

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ FIRINLARDA ENERJİ TÜKETİM
DENEYLERİNİN MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Müh. Haluk KARATAŞ
503041114**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Taner DERBENTLİ

**Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği
Programı: Isı-Akışkan**

MAYIS 2007

**ELEKTRİKLİ FIRINLARDA ENERJİ TÜKETİM
DENEYLERİNİN MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Müh. Haluk KARATAŞ
503041114

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2007

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Taner DERBENTLİ

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Feridun ÖZGÜÇ

Prof.Dr. Onur DEVRES

TEMMUZ 2007

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan değerli hocam Sn. Prof. Dr. Taner DERBENTLİ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan ve çalışmaya destek olan Arçelik Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, başta Sn. Cemil İNAN ve Sn. Fatih ÖZKADI'nın şahsında teşekkür ederim.

Çalışmanın her aşamasında desteğini esirgemeyen, değerli fikirleri ve eleştirileriyle çalışmaya katkıda bulunan Sn. Dr. Levent AKDAĞ'a, Sn. Dr. Deniz ŞEKER'e, Sn. Bekir ÖZYURT'a, Sn. Aslı KAYIHAN'a ve Sn. Murat KANTAŞ'a ; deneysel çalışmalarındaki katkılarından dolayı Sn. Mehmet MARAŞLI ve yapılan çalışmaya katkılarından dolayı Arçelik ARGE Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca verdikleri destekten dolayı Sn. Mehmet TOLAY, Sn. Ahmet BOZGEYİK, Sn. Fatih SÜZEK, Sn. Kemal Erdem YURTPINAR, Sn. Berç ULUK ve tüm Arçelik ARGE Yüksek Lisans Öğrencileri'ne teşekkür ederim.

Son olarak, tüm bu teşekkürlerin ötesinde, hayatım boyunca her adımda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını hissettiren sevgili AİLEM ve tüm dostlarıma şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2007

Haluk KARATAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Pişirme Hacmi İçi Akışın Modellendiği Çalışmaların İncelenmesi	4
2.2 Isı Taşınım Katsayısının Belirlendiği Çalışmaların İncelenmesi	5
2.3 Hedef Yiyecek/Malzeme İçi Isı Geçişinin Modellendiği Çalışmaların İncelenmesi	7
3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	13
3.1 Enerji Tüketim Deneyi	13
3.1.1 Tuğla testi standardı	13
3.2 Akış Ölçümleri	19
3.2.1 FKS üfleme delikleri	20
3.2.2 Tuğla ve pişirme hacmi iç duvarı çevresi	20
4 MODELLEME ÇALIŞMALARI	26
4.1 Pişirme Hacmi İçi Akışın Modellenmesi	26
4.1.1 Matematik Model	26
4.1.2 Sayısal Çözüm	31

4.1.3	2-D Modelleme	32
4.1.4	3-D Modelleme	36
4.2	Tuğla Isı Geçişinin Modellemesi	41
5	TAŞINIMLA ISI GEÇİŞ KATSAYISI HESABI	43
6	SONUÇLAR VE İRDELEMELER	46
6.1	2-D modelleme sonuçları	46
6.2	3-D modelleme sonuçları	48
6.2.1	Konfigürasyon 1	49
6.2.2	Konfigürasyon 2	53
6.2.3	Konfigürasyon 3	56
6.2.4	Konfigürasyon 4	59
6.2.5	Isı taşınım katsayısı	61
6.3	İleri Çalışmalar	64
7	KAYNAKLAR	65
8	ÖZGEÇMİŞ	68

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3-1 Tuğla malzeme termofiziksel özellikleri [51].....	13
Tablo 3-2 Ortalama fırın içi sıcaklığı[42]	17
Tablo 4-1 Motor gücü ve fan hızı.....	41
Tablo 4-2 Sınır şart setleri	41
Tablo 5-1 Nu bağıntıları (Igarashi, 1987)	44
Tablo 6-1 Tuğla sağ yan yüzey entegre hız ve Re değeri	61
Tablo 6-2 Nu ve h ($W/m^2.K$) değerleri.....	62
Tablo 6-3 Tuğla ve pişirme hacmi yüzeylerinde ısı taşınım katsayıları.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2-1 Çözüm geometrisi	5
Şekil 2-2 Farklı yiyecek şekil ve boyut oranları	6
Şekil 2-3 Yiyecek etrafında akış iplikleri	6
Şekil 2-4 Deneysel ve Çözümleme sonuçları karşılaştırılması.....	7
Şekil 2-5 Pişirme sırasında gıdada eş zamanlı gerçekleşen ısı ve kütle transferi	9
Şekil 2-6 Rosto yüzeyindeki ısı denge [5]	9
Şekil 2-7 Merkez noktası sıcaklık zaman grafiği model-deney sonuçları [5]	10
Şekil 2-8 Kabuk oluşumunun şematik gösterimi [13]	11
Şekil 3-1 Tuğla boyutları ve termoeleman yerleşimi.....	14
Şekil 3-2 Ortam sıcaklığı ölçümü için termoeleman yerleşimi	14
Şekil 3-3 Fırın kullanılabilir hacmi hesaplanması	15
Şekil 3-4 Deney ölçüm düzeneği	19
Şekil 3-5 Pitot hız ölçüm düzeneği	21
Şekil 3-6 PIV ölçüm yöntemi temel prensibi.....	22
Şekil 3-7 Akış görüntülerinin sayısal işlenmesi.....	23
Şekil 3-8 PIV deney düzeneği yerleşimi.....	23
Şekil 3-9 Pişirme hacmi saydam yüzeyler	24
Şekil 3-10 Duman Üretici	25
Şekil 3-11 Lazer üretici konumlandırması	25
Şekil 4-1 Diferansiyel kontrol hacmi	27
Şekil 4-2 Fırın pişirme hacminin yatay kesiti	33

