

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ANKASTRE FIRINLARDA ENERJİ TÜKETİMİNİN  
DENEYSEL VE TEORİK İNCELEME İLE AZALTILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Neslim HANCILAR**

**Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : ISI AKIŞKAN**

**EKİM 2007**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ANKASTRE FIRINLARDA ENERJİ TÜKETİMİNİN  
DENEYSEL VE TEORİK İNCELEME İLE AZALTILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Neslim HANCILAR  
503041118**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Eylül 2007  
Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Ekim 2007**

**Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Erhan BÖKE**

**Diğer Jüri Üyeleri : Y.Doç.Dr. Yalçın URALCAN**

**Y.Doç.Dr. Özer AYDIN**

**EKİM 2007**

## ÖNSÖZ

Beni böyle bir çalışmaya yönlendiren, tez çalışmasını yöneten ve yapıcı önerileriyle çalışmaya yön veren değerli hocam Sn. Y.Doç.Dr. Erhan BÖKE'ye teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılmasına olanak sağlayan Arçelik A.Ş.'ye ve Ürün Geliştirme Sistem ve Laboratuvar Takımı yöneticisi Sn. Semih Gürel'e, deney düzeneğinin oluşturulmasında ve deneylerin gerçekleştirilmesindeki yardımlarından dolayı Sn. Mehmet Göçer'e ve Sn. Ahmet Taner Tecirlioğlu'na, değerli yorumları ve yardımları için Sn. M.Zihni Gürlek, Sn. Haluk Karataş, Sn. Aslı Kayıhan ve Sn. Önder Fesligil'e, yüksek lisans eğitimini tamamlamam konusunda göstermiş oldukları anlayış için yöneticilerim Sn. Adnan Tüfekçi, Sn. Hasan Umur ve Sn. Güney Özaltan'a, teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul, Ekim 2007

Neslim HANCILAR

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
<b>ÖNSÖZ</b>	<b>i</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>ii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>iv</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>v</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>viii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>ix</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2 KAYNAK VE PATENT ARAŞTIRMALARI</b>	<b>3</b>
2.1 Yalıtım uygulamaları	3
2.2 Kapak Uygulamaları	10
2.3 Enerji tüketiminin belirlenmesinde kullanılan tuğla testi standart deney yöntemi	15
<b>3 ENERJİ TÜKETİMİ AZALTILACAK ELEKTRİKLİ ANKASTRE FIRININ MEVCUT DURUM ANALİZİ</b>	<b>24</b>
3.1 Fırın enerji tüketimi bildirim değerleri	24
3.2 Fırın yalıtım, kapak ve infiltrasyon özellikleri	25
3.3 Enerji tüketiminin mevcut durum analizi	27
<b>4 MATEMATİKSEL MODEL</b>	<b>32</b>
4.1 Yalıtım kalınlığının artırılmasının ısı kayıplarına etkisi	32
4.1.1 Fırın sağ yan duvarı için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması	34
4.1.2 Fırın sol yan duvarı için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması	35
4.1.3 Fırın üst duvarı için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması	36
4.1.4 Fırın alt duvarı için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması	37
4.1.5 Fırın arka duvarı için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması	38
4.1.6 Fırın duvarlarından olan ısıl kayıpların hesaplanması	39
4.1.7 Farklı yalıtım kalınlıkları için matematiksel model sonuçları	41
4.2 Ön kapakta cam sayısının artırılmasının ısı kayıplarına etkisi	43
4.2.1 Çift camlı ön kapak için ısıl taşınım katsayılarının hesaplanması	44
4.2.1.1 Çift camlı kapakta kontrol hacmi 1	45
4.2.1.2 Çift camlı kapakta kontrol hacmi 2	47
4.2.1.3 Çift camlı kapakta kontrol hacmi 3	48
4.2.1.4 Çift camlı kapaktan olan ısı kaybının hesaplanması	49
4.2.2 Üç camlı ön kapak için ısıl taşınım katsayılarının hesaplanması	49
4.2.2.1 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 1	50
4.2.2.2 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 2	51
4.2.2.3 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 3	51
4.2.2.4 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 4	52
4.2.2.5 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 5	53
4.2.2.6 Üç camlı kapaktan olan ısı kaybının hesaplanması	54
4.2.3 Ön kapak için matematiksel model sonuçları	54

<b>5</b>	<b>DENEYSSEL İNCELEME</b>	<b>58</b>
5.1	Turbo 155K tuğla enerji tüketime testleri için ölçüm sistemi yeterlilik analizi	58
5.2	“2k faktöryel deney tasarımı” ile denenen faktörlerin enerji tüketimine etkilerinin belirlenmesi	61
5.3	Termal kamera ile yapılan ölçümler	66
<b>6</b>	<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>	<b>69</b>
	<b>KAYNAKLAR</b>	<b>70</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>73</b>

## TABLO LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
<b>Tablo 2.1</b> Yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı değerleri.....	5
<b>Tablo 2.2</b> EN 60 335-2-6 standardına göre kapak sıcaklık sınırları.....	10
<b>Tablo 2.3</b> EN 50304 standardında enerji tüketim deneyleri için verilen sıcaklıklar.....	19
<b>Tablo 2.4</b> Tuğlanın özgül ısısının hesaplanması.....	31
<b>Tablo 4.1</b> Fırın duvarlarının iç yüzeylerinde ölçülen sıcaklıklar.....	33
<b>Tablo 4.2</b> Farklı yalıtım kalınlıkları için fırın duvarlarının ısı iletim katsayıları.....	42
<b>Tablo 4.3</b> Farklı yalıtım kalınlıkları için duvar yalıtım yüzeylerinin sıcaklıkları.....	42
<b>Tablo 4.4</b> Farklı yalıtım kalınlıkları için hdiş ısı taşınım katsayıları.....	42
<b>Tablo 4.5</b> Yalıtım kalınlıklarına göre fırın duvarlarının toplam ısı geçiş katsayıları.....	42
<b>Tablo 4.6</b> Farklı yalıtım kalınlıkları için fırın duvarlarından olan ısı kayıpları.....	43
<b>Tablo 4.7</b> Çift cam ve üç cam kullanımında ön kapak sıcaklıkları.....	57
<b>Tablo 4.8</b> Cam sıcaklıkları için ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
<b>Tablo 4.9</b> Model ile hesaplanan taşınım, ışıınım ve toplam ısı geçiş katsayıları.....	57
<b>Tablo 5.1</b> 3 faktörlü 2k tam faktöryel deney tasarımı.....	61
<b>Tablo 5.2</b> Ana etkiler ve etkileşimler için seviyeler.....	61
<b>Tablo 5.3</b> Uygulanan deneyler ve elde edilen enerji tüketim değerleri.....	62

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1:	Sık kullanılan yalıtım malzemeleri..... 4
Şekil 2.2:	Yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayısı değişimleri..... 5
Şekil 2.3:	Cam yünü..... 6
Şekil 2.4:	İğnelenmiş cam yünü uygulaması..... 6
Şekil 2.5:	Taş yünü..... 7
Şekil 2.6:	Aerojel ile yalıtılan bir fırın kabin ve kapısı..... 7
Şekil 2.7:	Ara Parça ile Hava Boşluğu Yaratılan Fırın Kesiti..... 8
Şekil 2.8:	Vakumlu ortam ile yalıtılmış fırın bölmesi..... 8
Şekil 2.9:	VIP’li Yalıtım Kabini..... 9
Şekil 2.10:	Alüminyum folyo paketleri ve köpük malzeme ile yalıtım uygulaması ..... 9
Şekil 2.11:	Isıl köprüleri azaltmaya yönelik fırın ön kapak parçaları bağlantı yöntemi 11
Şekil 2.12:	Fırın camlarının metal ile temasının kesilmesi..... 11
Şekil 2.13:	Çift camlı, yansıtıcı kaplamalı sistem..... 12
Şekil 2.14:	İki camlı hava soğutmalı kapak..... 12
Şekil 2.15:	Çok camlı zorlanmış hava dolaşımli kapak..... 13
Şekil 2.16:	Pirolitik fırın kapağı..... 13
Şekil 2.17:	Hava sirkülasyonlu kapak..... 14
Şekil 2.18:	Delikli alüminyum plaka kullanımı..... 14
Şekil 2.19:	Kanatlı Işınım perdesi..... 15
Şekil 2.20:	Test odası sıcaklığının ölçümü için yerleştirilen termoelemanın konumu..... 16
Şekil 2.21:	Elektrikli ankastre fırın test kabini boyutları..... 16
Şekil 2.22:	Elektrikli ankastre fırın test kabini..... 17
Şekil 2.23:	Ankastre fırın test köşesinde kabin temoelemanlarının yerleşimi.. 17
Şekil 2.24:	Tuğla boyutları ve üzerine yerleştirilen termoelemanlar..... 18
Şekil 2.25:	Tuğlaların buzdolabında su içerisinde bekletilmesi..... 19
Şekil 2.26:	Fırının kullanılabilir hacmi..... 20
Şekil 2.27:	Pişirilen yiyeceğin modellenmesinde kullanılan kontrol hacmi.... 21
Şekil 2.28:	Tuğla testi sırasında tuğla kütle kaybının zamana bağlı değişimi.. 22
Şekil 2.29:	Turbo konumunda 155°C’de yapılan tuğla testi sırasında tuğla kütle kaybının zamana bağlı değişimi..... 23
Şekil 3.1:	BE61FSX model kodlu fırının enerji etiketi..... 25
Şekil 3.2:	Ön kapak hava kanalları..... 25
Şekil 3.3:	Fırın bölmesi havalandırma kanalları..... 26
Şekil 3.4:	BE61FXS fırının ön kapağından hava akışı..... 26
Şekil 3.5:	BE61FSX fırında infiltrasyon..... 27
Şekil 3.6:	BE61FSX fırında enerji tüketiminin dağılımı ve betimsel istatistikleri..... 29
Şekil 3.7:	Süreç yeterlilik analizi..... 29
Şekil 3.8:	BE61FSX fırında enerji tüketiminin C enerji sınıfı için süreç yeterlilik analizi..... 30
Şekil 3.9:	BE61FSX fırında enerji tüketiminin B enerji sınıfı için süreç yeterlilik analizi..... 31

<b>Şekil 4.1:</b>	Fırın iç duvarlarında sıcaklık ölçümü yapılan bölgeler.....	33
<b>Şekil 4.2:</b>	Fırın sağ yan duvar yüzeyinde enerji dengesi.....	34
<b>Şekil 4.3:</b>	Fırın sol yan duvar yüzeyinde enerji dengesi.....	35
<b>Şekil 4.4:</b>	Fırın üst duvar yüzeyinde enerji dengesi.....	36
<b>Şekil 4.5:</b>	Fırın alt duvar yüzeyinde enerji dengesi.....	37
<b>Şekil 4.6:</b>	Fırın arka duvarı yüzeyinde enerji dengesi.....	38
<b>Şekil 4.7:</b>	Bitişik duvarlarda köşelerden ısı iletimi.....	39
<b>Şekil 4.8:</b>	Yalıtım programının ana sayfası.....	41
<b>Şekil 4.9:</b>	Sağ yan duva yalıtım yüzey sıcaklığına ait iterasyonlar.....	41
<b>Şekil 4.10:</b>	Çift camlı ön kapakta ısı akışı şeması.....	44
<b>Şekil 4.11:</b>	Çift camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 1.....	44
<b>Şekil 4.12:</b>	Paralel levhalar hali için görüş faktörü hesabı.....	45
<b>Şekil 4.13:</b>	Dik levhalar hali için görüş faktörü hesabı.....	46
<b>Şekil 4.14:</b>	Çift camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 3.....	48
<b>Şekil 4.15:</b>	Üç camlı ön kapakta ısı akışı şeması.....	49
<b>Şekil 4.16:</b>	Üç camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 1.....	50
<b>Şekil 4.17:</b>	Üç camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 3.....	51
<b>Şekil 4.18:</b>	Üç camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 5.....	53
<b>Şekil 4.19:</b>	Ön kapak programının ana sayfası.....	56
<b>Şekil 4.20:</b>	Çift camlı ön kapağa ait iterasyonlar.....	56
<b>Şekil 5.1:</b>	Ölçüm sistemi yeterlilik analizi Minitab grafik çıktısı.....	60
<b>Şekil 5.2:</b>	Ölçüm sistemi yeterlilik analizi Minitab analiz çıktısı.....	60
<b>Şekil 5.3:</b>	Güç ve örnek büyüklüğü analizi Minitab analiz çıktısı.....	62
<b>Şekil 5.4:</b>	2k faktöryel deney analiz çıktısı.....	63
<b>Şekil 5.5:</b>	2k faktöryel deney analizi indirgenmiş modeli.....	63
<b>Şekil 5.6:</b>	Ana etkiler grafiği.....	64
<b>Şekil 5.7:</b>	Baca ve yalıtım için etkileşim grafiği.....	65
<b>Şekil 5.8:</b>	Emiş kanalına açılan baca.....	65
<b>Şekil 5.9:</b>	Deney sonucuna göre ikinci iyi çözüm için süreç yeterlilik analizi.....	66
<b>Şekil 5.10:</b>	A enerji sınıfını sağlayan fırın için ön kapak termal kamera ölçümü.....	67
<b>Şekil 5.11:</b>	C enerji sınıfını sağlayan fırın için ön kapak termal kamera ölçümü.....	67
<b>Şekil 5.12:</b>	A enerji sınıfı fırın için sol yan duvar yalıtımı termal kamera ölçümü.....	68
<b>Şekil 5.13:</b>	C enerji sınıfı fırın için sol yan duvar yalıtımı termal kamera ölçümü.....	68

## SEMBOL LİSTESİ

$\alpha$	: Isıl yayılım sayısı, [m <sup>2</sup> /s]
$\beta$	: Isıl genleşme katsayısı, [K <sup>-1</sup> ]
$c_p$	: Özgül ısı, [kJ/kg.K]
$c_{pk}$	: Süreç yeterlilik indeksi
$\varepsilon$	: Yayma katsayısı, emisivite
$\delta$	: Karakteristik uzunluk, [m]
$g$	: Yerçekimi ivmesi, [m <sup>2</sup> /s]
$Gr$	: Grashof sayısı
$h_g$	: Giren hava entalpisi, [kJ/kg]
$h_ç$	: Çıkan hava entalpisi, [kJ/kg]
$h_{iç}$	: Fırın içi taşınım katsayısı, [W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{12}$	: 1. ve 2. camlar arası taşınım katsayısı, [W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{23}$	: 2. ve 3. camlar arası taşınım katsayısı, [W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{dış}$	: Dış ortam taşınım katsayısı, [W/m <sup>2</sup> .K]
$k$	: Isı iletim katsayısı, [W/m.K]
$c$	: Kalibrasyon sabiti, [(W/m <sup>2</sup> )/ $\mu$ V]
$L$	: Karakteristik uzunluk, [m]
$m_{hava}$	: hava kütlesi, [kg]
$Nu$	: Nusselt sayısı
$Pr$	: Prandtl sayısı
$Q_{taşınım\_iç-1}$	: Fırın iç havasından iç cama taşınım ile geçen ısı, [W]
$Q_{ışınım\_iç-1}$	: Fırın iç havasından iç cama ışınlama ile geçen ısı, [W]
$Q_{ışınım\_1-2}$	: 1. camdan - 2. cama ışınlama ile geçen ısı, [W]
$Q_{ışınım\_2-3}$	: 2. camdan - 3. cama ışınlama ile geçen ısı, [W]
$Q_{taşınım\_1-12}$	: 1. camdan ara havaya taşınım ile geçen ısı, [W]
$Q_{taşınım\_12-2}$	: Ara havadan 2. cama taşınım ile geçen ısı, [W]
$Q_{taşınım\_2-23}$	: 2. camdan ara havaya taşınım ile geçen ısı, [W]
$Q_{taşınım\_12-2}$	: Ara havadan 3. cama taşınım ile geçen ısı, [W]
$Q_{taşınım\_3-dış}$	: 3. camdan dış ortama taşınım ile geçen ısı, [W]
$Q_{ışınım\_2-3}$	: 3. camdan – dış ortama ışınlama ile geçen ısı, [W]
$Ra$	: Rayleigh sayısı
$Re$	: Reynolds sayısı
$\sigma$	: Stefan-Boltzman sabiti, [5.67x10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
$s$	: Standart sapma
$\Delta T$	: Sıcaklık farkı, [°C]
$T_{dış}$	: Dış ortam sıcaklığı, [°C]
$T_{iç}$	: Fırın içi sıcaklığı, [°C]
$T_1$	: İç cam sıcaklığı, [°C]
$T_{12}$	: Birinci ara hava sıcaklığı, [°C]
$T_2$	: Ara cam sıcaklığı, [°C]
$T_{23}$	: İkinci ara hava sıcaklığı, [°C]
$T_{23}$	: Dış cam sıcaklığı, [°C]
$U$	: Hava akış hızı, [m/s]
$\nu$	: Kinematik viskozite, [m <sup>2</sup> /s]
$V$	: Potansiyel, [ $\mu$ V]
$\bar{X}$	: Örneklerin ortalaması

## ÖZET

Bu çalışmada enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik olarak incelenen fırın gamı elektrikli ankastre fırınlardan oluşmaktadır. Üretici firma tarafından yeni üretilmeye başlanan ve enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik olarak daha önce çalışma yapılmamış bir ürün grubudur.

Bu çalışmada, elektrikli fırınlarda enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik patent araştırmaları sonucunda elde edilen bilgiler, teorik hesaplamalar ve deneysel sonuçlar ile desteklenmiş ve çalışmada fırın gamından seçilen ve gamın tamamını temsil edecek özellikteki ankastre elektrikli fırın modeli için enerji tüketimi % 30 azaltılmıştır.

Çalışma için seçilen fırında mevcut durumun analizi yapılarak, fırın yalıtımı, ön kapak yapısı ve infiltrasyon kayıpları detaylı olarak incelenmiştir. Mevcut durumda enerji tüketim değerinin belirlenmesinde ve EN 50304 standardına uygunluğunun kontrolünde istatistiksel yöntemlerden faydalanılmıştır. Seçilen fırında yalıtım kalınlığının artırılması, ön kapak cam sayısının artırılması ve infiltrasyon kayıplarının azaltılması amacıyla çalışılabileceği belirlenmiştir.

İncelenen elektrikli fırının C enerji sınıfı seviyesinden A enerji sınıfı seviyesine yükseltilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla uygulanacak çözümler için iki önemli koşul, fırında ilave yatırım gerektirmemeleri ve ürün maliyetine etkilerinin öngörülen sınırlar içerisinde kalmasıdır.

Yalıtım etkisini incelemek için fırın duvarlarından olan ve ön kapak yapısının etkisini inceleyebilmek için ön kapaktan olan ısı kayıplarını kolay ve hızlı şekilde hesaplayabilmek amacıyla Microsoft Excel programında matematiksel model oluşturulmuştur. Teorik hesaplamalar, belirtilen değişikliklerin fırın enerji tüketim sonuçlarını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

Enerji tüketimini etkileyen faktörlerin enerji tüketimine etkilerini belirlemek amacıyla 2k faktöryel deney tasarımı uygulanmıştır. Sonuçlar analiz edilerek A enerji sınıfı için uygun çözümler belirlenmiştir. Seçilen çözümler uygulandığında, fırının EN 50304 standardında verilen tuğla enerji tüketim testi koşullarında A enerji sınıfına ulaştığı, doğrulama deneyleri ile ispatlanmıştır. Kullanılan deney tasarımı yöntemi ve ölçüm sistemi yeterliliği için yapılan analiz çalışmaları sayesinde, deney sayısı istenilen farkları yakalayabilecek en uygun seviyede tutulabilmektedir.

## SUMMARY

This study combines theoretical studies and experimental analysis to reduce energy consumption on a specific electrical built in oven type and finally reduced consumption by % 30.

For the specific oven, insulation thickness, oven door and infiltration loss is examined in detail. Statistical techniques are used to analyze current energy consumption and to compare energy consumption values with the EN 50304 standard requirements. As a result of analysis and observations, increasing the insulation thickness, applying three glass oven door and decreasing infiltration loss are chosen as subjects to study on.

Theoretical heat losses are calculated for different insulation thicknesses and for different types of oven doors by building a mathematical model in Microsoft Excel. The results of theoretical studies prove that increasing insulation thickness and using three glass oven door instead of double glass reduce heat losses and energy consumption.

Experimental studies designed as 2k factorial design used to determine the effects of factors on energy consumption. As a result of analysis of experiments a mathematical model is built to define the relationship between the change in factors and change in energy consumption. Measurement system analysis and design of experiment provided an optimum number of experiments and increased the efficiency of studies.

## 1. GİRİŞ

Uluslararası standartların getirmiş olduğu zorunluluklar ve rekabet koşulları, dünyada enerji kaynaklarının verimli kullanımının önem kazanması nedeniyle, ev tipi elektrikli fırınlarda enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik çalışmalar hızla artmaktadır

Deneysel çalışmalardan önce yapılan kaynak ve patent incelemelerinde yalıtım ve ön kapak ile ilgili uygulamaların ağırlıklı olarak ele alındığı görülmüştür.

Fırınlarda sıklıkla kullanılan cam yünü ve taş yününe alternatif olarak vakum yalıtım teknikleri ve uygulamaları konusundaki patentler dikkat çekmektedir.

Enerji tüketiminin azaltılması amacıyla ön kapakta yaygın olarak:

- Bağlantı noktalarının yalıtımı, cam metal temasının kesilmesi
- Çift cam, üç cam, dört cam gibi çoklu cam uygulamaları: Çift cam kullanılan sistemde, camlar arasına delikli panel konularak, camlar arasından soğuk hava akışı gerçekleştirilir. Tamamen doğal akışa dayalı sistem sayesinde dış cam sıcaklığı düşürülmüş olmaktadır. Üç cam kullanımı ile ikinci ve üçüncü camlar arasında oluşturulan boşluktan faydalanılarak dış camın soğutulması sağlanmaktadır. Böylece çift camlı sistemlere göre daha az ısı kaybı gerçekleşmektedir. Dörtlü cam sistemi uygulamaları dış cam sıcaklığını ve ısı kaybını azaltan ancak yüksek maliyetli bir çözüm olmaktadır.
- Fırın kapağından hava akışı ile soğutma sağlanması
- Işınım kalkanı uygulamaları kullanılmaktadır.

Deneysel çalışmalardan önce EN 50304 standardına göre enerji tüketiminin belirlenmesi için kullanılan tuğla testi gereklilik ve koşulları detaylı olarak incelenmiştir. Tuğla testi sırasında tuğladan olan kütle kayıplarının belirlenmesi, pişirmenin modellenmesi ile ilgili makaleler ve çalışmalar incelenmiştir.

Enerji tüketiminin azaltılacağı ankastre elektrikli fırının mevcut durum analizi istatistiksel yöntemler ile desteklenerek tamamlanmıştır. Fırında yapılan analiz ve

gözlemler sonucunda yalıtım kalınlığının artırılması, ön kapakta iki cam yerine üç cam kullanımı ve infiltrasyona bağlı kayıplarının azaltılması çalışılacak konular olarak belirlenmiştir. Mevcut kapakta iki cam arasından zorlanmış hava dolaşımı incelenmiştir. İnfiltrasyonun nasıl gerçekleştiği tanımlanmıştır.

İncelenen elektrikli fırının C enerji sınıfı seviyesinden A enerji sınıfı seviyesine yükseltilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla uygulanacak çözümler için iki önemli koşul fırında ilave yatırım gerektirmemeleri ve ürün maliyetine etkilerinin öngörülen sınırlar içerisinde kalmasıdır.

- Yalıtım kalınlığını artırma
- Ön kapakta iki cam yerine üç cam kullanma çözümleri belirtilen kısıtları karşılamaktadır.

Yalıtım kalınlığının artırılması ve ön kapak cam sayısının artırılması durumunda teorik ısı kaybı hesaplamaları yapılmıştır. Teorik hesaplamalar, belirtilen değişikliklerin fırın enerji tüketim sonuçlarını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

Enerji tüketimini etkilediği belirlenen faktörler ile 2k faktöryel deney tasarlanarak, faktörlerin enerji tüketim sonuçlarına etkilerini açıklayan matematiksel model oluşturulmuştur. Kullanılan deney tasarımı yöntemi ve ölçüm sistemi yeterliliği için yapılan analiz çalışmaları, deney sayısının istenilen farkları yakalayabilecek en uygun seviyede tutulmasını sağlamıştır.

Yapılan çalışmaların sonucunda enerji tüketimi için incelenen faktörlerin uygun seviyeleri seçilerek üretilen fırının enerji seviyesinin EN 50304 standardında verilen tuğla enerji tüketim testinde A enerji sınıfına ulaştığı doğrulama deneyleri ile ispatlanmıştır.

Bu çalışmada, elektrikli fırınlarda enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik kaynak ve patent araştırmaları sonucunda elde edilen bilgiler teorik hesaplamalar ve deneysel sonuçlar ile desteklenmiş ve çalışmada seçilen ankastre elektrikli fırının enerji tüketimi % 30 azaltılmıştır.

