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

ÖNSÖZ **i**
İÇİNDEKİLER **ii**
TABLO LİSTESİ **iv**
ŞEKİL LİSTESİ **v**
SEMBOL LİSTESİ **vii**
ÖZET **viii**
SUMMARY **ix**
1 GİRİŞ **1**
2 KAYNAK VE PATENT ARAŞTIRMALARI **3**
2.1 Yalıtım uygulamaları 3
2.2 Kapak Uygulamaları 10
2.3 Enerji tüketiminin belirlenmesinde kullanılan tuğla testi standart deney yöntemi 15
3 ENERJİ TÜKETİMİ AZALTILACAK ELEKTRİKLİ ANKASTRE FIRININ MEVCUT DURUM ANALİZİ **24**
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
4 MATEMATİKSEL MODEL **32**
4.1 Yalıtım kalınlığının arttırılmasının 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 sonuçlar 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

5 DENEYSEL İNCELEME **58**
5.1 Turbo 155K tuğla enerji tüketim 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
6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER **69**
KAYNAKLAR **70**
ÖZGEÇMİŞ **73**

TABLO LİSTESİ

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

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
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 dolaşımlı 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

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

SEMBOL LİSTESİ

α	: Isıl yayılım sayısı, [m²/s]
β	: Isıl genleşme katsayısı, [K-1]
c_p	: Özgül ısı, [kj/kg.K]
c_{pk}	: Süreç yeterlilik indeksi
ε	: Yayma katsayısı, emisivite
δ	: Karakteristik uzunluk, [m]
g	: Yerçekimi ivmesi, [m2/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/m2.K]
h_{12}	: 1. ve 2. camlar arası taşınım katsayısı, [W/m2.K]
h_{23}	: 2. ve 3. camlar arası taşınım katsayısı, [W/m2.K]
$h_{dış}$	: Dış ortam taşınım katsayısı, [W/m2.K]
k	: Isı iletim katsayısı, [W/m.K]
c	: Kalibrayon sabiti, [(W/m²)/µV]
L	: Karakteristik uzunluk, [m]
m_{hava}	: hava kütlesi, [kg]
Nu	: Nusselt sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
$Qtaşınım_{_iç-1}$	: Fırın iç havasından iç cama taşınımla geçen ısı, [W]
$Qışınım_{_iç-1}$	: Fırın iç havasından iç cama ışınımla geçen ısı, [W]
$Qışınım_{_1-2}$	: 1. camdan - 2. cama ışınımla geçen ısı, [W]
$Qışınım_{_2-3}$	: 2. camdan - 3. cama ışınımla geçen ısı, [W]
$Qtaşınım_{_1-12}$	: 1.camdan ara havaya taşınımla geçen ısı, [W]
$Qtaşınım_{_12-2}$	: Ara havadan 2.cama taşınımla geçen ısı, [W]
$Qtaşınım_{_2-23}$	: 2.camdan ara havaya taşınımla geçen ısı, [W]
$Qtaşınım_{_12-2}$	: Ara havadan 3.cama taşınımla geçen ısı, [W]
$Qtaşınım_{_3-dış}$	: 3.camdan dış ortama taşınımla geçen ısı, [W]
$Qışınım_{_2-3}$	: 3. camdan – dış ortama ışınımla geçen ısı, [W]
Ra	: Rayleigh sayısı
Re	: Reynolds sayısı
σ	: Stefan-Boltzman sabiti, [5.67x10-8 W/m2.K4]
s	: Standart sapma
ΔT	: 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]
ν	: Kinematik viskozite, [m²/s]
V	: Potansiyel, [µV]
$\overline{X}$	: 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 arttırılması, ön kapak cam sayısının arttırılması 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 edelerek 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 tutulabilmiştir.

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 arttırılması, 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 arttırma
- Ön kapakta iki cam yerine üç cam kullanma çözümleri belirtilen kısıtları karşılamaktadır.

Yalıtım kalınlığının arttırılması ve ön kapak cam sayısının arttırılması durumunda teorik ısıl 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

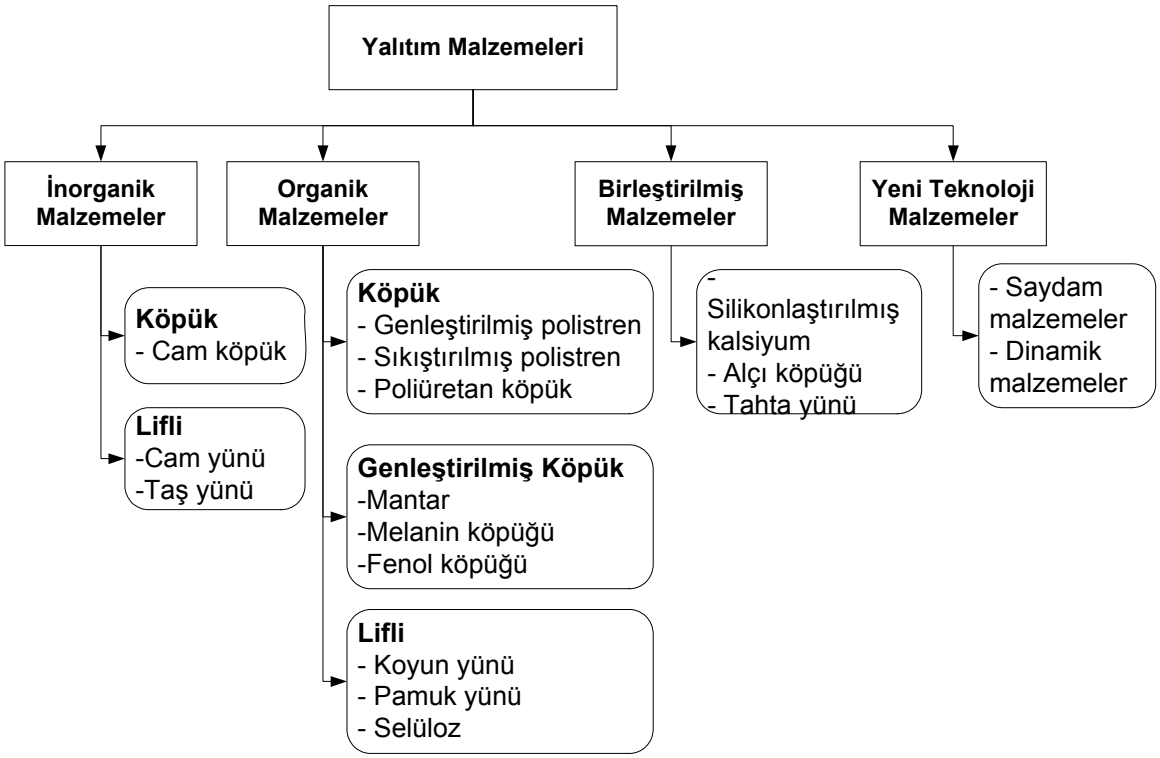
13. Kokusuz olması

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].

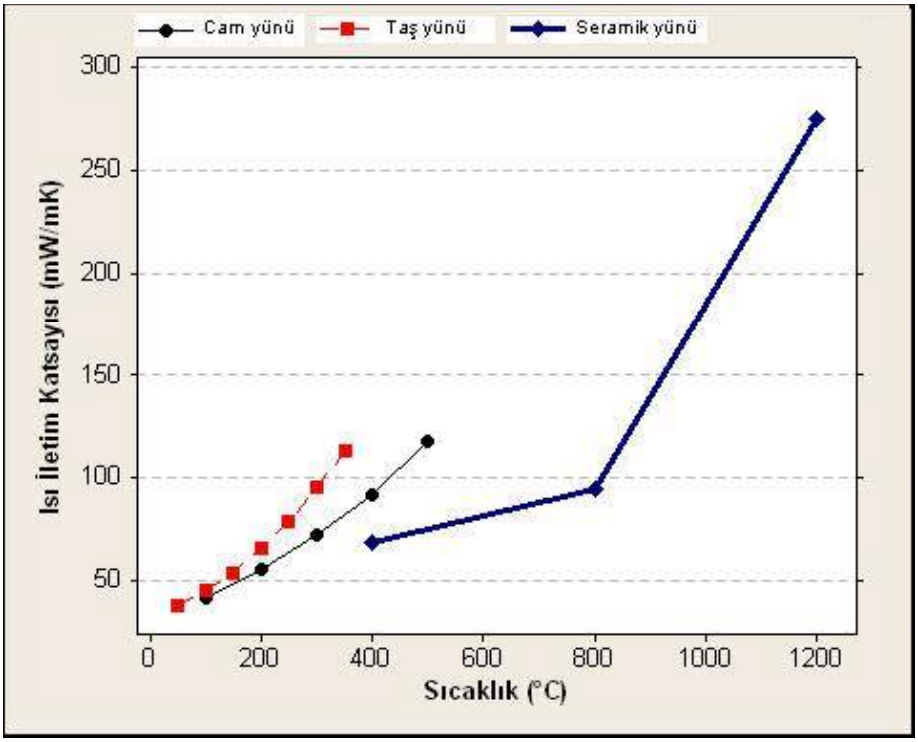


Şekil 2.1: Sık kullanılan yalıtım malzemeleri

Fırınlar yüksek sıcaklık değerlerinde çalıştıklarından dolayı, fırınlarda kullanılacak yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklık ile değişiminin az olması istenir. Yalıtım malzemesinin özgül hacminin yüksek olması, küçük ısıl kütleyi sağlamak üzere tercih edilmektedir. Uygun yalıtım kalınlığının belirlenmesinde yeterli ısıl direncin ve küçük ısıl kütlenin 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/m3)	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_2 (kuvars kum), % 15.7 $Al_2(OH)_3$, % 0.5 Fe_2O_3, % 16 CaO, % 3.8 MgO, % 8 B_2O_3 (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.

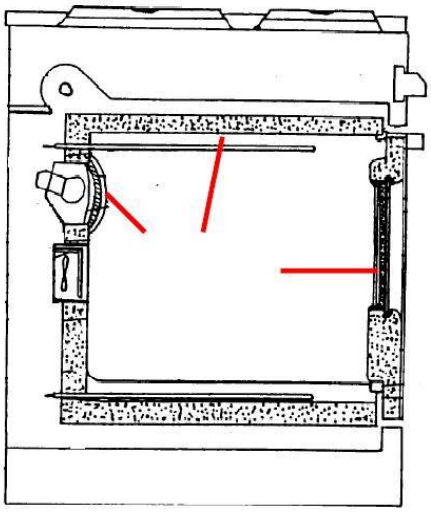


Şekil 2.5: Taş yünü

Seramik yünü çok yüksek sıcaklılarda 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/m3 arasında değişir. Yumuşak bir malzeme olup, levha tiplerinin dahi basınca dayanımı fazla değildir. En önemli özelliği yüksek sıcaklıklara dayanabilmesidir [3,4].

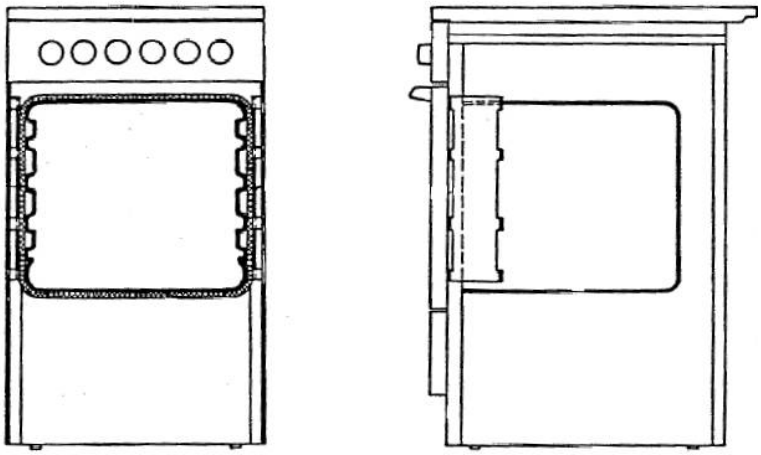
Fırınlarda ısı yalıtımı ile ilgili patentler incelendiğinde, cam yünü, taş yünü kullanımına alternatif olarak farklı yalıtım tekniklerinin kullanılmasına yönelik uygulamalar görülmektedir.

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



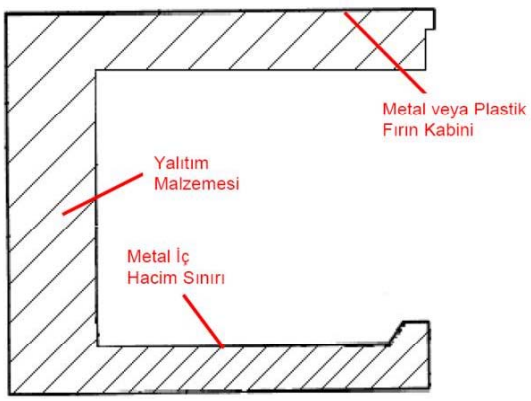
Şekil 2.6: Aerojel ile yalıtılan bir fırın kabin ve kapısı

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 arasına 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.



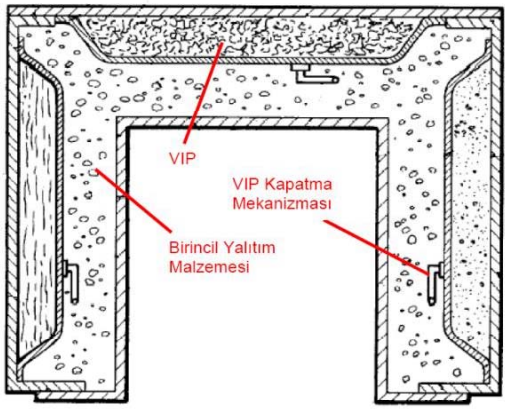
Şekil 2.7: Ara Parça ile Hava Boşluğu Yaratılan Fırın Kesiti

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.