Şekil 4-3 2-D Ağ yapısı	34
Şekil 4-4 Tuğla yakınında ağ yapısı detayı.....	34
Şekil 4-5 3-D modelleme geometrisi	37
Şekil 4-6 Fan, ısıtıcı ve FKS	37
Şekil 4-7 FKS ve Tuğla	38
Şekil 4-8 Hibrid ağ yapısı	39
Şekil 4-9 Tuğla yüzeylerinde yığılı ağ yapısı	40
Şekil 4-10 Tuğla yüzeyi ağ yapısı.....	40
Şekil 6-1 Hıza göre renklendirilmiş akış çizgileri (m/s).....	46
Şekil 6-2 Pişirme hacmi içerisinde hava hızı dağılımı (m/s)	47
Şekil 6-3 Tuğla yüzeyleri hız dağılımı	47
Şekil 6-4 Pişirme hacmi sıcaklık dağılımı (K).....	48
Şekil 6-5 FKS delik numaraları	49
Şekil 6-6 1400 rpm tüm delikler açık delik 1–2 hız dağılımı (m/s).....	49
Şekil 6-7 1400 rpm tüm delikler açık delik 3–4 hız dağılımı (m/s).....	50
Şekil 6-8 1400 rpm tüm delikler açık delik 5–6 hız dağılımı (m/s).....	50
Şekil 6-9 1400 rpm tüm delikler açık üfleme delik ortalama hızları HAD ve deneysel sonuçlar	51
Şekil 6-10 1400 rpm tüm delikler açık HAD vektör dağılımı (m/s).....	52
Şekil 6-11 1400 rpm tüm delikler açık PIV vektör dağılımı (m/s)	52
Şekil 6-12 1400 rpm 3ve 4. delikler açık hız dağılımı (m/s)	53
Şekil 6-13 1400 rpm 3. ve 4. delikler açık delik ortalama hava hızları	54
Şekil 6-14 1400 rpm 3. ve 4. delikler açık tuğla yan yüzey HAD vektör alanı (m/s)	55
Şekil 6-15 1400 rpm 3. ve 4. delikler açık PIV vektör alanı (m/s)	55
Şekil 6-16 2200 rpm FKS tüm delikler açık 1. ve 2. delik kesitleri hız dağılımı (m/s)	56
Şekil 6-17 2200 rpm tüm delikler açık 3. ve 4. delikler hız dağılımı (m/s).....	56

Şekil 6-18 2200 rpm FKS tüm delikler açık 5. ve 6. delik yatay kesit hız dağılımı (m/s)	57
Şekil 6-19 2200 rpm FKS tüm delikler açık delik ortalama hava hızları	57
Şekil 6-20 2200 rpm tüm delikler açık tuğla yan yüzeyinde HAD vektör alanı (m/s)	58
Şekil 6-21 2200 rpm FKS tüm delikler açık tuğla yan yüzeyi PIV vektör alanı (m/s)	58
Şekil 6-22 2200 rpm FKS 3. ve 4. delikler açık yatay kesitte hız dağılımı (m/s).....	59
Şekil 6-23 2200 rpm FKS 3. ve 4. delikler açık delik ortalama hız karşılaştırması (m/s)	60
Şekil 6-24 2200 rpm FKS 3. ve 4. delikler açık tuğla yan yüzey HAD vektör alanı (m/s)	60
Şekil 6-25 2200 rpm FKS 3. ve 4. delikler açık tuğla yan yüzeyi PIV vektör alanı (m/s)	61
Şekil 6-26 Tuğla sağ yan yüzey ısı taşınım katsayısı analitik hesap ve HAD.....	62
Şekil 6-27 Tuğla sağ yan yüzey ısı taşınım katsayısı	63