## 2. KAYNAK VE PATENT ARAŞTIRMALARI

Ev tipi elektrikli fırınlarda enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik uygulamalar ve alınan patentler incelendiğinde fırın yalıtım malzemelerinin ve ön kapakta enerji tüketimini azaltıcı uygulamaların ön plana çıktığı görülmüştür.

### 2.1 Yalıtım uygulamaları

Fırınlarda uygun yalıtım malzemesi ve yalıtım kalınlığının seçimi, enerji tüketimini ~% 2-20 arasında azaltabilmektedir. Isı yalıtım malzemelerinin seçimlerinde, kullanılma yerlerine göre bazı özellikleri gerçekleyip gerçeklemediklerine dikkat edilir [1]. Seçim yapılırken aşağıda verilen özelliklerden ilgili olanlar göz önünde tutulur:

1. Özgül hacmi
2. Hacim ve şekil değişimlerine karşı mukavemeti (yığılma olmaması gibi)
3. Kolay işçilik
4. Basma zorlanmalarına karşı şekil değiştirme mukavemeti
5. Çeki zorlanmalarına karşı şekil değiştirme mukavemeti
6. Kimyasal nötrlüğü
7. Çürüme ve ufalanmaya mukavemeti olması
8. Buhar difüzyonuna mukavemeti olması
9. Sürekli, periyodik veya kısa tesirli sıcaklıklarda ısı yalıtım fonksiyonunu değiştirmemesi
10. Tatbik edilecek konstrüksiyona uygun olması
11. Ucuz olması
12. Yanıcı olmaması

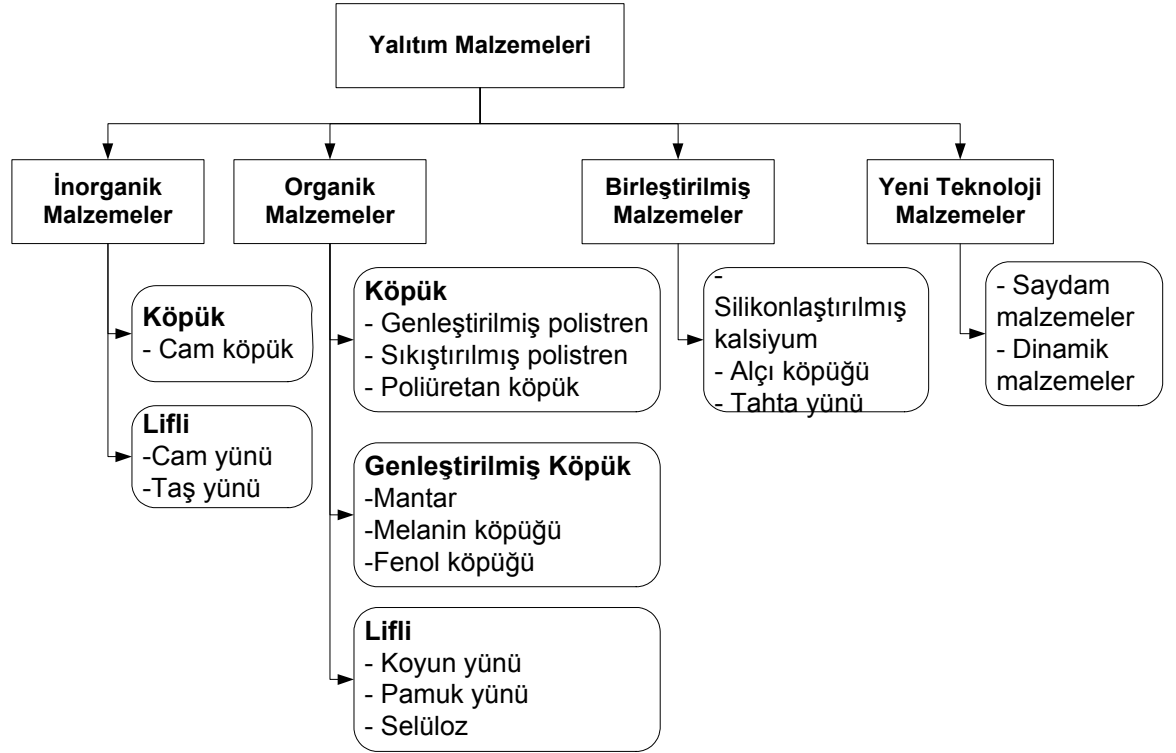
13. Kokusuz olması

14. Dengeli olması, zamanla yalıtım özelliğinin azalmaması

15. Isı iletim katsayısının düşük olması

16. Böcek ve hayvanların barınmaması

Yalıtım malzemeleri kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırılabilir [2].

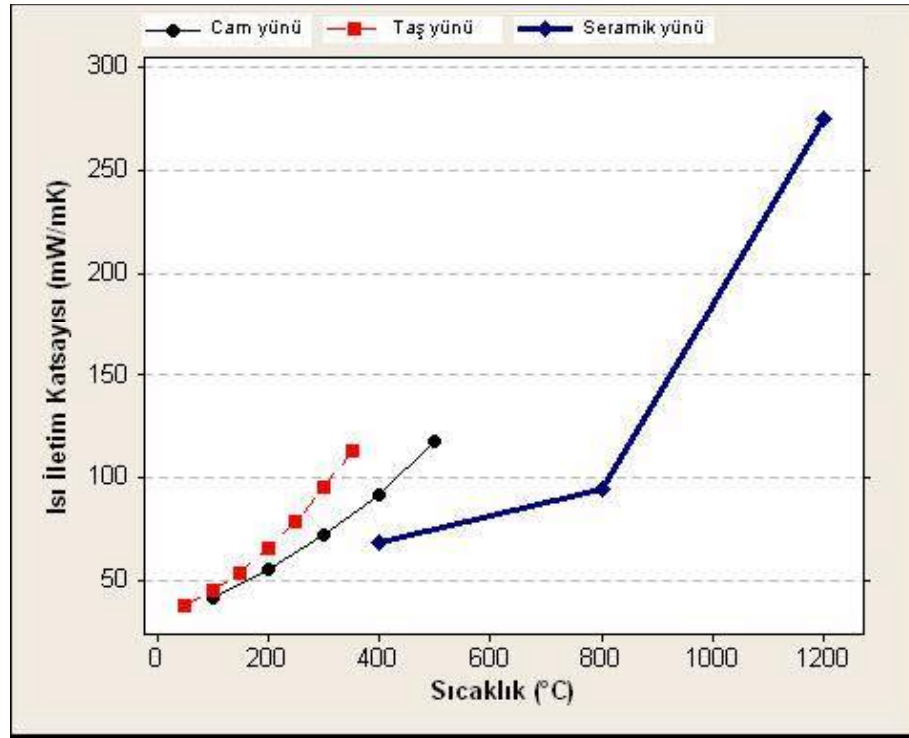


**Şekil 2.1:** Sık kullanılan yalıtım malzemeleri

Fırınlarda yüksek sıcaklık değerlerinde çalıştılarından dolayı, fırınlarda kullanılacak yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklık ile değişiminin az olması istenir. Yalıtım malzemesinin özgül hacminin yüksek olması, küçük ısıl kütleliyi sağlamak üzere tercih edilmektedir. Uygun yalıtım kalınlığının belirlenmesinde yeterli ısıl direncin ve küçük ısıl kütleliğin sağlanması bir arada sağlanmalıdır. Yalıtım malzemelerinin seçiminde malzemelerin ısı iletim katsayısı ve yoğunluk değerleri önemli parametrelerdir. Ev tipi fırınlarda kullanılan yalıtım malzemelerinin yoğunlukları, özgül ısıları ve ısı iletim katsayıları Tablo 2.1'de ve Şekil 2.2'de verilmektedir [1,3,4].

**Tablo2.1:** Yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı değerleri

	Cam Yünü	Taş Yünü	Seramik Yünü			
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	32	80	160			
Özgül Isı (J/kgK)	1030	1030	1200			
Sıcaklığa göre Isı İletim Katsayıları	Sıcaklık (°C)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Sıcaklık (°C)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Sıcaklık (°C)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
	100	0.041	50	0.038	400	0.068
	200	0.055	100	0.045	800	0.0946
	300	0.072	150	0.054	1200	0.2752
	400	0.092	200	0.066	***	***
	500	0.118	250	0.079	***	***
	***	***	300	0.095	***	***
	***	***	350	0.113	***	***



Şekil 2.2: Yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayısı değişimleri

Ev tipi fırınların yalıtımında cam yünü ve taş yünü yaygın olarak kullanılmaktadır.

Cam yünü silis kumunun yüksek sıcaklıklarda ergitilerek elyaf haline getirilmesi ile elde edilen bir ısı yalıtım malzemesidir. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi şilte ve levha halinde kullanılabilir. Cam yünü ortalama olarak % 54 SiO<sub>2</sub> (kuvars kum), % 15.7 Al<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>, % 0.5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 16 CaO, % 3.8 MgO, % 8 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Boroksit) içerir. İmal usulüne göre 3-40 mikron çapındaki liflerden meydana gelmiş olup, 500 °C gibi yüksek sıcaklıklara kadar kullanılır. Cam yünü yanmaz, zamanla bozulmaz, çürümez, korozyon ve paslanma yapmaz, böcekler ve mikroorganizmalar tarafından tahrip

edilemez, küf tutmaz. Higroskopik (nem tutucu) ve kapiler (nem emici) değildir [1,4]. Şekil 2.3’de şilte halinde cam yünü görülmektedir.



**Şekil 2.3:** Cam yünü

İğneli cam yünü özel olarak bağlayıcısız olarak beyaz renkte üretilmiş cam yünüdür. Bağlayıcısız olarak üretildiğinden sarı cam yününe göre daha yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Özel olarak fırınlarda kullanılmak üzere geliştirilmiş bir üründür. Bağlayıcı kullanılmadığından fırınların ilk kullanımında, cam yününde bağlayıcıların yanması neticesinde oluşan koku olmaz [4]. Şekil2.4’de fırın yalıtımında iğneli cam yünü uygulaması görülmektedir.



**Şekil 2.4:** İğnelenmiş cam yünü uygulaması

Taş yünü volkanik kayalardan elde edilir. Hammadde, kireç taşı ile karıştırılır ve 1600 °C’de ergitilir. Eriyik kaya, çok hızlı dönen disklerin üzerine damlatılır. Buradan uzun iplikler halinde çıkar. İplikler toplandıktan sonra yapıştırıcı özellikteki sentetik reçine ve yağ ilavesi ile kaya yünü malzemeleri şilte şekline getirilir. Şiltelerin özellikleri şekillerine bağlı olarak değişmektedir. Taş yününde hammadde olarak kalker, dolomit, kil kullanılır. Benzer malzemeleri içermesine karşın cam yününe göre ana farklılığı üretiminde daha yüksek erime sıcaklığına ve farklı lif boyutlarına sahip olmasıdır. Taş yünü cam yünü ile kıyaslandığında daha ağırdır ve

650°C gibi yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır [1,3]. Şekil 2.5’de levha halinde taş yünü görülmektedir.

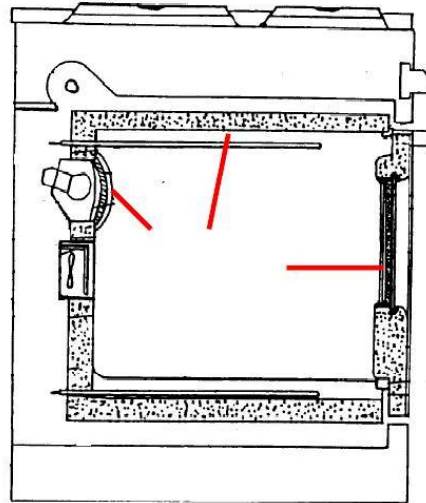


**Şekil 2.5:** Taş yünü

Seramik yünü çok yüksek sıcaklıklarda kullanılan lifli bir malzemedir. Taş yünün kullanılmadığı 1200-1400 °C sıcaklıklarda kullanılır. Rulo, levha ve dökme şekillerinde kullanılmaktadır. Beyaz renklidir. Yoğunluğu malzemenin şekline göre 100-160 kg/m<sup>3</sup> arasında değişir. Yumuşak bir malzeme olup, levha tiplerinin dahi basınca dayanımı fazla değildir. En önemli özelliği yüksek sıcaklıklara dayanabilmesidir [3,4].

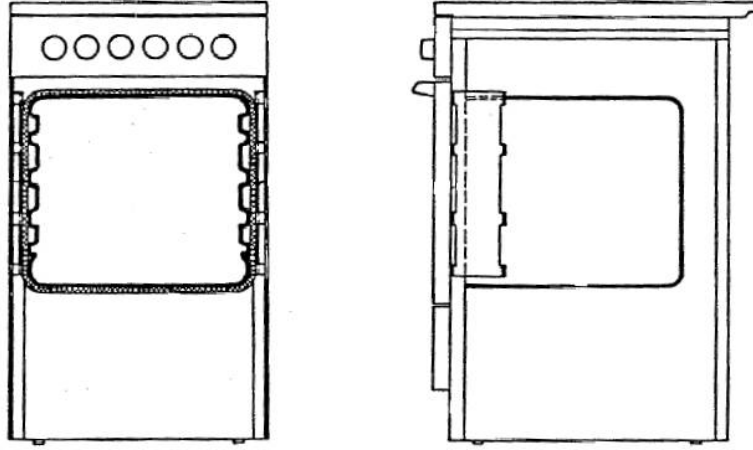
Fırınlarda ısı yalıtımı ile ilgili patentler incelendiğinde, cam yünü, taş yünü kullanımına alternatif olarak farklı yalıtım tekniklerinin kullanılmasına yönelik uygulamalar görülmektedir.

1992 yılında Miele firması tarafından alınan patent, Şekil 2.6’da görüldüğü gibi fırın kapısı ve pişirme kabini yalıtımının arojel malzeme ile yapıldığı uygulamayı anlatmaktadır [5].



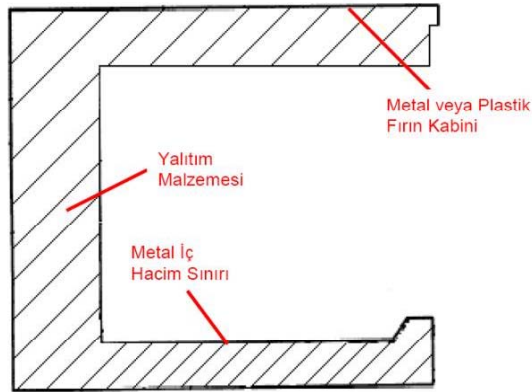
**Şekil 2.6:** Arojel ile yalıtılan bir fırın kabin ve kapısı

1988 yılında Bosch Hausegerate firmasına ait patentte, fırının çalışması ile içinde sıcaklığın arttığı, bu artışa bağlı olarak fırın dış duvarlarının da fırın içinin yalıtılmış olmasına rağmen arttığından bahsedilmiş ve bu sorunun çözümü için fırın yalıtımı ile dış duvarlar arasında metal bir plaka koyarak fırın yalıtımı ile dış duvarlar arasında bir hava boşluğu oluşturulması önerilmiştir [6]. Kullanılacak ara parçanın genişliği boyunun 1/12'si olacak şekilde tasarlanmalıdır. Ara parçanın yansıtıcı malzeme olması durumunda, radyasyonla oluşacak ısı geçişi de azaltılmış olacaktır. Bu şekilde tasarlanmış fırın Şekil 2.7'de sunulmuştur.



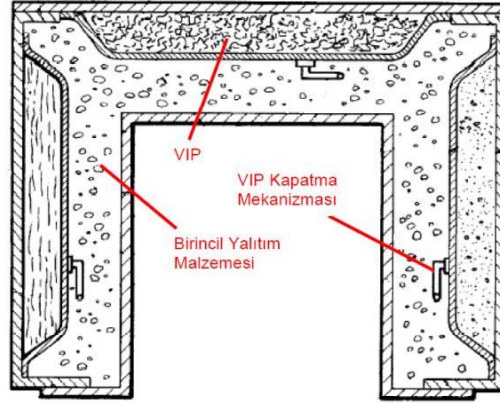
Şekil 2.7: Ara Parça ile Hava Boşluğu Yaratılan Fırın Kesiti

1996 yılında Bosch Hausegerate firması tarafından alınan patentte, kabin içi hacmi sınırı ile fırın kabini arasında bir boşluk oluşturulan ve bu boşluğa yalıtım malzemesi doldurulan, doldurma işlemi ardından vakumlanan ve yalıtım hacmi vakum sıkılığında kapatılabilen fırınlardan bahsedilmiştir [7]. Bu şekilde üretilmesi düşünülen fırınlarda, iç hacmi metal, fırın kabini metal veya plastik cidarlar arasında yaratılan yalıtım hacmi, silisyum esaslı malzeme ile doldurulur ve vakumlanır. Vakum seviyesinin 1mbar seviyesinde olması iyi bir yalıtım için yeterli olacaktır. Uygulamanın ana yapısı Şekil 2.8'de verilmektedir.



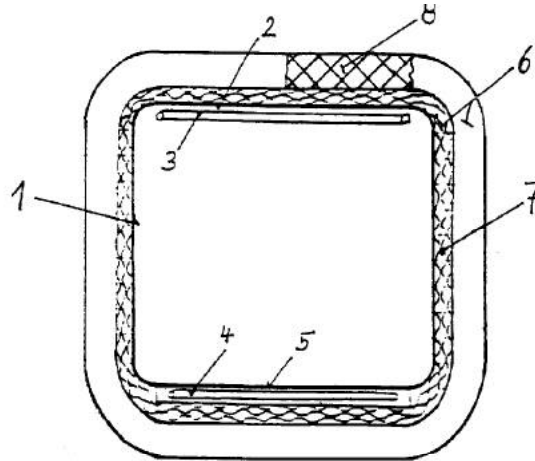
Şekil 2.8: Vakumlu ortam ile yalıtılmış fırın bölmesi

Maytag firması tarafından 2000 yılında alınan patentte, VIP'ler yardımı ile yapılan fırın yalıtımından bahsedilmiştir [8]. Bu tip uygulamada birincil yalıtım malzemesi dış yüzey sıcaklığı büyük öneme sahiptir. Bu sıcaklığın düşük olması plastik bazlı film malzemeleri ile hazırlanan VIP'lerin fırın yalıtımında kullanılmasına olanak sağlar. Ayrıca patentte belirtilen metal zarf ile hazırlanan ve yüksek sıcaklığa dayanabilen iç dolgu malzemesi ile hazırlanan VIP'ler her türlü fırın uygulamasında kullanılabilirler. Metal zarf kullanılarak hazırlanan VIP'lerin yalıtım kabine uygulandığı bir örnek Şekil 2.9'da sunulmuştur.



Şekil 2.9: VIP'li Yalıtım Kabini

1996 yılında AEG firması tarafında alınan patent, fırın pişirme kabininin çok katmanlı alüminyum folyo paketleri ve köpük malzeme ile yalıtımını anlatmaktadır [9]. Oluşturulan yalıtım paketi içinde mineral lifler veya organik bağlayıcılar bulunmamaktadır. Uygulama Şekil2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10: Alüminyum folyo paketleri ve köpük malzeme ile yalıtım uygulaması

## 2.2 Kapak Uygulamaları

Fırın kapak konstrüksiyonu enerji tüketimi açısından önem taşımaktadır. Burada göz önünde bulundurulması gereken konu fırının enerji tüketiminin, standartlarda belirtilen seviyede kalmasını sağlayacak, aynı zamanda ön kapak temas yüzey sıcaklığı düşük olacak şekilde optimum noktaya ulaşılmasıdır.

Fırın ön kapak temas yüzey sıcaklığı hakkında sınırlamalar, EN 60 335-2-6 numaralı ev ve benzeri yerlerde kullanılan elektrikli cihazlar için güvenlik kurallarına yönelik yayınlanan standart içerisinde yer almaktadır [10]. Fırın merkezindeki sıcaklık  $200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  de tutulurken, ortam sıcaklığı  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  de olmalıdır. Bu şartlar altında; deney sırasında, sıcaklık artışları Tablo 2.2'deki değerleri aşmamalıdır.

**Tablo 2.2:** EN 60 335-2-6 standardına göre kapak sıcaklık sınırları

	Kapak Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
Kaplanmış Metaller	$45\text{ }^{\circ}\text{C} + \text{Ortam Sıcaklığı}$
Cam	$60\text{ }^{\circ}\text{C} + \text{Ortam Sıcaklığı}$

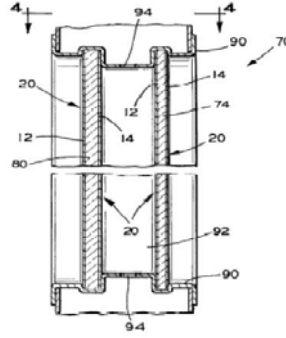
Kapak enerji tüketimini azaltmaya ve temas yüzey sıcaklığını düşürmeye yönelik patentler incelendiğinde genel olarak aşağıdaki yöntemlerin uygulandığı görülmektedir:

- Bağlantı noktalarının yalıtımı, cam metal temasının kesilmesi
- Çift cam, üç cam, dört cam gibi çoklu cam uygulamaları: Çift cam kullanılan sistemde, camlar arasında delikli panel konularak, camlar arasından soğuk hava akışı gerçekleştirilir. Tamamen doğal akışa dayalı sistem sayesinde dış cam sıcaklığı düşürülmüş olmaktadır. Üç cam kullanımı ile ikinci ve üçüncü camlar arasında oluşturulan boşluktan faydalanılarak dış camın soğutulması sağlanmaktadır. Böylece çift camlı sistemlere göre daha az ısı kaybı gerçekleşmektedir. Dörtlü cam sistemi uygulamaları dış cam sıcaklığını ve ısı kaybını azaltan ancak yüksek maliyetli bir çözüm olmaktadır
- Fırın kapağından hava akışı ile soğutma sağlanması
- Işınım kalkanı uygulamaları

1998 yılında Bosch Siemens Hausgerate firması tarafından yayınlanan patent, fırın kapısını oluşturan parçaların bağlantısına yönelik olarak Şekil 2.11'de görülen ısı

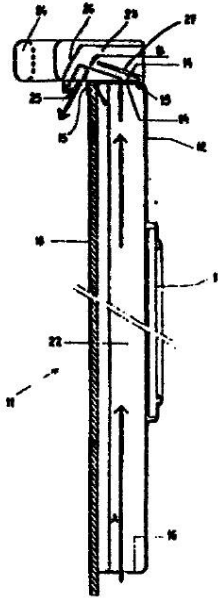


2000 yılında Engineered Glass Products LLC (US) firması tarafından yayınlanan patent, bu konstrüksiyonda amaç dış cam sıcaklığının düşürülmesidir [13]. Şekil 2.13'de görüleceği üzere sistemde çift cam kullanılmıştır. Dış camın iç yüzeyi reflektif madde ile kaplanmıştır. Patentte ayrıca iç camın da yansıtıcı madde ile kaplanması düşünülmüştür. Patent camları iç kaviteye bakan yüzeylerinin yansıtıcı madde ile kaplanması sayesinde ışınım ile gerçekleşen ısı geçişi minimize edilecek ve bu sayede camlar daha az ısınacaktır. Ayrıca camlar arası boşluk kısmı havalandırılarak burada bulunan sıcak havanın, soğuk havayla süpürülmesi sayesinde dış cam sıcaklığı düşürülmektedir.



Şekil 2.13: Çift camlı, yansıtıcı kaplamalı sistem

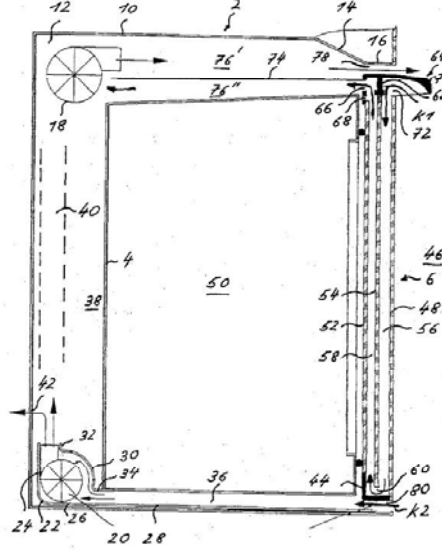
1987 yılında Zanussi firması tarafından yayınlanan patent, hava sirkülasyonu ile soğutulan fırın kapakları hakkındadır [14]. Şekil 2.14'de görülen sistem iki camlı ve yönlendirilmiş hava kanallarına sahip, fan kullanılan bir konstrüksiyona sahiptir.