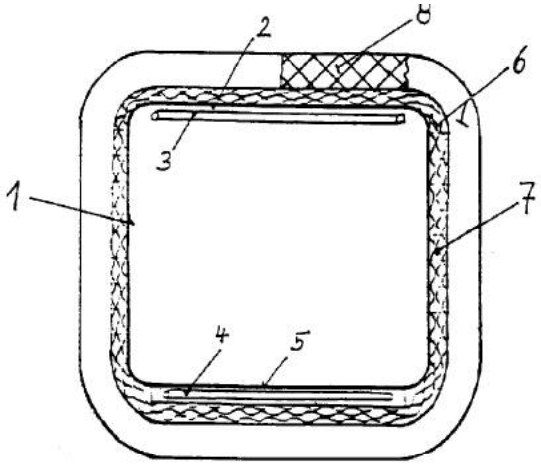
Şekil 2.8: Vakumlu ortam ile yalıtılmış fırın bölmesi

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 kabinine 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 °C ± 40 °C' de tutulurken, ortam sıcaklığı 23 °C ± 2 °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

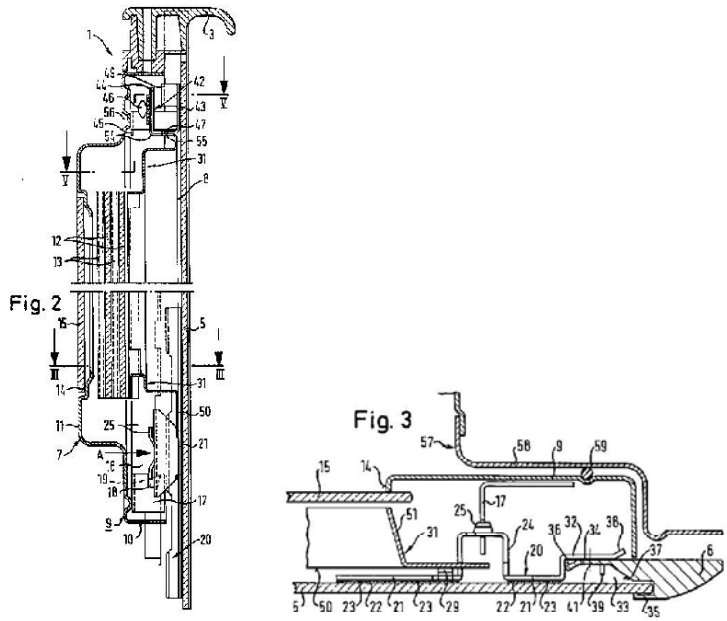
	Kapak Sıcaklığı (°C)
Kaplanmış Metaller	45 °C + Ortam Sıcaklığı
Cam	60 °C + Ortam Sıcaklığı

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 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

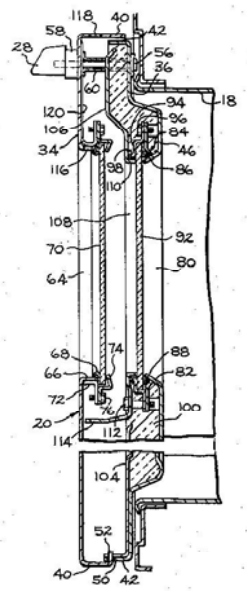
1998 yılında Bosch Siemens Hausgerate firması tarafından yayınlanan patent, fırın kapısını oluşturan parçaların bağlantısına yönelik olarak Şekil2.11'de görülen ısıl

köprüleri ve temas yüzeyini azaltacak bir konstrüksiyonu tariflemektedir [11]. Bağlantı elemanlarının sabitlenmesinde yapıştırma yöntemi kullanılmaktadır.



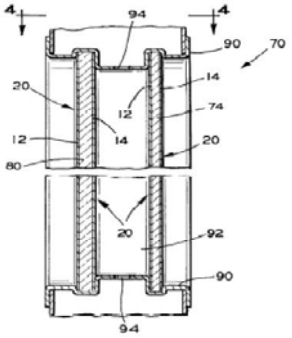
Şekil 2.11: Isıl köprüleri azaltmaya yönelik fırın ön kapak parçaları bağlantı yöntemi

1976 yılında General Electric firması tarafından yayınlanan patent, iki camlı fırın kapağı uygulaması ile kapaktan ısı iletimi yoluyla oluşan kayıpları azaltmayı hedeflemektedir [12]. İç cam ile kapağın bağlandığı bölge cam yünü ile yalıtılmıştır. Cam ile kapak bağlantılarında sızdırmazlık amacıyla lastik conta kullanılmıştır. Uygulama Şekil 2.12'de verilmektedir.



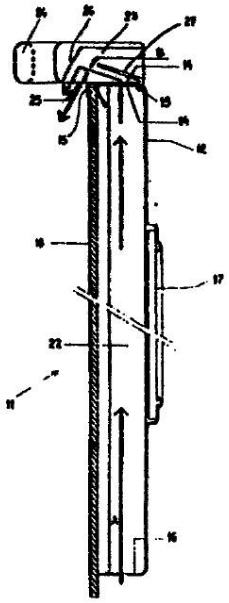
Şekil 2.12: Fırın camlarının metal ile temasının kesilmesi

2000 yılında Engineered Glass Produts 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 kaplanılması 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.



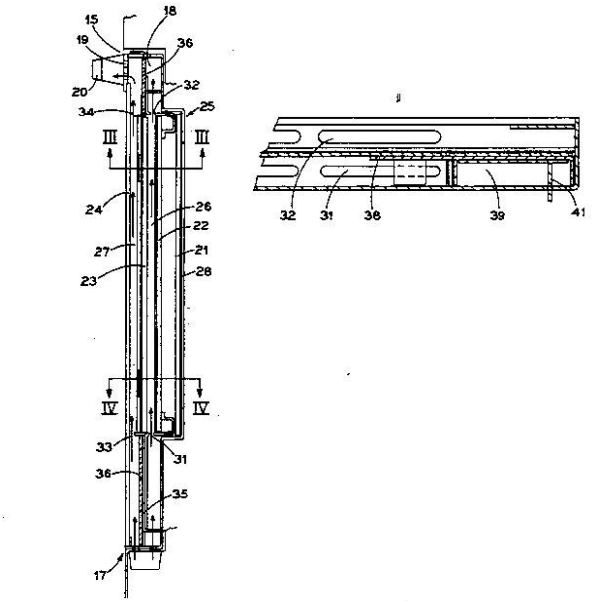
Şekil 2.13: Çift camlı, yansıtıcı kaplamalı sistem

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.



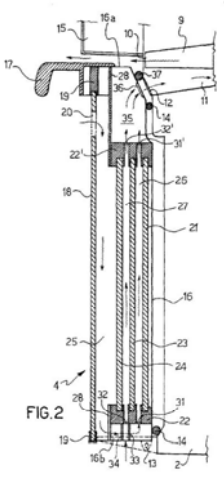
Şekil 2.14: İki camlı hava soğutmalı kapak

Whirpool firması tarafından 1995 yılında yayınlanan patent, çok camlı ve camlar arasında oluşturulan boşluklarda fan yardımıyla zorlanmış hava dolaşımı sağlanan fırın kapağı uygulaması hakkındadır [15]. Menteşelerde yansıtıcı kanatlar kullanılmıştır. Kapak yapısı Şekil 2.15'de görülmektedir.



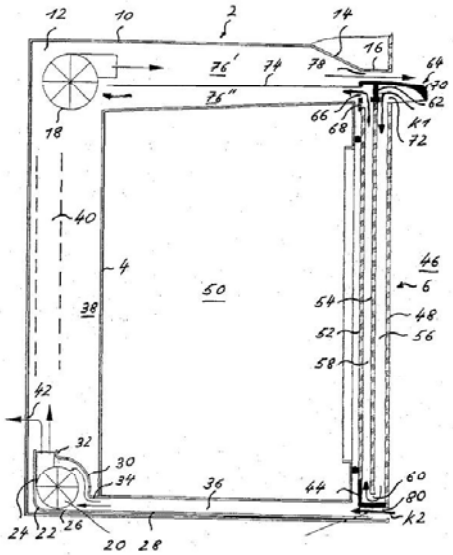
Şekil 2.15: Çok camlı zorlanmış hava dolaşımlı kapak

2000 yılında Candy firması tarafından yayınlanan patentte, zorlanmış akışlı pirolitik fırınlarda 4 camlı kapak uygulaması verilmektedir [16]. Kapak konstrüksiyonunda, camların birbirleri ile olan direkt teması kesilmiştir. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi camlar metal panellere sabitlenmiş ve bu paneller üzerine hava sirkülasyon kanalları oluşturulmuştur. Emme kanalında kapı ile fırın arasında kauçuk conta bulunmaktadır. Camlar arasında kalan sıcak hava ortamdan uzaklaştırılarak dış cam sıcaklığının düşürülmesi planlanmaktadır.



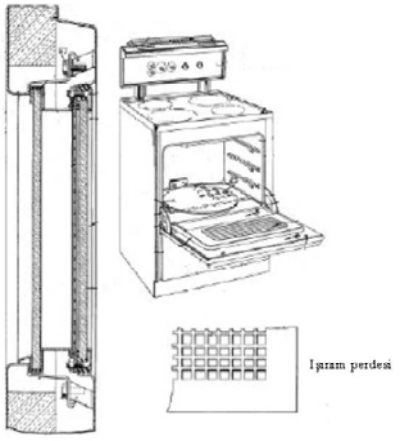
Şekil 2.16: Pirolitik fırın kapağı

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 ısıl verim arttırılmaktadır. Fırın ve kapaktaki hava sirkülasyonu Şekil 2.17'de verilmektedir.



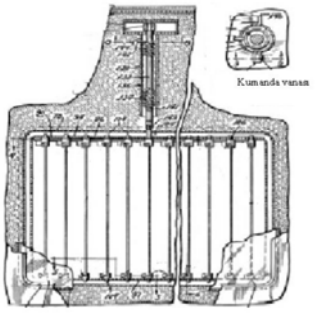
Şekil 2.17: Hava sirkülasyonlu kapak

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 etkendir. 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

1969 yılında Kelvinator firması tarafından yayınlanan patent, fırın penceresinde kepenk kullanımı ile ilgilidir [19]. Fırın penceresinden ışınım ile gerçekleşen ısı kayıpları düşünülerek, fırın camında ışınımı engellemek için kepenk kullanılmıştır. Şekil 2.19'da gösterildiği üzere kepenk oluşumu yan yana sıralanmış kanatçıklardan oluşmaktadır. Bu kanatçıklar yönlendirilebilmektedir, istenildiği takdirde açılıp fırın içerisi görülebildiği gibi, diğer zamanlarda ise kapalı kalarak ışınımı önlemektedir.



Şekil 2.19: Kanatlı Işınım perdesi

2.3 Enerji tüketiminin belirlenmesinde kullanılan tuğla testi standart deney yöntemi

Fırın enerji tüketiminin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler, CELENEC tarafından yayınlanan EN 50304 fırın enerji tüketim deneyi standardına uygun olarak yapılmıştır [20].

EN 50304 standardının kapsamı ev tipi elektrikli fırınlardır. Mikrodalga fırınlar, küçük hacimli fırınlar, sıcaklık ayarı yapılamayan fırınlar standardın kapsamı dışındadır. Standardın kapsamındaki fırın ısıtma yöntemleri:

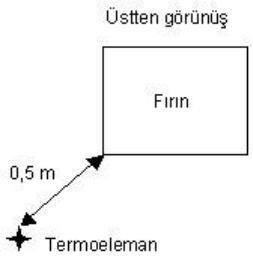
- Geleneksel ısıtma (Statik): Yiyecek sadece ışınım ve doğal taşınım ile pişirilir.
- Zorlanmış dolaşım ile ısıtma (Turbo): Yiyeceğe ısı geçişi zorlanmış hava taşınımı ile sağlanır. Hava dolaşımı fan yardımıyla sağlanır.
- Buharla ısıtma: Yiyecek sıcak buhar ile ısıtılır (T>>100°C, 1 bar basınç)

Standardın kullanım amacı, enerji etiketleme ve standart ürün bilgilerinin bildirilen değerleri için izin verilen toleranların ve bildirilen değerlerin kontrolü için kontrol prosedürlerinin belirlenmesidir.

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)

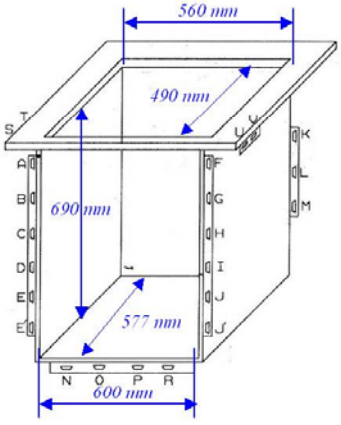
Deneyler için standardın belirlediği ortam sıcaklığı 23±2 °C'dir ve havalandırma olmamalıdır. Ortam sıcaklığı fırının yararlı hacminin merkezi ile aynı yükseklikte ve Şekil 2.20'de görüldüğü gibi ön kenarlardan birinden diagonal olarak 0.5 m uzaklıkta bir noktada ölçülür. Ortam sıcaklığının belirlenmesi 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 %±1 olmalıdır.