SEMBOL LİSTESİ

A	: Alan
A_{xi}	: i eksenine dik alan
C₁, C₂, C₃	: k- ε modeli sabitleri
C_p	: Özgül ısı
d	: Pişirme hacmi kullanılabilir yüksekliği
D_φ	: Yayınım katsayısı
E	: İç enerji
e	: Pişirme hacmi kullanılabilir genişliği
f	: Pişirme hacmi kullanılabilir derinliği
F_{yi}	: Yayınım terimi
f_{e,j}	: Dış kuvvetler
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Entalpi
h	: Isı taşınım katsayısı
h_m	: Taşınım kütle transfer katsayısı
k	: Türbülans kinetik enerjisi
L	: Karakteristik uzunluk
L_v	: Buharlaştırma ısısı
Δm	: Tuğlanın emdiği su miktarı
m_w	: Tuğlanın ıslak kütlesi
m_d	: Tuğlanın kuru kütlesi
Nu	: Nusselt Sayısı
Pr	: Prandtl Sayısı
p	: Basınç
Q_{buharlaştırma}	: Buharlaştırma için harcanan ısı
Q_{iletim}	: İletimle transfer edilen ısı
Q_{ışınım}	: Işınım ile transfer edilen ısı
Q_{taşınım}	: Taşınım ile transfer edilen ısı
Q_{vφ}	: Hacimsel üretim
Q_{sφ}	: Yüzeysel üretim
Q_{ve}	: Enerji üretimi
r	: Radyal yön
Re	: Reynolds Sayısı
T	: Sıcaklık
T_y	: Yüzey sıcaklığı
T_∞	: Taşınım ortamı sıcaklığı
ΔT	: Sıcaklık farkı
Δt	: Zaman farkı
u	: Hız bileşeni
u_i	: Hızın i ekseninde bileşeni
V	: Kullanılabilir hacim
v	: Hız bileşeni

Δy	: y ekseninde eleman uzunluğu
Δz	: y ekseninde eleman uzunluğu
φ	: Akış özelliği
τ_{ij}	: Viskoz gerilmeler
δ	: Kronecker delta
μ	: Dinamik viskozite
λ	: Isı iletim katsayısı
ε	: Türbülans yayılım oranı
γ	: Kinematik viskozite
ρ	: Yoğunluk
ρ_s	: Yüzeydeki doymuş buhar yoğunluğu
ρ_∞	: Taşınım ortamındaki buhar yoğunluğu
Δx	: x ekseninde eleman uzunluğu
ΔX	: Yer değiştirme
Δx_i	: i ekseninde eleman uzunluğu
Ω	: Eleman hacmi

KISALTMALAR

CENELEC : Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

FKS : Fan Koruma Sacı

HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

ELEKTRİKLİ FIRINLARDA ENERJİ TÜKETİM DENEYLERİNİN MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, ev tipi bir elektrikli fırında pişirme hacmi içerisindeki hava akışı modellenmesi yoluyla pişirme hacmi içerisindeki ısı transfer katsayılarının belirlenmesidir. Modelleme iki boyutlu ve üç boyutlu geometrilerde fırın pişirme hacmi tanımlanarak yapılmıştır. Hava akışının etkisi daha baskın olduğundan zorlanmış taşınımlı “Turbo” çalışma modu için modelleme yapılmıştır. Enerji tüketimi deneylerinin modellenmesi hedeflendiğinden pişirme hacmi geometrik merkezine enerji testi tuğlası yerleştirilmiş halde modelleme yapılmıştır. Modelleme için iki ve üç boyutlu kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri sıkıştırılamaz bir akışkan için düzenlenmiş, elde edilen denklemler sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılarak çözümleme yapılmıştır. Sayısal çözümlemeler ticari bir kod olan “FLUENT” yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Çözümlemeler fırının alternatif bileşenlerini temsil eden dört farklı konfigürasyon için yapılmıştır. Çözümlemeler sonucunda pişirme hacmi içerisinde, özellikle tuğla çevresi ve pişirme hacmi iç duvarları çevresinde, akış alanı hız değerleri elde edilmiştir. Akış ölçümleri ile çözümlemelerin deneysel doğrulaması yapılmıştır. Fan koruma sacı üfleme deliklerindeki ortalama hava hızı ve debileri Pitot tüpü kullanılarak ölçülmüştür. Tuğla yüzeyleri ve pişirme hacmi duvarları çevresindeki akış ise PIV (Particle Image Velocimetry) cihazı ölçülmüş, tuğla ve pişirme hacmi iç duvarları üzerindeki ısı taşınım katsayıları deneysel Nusselt bağıntıları kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Literatürde tuğla geometrisi benzeri yapılar için kullanılan Nu bağıntıları araştırılarak bunlardan uygulanabilir olan üç adedi ile hesaplamalar tekrarlanmıştır. Bir yüzey için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımı ile ısı taşınım katsayısı hesabı yaptırılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. HAD yazılımı ile elde edilen ısı taşınım katsayısı değerlerinin Nu bağıntıları ile tutarlı olduğu görülerek tüm yüzeyler için tüm çalışma koşullarında ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda zorlanmış taşınımlı elektrikli bir ev tipi fırının dört farklı çalışma koşulu için tuğla yüzeyleri ve pişirme hacmi duvarlarında ısı taşınım katsayısı değerleri elde edilmiştir. Bu veri fırın enerji tüketimi deneyinin ısı modellenmesi çalışmasında kullanılarak farklı akış şartları için fırınların enerji tüketimini öngörülebilmesini sağlayabilecektir.