Şekil 2.14: İki camlı hava soğutmalı kapak

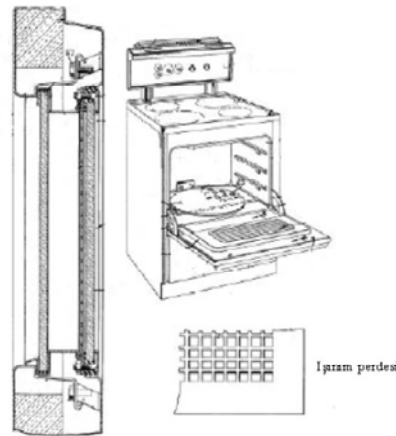


2002 yılında yayınlanan AEG firmasına ait patent, 3 camlı kapakta zorlanmış hava dolaşımı uygulaması görülmektedir [17]. Dış ortamdan alınan soğuk hava en sıcak bölge ile direkt temas ettirilmemekte ve böylelikle ısı verim arttırılmaktadır. Fırın ve kapaktaki hava sirkülasyonu Şekil 2.17’de verilmektedir.



Şekil 2.17: Hava sirkülasyonlu kapak

Işınım kalkanı ilgili ilk uygulama 1965 yılında General Electric firması tarafından yapılan çalışmadır [18]. Bu çalışmada Şekil 2.18’de gösterilen delikli alüminyum plakanın kullanılması ile ışınım kalkanı oluşturulmaktadır. Alüminyum plaka iki camlı kapakta iç camın dış yüzeyine yerleştirilmiştir. Alüminyumun yayma katsayısının düşük olması, maliyetinin düşük olmasının yanı sıra, ışınım açısından çok önemli bir etkidir. Delikli bir yapıya sahip olması artı olarak fırın içinin görünümü açısından da fayda sağlamaktadır. Kapakta sızdırmazlık açısından çevresel cam elyaf conta kullanılmıştır.



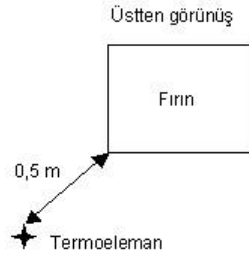
Şekil 2.18: Delikli alüminyum plaka kullanımı



Standart aşağıda verilen bilgilerin belirlenmesi ve kontrolü için kullanılır:

- Standart yük altında ve standart bir deney prosedürü uygulanarak enerji tüketimleri
- Ürüne ait bazı performans karakteristikleri (hacim, belirli bir yükü ve tepsi alanını ısıtması için gerekli süre)

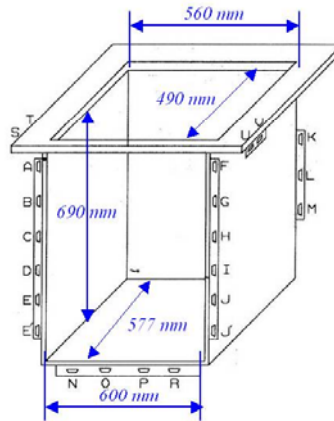
Deneyleer için standardın belirlediği ortam sıcaklığı  $23\pm 2$  °C'dir ve havalandırma olmamalıdır. Ortam sıcaklığı fırının yararlı hacminin merkezi ile aynı yükseklikte ve Şekil 2.20'de görüldüğü gibi ön kenarlardan birinden diagonal olarak 0.5 m uzaklıkta bir noktada ölçülür. Ortam sıcaklığının belirlenmesi için ölçüm alınan yer deney sırasında fırın sıcaklığından etkilenmemelidir.



**Şekil 2.20:** Test odası sıcaklığının ölçümü için yerleştirilen termoelemanın konumu

Deney süresi boyunca nominal voltaj ve frekans toleransı  $\pm 1\%$  olmalıdır.

Deneyleer EN 50304 standartlarına uygun olarak hazırlanmış test kabiniinde yapılmıştır. Test kabini müşteri kullanımında fırının yerleştirildiği mutfak koşullarını karşılamaktadır. Ankastre elektrikli fırınlar için kullanılan test kabiniinin ölçüleri Şekil 2.21'de verilmektedir. Ankastre fırının test kabiniine yerleştirilmesi Şekil 2.22'de gösterilmektedir.

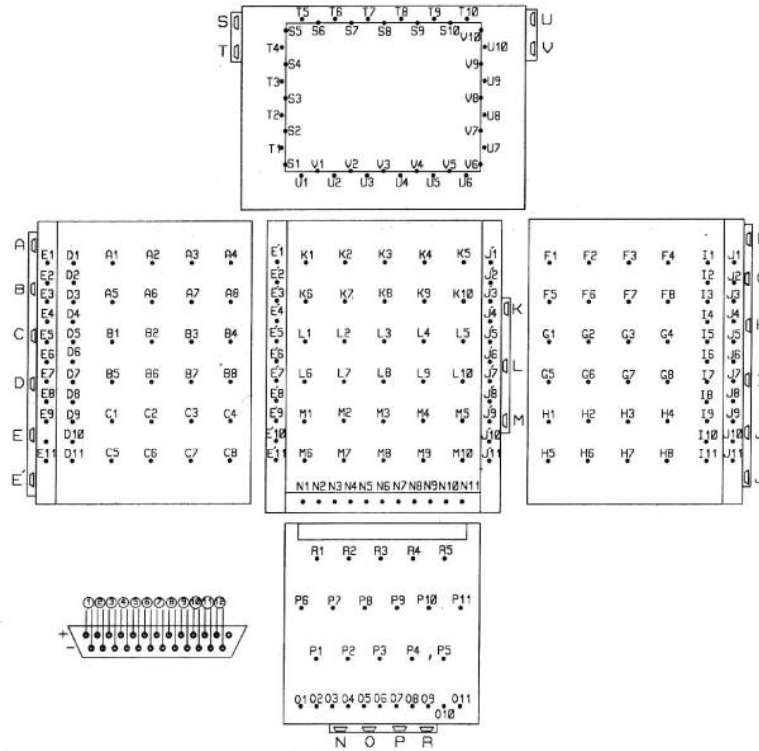


**Şekil 2.21:** Elektrikli ankastre fırın test kabini boyutları



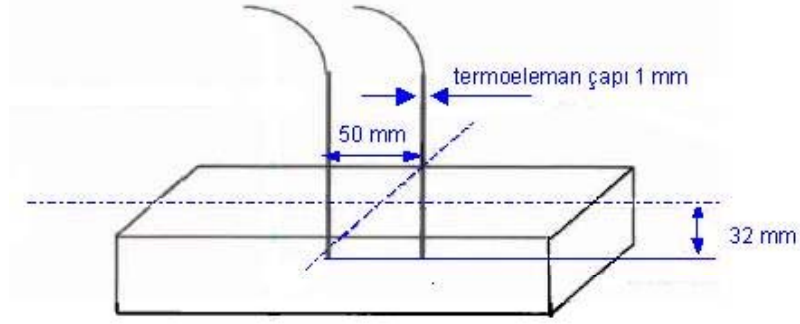
**Şekil 2.22:** Elektrikli ankastre fırın test kabini

Test kabininde bulunan termoelemanlar alt, üst, arka ve yan duvarlardaki sıcaklık ölçümlerinin yapılabilmesine imkan verir. Ankastre fırın test köşesinde kabin temoelemanlarının yerleşimi Şekil 2.23’de verilmektedir.



**Şekil 2.23:** Ankastre fırın test kabininde temoelemanların yerleşimi

Deneysel olarak yük olarak tuğla kullanılmaktadır. Tuğla sıcaklık ölçümleri için kullanılan termoelemanlar  $\pm 1.5$  K hassasiyetinde olmalıdır. Tuğla merkezinden eşit uzaklıkta aralarındaki mesafe 50 mm olacak şekilde yerleştirilen 2 adet termoeleman ile sıcaklık ölçümü yapılmaktadır. Termoelemanlar Şekil 2.24’de verilen ölçülere göre tuğla merkez sıcaklığının ölçülebilmesi için tuğla derinliğinin yarısına kadar (32 mm) saplanmalıdır. Termoelemanların gireceği delikler termoelemanın çapında olmalıdır. Deney süresince termoelemanların yerinden çıkmaması gerekmektedir. Tuğla yaklaşık 20 deney kullanılabilir. 20 deneyden fazla kullanıldığında termoelemanların yerleştirildiği delikler genişleyecek ve ölçülen sıcaklık değeri tuğla iç sıcaklığını temsil etmeyecektir.



**Şekil 2.24:** Tuğla boyutları ve üzerine yerleştirilen termoelemanlar

Yük olarak kullanılan tuğla, standartta belirtildiği şekilde hazırlanıp kullanıldığında yiyeceğin ısı özelliklerini ve su içeriğini temsil eden suya doymuş bir tuğladır. Standart tuğlanın özellikleri;

Kuru yoğunluk : 550 kg/m<sup>3</sup>

Kuru kütle: (920  $\pm$  75) g

Su emmesi: (1050  $\pm$  50) g

Boyutlar : 230\*114\*64 mm

Tuğla kullanılmadan önce 175 °C ve üstü sıcaklıkta hacmi 50 litre olan bir fırında, fan ile ısıtıcının beraber çalıştığı zorlanmış taşınımli durumda üç saat kurutulur. Aynı fırında en fazla iki adet tuğla kurutulabilir. Tuğlalar çıkarıldıktan sonra 5 dakika içinde kuru ağırlığı ölçülür ve kaydedilir.

Tuğla daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Tuğlalar soğuduktan sonra, sıcaklığı 20 °C’den daha düşük olan su dolu bir kaba konularak Şekil 2.25’de

gösterildiği gibi en az 8 saat buzdolabı içerisinde bekletilir ve merkez sıcaklığının  $5\pm 2$  °C olana kadar soğuması beklenir. Tuğla deney için buzdolabından çıkarıldıktan sonra yaklaşık 1 dakika üzerindeki fazla su miktarını atması beklenir. Islak tuğlanın kütlesi 1 dakika geçtikten sonra ölçülerek kaydedilir ve tuğlanın emdiği su miktarı ıslak kütlesi ile kuru kütlesi arasındaki fark ile hesaplanır.



**Şekil 2.25:** Tuğlaların buzdolabında su içerisinde bekletilmesi

Tuğlalar, buzdolabından çıkarıldıktan sonra 3 dakika içinde deney başlatılmalıdır. Merkez sıcaklığı  $5\pm 2$  °C olan tuğla deney için hazırlanan oda sıcaklığındaki fırının geometrik merkezine yerleştirilir. Tuğlanın bu şekilde yerleştirilebilmesi için fırın ızgara elemanı kullanılır. Fırın merkezine gelecek şekilde fırın rafına yerleştirilen ızgara elemanın üzerine yerleştirilen tuğlanın uzun kenarı fırının önüne paralel olmalı ve tuğla merkezi fırın kullanılabilir hacminin merkezi ile çakışık olmalıdır. Fırın çalışma modu seçilir ve çalışma moduna uygun olarak EN 50304 standardında verilen değerlere göre fırın sıcaklığı ayarlanır, deneye başlanır.

Fırınların enerji tüketim deneyleri, Tablo 2.3’de gösterilen durumlarda ve sıcaklık değerlerinde yapılmaktadır.

**Tablo2.3:** EN 50304 standardında enerji tüketim deneyleri için verilen sıcaklıklar

Isıtma Modu	Isıtma Yöntemi		
	Geleneksel (Statik)	Zorlanmış dolaşım (Turbo)	Buhar
$\Delta T1$	$(140 \pm 10)$ K	$(135 \pm 10)$ K	$(135 \pm 10)$ K
$\Delta T2$	$(180 \pm 10)$ K	$(155 \pm 10)$ K	$(155 \pm 10)$ K
$\Delta T3$	$(220 \pm 10)$ K*	$(175 \pm 10)$ K*	$(175 \pm 10)$ K*

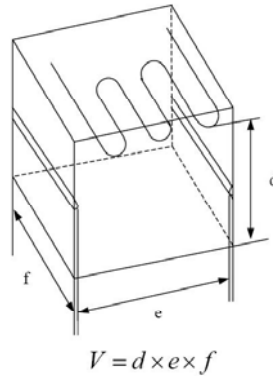
\*bu sıcaklık değerine ulaşamıyorsa en yüksek sıcaklık artışı

Sıcaklığı  $5\pm 2$  °C olan tuğla fırın içine konulduktan sonra, üzerindeki termoelemanlar ile merkez sıcaklığı okunur. Tuğladaki her iki deliğin sıcaklığındaki artış 55 K

değerine ulaştığında tuğla fırından çıkarılır ve tuğlanın çıkarıldıktan sonraki ağırlığı ölçülür, deney süresi kaydedilir ve tuğla oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Deneyler esnasında enerji tüketimi, süre, tuğla merkez sıcaklıkları ve ortam sıcaklığı ölçülür. Deney sırasında kaydedilen veriler ise şunlardır:

- i. Fırının cinsi ve ısıtma fonksiyonu
- ii. Fırının kullanılabilir hacmi
- iii. Pişirme tepsisinin veya ızgaranın kullanılabilir alanı
- iv. Voltaj değeri
- v. Test edilen fonksiyonlar ve çeşitleri
- vi. Fırının ön ısıtması için tüketilen enerji
- vii. Ön ısıtma süresi
- viii. Enerji tüketimi
- ix. Zaman
- x. Tuğlanın emdiği su miktarı

Fırın hacminin kullanılabilir yüksekliği, derinliği ve genişliği Şekil 2.26'da gösterildiği gibi ölçülür ve kullanılabilir hacim bu üç boyut kullanılarak litre cinsinden hesaplanır ve en yakın tam litreye tamamlanır. En büyük pişirme tepsisinin yüzey alanı kullanılabilir derinliğin genişlikle çarpılmasıyla bulunur. Fırında pişirme tepsisi yerine ızgara eleman bulunuyorsa ızgara elemanın alanı hesaplanır.



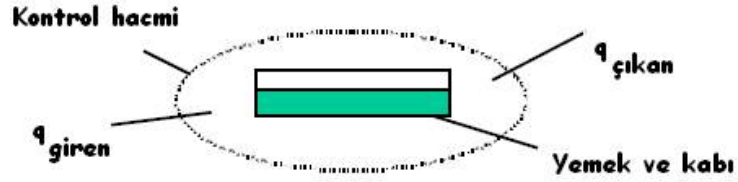
**Şekil 2.26:** Fırının kullanılabilir hacmi

Bulunan enerji tüketimi, fırın üretici firmanın bildirdiği değerin %10 + 40 Wh üstüne çıkmamalıdır. Bildirilen hacim değeri  $\pm 5\%$ 'ten fazla değişmemelidir. Fırının ön ısıtma süresi ise, belirtilen değerin %15 fazlasından daha fazla olmamalıdır.

Tuğla testi ile ilgili yapılan çalışmalarda, EN 50304 standardına göre uygulanan enerji tüketim testlerinde tuğlanın davranışı incelenerek ısı ve kütle geçişinin modellenmesi hedeflenmiştir.

David Ward tarafından 2000 yılında yayınlanan makale [21], fırında pişirmenin modellenmesi ve tuğla testi konusunda yapılan deneysel sonuçları vermektedir.

Piştirilen yiyecek için kontrol hacmi Şekil 2.27'deki gibi belirlenmiş ve enerji dengesi yazılmıştır.



**Şekil 2.27:** Piştirilen yiyeceğin modellenmesinde kullanılan kontrol hacmi

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{cikan} + \dot{E}_{üretilen} = \dot{E}_{depolanan} \quad (2.1)$$

Yiyeceğe verilen enerji denkleminde yer alan  $h$ , taşınım ve ışıınım yoluyla ısı geçiş katsayılarının toplamıdır.

$$\dot{E}_{giren} = \bar{h}.A.(T_{\infty} - T) \quad (2.2)$$

Kontrol hacminde enerji üretimi yoktur.

$$\dot{E}_{üretilen} = 0 \quad (2.3)$$

Kaybedilen enerji, yiyeceğin pişmesi sırasında içindeki suyun buharlaşması ile oluşan kütle akışı sonucunda oluşmaktadır.

$$\dot{E}_{cikan} = \dot{m}.h_{fg} \quad (2.4)$$

Depolanan enerji için verilen denklemde, kütle pişirme boyunca zamana bağlı olarak değişecektir.

$$\dot{E}_{depolanan} = M \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.5)$$

$$M = M_0 - \int_0^t \dot{m} \cdot dt \quad (2.6)$$

Eşitlik yeniden yazıldığında:

$$\bar{h} \cdot A \cdot (T_\infty - T) - \dot{m} \cdot h_{fg} + 0 = M \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.7)$$

Tuğlanın özgül ısısı Tablo 2.4’de görüldüğü şekilde hesaplanmıştır.

**Tablo2.4:** Tuğlanın özgül ısısının hesaplanması

Malzeme	Kütle (gr)	Kütlesel oran	Özgül ısı (kJ/kg K)
Tuğla	920	0.424	0.800
Su	1250	0.576	4.187
Toplam	2170	1	2.750

Çalışmada 200°C termostat ayar sıcaklığında statik fırın konumunda yapılan deneylerde tuğla ağırlığı zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Tuğla ağırlığının zaman bağlı değişim grafiği Şekil 2.28’de verilmektedir.



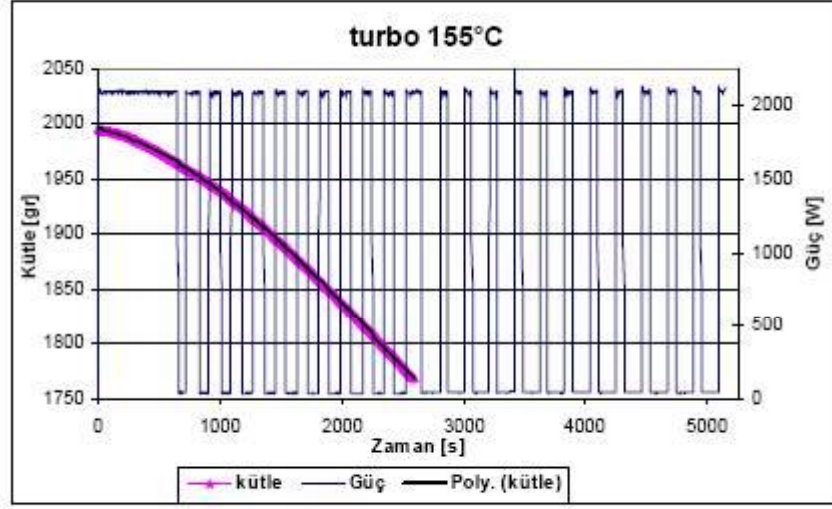
**Şekil 2.28:** Tuğla testi sırasında tuğla kütle kaybının zamana bağlı değişimi

Deney sonuçlarına göre tuğla kütle kaybının değişim denklemi verilmiştir.

$$M_L(t) = 1401,6908 - 0,01308 t^2 + 9,0468 t \quad (2.8)$$

2003 yılında Arçelik AŞ Araştırma ve Geliştirme merkezi tarafından yayınlanan makale [22] elektrikli fırının termal modellemesini konu almaktadır. Yapılan

çalışmalarda enerji tüketim deneyleri sırasında tuğlanın kütle kaybı ölçölmüş ve kütlenin zamana göre değişim denklemi belirlenmiştir.



$$m = 27 \cdot 10^{-14} t^4 + 32 \cdot 10^{-10} t^3 - 34 \cdot 10^{-6} t^2 - 27 \cdot 10^{-3} t + 1996$$

**Şekil 2.29:** Turbo konumunda 155°C’de yapılan tuğla testi sırasında tuğla kütle kaybının zamana bağlı değişimi

### **3. ENERJİ TÜKETİMİ AZALTILACAK ELEKTRİKLİ ANKASTRE FIRININ MEVCUT DURUM ANALİZİ**

Enerji tüketimi azaltılacak fırın grubu elektrikli ankastre fırınlardan oluşmaktadır. Pişirmenin gerçekleştiği fırın şasisinin konstrüksiyonu ve hava yönlendirme sistemi, üretici firmanın mevcut ankastre fırınlarından farklıdır. Üretici firma tarafından yeni üretilmeye başlanan ve enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik olarak daha önce çalışma yapılmamış bir ürün grubudur. Arçelik Bolu Pişirici Cihazlar İşletmesi tarafından üretilmektedir. Bu fırın grubunun enerji tüketimini azaltma çalışmalarında kullanılmak üzere, fırın grubundaki farklı modellere ait tüm pişirme işlevlerine sahip olan çok işlevli pişirme yapabilen BE61FSX model kodlu elektrikli ankastre fırın modeli seçilmiştir. Bu fırın modelinde elde edilecek sonuçlar, fırın grubundaki tüm modellere uygulanacaktır.

Enerji tüketimini azaltmaya yönelik değişiklikler öncesinde seçilen fırın modelinin mevcut özellikleri, üretici firma tarafından bildirilen enerji tüketimi değerleri, fırın yalıtımı, ön kapak yapısı, infiltrasyon incelenmiştir.

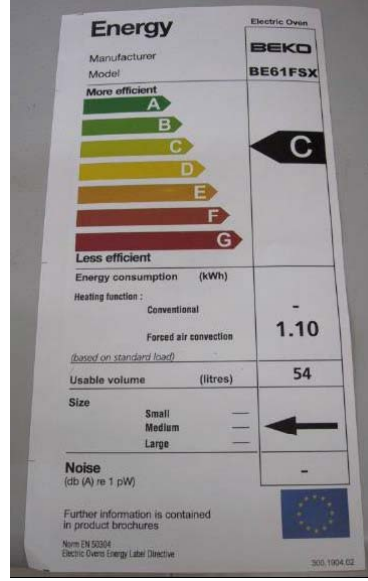
Örnekleme yapılarak 10 adet fırında enerji tüketim değerleri ölçülmüş ve sonuçlar istatistiksel yöntemler kullanılarak Minitab istatistiksel yazılımı ile incelenmiştir. Ortalama enerji tüketiminin ve enerji tüketiminin değişkenliğinin daha doğru tahmin edilebilmesi için güven aralıkları hesaplanmış, EN 50304 standardına göre enerji sınıfı limitlerine uygunluğun belirlenmesi için süreç yeterlilik analizinden faydalanılmıştır.

#### **3.1 Fırın enerji tüketiminin üretici tarafından bildirilen değerleri**

Deneysel çalışmalarda kullanılan BE61FSX model kodlu fırın Arçelik Bolu Pişirici Cihazlar İşletmesi tarafından üretilmektedir.

Fırının kullanılabilir hacmi 54 lt'dir.

Başlangıç enerji tüketimi zorlanmış dolaşım ile pişirme fonksiyonunda 1.1 kWh olarak bildirilmiştir ve fırın C enerji sınıfıdır. Fırına ait enerji etiketi Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1: BE61FSX model kodlu fırının enerji etiketi

### 3.2 Fırın yalıtım, kapak ve infiltrasyon özellikleri

Fırın çok işlevli özellikte olup, alt ve üst ısıtıcıları sayesinde geleneksel ısıtma fonksiyonunda (statik mod), fan ve turbo ısıtıcısı sayesinde zorlanmış dolaşım ile ısıtma fonksiyonunda (turbo mod) pişirme yapabilmektedir.

Fırında pişirme bölmesi 20 mm kalınlığında iğneli cam yünü ile yalıtılmaktadır. İğneli cam yünü yan duvarlar, üst ve alt duvarlarda çepeçevre sarılmıştır. Arka duvarda da iğneli cam yünü ile yalıtım uygulaması mevcuttur.

Fırın kapağı iki camlıdır. Fırının üst tarafına yerleştirilen soğutma fanı yardımıyla kapak içinden zorlanmış dolaşım ile hava dolaşımı sağlanmaktadır. Şekil 3.2'de kapakta ve Şekil 3.3'de fırın şasisinde yer alan emiş kanalları görülmektedir.