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

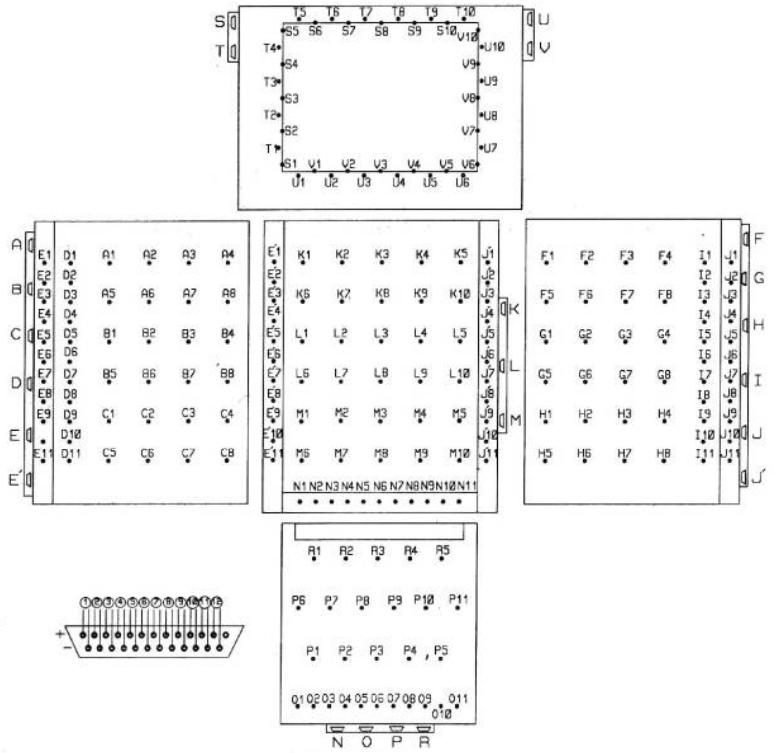


Şekil 2.21: Elektrikli ankastre fırın test kabini boyutları



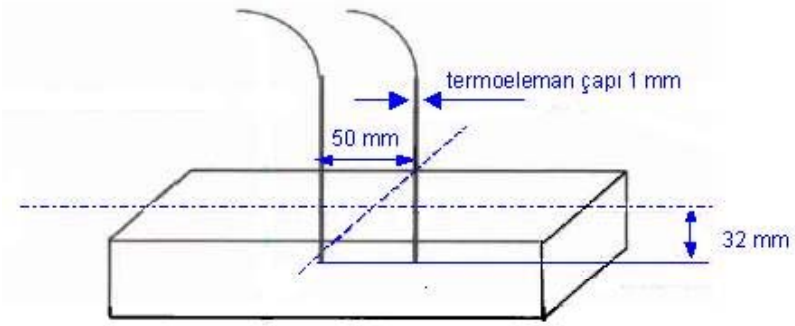
Şekil 2.22: Elektrikli ankastre fırın test kabini

Test kabininde bulunan termoelamanlar 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

Deneylerde yük olarak tuğla kullanılmaktadır. Tuğla sıcaklık ölçümleri için kullanılan termoelemanlar ±1.5 K hassasiyetinde olmalıdır. Tuğla merkezinden eşit uzaklıkta aralarındaki mesafe 50 mm olacak şekilde yerleştirilen 2 adet termoeleman ile sıcaklık ölçümü yapılmaktadır. Termoelamanlar 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 ısıl özelliklerini ve su içeriğini temsil eden suya doymuş bir tuğladır. Standart tuğlanın özellikleri;

Kuru yoğunluk : 550 kg/m3

Kuru kütle: (920 ± 75) g

Su emmesi: (1050 ± 50) g

Boyutlar : 230*114*64 mm

Tuğla kullanılmadan önce 175 ºC ve üstü sıcaklıkta hacmi 50 litre olan bir fırında, fan ile ısıtıcının beraber çalıştığı zorlanmış taşınımlı 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 ºC'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±2 ºC 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±2 ºC 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 Yöntemi		
Isıtma Modu	**Geleneksel (Statik)**	**Zorlanmış dolaşım (Turbo)**	**Buhar**
ΔT1	(140 ± 10) K	(135 ± 10) K	(135 ± 10) K
ΔT2	(180 ± 10) K	(155 ± 10) K	(155 ± 10) K
ΔT3	(220 ± 10) K*	(175 ± 10) K*	(175 ± 10) K*

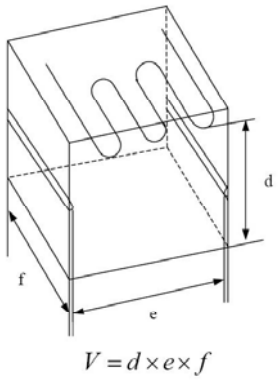
*bu sıcaklık değerine ulaşamıyorsa en yüksek sıcaklık artışı

Sıcaklığı 5±2 ºC 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.



$$V = d \times e \times f$$

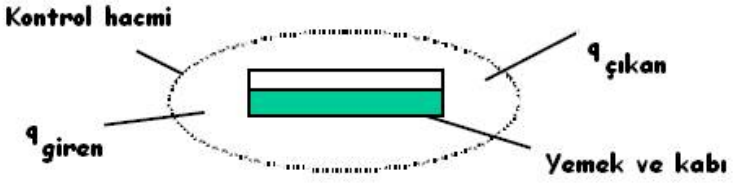
Şekil 2.26: Fırının kullanılabilir hacmi

Bulunan enerji tüketimi, fırın üretici firmanın bildirdiği değerin %10 + 40 Wh üstüne çıkmamalıdır. Bildirilen hacim değeri ±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.

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



Şekil 2.27: Pişirilen yiyeceğin modellenmesinde kullanılan kontrol hacmi

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

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

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

Kontrol hacminde enerji üretimi yoktur.

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

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

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

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

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

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

Eşitlik yeniden yazıldığında:

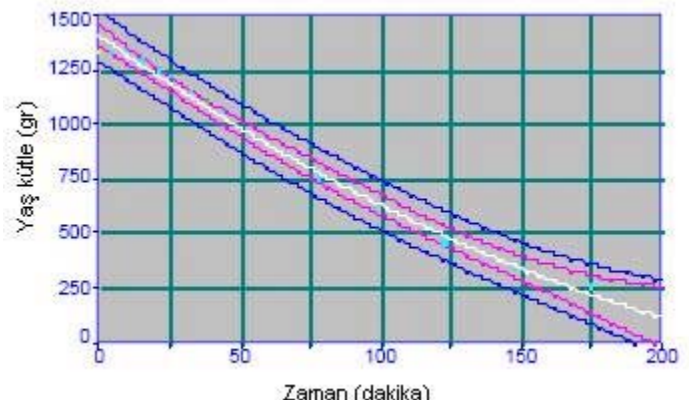
$$\bar{h}.A.(T_\infty - T) - \dot{m}.h_{fg} + 0 = M.C_p.\frac{dT}{dt} \quad \textbf{(2.7)}$$

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.



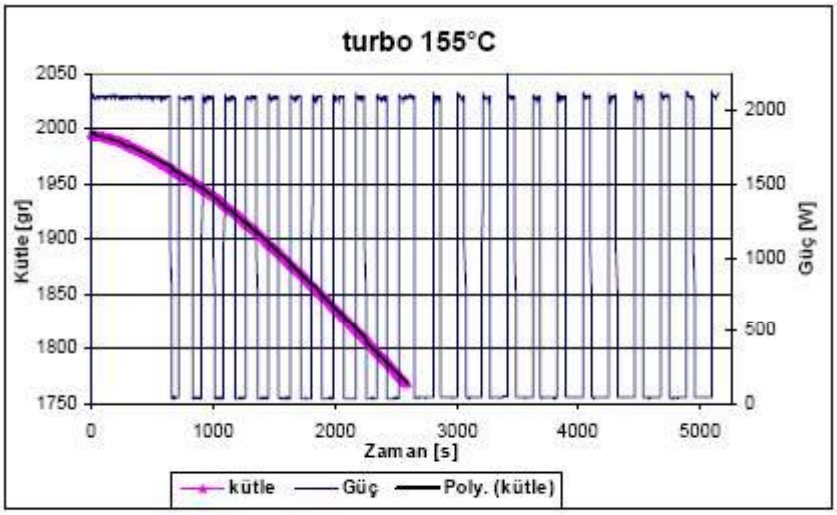
Şekil 2.28: Tuğla testi sırasında tuğla kütle kaybının zamana bağlı değişimi

Deney sonuçlarına göre tuğla kütlesinin değişim denklemi verilmiştir.

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

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 ölçülmüş ve kütlenin zamana göre değişim denklemi belirlenmiştir.



$$m = 27.10^{-14}t^4 + 32.10^{-10}t^3 - 34.10^{-6}t^2 - 27.10^{-3}t + 1996$$

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 gerçekşeştiği 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 grubununun 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.

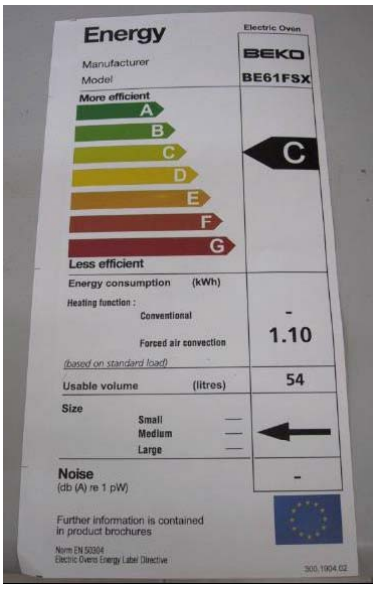
Örnekleme yapılarak 10 adet fırında enerji tüketim değerleri ölçülmüş ve sonuçlar istatistiksel yöntemler kullanılarak Minitab istatistiksel yazılımı ile incelenmiştir. Ortalama enerji tüketiminin ve enerji tüketiminin değişkenliğinin daha doğru tahmin edilebilmesi için güven aralıkları hesaplanmış, 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 dolaşımla 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.

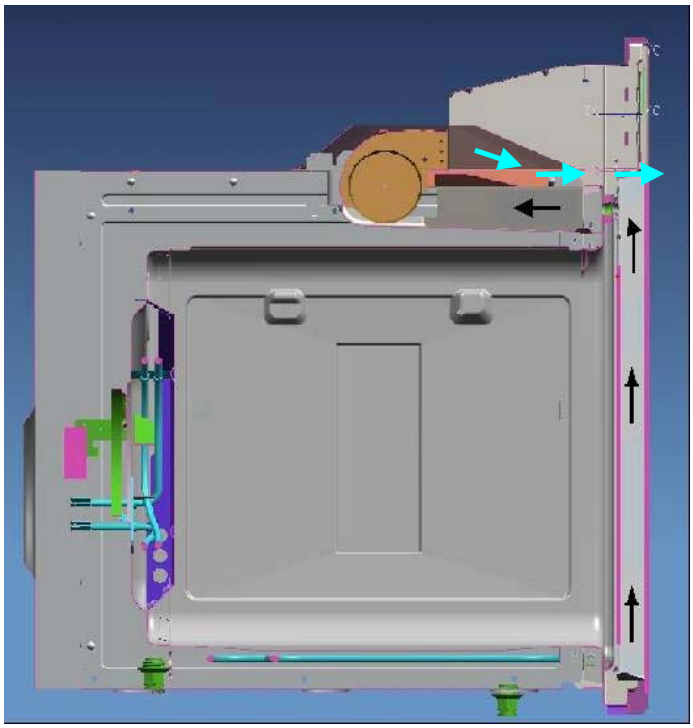


Şekil 3.2: Ön kapak hava kanalları



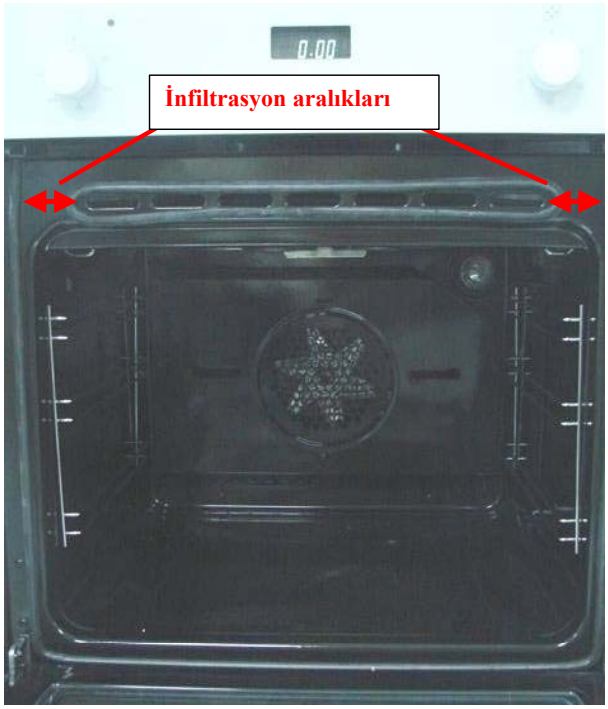
Şekil 3.3: Fırın bölmesi havalandırma kanalları

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 (χ^2) değerinden faydalanılmaktadır.

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

$$S\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{\alpha/2}}} \le \sigma \le S\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{1-\alpha/2}}} \quad \textbf{(3.2)}$$

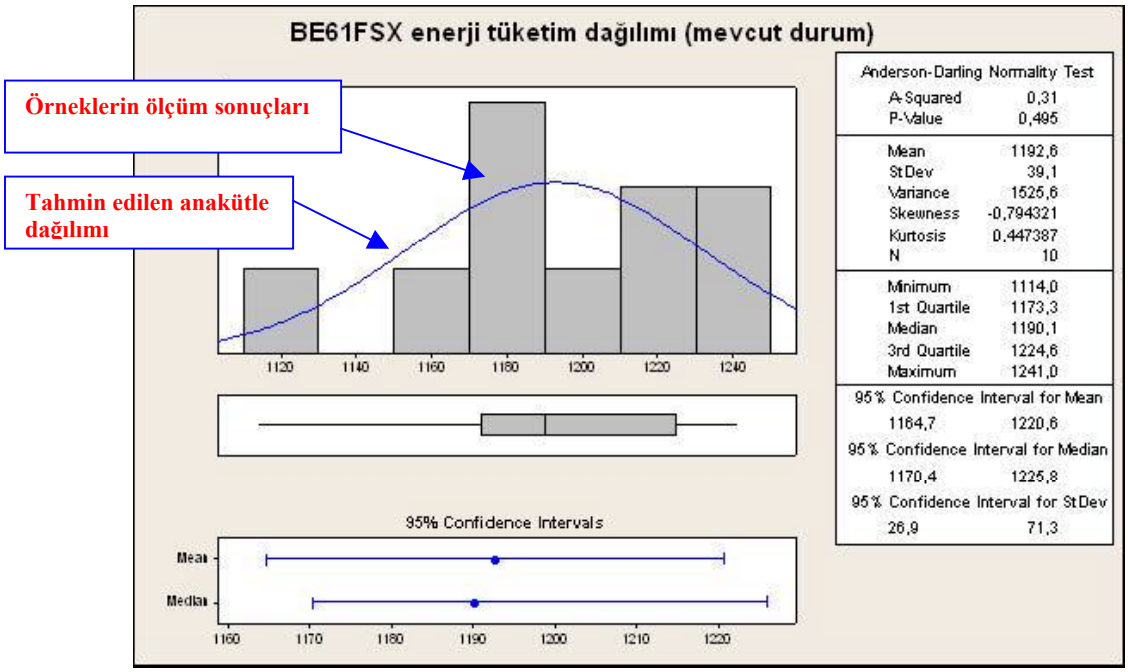
Örnek sayısının arttırılması güven aralığını daraltmakta ve daha kesin tahmin yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada örnek değişkenliğinin göz önünde tutularak daha doğru karar verilebilmesi amacıyla örnekleme yapılarak çoklu ölçümler ile çalışılmış, sonuçların değerlendirilmesi amacıyla istatistiksel 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 değerin 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.