MODELLING OF ENERGY CONSUMPTION TESTS FOR ELECTRICALLY HEATED OVEN

SUMMARY

Aim of this study is obtaining the heat transfer coefficients inside cooking cavity by modelling the air flow inside the cooking cavity of an electrically heated domestic oven. Modelling was made for both two-dimensional and three-dimensional geometries defining the cooking cavity. As the effect of the air flow is more dominant in forced convection, modelling was made for this mode of operation. A test brick is defined in the geometric center of the cooking cavity as the aim of this study to investigate the energy consumption test for the ovens. Two and three-dimensional conservation equations for mass, momentum and energy are defined for incompressible fluids and discretized by the finite volume method. Computational analysis were made using a commercial CFD code "FLUENT". Analysis were made for four different flow conditions, simulating alternative components of oven. Flow field vectors are obtained for the cooking cavity, especially around the surfaces of brick and cavity walls. Experimental validation of the results were made by flow measurements. Average velocities and flow rates are measured at the blow-out ports of the fan cover plate. Flow around the brick surfaces is measured by PIV (Particle Image Velocimetry), also convection heat transfer coefficient was calculated manually by using the experimental Nusselt equations. Three appropriate Nusselt equations were found in literature, and calculations were made with both of them. For the one surface, convection heat transfer coefficient was calculated by using the CFD code. The convection heat transfer coefficients obtained by manual calculations and the CFD code were compared. Calculation of all surfaces for all flow conditions were made by using the CFD code. As a result of this study, convection heat transfer coefficients of surfaces of test brick and inner wall of cooking cavity of an electrically heated forced convection oven is obtained for four different working conditions. These data can be used develop a thermal modelling for energy consumption test, in order to simulate different flow conditions.

1 GİRİŞ

Tüm dünyada, ekonomik gelişme ile beraber, enerji tüketimi de artmaktadır. Bununla beraber, fosil yakıt kaynaklarının kısıtlı olması ve uluslararası gelişmeler enerji maliyetlerinin artmasına sebep olmuştur. Diğer yandan küresel ısınma, mevcut enerji kaynaklarının azalması gibi etkenler enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik bir bilinç oluşturmıştır. Bu nedenle, tüm ürünlerle birlikte beyaz eşyalarda da enerji tüketimi düşük ürünler tercih edilir halde gelmiştir. Ayrıca, uluslararası organizasyonlar ve standartlar düşük enerjili ürünleri ayırt edici tanımlamalar oluşturmuşlardır. Bunlardan biri de CENELEC tarafından yayınlanan EN50304 numaralı standarttır. Bu standart ev tipi fırınların enerji tüketimlerinin hesaplanması için yapılan “Tuğla testi” prosedürünü tanımlamaktadır. Bu test sonucunda, üzerinde en iyiden en kötüye sırasıyla A,B,C,D ve E harfleriyle enerji tüketimi performansını gösteren bir işaret olan enerji etiketi oluşturulur.

Elektrikli ev tipi fırınlarda farklı çalışma modları bulunmaktadır. Bunlar genel olarak iki gruba ayrılabilir. Birinci grup “STATİK” olarak adlandırılır. Fırın içerisinde hava akışı oluşturulmayan bu çalışma modunda yoğun olarak doğal taşınım ve ışıınım ısı geçişi etkindir. Diğer çalışma modu grubu ise “TURBO” olarak adlandırılır. Fırın hacmi içerisinde, çoğunlukla radyal bir geometriye sahip, bir fan ile hareketlendirilen hava akışının yer aldığı bu modda, yüksek hava hızı nedeniyle, zorlanmış taşınım ile ısı geçişi etkindir. Bunun yanında alt çalışma moduna göre (alt/üst ısıtıcı) ışıınımla ısı geçişi de etken olabilmektedir.

