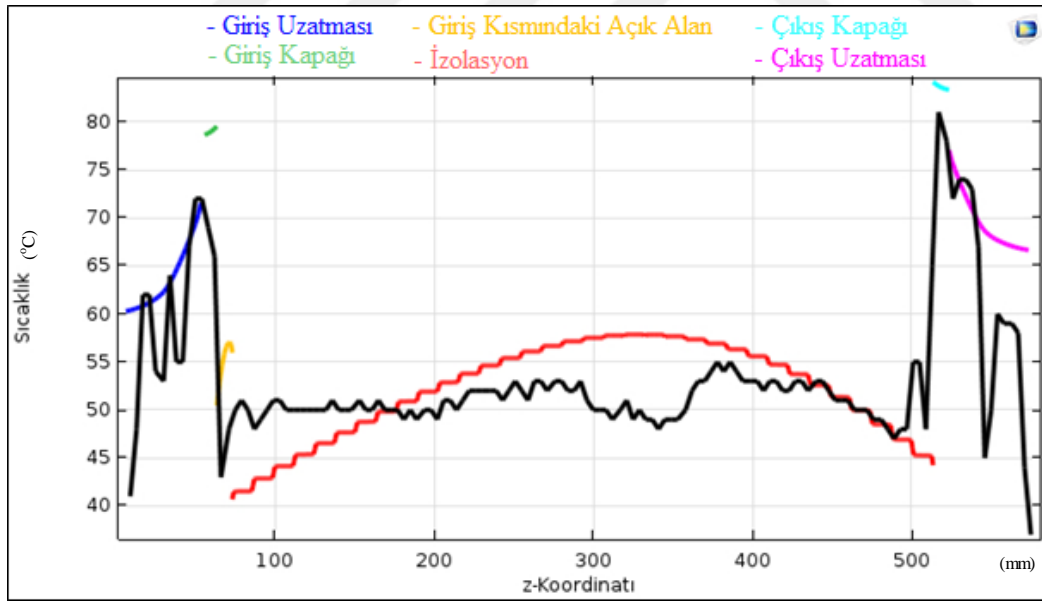
Sürekli rejim durumuna gelen K-1 ısıtıcısında ortaya çıkan sıcaklık konturu Şekil 3.13 ile verilmiştir. Burada, havanın ortam sıcaklığında sisteme giriş yapması, kovanda meydana gelen ısınmanın sol tarafa doğru kaymasına neden olmuştur. Bu, kovanın giriş bölgesinde oluşturulan ısının havaya daha çok aktarıldığı anlamına gelmektedir.



Şekil 3.14 : Yalıtımsız K-1 tipi ısıtıcının basınç konturu.

Sistem içerisinde oluşan ısı transferleri nedeniyle akışkanın hızında meydana gelen değişiklikler, basınç konturunun incelenmesini de gerektirmiştir. Havanın sıkıştırılabilir akışkan olması dolayısıyla sisteme girerken sahip olduğu basınç değeri, konik plakanın uç noktasında en yüksek değerine çıkmıştır (Şekil 3.14). Sistem içerisinde ısınmaya başlayan akışkanın basınç değeri az miktarda artarken, sistem çıkışında kesit daralması ile basınç değeri en düşük değerine sahip olmuştur.

Şekil 3.15 ile verilen değerler termal kamera ve Comsol paket programı ile elde edilen verilerdir. Siyah ile termal kamera görüntüleri ifade edilirken, Comsol sonuçları renkli çizgiler ile belirtilmiştir. Her iki sıcaklık dağılımında da benzerlik olduğu görülmektedir. Giriş ve çıkış kapaklarının dış yüzey sıcaklıkları, kovan bölgesine göre daha yüksektir. Mor renk ile gösterilen çıkış uzatmasının yüzey sıcaklığı, giriş kapağının yüzey sıcaklığından daha yüksek çıkmıştır. En yüksek sıcaklık değeri kovan ve kapakların bağlantı noktalarında meydana gelmiştir. Kovan bölgesinde, bobin sarımlarında kalınlık farkı nedeniyle sıcaklık değeri dalgalı bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca Comsol'da sıcaklık dağılımı üniform olarak atandığı için deneysel bulgulara oranla daha düzgün geometriye sahip olmuştur.



Şekil 3.15 : COMSOL ve termal kamera ile elde edilen dış cidar sıcaklık dağılımları.

### 3.3 K-2 Tipi İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Bulguları ve Analizi

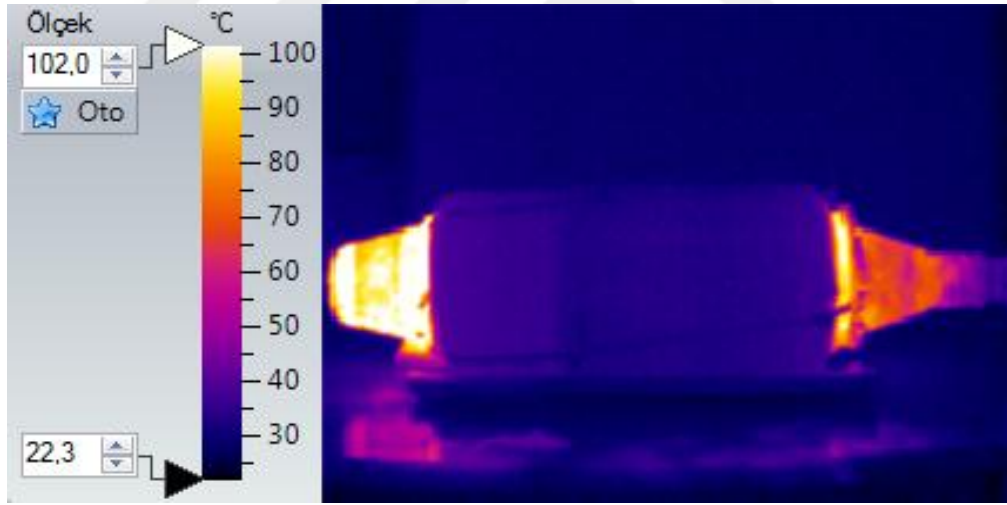
K-2 tipi indüksiyonlu hava ısıtma deney düzeneğinde kovan çıkışı, Sch 40 standardına uygun, 140x90 mm boyutunda konik redüksiyon geometrisine sahiptir.

Sistem girişinde ise 129 mm uzunluğunda, 140x68,5 mm boyutunda konik redüksiyon mevcuttur. Çıkış kesitinin görüntüsü Şekil 3.16'da verilmiştir.

Akışkan ısıtıcısının K-2 tipi üzerinde yapılan analizlerde  $\dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_2$  ve  $\dot{m}_3$  debilerinde yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar incelenmiştir. K-2 prototipi, K-1 prototipi ile kıyaslanmıştır.



Şekil 3.16 : K-2 prototipinin çıkış kapağı (konik redüksiyon) görüntüsü.



Şekil 3.17 : K-2 prototipinin sürekli rejim şartlarındaki örnek termal kamera görüntüsü.

Isı kayıpları hesaplamalarında kullanılan yüzey sıcaklık değerleri, termal kamera ile ölçülmüş ve Şekil 3.17'de verilmiştir. Burada, en yüksek yüzey sıcaklığının çıkış kapağında, en düşük yüzey sıcaklık değerlerinin de kovan bölgesi üzerinde bulunduğu görülmektedir. Kovan bölgesinin bu düzeyde düşük yüzey sıcaklığına sahip olmasındaki en büyük etken, bobinlerin kovan üzerinde yalıtım görevi üstlenmesidir. Kovan gibi manyetik alan içerisinde kalan giriş ve çıkış kapakları da yüksek sıcaklıklara çıkmıştır. Buna ek olarak, hava kovan başlangıç bölgesinde

meydana gelen ısı enerjisinin bir kısmını çıkış redüksiyonuna taşımıştır. Bu nedenle çıkış kapağı giriş kapağına oranla daha yüksek yüzey sıcaklık dağılımına sahiptir. K-2 tipi indüksiyonlu akışkan ısıtma deney sisteminden elde edilen veriler Çizelge 3.6 ile verilmiştir. Deneylerden yola çıkarak yapılan analizlerin sonuçları ise Çizelge 3.7 ile verilmektedir.

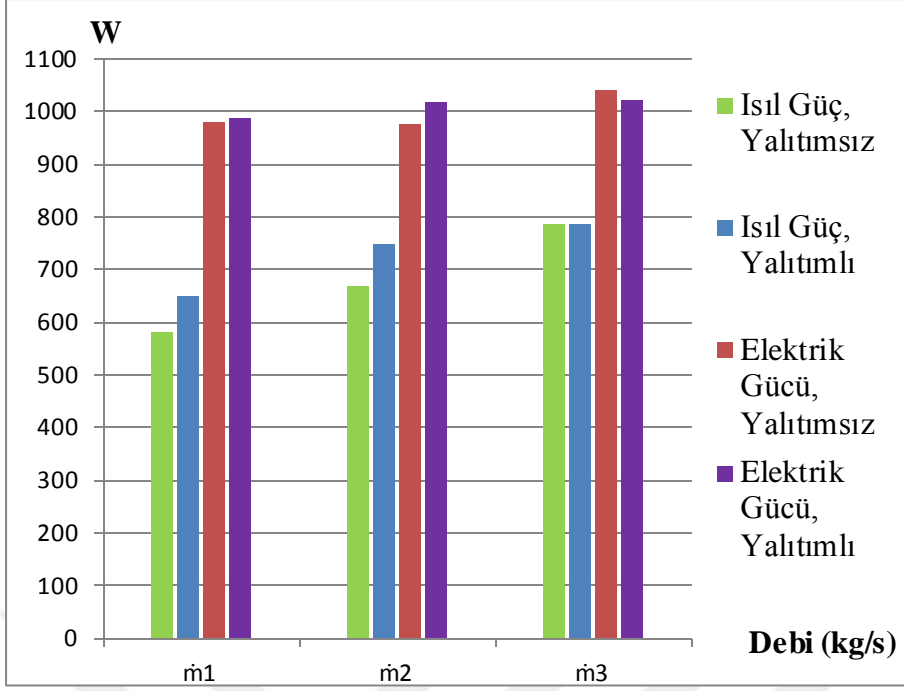
**Çizelge 3.6 :** K-2 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısından elde edilen deneysel veriler.

Parametre		Yalıtımsız			Yalıtımlı		
$\dot{m}$	kg/s	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
$t_{\text{geçici rejim}}$	h	1,50	1,42	1,08	1,25	1,33	1,25
$T_{\text{çıkış,hava}}$	°C	88,65	62,05	49,85	72,10	60,60	52,80
$V_{\text{çıkış,hava}}$	m/s	2,00	3,45	5,45	2,90	4,20	5,35

Çizelge 3.6 ve 3.7'den görüldüğü gibi K-2 prototipinde debi artışı ve yalıtım ile sistemin termal verimi artmıştır. En yüksek termal verim; yalıtım malzemesi kullanılan,  $\dot{m}_3$  debisine sahip deneyden elde edilmiştir. Yalıtım sayesinde, taşınım ve ışıma ile meydana gelen ısı kayıpları azalmıştır. Kinetik enerji ve sürtünme kayıpları, sistem kayıplarının çok küçük miktarını oluşturmuştur. Şebekeden alınan elektrik enerjisi dalgalanma gösterdiğinden hesaplanan elektriksel verim, her deneyde farklılık göstermiştir.

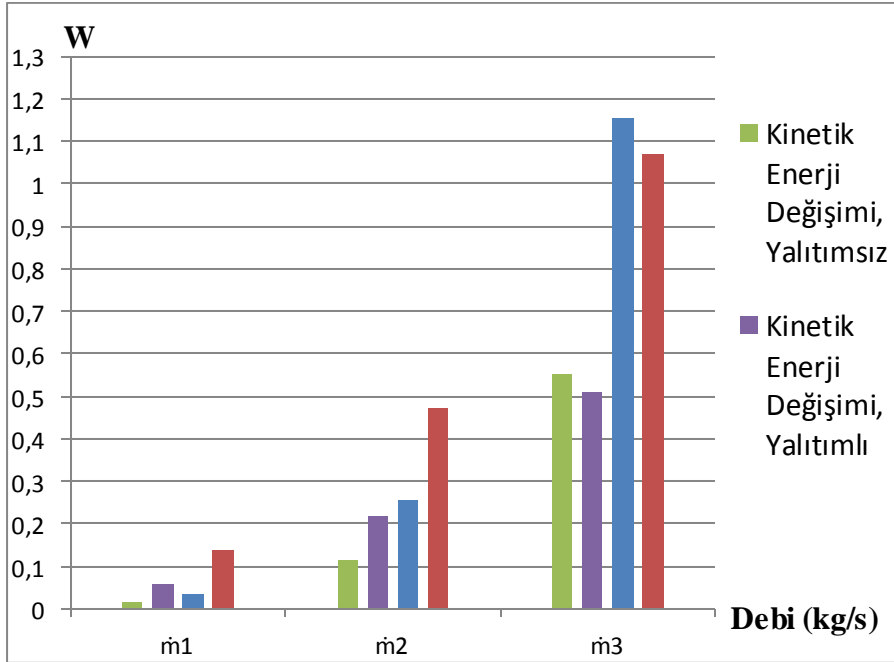
Çizelge 3.7 : K-2 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı analiz sonuçları.

Parametre		Yalıtımsız			Yalıtımlı		
$Q_{\text{hava}}$	W	581,66	667,63	785,09	650,28	746,91	788,47
$P_{\text{bobin}}$	W	981,61	978,54	1039,46	988,91	1016,83	1022,07
$P_{\text{sürtünme}}$	W	0,04	0,26	1,15	0,14	0,47	1,07
$P_{\text{taşınım}}$	W	346,97	265,81	216,91	252,26	197,31	173,49
$P_{\text{ışınım}}$	W	46,94	36,43	30,09	26,44	21,44	19,08
$\Delta KE$	W	0,01	0,12	0,55	0,06	0,22	0,51
$P_{\Sigma k}$	W	393,97	302,61	248,70	278,90	219,44	194,14
$P_{\text{diğer}}$	W	5,98	8,30	5,67	59,74	50,48	39,46
$\eta_{1.\text{Kanun}}$	%	48,65	55,14	61,34	53,50	59,60	62,76
$\eta_{\text{Termal}}$	%	<b>59,26</b>	<b>68,23</b>	<b>75,53</b>	<b>65,76</b>	<b>73,45</b>	<b>77,14</b>
$\eta_{\text{elektriksel}}$	%	82,10	80,82	81,21	81,37	81,14	81,35



Şekil 3.18 : K-2 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısından elde edilen güç değerleri.

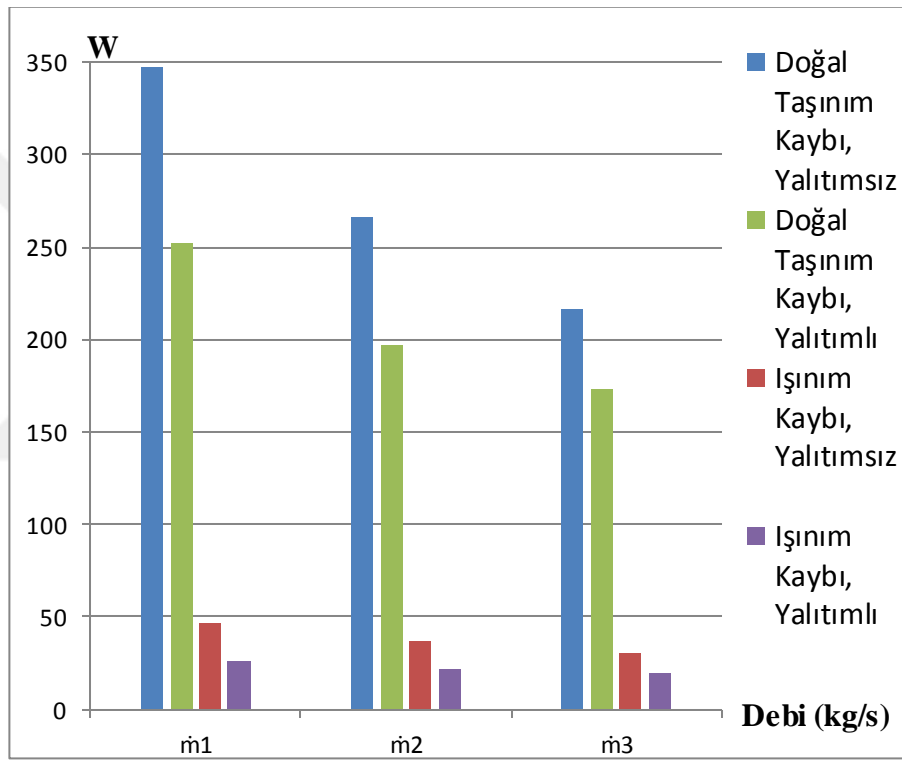
Şekil 3.18’de, elektrik gücü yaklaşık 1000 W civarında iken, akışkanı ısıtmak için bu güçten 550-800 W oranında yararlanılmıştır. Her iki yalıtım durumunda da debi artışı ile ısıl gücün arttığı gözlemlenmiştir. Bütün debi değerleri için, kovan dışına uygulanan 30 mm kalınlığındaki yalıtım malzemesi ile ısıl güç artmıştır.



Şekil 3.19 : K-2 prototipinde sürtünme ve kinetik enerji değişiminden kaynaklanan kayıplar.

Yalıtımın sürtünme kaybına doğrudan dikkate değer etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan yalıtımla daha fazla ısı transfer edildiğinden yoğunluk değişimi de daha fazla olmuştur. Debi artışı, sürtünme kaybını ve kinetik enerji değişimi ile meydana gelen kayıpların artmasına neden olmuştur (Şekil 3.19).

İndüksiyonlu hava ısıtıcılarında ısı transferi kayıpları doğal taşınım ve ışınm kayıplarından ileri gelmektedir. Taşınım ve ışınm miktarının, K2 prototipi ile elde edilen değerleri Şekil 3.20 ile verilmiştir. Yalıtım malzemesinin ısı kaybını azalttığı belirgin şekilde anlaşılmaktadır. Debinin artması ise, ısı kayıp miktarının azalmasını sağlamıştır.



Şekil 3.20 : K-2 prototipinde doğal taşınım ve ışınm ile meydana gelen ısı kayıpları.

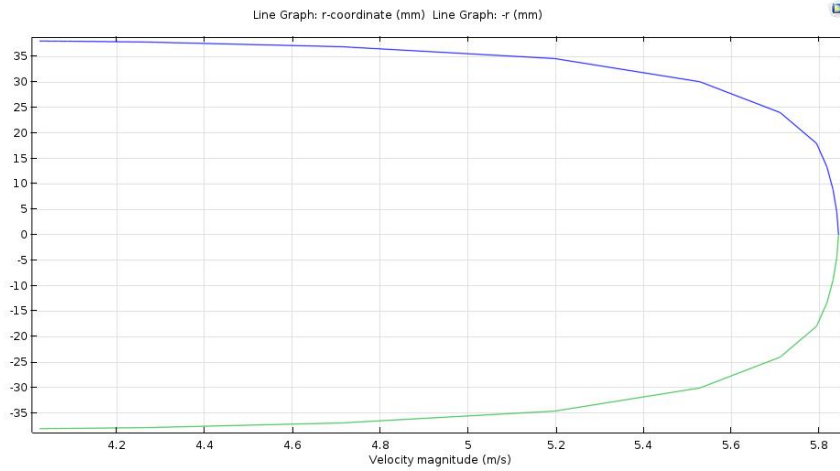
K-2 prototipi, K-1 prototipi ile kıyaslandığında, K-2'nin daha geç sürekli rejim şartlarına ulaştığı gözlenmiştir. K-1 tipinde çıkış kapağının çapı K-2'ye oranla daha küçük olması nedeniyle, aynı debide K-1 prototipinin verimi daha düşük çıkmıştır. (Çizelge 3.8). K-2 prototipinde, sistem üzerinde yapılan işlemlerin olması sonuç verdiği görülmektedir.

**Çizelge 3.8 :** Yalıtımsız K-1 ve K-2 prototiplerinden elde edilen deney parametreleri.

Parametre		K-1 Tipi	K-2 Tipi		
		(D=25 mm)	(D=90 mm)		
$\dot{m}$	kg/s	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$	$\dot{m}_3$
$Q_{hava}$	W	524,5	581,7	667,6	785,1
$P_{bobin}$	W	931,6	981,6	978,5	1039,5
$T_{çıkış, hava}$	°C	76,1	88,65	62,05	49,85
$V_{çıkış, hava}$	m/s	9,8	2	3,45	5,45
$t_{geçici rejim}$	h	0,75	1,5	1,42	1,08
$\eta_{Termal}$	%	<b>56,3</b>	<b>59,26</b>	<b>68,23</b>	<b>75,53</b>

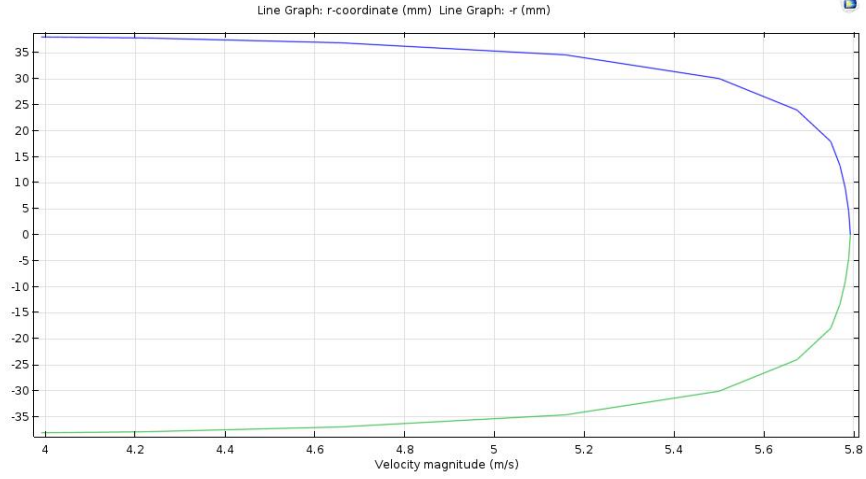
### 3.3.1 K-2 prototipi COMSOL analizi

COMSOL paket programı ile K-2 prototipinin yalıtımsız ve yalıtımlı durumları  $\dot{m}_3$  debi değerinde analiz edilmiştir.