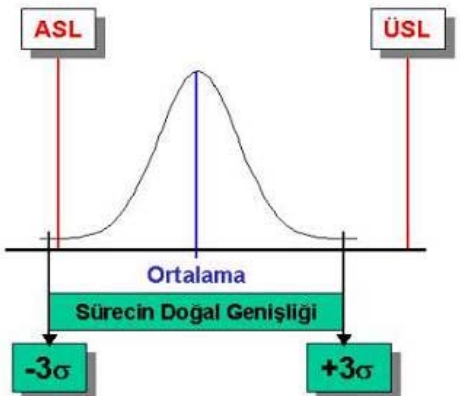
- Enerji tüketiminin ortalama değeri 1192.6 Wh (% 95 CI: 1164.7;1220.6) tir.
- Enerji tüketiminin standart sapması 39.1 Wh (% 95 CI: 26.9;71.3) tir.
- Enerji tüketim dağılımı normal dağılıma uymaktadır (normallik testi sonucunda elde edilen p-değerinin (p-değeri=0.495) belirlenen risk seviyesinden (αriski=0,05) 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.



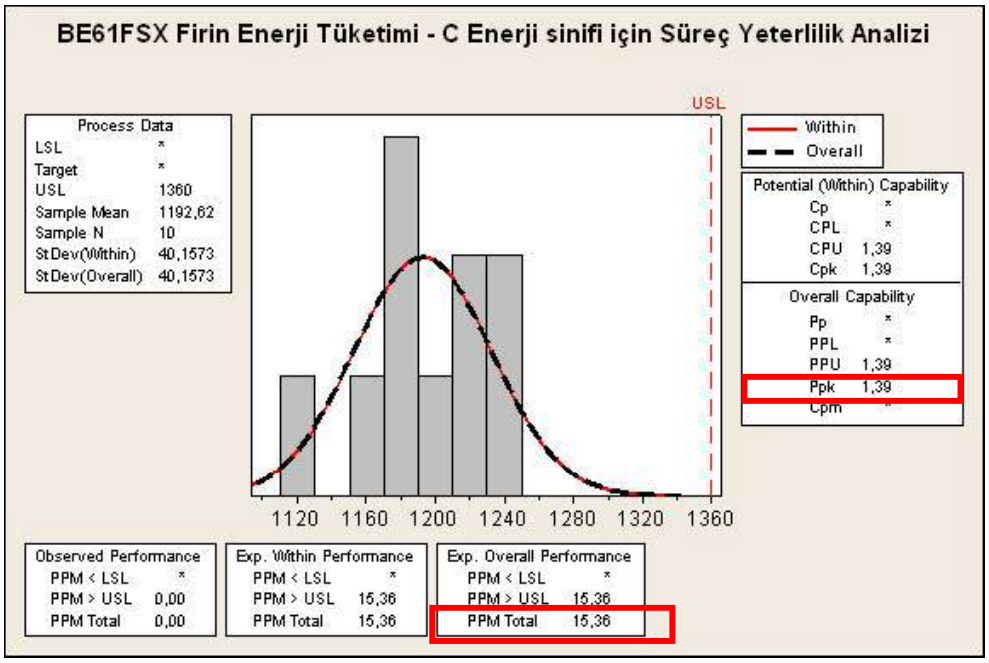
Şekil 3.7: Süreç yeterlilik analizi

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.

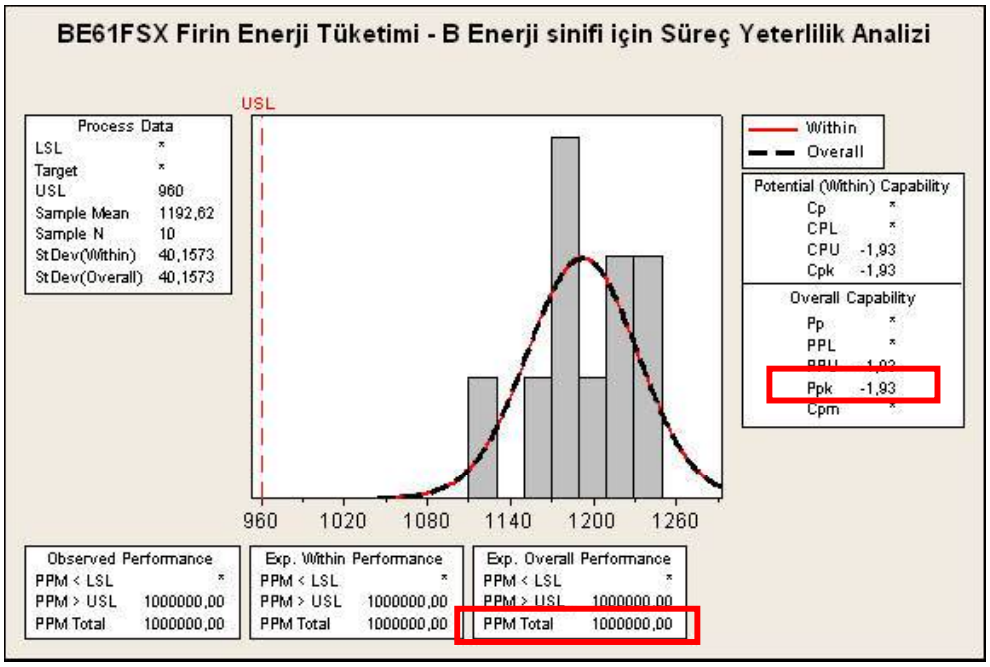
$$C_{pk} = min(\frac{\bar{x} - ASL}{3s}, \frac{USL - \bar{x}}{3s}) \qquad \textbf{(3.3)}$$

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.

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

l_{sac} = *0.0007 m,* k_{sac} = *60 W/mK*

l_{emaye} = *0.00005 m,* k_{emaye} = *1.046 W/mK*

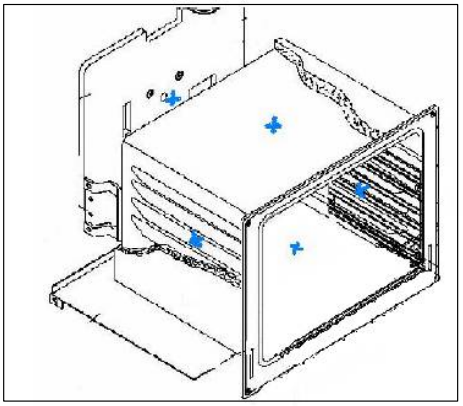
$l_{camyünü}$ = *0.02 m,* $k_{camyünü}$ = *0.041 W/mK*

0.02 m cam yünü kullanıldığı durumda K_{duvar}=*2.05 W/m*^{2}*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)
Sağ yan duvar	172
Sol yan duvar	174
Üst duvar	169
Alt duvar	164
Arka Duvar	176

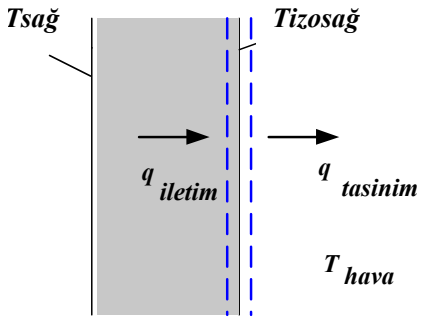


Şekil 4.1: Fırın iç duvarlarında sıcaklık ölçümü yapılan bölgeler

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

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

$$q_{iletim} - q_{tasinim} = 0 \qquad \textbf{(4.3)}$$

$$K_{duvar}.(T_{sag} - T_{izosag}) = h_{dsag}.(T_{izosag} - T_{hava}) \qquad \textbf{(4.4)}$$

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

$$T_{izosag} = \frac{K_{duvar}.T_{sag} + h_{dsag}.T_{hava}}{h_{dsag} + K_{duvar}} \qquad \textbf{(4.5)}$$

$h_{dışsağ}$ değerinin hesaplanması;

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

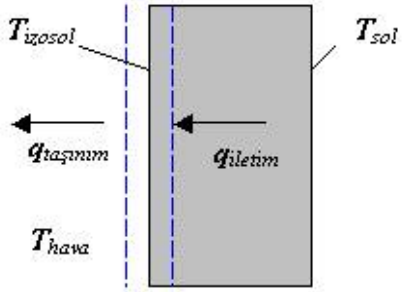
$$Ra = \frac{g.\beta.L^3.\Delta T}{\alpha.\nu} \qquad \textbf{(4.6)}$$

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

$$h_{dsag} = \frac{\overline{Nu}_L.k}{L} \qquad \textbf{(4.8)}$$

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

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

$$q_{iletim} - q_{ta\sin im} = 0 \qquad \textbf{(4.10)}$$

$$K_{du\,var}.(T_{sol} - T_{izosol}) = h_{dsol}.(T_{izosol} - T_{hava}) \qquad \textbf{(4.11)}$$

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

$$T_{izosol} = \frac{K_{du\,var}.T_{sol} + h_{dsol}.T_{hava}}{h_{dsol} + K_{du\,var}} \qquad \textbf{(4.12)}$$

$h_{dışsol}$ değerinin hesaplanması;

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

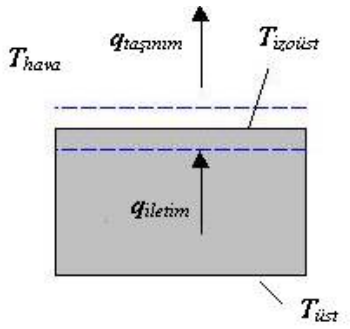
$$Ra = \frac{g.\beta.L^3.\Delta T}{\alpha.\nu} \qquad \textbf{(4.13)}$$

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

$$h_{dsol} = \frac{\overline{Nu}_L.k}{L} \qquad \textbf{(4.15)}$$

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

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

$$q_{iletim} - q_{ta\sin im} = 0 \qquad \textbf{(4.17)}$$

$$K_{du\,var}.(T_{üst} - T_{izoüst}) = h_{düst}.(T_{izoüst} - T_{hava}) \qquad \textbf{(4.18)}$$

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

$$T_{izoüst} = \frac{K_{du\,var}.T_{üst} + h_{düst}.T_{hava}}{h_{düst} + K_{du\,var}} \qquad \textbf{(4.19)}$$

$h_{dışüst}$ değerinin hesaplanması;

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

$$Ra = \frac{g.\beta.L^3.\Delta T}{\alpha.\nu} \qquad \textbf{(4.20)}$$

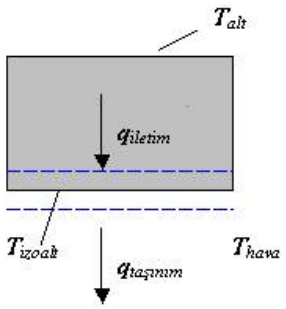
$$L = \frac{A_s}{P} \qquad \textbf{(4.21)}$$

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \qquad 10^5 \le Ra_L \le 10^{10} \qquad \textbf{(4.22)}$$

$$h_{düst} = \frac{\overline{Nu}_L.k}{L} \qquad \textbf{(4.23)}$$

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

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

$$q_{iletim} - q_{tasinim} = 0 \qquad \textbf{(4.25)}$$

$$K_{duvar}.(T_{alt} - T_{izoalt}) = h_{dalt}.(T_{izoalt} - T_{hava}) \qquad \textbf{(4.26)}$$

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

$$T_{izoalt} = \frac{K_{duvar}.T_{alt} + h_{dalt}.T_{hava}}{h_{dalt} + K_{duvar}} \qquad \textbf{(4.27)}$$

$h_{dışalt}$ değerinin hesaplanması;

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

$$Ra = \frac{g.\beta.L^3.\Delta T}{\alpha.\nu} \qquad \textbf{(4.28)}$$

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

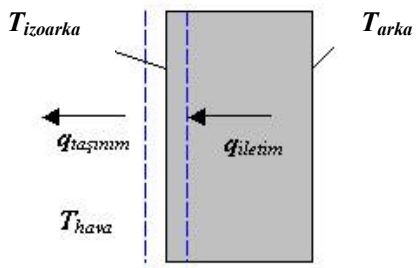
$$\overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \qquad 10^4 \le Ra_L \le 10^7 \qquad \textbf{(4.30)}$$

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

$$h_{dalt} = \frac{\overline{Nu}_L.k}{L} \qquad \textbf{(4.32)}$$

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

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

$$q_{iletim} - q_{ta\sin im} = 0 \qquad \textbf{(4.34)}$$

$$K_{du\,var}.(T_{sol} - T_{izoarka}) = h_{dsol}.(T_{izosol} - T_{hava}) \qquad \textbf{(4.35)}$$

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

$$T_{izoarka} = \frac{K_{du\,var}.T_{arka} + h_{darka}.T_{hava}}{h_{darka} + K_{du\,var}} \qquad \textbf{(4.36)}$$

$h_{dışarka}$ değerinin hesaplanması;

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

$$Ra = \frac{g.\beta.L^3.\Delta T}{\alpha.\nu} \qquad \textbf{(4.37)}$$

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

$$h_{darka} = \frac{\overline{Nu}_L.k}{L} \qquad \textbf{(4.39)}$$

4.1.6 Fırın duvarlarından olan ısıl kayıpların hesaplanması

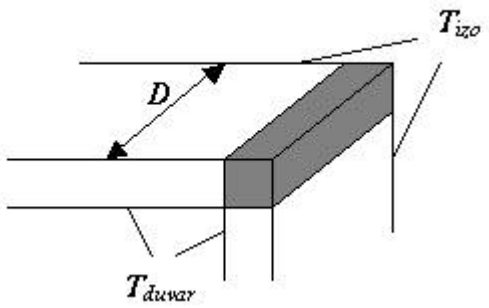
Fırın yalıtım yüzeylerinin sıcaklık değerlerinin ve ısı taşınım katsayılarının belirlenmesi için gerekli bağıntılar çıkartıldıktan sonra, fırın duvarları için toplam ısı geçiş katsayıları hesaplanmıştır.