Turbo modunda çalışan ev tipi fırınlar genel olarak incelendiğinde ise çoğu zaman fan fırın hacminin arka ve ayrılmış bir bölgesinde yer almakta, etrafında dairesel formda ısıtıcılar bulunmaktadır. Fan ve ısıtıcı pişirme bölgesinden Fan Koruma Sacı olarak adlandırılan bir dikey duvar ile ayrılır. Ayrıca, Fan Koruma Sacı ile şasi arka duvarı arkasında kalan bölge bir üfleme odası oluşturur. Bu üfleme odası ile pişirme hacmi (kavite) arasında hava akışının sağlanması amacıyla fan koruma sacı üzerinde belirli formlarda delikler bulunur. Bu deliklerden orta kısımda yer alanlar fanın

emişi, daha kenara yakın olanlar ise fan tarafından emilip ısıtıcı üzerinden geçirilen sıcak havanın pişirme hacmine geri dönmesi amacıyla kullanılır. Dolayısıyla, fırın hacmi içerisinde pişirme amacıyla kullanılan sıcak havanın hareketi sadece fırın arka kısmında kontrol edilebilmektedir. Diğer bir deyişle, fan koruma sacı üzerindeki deliklerin konum ve formları tüm pişirme hacmi içerisindeki hava hareketini belirlemektedir. Pişirme hacmi içerisindeki hava akış karakteri, deney tuğlası ve pişirme hacmi duvarları üzerindeki ısı geçiş katsayını belirlediğinden, enerji tüketimi değeri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.

Elektrikli ev tipi fırınların Turbo sistemlerinin tasarlanması enerji tüketiminin iyileştirilmesi önemlidir. Ancak, tasarlanan sistemin enerji tüketimi üzerinde yaptığı etkinin görülebilmesi çok sayıda ilk örnek üretilmesini gerektirmektedir. Fırınların yüksek sıcaklık şartlarına uygun olarak, metal sac parçalardan imal ediliyor olması bu ilk örnek yapım işinin zaman ve maddi kaynak ihtiyaını artırmaktadır. Bu durumda, ürün tasarımının erken aşamalarında enerji tüketiminin ongorlebilmesini sağlayan bir model tasarım sürecinin hızlı etkin ve düşük maliyetli olmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmanın amacı, zorlanmış taşınımlı (TURBO) bir pişirme hacmi içerisindeki hava akışının modellenmesi yoluyla bu bölgedeki ısı taşınım katsayılarının belirlenmesidir.

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Fırın içi hava akışının incelenmesi ile ilgili yayınların büyük çoğunluğunda, çözümlemenin ticari HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kodları ile yapıldığı görülmüştür. Verboven ve diğ. [1] çalışmasında bir turbo fırın pişirme haznesi (kavite) içindeki hava akışı sayısal çözümlemesi yapılmıştır. Mevcut turbo fırınlardan farklı olarak, hava üfleme deliklerinin yan duvarlara yerleştirildiği bir pişirme hacmi yapısı incelenen çalışmada, pişirme hacmi içerisinde sıcaklık farkları ve hava hızları düşük olduğundan hava için sıkıştırılamaz akışkan kabulü yapılmıştır. Ayrıca duvar yakınlarında türbülanslı sınır tabakası olduğu kabul yapılarak, ısı transfer katsayılarının daha doğru hesaplanması sağlanmıştır. Çözümlemenin işlem gücü ihtiyacını ve süresini kısaltmak amacıyla, fan ve ısıtıcı geometrileri tanımlanmamış, bu geometrilerin hava hızı ve sıcaklığına olan etkileri tanımlanmıştır.

Pişirme hacmi içerisindeki akışın çözümlenmesinde yüzeylerdeki ısı taşınım sayısının doğru hesaplanması çözümlemenin doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Bu katsayının hesaplanması için Verboven ve diğ [2] tarafından yapılan çalışmada, farklı şekillerdeki yiyecekler ve farklı akış şartları için yiyecek üzerindeki ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Yüzeylerdeki ısı taşınım katsayısı dağılımının elde edildiği çalışmada, yiyecek içerisinde en soğuk noktanın geometrik merkezde olmadığı görülmüştür. Ayrıca, yüzeyin tamamında ısı taşınım katsayısının homojen olduğu kabulü ile yapılan çözümler ile karşılaştırıldığında, homojen olmayan dağılımın yiyecek sıcaklığındaki değişimin daha yavaş olduğu görülmüştür.