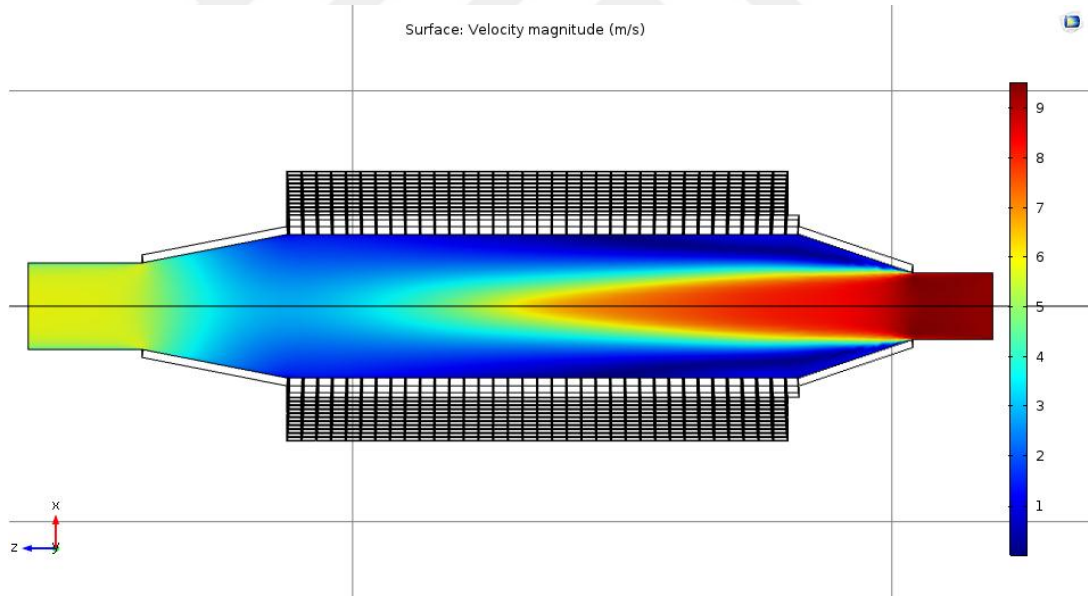
**Şekil 3.21 :** Yalıtımsız K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız profili.



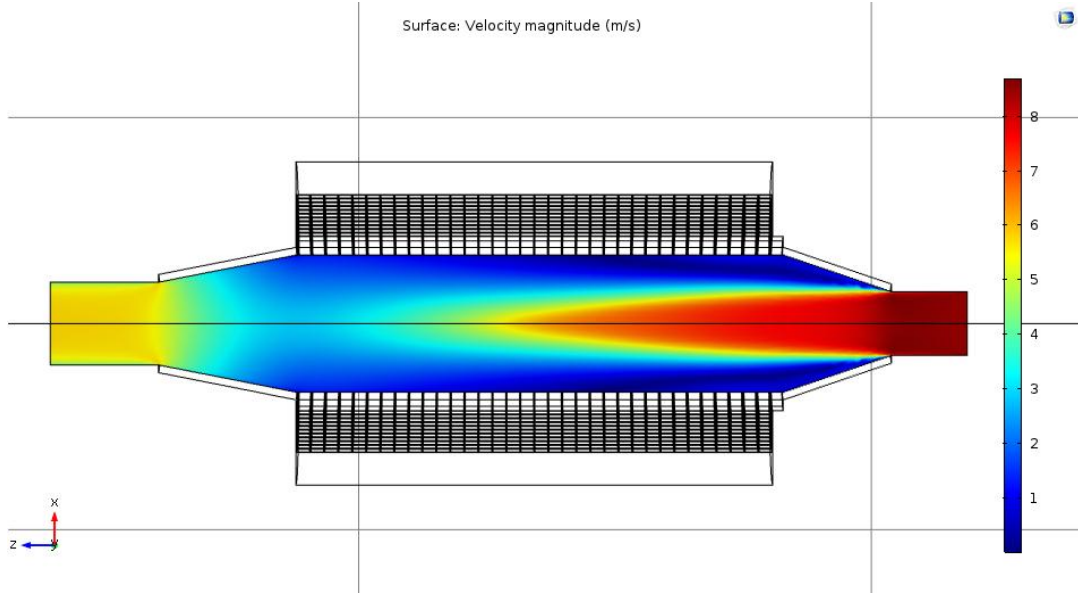


**Şekil 3.22** : Yalıtımlı K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız profili.

K-2 prototipinde yalıtımsız ve yalıtımlı durumlarında havanın çıkış hız profili Şekil 3.21 ve 3.22 ile verilmiştir. Sürekli rejim durumunda yalıtımın olup olmaması hız profilinde değişikliğe neden olmamıştır. Her iki durumda da akışkan  $r=0$  konumunda maksimum hız değerine sahip olmuştur.

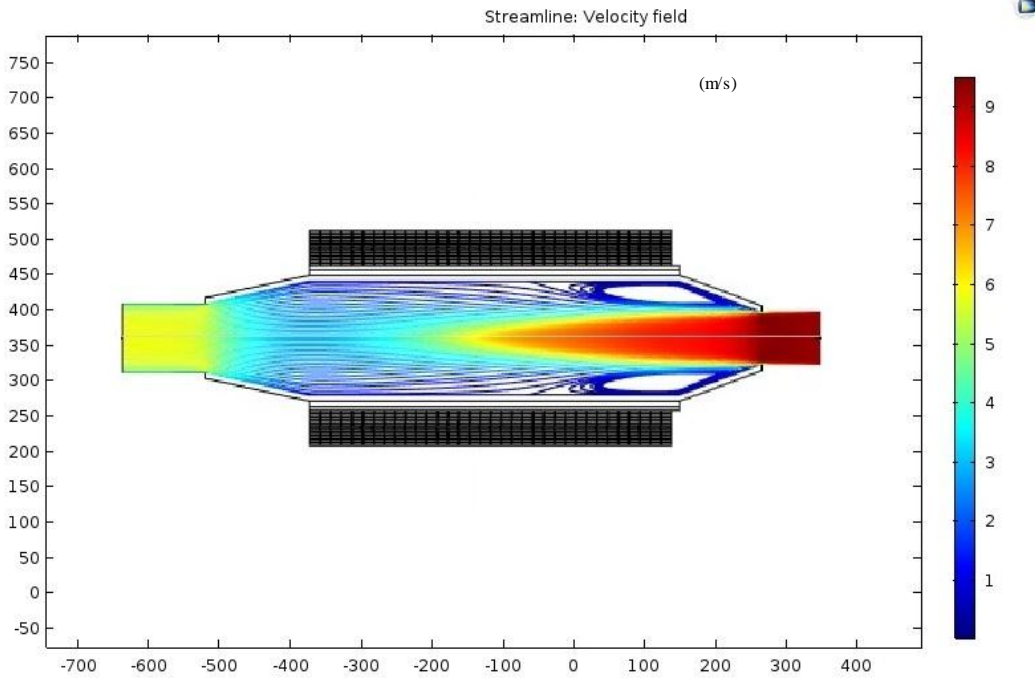


**Şekil 3.23** : Yalıtımsız K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu.

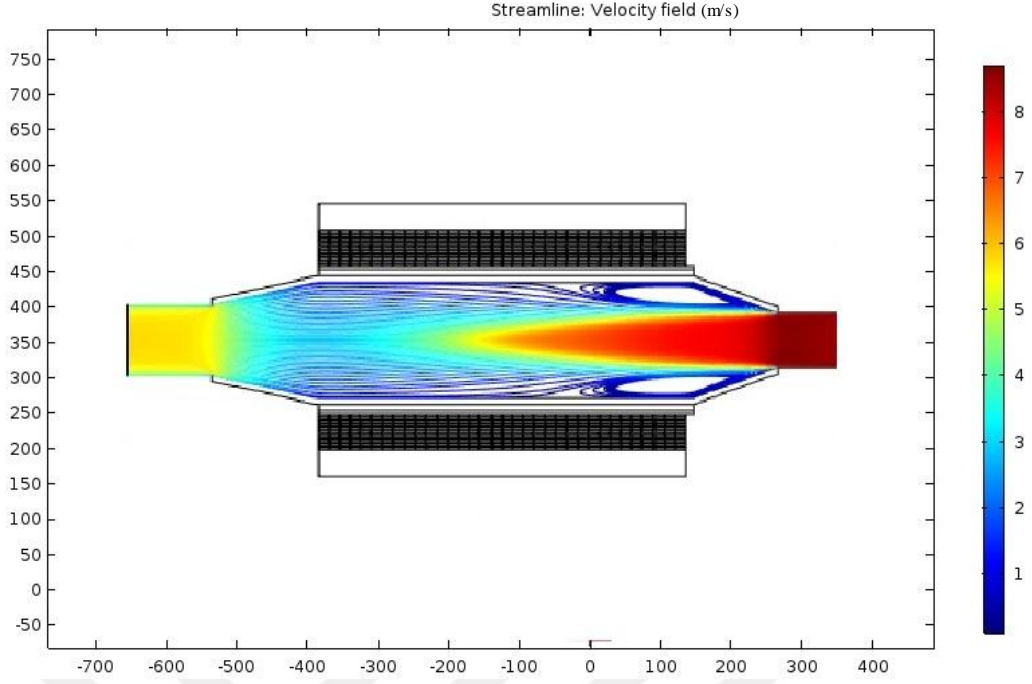


**Şekil 3.24 :** Yalıtımlı K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu.

K-2 prototipinin yalıtımsız ve yalıtımlı durumları için elde edilen çıkış hız konturları Şekil 3.23 ve Şekil 3.24 ile verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi yalıtım durumu hız konturlarına net bir şekilde yansımamıştır.

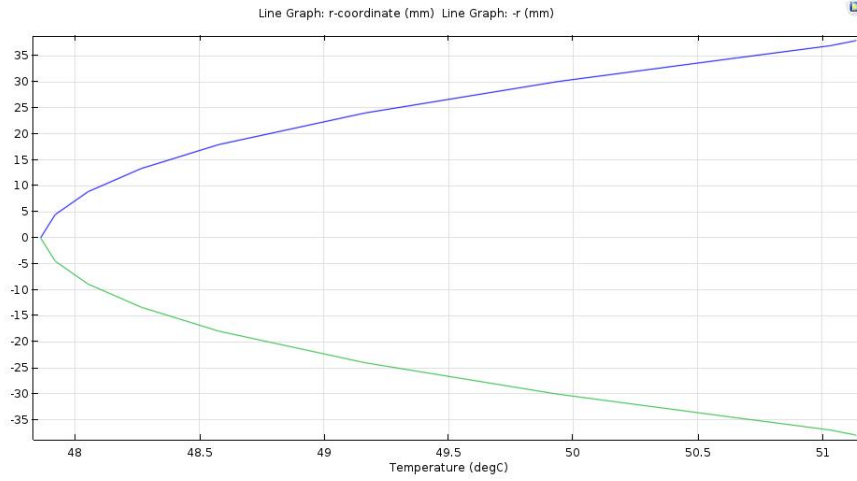


**Şekil 3.25 :** Yalıtımsız K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız akım çizgileri.

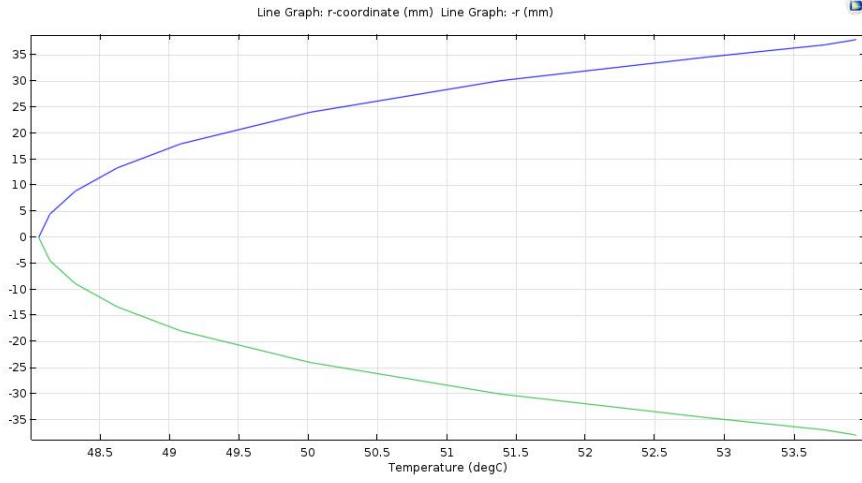


Şekil 3.26 : Yalıtımlı K-2 tipi ısıtıcının çıkış hız akım çizgileri.

Şekil 3.25'te K-2 prototipinin yalıtımsız çıkış hız akım çizgileri verilirken, Şekil 3.26 ile yalıtımlı çıkış hız akım çizgileri verilmiştir. Geometrik değişikliğin olmaması nedeniyle her iki şekilde de birbirine benzer akım çizgileri elde edilmiştir.

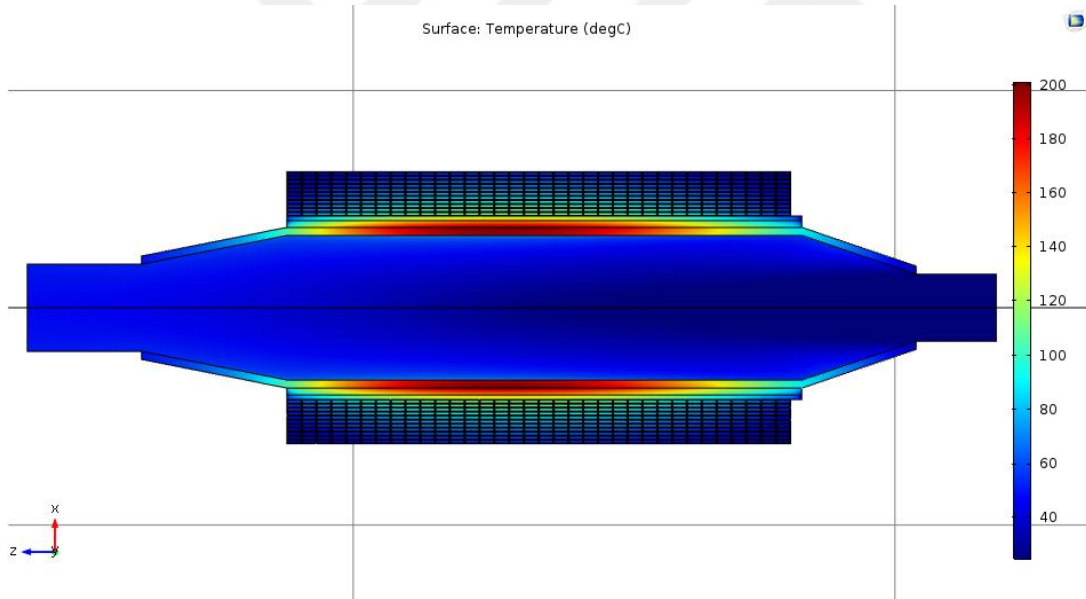


Şekil 3.27 : Yalıtımsız K-2 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.

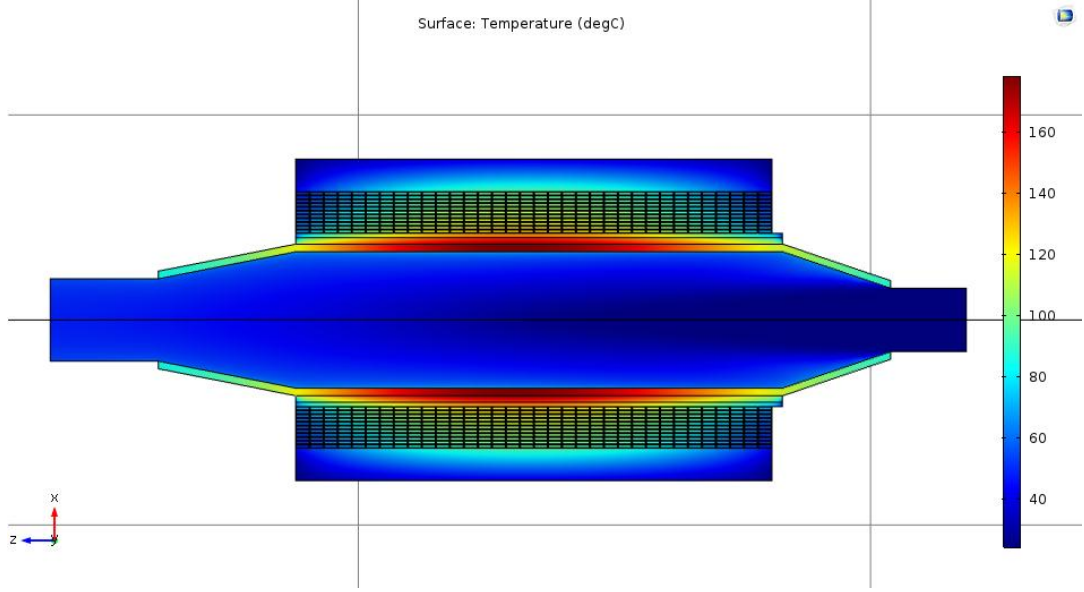


**Şekil 3.28 :** Yalıtımlı K-2 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.

Şekil 3.27’de yalıtımlı K-2 prototipinden, Şekil 3.28’de ise yalıtımsız prototipden havanın çıkış sıcaklık profilleri verilmiştir. Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da ise yalıtımsız ve yalıtımlı durumların sıcaklık kontrolleri gösterilmiştir.

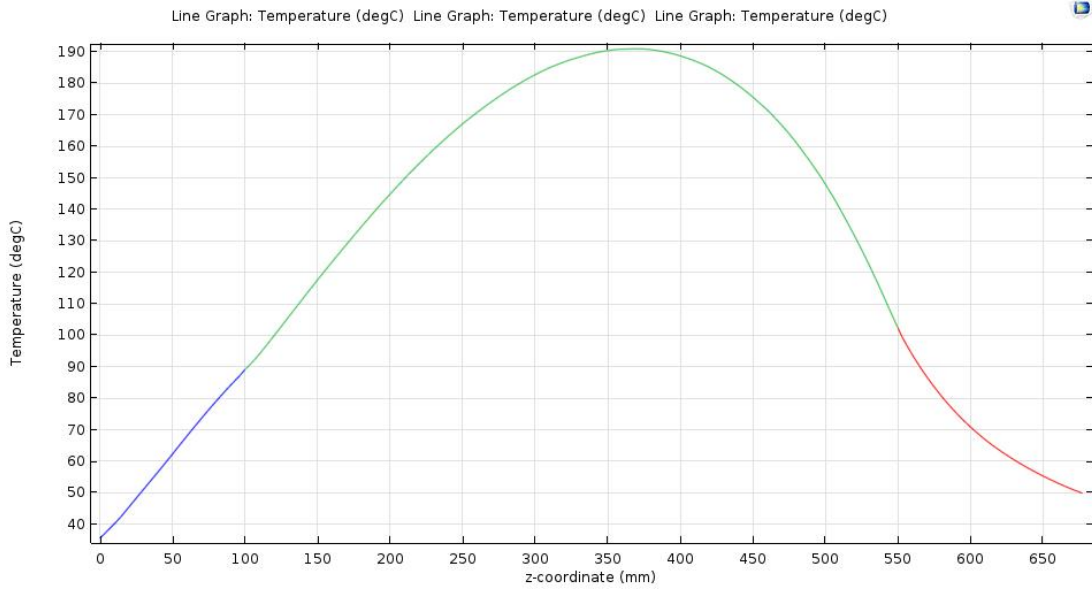


**Şekil 3.29 :** Yalıtımsız K-2 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu.

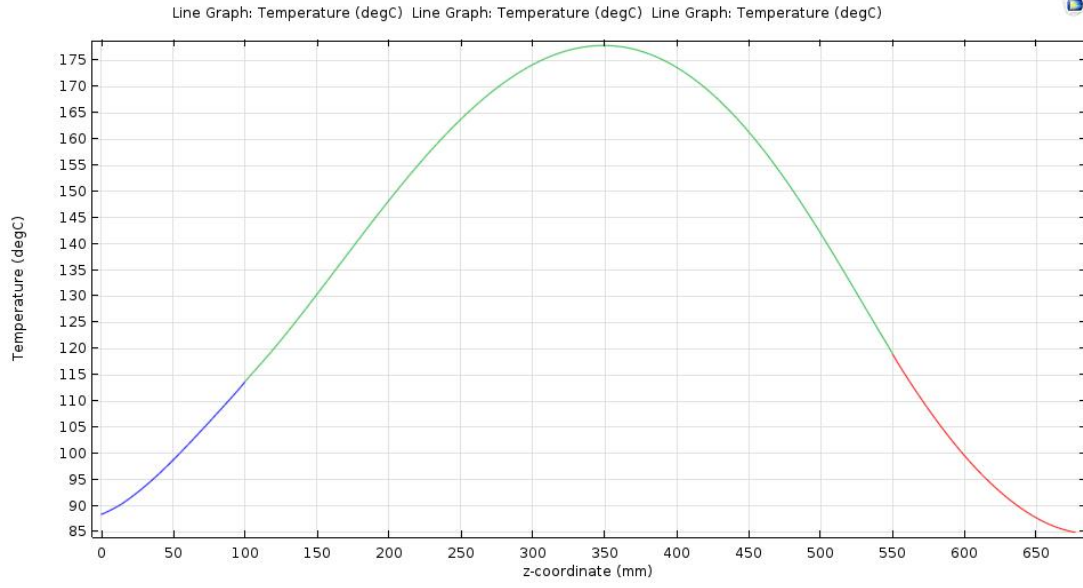


**Şekil 3.30 :** Yalıtımlı K-2 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu.

Şekil 3.31'de yalıtımsız K-2 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının iç cidarında oluşan sıcaklık dağılımının analiz sonucu verilmiştir. Şekil 3.32 ile verilen yalıtımlı sistemin grafiği de göz önüne alındığında, yalıtımsız sisteme göre havanın çıkış sıcaklığının azaldığı görülmektedir.