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

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

$$Q_{du\,\mathrm{var}} = K.A_{du\,\mathrm{var}}.(T_{du\,\mathrm{var}} - T_{hava}) \quad \textbf{(4.41)}$$

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



Şekil 4.7: Bitişik duvarlarda köşelerden ısı iletimi

$$S = 0.54D \quad \textbf{(4.42)}$$

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

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

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 ısıl kayıplar hesaplanabilir. Farklı yalıtım kalınlıkları için elde edilen toplam kayıp karşılaştırıldığında, yalıtım kalınlığının ısıl 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 matematikse 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 ısıl özellikleri (k,ν,Pr..) hesaplamaktadır. Hesaplanan ısıl 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;

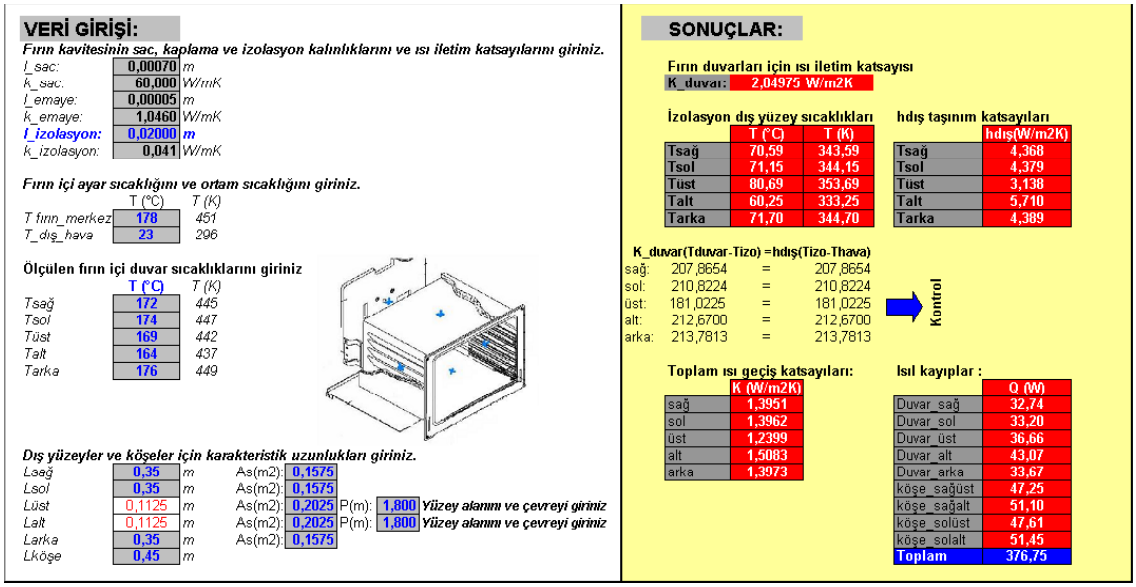
- Fırın duvarları için ısı iletim katsayısı
- Fırın duvarlarının yalıtım yüzeylerinin sıcaklıkları

- Fırın duvarlarının yalıtım yüzeylerinden olan taşınım için $h_{dış}$ ısı taşınım katsayıları

- Fırın duvarlarının toplam ısı geçiş katsayıları

- Tüm fırın duvarlarından ve kşelerden olan ısı kayıpları

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



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	Sağ yan duvar yalıtım yüzey sıcaklığının hesaplanması													
2	Tizosa	Tf	beta	L3	ν	alfa	RaL	RaL<109	Pr	Nu	k	hdsağ	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	350,7	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	0,003159	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*duvar* (W/m2K)
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*izosağ* (°C)	70.6	60.0	53.6
T*izosol* (°C)	71.1	60.4	53.9
T*izoüst* (°C)	80.7	68.8	61.4
T*izoalt* (°C)	60.2	51.5	46.4
T*izoarka* (°C)	71.7	60.8	54.3

Fırın duvarları için $h_{dış}$ taşınım katsayıları Tablo 4.4'de verilmektedir.

Tablo 4.4: Farklı yalıtım kalınlıkları için $h_{dış}$ ısı taşınım katsayıları

Yalıtım kalınlığı (m)	0.02	0.03	0.04
h*dış_sağ* (W/m2K)	4.37	4.14	3.97
h*dış_sol* (W/m2K)	4.38	4.15	3.98
h*dış_üst* (W/m2K)	3.14	2.99	2.87
h*dış_alt* (W/m2K)	5.71	5.38	5.15
h*dış_arka* (W/m2K)	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*sağ* (W/m2K)	1.40	1.03	0.81
K*sol* (W/m2K)	1.40	1.03	0.82
K*üst* (W/m2K)	1.24	0.94	0.76
K*alt* (W/m2K)	1.51	1.09	0.85
K*arka* (W/m2K)	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_sağ (W)	32.74	24.11	19.12
Qduvar_sol (W)	33.20	24.45	19.38
Qduvar_üst (W)	36.66	27.72	22.34
Qduvar_alt (W)	43.07	31.12	24.41
Qduvar_arka (W)	33.67	24.79	19.65
Qköşe_sağüst (W)	47.25	35.23	28.15
Qköşe_sağalt (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
Qtoplam (W)	**376,75**	**277,70**	**220,39**

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 ısıl kayıplardaki azalma % 42 olmaktadır.

4.2 Ön kapakta cam sayısının arttırılmasının ısı kayıplarına etkisi

Fırın kapağından olan ısı kayıpları,

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

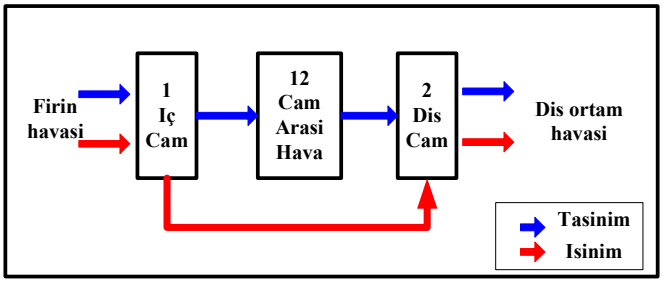
İki camlı ve üç camlı kapak için kapak kontrol hacimlerine ayrılmış ve kontrol hacimlerinin ısıl dengeleri yazılmıştır.

Kontrol hacimlerinde belirtilen sıcaklıklar, fırın sabit sıcaklık deneylerinde ilgili yerler için termoelemanlar ile sıcaklık ölçümü yapılarak belirlenmiştir. Fırın zorlanmış dolaşım ile ısıtma fonksiyonunda, ΔT =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 ısıl taşınım katsayılarının hesaplanması

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

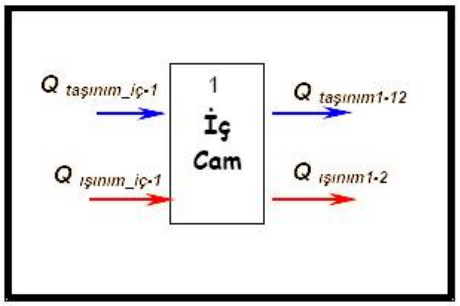


Şekil 4.10: Çift camlı ön kapakta ısı akışı şeması

Kontrol hacimlerinde ısı akısı dengesi yazılarak ısıl 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 akısı dengesi aşağıda verilmektedir.

$$Q_{ta\sin im_iç_1} + Q_{i\sin im_iç_1} = Q_{ta\sin im1_12} + Q_{i\sin im1-2} \qquad \textbf{(4.45)}$$

$h_{iç}$ 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 taşınımla 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.

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0,42}} = \frac{2}{3} A_{r,o}^{3/4} \left(\frac{2Re}{A_r / A_{r,o} + A_{r,o} / A_r} \right)^{2/3} \quad \textbf{(4.46)}$$

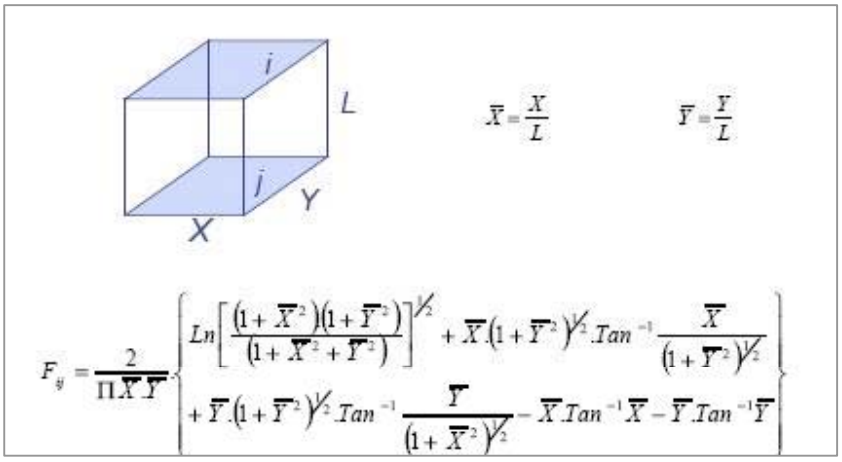
$$A_{r,o} = \left[60 + 4\left(\frac{H}{2W} - 2 \right)^2 \right]^{-1/2} \quad \textbf{(4.47)}$$

$$A_r = W / S \quad \textbf{(4.48)}$$

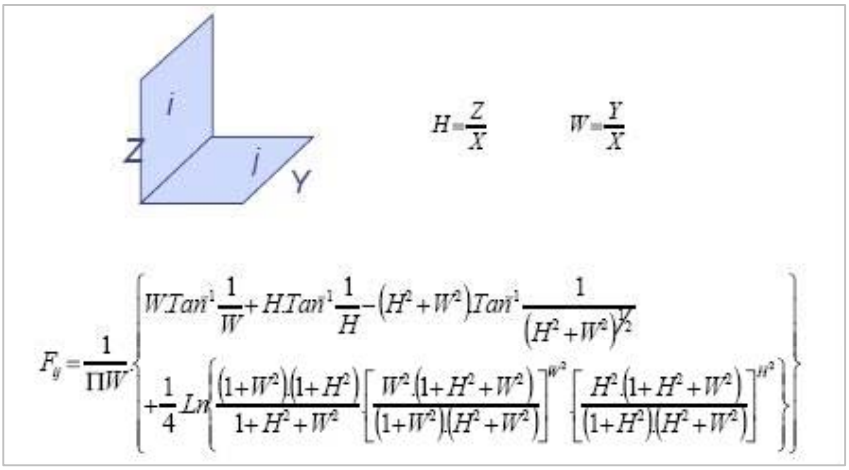
$$h_{iç} = \frac{\overline{Nu}_D .k}{D_h} \quad \textbf{(4.49)}$$

$$q_{ta\,\sin im_iç_1} = h_{iç} .(T_{iç} - T_1) \quad \textbf{(4.50)}$$

İç cam ile fırın içi ortam arasındaki ışınım bağıntısı için, fırın duvar sıcaklıklarının eşit olduğu kabulü yapılmıştır. İç cam ile fırın duvar yüzeyleri arasındaki ışınımla 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_{i1} görüş faktörü paralel levhalar haline göre hesaplanmıştır. Alt, üst ve yan duvarlar için F_{i1} 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 ışınımla ısı geçişi için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$q_{i1} = \frac{\sigma.(T_{du\,\mathrm{var}}^4 - T_1^4)}{\frac{1-\varepsilon_d}{\varepsilon_d A_i} + \frac{1}{A_i F_{i1}} + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} \qquad \textbf{(4.51)}$$

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

$$q_{i\sin im_iç_1} = \sum_{i=1}^{N} q_{i1} = \sigma(T_{du\,\mathrm{var}}^4 - T_1^4)\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_d}{\varepsilon_d A_i} + \frac{1}{A_i F_{i1}} + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} \qquad \textbf{(4.52)}$$

Bu denkleme göre ışınım katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$h_{i\sin im_iç_1} = \sigma.(T_{du\,\mathrm{var}}^4 + T_1^4).(T_{du\,\mathrm{var}} + T_1).\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_d}{\varepsilon_d A_i} + \frac{1}{A_i F_{i1}} + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} \qquad \textbf{(4.53)}$$

İç cam için ε_1=0,23 ve fırın duvarları için ε_d=0,98 alınmıştır.