Ward [3] yiyecek içerisindeki ısı ve kütle transferinin çözümlendiği çalışmasında tüm fırının ısı modellemesini yapmıştır. Ancak, modelin basitleştirilmesi amacıyla, fırın içi hava akışı modellenmesi yapılmayarak yalnızca yiyecekteki ısı olaylar modellenmiştir. Yiyecek bir yığın model olarak tanımlanarak yiyecek içerisinde uniform sıcaklık dağılımı olduğu kabul edilmiştir. Yiyeceğin ısı özellikleri de işlem

boyunca sabit kabul edilmiştir. Makalede kek ve patates gibi yiyeceklerin yanında enerji tüketimini ölçmek için yapılan tuğla testi için de çözümleme yapılmıştır.

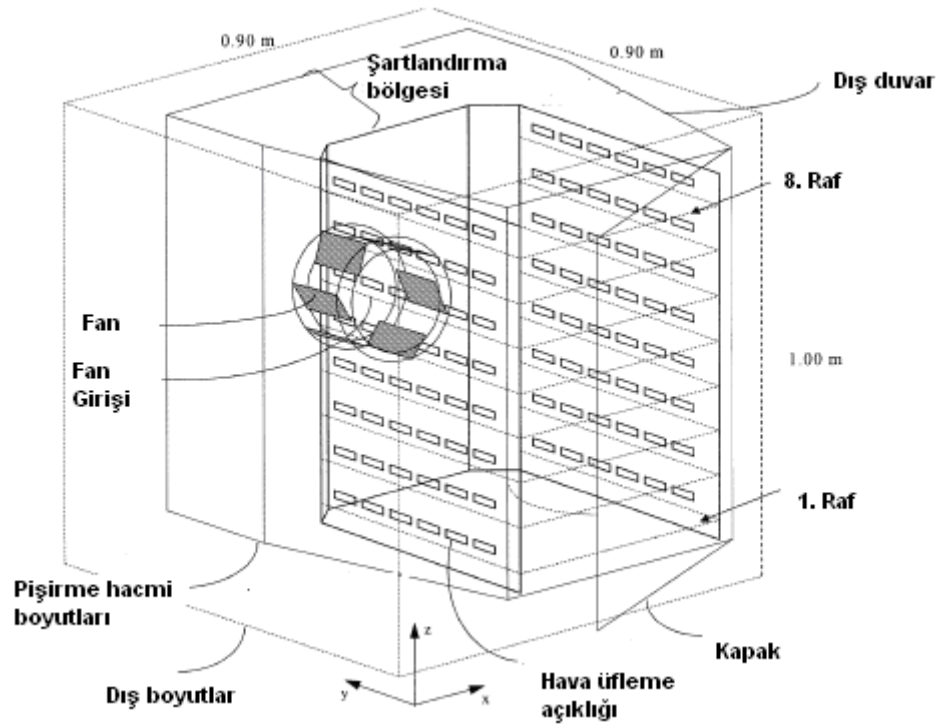
Endüstriyel tuğla kurutma prosesinin incelenmesi amacıyla yapılan bir modelleme çalışmasında, ısı transferi ve kütle transferi arasındaki analojinin tüm proses süresince devam edip etmediği incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan model, tuğla içerisindeki suyun hem sıvı hem de gaz fazı için kütle korunum denklemlerini ve genel enerji denklemini içermektedir. Model ayrıca, tuğla etrafındaki akışın çözümlenmesini de içermektedir. Buradaki akış çözümlemesi, bir kanal içerisinde ve iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Çözümleme sonucunda, tuğlanın ısınmasının, ortam nem değerine uygun ıslak termometre sıcaklığına ulaşınca durduğu ve bir süre sonra tekrar sıcaklığın yükseldiği görülmüştür. Ayrıca, farklı akış koşulları için tuğla kuruluk dereceleri elde edilmiştir.

2.1 Pişirme Hacmi İçi Akışın Modellendiği Çalışmaların İncelenmesi

Verboven ve diğ. [1] tarafından zorlanmış taşınımlı bir ticari fırın incelenerek, matematik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matematik model kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar ile yapılan deneyler ile doğrulanmıştır.

Fırın temel olarak arka kısmında bir fan ve fan etrafına yerleştirilmiş bir ısıtıcı ile bunları pişirme hacmiden ayıran bir fan koruma sacından oluşur. Ayrıca, fan ile pişirme hacmiden emilen havanın homojen dağıtılması için, ısıtılan hava yan duvarlarda oluşturulan kanallardan üflenmektedir. Yiyeceklerin yerleştirilmesi için toplam sekiz çıkartılabilir tepsi vardır.

Fırın arka kısmındaki fan ile pişirme hacmi içerisinde toplanan hava fan etrafındaki ısıtıcıdan geçirilerek yan duvarlardaki kanallardan pişirme hacmiye verilir. Yan duvarlarda her tepsi için yatay olarak sıralanmış çok sayıda üfleme deliği bulunur.