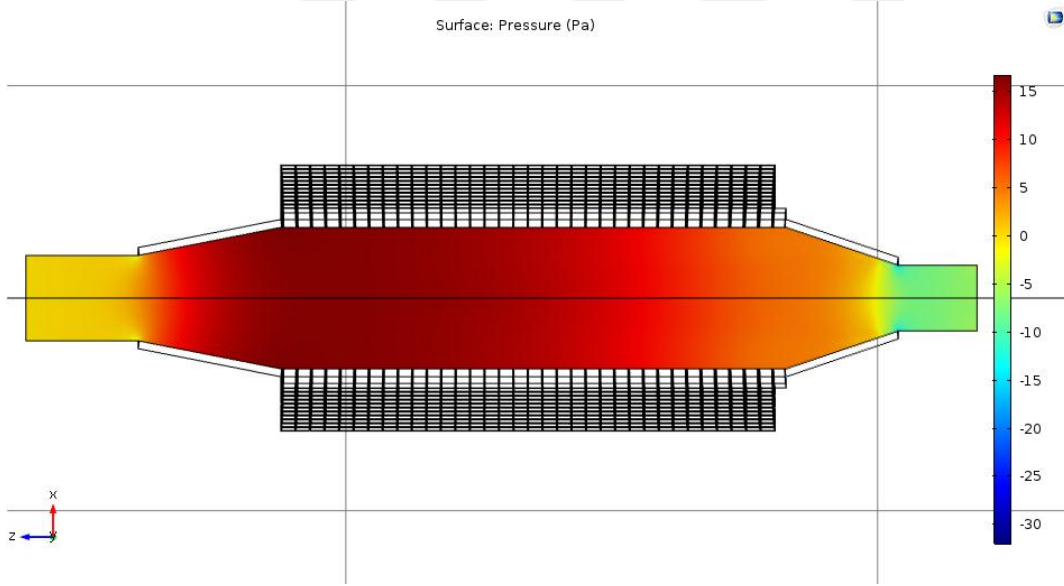


**Şekil 3.31 :** Yalıtımsız K-2 prototipinden iç cidar sıcaklık dağılımı.

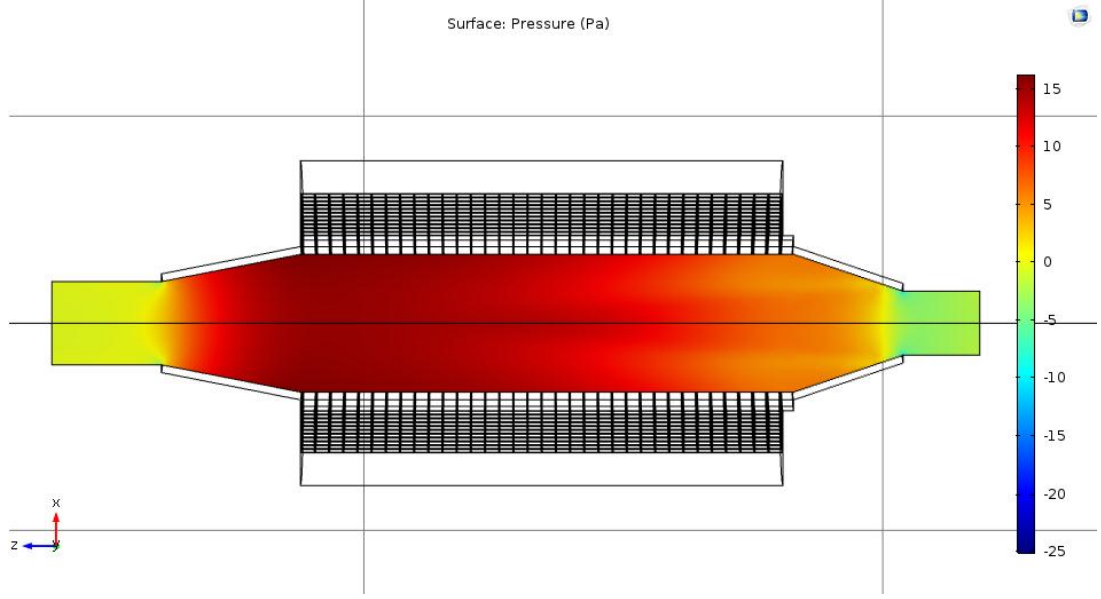


**Şekil 3.32** : Yalıtımlı K-2 prototipinden iç cidar sıcaklık dağılımı.

Şekil 3.33 ve Şekil 3.34 ile verilen basınç kontrolleri, K-2 tipi ısıtıcının yalıtımsız ve yalıtımlı durumları değerlendirilerek COMSOL programı ile elde edilmiştir.



**Şekil 3.33** : Yalıtımsız K-2 prototipinde basınç kontrolü.



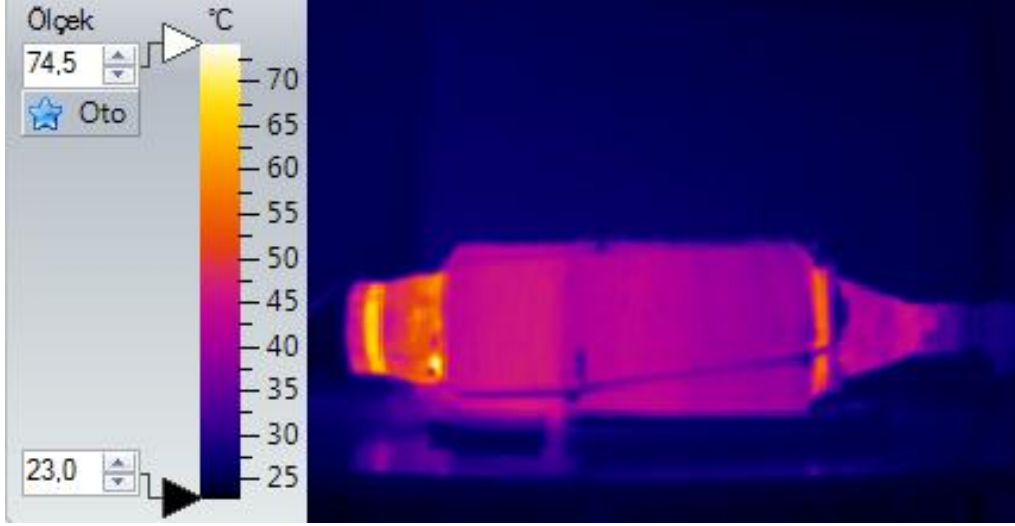
**Şekil 3.34 :** Yalıtımlı K-2 prototipinde basınç konturu.

### 3.4 K-3 Tipi İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Bulguları ve Analizi

K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtma deney düzeneğinde kovan çıkışı, ASME B 16.9 standartında, 140x114 mm boyutlarında, konsantrik redüksiyon geometrisine sahiptir (Şekil 3.35). Kovan girişinde K-2 tipi deney düzeneğinde olduğu gibi 129 mm uzunluğunda, 140x68,5 mm boyutunda konik redüksiyon vardır.



**Şekil 3.35 :** K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının çıkış kapağı (konsantrik redüksiyon) görüntüsü.



**Şekil 3.36 :** K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının sürekli rejim şartlarındaki örnek termal kamera görüntüsü.

K-3 prototipi üzerinde yapılan analizlerde  $\dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_2$  ve  $\dot{m}_3$  debileri sağlanarak, yalıtımlı ve yalıtımsız durumları incelenmiştir. K-0, K-1 ve K-2 geometrileri içerisinde en yüksek termal verim, K-2 tipi sistemin deneylerinde hesaplandığı için, K-3 tipinin K-2 ile karşılaştırılması uygun görülmüştür.

K-2 prototipine benzer şekilde, K-3 tipinde de çıkış kapağı, sürekli rejime giriş esnasında en yüksek yüzey sıcaklığına sahip olmuştur. Kovan yüzeyindeki sıcaklık dağılımı termal kamera ile Şekil 3.36'da olduğu gibi gözlemlenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler Çizelge 3.9 ile gösterilirken, yapılan analizlerden çıkan sonuçlar Çizelge 3.10 ile verilmiştir.

**Çizelge 3.9 :** K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı deney verileri.

Parametre		Yalıtımsız			Yalıtımlı		
$\dot{m}$	kg/s	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
$T_{\text{çıkış, hava}}$	°C	95,40	66,20	51,20	72,10	54,70	50,90
$V_{\text{çıkış, hava}}$	m/s	1,00	1,75	2,95	1,67	2,75	3,30
$t_{\text{geçici rejim}}$	h	1,83	1,67	1,17	1,33	0,92	1,00



Çizelge 3.9 ve 3.10'dan görüleceği üzere, K-3 prototipinde debi artışı ve yalıtım termal verimi olumlu yönde etkilemiştir. Debi artışıyla taşınım ve ışıınım ile meydana gelen ısı kayıplarının değerlerinde de düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni, kovan bölgesinde oluşturulan ısının, dış ortamdan çok havaya aktarılmasıdır. Debi artışı ile sistem cidarında artık tutulamayacak kadar ısı enerjisi biriktiğinde, ısıyı yüzeyden ortama doğru kaybetmek yerine kovandan geçen havaya daha çok aktarılmaktadır. Bu şekilde ısı yüzeylerden meydana gelen kayıplar yerine havaya aktarılarak kaybedilmiş olur. Yalıtımla birlikte ısı kayıplarının azalması verimin artmasını sağlamıştır. Şebekeden çekilen elektrik enerjisinin değerlerinde hafif dalgalanmalar olmasına rağmen tüm deneylerde verimlilik %80-82 arasındaki hesaplanmıştır.

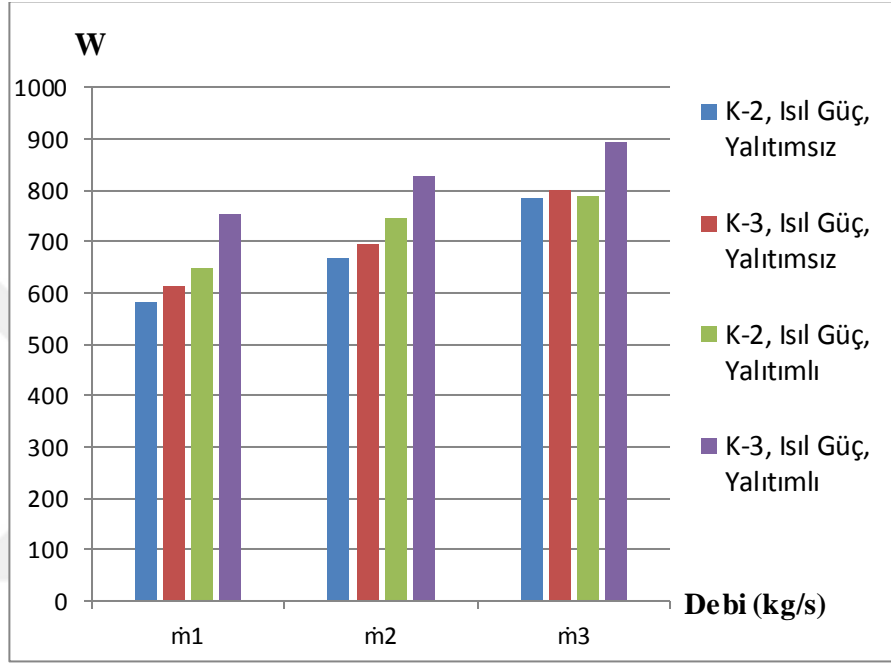
**Çizelge 3.10 : K-3 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının analiz sonuçları.**

Parametre		YALITIMSIZ			YALITIMLI		
$Q_{hava}$	W	612,41	694,50	800,47	755,29	827,61	896,31
$P_{bobin}$	W	930,07	974,85	1015,19	960,10	1015,02	1029,00
$P_{sürtünme}$	W	0,03	0,23	1,34	0,19	1,04	1,88
$P_{taşınım}$	W	274,09	239,19	176,10	165,06	139,79	82,86
$P_{ışıınım}$	W	37,52	33,77	25,78	25,27	15,69	10,17
$\Delta KE$	W	0,02	0,18	1,01	0,14	0,79	1,41
$P_{\Sigma k}$	W	311,66	273,37	204,22	190,66	157,31	96,32
$P_{diğer}$	W	6,01	6,98	10,51	14,16	30,10	36,37
$\eta_{1.Kanun}$	%	53,03	57,64	64,00	64,04	66,35	70,88
$\eta_{termal}$	%	<b>65,85</b>	<b>71,24</b>	<b>78,85</b>	<b>78,67</b>	<b>81,54</b>	<b>87,10</b>
$\eta_{elektriksel}$	%	80,54	80,91	81,16	81,41	81,37	81,38

Çizelge 3.11 : K-2 ve K-3 tipi induksiyonlu hava ısıtıcıları parametreleri.

Parametre	K-2 Modeli			K-3 Modeli			K-2 Modeli			K-3 Modeli			
	YALITIMSIZ						YALITIMLI						
$\dot{m}$	kg/s	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
$T_{\text{çıkış, hava}}$	oC	88,65	62,05	49,85	95,40	66,20	51,20	72,10	60,60	52,80	72,10	54,70	50,90
$V_{\text{çıkış, hava}}$	m/s	2,00	3,45	5,45	1,00	1,75	2,95	2,90	4,20	5,35	1,67	2,75	3,30
$t_{\text{geçici rejim}}$	h	1,50	1,42	1,08	1,83	1,67	1,17	1,25	1,33	1,25	1,33	0,92	1,00
$Q_{\text{hava}}$	W	581,66	667,63	785,09	612,41	694,50	800,47	650,28	746,91	788,47	755,29	827,61	896,31
$P_{\text{bobin}}$	W	981,61	978,54	1039,46	930,07	974,85	1015,19	988,91	1016,83	1022,07	960,10	1015,02	1029,00
$P_{\Sigma k}$	W	393,97	302,61	248,70	311,66	273,37	204,22	278,90	219,44	194,14	190,66	157,31	96,32
$\eta_{1.\text{Kanun}}$	%	48,65%	55,14%	61,34%	53,03%	57,64%	64,00%	53,50%	59,60%	62,76%	64,04%	66,35%	70,88%
$\eta_{\text{termal}}$	%	<b>59,26%</b>	<b>68,23%</b>	<b>75,53%</b>	<b>65,85%</b>	<b>71,24%</b>	<b>78,85%</b>	<b>65,76%</b>	<b>73,45%</b>	<b>77,14%</b>	<b>78,67%</b>	<b>81,54%</b>	<b>87,10%</b>

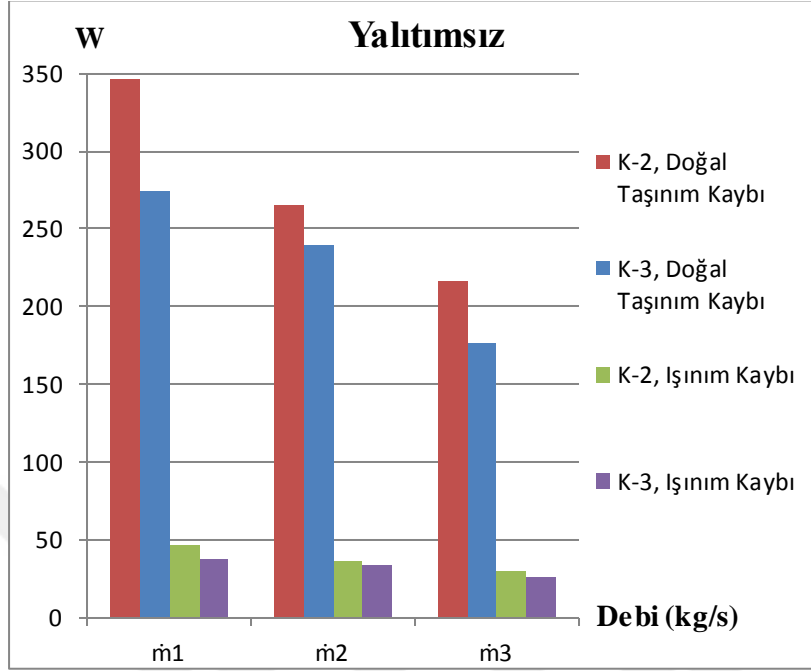
K-2 ve K-3 prototiplerinin kıyaslaması için gerekli veriler Çizelge 3.11 ile verilmiştir. Çizelge 3.11'deki değerlere göre bobinden çekilen enerji, her deneyde farklılık göstermiştir. Debi miktarındaki artış, toplam kayıp miktarını azaltırken havanın sistemden çıkış sıcaklığında düşüşe neden olmuştur. Önceki tablolarda olduğu gibi Çizelge 3.11'de de yalıtım ve debi artışı, termal verimin artmasını sağlamıştır. Elektriksel verim ifadelerinde de %80-82 arasında değişen değerler deneysel olarak elde edilmiştir.



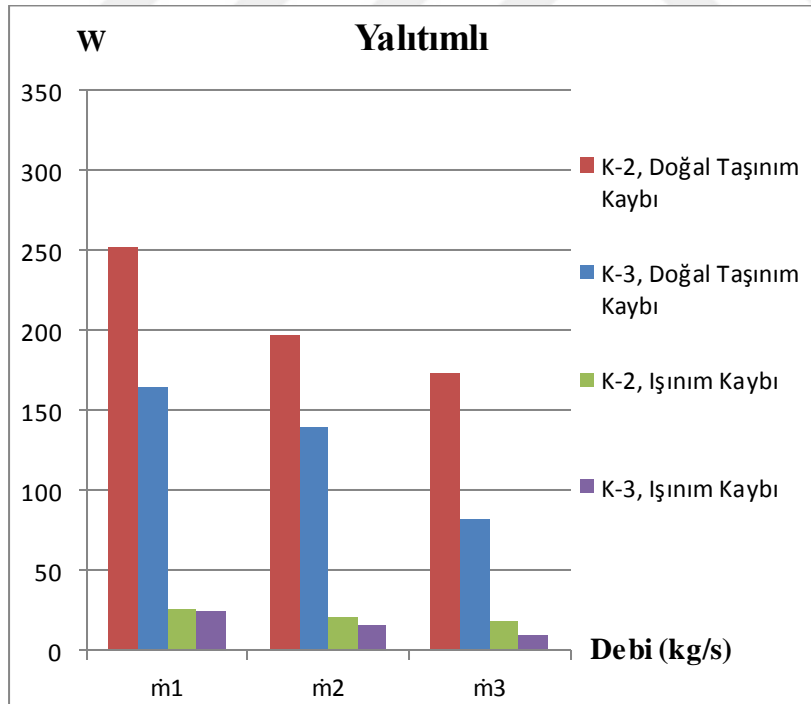
Şekil 3.37 : K-2 ve K-3 tipi induksiyonlu hava ısıtıcılarında ısı güç değerleri.

Debi artışı ile birlikte, elektrik enerjisinin ısıya dönüşümü artmıştır (Şekil 3.37). Herhangi bir debi değeri için K-3 tipi ısıtıcının, K-2 prototipinden daha yüksek ısı güce sahip olduğu görülebilmektedir. İş akışkanı olarak kullanılan hava, sıkıştırılabilir akışkandır. Akışkan önüne çıkabilecek her engelin havayı sıkıştırarak, yoğunluk değiştirmesine ve ısı transferi miktarında değişiklik meydana gelmesine sebep olur. Buradan yola çıkarak, sistemin çıkış çapının artması ile ısı gücün ve dolaylı olarak termal verimin artmasını sağlayacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu ifade Çizelge 3.11 ve 3.14 başta olmak üzere K tipi karşılaştırmalarının olduğu tüm şekil ve çizelgelerle desteklenmektedir. Şekil 3.38 ve 3.39'da K-2 ve K-3 ısıtıcılarının deneylerinde, doğal taşınım ve ışınım ile meydana gelen ısı kayıpları verilmiştir. Şekil 3.38 ve 3.39'dan yola çıkarak, yalıtımın kullanılması ile ısı kayıplarının

azaldığı söylenebilir. Aynı zamanda K-3 tipinde meydana gelen kayıpların, K-2 prototipine göre daha düşük olduğu görülmektedir.



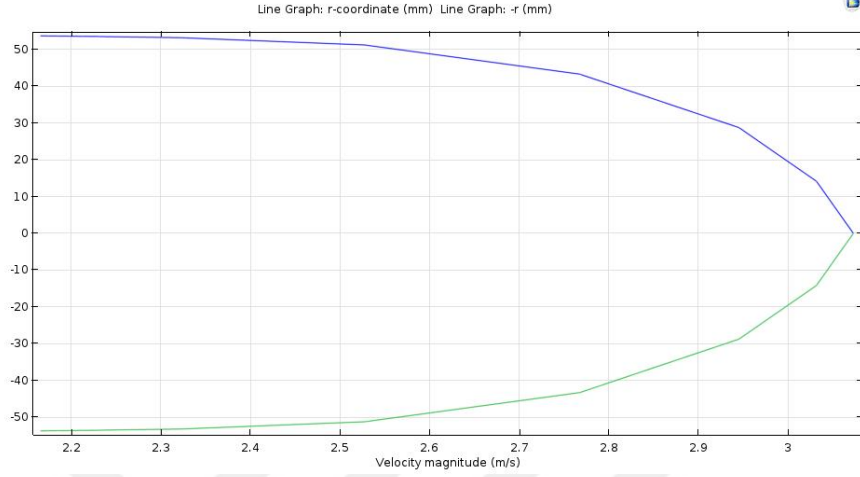
Şekil 3.38 : K-2 ve K-3 tipi yalıtımsız sistemlerde doğal taşınım ve ışıınım kaybı.



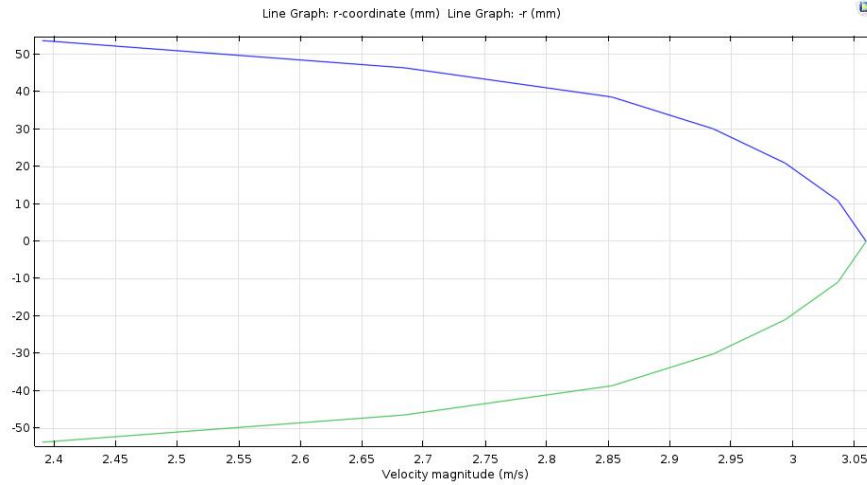
Şekil 3.39 : K-2 ve K-3 tipi yalıtımlı sistemlerde doğal taşınım ve ışıınım kaybı.

### 3.4.1 K-3 prototipi COMSOL analizi

COMSOL programı ile K-3 prototipinin yalıtımsız ve yalıtımlı durumları  $m_3$  debi değerinde analiz edilmiştir.

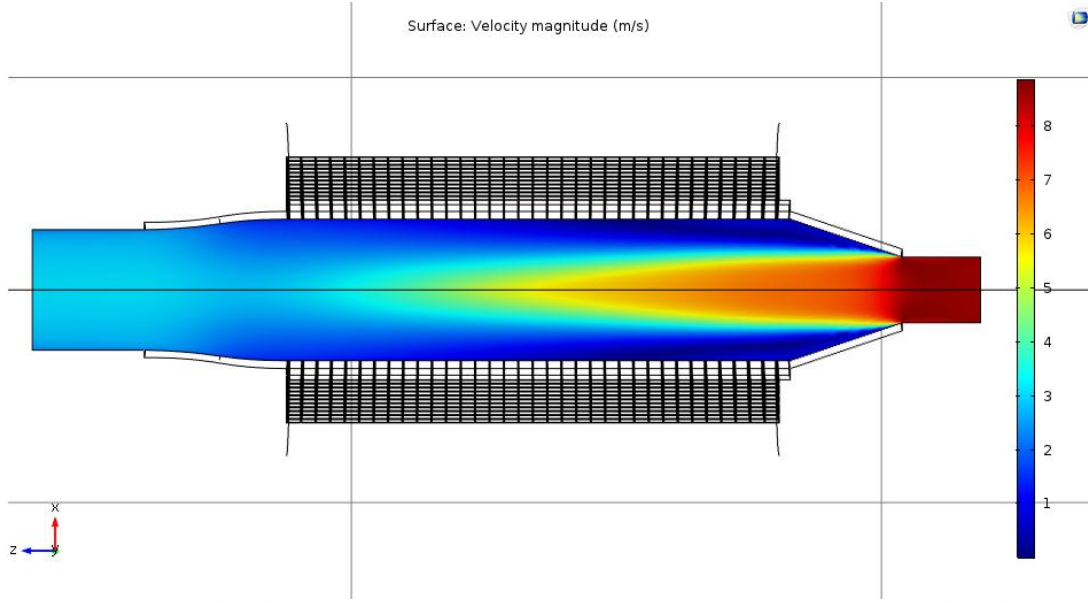


Şekil 3.40 : Yalıtımsız K-3 tipi ısıtıcının çıkış hız profili.