İki cam arasında zorlanmış taşınımla 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;

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{4.54}$$

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

$$Nu = 7.54 \tag{4.55}$$

$$h_{ta\,\sin im_ara} = \frac{Nu.k}{D_h} \tag{4.56}$$

Camlar arası ışınım için paralel levha formülü kullanılmıştır.

$$q_{i\,\sin im_1_2} = \frac{\sigma.(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{dis}} - 1} \tag{4.57}$$

$$h_{i\,\sin im_1_2} = (T_1^2 + T_2^2).(T_1 + T_2).\sigma.\left(\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{dis}} - 1}\right) \tag{4.58}$$

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

$$T_1 = \frac{h_{ta\,\sin im_iç} T_{iç} + h_{ta\,\sin im_ara} T_{12} + q_{i\,\sin i_iç-1} - q_{i\,\sin im_1_2}}{(h_{ta\,\sin im_ara} + h_{ta\,\sin im_iç})} \tag{4.59}$$

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.

$$Q_{ta\,\sin im1_12} = Q_{ta\,\sin im12-2} \tag{4.60}$$

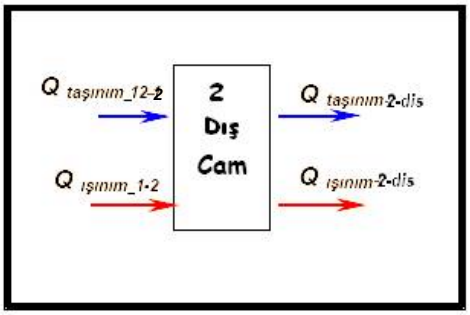
$$q_{ta\,\sin im_1_12} = h_{12}.(T_1 - T_{12}) \tag{4.61}$$

$$q_{ta\,\sin im_12_2} = h_{12}.(T_{12} - T_2) \tag{4.62}$$

$$T_{12} = \frac{T_1 + T_2}{2} \tag{4.63}$$

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 ısıl taşınım katsayısı hesaplanmıştır [24].

$$Ra = \frac{g.\beta.L^3.\Delta T}{\alpha.\nu} \tag{4.64}$$

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

$$h_{dis} = \frac{\overline{Nu}_L.k}{L} \tag{4.66}$$

Dış cam ile ortam arasındaki ışınım bağıntısı aşağıda verilmektedir.

$$q_{i\sin im_2_dis} = \varepsilon_{dis}.\sigma.(T_2^4 - T_{dis}^4) \tag{4.67}$$

Bu denkleme göre ışınım katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Dış cam için ε_{dis}=0,9 alınmıştır.

$$h_{i\sin im_2_dis} = \varepsilon_{dis}.\sigma.(T_2^2 + T_{dis}^2).(T_2 + T_{dis}) \tag{4.68}$$

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

$$T_2 = \frac{h_{ta\,\sin im_ara} T_{12} + h_{ta\,\sin im_dis} T_{dis} + q_{i\,\sin im_12} - q_{i\,\sin im_2dis}}{(h_{ta\,\sin im_ara} + h_{ta\,\sin im_dis})} \quad \textbf{(4.69)}$$

4.2.1.4 Çift camlı kapaktan olan ısı kaybının hesaplanması

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

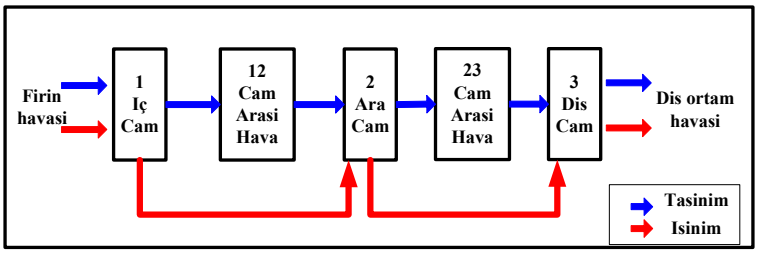
$$K = 1/\left[\frac{1}{h_{ta\,\sin im_iç} + h_{i\,\sin im_iç_1}} + \frac{l}{k_{cam}} + \frac{1}{h_{ta\,\sin im_ara} + h_{i\,\sin im_12}} + \frac{l}{k_{cam}} + \frac{1}{h_{ta\,\sin im_dis} + h_{i\,\sin im_2dis}} \right] \quad \textbf{(4.70)}$$

Cam için *k=1,4W/mK* alınmıştır.

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

4.2.2 Üç camlı ön kapak için ısıl taşınım katsayılarının hesaplanması

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

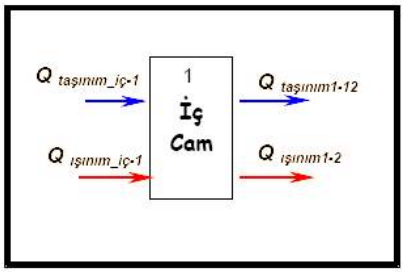


Şekil 4.15: Üç camlı ön kapakta ısı akışı şeması

Kontrol hacimlerinde ısı akısı dengesi yazılarak ısıl 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.

$$Q_{ta\sin im_iç_1} + Q_{i\sin im_iç_1} = Q_{ta\sin im1_12} + Q_{i\sin im1-2} \quad \textbf{(4.72)}$$

$h_{iç}$ 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 ışınım için çift camlı kapakta verilen durum ile aynıdır. İç ortam ile ön kapak iç cam yüzeyi arasındaki ışınımla ısı geçişi için ışınım katsayısı (4.53) numaralı bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

İç cam ve ara cam arası hava boşluğu tek tarafından ısıtılan dar boşluklarda doğal taşınım problemidir. 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.

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

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

$$h_{ta\sin im_ara1} = \frac{Nu_\delta.k}{\delta} \quad \textbf{(4.75)}$$

İç cam ile ara cam arasındaki boşluk δ=0,0065m'dir.

Camlar arası ışınım için paralel levha formülü kullanılmıştır. İkinci cam (ara cam) için ε_2=0,9 alınmıştır.

$$q_{i\sin im_1_2} = \frac{\sigma.(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \textbf{(4.76)}$$

$$h_{i\sin im_1_2} = (T_1^2 + T_2^2).(T_1 + T_2).\sigma.(\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}) \quad \textbf{(4.77)}$$

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

$$T_1 = \frac{h_{ta\sin im_iç} T_{iç} + h_{ta\sin im_ara1} T_{12} + q_{i\sin i_iç-1} - q_{i\sin im_1_2}}{(h_{ta\sin im_ara1} + h_{ta\sin im_iç})} \quad \textbf{(4.78)}$$

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.

$$Q_{ta\sin im1_12} = Q_{ta\sin im12-2} \quad \textbf{(4.79)}$$

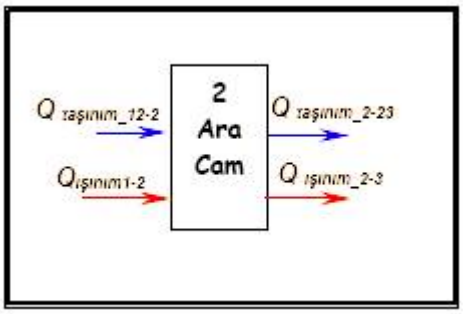
$$q_{ta\sin im_1_12} = h_{12}.(T_1 - T_{12}) \quad \textbf{(4.80)}$$

$$q_{ta\sin im_12_2} = h_{12}.(T_{12} - T_2) \quad \textbf{(4.81)}$$

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

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 taşınımla 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;

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{4.83}$$

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

$$Nu = 7.54 \tag{4.84}$$

$$h_{ta\sin im_ara2} = \frac{Nu.k}{D_h} \tag{4.85}$$

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

$$q_{i\sin im_2_3} = \frac{\sigma.(T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_{dis}} - 1} \tag{4.86}$$

$$h_{i\sin im_2_3} = (T_2^4 + T_3^4).(T_2 + T_3).\sigma.(\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_{dis}} - 1}) \tag{4.87}$$

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

$$T_2 = \frac{h_{ta\sin im_ara1}T_{12} + h_{ta\sin im_ara2}T_3 + q_{i\sin im_12} - q_{i\sin im_23}}{(h_{ta\sin im_ara1} + h_{ta\sin im_ara2})} \tag{4.88}$$

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.

$$Q_{ta\sin im2_23} = Q_{ta\sin im23-3} \tag{4.89}$$

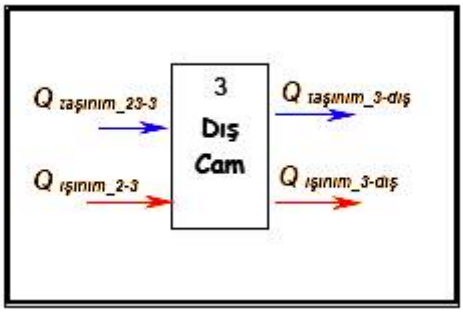
$$q_{ta\sin im_2_23} = h_{23}.(T_2 - T_{23}) \tag{4.90}$$

$$q_{ta\sin im_23_3} = h_{23}.(T_{23} - T_3) \quad \textbf{(4.91)}$$

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

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 ısıl taşınım katsayısı hesaplanmıştır.

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

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

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

Dış cam ile ortam arasındaki ışınım bağıntısı aşağıda verilmektedir.

$$q_{i\sin im_3_dis} = \varepsilon_{dis}.\sigma.(T_3^4 - T_{dis}^4) \quad \textbf{(4.96)}$$

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

$$h_{i\sin im_3_disortam} = \varepsilon_{dis}.\sigma.(T_3^2 + T_{dis}^2).(T_3 + T_{dis}) \quad \textbf{(4.97)}$$

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

$$T_3 = \frac{h_{ta\sin im_ara2} T_{23} + h_{ta\sin im_dis} T_{dis} + q_{i\sin im_23} - q_{i\sin im_3dis}}{(h_{ta\sin im_ara2} + h_{ta\sin im_dis})} \quad \textbf{(4.98)}$$

4.2.2.6 Üç camlı kapaktan olan ısı kaybının hesaplanması

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

$$K = 1/\left[\frac{1}{h_{ta\sin im_iç} + h_{i\sin im_iç_1}} + \frac{l}{k_{cam}} + \frac{1}{h_{ta\sin im_ara1} + h_{i\sin im_12}} + \frac{l}{k_{cam}} \right.$$

$$\left. + \frac{1}{h_{ta\sin im_23} + h_{i\sin im_23}} + \frac{l}{k_{cam}} + \frac{1}{h_{ta\sin im_dis} + h_{i\sin im_3dis}} \right] \quad \textbf{(4.99)}$$

Cam için *k=1,4W/mK* alınmıştır.

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

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 ışınım katsayılarını veren bağıntılar çıkartılmıştır. Isı taşınım ve ışınım 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,ν,Pr..) hesaplamaktadır. Hesaplanan ısıl özellikleri kullanarak, ısı taşınım ve ışınım 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.

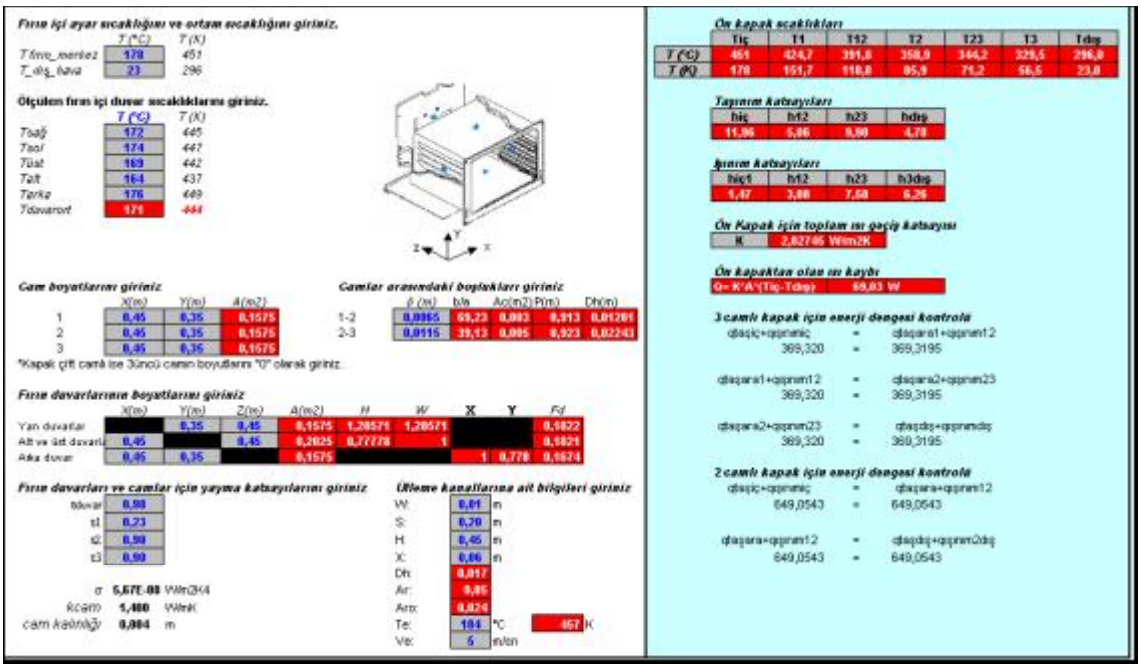
Kullanıcının programa girmesi gereken değerler şunlardır;

- 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;

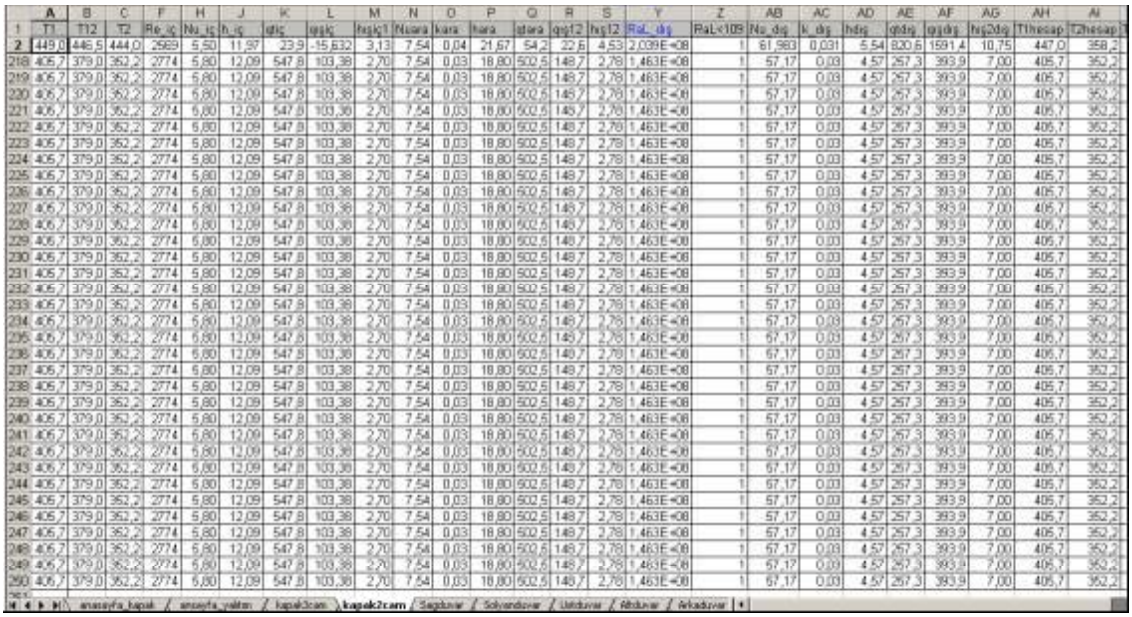
- Ön kapak cam yüzeylerinin ve camlar arası havanın sıcaklıkları
- Taşınım ve ışınım katsayıları
- Kapak için toplam ısı geçiş katsayısı
- Ön kapaktan olan ısı kaybı

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.