Şekil 2-1 Çözüm geometrisi

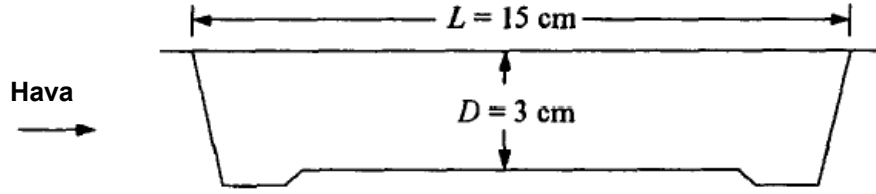
Matematik model oluşturulurken sıcaklık farkına bağlı yoğunluk değişimleri az olduğu ve havanın hızı ses hızına göre çok düşük olduğu için hava sıkıştırılmaz akışkan olarak kabul edilmiştir. Mevcut süreklilik ve momentum denklemleri kullanılmıştır. Türbülans modellemesi için türbülans viskoziteyi artıran bir değer olarak kabul edilmiştir. Böylece, normal viskozite ile türbülans viskozitesi toplamına eşit olan toplam viskozite değeri denklemlerde kullanılmaktadır.

Türbülans viskozitesinin hesaplanmasında deneysel olarak elde edilen denklemler kullanılır. Bu denklemlerde türbülans kinetik enerjisi (k) ve enerji yayılım oranı (ϵ) değerleri kullanılır.

2.2 Isı Taşınım Katsayısının Belirlendiği Çalışmaların İncelenmesi

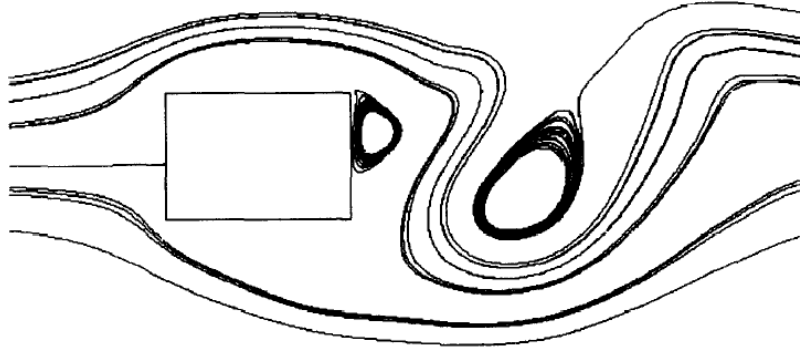
Pişirme hacmi içerisindeki akışın çözümlenmesinde yüzeylerdeki ısı taşınım katsayısının doğru hesaplanması çözümlemenin doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Bu katsayının hesaplanması için Verboven ve diğ. [2] tarafından yapılan

farklı şekillerdeki yiyecekler (Şekil.2-2) ve farklı akış şartları için yiyecek üzerindeki ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır.



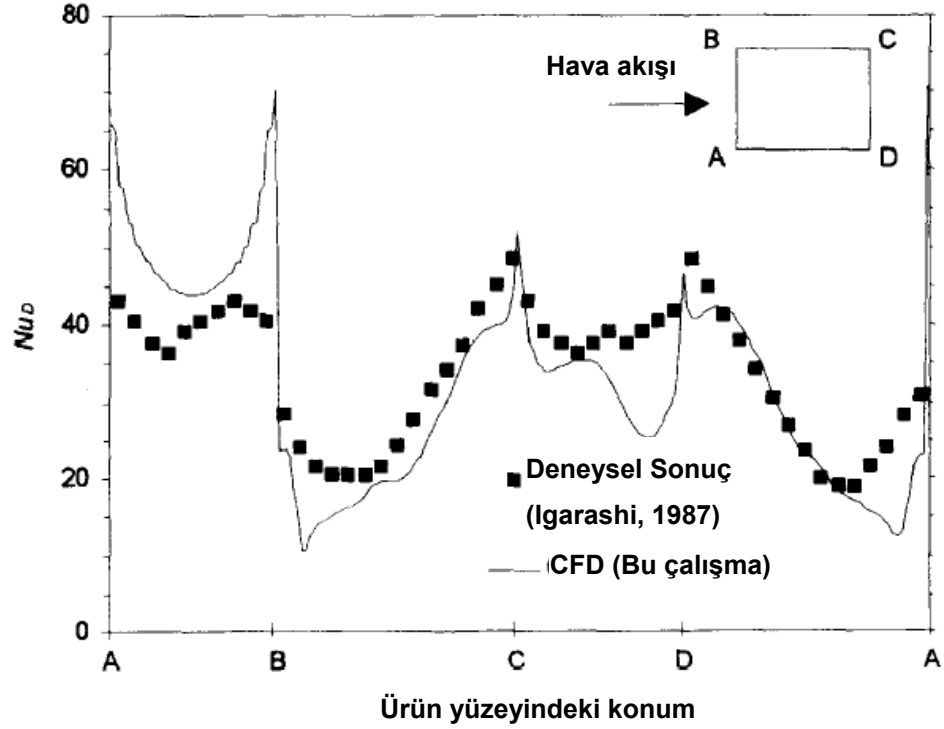
Şekil 2-2 Farklı yiyecek şekil ve boyut oranları