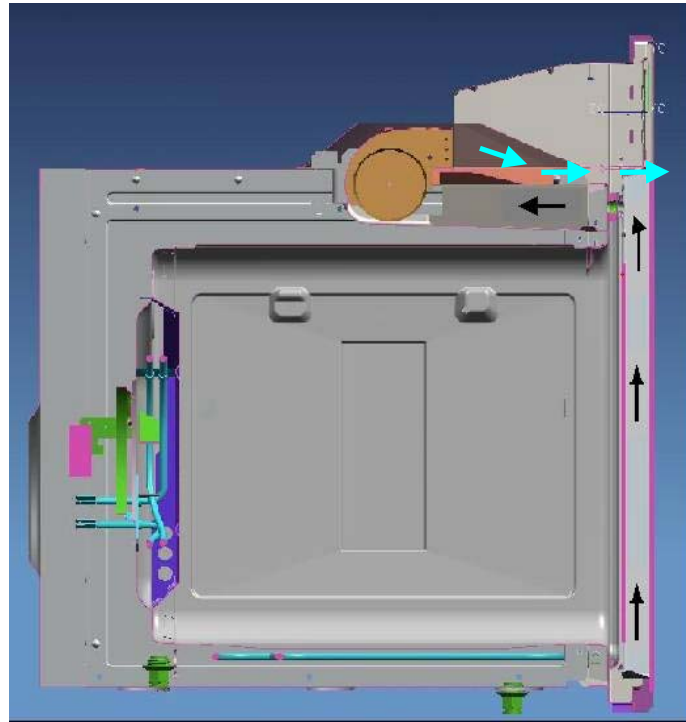


Şekil 3.2: Ön kapak hava kanalları



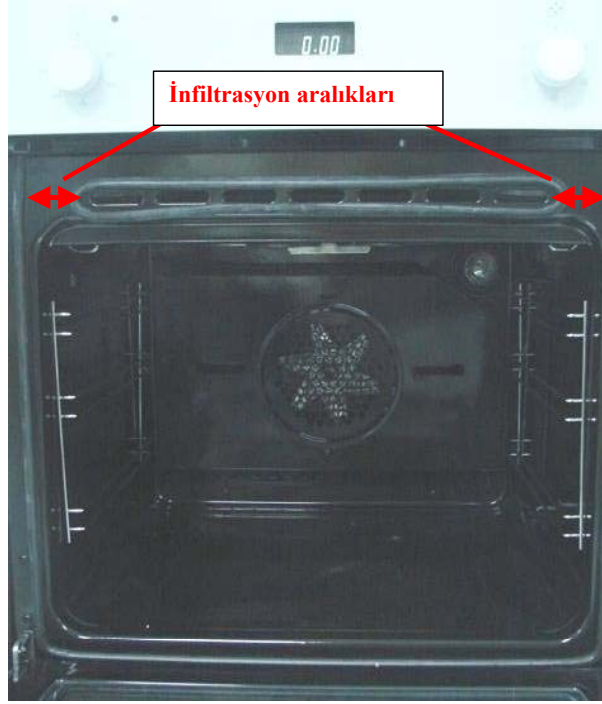
**Şekil 3.3:** Fırın bölmesi havalandırma kanalları

Kapakta ve fırın şasisinde birbirini karşılayan bu kanallar vasıtasıyla kapak içinden hava emişi yapılabilmektedir. Kapak içinden alınan hava kontrol panosu ile fırın pişirme bölmesi arasındaki egzoz kanallarından dış ortama atılmaktadır. Soğutma fanı yardımıyla fırın kapağından alınan havanın akışı Şekil 3.4’te gösterilmektedir.



**Şekil 3.4:** BE61FXS fırının ön kapağından hava akışı

Fırında baca bulunmamaktadır. “U” şeklindeki conta ile fırın şasisi ile kapak arasındaki yüzeyde alt ve yan kenarlardan infiltrasyonu engellemektedir. Üst birleşimde conta olmayan bölgeler ise Şekil 3.5’de görüldüğü gibi infiltrasyona izin vermektedir.



**Şekil 3.5:** BE61FSX fırında infiltrasyon

### 3.3 Enerji tüketiminin mevcut durum analizi

BE61FSX model kodlu fırının enerji tüketim değeri zorlanmış dolaşım ile pişirme fonksiyonunda 1,1kWh olarak deklare edilmektedir. EN 50304 standardında verilen toleranslara uygunluğu görebilmek amacıyla, farklı üretim partilerine ait rastsal olarak seçilmiş 10 adet fırının enerji tüketim değerleri tuğla testi uygulanarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar istatistiksel yöntemler ile Minitab istatistiksel yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Örnek alınan fırınlarda ölçülen enerji tüketim değerleri istatistiksel olarak incelenmiş ve anakütle parametreleri tahmin edilebilmiş ve tahminlerin güven aralıkları belirlenmiştir.

Güven Aralıkları, nokta tahminlerimizin örnekten örneğe olan değişkenliğini dikkate alarak anakütlenin parametreleri hakkında bir değerlendirme yapmanızı sağlar [23]. Tesadüfen gerçekten daha yüksek ortalamaya veya standart sapmaya sahip olan örnekleme yapma veya tesadüfen gerçekten daha düşük ortalamaya veya standart sapmaya sahip olan örnekleme yapma olasılığına karşı örneklerden elde edilen bilgiyi anakütleyi tahmin etmek için kullanmayı sağlar.

Örneklerden hesaplanan ortalama ve standart sapmanın güven aralıklarının hesaplanması için aşağıdaki formüller kullanılmakta ve anakütle parametreleri bir

aralık içinde daha doğru tahmin edilebilmektedir. Ortalamanın güven aralığı hesaplanırken  $\alpha/2$  risk seviyesi (%95 güven aralığı için 0,025), n-1 serbestlik derecesi için t dağılımı kullanılarak t değerinden faydalanılmaktadır. Standart sapmanın güven aralığı hesaplanırken  $\alpha/2$  risk seviyesi (%95 güven aralığı için 0,025) için ki-kare dağılımı kullanılarak ki-kare ( $\chi^2$ ) değerinden faydalanılmaktadır.

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

$$S \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{\alpha/2}^2}} \leq \sigma \leq S \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{1-\alpha/2}^2}} \quad (3.2)$$

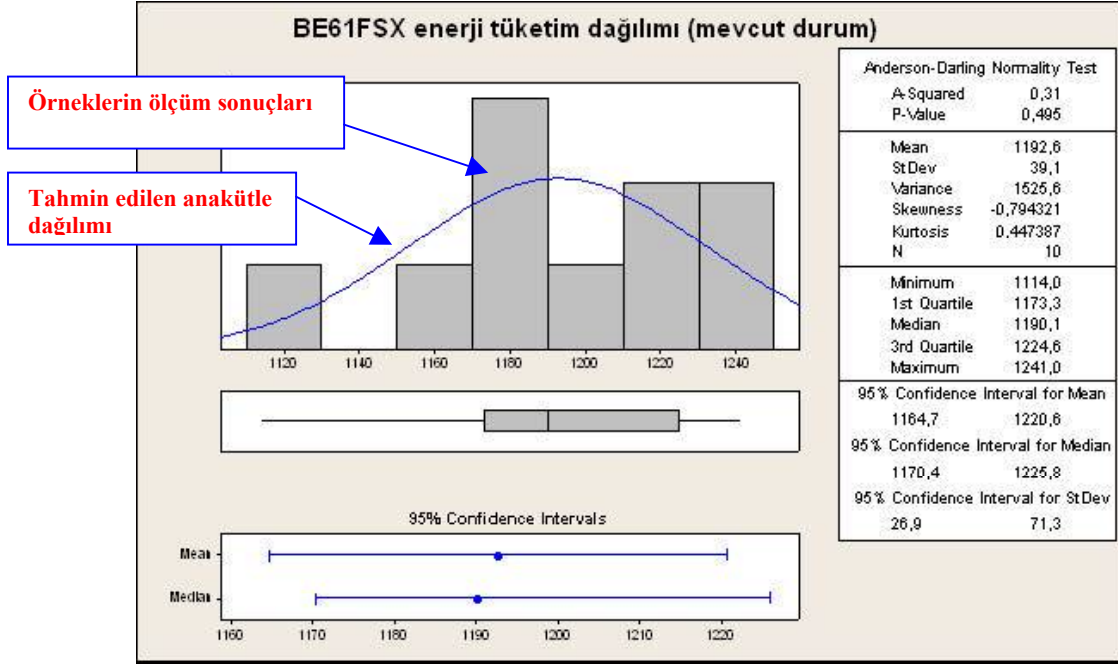
Örnek sayısının artırılması güven aralığını daraltmakta ve daha kesin tahmin yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada örnek değişkenliğinin göz önünde tutularak daha doğru karar verilebilmesi amacıyla örnekleme yapılarak çoklu ölçümler ile çalışılmış, sonuçların değerlendirilmesi amacıyla istatistiksel yöntemlerden faydalanılmıştır. Örnek sayıları çalışma için ayrılan zaman ve laboratuvar kaynağı göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Ortalama ve standart sapmanın güven aralıkları ile tahmin edilmesine ek olarak, 10 adet örnekte yapılan ölçümlere bakılarak dağılımın normal dağılıma uyup uymadığı normallik testi yardımı ile değerlendirilmiştir.

Normal dağılım eğrisi, en sık oluşan değer ortada, diğer olasılıkların her iki yanda simetrik olarak azaldığı olasılık dağılımıdır. Ortalama ve standart sapma ile dağılım eğrisi tanımlıdır. Normallik testi, örneklerden elde edilen ortalama ve standart sapma ile tanımlanan normal dağılım eğrisi ile örneklerin dağılımını karşılaştırarak, örneklerin normal dağılıma uygunluğunu belirler. Test sonucunda elde edilen p-değerinin yüksek olması normal dağılıma uygunluğun göstergesidir [23].

Şekil 3.6'da, 10 örneğe ait enerji tüketim değerlerinin Minitab yazılımı ile değerlendirilmesi sonucunda, BE61FSX fırınlarda enerji tüketim dağılımının betimsel istatistikleri verilmektedir.

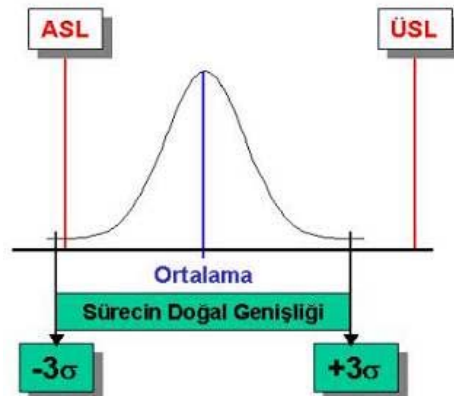
- Enerji tüketiminin ortalama değeri 1192.6 Wh (% 95 CI: 1164.7;1220.6) tir.
- Enerji tüketiminin standart sapması 39.1 Wh (% 95 CI: 26.9;71.3) tir.
- Enerji tüketim dağılımı normal dağılıma uymaktadır (normallik testi sonucunda elde edilen p-değerinin (p-değeri=0.495) belirlenen risk seviyesinden ( $\alpha$ riski=0,05) küçük olması nedeniyle, dağılımın normal dağılıma uyduğu kabul edilebilir).



**Şekil 3.6:** BE61FSX fırında enerji tüketiminin dağılımı ve betimsel istatistikleri

Ölçüm değerleri ile süreç yeterlilik analizi yapılmıştır. EN 50304 standardına göre 54lt hacimde C enerji sınıfı için enerji tüketiminin üst limiti 1360 Wh'tir. B enerji sınıfı için üst limit 960 Wh'tir.

Süreç yeterlilik analizi ölçümler ile belirlenen dağılım ile tolerans değerlerini karşılaştırır [23]. Toleransların dışında elde edilebilecek durumların olasılığını belirler. Hesaplanan  $C_{pk}$  indeksi toleranslara uygunluk için kıyaslama imkanı verir.  $C_{pk}$  yükseldikçe toleranslara uygunluk artar. Şekil 3.7'de normal dağılıma sahip bir süreç ile tolerans limitlerinin (ASL: Alt spesifikasyon limiti, ÜSL: Üst spesifikasyon limiti) karşılaştırılması görülmektedir. Süreç ortalamasının tolerans limitlerine yakın olması ve süreç değişkenliğinin artması tolerans limitleri dışında gözlemlenecek durumların artmasına sebep olur.



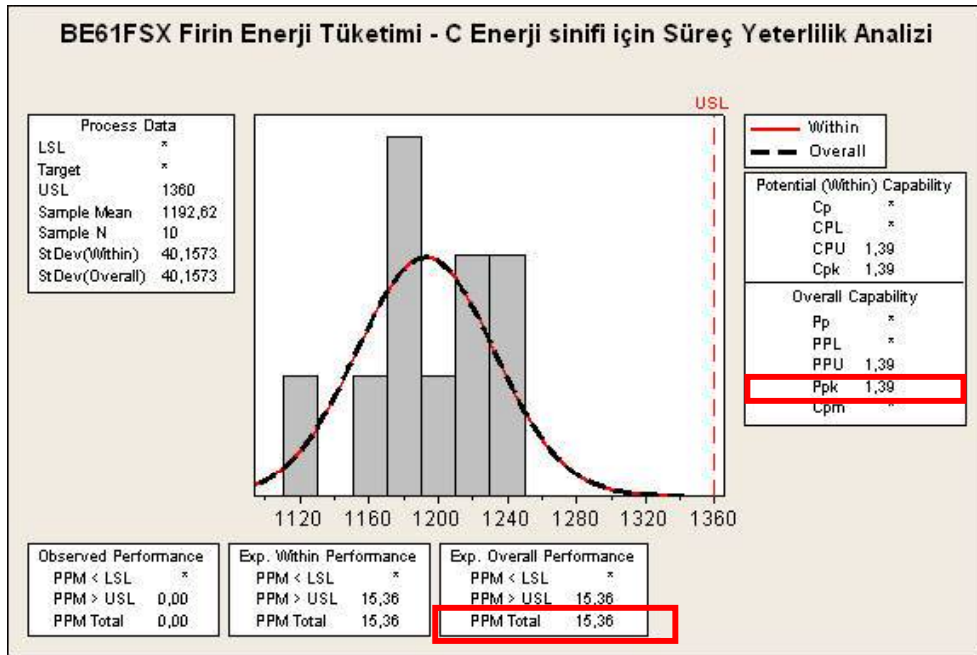
**Şekil 3.7:** Süreç yeterlilik analizi

Süreç yeterlilik analizi örneklerden elde edilen ortalama ve standart sapmaya uygun olan dağılım ile (normal dağılım) tolerans limitlerini karşılaştırır. Böylelikle sadece örneklerin limitlere uygunluğuna değil, örneklerden elde edilen bilgiler ile tahmin edilen anakütlenin limitlere uygunluğunu ve hata oranlarını gösterir.

$C_{pk}$ , örneklerden elde edilen ortalamanın yakın olduğu spesifikasyon limiti ile farkının, sürecin doğal değişkenliğini gösteren 3 standart sapma aralığına bölünmesi ile elde edilir.

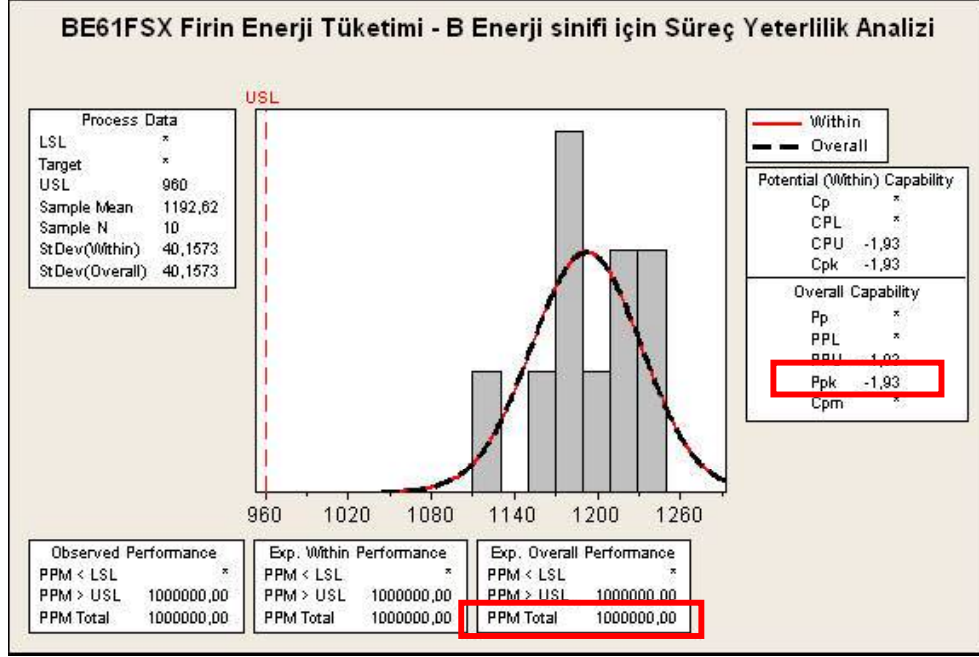
$$C_{pk} = \min\left(\frac{\bar{x} - ASL}{3s}, \frac{USL - \bar{x}}{3s}\right) \quad (3.3)$$

Süreç yeterlilik analizlerine göre C enerji sınıfı limitine uygunluk için  $C_{pk}$  değeri 1.39'dur. Üretilen fırınların C enerji sınıfını karşılamama oranının sadece 15.36 ppm (milyonda hata oranı) olduğu görülmektedir. Şekil 3.8'de analiz sonuçları verilmektedir.



**Şekil 3.8:** BE61FSX fırında enerji tüketiminin C enerji sınıfı için süreç yeterlilik analizi

Süreç yeterlilik analizlerine göre B enerji sınıfı limitine uygunluk için  $C_{pk}$  değeri -1.93'tür. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere üretilen fırınların hiçbiri B enerji sınıfını karşılamamaktadır.



**Şekil 3.9:** BE61FSX fırında enerji tüketiminin B enerji sınıfı için süreç yeterlilik analizi

A enerji sınıfına ulaşılabilmesi için fırın enerji tüketim değerinin tuğla testi sonuçlarının 909 Wh üst limit değerinden küçük olması gerekmektedir.

Yapılan enerji tüketimi deneylerinin istatistiksel analizler ile değerlendirilmesi sonucunda, çalışma yapılan elektrikli ankastre fırının C enerji sınıfı kriterlerini karşıladığı, B ve A enerji sınıfı kriterlerini karşılayamadığı görülmüştür.

#### 4. MATEMATİKSEL MODEL

İncelenen elektrikli fırının C enerji sınıfı seviyesinden A enerji sınıfı seviyesine yükseltilmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla uygulanacak çözümler için iki önemli koşul fırında ilave yatırım gerektirmemeleri ve ürün maliyetine etkilerinin öngörülen sınırlar içerisinde kalmasıdır.

- Yalıtım kalınlığını arttırma
- Ön kapakta iki cam yerine üç cam kullanma çözümleri belirtilen kısıtları karşılamaktadır.

Öngörülen çözümler için mevcut durumda ve hedeflenen iyileştirme durumlarında ısı kayıplarını hesaplamak için gerekli bağıntılar çıkartılmıştır. Kurulan matematiksel model yardımıyla, bu çözümlerin uygulanması durumunda ısı kayıplarında oluşacak değişimin belirlenmesi ve çözümlerin hızlı ve kolay bir şekilde karşılaştırılması hedeflenmiştir.

##### 4.1 Yalıtım kalınlığının arttırılmasının ısı kayıplarına etkisi

Fırın duvarlarından olan ısı kayıpları,

- Fırının zorlanmış dolaşım ile ısıtma fonksiyonunda çalıştığı,
- Fırın içi ayar sıcaklığı ile ortam arasındaki sıcaklık farkının  $\Delta T = 155$  K olduğu durumda
- Fırın duvarlarının (yan duvarlar, üst, alt ve arka duvar) mükemmel şekilde izole edildiği kabul edilerek, sistem denge konumuna geldikten sonraki durum için hesaplanmıştır.

Üç farklı yalıtım kalınlığı (mevcut 0.02 m, 0.03 m, 0.04 m) için hesaplanan değerler karşılaştırılarak, yalıtım kalınlığının arttırılmasının ısı kayıplarına olan etkisi incelenmiştir.

Emaye kaplı sac ve iğneli cam yünü sarılmış fırın duvarları için ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır.

$$K_{duvar} = 1 / \left[ \frac{l_{sac}}{k_{sac}} + \frac{l_{emaye}}{k_{emaye}} + \frac{l_{camyünü}}{k_{camyünü}} \right] \quad (4.1)$$

$$l_{sac} = 0.0007 \text{ m}, \quad k_{sac} = 60 \text{ W/mK}$$

$$l_{emaye} = 0.00005 \text{ m}, \quad k_{emaye} = 1.046 \text{ W/mK}$$

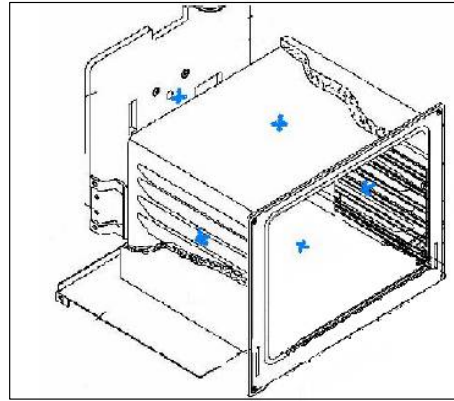
$$l_{camyünü} = 0.02 \text{ m}, \quad k_{camyünü} = 0.041 \text{ W/mK}$$

0.02 m cam yünü kullanıldığı durumda  $K_{duvar} = 2.05 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak bulunmuştur.

Denge konumunda kullanılan J tipi termoelemanlar ile Şekil 4.1’de işaretlenen bölgelerden fırın iç duvarlarında yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklıklar Tablo 4.1’de verilmektedir. Fırının termostatik özellikte olması ve termostat tarafından referans alınan sıcaklığın fırın içi duvar yüzeyinden algılanması nedeniyle, duvar iç yüzey sıcaklıklarının farklı yalıtım kalınlıklarında değişmediği görülmüştür.

**Tablo 4.1:** Fırın duvarlarının iç yüzeylerinde ölçülen sıcaklıklar

	Yüzey Sıcaklığı (°C)
<b>Sağ yan duvar</b>	172
<b>Sol yan duvar</b>	174
<b>Üst duvar</b>	169
<b>Alt duvar</b>	164
<b>Arka Duvar</b>	176

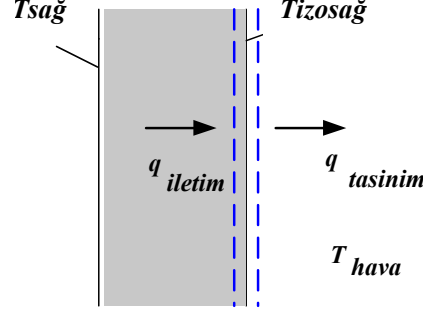


**Şekil 4.1:** Fırın iç duvarlarında sıcaklık ölçümü yapılan bölgeler

Fırın sağ ve sol yan duvarları, alt duvar, üst duvar ve arka duvar için enerji dengesi yazılarak yalıtım yüzeylerindeki sıcaklıklar ve ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır.

#### 4.1.1 Fırın sağ yan duvar için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması

Sağ yan duvar yüzeyinde enerji dengesi Şekil 4.2'deki gibi yazılmıştır.  $T_{hava}$  ortam sıcaklığına eşittir.



Şekil 4.2: Fırın sağ yan duvar yüzeyinde enerji dengesi

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{cikan} = 0 \quad (4.2)$$

$$q_{iletim} - q_{tasnim} = 0 \quad (4.3)$$

$$K_{duvar} \cdot (T_{sag} - T_{izosag}) = h_{dsag} \cdot (T_{izosag} - T_{hava}) \quad (4.4)$$

$T_{izosag}$  sağ yanduvvar yalıtım yüzeyindeki sıcaklık (yalıtım malzemesinin dış taraftaki sıcaklığı) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$T_{izosag} = \frac{K_{duvar} \cdot T_{sag} + h_{dsag} \cdot T_{hava}}{h_{dsag} + K_{duvar}} \quad (4.5)$$

#### $h_{dışsağ}$ değerinin hesaplanması;

Düsey yüzeyden doğal taşınım durumuna göre ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır [24].

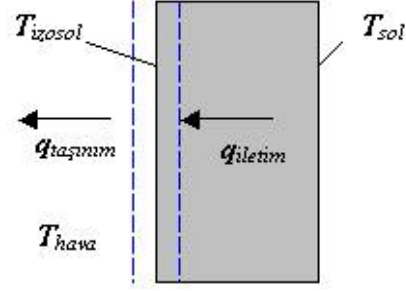
$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\alpha \cdot \nu} \quad (4.6)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (4.7)$$

$$h_{dsag} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (4.8)$$

#### 4.1.2 Fırın sol yan duvar için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması

Sol yan duvar yüzeyinde enerji dengesi Şekil 4.3'deki gibi yazılmıştır.  $T_{hava}$  ortam sıcaklığına eşittir.



Şekil 4.3: Fırın sol yan duvar yüzeyinde enerji dengesi

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{cikan} = 0 \quad (4.9)$$

$$q_{iletim} - q_{tasinim} = 0 \quad (4.10)$$

$$K_{duvar} \cdot (T_{sol} - T_{izosol}) = h_{dsol} \cdot (T_{izosol} - T_{hava}) \quad (4.11)$$

$T_{izosol}$  sol yanduvvar yalıtım yüzeyindeki sıcaklık (yalıtım malzemesinin dış taraftaki sıcaklığı) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$T_{izosol} = \frac{K_{duvar} \cdot T_{sol} + h_{dsol} \cdot T_{hava}}{h_{dsol} + K_{duvar}} \quad (4.12)$$

#### $h_{dışsol}$ değerinin hesaplanması;

Düşey yüzeyden doğal taşınım durumuna göre ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır [24].