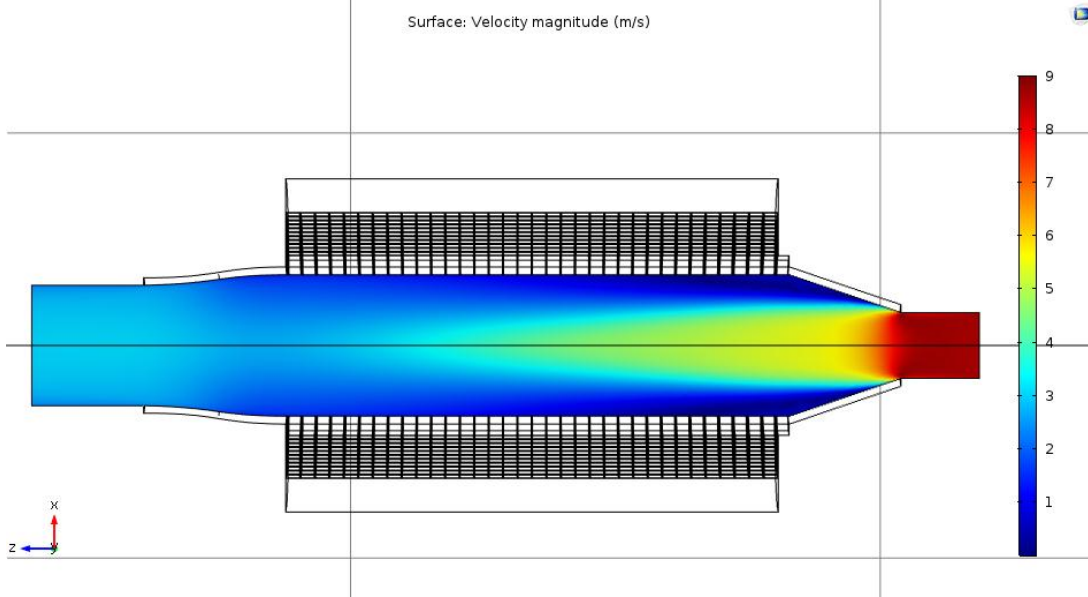


Şekil 3.41 : Yalıtımlı K-3 tipi ısıtıcının çıkış hız profili.

K-3 prototipinde yalıtımsız ve yalıtımlı durumlarında havanın çıkış hız profili Şekil 3.40 ve 3.41 ile verilmiştir.

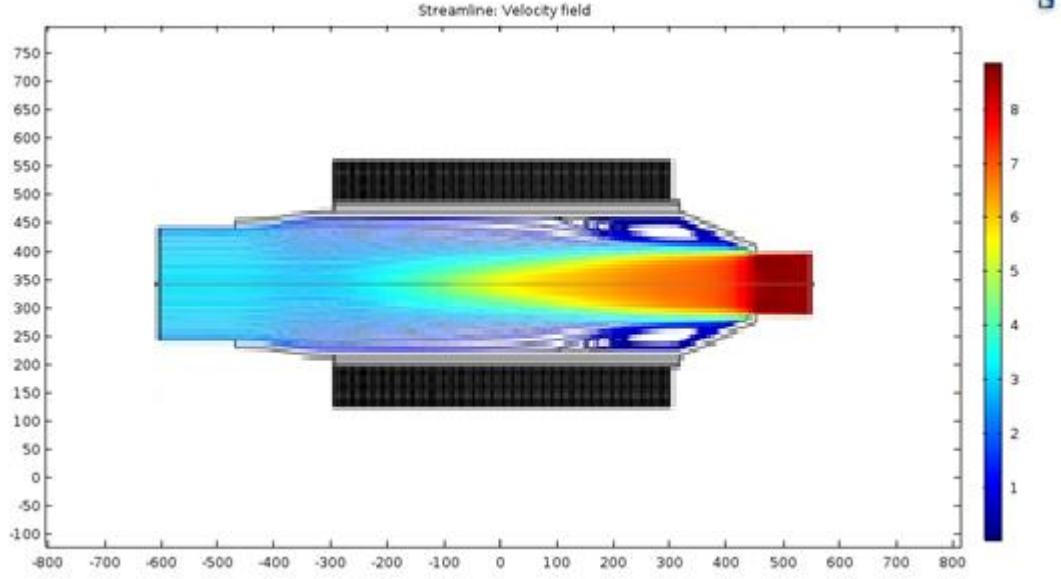


**Şekil 3.42 :** Yalıtımsız K-3 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu.

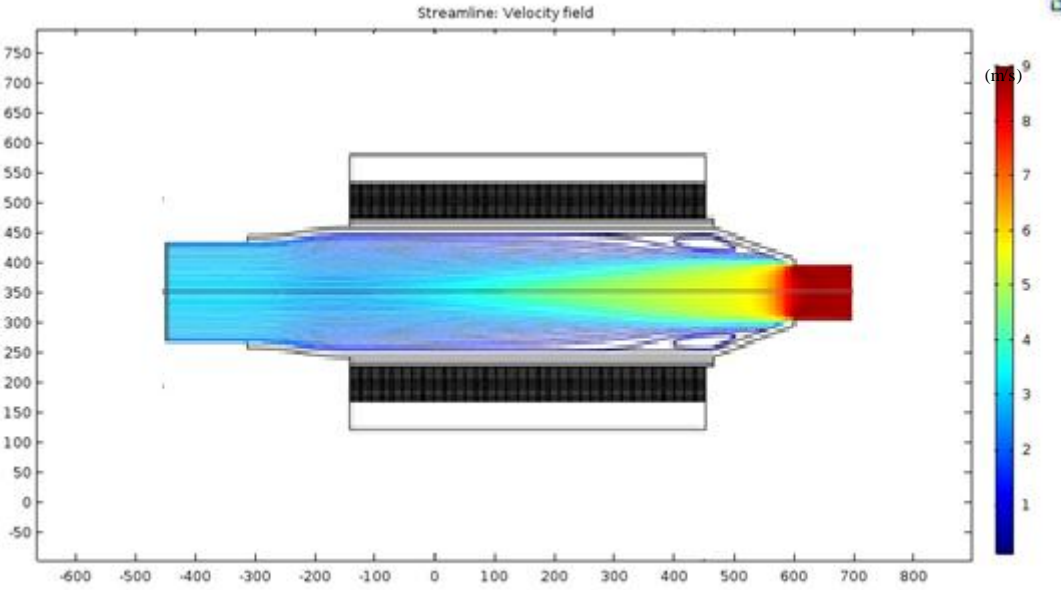


**Şekil 3.43 :** Yalıtımlı K-3 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu.

K-3 prototipinin yalıtımsız ve yalıtımlı durumları için elde edilen çıkış hız konturları Şekil 3.42 ve Şekil 3.43 ile verilmiştir.

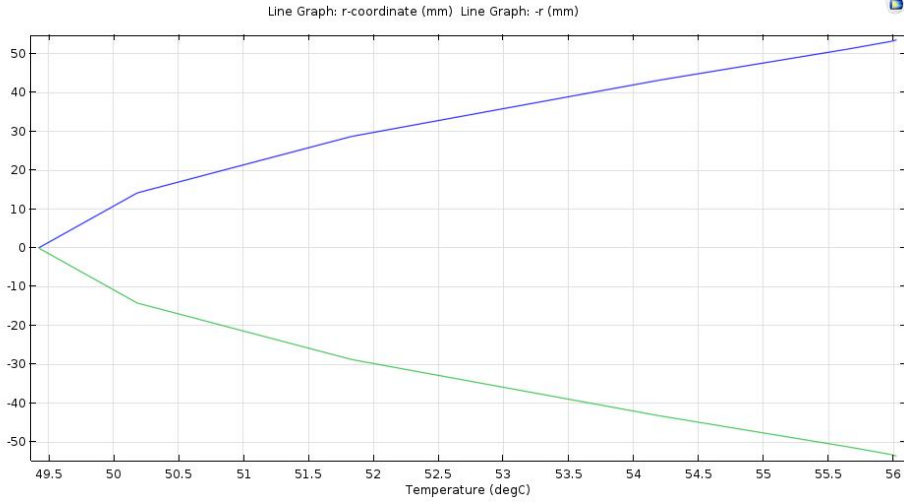


Şekil 3.44 : Yalıtımsız K-3 tipi ısıtıcıdan geçen havanın hız akım çizgileri.

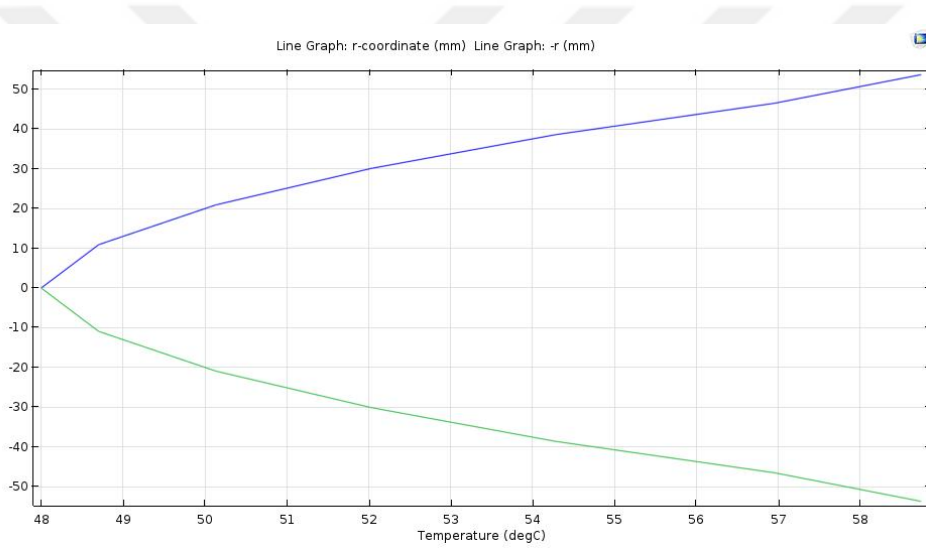


Şekil 3.45 : Yalıtımlı K-3 tipi ısıtıcıdan geçen havanın hız akım çizgileri.

Şekil 3.44'te K-3 prototipinin yalıtımsız çıkış hız akım çizgileri verilirken, Şekil 3.45 ile yalıtımlı çıkış hız akım çizgileri verilmiştir.



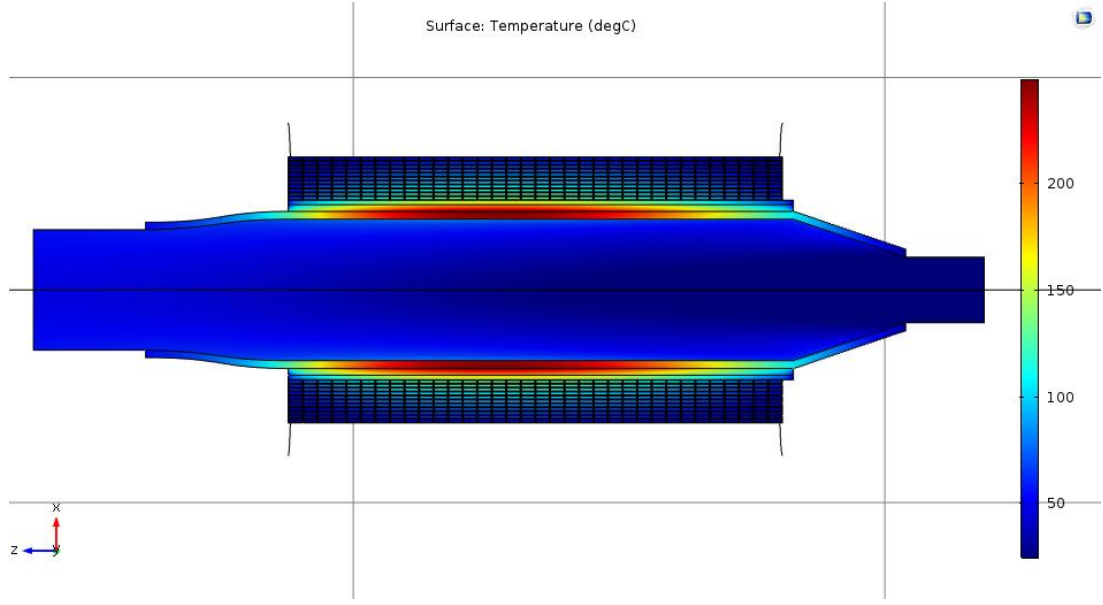
**Şekil 3.46 :** Yalıtımsız K-3 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.



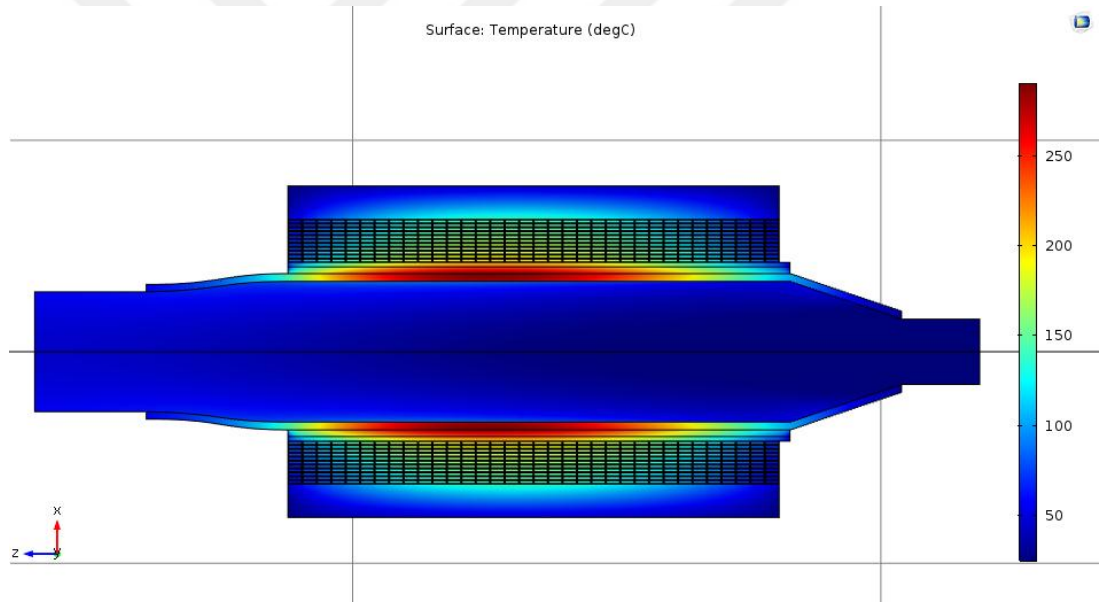
**Şekil 3.47 :** Yalıtımlı K-3 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.

Şekil 3.46'da yalıtımsız K-3 prototipinden, Şekil 3.47'de ise yalıtımlı prototipden havanın çıkış sıcaklık profilleri verilmiştir. Şekil 3.48 ve Şekil 3.49'de ise yalıtımsız ve yalıtımlı durumların sıcaklık kontrolleri gösterilmiştir.



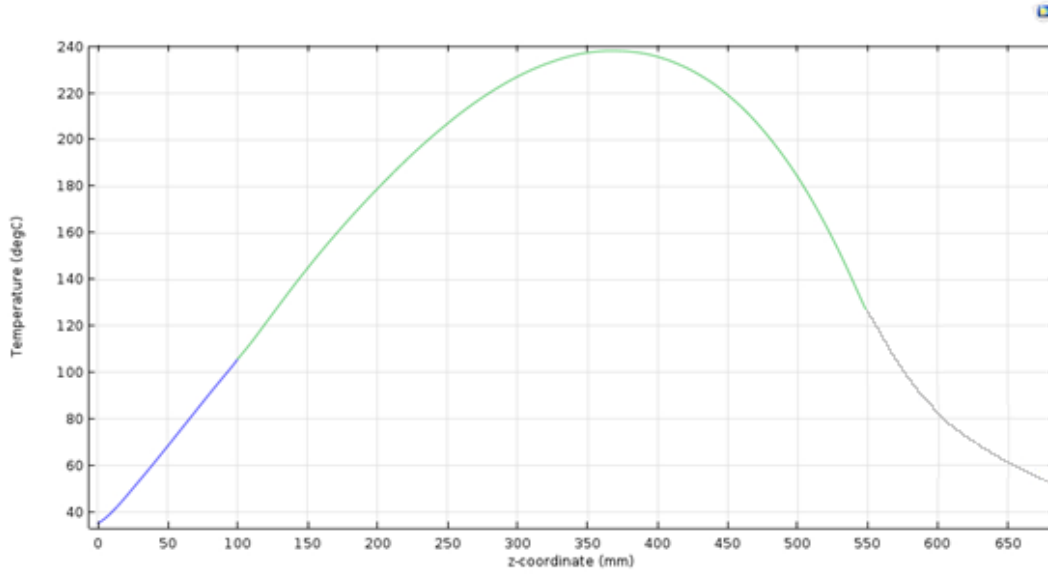


Şekil 3.48 : Yalıtımsız K-3 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu.

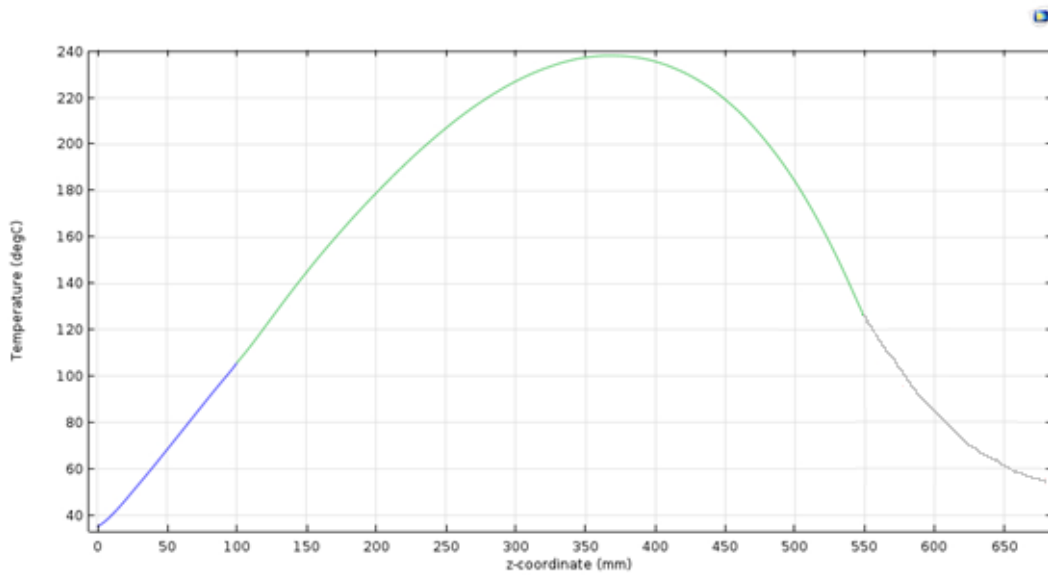


Şekil 3.49 : Yalıtımlı K-3 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu.

Şekil 3.50'de yalıtımsız K-3 tipi induksiyonlu hava ısıtıcısının iç cidarında oluşan sıcaklık dağılımının analiz sonucu verilmiştir. Şekil 3.51 ise yalıtımlı sistemin iç cidarında meydana gelen sıcaklık dağılımını ifade etmektedir.

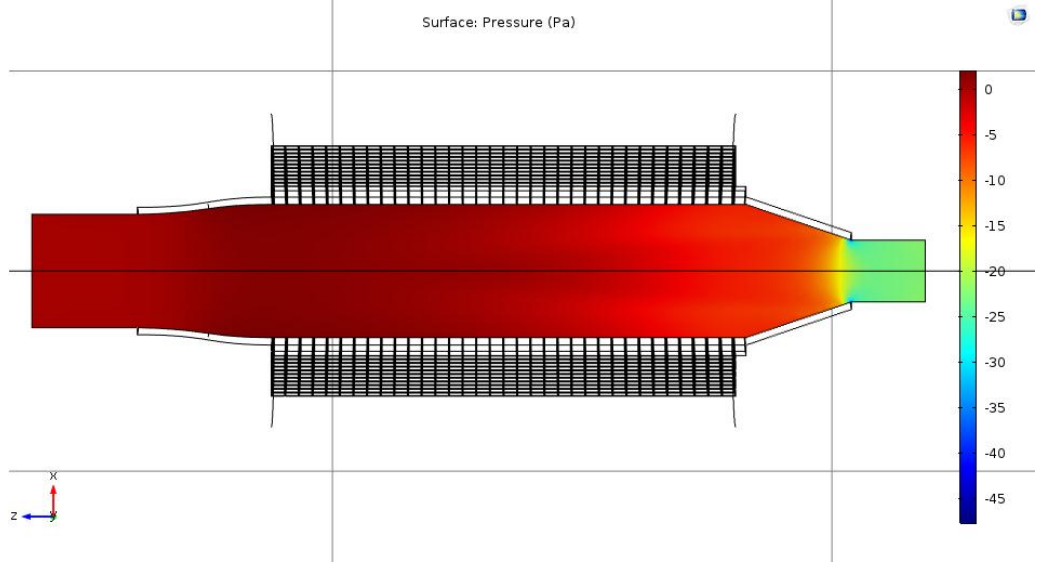


Şekil 3.50 : Yalıtımsız K-3 prototipinde iç cidar sıcaklık dağılımı.