	A	B	C	F	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	Y	Z	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
1	T1	T12	T2	Re_iç	Nu_iç	h_iç	qiç	qşiç	hşiç1	Nusra	kara	hara	qtara	qşç12	hş12	RaL_dış	RaL<109	Nu_dış	k_dış	hdış	qtdış	qşdış	hş2dış	Thesap	Tzhesap
2	449,0	446,5	444,0	2989	5,50	11,97	23,9	-15,632	3,13	7,54	0,04	21,67	54,2	22,6	4,53	2,039E+08	1	61,980	0,031	5,54	820,6	1591,4	10,75	447,0	358,2
216	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
219	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
220	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
221	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
222	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
223	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
224	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
225	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
226	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
227	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
228	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
229	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
230	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
231	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
232	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
233	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
234	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
235	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
236	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
237	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
238	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
239	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
240	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
241	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
242	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
243	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
244	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
245	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
246	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
247	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
248	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
249	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2
250	406,7	379,0	352,2	2774	5,80	12,09	547,8	103,36	2,70	7,54	0,03	18,80	502,5	148,7	2,78	1,463E+08	1	57,17	0,03	4,57	257,3	393,9	7,00	405,7	352,2

ana sayfa_kapak / ana sayfa_yalıtım / kapak2cam / kapak2cam / Sağduvar / Solduvar / Üstduvar / Altduvar / Arkaduvar

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

	$T_{iç}$	T_1	T_{12}	T_2	T_{23}	T_3	$T_{dış}$
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, ışınım ve toplam ısı geçiş katsayıları Tablo 4.9'da verilmektedir.

Tablo 4.9: Model ile hesaplanan taşınım, ışınım 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
hışınım_iç1 (W/m2K)	2.8	1.5
hışınım_12 (W/m2K)	2.8	3.1
hışınım_23 (W/m2K)	-	7.6
hışınım_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. DENEYSEL İNCELEME

Enerji tüketiminin azaltılması istenen fırının mevcut durumu incelendiğinde

- Yalıtım kalınlığının arttırılması
- Ön kapak cam sayısının arttırılması
- 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].

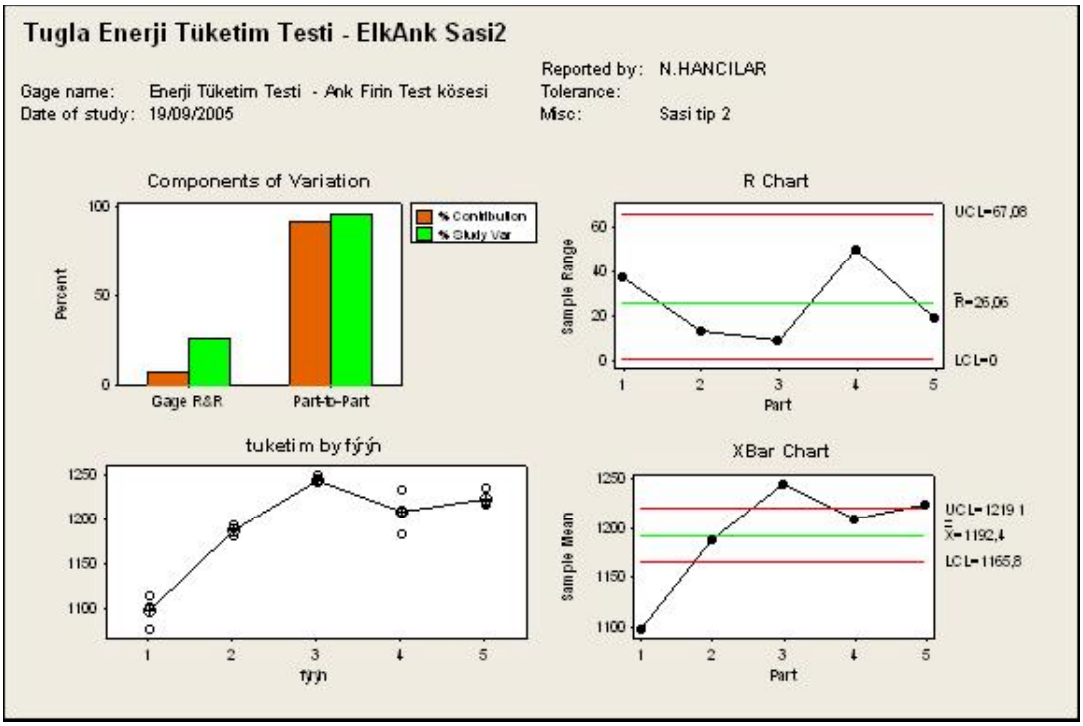
Yöntemin uygulamasında enerji tüketimi ölçülecek fırınların mevcut ölçüm sistemi ile tekrarlı ölçümleri alınmış, tekrarlı ölçümlerde görülen değişkenliğin büyüklüğü %R&R indeksi ile değerlendirilmiştir.

$$\%R\,\&\,R = \frac{s_{ölçümsistemi}}{s_{toplam}}$$

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

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for tuketim

Gage name: Enerji Tüketim Testi - Ank Firin Test kösesi
Date of study: 19/09/2005
Reported by: N.HANCILAR
Tolerance:
Misc: Sasi tip 2

One-Way ANOVA Table

Source	DF	SS	MS	F	P
fırın	4	39121,1	9780,26	40,2680	0,000
Repeatability	10	2428,8	242,88		
Total	14	41549,8			

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	242,88	7,10
Repeatability	242,88	7,10
Part-To-Part	3179,13	92,90
Total Variation	3422,01	100,00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%R&R (%SV)
Total Gage R&R	15,5846	93,508	**26,64**
Repeatability	15,5846	93,508	26,64
Part-To-Part	56,3838	338,303	96,39
Total Variation	58,4979	350,988	100,00

Number of Distinct Categories = 5

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 contalı, (+1)Bacalı-o contalı

Karşılaştırmalı 8 test için tuğla testi sadece 155K için yapılmıştır. Tek sıcaklıkta yapılan ölçüm sistemi yeterliliği buna izin vermiştir. Böylelikle üç sıcaklık ayarı için 8x3=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.

Factorial Fit: Tüketim(Wh) versus fırın içi(K); yaş ağırlık; ...

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
Camsayi	-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 kütlesi 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.

Factorial Fit: Tüketim (Wh) versus izolasyon; Camsayi; Baca

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
Camsayi	-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)

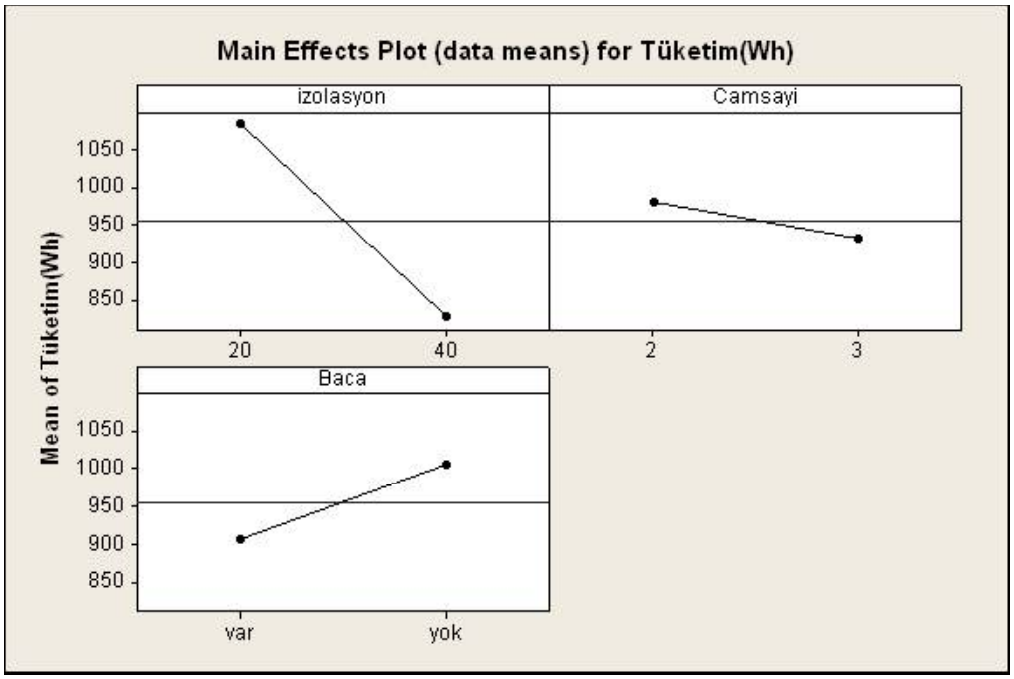
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	155501	155501	51833,8	137,19	0,001
2-Way Interactions	1	2113	2113	2112,5	5,59	0,099
Residual Error	3	1134	1134	377,8		
Total	7	158747				

Estimated Coefficients for Tüketim(Wh) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	1340,00
izolasyon	-12,8250
Camsayi	-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.



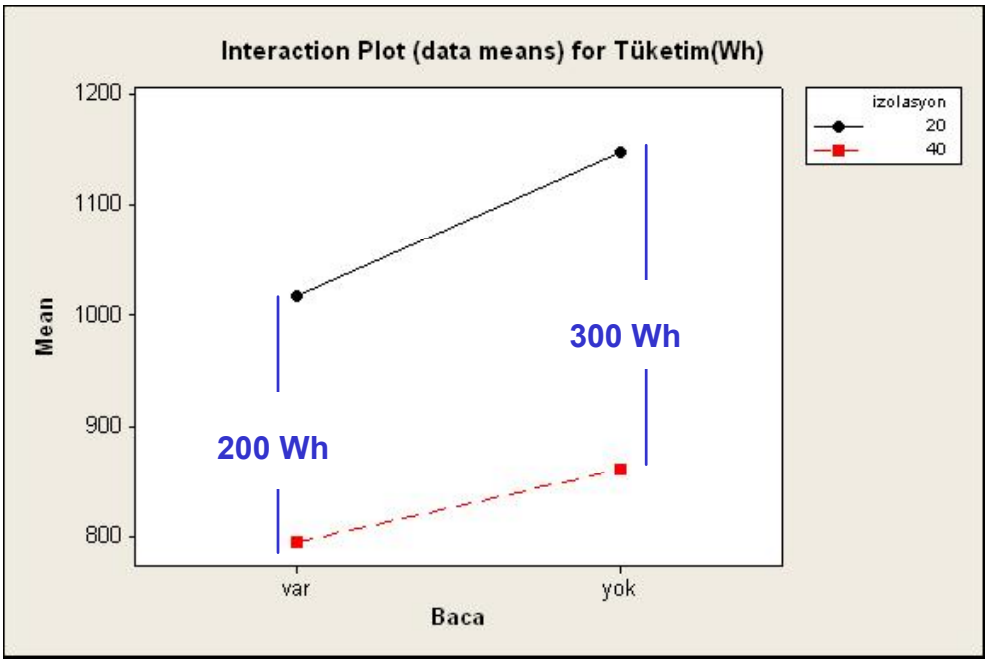
Şekil 5.6: Ana etkiler grafiği

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.

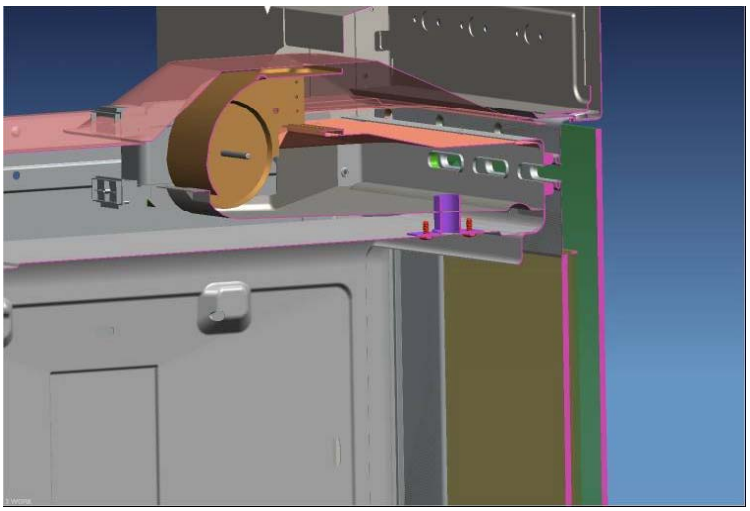
"O" tipi conta kullanılan bacalı fırınların enerji tüketiminin, "U" tipi conta kullanılan bacasız fırınların enerji tüketimine göre 100 Wh düşük olması (% 10 iyileşme) beklenmektedir.