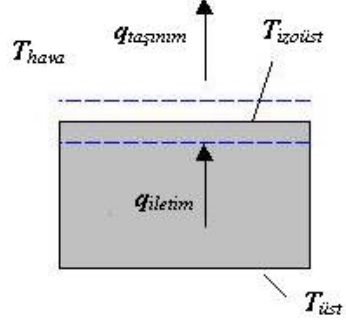
$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\alpha \cdot \nu} \quad (4.13)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (4.14)$$

$$h_{dsol} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (4.15)$$

### 4.1.3 Fırın üst duvarı için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması

Üst duvar yüzeyinde enerji dengesi Şekil 4.4'deki gibi yazılmıştır.  $T_{hava}$  ortam sıcaklığına eşittir.



Şekil 4.4: Fırın üst duvar yüzeyinde enerji dengesi

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{cikan} = 0 \quad (4.16)$$

$$q_{iletim} - q_{tasinim} = 0 \quad (4.17)$$

$$K_{duvar} \cdot (T_{üst} - T_{izooüst}) = h_{düst} \cdot (T_{izooüst} - T_{hava}) \quad (4.18)$$

$T_{izosol}$  sol yanduvuar yalıtım yüzeyindeki sıcaklık (yalıtım malzemesinin dış taraftaki sıcaklığı) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$T_{izooüst} = \frac{K_{duvar} \cdot T_{üst} + h_{düst} \cdot T_{hava}}{h_{düst} + K_{duvar}} \quad (4.19)$$

#### $h_{düst}$ değerinin hesaplanması;

Alttan ısıtılan veya üstten soğutulan yüzeyden doğal taşınım durumuna göre ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır [25].

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\alpha \cdot \nu} \quad (4.20)$$

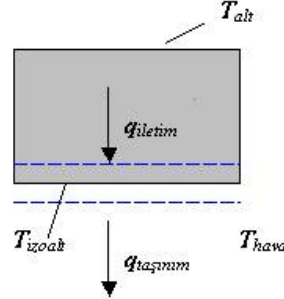
$$L = \frac{A_s}{P} \quad (4.21)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \quad (4.22)$$

$$h_{düst} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (4.23)$$

#### 4.1.4 Fırın alt duvarı için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması

Alt duvar yüzeyinde enerji dengesi Şekil 4.5'deki gibi yazılmıştır.



Şekil 4.5: Fırın alt duvar yüzeyinde enerji dengesi

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{cikan} = 0 \quad (4.24)$$

$$q_{iletım} - q_{taşınım} = 0 \quad (4.25)$$

$$K_{du var} \cdot (T_{ait} - T_{izoaıt}) = h_{dalt} \cdot (T_{izoaıt} - T_{hava}) \quad (4.26)$$

$T_{izoaıt}$  sol yanduvuar yalıtım yüzeyindeki sıcaklık (yalıtım malzemesinin dış taraftaki sıcaklığı) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$T_{izoaıt} = \frac{K_{du var} \cdot T_{ait} + h_{dalt} \cdot T_{hava}}{h_{dalt} + K_{du var}} \quad (4.27)$$

#### $h_{dışalt}$ değerinin hesaplanması;

Üstten ısıtılan veya alttan soğutulan yüzeyden doğal taşınım durumuna göre ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır [25].

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\alpha \cdot \nu} \quad (4.28)$$

$$L = \frac{A_s}{P} \quad (4.29)$$

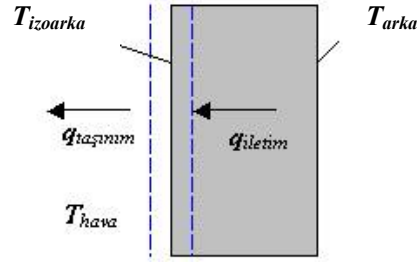
$$\overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \quad (4.30)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15 Ra_L^{1/3} \quad 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11} \quad (4.31)$$

$$h_{dalt} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (4.32)$$

#### 4.1.5 Fırın arka duvarı için yalıtım dış yüzey sıcaklığının ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması

Arka duvar yüzeyinde enerji dengesi Şekil 4.6'daki gibi yazılmıştır.  $T_{hava}$  ortam sıcaklığına eşittir.



Şekil 4.6: Fırın arka duvarı yüzeyinde enerji dengesi

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{cikan} = 0 \quad (4.33)$$

$$q_{iletim} - q_{taşınım} = 0 \quad (4.34)$$

$$K_{du\ var} \cdot (T_{sol} - T_{izoarka}) = h_{dışarka} \cdot (T_{izosol} - T_{hava}) \quad (4.35)$$

$T_{izoarka}$  arka duvar yalıtım yüzeyindeki sıcaklık (yalıtım malzemesinin dış taraftaki sıcaklığı) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$T_{izoarka} = \frac{K_{du\ var} \cdot T_{arka} + h_{dışarka} \cdot T_{hava}}{h_{dışarka} + K_{du\ var}} \quad (4.36)$$

#### $h_{dışarka}$ değerinin hesaplanması;

Düsey yüzeyden doğal taşınım durumuna göre ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır [24].

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\alpha \cdot \nu} \quad (4.37)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (4.38)$$

$$h_{dışarka} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (4.39)$$

#### 4.1.6 Fırın duvarlarından olan ısı kayıplarının hesaplanması

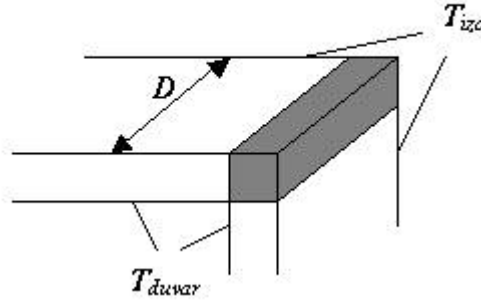
Fırın yalıtım yüzeylerinin sıcaklık değerlerinin ve ısı taşınım katsayılarının belirlenmesi için gerekli bağıntılar çıkartıldıktan sonra, fırın duvarları için toplam ısı geçiş katsayıları hesaplanmıştır.

$$K = 1 / \left[ \frac{l_{sac}}{k_{sac}} + \frac{l_{emaye}}{k_{emaye}} + \frac{l_{camyüü}}{k_{camyüü}} + \frac{1}{h_{disortan}} \right] \quad (4.40)$$

Yan duvarlar, alt, üst ve arka duvardan olan ısı kayıplar aşağıda verilen bağıntıya göre hesaplanmıştır.

$$Q_{du\ var} = K \cdot A_{du\ var} \cdot (T_{du\ var} - T_{hava}) \quad (4.41)$$

Bitişik duvarların köşelerinden iki boyutlu ısı iletimi gerçekleşmektedir. Isıl kaybın gerçekleştiği dört adet köşe bulunmaktadır. Köşelerdeki ısı kayıpları hesaplamak için Şekil 4.7’de verilen duruma uyan şekil faktörü kullanılmıştır [26].



Şekil 4.7: Bitişik duvarlarda köşelerden ısı iletimi

$$S = 0.54D \quad (4.42)$$

$$K_{du\ var} = 1 / \left[ \frac{l_{sac}}{k_{sac}} + \frac{l_{emaye}}{k_{emaye}} + \frac{l_{camyüü}}{k_{camyüü}} \right] \quad (4.43)$$

$$Q_{köse} = S \cdot K_{du\ var} \cdot \Delta T = 0.54 \cdot D \cdot K_{du\ var} \cdot (T_{du\ var} - T_{izo}) \quad (4.44)$$

$D$  uzunluğu, bitişen duvarların genişliğidir ve 0,45 m ‘ye eşittir.

$T_{duvar}$  bitişik duvarların ölçülen iç yüzey sıcaklıklarının ortalamasına eşit alınmıştır.

$T_{izo}$  bitişik duvarların hesaplanan yalıtım yüzey sıcaklıklarının ortalamasına eşit alınmıştır.

Verilen bağıntılar kullanılarak tüm duvar ve köşelerden olan ısı kayıplar hesaplanabilir. Farklı yalıtım kalınlıkları için elde edilen toplam kayıp karşılaştırıldığında, yalıtım kalınlığının ısı kayıplara olan etkisi belirlenebilir.

#### 4.1.7 Farklı yalıtım kalınlıkları için matematiksel model sonuçları

Fırın duvarlarının her biri için enerji dengesi yazılarak dış yüzey sıcaklıklarını ve ısı taşınım katsayılarını veren bağıntılar çıkartılmıştır. Isı taşınım katsayılarının ve yüzey sıcaklıklarının elde edilmesi sonucunda, her duvar için toplam ısı geçiş katsayısı belirlenebilecek ve duvar ve köşelerden olan ısı kayıpları hesaplanabilecektir. Microsoft Excel programında oluşturulan matematiksel model yardımıyla, ölçülen sıcaklık değerlerinin, malzeme özellikleri ve karakteristik boyutların girilmesi sonucunda ısı kayıpları hesaplanabilmektedir. Hazırlanan program fırın içi ve dış ortam sıcaklıklarına göre duvar yalıtım yüzeylerinin sıcaklığı için ilk tahmin değerlerini ve bu sıcaklık değerlerine karşılık gelen ısı özellikleri ( $k, v, Pr..$ ) hesaplamaktadır. Hesaplanan ısı özellikleri kullanarak  $h_{dış}$  ısı taşınım katsayılarını ve enerji dengesinden çıkartılan bağıntıları kullanarak duvar yalıtım yüzey sıcaklıklarını hesaplamaktadır. Hesaplanan yalıtım yüzey sıcaklıkları ile tahmin sıcaklıklarını karşılaştırmakta ve sıcaklıklar dengeye oturana kadar iterasyon işlemine devam etmektedir.

Kullanıcın programa girmesi gereken değerler şunlardır;

- Fırın duvarlarını oluşturan malzemelerin kalınlık ve ısı iletim katsayıları ( $sac, emaye, camyünü$ )
- Ortam sıcaklığı
- Fırın içi sıcaklığı
- Fırın duvarlarının denge konumu için ölçülen iç yüzey sıcaklıkları
- Duvarlar ve köşeler için karakteristik uzunluklar
- Duvarlar için yüzey alanları

İstenen veriler girildiğinde programdan alınan çıktılar şunlardır;

- Fırın duvarları için ısı iletim katsayısı
- Fırın duvarlarının yalıtım yüzeylerinin sıcaklıkları

- Fırın duvarlarının yalıtım yüzeylerinden olan taşınım için  $h_{dış}$  ısı taşınım katsayıları
- Fırın duvarlarının toplam ısı geçiş katsayıları
- Tüm fırın duvarlarından ve köşelerden olan ısı kayıpları

Veri girişinin yapıldığı ve sonuçların alındığı program ana sayfası Şekil 4.8'de görülmektedir.

**VERİ GİRİŞİ:**

*Fırın kavitesinin sac, kaplama ve izolasyon kalınlıklarını ve ısı iletim katsayılarını giriniz.*

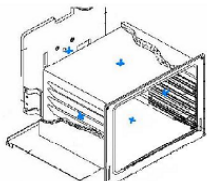
$l_{sac}$ :	0,00070	m
$k_{sac}$ :	60,000	W/mK
$l_{emaye}$ :	0,00005	m
$k_{emaye}$ :	1,0460	W/mK
$l_{izolasyon}$ :	0,02000	m
$k_{izolasyon}$ :	0,041	W/mK

*Fırın içi ayar sıcaklığını ve ortam sıcaklığını giriniz.*

$T_{fırın\_merkez}$	178	T (°C)	451	T (K)
$T_{dış\_hava}$	23	T (°C)	296	T (K)

*Ölçülen fırın içi duvar sıcaklıklarını giriniz*

	T (°C)	T (K)
Tsağ	172	445
Tsol	174	447
Tüst	169	442
Talt	164	437
Tarka	176	449



*Dış yüzeyler ve köşeler için karakteristik uzunlukları giriniz.*

$L_{sağ}$	0,35	m	$As(m^2)$	0,1575			
$L_{sol}$	0,35	m	$As(m^2)$	0,1575			
$L_{üst}$	0,1125	m	$As(m^2)$	0,2025	$P(m)$	1,800	<i>Yüzey alanını ve çevreyi giriniz</i>
$L_{alt}$	0,1125	m	$As(m^2)$	0,2025	$P(m)$	1,800	<i>Yüzey alanını ve çevreyi giriniz</i>
$L_{arka}$	0,35	m	$As(m^2)$	0,1575			
$L_{köşe}$	0,45	m					

**SONUÇLAR:**

Fırın duvarları için ısı iletim katsayısı  
**K duvarı: 2,04973 W/m<sup>2</sup>K**

**izolasyon dış yüzey sıcaklıkları**

	T (°C)	T (K)
Tsağ	70,59	343,59
Tsol	71,15	344,15
Tüst	80,69	353,69
Talt	60,25	333,25
Tarka	71,70	344,70

**h<sub>dış</sub> taşınım katsayıları**

	h <sub>dış</sub> (W/m <sup>2</sup> K)
Tsağ	4,368
Tsol	4,379
Tüst	3,138
Talt	5,710
Tarka	4,389

**K duvar(Tduvar-Tizo)=h<sub>dış</sub>(Tizo-Thava)**

sağ:	207,8654	=	207,8654
sol:	210,8224	=	210,8224
üst:	181,0225	=	181,0225
alt:	212,6700	=	212,6700
arka:	213,7813	=	213,7813

**Toplam ısı geçiş katsayıları:**

	K (W/m <sup>2</sup> K)
sağ	1,3951
sol	1,3962
üst	1,2399
alt	1,5083
arka	1,3973

**Isıl kayıplar:**

	Q (W)
Duvar sağ	32,74
Duvar sol	33,20
Duvar üst	36,66
Duvar alt	43,07
Duvar arka	33,67
köşe sağüst	47,25
köşe sağalt	51,10
köşe solüst	47,61
köşe solalt	51,45
<b>Toplam</b>	<b>376,75</b>

Şekil 4.8: Yalıtım programının ana sayfası

Sağ yan duvar yalıtım yüzeyindeki sıcaklık için program tarafından yapılan iterasyonları gösteren örnek sayfa Şekil 4.9'da görülmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	<b>Sağ yan duvar yalıtım yüzey sıcaklığının hesaplanması</b>													
2	Tizosa Tf	beta	L3	v	alfa	RaL	RaL<109	Pr	Nu	k	hdsag	Tizohesap	Tizo_hata	
3	440,0	368,0	0,002717	0,043	3,189E-05	4,642E-05	1,11E+08	1	0,686	53,29	0,0364	5,53	319,28	120,72
4	379,6	337,8	0,002960	0,043	2,501E-05	3,615E-05	1,15E+08	1	0,693	53,82	0,0320	4,92	321,68	57,96
5	360,7	323,3	0,003093	0,043	2,170E-05	3,122E-05	1,05E+08	1	0,698	52,63	0,0299	4,50	323,65	27,01
6	337,2	316,6	0,003169	0,043	2,016E-05	2,892E-05	9,38E+07	1	0,700	51,21	0,0289	4,23	325,04	12,12
7	331,1	313,5	0,003189	0,043	1,947E-05	2,789E-05	8,67E+07	1	0,701	50,23	0,0285	4,09	325,85	5,25
8	328,5	312,2	0,003203	0,043	1,917E-05	2,744E-05	8,31E+07	1	0,702	49,72	0,0283	4,02	326,26	2,22
9	327,4	311,7	0,003208	0,043	1,905E-05	2,726E-05	8,15E+07	1	0,702	49,48	0,0282	3,99	326,44	0,93
10	326,9	311,5	0,003211	0,043	1,899E-05	2,718E-05	8,08E+07	1	0,702	49,38	0,0282	3,98	326,52	0,38
11	326,7	311,4	0,003212	0,043	1,897E-05	2,714E-05	8,06E+07	1	0,702	49,34	0,0282	3,97	326,55	0,16
12	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,713E-05	8,04E+07	1	0,702	49,32	0,0282	3,97	326,57	0,07
13	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,713E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,03
14	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,01
15	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
16	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
17	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
18	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
19	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
20	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
21	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
22	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
23	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
24	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
25	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
26	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
27	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
28	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
29	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
30	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
31	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00
32	326,6	311,3	0,003212	0,043	1,896E-05	2,712E-05	8,04E+07	1	0,702	49,31	0,0282	3,97	326,57	0,00

Şekil 4.9: Sağ yan duvar yalıtım yüzey sıcaklığına ait iterasyonlar

Program sonucunda hesaplanan fırın duvarlarının ısı iletim katsayıları Tablo 4.2’de verilmektedir.

**Tablo 4.2:** Farklı yalıtım kalınlıkları için fırın duvarlarının ısı iletim katsayıları

Yalıtım kalınlığı (m)	K <sub>duvar</sub> (W/m <sup>2</sup> K)
0.02	2.050
0.03	1.367
0.04	1.025

Fırın duvarlarının yalıtım yüzey sıcaklıklarının yalıtım kalınlığına göre değişimi Tablo 4.3’de görülmektedir.

**Tablo 4.3:** Farklı yalıtım kalınlıkları için duvar yalıtım yüzeylerinin sıcaklıkları

Yalıtım kalınlığı (m)	0.02	0.03	0.04
T <sub>izosağ</sub> (°C)	70.6	60.0	53.6
T <sub>izosol</sub> (°C)	71.1	60.4	53.9
T <sub>izoüst</sub> (°C)	80.7	68.8	61.4
T <sub>izoalt</sub> (°C)	60.2	51.5	46.4
T <sub>izoarka</sub> (°C)	71.7	60.8	54.3

Fırın duvarları için h<sub>dış</sub> taşınım katsayıları Tablo 4.4’de verilmektedir.

**Tablo 4.4:** Farklı yalıtım kalınlıkları için h<sub>dış</sub> ısı taşınım katsayıları

Yalıtım kalınlığı (m)	0.02	0.03	0.04
h <sub>dış_sag</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	4.37	4.14	3.97
h <sub>dış_sol</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	4.38	4.15	3.98
h <sub>dış_üst</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	3.14	2.99	2.87
h <sub>dış_alt</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	5.71	5.38	5.15
h <sub>dış_arka</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	4.39	4.16	3.99

Fırın duvarları için K toplam ısı geçiş katsayıları Tablo 4.5’de verilmektedir

**Tablo 4.5:** Yalıtım kalınlıklarına göre fırın duvarlarının toplam ısı geçiş katsayıları

Yalıtım kalınlığı (m)	0.02	0.03	0.04
K <sub>sag</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	1.40	1.03	0.81
K <sub>sol</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	1.40	1.03	0.82
K <sub>üst</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	1.24	0.94	0.76
K <sub>alt</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	1.51	1.09	0.85
K <sub>arka</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	1.40	1.03	0.82

Duvar ve köşelerden olan ısı kayıplarının yalıtım kalınlığına göre değişimi Tablo 4.6'da görülmektedir.

**Tablo 4.6:** Farklı yalıtım kalınlıkları için fırın duvarlarından olan ısı kayıpları

Yalıtım kalınlığı (m)	0.02	0.03	0.04
Qduvar_sag (W)	32.74	24.11	19.12
Qduvar_sol (W)	33.20	24.45	19.38
Qduvar_ust (W)	36.66	27.72	22.34
Qduvar_ait (W)	43.07	31.12	24.41
Qduvar_arka (W)	33.67	24.79	19.65
Qköşe_sagüst (W)	47.25	35.23	28.15
Qköşe_sagalt (W)	51.10	37.27	29.39
Qköşe_solüst (W)	47.61	35.49	28.35
Qköşe_solalt (W)	51.45	37.53	29.60
<b>Qtoplam (W)</b>	<b>376,75</b>	<b>277,70</b>	<b>220,39</b>

Yalıtım için kullanılan cam yününün kalınlığı 0.02 m'den 0.03 m'ye arttırıldığında, fırın duvarlarından olan ısı kayıpları % 26 azalmaktadır. Yalıtım kalınlığı 0.02 m'den 0.04 m'ye arttırıldığında ise ısı kayıplardaki azalma % 42 olmaktadır.

## 4.2 Ön kapakta cam sayısının arttırılmasının ısı kayıplarına etkisi

Fırın kapağında olan ısı kayıpları,

- Fırının zorlanmış dolaşım ile ısıtma fonksiyonunda çalıştığı,
- Fırın içi ayar sıcaklığı ile ortam arasındaki sıcaklık farkının  $\Delta T = 155$  K olduğu durumda, sistem denge konumuna geldikten sonraki durum için hesaplanmıştır.

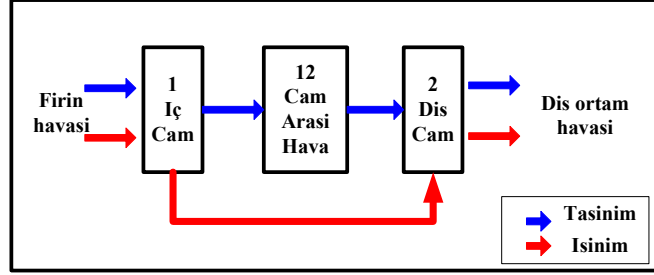
İki camlı ve üç camlı kapak için kapak kontrol hacimlerine ayrılmış ve kontrol hacimlerinin ısı dengeleri yazılmıştır.

Kontrol hacimlerinde belirtilen sıcaklıklar, fırın sabit sıcaklık deneylerinde ilgili yerler için termoelemanlar ile sıcaklık ölçümü yapılarak belirlenmiştir. Fırın zorlanmış dolaşım ile ısıtma fonksiyonunda,  $\Delta T = 155$  K olacak termostat ayar sıcaklığında çalıştırılarak sistemin denge konumuna gelmesi gözlenmiştir. Denge konumunda kullanılan J tipi termoelemanlar ile ölçülen sıcaklık değerleri kaydedilmiştir.

Cam sıcaklıkları,camın içi ve dışında yapılan ölçümlerde yüksek bir farklılık göstermediği için lumped olarak kabul edilmiştir. Buna göre cam kalınlığı boyunca sıcaklık değişimi olmadığı kabul edilmektedir.

#### 4.2.1 Çift camlı ön kapak için ısı taşınım katsayılarının hesaplanması

Çift camlı ön kapak için ısı akışı Şekil 4.10’de verilmektedir.

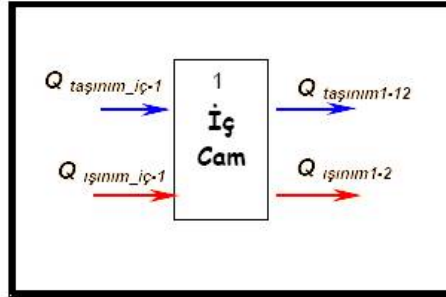


Şekil 4.10: Çift camlı ön kapakta ısı akışı şeması

Kontrol hacimlerinde ısı akışı dengesi yazılarak ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır.

##### 4.2.1.1 Çift camlı kapakta kontrol hacmi 1

İç cam için kontrol hacmi Şekil 4.11’de verilmektedir.



Şekil 4.11: Çift camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 1

Kontrol hacmi 1 için ısı akışı dengesi aşağıda verilmektedir.

$$Q_{taşınım\ iç-1} + Q_{ısınım\ iç-1} = Q_{taşınım1-12} + Q_{ısınım1-2} \quad (4.45)$$

##### $h_{iç}$ taşınım katsayısının hesaplanması

Fırın zorlanmış hava dolaşımı ile ısıtma fonksiyonunda çalışmaktadır. Fırın ön kapağının iç cam yüzeyine fırın arka duvarındaki fan yardımıyla hava yönlendirme

sacı üzerinde yer alan kanallardan hava akışı olmaktadır. Kanalların çıkışındaki hava hızları ~5 m/sn dir [27,28].

Fırın içinden ön kapak iç yüzeyine olan taşınım ısı geçişi için hüzme şeklinde üfleme durumu için kullanılan bağıntılardan faydalanılmıştır [29]. Bağıntılarda  $W$  kanal genişliğini,  $S$  kanalların merkezleri arasındaki mesafeyi,  $H$  kanal ile iç cam yüzeyi arasındaki uzaklığı,  $D_h$  hidrolik çapı ifade etmektedir. Reynolds sayısı üfleme havasının hızına ve üfleme kanalının hidrolik çapına göre hesaplanmaktadır.