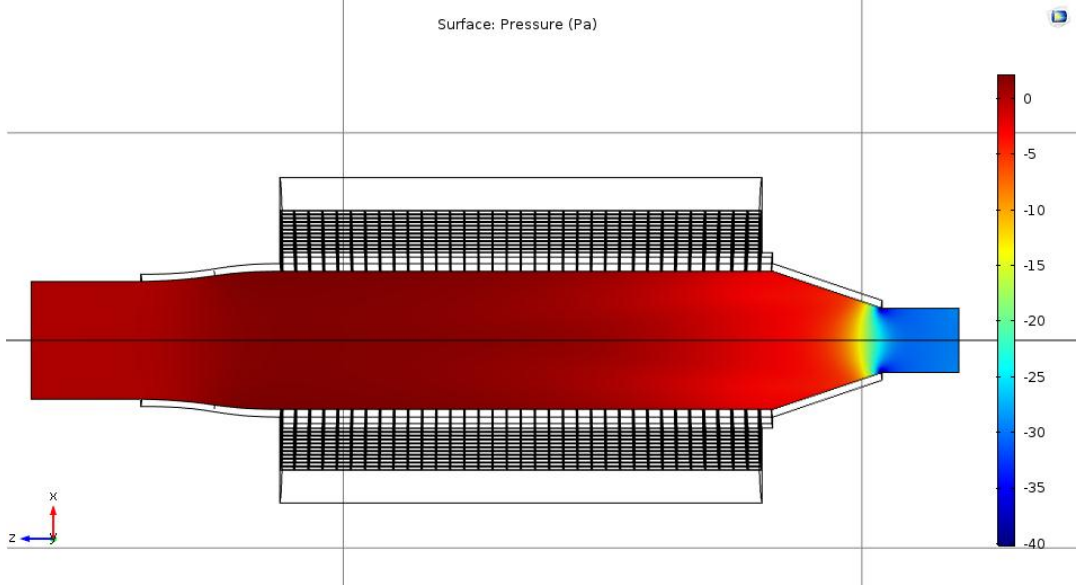


Şekil 3.51 : Yalıtımlı K-3 prototipinde iç cidar sıcaklık dağılımı.

Şekil 3.52 ve Şekil 3.53 ile verilen basınç konturları, K-3 tipi ısıtıcının yalıtımsız ve yalıtımlı durumları değerlendirilerek COMSOL programı ile elde edilmiştir.



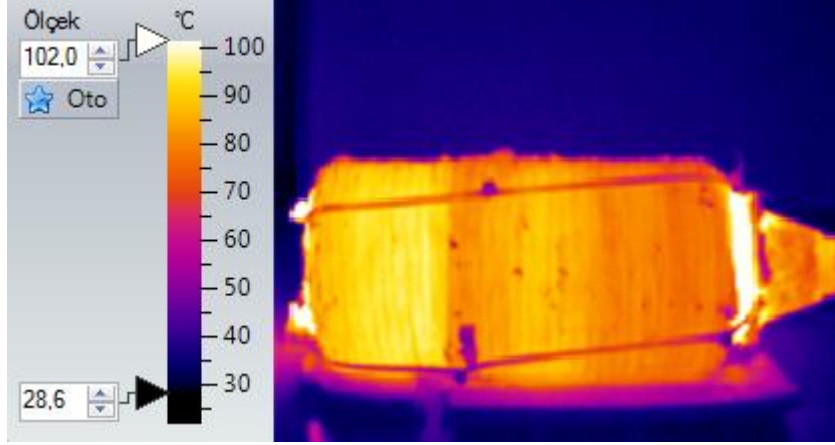
Şekil 3.52 : Yalıtımsız K-3 prototipinde basınç konturu.



Şekil 3.53 : Yalıtımlı K-3 prototipinde basınç konturu.

### 3.5 K-4 Tipi İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Bulguları ve Analizi

K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı sisteminde, çıkış kapağı kaldırılmış ve havanın çıkışı doğrudan kovan gövdesinden sağlanmıştır. Kovan, 130 mm boyutunda iç çapa sahiptir. Kovan girişinde ise K-2 ve K-3 tipi deney düzeneklerinde olduğu gibi 129 mm uzunluğunda, 140x68,5 mm boyutunda konik redüksiyon bulunmaktadır.



Şekil 3.54 : K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının sürekli rejim şartlarındaki örnek termal kamera görüntüsü.

Çizelge 3.12 : K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı deney verileri.

Parametre		Yalıtımsız			Yalıtımlı		
$\dot{m}$	kg/s	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
$t_{\text{geçici rejim}}$	h	1,58	1,58	1,08	1,75	1,25	1,25
$T_{\text{çıkış, hava}}$	°C	91,3	62,8	48,2	82	63,1	49,8
$V_{\text{çıkış, hava}}$	m/s	0,8	1,4	2,35	1	1,5	2,3

Şekil 3.54'te de görüldüğü gibi, kovanın çıkış kısmında kapak bulunmamaktadır. Debi miktarı  $\dot{m}_1$  olarak en düşük seviyede tutulduğunda, kovan bölgesinde ısınma miktarının, diğer debi miktarlarındakilere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. K-4 prototipinin deneylerinden elde edilen veriler Çizelge 3.12 ile verilmiştir. Geçici rejim süreleri için net bir değerlendirme doğru değildir. Debi artışı, havanın sistemden daha düşük sıcaklıkta çıkışına neden olmuştur.

**Çizelge 3.13 : K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısı analiz sonuçları.**

Parametre		Yalıtımsız			Yalıtımlı		
		0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
$\dot{m}$	kg/s	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
$Q_{hava}$	W	707,96	824,28	905,7	795,53	868,32	944,37
$P_{bobin}$	W	920,73	977,22	1025,69	925,62	969,65	988,99
$P_{sürtünme}$	W	0,05	0,41	2,32	0,07	0,5	2,13
$P_{taşınım}$	W	181	127,01	94,6	95,51	44,43	34,89
$P_{ışınım}$	W	25,27	18,4	14,5	11,04	5,98	4,9
$\Delta KE$	W	0,05	0,33	1,86	0,1	0,41	1,71
$P_{\Sigma k}$	W	206,37	146,15	113,28	106,71	51,32	43,63
$\eta_{1.Kanun}$	%	61,94	68,21	71,61	69,47	72,65	77,82
$\eta_{Termal}$	%	<b>76,89</b>	<b>84,35</b>	<b>88,3</b>	<b>85,95</b>	<b>89,55</b>	<b>95,49</b>
$\eta_{elektriksel}$	%	80,55	80,87	81,1	80,83	81,13	81,49

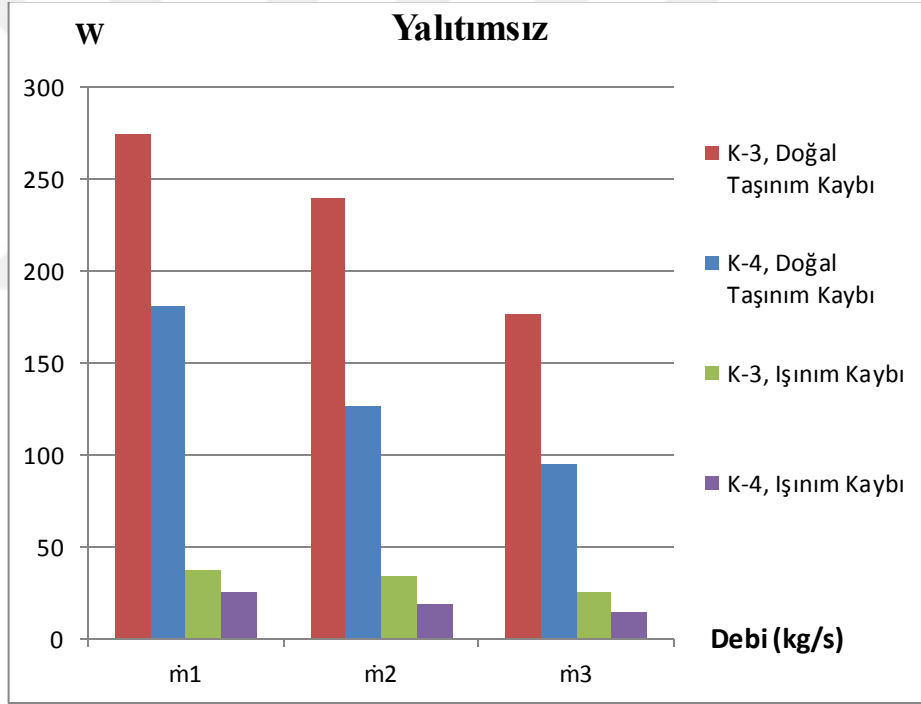
Çizelge 3.13 ile K-4 prototipinin analizlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Debi artışı ile sistemde meydana gelen toplam kayıp miktarında düşüş görülmüştür. En yüksek termal verim; yalıtımlı durumda  $\dot{m}_3$  debisi sağlandığında hesaplanmıştır.

Çizelge 3.14 : K-3 ve K-4 tipi induksiyonlu hava ısıtıcısı parametreleri.

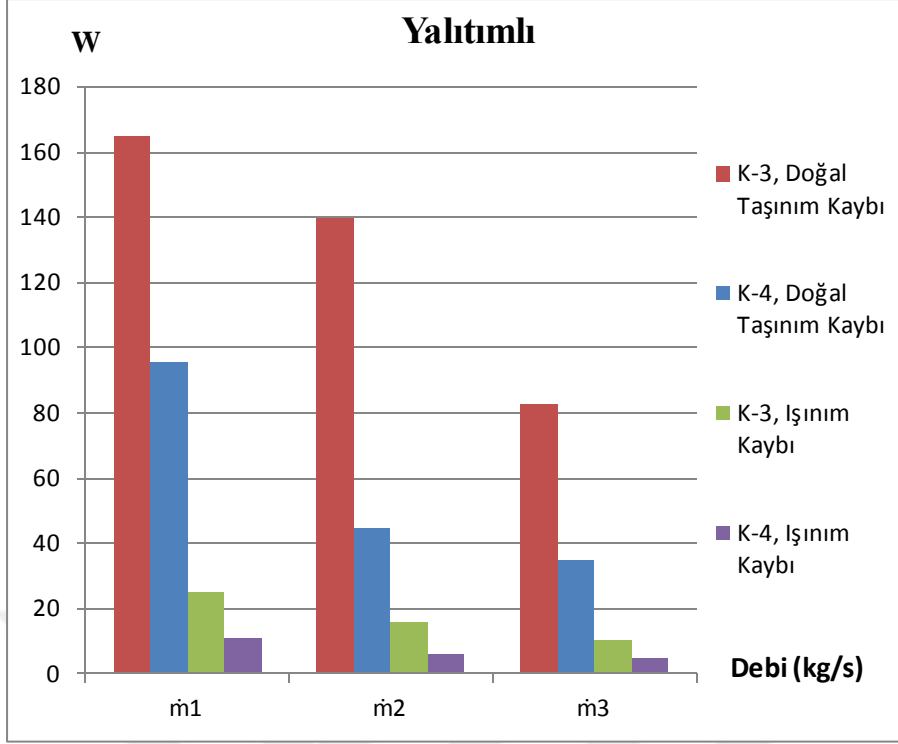
Parametre	K-3 Modeli			K-4 Modeli			K-3 Modeli			K-4 Modeli			
	Yalıtımsız						Yalıtımlı						
$\dot{m}$	kg/s	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
$Q_{\text{hava}}$	W	612,4	694,5	800,47	707,96	824,28	905,7	755,29	827,61	896,31	795,53	868,32	944,37
$P_{\text{bobin}}$	W	930	974,85	1015,19	920,73	977,22	1025,69	960,1	1015,02	1029	925,62	969,65	988,99
$T_{\text{çıkış, hava}}$	°C	95,4	66,2	51,2	91,3	62,8	48,2	72,1	54,7	50,9	82	63,1	49,8
$V_{\text{çıkış, hava}}$	m/s	1	1,75	2,95	0,8	1,4	2,35	1,67	2,75	3,3	1	1,5	2,3
$t_{\text{geçici rejim}}$	h	1,83	1,67	1,17	1,58	1,58	1,08	1,33	0,92	1	1,75	1,25	1,25
$\eta_{1.\text{Kanun}}$	%	53,03	57,64	64	61,94	68,21	71,61	64,04	66,35	70,88	69,47	72,65	77,82
$\eta_{\text{termal}}$	%	<b>65,85</b>	<b>71,24</b>	<b>78,85</b>	<b>76,89</b>	<b>84,35</b>	<b>88,3</b>	<b>78,67</b>	<b>81,54</b>	<b>87,1</b>	<b>85,95</b>	<b>89,55</b>	<b>95,49</b>
$\eta_{\text{elektriksel}}$	%	80,54	80,91	81,16	80,55	80,87	81,1	81,41	81,37	81,38	80,83	81,13	81,49

Çizelge 3.14'te K-3 ve K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcıları kıyaslanmıştır. Çizelge 3.14'ten yola çıkarak, yalıtım yapılmadığı takdirde havaya aktarılan ısı güç değeri en fazla 906 W olmuştur. Yalıtım uygulaması ile ısı güç değeri en fazla 945 W değerine ulaşmıştır. Hava, debi değerinin en düşük olduğu ve yalıtım uygulanmadığı durumda en yüksek (95,4 °C) sıcaklığa sahip olmuştur. Elektriksel verim değerleri %80-82 değerleri arasında değişiklik göstermiştir. Termal verim ise; çıkış kapağının kullanılmadığı K-4 sisteminde, K-3 prototipine göre daha yüksek değerlere sahip olmuştur.

Şekil 3.55 ve 3.56'da K-3 ve K-4 tipi geometriye sahip yalıtımlı ve yalıtımsız deney sistemlerinde, doğal taşınım ve ışınlım ile meydana gelen ısı kayıpları verilmiştir. Her iki grafikten de görüleceği üzere, yalıtım malzemesi ve K-4 geometrisi kullanımı ile ısı kayıplarında düşüş meydana gelmiştir.



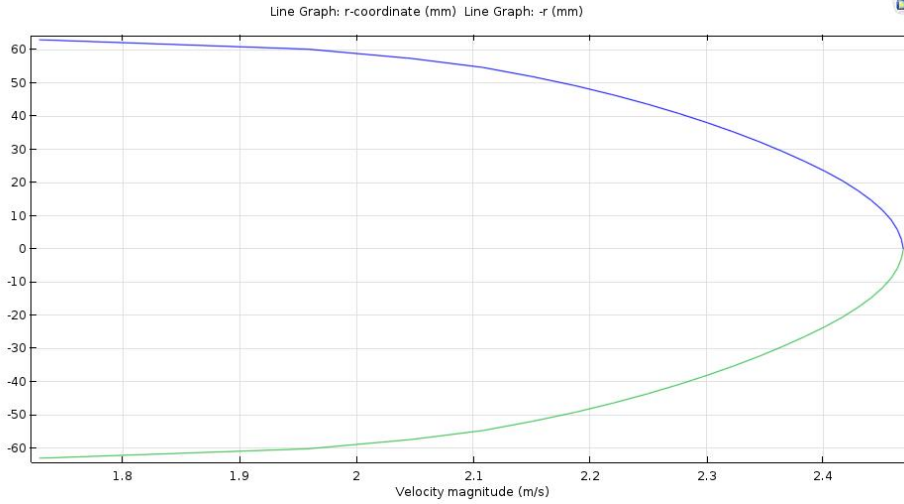
Şekil 3.55 : K-3 ve K-4 tipi yalıtımsız ısıtıcılarda doğal taşınım ve ışınlım kayıpları.



Şekil 3.56 : K-3 ve K-4 tipi yalıtımlı ısıtıcılarda doğal taşınım ve ışınım kayıpları.

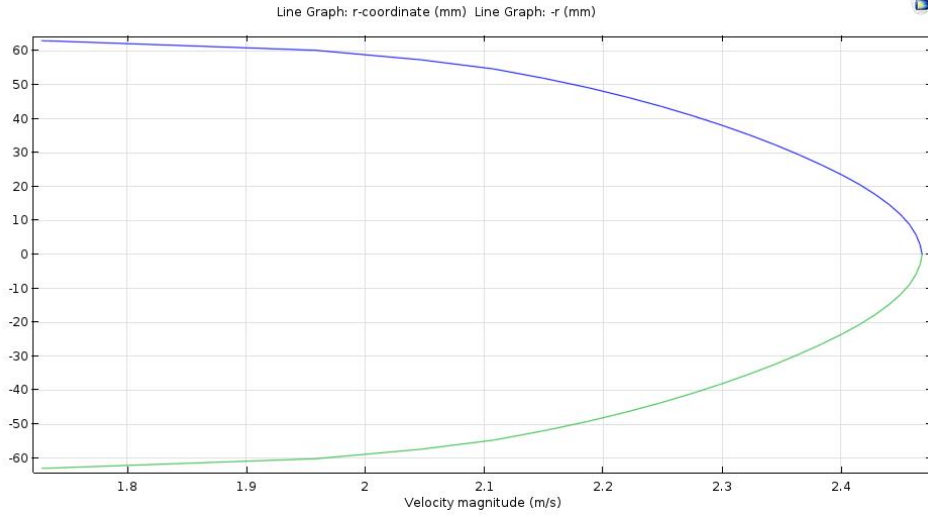
### 3.5.1 K-4 prototipi COMSOL analizi

COMSOL programı ile K-4 prototipinin yalıtımsız ve yalıtımlı durumları  $\dot{m}_3$  debi değerinde analiz edilmiştir.



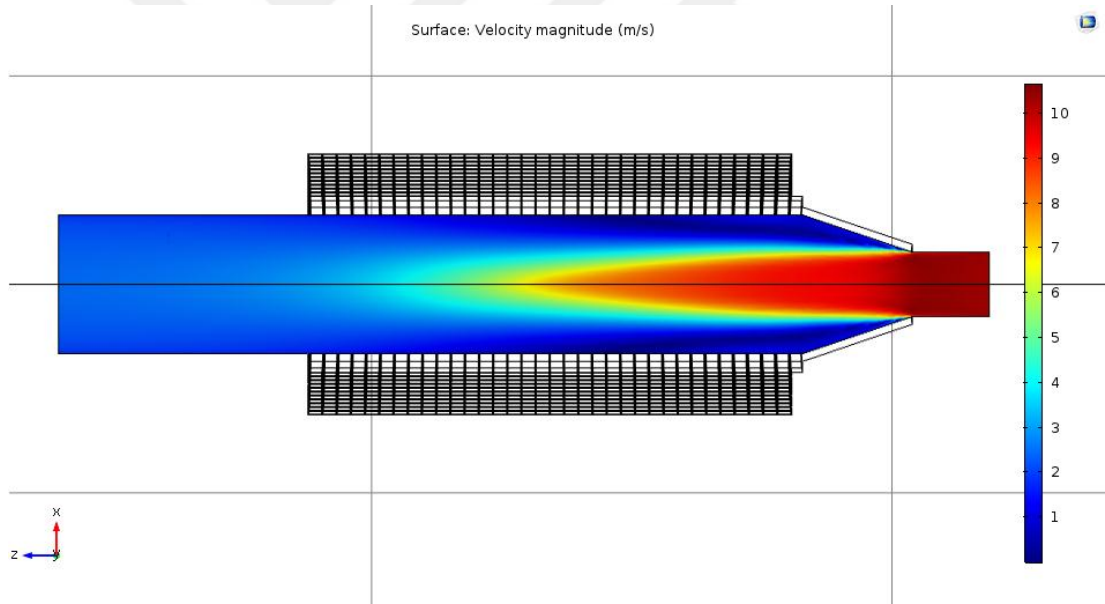
Şekil 3.57 : Yalıtımsız K-4 tipi ısıtıcının çıkış hız profili.



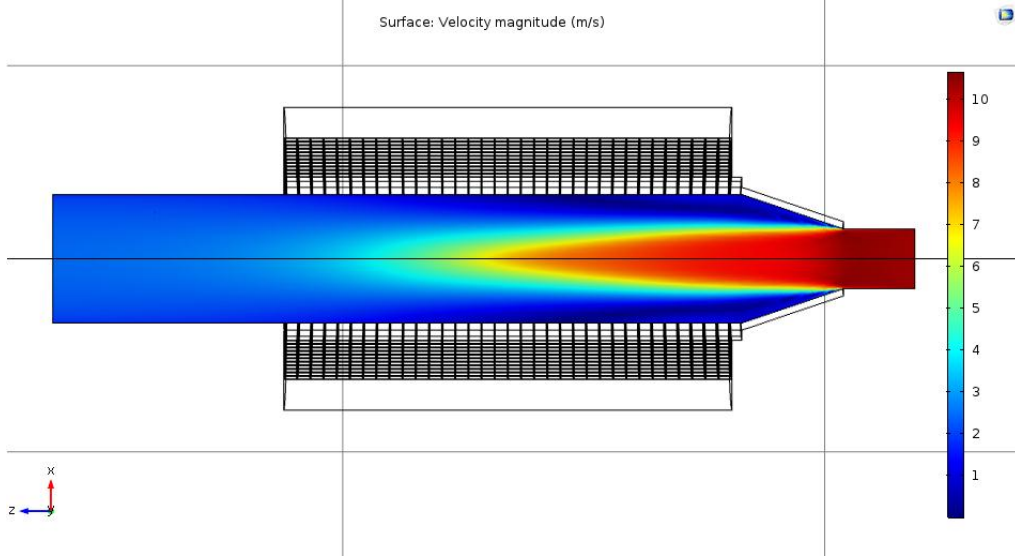


**Şekil 3.58 :** Yalıtımlı K-4 tipi ısıtıcının çıkış hız profili.

K-4 prototipinde yalıtımsız ve yalıtımlı durumlarında havanın çıkış hız profili Şekil 3.57 ve 3.58 ile verilmiştir.