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

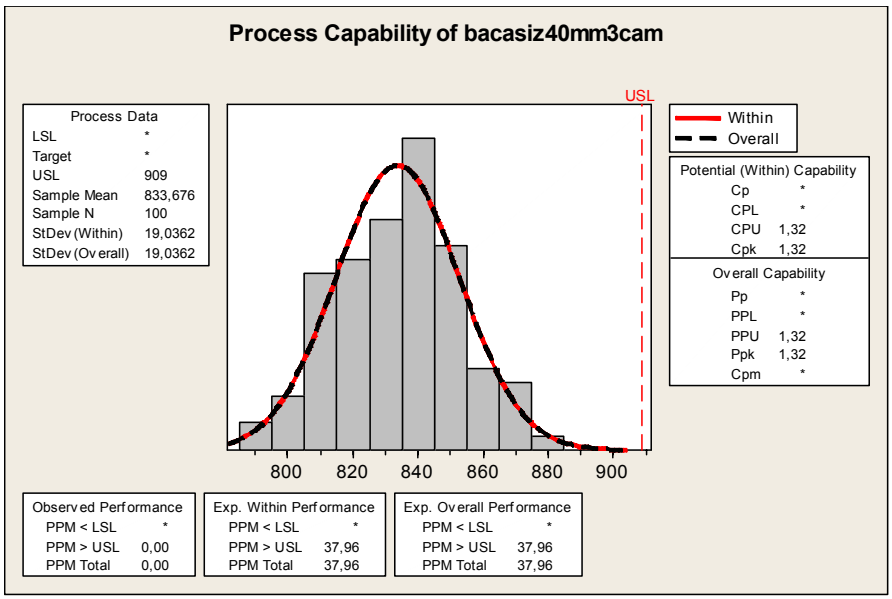
Deneyler sonucunda en iyi sonucun 40 mm yalıtım kalınlığı ve 3 camlı ön kapağı olan, Şekil 5.8'de gösterildiği gibi emiş kanalına açılan baca ilave edilmiş fırınlara ait olduğu görülmüştür. Ancak bu çözüm baca ilavesi için fırın bölmesinde kalıp yatırımı gerektiren ve malzeme çeşitliliğine sebep olacak 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. Deney sonuçları bu özellikteki fırınlar için ortalama enerji tüketiminin 835 Wh ve standart sapmasının 19 Wh olmasını öngörmektedir. Bu değerler A enerji sınıfı toleranslarını karşılamaktadır. Deneyde 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, üretilecek fırınlarda A enerji sınıfı kriterlerini karşılamama oranı 38 ppm olacaktır.



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

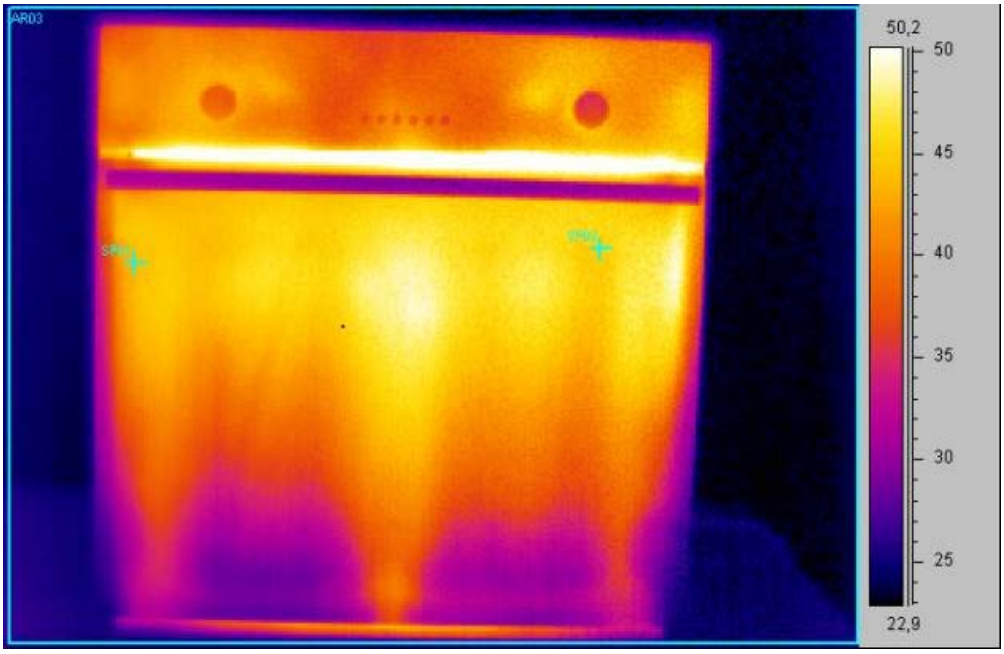
Bu sonucu doğrulamak amacıyla 2 adet doğrulama deneyi yapılmıştır.

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

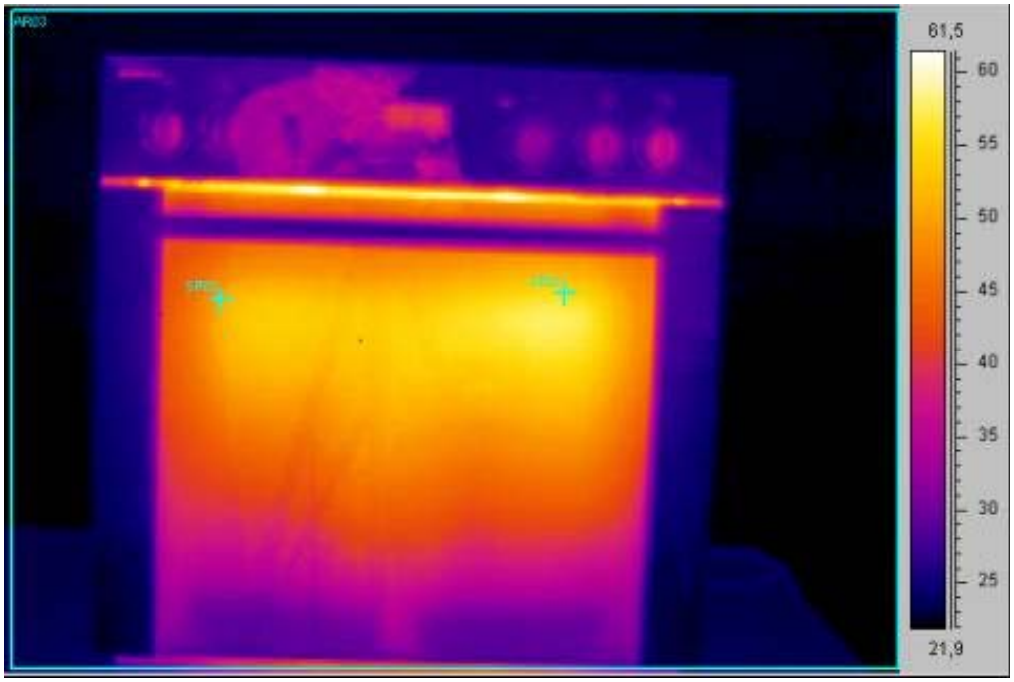
A sınıfı enerji tüketim seviyesini gerçekleyen üç camlı ön kapağı olan, 40mm yalıtım kalınlığına sahip, bacasız fırın ile C sınıfı enerji seviyesini sağlayan iki camlı ön kapağı olan, 20mm yalıtım kalınlığına sahip, bacasız fırında 1 saatlik çalıştırma sonucunda yapılan termal kamera ölçümleri kapak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

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



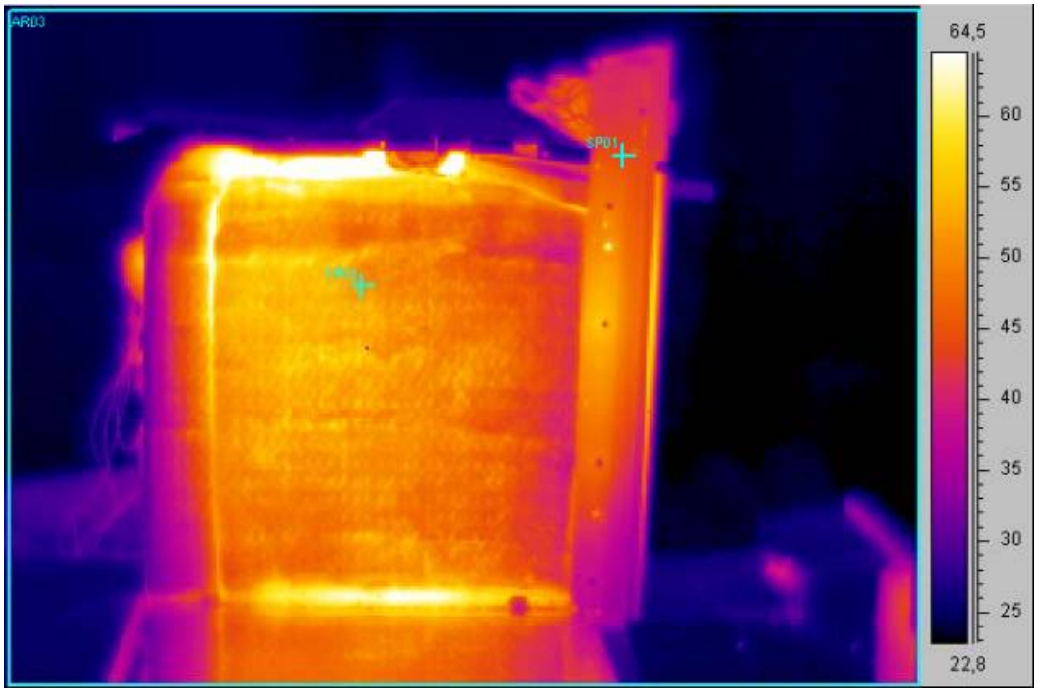
Şekil 5.10: A enerji sınıfını sağlayan fırın için ön kapak termal kamera ölçümü

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



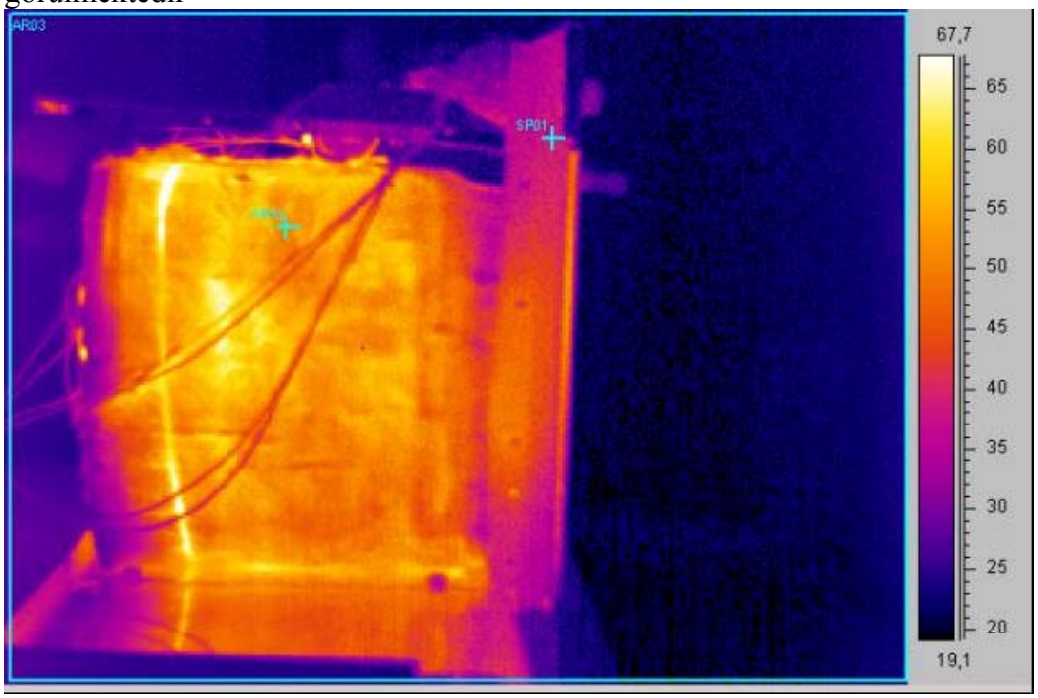
Şekil 5.11: C enerji sınıfını sağlayan fırın için ön kapak termal kamera ölçümü

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 yalıtımı 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 yalıtımı 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 elektirikli fırının enerji tüketimini azaltacak yöntemler incelenmiş ve uygulanmıştır. Kaynak ve patentlerde tavsiye edilen yöntemler araştırılmış, seçilen fırının mevcut durumu analiz edilmiştir. Yalıtım kalınlığının arttırılması ve ön kapakta cam sayısının arttırılması 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 arttırılması 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 yapılarda 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., Armanni 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, Whirpool 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. Fundementals of Heat and Mass Transfer, pp.493., John Wiley and Sons

[25] DeWitt D. P., Incropera F. P., 1996. Fundementals of Heat and Mass Transfer, pp.498., John Wiley and Sons

[26] DeWitt D. P., Incropera F. P., 1996. Fundementals 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. Fundementals of Heat and Mass Transfer, pp.392., John Wiley and Sons

[30] DeWitt D. P., Incropera F. P., 1996. Fundementals of Heat and Mass Transfer, pp.723., John Wiley and Sons

[31] DeWitt D. P., Incropera F. P., 1996. Fundementals of Heat and Mass Transfer, pp.450., John Wiley and Sons

[32] DeWitt D. P., Incropera F. P., 1996. Fundementals 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.