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0.42}} = \frac{2}{3} A_{r,o}^{3/4} \left( \frac{2Re}{A_r / A_{r,o} + A_{r,o} / A_r} \right)^{2/3} \quad (4.46)$$

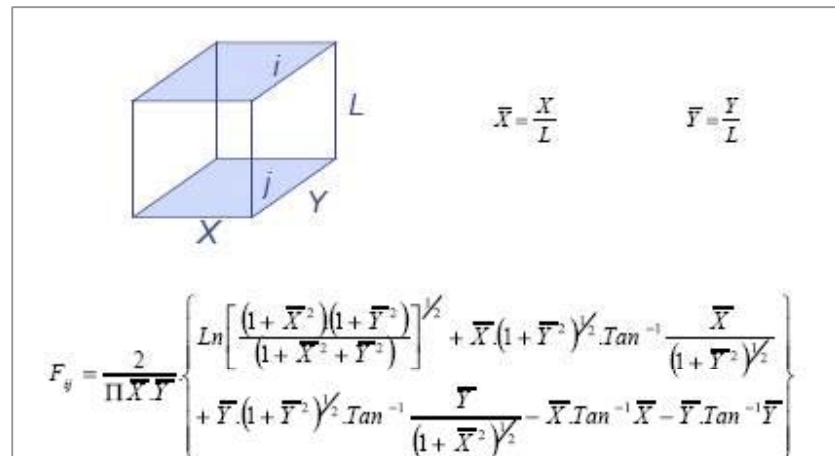
$$A_{r,o} = \left[ 60 + 4 \left( \frac{H}{2W} - 2 \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (4.47)$$

$$A_r = W / S \quad (4.48)$$

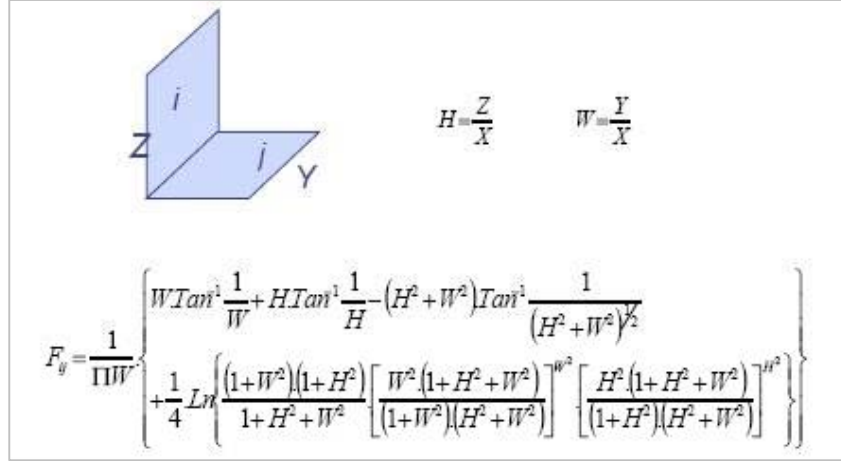
$$h_{iç} = \frac{\overline{Nu}_D \cdot k}{D_h} \quad (4.49)$$

$$q_{ta\ sim\ _iç\_1} = h_{iç} \cdot (T_{iç} - T_1) \quad (4.50)$$

İç cam ile fırın içi ortam arasındaki ışınlım bağıntısı için, fırın duvar sıcaklıklarının eşit olduğu kabulü yapılmıştır. İç cam ile fırın duvar yüzeyleri arasındaki ışınlımla ısı geçiş miktarlarının hesaplanabilmesi amacıyla öncelikle yüzeylerin birbirleri ile olan görüş faktörleri belirlenmiştir. Sac yüzeyler incelendiğinde görüş faktörleri açısından iki temel durum vardır. Bunlar Şekil 4.12’de verilen birbirine paralel levhalar hali ve Şekil 4.13’de verilen birbirine dik levhalar halidir [30].



Şekil 4.12: Paralel levhalar hali için görüş faktörü hesabı



**Şekil 4.13:** Dik levhalar hali için görüş faktörü hesabı

Arka duvar için  $F_{il}$  görüş faktörü paralel levhalar haline göre hesaplanmıştır. Alt, üst ve yan duvarlar için  $F_{il}$  görüş faktörleri dik levhalar haline göre hesaplanmıştır. Alt ve üst duvar için görüş faktörleri birbirine eşittir. Sağ ve sol yan duvarlar için görüş faktörleri birbirine eşittir.

Fırın duvarı ile ön kapak iç cam yüzeyi arasındaki ışınlama ısı geçişi için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$q_{il} = \frac{\sigma \cdot (T_{du\ var}^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_d}{\varepsilon_d A_i} + \frac{1}{A_i F_{il}} + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} \quad (4.51)$$

Bu durumda, ön kapak iç cam yüzeyi ile tüm duvarlar arasındaki ışınlama ısı geçişi aşağıda verildiği şekilde hesaplanabilir;

$$q_{i\ sin\ im\ _iç\ _1} = \sum_{i=1}^N q_{il} = \sigma (T_{du\ var}^4 - T_1^4) \sum_{i=1}^N \frac{1}{\frac{1 - \varepsilon_d}{\varepsilon_d A_i} + \frac{1}{A_i F_{il}} + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} \quad (4.52)$$

Bu denkleme göre ışınlama katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$h_{i\ sin\ im\ _iç\ _1} = \sigma \cdot (T_{du\ var}^4 + T_1^4) \cdot (T_{du\ var} + T_1) \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{\frac{1 - \varepsilon_d}{\varepsilon_d A_i} + \frac{1}{A_i F_{il}} + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} \quad (4.53)$$

İç cam için  $\varepsilon_1=0,23$  ve fırın duvarları için  $\varepsilon_d=0,98$  alınmıştır.

İki cam arasında zorlanmış taşınımın hava geçişi olmaktadır. Dairesel kesitli olmayan borular için iç akış bağıntıları kullanılmıştır [31].

Hidrolik çap  $A_c$  akış kesidi ve  $P$  ıslak çevre olmak üzere aşağıdaki bağıntı ile tanımlanabilir;

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (4.54)$$

Akış kesidini oluşturan kenarların birbirlerine oranına göre (b/a), sabit yüzey sıcaklığı durumuna göre Nusselt sayısı belirlenmiştir.

$$Nu = 7.54 \quad (4.55)$$

$$h_{ta \sin im\_ara} = \frac{Nu.k}{D_h} \quad (4.56)$$

Camlar arası ışıınım için paralel levha formülü kullanılmıştır.

$$q_{i \sin im\_1\_2} = \frac{\sigma.(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{dis}} - 1} \quad (4.57)$$

$$h_{i \sin im\_1\_2} = (T_1^2 + T_2^2).(T_1 + T_2).\sigma.\left(\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{dis}} - 1}\right) \quad (4.58)$$

İç cam sıcaklığının hesaplanması için ısı akısı dengesine göre aşağıdaki bağıntı kullanılabilir;

$$T_1 = \frac{h_{ta \sin im\_iç} T_{iç} + h_{ta \sin im\_ara} T_{12} + q_{i \sin i\_iç-1} - q_{i \sin im\_1\_2}}{(h_{ta \sin im\_ara} + h_{ta \sin im\_iç})} \quad (4.59)$$

#### 4.2.1.2 Çift camlı kapakta kontrol hacmi 2

Camlar arası hava hacminde iç cam ile camlar arası hava ve dış cam ile camlar arası hava arasında taşınım yoluyla ısı geçişi olmaktadır. Ara hava sıcaklığı ısı akısı dengesinden yazılabilir.

$$Q_{ta \sin im1\_12} = Q_{ta \sin im12-2} \quad (4.60)$$

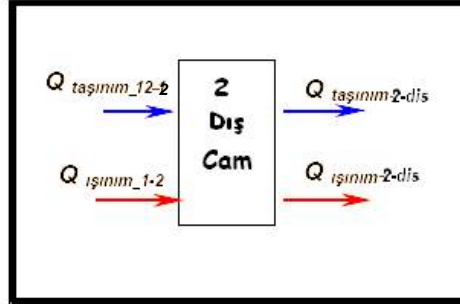
$$q_{ta \sin im\_1\_12} = h_{12}.(T_1 - T_{12}) \quad (4.61)$$

$$q_{ta \sin im\_12\_2} = h_{12}.(T_{12} - T_2) \quad (4.62)$$

$$T_{12} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (4.63)$$

### 4.2.1.3 Çift camlı kapakta kontrol hacmi 3

Dış cam için kontrol hacmi Şekil 4.14'de verilmektedir.



Şekil 4.14: Çift camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 3

Dış cam ile ortam havası arasında yatay yüzeyden doğal taşınım durumuna göre ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır [24].

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\alpha \cdot \nu} \quad (4.64)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 \cdot Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (4.65)$$

$$h_{dis} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (4.66)$$

Dış cam ile ortam arasındaki ışıınım bağıntısı aşağıda verilmektedir.

$$q_{i\ sin\ im\ _2\ _dis} = \varepsilon_{dis} \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_{dis}^4) \quad (4.67)$$

Bu denkleme göre ışıınım katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Dış cam için  $\varepsilon_{dis}=0,9$  alınmıştır.

$$h_{i\ sin\ im\ _2\ _dis} = \varepsilon_{dis} \cdot \sigma \cdot (T_2^2 + T_{dis}^2) \cdot (T_2 + T_{dis}) \quad (4.68)$$

Dış cam sıcaklığının hesaplanması için ısı akısı dengesine göre aşağıdaki bağıntı kullanılabilir;

$$T_2 = \frac{h_{ta\ sin\ im\_ara} T_{12} + h_{ta\ sin\ im\_dis} T_{dis} + q_{i\ sin\ im\_12} - q_{i\ sin\ im\_2dis}}{(h_{ta\ sin\ im\_ara} + h_{ta\ sin\ im\_dis})} \quad (4.69)$$

#### 4.2.1.4 Çift camlı kapaktan olan ısı kaybının hesaplanması

Çift camlı kapak için kullanılan bağıntılar ile taşınım ve ışıınım katsayıları belirlendiğinde ön kapak için toplam ısı geçiş katsayısı ve ön kapaktan olan ısı kaybı aşağıda verildiği şekilde hesaplanabilir;

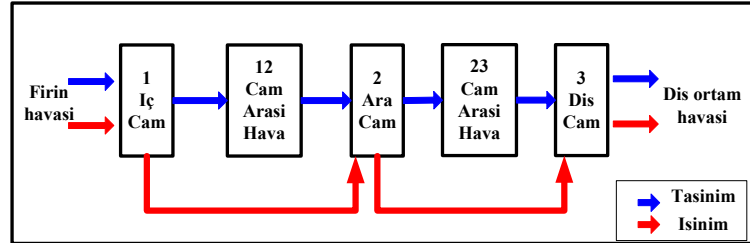
$$K = 1 / \left[ \frac{1}{h_{ta\ sin\ im\_iç} + h_{i\ sin\ im\_iç\_1}} + \frac{l}{k_{cam}} + \frac{1}{h_{ta\ sin\ im\_ara} + h_{i\ sin\ im\_12}} + \frac{l}{k_{cam}} + \frac{1}{h_{ta\ sin\ im\_dis} + h_{i\ sin\ im\_2dis}} \right] \quad (4.70)$$

Cam için  $k=1,4W/mK$  alınmıştır.

$$Q = K.A.(T_{iç} - T_{dis}) \quad (4.71)$$

#### 4.2.2 Üç camlı ön kapak için ısı taşınım katsayılarının hesaplanması

Üç camlı ön kapak için ısı akışı Şekil 4.15’de verilmektedir.

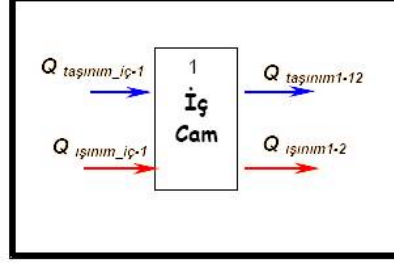


Şekil 4.15: Üç camlı ön kapakta ısı akışı şeması

Kontrol hacimlerinde ısı akışı dengesi yazılarak ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır.

#### 4.2.2.1 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 1

İç cam için kontrol hacmi Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4.16: Üç camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 1

Kontrol hacmi 1 için ısı akısı dengesi aşağıda verilmektedir.

$$Q_{taşınım\ i\ ç\ 1} + Q_{ısıtım\ i\ ç\ 1} = Q_{taşınım1-12} + Q_{ısıtım1-2} \quad (4.72)$$

$h_{iç}$  taşınım katsayısının hesaplanmasında, çift camlı kapakta iç taşınım katsayısının bulunması için kullanılan bağıntılar ile aynıdır. Nusselt sayısı için (4.46) numaralı bağıntı kullanılmıştır.

Fırın içi ortam ile iç cam arasındaki ısıtım için çift camlı kapakta verilen durum ile aynıdır. İç ortam ile ön kapak iç cam yüzeyi arasındaki ısıtım ile ısı geçişi için ısıtım katsayısı (4.53) numaralı bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

İç cam ve ara cam arası hava boşluğu tek tarafından ısıtılan dar boşluklarda doğal taşınım problemi. Rayleigh sayısının kritik değerden ( $Ra_{L,c}=1708$ ) büyük olduğu durumlar için camlar arası dar boşluklarda gerçekleşen doğal taşınım aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır [32]. Rayleigh sayısının kritik değerden küçük olduğu durumda ısı geçişi ısı iletimi ile sağlanmaktadır ve  $Nu_L=1$  olmaktadır.

$$Gr_{\delta} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2) \cdot \delta^3}{\gamma^2} \quad (4.73)$$

$$Nu_{\delta} = 0,42 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4} \cdot Pr^{0,012} \left(\frac{L}{\delta}\right)^{-0,3} \quad (4.74)$$

$$h_{taşınım\ ara1} = \frac{Nu_{\delta} \cdot k}{\delta} \quad (4.75)$$

İç cam ile ara cam arasındaki boşluk  $\delta=0,0065m$ 'dir.

Camlar arası ısıtım için paralel levha formülü kullanılmıştır. İkinci cam (ara cam) için  $\epsilon_2=0,9$  alınmıştır.

$$q_{i \sin im\_1\_2} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.76)$$

$$h_{i \sin im\_1\_2} = (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \cdot \sigma \cdot \left( \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \right) \quad (4.77)$$

İç cam sıcaklığının hesaplanması için ısı akısı dengesine göre aşağıdaki bağıntı kullanılabilir;

$$T_1 = \frac{h_{ta \sin im\_iç} T_{iç} + h_{ta \sin im\_ara1} T_{12} + q_{i \sin i\_iç-1} - q_{i \sin im\_1\_2}}{(h_{ta \sin im\_ara1} + h_{ta \sin im\_iç})} \quad (4.78)$$

#### 4.2.2.2 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 2

Camlar arası hava hacminde iç cam ile ara cam arası hava ve ara cam ile camlar arası hava arasında taşınım yoluyla ısı geçişi olmaktadır. Ara hava sıcaklığı ısı akısı dengesinden yazılabilir.

$$Q_{ta \sin im1\_12} = Q_{ta \sin im12-2} \quad (4.79)$$

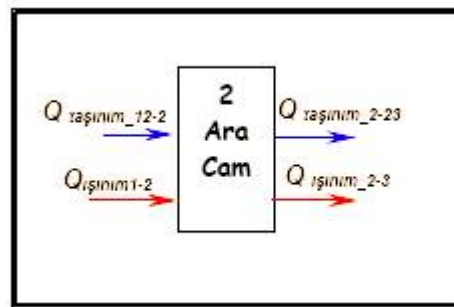
$$q_{ta \sin im\_1\_12} = h_{12} \cdot (T_1 - T_{12}) \quad (4.80)$$

$$q_{ta \sin im\_12\_2} = h_{12} \cdot (T_{12} - T_2) \quad (4.81)$$

$$T_{12} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (4.82)$$

#### 4.2.2.3 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 3

Ara cam için kontrol hacmi Şekil 4.17'de verilmektedir.



Şekil 4.17: Üç camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 3

İki cam arasında zorlanmış taşınımın hava geçişi olmaktadır. Dairesel kesitli olmayan borular için iç akış bağıntıları kullanılmıştır [31].

Hidrolik çap  $A_c$  akış kesidi ve  $P$  ıslak çevre olmak üzere aşağıdaki bağıntı ile tanımlanabilir;

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (4.83)$$

Akış kesidini oluşturan kenarların birbirlerine oranına göre (b/a), sabit yüzey sıcaklığı durumuna göre Nusselt sayısı belirlenmiştir.

$$Nu = 7.54 \quad (4.84)$$

$$h_{ta\ sin\ im\_ara2} = \frac{Nu.k}{D_h} \quad (4.85)$$

Camlar arası ışınım için paralel levha formülü kullanılmıştır. Ara cam için  $\epsilon_{dis}=0,9$ 'dur.

$$q_{i\ sin\ im\_2\_3} = \frac{\sigma.(T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1}{\epsilon_{dis}} - 1} \quad (4.86)$$

$$h_{i\ sin\ im\_2\_3} = (T_2^4 + T_3^4).(T_2 + T_3).\sigma.\left(\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1}{\epsilon_{dis}} - 1}\right) \quad (4.87)$$

Ara cam sıcaklığının hesaplanması için ısı akısı dengesine göre aşağıdaki bağıntı kullanılabilir;

$$T_2 = \frac{h_{ta\ sin\ im\_ara1}T_{12} + h_{ta\ sin\ im\_ara2}T_3 + q_{i\ sin\ im\_12} - q_{i\ sin\ im\_23}}{(h_{ta\ sin\ im\_ara1} + h_{ta\ sin\ im\_ara2})} \quad (4.88)$$

#### 4.2.2.4 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 4

Camlar arası hava hacminde ara cam ile camlar arası hava ve dış cam ile camlar arası hava arasında taşınım yoluyla ısı geçişi olmaktadır. Ara hava sıcaklığı enerji dengesinden yazılabilir.

$$Q_{ta\ sin\ im2\_23} = Q_{ta\ sin\ im23-3} \quad (4.89)$$

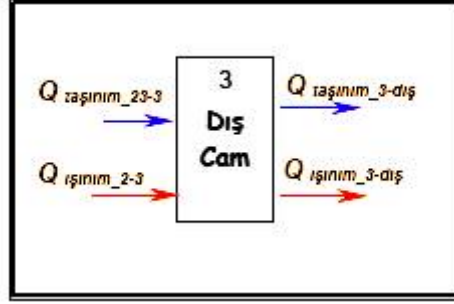
$$q_{ta\ sin\ im\_2\_23} = h_{23}.(T_2 - T_{23}) \quad (4.90)$$

$$q_{ta\sin im\_23\_3} = h_{23} \cdot (T_{23} - T_3) \quad (4.91)$$

$$T_{23} = \frac{T_2 + T_3}{2} \quad (4.92)$$

#### 4.2.2.5 Üç camlı kapakta kontrol hacmi 5

Dış cam için kontrol hacmi Şekil 4.18’de verilmektedir.



Şekil 4.18: Üç camlı kapakta iç cam kontrol hacmi 5

Dış cam ile ortam havası arasında yatay yüzeyden doğal taşınım durumuna göre ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\alpha \cdot \gamma} \quad (4.93)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 \cdot Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (4.94)$$

$$h_{dis} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (4.95)$$

Dış cam ile ortam arasındaki ışıınım bağıntısı aşağıda verilmektedir.

$$q_{i\sin im\_3\_dis} = \varepsilon_{dis} \cdot \sigma \cdot (T_3^4 - T_{dis}^4) \quad (4.96)$$

Bu denkleme göre ışıınım katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Dış cam için  $\varepsilon_{dis}=0,9$  alınmıştır.

$$h_{i\sin im\_3\_disortam} = \varepsilon_{dis} \cdot \sigma \cdot (T_3^2 + T_{dis}^2) \cdot (T_3 + T_{dis}) \quad (4.97)$$

Dış cam sıcaklığının hesaplanması için ısı akısı dengesine göre aşağıdaki bağıntı kullanılabilir;

$$T_3 = \frac{h_{ta\ sin\ im\_ara2} T_{23} + h_{ta\ sin\ im\_dis} T_{dis} + q_{i\ sin\ im\_23} - q_{i\ sin\ im\_3dis}}{(h_{ta\ sin\ im\_ara2} + h_{ta\ sin\ im\_dis})} \quad (4.98)$$

#### 4.2.2.6 Üç camlı kapaktan olan ısı kaybının hesaplanması

Üç camlı kapak için kullanılan bağıntılar ile taşınım ve ışıyım katsayıları belirlendiğinde ön kapak için toplam ısı geçiş katsayısı ve ön kapaktan olan ısı kaybı aşağıda verildiği şekilde hesaplanabilir;

$$K = 1 / \left[ \frac{1}{h_{ta\ sin\ im\_iç} + h_{i\ sin\ im\_iç\_1}} + \frac{l}{k_{cam}} + \frac{1}{h_{ta\ sin\ im\_ara1} + h_{i\ sin\ im\_12}} + \frac{l}{k_{cam}} \right. \\ \left. + \frac{1}{h_{ta\ sin\ im\_23} + h_{i\ sin\ im\_23}} + \frac{l}{k_{cam}} + \frac{1}{h_{ta\ sin\ im\_dis} + h_{i\ sin\ im\_3dis}} \right] \quad (4.99)$$

Cam için  $k=1,4W/mK$  alınmıştır.

$$Q = K.A.(T_{iç} - T_{dis}) \quad (4.100)$$

#### 4.2.3 Ön kapak için matematiksel model sonuçları

Ön kapakta her bir kontrol hacmi için ısı akısı dengesi yazılarak cam yüzey sıcaklıklarını, ısı taşınım katsayılarını ve ışıyım katsayılarını veren bağıntılar çıkartılmıştır. Isı taşınım ve ışıyım katsayılarının, yüzey sıcaklıklarının elde edilmesi sonucunda, ön kapak için toplam ısı geçiş katsayısı belirlenebilmekte ve ön kapaktan olan ısı kayıpları hesaplanabilmektedir. Microsoft Excel programında oluşturulan matematiksel model yardımıyla, fırın içi ve ortam için ölçülen sıcaklık değerlerinin, malzeme özelliklerinin ve karakteristik boyutların girilmesi sonucunda ısı kayıpları hesaplanabilmektedir. Hazırlanan program fırın içi ve dış ortam sıcaklıklarına göre ön kapak cam yüzeylerinin ve camlar arasındaki havanın sıcaklıkları için ilk tahmin değerlerini ve bu sıcaklık değerlerine karşılık gelen ısıl özellikleri ( $k,v,Pr..$ ) hesaplamaktadır. Hesaplanan ısıl özellikleri kullanarak, ısı taşınım ve ışıyım katsayılarını ve ısı akısı dengesinden çıkartılan bağıntıları kullanarak camların yüzey sıcaklıklarını hesaplamaktadır. Hesaplanan cam yüzey sıcaklıkları ile tahmin sıcaklıklarını karşılaştırmakta ve sıcaklıklar dengeye oturana kadar iterasyon işlemine devam etmektedir.

Kullanıcının programa girmesi gereken değerler şunlardır;

- Ortam sıcaklığı
- Fırın içi sıcaklığı
- Fırın duvarlarının denge konumu için ölçülen iç yüzey sıcaklıkları
- Camların ve fırın duvarlarının boyutları
- Camlar arası mesafeler
- Fırın duvarları ve camlar için yayma katsayıları
- Cam kalınlıkları
- Camın ısı iletim katsayısı
- Hava üfleme kanallarının genişliği, aralarındaki mesafe, kapağa olan uzaklıkları
- Ön kapak yüzeyine gelen havanın üfleme hızı ve sıcaklığı

İstenen veriler girildiğinde programdan alınan çıktılar şunlardır;

- Ön kapak cam yüzeylerinin ve camlar arası havanın sıcaklıkları
- Taşınım ve ışınım katsayıları
- Kapak için toplam ısı geçiş katsayısı
- Ön kapaktan olan ısı kaybı

Veri girişinin yapıldığı ve sonuçların alındığı program ana sayfası Şekil 4.19'da görülmektedir.

Şekil 4.19: Ön kapak programının ana sayfası

Çift camlı kapak sıcaklıkları için program tarafından yapılan iterasyonları gösteren örnek sayfa Şekil 4.20'de görülmektedir.

1	A	B	C	F	H	J	K	L	M	N	D	P	Q	R	S	Y	Z	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
2	T1	T12	T2	Re iç	h iç	h dış	g iç	g dış	h iç1	h iç2	Nısıra	kara	hara	stara	g iç12	h iç12	ReL105	Na dış	k dış	hdış	gdış	g dış	h dış2g	Tthesap	Tthesap2
218	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	61,983	0,031	5,54	820,6	1591,4	10,75	447,0	358,2
219	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
220	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
221	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
222	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
223	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
224	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
225	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
226	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
227	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
228	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
229	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
230	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
231	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
232	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
233	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
234	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
235	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
236	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
237	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
238	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
239	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
240	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
241	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
242	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
243	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
244	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
245	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
246	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
247	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
248	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
249	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2
250	406,7	379,0	362,2	2774	5,80	12,09	547,9	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	1487,2	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	267,3	393,9	7,00	405,7	352,2

Şekil 4.20: Çift camlı ön kapağa ait iterasyonlar

Programın kullanımı ile hesaplanan ön kapak sıcaklıkları Tablo 4.7’de verilmektedir.

**Tablo 4.7:** Çift cam ve üç cam kullanımında ön kapak sıcaklıkları

	Tiç	T1	T12	T2	T23	T3	Tdış
Çift camlı Kapak	178	146	-	-	106	65	23
Üç camlı Kapak	178	152	119	86	71	56	23

Ön kapak için denge konumunda alınan iç ve dış cam sıcaklık ölçümleri ile modelden elde edilen sonuçlar Tablo 4.8’de karşılaştırılmaktadır;

**Tablo 4.8:** Cam sıcaklıkları için ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması

	Çift camlı kapak		Üç camlı kapak	
	Deney	Model	Deney	Model
İç cam sıcaklık (°C )	140	146	146	152
Dış cam sıcaklık (°C )	62	65	54	56

Ön kapak için model ile hesaplanan ısı taşınım, ışıınım ve toplam ısı geçiş katsayıları Tablo 4.9’da verilmektedir.