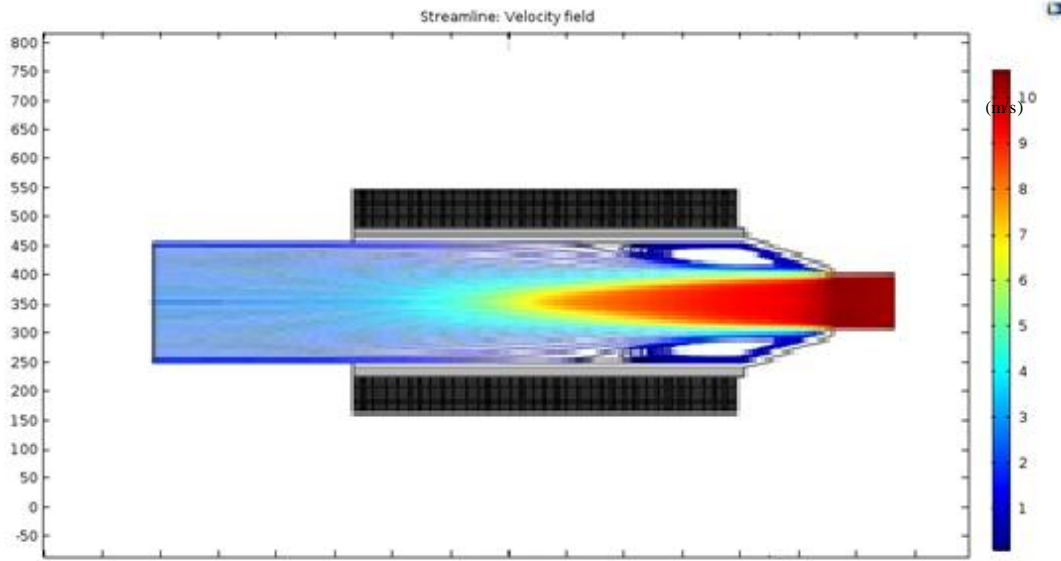


**Şekil 3.59 :** Yalıtımsız K-4 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu.

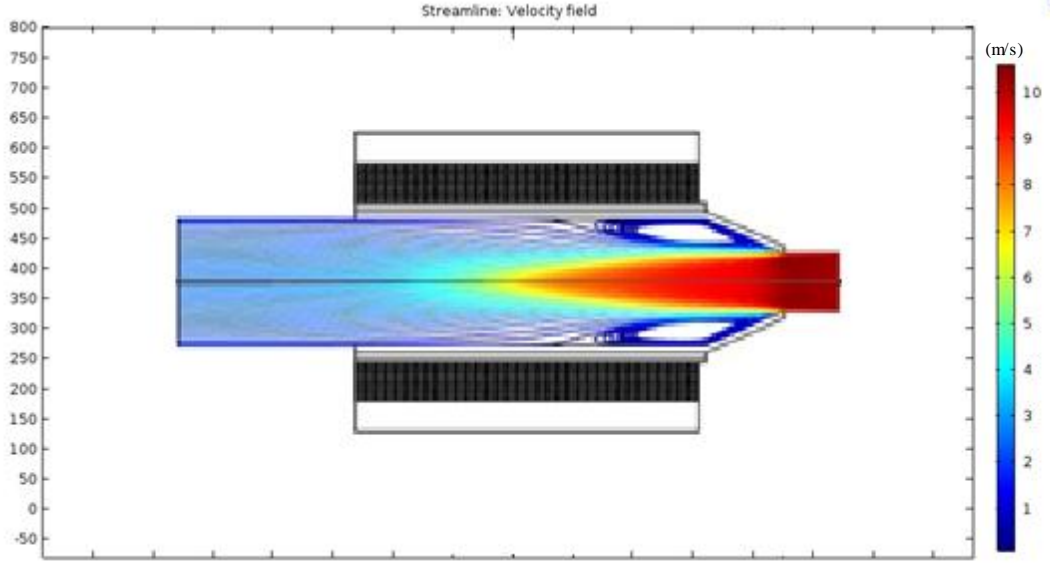


Şekil 3.60 : Yalıtımlı K-4 tipi ısıtıcının çıkış hız konturu.

K-4 prototipinin yalıtımlı ve yalıtımsız durumları için elde edilen çıkış hız konturları Şekil 3.59 ve Şekil 3.60 ile verilmiştir.

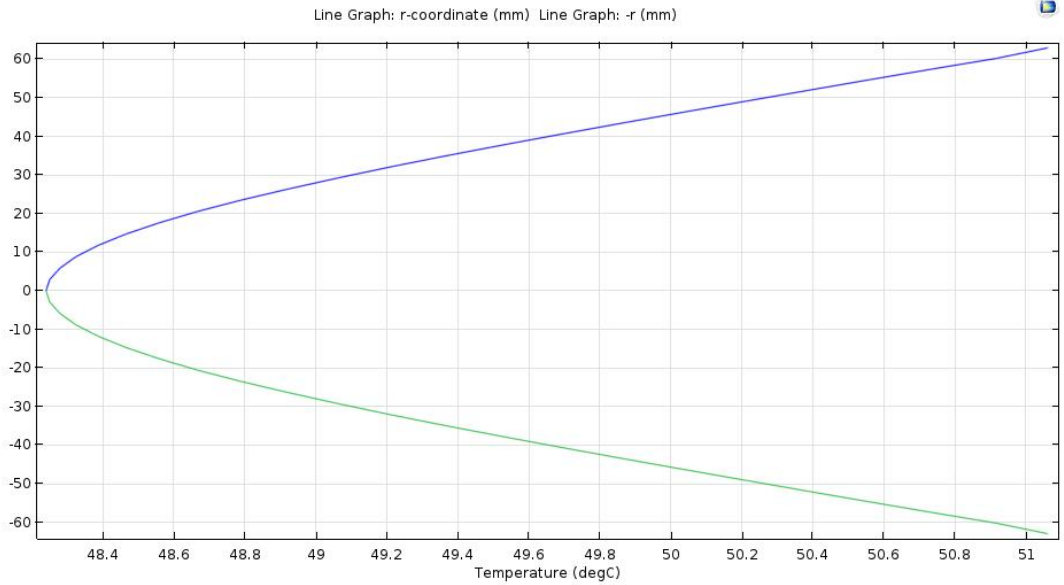


Şekil 3.61 : Yalıtımsız K-4 tipi ısıtıcında havanın çıkış hız akım çizgileri.

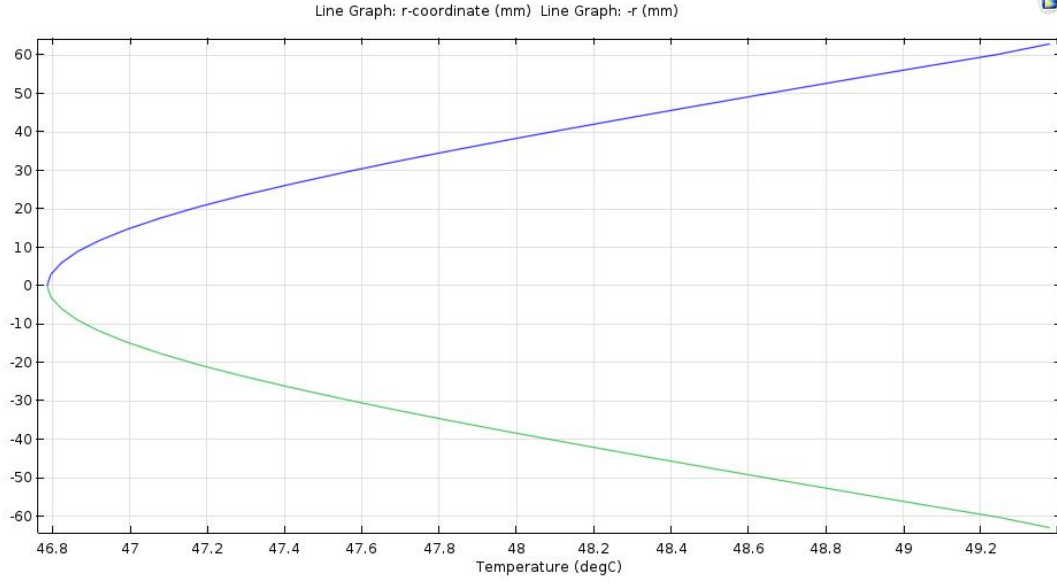


**Şekil 3.62 :** Yalıtımlı K-4 tipi ısıtıcıda havanın çıkış hız akım çizgileri.

Şekil 3.61’de K-4 prototipinin yalıtımsız çıkış hız akım çizgileri verilirken, Şekil 3.62 ile yalıtımlı çıkış hız akım çizgileri verilmiştir.

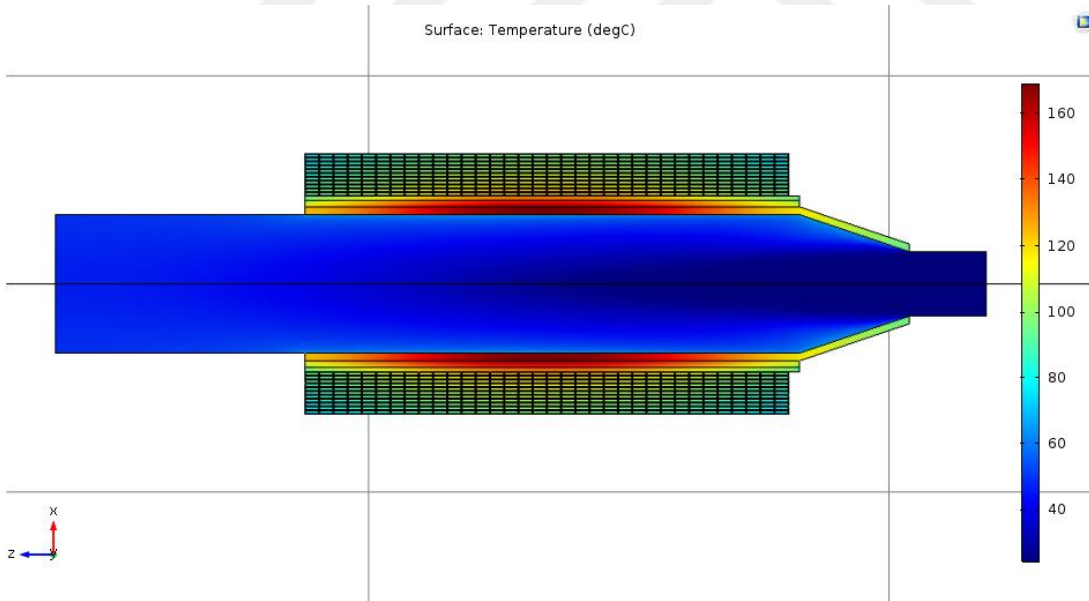


**Şekil 3.63 :** Yalıtımsız K-4 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.

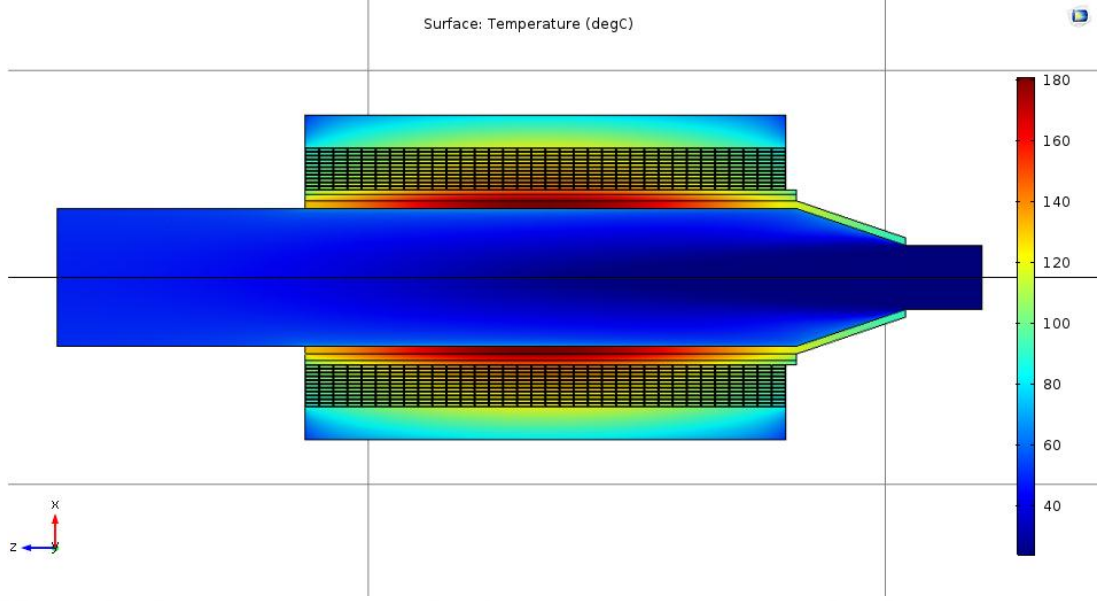


**Şekil 3.64 :** Yalıtımlı K-4 tipi ısıtıcıda havanın çıkış sıcaklık profili.

Şekil 3.63’de yalıtımsız K-4 prototipinden, Şekil 3.64’te ise yalıtımlı prototipden havanın çıkış sıcaklık profilleri verilmiştir. Şekil 3.65 ve Şekil 3.66’da ise yalıtımsız ve yalıtımlı durumların sıcaklık kontrolleri gösterilmiştir.

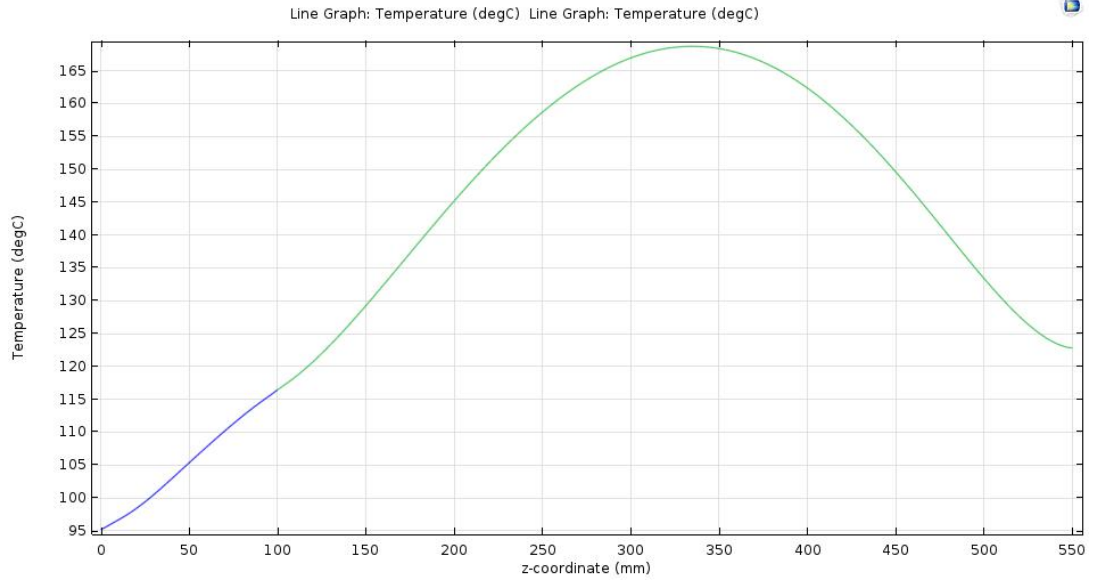


**Şekil 3.65 :** Yalıtımsız K-4 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu.

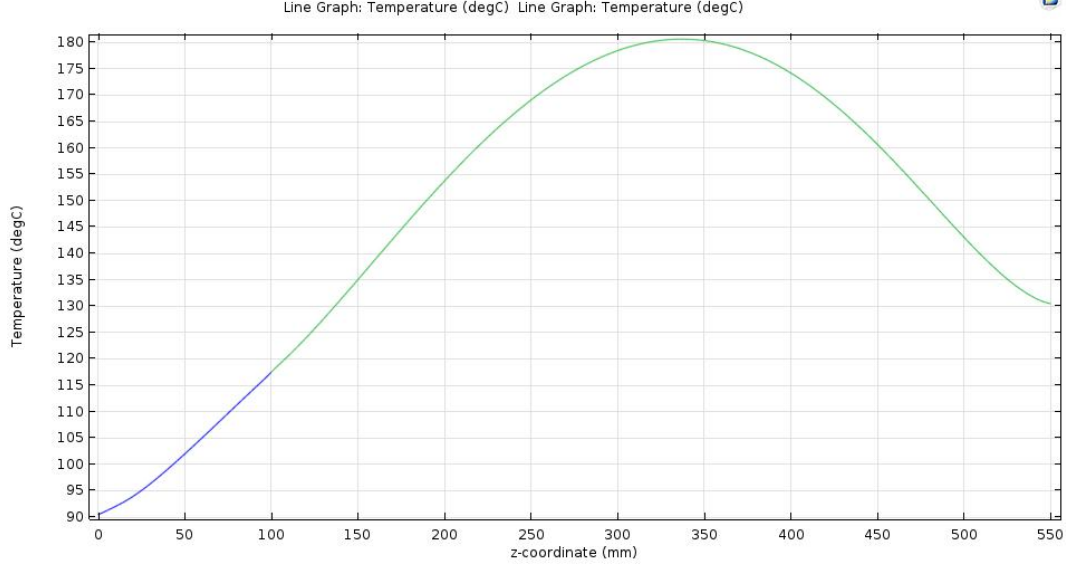


**Şekil 3.66 :** Yalıtımlı K-4 prototipinden çıkan havanın sıcaklık konturu.

Şekil 3.67'de yalıtımsız K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcısının iç cidarında oluşan sıcaklık dağılımının analiz sonucu verilmiştir. Şekil 3.68 ile verilen yalıtımlı sistemin grafiği de göz önüne alındığında, yalıtımsız sisteme göre havanın çıkış sıcaklığının azaldığı görülmektedir.

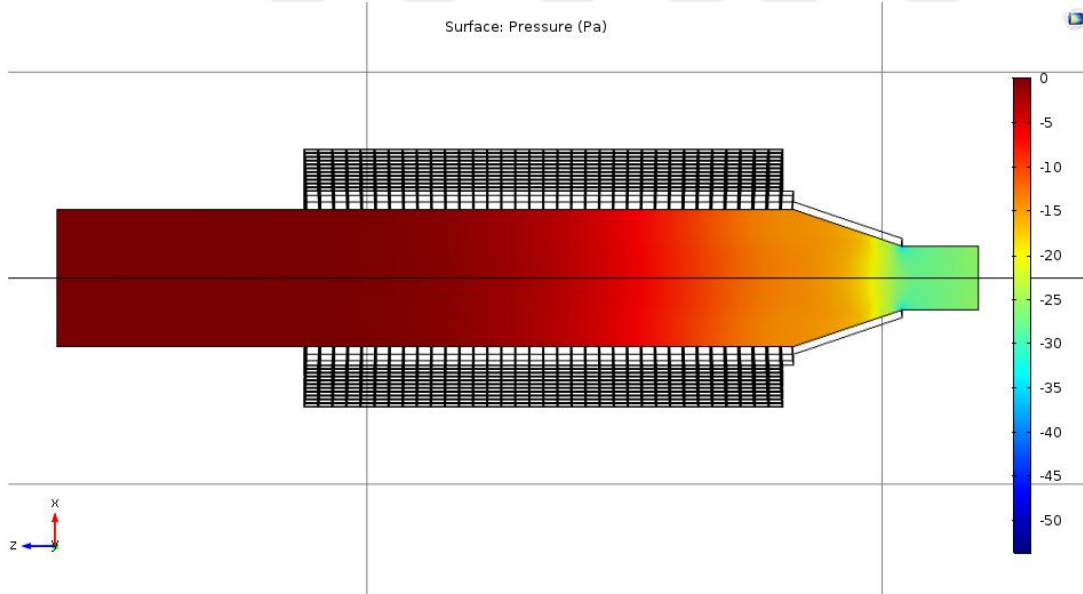


**Şekil 3.67 :** Yalıtımsız K-4 prototipinde iç cidar sıcaklık dağılımı.

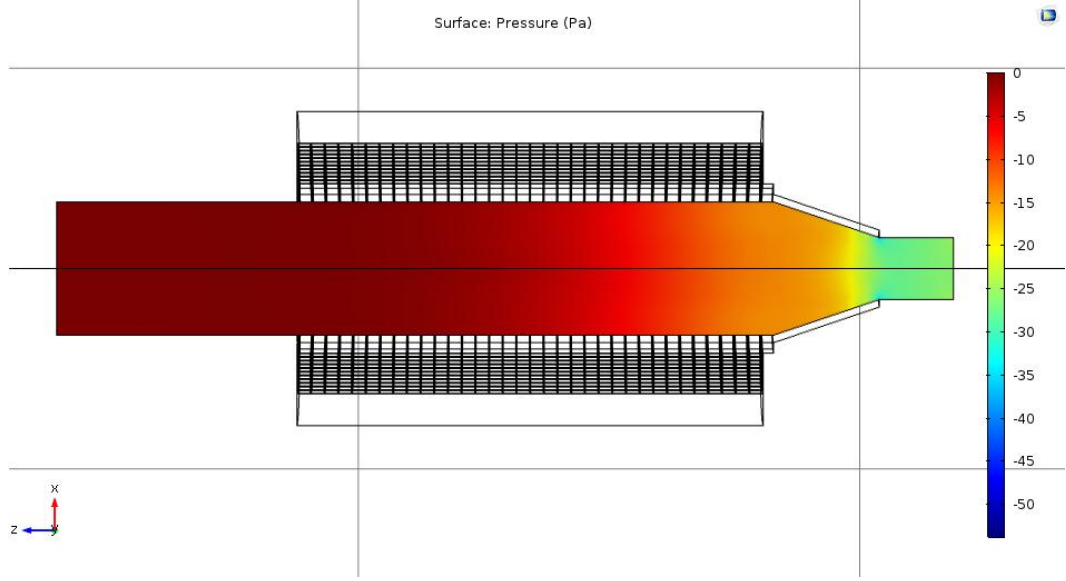


**Şekil 3.68 :** Yalıtımlı K-4 prototipinde iç cidar sıcaklık dağılımı.

Şekil 3.69 ve Şekil 3.70 ile verilen basınç kontrolleri, K-4 tipi ısıtıcının yalıtımsız ve yalıtımlı durumları değerlendirilerek elde edilmiştir. Kovanın girişinden itibaren basıncın artışı her iki şekilde de görülebilmektedir.



**Şekil 3.69 :** Yalıtımsız K-4 prototipinde basınç kontrolü.

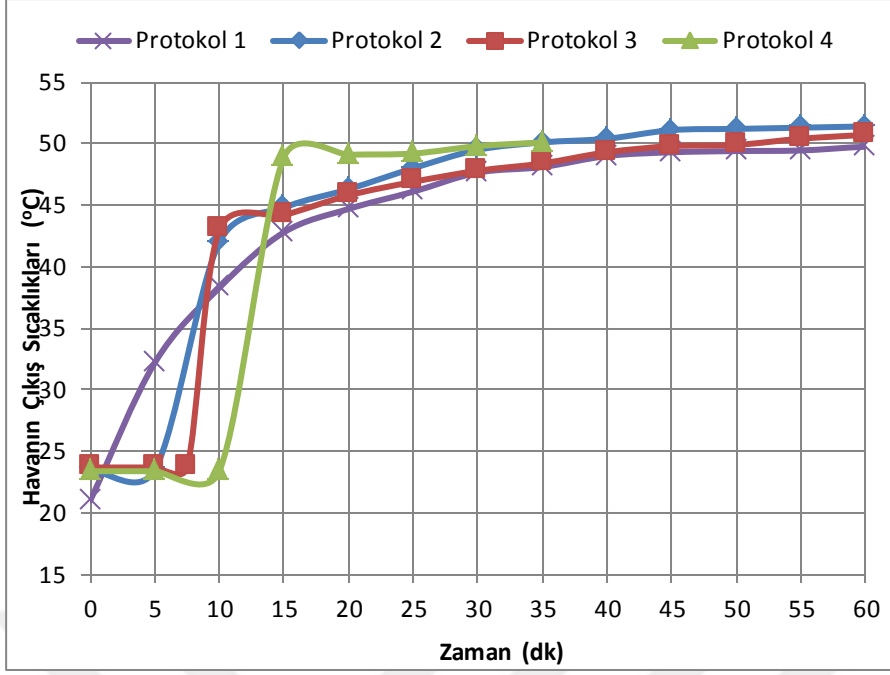


Şekil 3.70 : Yalıtımlı K-4 prototipinde basınç konturu.

### 3.6 İndüksiyonlu Hava Isıtıcısında Akış Parametrelerinin Genel Etkisi

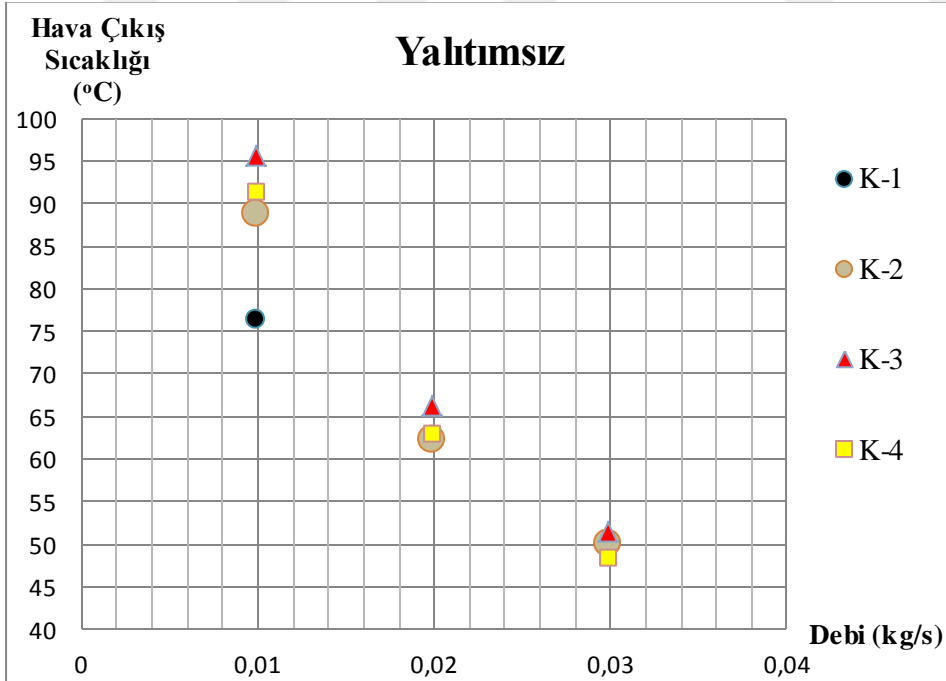
İndüksiyonlu hava ısıtma sisteminde, tüm ısıtma uygulamalarında olduğu gibi, verim ve akış parametrelerinin analizi oldukça önemlidir. Bu kapsam altında, verim artışına yönelik olarak, akışkanın hızında ve hareket halinde bulunduğu yüzeyin geometrisinde yapılan değişimler incelenmiştir. Ek olarak, ısı kayıplarının önlenmesi adına yalıtım durumunda da analizler yapılmıştır.

Bu tez çalışmasına ek olarak yapılan makale çalışmasında, indüksiyonlu hava ısıtıcısında geçici rejim şartları incelenmiştir. Çalışmada hava akışı ile elektrik girişi aynı anda verilmesinin yanında (Protokol 1), aralarında 5 dk (Protokol 2), 7.5 dk (Protokol 3) ve 10 dk (Protokol 4) süre bırakılmıştır. Şekil 3.71 ile bu protokol çalışmasından elde edilen hava çıkış sıcaklığı değerleri verilmiştir. Sisteme elektrik enerjisi beslemesinin gecikmesi havanın sürekli rejime ulaşma süresini kısaltmıştır. Ancak ısı kayıpları hesaplamalarına göre akışkan girişinin 10. dk'ya kadar yapılmaması durumunda, sistemde ısının birikerek ortama verildiği ve bu nedenle meydana gelen kayıpların termal verimi azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Aynı işlem K-1, K-2, K-3 ve K-4 tipi ısıtıcılar içinde yapıldığında aynı sonuca ulaşılabilecektir.



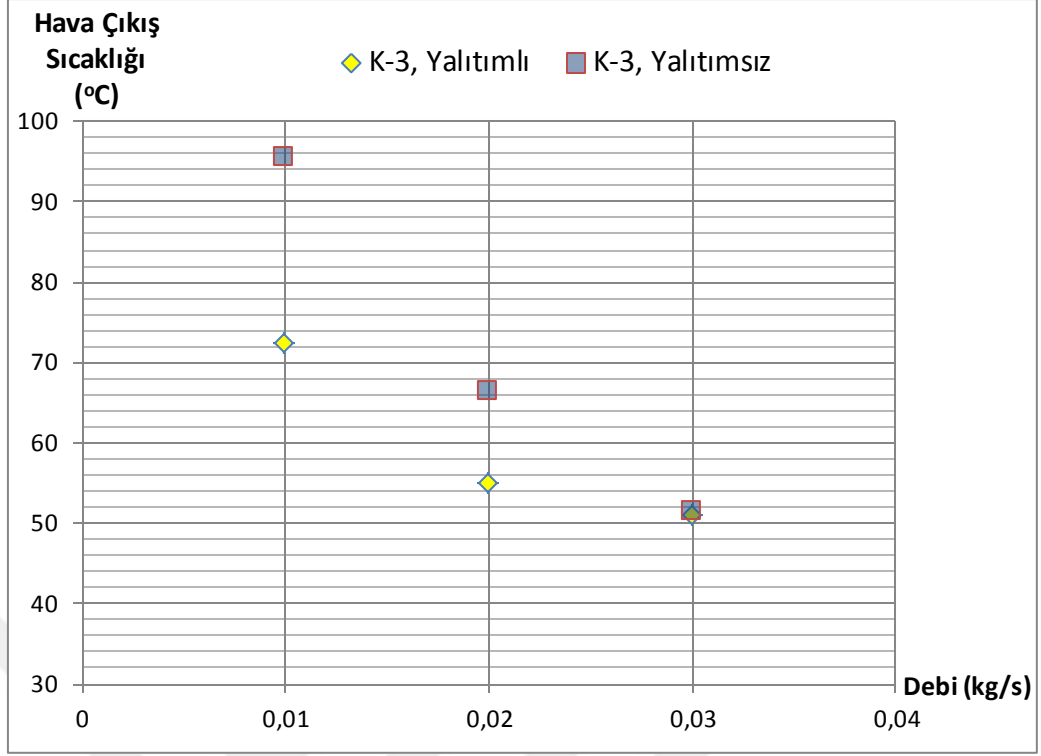
Şekil 3.71 : Protokol çalışmasında havanın çıkış sıcaklıkları.

İndüksiyonlu ıstımda, havanın debisi ile sistemden çıkış sıcaklığı arasında, Şekil 3.72'de gösterildiği gibi bir ilişki bulunmaktadır. Debinin artması ile havanın çıkış sıcaklığında düşüş meydana gelmiştir.



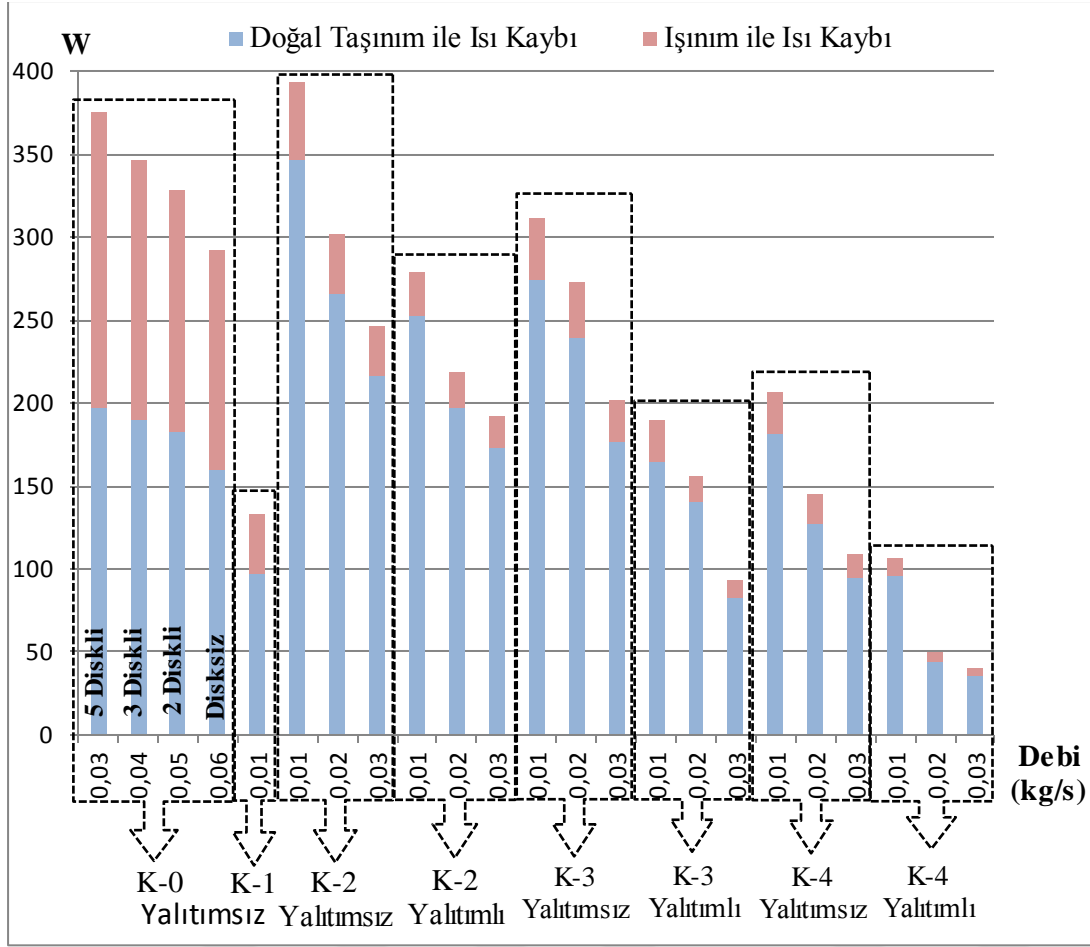
Şekil 3.72 : Yalıtımsız prototiplerde debi ve hava çıkış sıcaklığı ilişkisi.





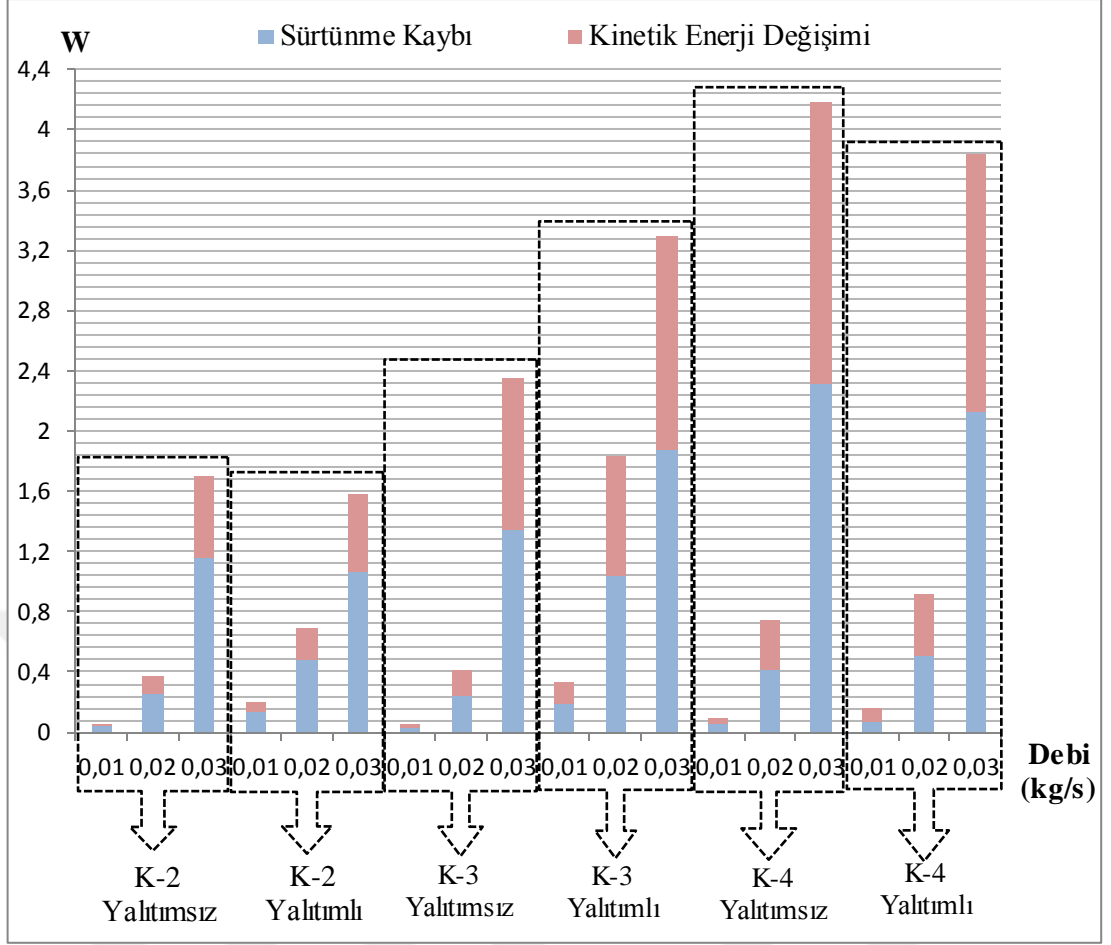
**Şekil 3.73 :** K-3 sisteminin yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarında havanın çıkış sıcaklığı.

Yalıtımın sistem üzerindeki etkisinin görülebilmesi amacıyla bir prototip üzerinde durulmuştur. Numune olarak K-3 tipi ısıtıcı göz önüne alındığında, havanın çıkış sıcaklığı Şekil 3.73 ile ifade edildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 3.73'ten de görüldüğü gibi, yalıtım kullanılması sürekli rejim şartları altında havanın çıkış sıcaklığını düşürmüştür. Ancak debi artışı ile yalıtımlı ve yalıtımsız sistemler arasındaki hava çıkış sıcaklığı farkı azalmaktadır. Aynı durum diğer prototipler için de söz konusu olmuştur.



Şekil 3.74 : K tipi indüksiyonlu hava ısıtıcılarında doğal taşınım ve ışınım kayıpları.

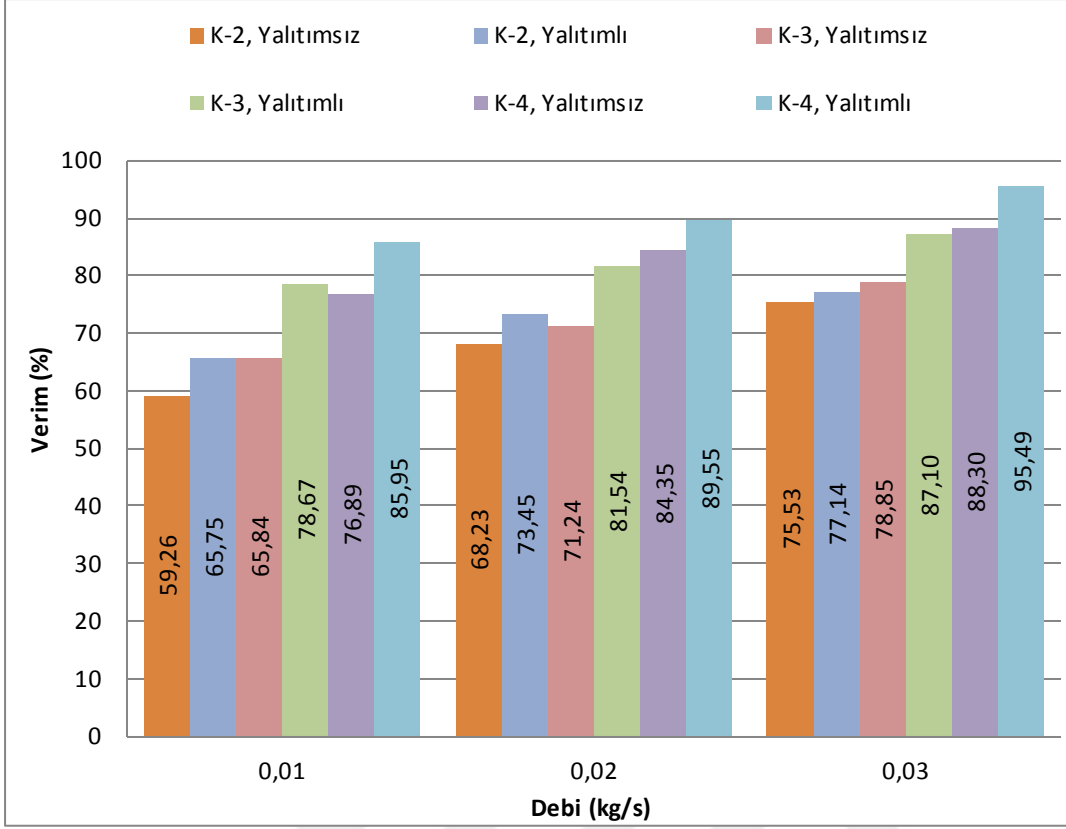
Şekil 3.74'te K tipi indüksiyonlu hava ısıtıcılarında, doğal taşınım ve ışınım ile meydana gelen ısı kayıpları verilmiştir. Şekil 3.74'te görüldüğü gibi, yalıtım kullanımının yanında, debi değerinin artışı da ısı kayıplarının azalmasını sağlamıştır. Ayrıca K-2'den K-4'e doğru gidildikçe, çıkış çapının artışı ile kayıp miktarlarında azalma söz konusu olmuştur.



Şekil 3.75 : K-2, K-3 ve K-4 tipi indüksiyonlu hava ısıtıcılarında kinetik enerji değişimleri ve sürtünme kayıpları.

K-2, K-3 ve K-4 tipi indüksiyonlu akışkan ısıtıcı sistemlerinde kinetik enerji değişimleri ve sürtünme kayıpları Şekil 3.75 ile verilmiştir. Şekil 3.75'ten, debi artışı ile kinetik enerji değişimi ve sürtünme kaybı toplamında artış olduğu görülmektedir. Ayrıca kovanın çıkış kapağı çapının büyümesine bağlı olarak bu kayıpların arttığı da söylenebilmektedir.

Yalıtım malzemesi kullanımı hakkında net bir yargıya varmak söz konusu değildir.  $m_3$  debi değerinde, K-2 ve K-4 sistemlerinde yalıtım kullanımı bu kayıpların azaltılmasında yararlı olmuştur. Ancak K-3 sisteminde yalıtım kullanımının faydası görülmemiştir. Yalıtım malzemesi kullanımı gibi diğer parametrelerin üzerinde de kesin bir yargıda bulunmak bu sonuçlar doğrultusunda doğru olmayacaktır.



Şekil 3.76 : K tipi indüksiyonlu hava ısıtma sistemleri termal verim ifadeleri.

İndüksiyonlu hava ısıtma sistemi deneylerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplanan termal verim değerleri Şekil 3.76'daki gibidir. Burada, debi artışı ve yalıtım kullanımı termal verimi arttırmıştır. Ancak bu noktada asıl önem taşıyan husus, indüksiyonlu hava ısıtma düzeneğinin çıkış kapağının geometrisidir. Çıkış kapaklarında çapın artışı ile beraber verim artışı da söz konusu olmuştur. En büyük çıkış çapına K-4 sistemi sahiptir. K-4 tipi,  $m_3$  debisi ile en yüksek debiye sahip olan yalıtımlı sistem %95,49 ile en yüksek termal verime sahiptir. En düşük termal verim ise, çıkış çapı en düşük olan K-2 tipinde, yalıtımsız şekilde,  $m_1$  debisinde kullanıldığında %59,26 olarak hesaplanmıştır. Eğer geçici rejim sürelerinin kısaltılması istenirse hava sisteme elektrik enerjisinden daha sonra verilmelidir. Bu şekilde sistemin ısınma süresi kısılır ve hava sistemden daha fazla ısı çekerek istenilen bölgeye verilir.

### 3.7 İndüksiyonlu Hava Isıtıcısında Belirsizlik Analizi

İndüksiyonlu hava ısıtıcısı prototiplerinin  $m_3$  debisi, yalıtımsız durumları için belirsizlik analizleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 3.15 ile verilmiştir.

**Çizelge 3.15** : K tipi ısıtıcıların ısı verimlerinde ki belirsizlik oranları.

	<b>K-1</b>	<b>K-2</b>	<b>K-3</b>	<b>K-4</b>
<b><math>W_{\eta,I}</math></b>	0,013	0,043	0,064	0,083
<b><i>Belirsizlik (%)</i></b>	2,2	5,7	8,1	9,4





#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

İndüksiyonlu hava ısıtma sistemleri üzerine yapılan bu tezde, geometri ve debi gibi akış parametrelerinin kayıp ve verim üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan deney ve analizlerde, 4 farklı prototip değerlendirilmiştir. Ayrıca deneyler yalıtım uygulaması ile tekrarlanmış, yalıtımın etkisi değerlendirilmiştir. İş akışkanı olarak, sıkıştırılabilir bir akışkan olan hava kullanılmıştır.

Endüstride henüz kullanım alanı olmayan indüksiyonlu akışkan ısıtıcısı tasarımının ve termal veriminin iyileştirilmesi, kayıp miktarının en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, yapılan deneylerin doğruluğu ve kıyaslanabilirliği açısından COMSOL programı ile modellenmesi yapılmıştır.

Havanın sıkıştırılabilir akışkan olması dolayısıyla, hareket halindeyken önüne çıkan her engelin enerji kaybına neden olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçları göz önüne alındığında, çıkış kesit çapının genişletilmesi, verimin artmasını sağlamıştır. Çıkış çapının daraltılması gibi havanın önünde oluşturulan, ısı transferi miktarını arttıracak düşünülen engeller, çıkış sıcaklık değerini arttırırken, verimin azalmasına neden olmuştur. Buradan hareketle indüksiyonlu hava ısıtıcılarında, maksimum verimin sağlanabilmesi için K-4 prototipi gibi, çıkış kesit çapının büyük tutulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Tüm prototiplerde, debi miktarlarında meydana gelen artış, havanın çıkış sıcaklığında düşüşe neden olmuştur. Ancak havanın debisindeki artış ile sistem cidarında fazla ısı depolanmasını engellemesi, ısı kayıplarının azalması ve toplam enerji kayıplarının azalmasını sağlamıştır. Bu nedenle debi artışı, verimin artmasını sağlamıştır.

Isı transferi uygulamalarında ısı kayıplarının engellenmesinin en etkili yolu yalıtımdır. Çalışmada, indüksiyonlu hava ısıtma sistemlerine yalıtım uygulaması ile dış yüzeylerde meydana gelen ısı kayıplarının en aza indirilmesi sağlanmıştır.