**Tablo 4.9:** Model ile hesaplanan taşınım, ışıınım ve toplam ısı geçiş katsayıları

	Çift camlı kapak	Üç camlı kapak
htaşınım_iç (W/m2K)	12.1	12.0
htaşınım_ara1 (W/m2K)	5.7	5.1
htaşınım_ara2 (W/m2K)	-	9.9
htaşınım_dış (W/m2K)	4.3	4.8
hışıınım_iç1 (W/m2K)	2.8	1.5
hışıınım_12 (W/m2K)	2.8	3.1
hışıınım_23 (W/m2K)	-	7.6
hışıınım_3dış (W/m2K)	6.5	6.3
K top. ısı geçiş katsayısı (W/m2K)	3.54	2.83

Modelin kullanılması sonucunda, ön kapaktan ısı kaybı çift camlı kapak için 86 W, üç camlı kapak için 69 W olarak hesaplanmıştır. Mevcut kapağa ara cam ilavesi ile çift camdan üç cama geçiş sonucunda kapaktan olan ısı kayıplarının % 20 azaltılması ve ön kapak sıcaklığının ~10 K düşürülmesi öngörülmektedir.

## 5. DENEYSSEL İNCELEME

Enerji tüketiminin azaltılması istenen fırının mevcut durumu incelendiğinde

- Yalıtım kalınlığının artırılması
- Ön kapak cam sayısının artırılması
- İnfiltrasyon kayıplarının azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılabileceği görülmüştür.

Matematiksel model yardımı ile yapılan hesaplar, yalıtım kalınlığı ve ön kapak yapısının değiştirilmesinin ısı kayıplarını azaltıcı yönde etkili olacağını desteklemektedir.

Fırının enerji tüketimine olumlu etkisi olacağı düşünülen faktörlerin etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarda faktörlerin birbirleri ile etkileşimlerinin de görülebilmesini sağlamak ve elde edilecek bilgi kalitesini yükseltmek amacıyla 2k faktöryel deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Enerji tüketimini azaltacak uygun faktör seviyelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Deneyler tuğla enerji tüketim testine göre yapılmıştır.

Karşılaştırmalı deneyler fırının turbo çalışma fonksiyonunda ve  $\Delta T=155$  K sağlayan fırın ayar sıcaklığında yapılmıştır. Doğrulama testleri EN 50304 standardında verilen 3 sıcaklık konumu için uygulanarak, standarda uygun şekilde değerlendirilmiştir.

Deneylerin uygulanmasından önce ölçüm sistemi yeterliliği kontrol edilmiştir.

### 5.1 Turbo 155K tuğla enerji tüketim testleri için ölçüm sistemi yeterlilik analizi

İlgili standarda göre tuğla enerji tüketim testleri 3 farklı ayar sıcaklığında yapılmakta ve fırına ait enerji tüketimi 3 testten elde edilen sonuçlara göre belirlenmektedir. Bu durum ölçüm sistemini iyileştirici yönde etkilemektedir.

Deney süresini ve maliyetini azaltmak amacıyla 2k faktöryel deney tasarımına uygun karşılaştırmalı deneylerin tek ayar sıcaklığında değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu durum tek deney ile fırının enerji tüketim değerini doğru belirleme koşulunu getirmektedir. Bu nedenle ölçüm sistemi yeterlilik analizi yapılarak, ölçüm sistemine bağlı değişkenliğin büyüklüğü ve yeterliliği kontrol edilmiştir.

Ölçüm sistemi yeterlilik analizi çalışması, ölçüm sistemine ait değişkenliğin ölçüm sonuçlarını yanıltıcı yönde etkilemesini engellemek amacıyla uygulanmaktadır [23].

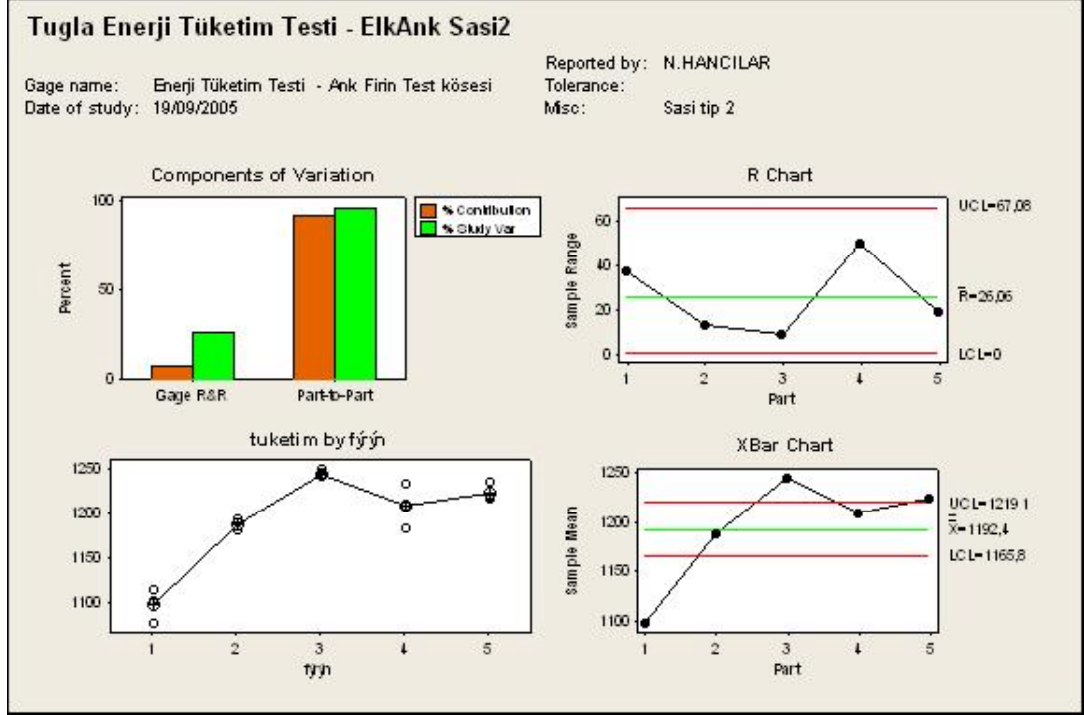
Yöntemin uygulamasında enerji tüketimi ölçülecek fırınların mevcut ölçüm sistemi ile tekrarlı ölçümleri alınmış, tekrarlı ölçümlerde görülen değişkenliğin büyüklüğü %R&R indeksi ile değerlendirilmiştir.

$$\%R \& R = \frac{S_{ölçümsistemi}}{S_{toplam}}$$

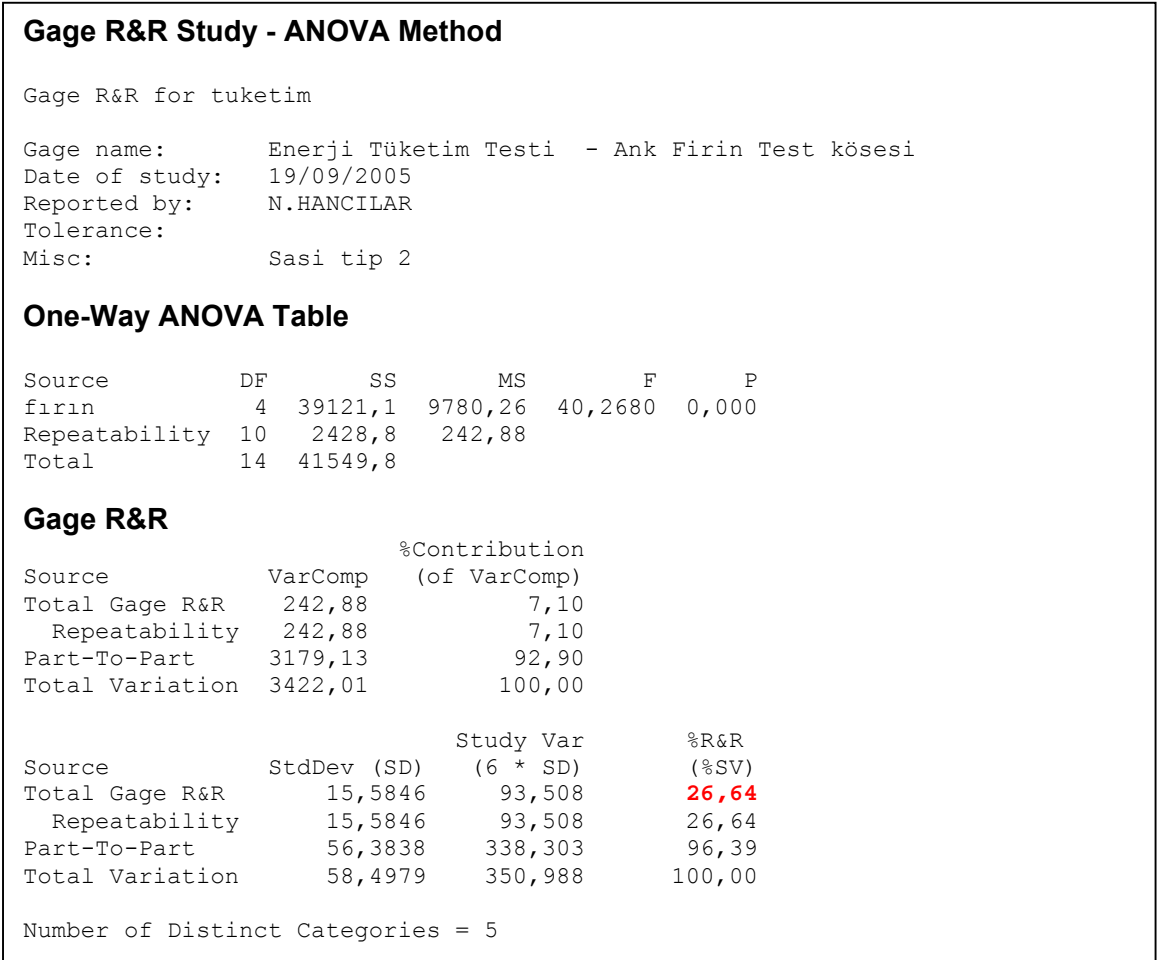
Ölçüm sistemi yeterlilik analizi, tekrarlı ölçümler ile oluşan değişkenliğin toplam değişkenliğe oranını hesaplar ve bu oranın ölçüm sistemi ile doğru karar verilebilmesi için yeterli olup olmadığını gösterir. Ölçüm sisteminin yeterli olması için %R&R değerinin kabul edilebilir sınırdan (%30) küçük olması gerekmektedir. %R&R değerinin küçük olması, ölçümler neticesinde görülen farkların, ölçüm sistemindeki değişkenlik kaynaklarından değil, ölçülen örneklerin arasındaki farklardan kaynaklandığını gösterir.

5 adet BE61FSX model fırın ölçüm sistemi yeterlilik çalışması için örnek olarak seçilmiştir. Örnekleme yapılırken fırınların farklı üretim koşullarını temsil etmesi hedeflenerek seçimin tesadüfi yapılmasına dikkat edilmiştir. Seçilen fırınların tuğla enerji testinde 155 K ayar sıcaklığında ve turbo konumda enerji tüketim değerleri dört kez ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan tuğla ağırlıklarının enerji tüketim sonuçlarında değişkenliği arttırmaması amacıyla, yaş kütleleri birbirine yakın olan ve 1970 gr değerinin üzerinde olmayan tuğlalar kullanılmıştır.

Sonuçlar analiz edildiğinde %R&R değerinin %30 dan küçük olduğu, ölçüm sisteminin enerji tüketimi ölçümlerinin güvenilir olduğu görülmüştür. Şekil 5.1’de ve Şekil 5.2’de analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.1: Ölçüm sistemi yeterlilik analizi Minitab grafik çıktısı



Şekil 5.2: Ölçüm sistemi yeterlilik analizi Minitab analiz çıktısı

Analiz sonuçlarına göre, yapılacak karşılaştırmalı deneylerin tek sıcaklık değerinde uygulanabileceği kararı verilmiştir.

## 5.2 “2k faktöryel deney tasarımı” ile denenen faktörlerin enerji tüketimine etkilerinin belirlenmesi

Belirlenen 3 faktör için  $2^3=8$  deneyden oluşan 2k faktöryel deney tanımlanmıştır.

2k faktöryel deneyler, her faktör için -1(düşük) ve +1(yüksek) seviyenin denendiği ve faktörler ile olabilecek tüm eşlemeleri içerecek desende oluşturulan özel bir deney tasarımı uygulamasıdır. Tablo 5.1’de 3 faktör için oluşturulan eşleşmeler görülmektedir.

**Tablo 5.1:** 3 faktörlü 2k tam faktöryel deney tasarımı

A	B	C
-1	-1	-1
1	-1	-1
-1	1	-1
1	1	-1
-1	-1	1
1	-1	1
-1	1	1
1	1	1

Bu şekilde hazırlanan deney tasarımı Tablo5.2’de verilen etkileşimlerin (AB,AC,BC,ABC) oluşturacağı etkilerin de görülebilmesini sağlar.

**Tablo 5.2:** Ana etkiler ve etkileşimler için seviyeler

A	B	C	AB	AC	BC	ABC
-1	-1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1
1	1	-1	1	-1	-1	-1
-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1

Bir ana etki veya etkileşim için etki, düşük seviye deneylerinden (-1) ve yüksek seviye deneylerinden (+1) elde edilen sonuçların ortalamalarının farkı alınarak hesaplanır.

Deney tasarımı için seçilen faktörler ve seviyeleri şöyledir;

- Yalıtım kalınlığı: (-1)20mm, (+1)40mm
- Ön kapak tipi: (-1)Çift camlı, (+1)Üç camlı
- İnfiltrasyon yöntemi: (-1)Bacasız-u conta, (+1)Bacalı-o conta

Karşılaştırmalı 8 test için tuğla testi sadece 155K için yapılmıştır. Tek sıcaklıkta yapılan ölçüm sistemi yeterliliği buna izin vermiştir. Böylelikle üç sıcaklık ayarı için  $8 \times 3 = 24$  deney yerine tek sıcaklık ayarında 8 deney yapılmıştır.

Mevcut deney sayısı ile ne kadarlık bir enerji tüketimi farkının anlamlı olarak yakalanabileceğini belirlemek amacıyla güç ve örnek büyüklüğü hesabı yapılmıştır. Güç ve örnek büyüklüğü analizinin sonucu Şekil 5.3’de verilmektedir. 8 adet tek tekrarlı deney ile ~55 W ve üzerindeki farkların yakalanabileceği görülmüştür.

Power and Sample Size				
2-Level Factorial Design				
Alpha = 0,05 Assumed standard deviation = 20				
Factors: 3 Base Design: 3; 8				
Blocks: none				
Number of terms omitted from model: 3				
Center		Total		
Points	Reps	Runs	Power	Effect
0	1	8	0,9	62,1669
0	1	8	0,8	53,1894

Şekil 5.3: Güç ve örnek büyüklüğü analizi Minitab analiz çıktısı

Uygulanan deney tasarımı ve sonuçları Tablo 5.3’de verilmektedir.

Tablo 5.3: Uygulanan deneyler ve elde edilen enerji tüketim değerleri

C5	C6-T	C7-T	C8-T	C9	C10
izolasyon	Camsayi	Baca	Baca_conta	Tüketim(Wh)	FITS1
20	2	var	Baca emişte - o conta	1056	1041,75
40	2	var	Baca emişte - o conta	821	817,75
20	3	var	Baca emişte - o conta	980	994,25
40	3	var	Baca emişte - o conta	767	770,25
20	2	yok	Baca yok - u conta	1154	1172,75
40	2	yok	Baca yok - u conta	885	883,75
20	3	yok	Baca yok - u conta	1144	1125,25
40	3	yok	Baca yok - u conta	835	836,25

Elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Analiz sonucu Şekil 5.4'de Minitab çıktısı olarak görülmektedir.

<b>Factorial Fit: Tüketim(Wh) versus fırın içi(K); yaş ağırlık; ...</b>					
Estimated Effects and Coefficients for Tüketim(W) (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		-3348	2150,72	-1,56	0,363
fırın içi(K)		3	4,20	0,83	0,560
yaş kütle		2	1,12	1,72	0,336
yalıtım	-249	-124	5,77	-21,53	0,030
Camsayı	-18	-9	8,71	-1,02	0,493
Baca	123	62	7,80	7,91	0,080
yalıtım*Baca	-30	-15	5,82	-2,59	0,235

S = 14,4130    R-Sq = 99,87%    R-Sq(adj) = 99,08%

**Şekil 5.4:** 2k faktöryel deney analiz çıktısı

Tuğla yaş kütleli deney analizine gürültü (kovaryans) olarak koyulmuş ve etkisiz olduğu görülmüştür.

P-değerlerine göre p-değeri kabul edilen riskin (% 10) üzerinde olan terimler modelden adım adım çıkarıldığında Şekil 5.5'de verilen indirgenmiş model elde edilmiştir.

<b>Factorial Fit: Tüketim (Wh) versus izolasyon; Camsayı; Baca</b>					
Estimated Effects and Coefficients for Tüketim(Wh) (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		955,3	6,872	139,00	0,000
izolasyon	-256,5	-128,2	6,872	-18,66	0,000
Camsayı	-47,5	-23,7	6,872	-3,46	0,041
Baca	98,5	49,3	6,872	7,17	0,006
izolasyon*Baca	-32,5	-16,3	6,872	-2,36	0,099

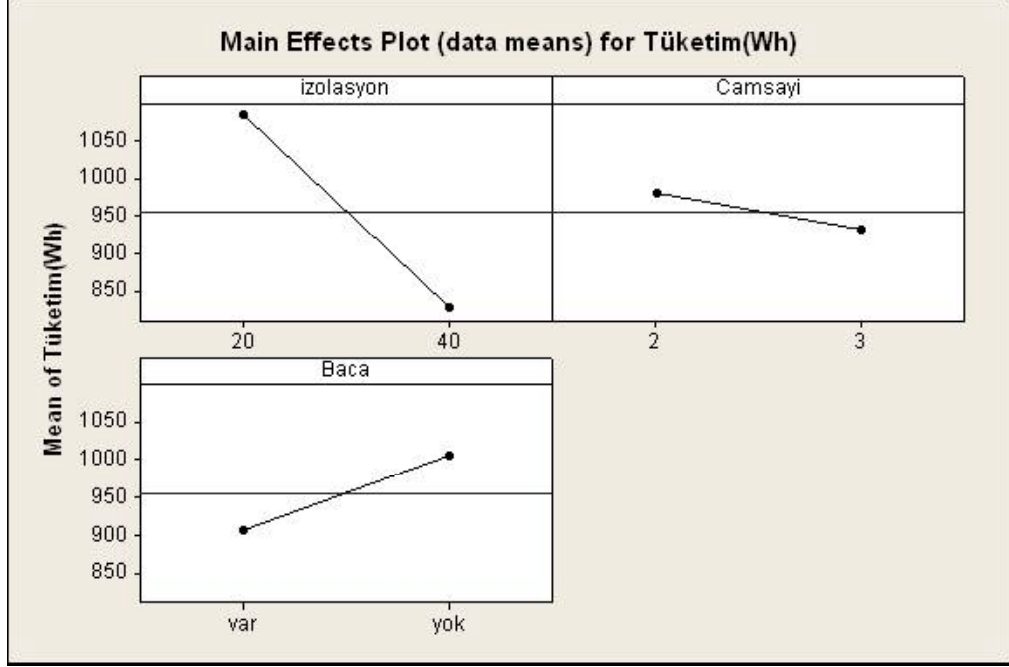
S = 19,4379    R-Sq = 99,29%    R-Sq(adj) = 98,33%

Analysis of Variance for Tüketim(Wh) (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	155501	155501	51833,8	137,19	0,001
2-Way Interactions	1	2113	2113	2112,5	5,59	0,099
Residual Error	3	1134	1134	377,8		
Total	7	158747				

Estimated Coefficients for Tüketim(Wh) using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	1340,00
izolasyon	-12,8250
Camsayı	-23,7500
Baca	98,0000
izolasyon*Baca	-1,62500

**Şekil 5.5:** 2k faktöryel deney analizi indirgenmiş modeli

Şekil 5.6’da verilen ana etkiler grafiğinde, faktörlerin düşük ve yüksek seviyeleri için enerji tüketimindeki farklar (etki) görülebilmektedir. Grafikler üzerindeki noktalar, her faktörün düşük ve yüksek seviyelerinin denendiği deneylerde elde edilen enerji tüketimlerinin ortalama değerlerini göstermektedir.



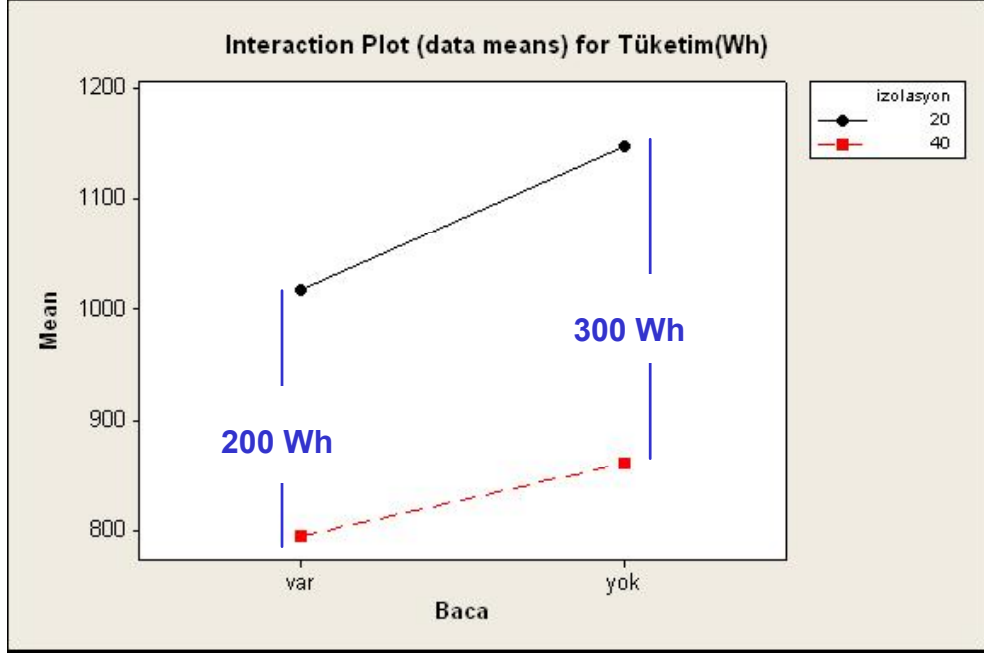
Şekil 5.6: Ana etkiler grafiği

Yalıtım kalınlığının etkisi: 20mm yerine 40mm kullanırsak yalıtım kullanılması durumunda enerji tüketim değerinde 250 Wh’lik azalma (% 24 iyileşme) beklenmektedir.

Cam sayısının etkisi: Çift camlı ön kapak yerine 3 camlı ön kapak kullanılması durumunda enerji tüketiminde 50 Wh’lik azalma (% 5 iyileşme) beklenmektedir.

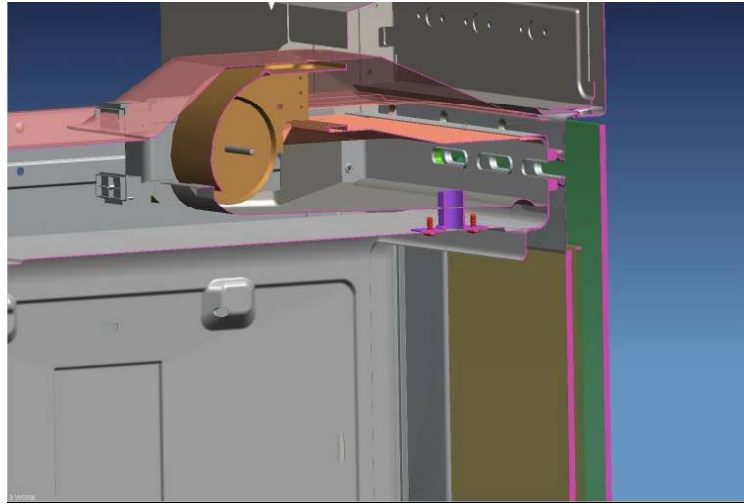
“O” tipi conta kullanılan bacalı fırınların enerji tüketiminin, “U” tipi conta kullanılan bacasız fırınların enerji tüketimine göre 100 Wh düşük olması (% 10 iyileşme) beklenmektedir.

Deney sonuçları yalıtım kalınlığının etkisinin baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 5.7’deki etkileşim grafiği incelendiğinde yalıtım kalınlığının etkisinin baca olmadığı durumda arttığı görülebilir.