**Çizelge 4.1** : K tipi indüksiyonlu hava ısıtıcılarından elde edilen sonuçlar.

	K-Tipi	Debi	Yalıtım	Değer
$T_{\text{çıkış, max}}$	K-3	0,01	Yok	95,4 °C
$T_{\text{çıkış, min}}$	K-4	0,03	Yok	48,2 °C
$V_{\text{çıkış, max}}$	K-1	0,01	Yok	9,8 m/s
$V_{\text{çıkış, min}}$	K-4	0,01	Yok	0,8 m/s
$t_{\text{geçici rejim, max}}$	K-3	0,01	Yok	1,83 h
$t_{\text{geçici rejim, min}}$	K-1	0,01	Yok	0,75 h
$P_{\text{bobin, max}}$	K-2	0,03	Yok	1039,5 W
$P_{\text{bobin, min}}$	K-4	0,01	Yok	920,7 W
$Q_{\text{hava, max}}$	K-4	0,03	Var	944,4 W
$Q_{\text{hava, min}}$	K-1	0,01	Yok	524,5 W
$P_{\Sigma k, \text{max}}$	K-1	0,01	Yok	407,1 W
$P_{\Sigma k, \text{min}}$	K-4	0,03	Var	43,6 W
$\eta_{l, \text{max}}$	K-4	0,03	Var	77,82%
$\eta_{l, \text{min}}$	K-1	0,01	Yok	47,86%
$\eta_{\text{Termal, max}}$	K-4	0,03	Var	95,49%
$\eta_{\text{Termal, min}}$	K-1	0,01	Yok	56,30%

Çizelge 4.1'den de görüldüğü gibi tasarımların içinde en verimli olanı; K-4 tipi, m<sub>3</sub> debisinin kullanıldığı yalıtımlı olan sistemdir. Havanın sıkışarak enerji kaybetmesine müsaade edilmeyen bu sistemde, hava çıkışının engelsiz olması sağlanmıştır.



Bu çalışmadan yola çıkarak kovan çıkışına eklenecek olan, çapı kovan çapından daha büyük olan bir çıkış kapağının etkisi araştırılabilir. İndüksiyonlu ısıtıcının kullanım alanlarının yaygınlaşması amacıyla farklı iş akışkanları ve kovan geometrileri kullanılabilir. Geçici rejim süresinin azaltılması, farklı sayıda kovan kullanımı gibi durumların da araştırılarak sistem arttırılmasına yönelik tasarımlar araştırılmalıdır.





## KAYNAKLAR

- Acero, J., Alonso, R., Burdio, J.M. and Barragan, L.A.** (2006). Enhancement Of Induction Heating Performance By Sandwiched Planar Windings, *Electronics Letters*, Vol. 42, No. 4.
- Acero, J., Carretero, C., Millán, I., Alonso, R., Lucía, O. and Burdío, J.M.** (2010). Experimental Setup For Inductive Efficiency Measurements Of Domestic Induction Systems Based On Energy Balance, *36th Annual Conference On IEEE Industrial Electronics Society*, ISSN 1553-572X, pp. 114-119.
- Altıntaş, A. ve Karahan, M.** (2015). İndüksiyon Isıtma Yöntemiyle Çalışan Sıvı Isıtıcısı Aparatlarının Araştırılması, *SDU International Technologic Science*, Vol. 7, No. 3, pp. 16-26.
- Altıntaş, A., Yıldız, M.N. ve Kızılkaya İ.** (2012). İndüksiyonlu Isıtma Prensipleri İle Çalışan Mikrokontrol Denetimli Bir Sıvı Isıtıcısı Tasarımı, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, ISSN-102-3055.
- Aung, S.S., Wai, H.P., Soe, N.N.** (2008). Design Calculation And Performance Testing Of Heating Coil In Induction Surface Hardening Machine, *World Academy Of Science, Engineering And Technology*, Vol. 18, pp. 416-420.
- Bednarz, T., Fornalik, E., Tagawa, T., Ozoe, H. and Szmyd, J.S.** (2005). Experimental And Numerical Analyses Of Magnetic Convection Of Paramagnetic Fluid In A Cube Heated And Cooled From Opposing Verticals Walls, *International Journal Of Thermal Sciences*, 44 (2005) pp. 933–943.
- Beer, S. and Günter, U.** (2012). Combined Log Heating Furnace - Inlineconcept For Aluminum Extruders, *Induction Technology, Heat Processing*, pp. 77-80.
- Bera, A., Babadağlı, T.** (2015). Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/ bitumen recovery and future projects: A review. *Applied Energy*. 151 (2015) 206-226
- Bermúdez, A., Gómez, D., Muñiz, M.C., Salgado, P. and Vázquez, R.** (2009). Numerical Simulation Of A Thermo-Electromagneto-Hydrodynamic Problem In An Induction Heating Furnace, *Applied Numerical Mathematics*, 59 (2009) pp. 2082–2104.

- Callebaut, J.** (2011). Application Note Induction Heating, ECI Publication No: CuO123, Vol. 2.
- Chatterjee, K., Ramanarayanan, V.** (1992). Computer-Aided Design Of Pancake Coils For Induction Heaters, Journal of the Indian Institute of Science Bangalore, Vol. 72, No. 2, pp. 111-119.
- Codrington, J., Nguyen, P., Ho, S.Y. and Kotousov, A.** (2009). Induction Heating Apparatus For High Temperature Testing Of Thermo-Mechanical Properties, Applied Thermal Engineering, 29 (2009) pp. 2783–2789.
- Courtessole, C. and Etay, J.** (2013). Flows And Mass Transfers In Two Superimposed Liquid Layers In An Induction Furnace, International Journal Of Heat And Mass Transfer, 65 (2013) pp. 893–906.
- Curran, J.S. ve Featherstone, A.M.** (1988). Electric-Induction Fluid Heaters, Power Engineering Journal, Vol. 2, pp. 157-160, ISSN 0950-3366.
- Çelik, Ö.** (2005). İndüksiyon Fırını Tasarım Ve Yapımı, Yüksek Lisans Tezi, Frat Üniversitesi, Elazığ.
- Çetin, S.** (2005). Bir Fazlı İndüksiyon Isıtma Sistemi Analizi Ve Dizaynı, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Daly, S.A., De Paor, A.M. ve Simpson, R.J.** (1983). Modelling And Control Of A Wind-Driven Induction Generator For Water Storage Heating, IEE Proceedings, Vol. 130, No. 9, pp. 596-603.
- Dereci, S.** (2010). İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi Ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dilip, K.V., Vasa, N.J., Carsten, K. and Ravindra, K.U.** (2011). Incineration Of Diesel Particulate Matter Using Induction Heating Technique, Applied Energy, 88 (2011) pp. 938–946.
- Durukan, İ.** (2007). Effects Of Induction Heating Parameters On Forging Billet Temperature, A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, In Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of Master Of Science In Mechanical Engineering.
- Duygu, A.** (2014). Bulaşık Makinesi Tasarımı Ve CFD Analizi, Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Fornalik, E., Filar, P., Tagawa, T., Ozoe, H. and Szmyd, J.S.** (2005). Experimental Study On The Magnetic Convection In A Vertical Cylinder, Experimental Thermal And Fluid Science, 29 (2005) pp. 971–980.

- Fornalik, E., Filar, P., Tagawa, T., Ozoe, H.S. and Szmyd, J.S.** (2006). Effect Of A Magnetic Field On The Convection Of Paramagnetic Fluid In Unstable And Stable Thermosyphon-Like Configurations, *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 49 (2006) pp. 2642–2651.
- Haimbaugh, R.E.** (2001). *Practical Induction Heat Treating, Chapter 2, Theory Of Heating By Induction.*
- Holman, J.P.** (2011). *Experimental Methods For Engineers, Eighth Edition*, ISBN: 978-0-07-352930-1, Library of Congress Cataloging in Publication Data
- Jegou, C., Boccaccio, E., Journeau, C., Piluso, P. and Moneris, J.** (t.y.). *Induction Heating Simulation Of Residual Power In The Vulcano Facility.*
- Jiang, H., Nguyen, T.H., Prud'homme, M.** (2007). Optimal Control Of Induction Heating For Semi-Solid Aluminum Alloy Forming, *Journal Of Materials Processing Technology*, 189 (2007) pp. 182-191.
- Johnson, R.J. and Pitchumani, R.** (2003). Enhancement Of Flow In VARTM Using Localized Induction Heating, *Composites Science And Technology*, 63 (2003) pp. 2201–2215.
- Kaneda, M., Hishikawa, S., Tanaka, T., Guo, B. and Nakaoka, M.** (2003). Innovative Electromagnetic Induction Eddy Current-Based Dual Packs Heater Using Voltage-Fed High-Frequency PWM Resonant Inverter for Continuous Fluid Processing In Pipeline, *Industrial Electronics Society, IECON '03., The 29th Annual Conference of the IEEE*, Vol. 2, pISBN:0-7803-7906-3, pp. 1679 – 1684.
- Kang, C.G., Seo, P.K. and Jung, H.K.** (2003). Numerical Analysis By New Proposed Coil Design Method In Induction Heating Process For Semi-Solid Forming And Its Experimental Verification With Globalization Evaluation, *Materials Science And Engineering*, A341 (2003) pp. 121-138.
- Jang J.H. ve Chiu Y.W.** (2007). Numerical and Experimental Thermal Analysis for a Metallic Hollow Cylinder Subjected to Step-Wise Electro-magnetic Induction Heating, *Applied Thermal Engineering*, Syf: 1883-1894
- Karcher, C. and Kolesnikov, Y.** (2005). Electromagnetic Control Of Convective Heat Transfer During Electron Beam Evaporation: Model Experiments, *Vacuum* 77 (2005) pp. 437–441.
- Kolesnikov, Y.B., Andreev, O.V.** (1997). Heat-Transfer Intensification Promoted By Vortical Structures In Closed Channel Under Magnetic Field, *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 82-90.

- Kranjc, M., Zupanic, A., Miklavcic, D. and Jarm, T.** (2010) Numerical Analysis And Thermographic Investigation Of Induction Heating, *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 53 (2010) pp. 3585–3591.
- Kuzmichev, A. and Tsybulsky, L.** (2011). *Evaporators With Induction Heating And Their Applications*, *Advances In Induction And Microwave Heating Of Mineral And Organic Materials*, ISBN 978-953-307-522-8.
- Li, C., Burke, N., Gerdes, K., Patel, J.** (2013). The Undiluted, Non-Catalytic Partial Oxidation Of Methane In A Flow Tube Reactor-An Experimental Study Using Indirect Induction Heating, *Fuel*, 109 (2013) pp. 409–416.
- Lim, C.H., Airoidi, G., Dominy, R.G. and Mahkamov, K.** (2011). Experimental Validation Of CFD Modelling For Heat Transfer Coefficient Predictions In Axial Flux Permanent Magnet Generators, *International Journal Of Thermal Sciences*, 50 (2011) pp. 2451-2463.
- Lin, H.L., Chen, S.C., Jeng, M.C., Minh, P.S., Chang, J.A. and Hwang, J.R.** (2012). Induction Heating With The Ring Effect For Injection Molding Plates, *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 39 (2012) pp. 514–522.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á. and Van De Ven M.** (2010). Induction Heating Of Electrically Conductive Porous Asphalt Concrete, *Construction And Building Materials*, 24 (2010) pp. 1207–1213.
- Lucía O., Maussion, P., Dede, E.J., Burdío J.M.** (2014). Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology and Future Challenges. *Ieee Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 5
- Luo, J. and Shih, A.J.** (2005). Inverse Heat Transfer Solution Of The Heat Flux Due To Induction Heating, *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, Vol. 127, pp. 555-563.
- Makimura, Y. Tomita, H., Motegi, S.** (2009). Superheated steam generator by induction heating, *Power Electronics and Applications. EPE '09. 13th European Conference Barcelona*, 8-10 Sept. 2009 Page(s):1 – 4, E-ISBN : 978-90-75815-13-9
- Manuel, G. and Khan, M.T.E.** (2008). Design Of An Induction Heating Domestic Water Heater System.
- Nakabori, T., Ikeda, H., Suzuki, T., Yoshida, H., Iwanabe, N. and Hattori, M.** (1994). Dispersion Of Water Drops By Induction Heating Using MOS-FET Inverter, *Circuits And Systems, Proceedings Of The 37th Midwest Symposium On IEEE*, pISBN 0-7803-2428-5, Vol. 2, pp. 1277-1280.

- Nakaharai, H., Takeuchi, J., Yokomine, T., Kunugi, T., Satake, S., Morley, N.B., Abdou, M.A.** (2007). The Influence Of A Magnetic Field On Turbulent Heat Transfer Of A High Prandtl Number Fluid, *Experimental Thermal And Fluid Science*, 32 (2007) pp. 23–28.
- Nakamizo, T., Kaneda, M., Hishikawa, S., Guo, B., Iwamoto, H. and Nakaoka, M.** (1999). New Generation Fluid Heating Appliance Using High-Frequency Load Resonant Inverter, *IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*.
- Nian, S.C., Huang, M.S. and Tsai, T.H.** (2014). Enhancement Of Induction Heating Efficiency On Injection Mold Surface Using A Novel Magnetic Shielding Method, *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 50 (2014) pp. 52–60.
- Pérez-Camacho, M.N., Abu-Dahrieh, J., Rooney, David. and Sun, K.** (2015). Biogas Reforming Using Renewable Wind Energy And Induction Heating, *Catalysis Today*, 242 (2015) pp. 129–138.
- Pleshivtseva, Y., Rapoport, E., Efimov, A., Nacke, B. and Nikanorov, A.** (2008). Special Method Of Parametric Optimization Of Induction Heating Systems, *International Scientific Colloquium Modelling For Electromagnetic Processing*, Hannover, pp. 27-29.
- Poncin, R., Çeviri: Özen, S.** (t.y.). İndüksiyonla Takoz Isıtma ([www.metalurji.org.tr](http://www.metalurji.org.tr))
- Popa, C. and Radu, P.** (2012). Analysis Of A New Induction Thermal Converter For Heating, *Energy*, 42 (2012) pp. 81-93.
- Rudnev, V.** (2008a). Successful Induction Heating Of RCS Billets, *Forge*, pp. 15-18.
- Rudnev, V.** (2013). Recent Inventions And Innovations In Induction Heating Technology, *Gear Technology*, pp. 66-69.
- Rudnev, V.** (2015). Intricacies Of Computer Simulation Of Induction Heating Processes. Alındığı tarih: 07.04.2016, Adres: <http://fliphtml5.com/ljay/kcub/basic>.
- Rudnev, V., Brown, D., Van Tyne, C.J. and Clarke, K.D.** (2008b). Intricacies For The Successful Induction Heating Of Steels In Modern Forge Shops, *Technical Proceedings And World Forging Trends Of The 19th International Forging Congress, FIA, Cleveland*, pp. 71-82.
- Rudnev, V., Loveless, D., Schweigert, K., Dickson, P. and Rugg, M.** (1999,2000). Efficiency And Temperature Considerations In Induction Re-Heating Of Bar, Rod And Slab, *The International Journal Of Thermal Technology, Industrial Heating, Induction Heat Treatments Equipment*.

- Sadakata, H., Nabob, M., Yamashita, H., Omori, H. and Terai, H.** (2002). Development Of Induction Heated Hot Water Producer Using Soft Switching PWM High Frequency Inverter, Power Conversion Conference, pISBN 0-7803-7156-9, Vol. 2, pp. 452-455.
- Sarnago, H., Lucía, O., Mediano, A. and Burdío, J.M.** (2013). Modulation Scheme For Improved Operation Of An RB-IGBT-Based Resonant Inverter Applied To Domestic Induction Heating, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 5.
- Satish, G., Kumar, K.A., Prasad, V.V. and Pasha, S.M.** (2013). Comparison Of Flow Analysis Of A Sudden And Gradual Change Of Pipe Diameter Using Fluent Software, *International Journal Of Research In Engineering And Technology*, eISSN: 2319-1163, pISSN: 2321-7308, Vol. 02.
- Shokouhmand, H. ve Ghaffari, S.** (2012). Thermal Analysis of Moving Induction Heating of a Hollow Cylinder with Subsequent Spray Cooling: Effect of Velocity, Initial Position of Coil, and Geometry. *Applied Mathematical Modelling*, Syf:4304-4323.
- Stefanov, G., Karadzinov, Lj., Sarac, V. and Dambov, R.** (2011). Distribution Of The Temperature And Energy Induction Heating Of Work Piece Copper, *Machines, Technologies*. ISSN 1313-0226.
- Tavakoli, M.H., Karbaschi, H. and Samavat, F.** (2009). Computational Modeling Of Induction Heating Process, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 11, pp. 93-102.
- Tavakoli, M.H., Karbaschi, H. and Samavat, F.** (2011). Influence Of Workpiece Height On The Induction Heating Process, *Mathematical And Computer Modelling*, 54 (2011) pp. 50–58.
- Tomita, H., Maruyama, T., Yoshimura, S. and Takahashi, N.** (2009). Superheated Steam Generator by Induction Heating, Power Electronics and Applications, EPE '09, 13th European Conference On, ISBN 978-1-4244-4432-8.
- Uchida, S., Yamagata, M. and Ishikawa, M.** (2013). Novel Rapid Synthesis Method Of LiFePO<sub>4</sub>/C Cathode Material By High-Frequency Induction Heating, *Journal Of Power Sources*, 243 (2013) pp. 481-487.
- Ujihara, A., Tagawa, T. and Ozoe, H.** (2006). Average Heat Transfer Rates Measured In Two Different Temperature Ranges For Magnetic Convection Of Horizontal Water Layer Heated From Below, *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 49 (2006) pp. 3555–3560.



- Ünver H. M., Aydemir M.T. ve Çelik V.** (2005), Power and Frequency Control in a 60 kW Induction Steel Heating Furnaces through PLC. IEE Power Engineer. Syf:36-39
- Ünver H.M.** (1996). İndüksiyon Fırınlarının Tanımlanması, Verimli Kullanımı, Karşılaştırılması, Metal - Makine Dergisi, sayı 82, s.36-45, Eylül
- Ünver H.M.** (1997-a). İndüksiyon Fırını Nedir?, Enerji, Elektrik, Elektronik 3E Dergisi, sayı 33, s.62-68, Şubat
- Ünver H.M.** (1997-b). İndüksiyon Fırınlarının Analizi, Enerji, Elektrik, Elektronik 3E Dergisi, sayı 34, s.64-69, Mart
- Ünver H.M.** (2003). Isıl İşlem Atölyelerinin Otomasyonu için PLC Kontrollü İndüksiyon Ocağı Tasarımı, 3. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Ankara, 18-20 Ağustos, p.416-424
- Ünver Ü.** (2016). Efficiency Analysis of Induction Air Heater and Investigation of Distribution of Energy Losses, ISSN 1330-3651, Tehnicki vjesnic, "(baskıda)"
- Ünver, H.M. ve Aydemir, M.T.** (2004). A Simple Induction Heating Design For The Steel Molds Of Aluminum Extrusion Presses, 2nd International Conference On Technical And Physical Problems In Power Engineering, No. 14, pp. 57-60.
- Ünver, Ü. and Ünver, H.M.** (2013). Comparison Of Natural Gas Fired And Induction Heating Furnaces, Proceeding of the Sixth International Exergy, Energy and Environment Symposium, ISBN: 978-605-85878-0-9, pp. 721-727.
- Waeckerle, T., Fraisse, H., Boulogne, B. and Spire, S.L.** (2006). New Alloys And Multilayer Configuration Of Them To Get Self-Regulated Temperature Cookware (SRTC) In Induction Heating, Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, 304 (2006) pp. e844–e846.
- Yıldız, M.N. and Alan, İ.** (2009). Kalorifer Sistemlerinde İndüksiyon Tabanlı Isıtmanın Kullanılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (Iats'09), Karabük.
- Yıldız, M.N. ve Alan, İ.** (2006). Sıvıların İndüksiyonla Isıtılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, ISSN:1304-4141, pp. 45-50.
- Zimm, S.** (1988). "Elements of Induction Heating, Design, Control and Applications" , ASM Int.

- [1] The EPRI Center For Materials Fabrication, (1993). Induction Heating Technology Vol. 2, No. 1 Revised.
- [2] Alındığı tarih: 16.04.2016, adres:  
<http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/5345SampleBuyNow.pdf/917605db-7173-4333-80d0-609dfc9ef8cf>
- [3] Alındığı tarih: 18.05.2016, adres: <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/oto-trafolari-elektrikport-akademi/6773#ad-image-0>
- [4] **Çengel Y.A. and Boles M.A.** (2002). Thermodynamics an Engineering Approach (Fourth Eddition), McGraw Hill. Pg:930, ISBN0-07-23832-1, USA.
- [5] **Çengel Y.A. and Cimbala J.M.** (2015). Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications. (Translate from third eddition: In Turkish) Pg:987, Palme Yayıncılık, Ankara. ISBN: 978-605-355-274-1.
- [6] **Çengel Y.A.** (2011). Isı ve Kütle Transferi-Pratik bir yaklaşım, (Üçüncü Baskıdan Çeviri), İzmir Güven Kitabevi, ISBN: 978-975-6240-41-0.
- [7] **Incropera F.P. and DeWitt D.P.** (2006). Isı Ve Kütle Geçişinin Temelleri, Literatür Yayınları: 51, Sertifika No: I0843, İstanbul, ISBN:978-975-04-0106-0.
- [8] Alındığı tarih: 25.04.2016, adres:  
[http://www.kraftteknik.com/urun/detay.php?id=421&baslik=2\\_Kanalli\\_Sicaklik\\_Kayit\\_Cihaz\\_i\\_Sicaklik\\_Kayit\\_Cihaz\\_i\\_Kanalli\\_K\\_Tipi\\_Problu\\_Datalogger](http://www.kraftteknik.com/urun/detay.php?id=421&baslik=2_Kanalli_Sicaklik_Kayit_Cihaz_i_Sicaklik_Kayit_Cihaz_i_Kanalli_K_Tipi_Problu_Datalogger)
- [9] Alındığı tarih: 25.04.2016, adres:  
<https://www.testo.com.tr/urundetaylari/0560+4102/testo-410-2-Entegre-nem-sensoru-ile-cep-tipi-pervane-anemometre>
- [10] Alındığı tarih: 25.04.2016, adres:  
<https://www.testo.com.tr/urundetaylari/0563+0875+V1/testo-875-1i-Termal-kamera-50-mK-Entegre-dijital-kamera>
- [11] Alındığı tarih: 25.04.2016, adres: <http://www.brymen.com.tw/product-html/cata157/Bm157s.htm>

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad** :Ahmet Yüksel

**Doğum Yeri ve Tarihi** : Erzurum/1991

**E-Posta** : ahmetyukselmak@gmail.com

**Lisans** : Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Ünver Ü. ve **Yüksel A.** (2016). İndüksiyonlu Hava Isıtıcısında Geçici Rejim Durumunun Deneysel Olarak İncelenmesi. *Erzincan Universty Journal of Science an Technology*, Haziran cilt 9, sayı 2, ISSN 1307-9085, e-ISSN 2149-4584