**Şekil 5.7:** Baca ve yalıtım için etkileşim grafiği

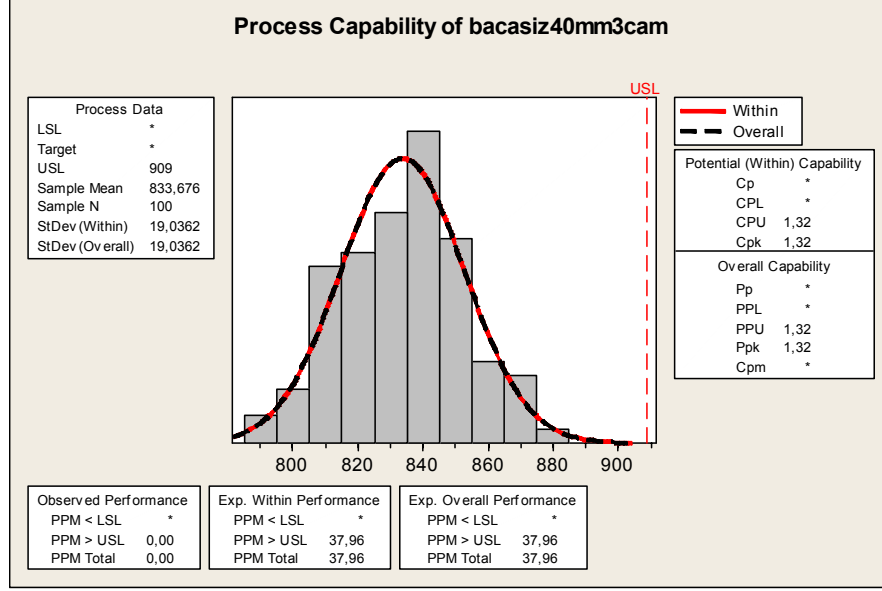
Deneysel sonuçlarda en iyi sonucun 40 mm yalıtım kalınlığı ve 3 camlı ön kapağı olan, Şekil 5.8’de gösterildiği gibi emiş kanalına açılan baca ilave edilmiş fırınlara ait olduğu görülmüştür. Ancak bu çözüm baca ilavesi için fırın bölmesinde kalıp yatırımı gerektiren ve malzeme çeşitliliğine sebep olacak bir çözümdür.



**Şekil 5.8:** Emiş kanalına açılan baca

İkinci iyi sonuç 40 mm yalıtım kalınlığı ve 3 camlı ön kapağı olan ve bacasız (infiltrasyon kapak ve fırın bölmesindeki aralıklardan gerçekleşmekte) fırındır. Deneysel sonuçları bu özellikteki fırınlar için ortalama enerji tüketiminin 835 Wh ve standart sapmasının 19 Wh olmasını öngörmektedir. Bu değerler A enerji sınıfı toleranslarını karşılamaktadır. Deneysel öngörülen ortalama ve standart sapmaya

sahip dağılım için EN 50304 standardında verilen A enerji sınıfı toleransına göre süreç yeterlilik analizi yapıldığında,  $c_{pk}$  değerinin 1,32 olarak gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 5.9'da verilen analizde görüldüğü üzere, ikinci iyi çözüm uygulandığında, üretilen fırınlarda A enerji sınıfı kriterlerini karşılamama oranı 38 ppm olacaktır.



**Şekil 5.9:** Deney sonucuna göre ikinci iyi çözüm için süreç yeterlilik analizi

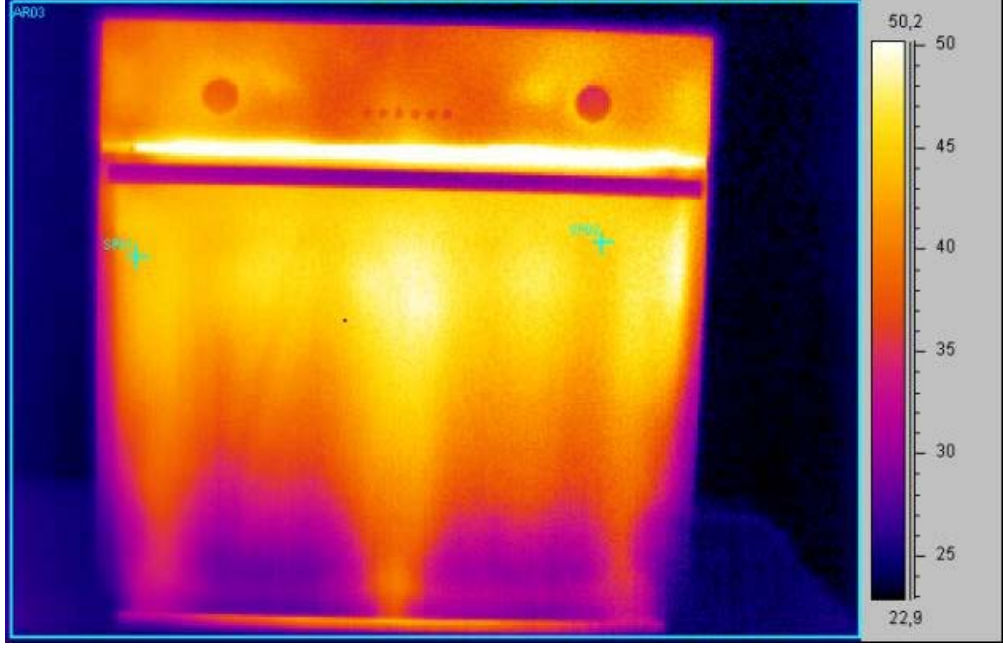
Bu sonucu doğrulamak amacıyla 2 adet doğrulama deneyi yapılmıştır.

40 mm yalıtım kalınlığı ve 3 camlı ön kapağı olan, bacasız 2 adet fırın üretilmiştir. EN 50304 standardına uygun olarak tuğla enerji tüketim testi uygulanan fırınların enerji tüketimleri 807 Wh ve 815 Wh olarak ölçülmüştür. Bu değerler Şekil 4.29'da verilen dağılıma uygundur ve deneyin öngördüğü sonuçların güvenilirliğini desteklemektedir. Doğrulama deneylerinde ölçülen enerji tüketimleri A enerji sınıfı için verilen limitin altındadır.

### 5.3 Termal kamera ile yapılan ölçümler

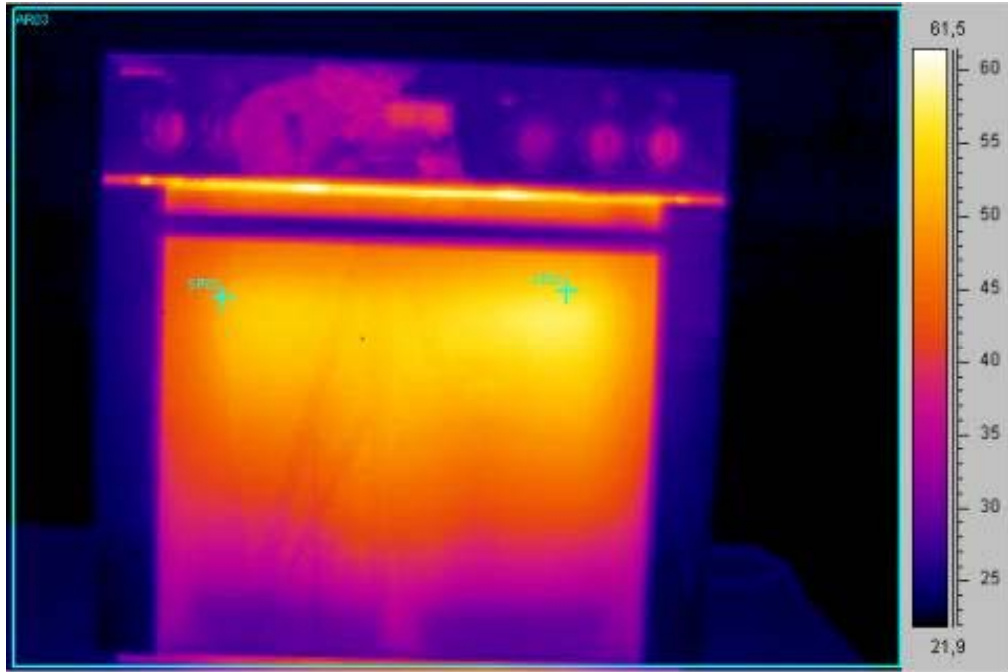
A sınıfı enerji tüketim seviyesini gerçekleyen üç camlı ön kapağı olan, 40mm yalıtım kalınlığına sahip, bacasız fırın ile C sınıfı enerji seviyesini sağlayan iki camlı ön kapağı olan, 20mm yalıtım kalınlığına sahip, bacasız fırında 1 saatlik çalıştırma sonucunda yapılan termal kamera ölçümleri kapak ve yalıtım üzerindeki sıcaklık farklarını göstermektedir.

A enerji sınıfını sağlayan fırın için ön kapak sıcaklıkları Şekil 5.10'da görölmektedir.



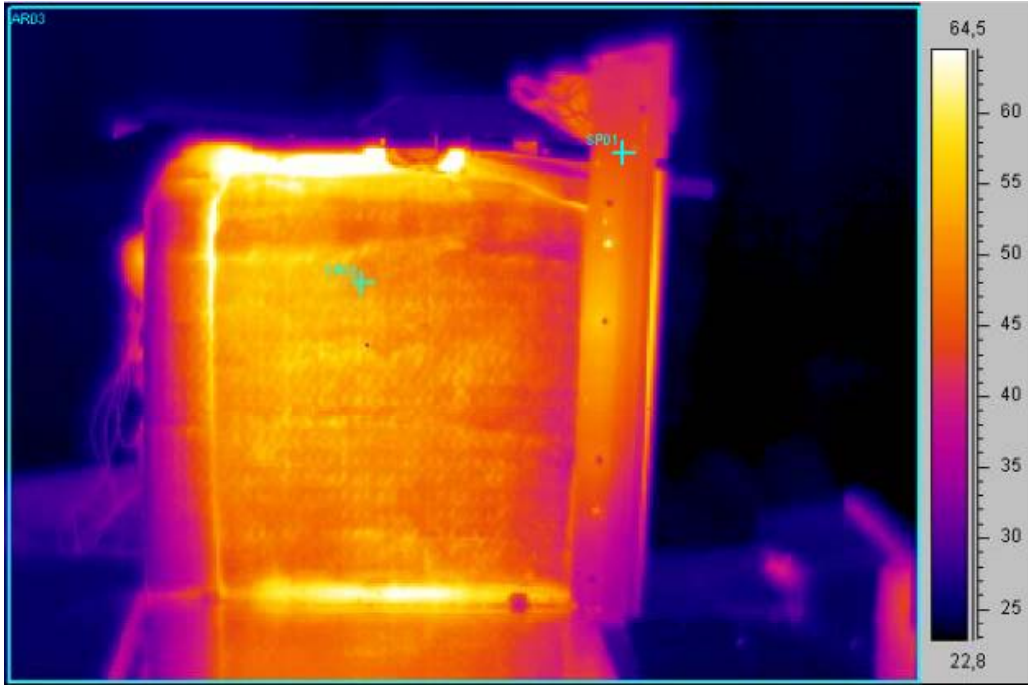
Şekil 5.10: A enerji sınıfını sağlayan fırın için ön kapak termal kamera ölçümü

C enerji sınıfını sağlayan fırın için ön kapak sıcaklıkları Şekil 5.11'de görölmektedir.



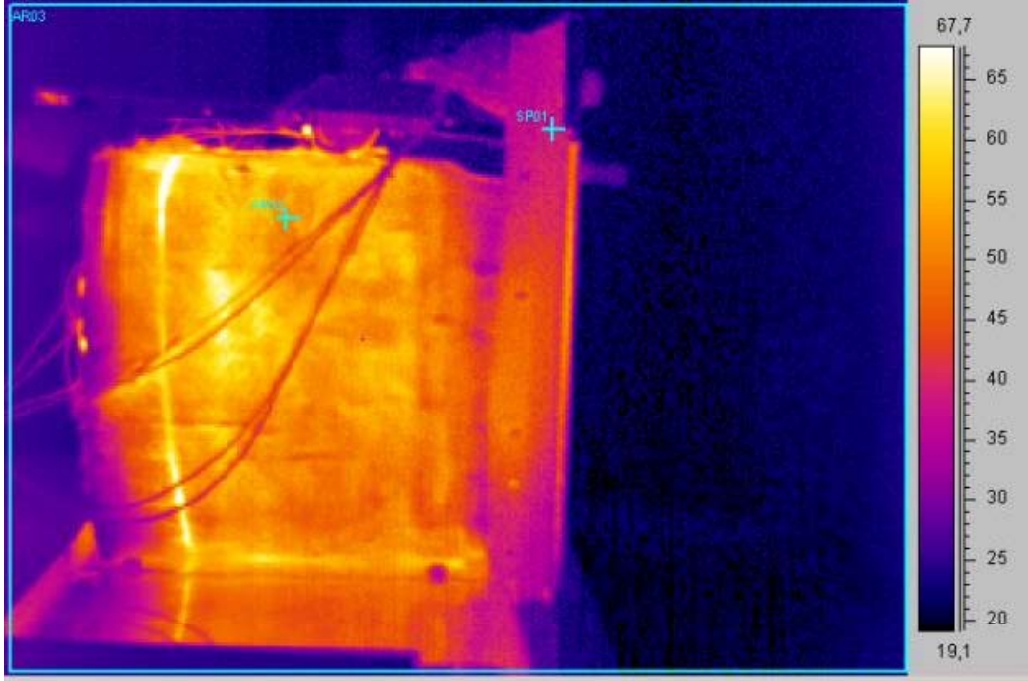
Şekil 5.11: C enerji sınıfını sağlayan fırın için ön kapak termal kamera ölçümü

A enerji sınıfını sağlayan fırın için sol yan duvar yalıtım sıcaklıkları Şekil 5.12’de görülmektedir.



Şekil 5.12: A enerji sınıfı fırın için sol yan duvar yalıtımını termal kamera ölçümü

C enerji sınıfını sağlayan fırın için sol yan duvar yalıtım sıcaklıkları Şekil 5.13’de görülmektedir



Şekil 5.13: C enerji sınıfı fırın için sol yan duvar yalıtımını termal kamera ölçümü

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan yüksek lisans tez çalışmasında daha önce üretici tarafından enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışma yapılmamış olan ev tipi elektrikli fırının enerji tüketimini azaltacak yöntemler incelenmiş ve uygulanmıştır. Kaynak ve patentlerde tavsiye edilen yöntemler araştırılmış, seçilen fırının mevcut durumu analiz edilmiştir. Yalıtım kalınlığının artırılması ve ön kapakta cam sayısının artırılması yönünde değişikliklerin tüketim sonuçlarını azaltabileceği belirlenmiştir.

Yapılması düşünülen değişiklikler için teorik ısı kaybı hesaplamaları yapılmış ve Microsoft Excel programında matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel model yardımıyla yalıtım ve ön kapak değişikliklerinin ısı kayıplarına etkilerinin hızlı ve kolay şekilde hesaplanması hedeflenmiştir. Yalıtım kalınlığının 20mm'den 40mm'e çıkarılmasının, fırın duvarlarından olan ısı kayıplarını % 42 azaltabileceği hesaplanmıştır. Çift camlı ön kapak yerine üç camlı ön kapak uygulamasının, ön kapaktan olan ısı kayıplarını % 20 azaltması ve ön kapak sıcaklığının ~10 K düşürmesi öngörülmüştür. Matematiksel model ile hesaplanan ön kapak cam sıcaklıkları, deneysel yöntemler ile ölçülen sıcaklıklar ile karşılaştırılmıştır. Model ile ölçüm sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür (~% 4 hata).

Literatür araştırmaları ve teorik kayıp hesaplarından elde edilen bilgileri deneysel yöntemler ile doğrulamak ve infiltrasyon etkisini incelemek amacıyla, istatistiksel yöntemlerin de kullanıldığı deney tasarlanmıştır. Deney sonuçlarına göre yalıtım kalınlığının 20mm den 40mm'e çıkartılmasının enerji tüketimini %24 iyileştirdiği, ön kapakta çift cam yerine 3 cam kullanımının enerji tüketimini %5 iyileştirdiği görülmüştür. Deneysel incelemeler termal kamera ölçümleri ile desteklenmiştir.

Sonuç olarak, yalıtım kalınlığının artırılması ve üç camlı ön kapak uygulaması ile üzerinde çalışılan elektrikli ankastre fırının ortalama enerji tüketim değeri % 30 azaltılmıştır. Seçilen fırın gamı için üretici firma tarafından çalışma öncesinde bildirilen enerji tüketim değeri 1.1 kWh iken, çalışma sonrasında bildirilen değer 0.8 kWh olarak gerçekleşmiş, ürün C enerji sınıfından A enerji sınıfına yükseltilmiştir. Fırına baca ilave edilmesi ve infiltrasyon kayıpları üzerinde çalışılması durumunda bu çalışmada ulaşılan seviyeden % 10 daha fazla iyileşme fırsatı mevcuttur.

## KAYNAKLAR

- [1] **Dağsöz, A.Kemal**, 1995. Türkiye’de derece-gün sayıları ulusal enerji tasarruf politikası yapılarında ısı yalıtımı, pp.C69-C100, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- [2] **Papadopoulos A. M.**, 2004. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, *Energy and Buildings*, **37**, 77-86.
- [3] <http://www.kimyamuhendisi.com/arsiv/kimyasalteknolojiler>, **2006**
- [4] <http://www.izocam.com.tr/>, **2006**
- [5] **Ulrich S.**, 1992. Oven with baking muffle, EP0475285, Miele & CIE.
- [6] **Gramlich W.**, 1988. Muffle insulation in a cooker, GB2195760, Bosch Siemens Haugerate GmbH.
- [7] **Knoll H., Waigand H., Schweidler E.**, 1996. Double-walled domestic oven, DE19520040, Bosch Siemens Haugerate GmbH.
- [8] **Haworth G., Srikanth R.**, 2000. Integrated vacuum panel insulation for thermal cabinet structures, US6109712, Maytag Corp.
- [9] **Schönweiss H.**, 1996. Baking and roasting oven with heat insulating coating, DE4439384, AEG Haugerate GmbH.
- [10] **Comité Européen de Normalisation Electrotechnique**, 2003. Household and similar electrical appliances safety - particular requirements for stationary cooking ranges, hobs, ovens and similar appliances, EN 60 335-2-6.
- [11] **Kieslinger M.**, 1996. Door for a cooking apparatus, EP0699871, Bosch Siemens Haugerate GmbH.
- [12] **Nuss James J.**, 1976. Simplified oven door window, US3996710, General Electric.
- [13] **Gerhardinger P.**, 2000. Double sided heat barrier glass with clear CVD coating and method of making the same, US6024084, Engineered Glass Products LLC (US)

- [14] **Bonaccorsi L., Armani P., Zanetti G.**, 1987. Door for an oven particularly of the ventilated type, EP0209115, Zanussi Elettrodomestici.
- [15] **Mikalauskas G., Corson D., Paul G.**, 1995. Cool multi-sectioned oven door for a large window oven, US5441036, Whirlpool Co.
- [16] **Fumagalli S.**, 2000. Door for pyrolytic oven, EP1022517, Candy Spa.
- [17] **Stahlmann R; Poerner H.**, 2002. Cooler for cooking oven with oven muffle opening and door has outer and inner chambers and outer and inner door cavities, suction and blower openings., DE10047016, AEG Hausgerate GmbH.
- [18] **Kinkle R.**, 1965. Oven door window, US3177334, General Electric.
- [19] **Huff G., Shelly D.**, 1969. Shutter for window in oven door, US3433213, Kelvinator Inc.
- [20] **Comité Européen de Normalisation Electrotechnique**, 2001. Electric ovens for household use- methods for measuring the energy consumption, EN 50304.
- [21] **Ward,David**, 2002. Basic Thermal Modelling of Oven Cooking and the 'Brick' Test
- [22] **Özyurt B., Kayıhan A.S., İnan C and Eğrican N.E.**, 2003, ARS 088, Thermal Modelling of an Electrical Domestic Oven, Arçelik A.Ş. R&D Center
- [23] **Altı Sigma Karakuşak Eğitim Notları**, 2005, Arçelik A.Ş.
- [24] **DeWitt D. P., Incropera F. P.**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, pp.493., John Wiley and Sons
- [25] **DeWitt D. P., Incropera F. P.**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, pp.498., John Wiley and Sons
- [26] **DeWitt D. P., Incropera F. P.**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, pp.171., John Wiley and Sons
- [27] **Kantaş M., Heperkan H.**, 2007, Ev tipi elektrikli fırınların performansının sayısal ve deneysel incelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [28] **Akdağ L.**, 2002, ARS 183, Tüm çalışma modlarında fırın için CFD analizleri, Arçelik A.Ş. Araştırma Teknoloji Geliştirme Merkezi

- [29] **DeWitt D. P., Incropera F. P.**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, pp.392., John Wiley and Sons
- [30] **DeWitt D. P., Incropera F. P.**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, pp.723., John Wiley and Sons
- [31] **DeWitt D. P., Incropera F. P.**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, pp.450., John Wiley and Sons
- [32] **DeWitt D. P., Incropera F. P.**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, pp.511., John Wiley and Sons

## ÖZGEÇMİŞ

Neslim HANCILAR, 1975 yılında İzmir’de doğdu. 1993 yılında orta öğrenimini Bolu İzzet Baysal Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 1998 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesi’nden Makina Mühendisi olarak mezun oldu. 2004 yılında İ.T.Ü. Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Enerji Programı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen İ.T.Ü. Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrencisi olup, ARÇELİK A.Ş.’de üretim mühendisi olarak çalışmaktadır.

## VERİ GİRİŞİ:

Fırın kavitesinin sac, kaplama ve izolasyon kalınlıklarını ve ısı iletim katsayılarını giriniz

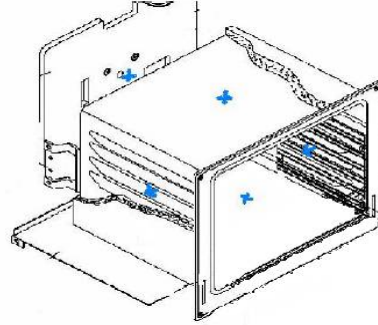
$l_{sac}$ :	0,00070	m
$k_{sac}$ :	60,000	W/mK
$l_{emaye}$ :	0,00005	m
$k_{emaye}$ :	1,0460	W/mK
$l_{izolasyon}$ :	0,04000	m
$k_{izolasyon}$ :	0,041	W/mK

Fırın içi ayar sıcaklığını ve ortam sıcaklığını giriniz.

	T (°C)	T (K)
$T_{fırın\_merkez}$	178	451
$T_{dış\_hava}$	23	296

Ölçülen fırın içi duvar sıcaklıklarını giriniz.

	T (°C)	T (K)
$T_{sağ}$	172	445
$T_{sol}$	174	447
$T_{üst}$	169	442
$T_{alt}$	164	437
$T_{arka}$	176	449



Dış yüzeyler ve köşeler için karakteristik uzunlukları giriniz.

$L_{sağ}$	0,35	m	$As(m2)$ :	0,1575	
$L_{sol}$	0,35	m	$As(m2)$ :	0,1575	
$L_{üst}$	0,1125	m	$As(m2)$ :	0,2025	$P(m)$ : 1,800
$L_{alt}$	0,1125	m	$As(m2)$ :	0,2025	$P(m)$ : 1,800
$L_{arka}$	0,35	m	$As(m2)$ :	0,1575	
$L_{köşe}$	0,45	m			

## SONUÇLAR:

Fırın duvarları için ısı iletim katsayısı

$K_{duvar}$ : 1,02 W/m2K

İzolasyon dış yüzey sıcaklıkları

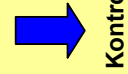
	T (°C)	T (K)
$T_{sağ}$	53,57	326,57
$T_{sol}$	53,92	326,92
$T_{üst}$	61,38	334,38
$T_{alt}$	46,41	319,41
$T_{arka}$	54,27	327,27

h dış taşınım katsayıları

	$h_{dış}(W/m2K)$
$h_{sağ}$	3,97
$h_{sol}$	3,98
$h_{üst}$	2,87
$h_{alt}$	5,15
$h_{arka}$	3,99

$K_{duvar}(T_{duvar}-T_{izo}) = h_{dış}(T_{izo}-T_{hava})$

sağ:	121,38	=	121,38
sol:	123,07	=	123,07
üst:	110,30	=	110,30
alt:	120,53	=	120,53
arka:	124,76	=	124,76



Toplam ısı geçiş katsayıları:

	$K (W/m2K)$
sağ	0,81
sol	0,82
üst	0,76
alt	0,85
arka	0,82

Isıl kayıplar :

	$Q (W)$
Duvar sağ	19,12
Duvar sol	19,38
Duvar üst	22,34
Duvar alt	24,41
Duvar arka	19,65
köşe sağüst	28,15
köşe sağalt	29,39
köşe solüst	28,35
köşe solalt	29,60
<b>Toplam</b>	<b>220,39</b>