Bu yiyecekler etrafındaki akış farklı boyut oranları için çözümlenmiştir. Bu çözümler sonucunda yiyecek paketleri etrafındaki akış çizgileri ve hızları elde edilmiştir.(Şekil.2-3) Bu değerler kullanılarak akışın Re sayısı hesaplanmış ve buradan ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir.



Şekil 2-3 Yiyecek etrafında akış iplikleri

Yüzeylerdeki ısı taşınım katsayısı dağılımının elde edildiği çalışmada, yiyecek içerisinde en soğuk noktanın geometrik merkezde olmadığı görülmüştür. Ayrıca, yüzeyin tamamında ısı taşınım katsayısının homojen olduğu kabulü ile yapılan çözümler ile karşılaştırıldığında, homojen olmayan dağılımın yiyecek sıcaklığındaki değişimin daha yavaş olduğu görülmüştür. Şekil 2.4'te daha önce yapılmış bir deneysel çalışma sonuçları ile HAD sonuçları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 2-4 Deneysel ve Çözümleme sonuçları karşılaştırılması

2.3 Hedef Yiyecek/Malzeme İçi Isı Geçişinin Modellendiği Çalışmaların İncelenmesi

Gıdaların ısıtılması, soğutulması, sterilizasyonu ve kurutulması gibi prosesler gıda mühendisliğinin temel konularıdır ve literatürde bu prosesler sırasında gıdalarda gerçekleşen ısı, kütle ve momentum transferlerinin modellenmesi hakkında bir çok çalışma bulunmaktadır.

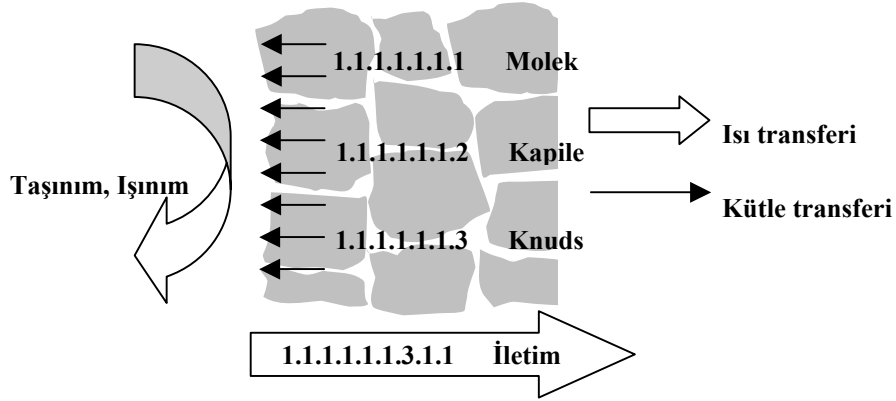
Katı gıdaların pişirilmesinin fiziksel prensibi, gıda ile içinde bulunduğu ortam arasında gerçekleşen ısı ve kütle transferine dayanmaktadır. Katı gıdaların içindeki ısı transferi Fourier kanunuyla, kütle transferi ise Fick kanunuyla ifade edilir. Akışkan gıdaların pişirilmesinin modellenmesi için ise akışkan içindeki ısı, kütle ve momentum transferinin birlikte göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Akış çözümleri için Navier-Stokes denklemleri kullanılır. [4].

Modellerin çözümlerinde sonlu fark, sonlu hacim ve sonlu eleman yöntemleri oldukça sık kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, özellikle sıvı gıdaların ısıl prosesler altındaki davranışlarının modellenmesinde HAD paket

programlarından yararlanılmaktadır. Isıl proseslerin modellenmesinde, sonlu fark yöntemi kullanılarak plaka, küre ve silindir şekilli gıdalar için yapılmış iki veya üç boyutlu modelleme çalışmaları bulunmaktadır. Belirsiz şekilli geometriler, karmaşık sınır şartları ve heterojen yapıdaki gıdalar için sonlu eleman yöntemi daha iyi sonuç vermektedir. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak gıda ısıl proseslerinin modellendiği çalışmalar da mevcuttur. Sonlu eleman yöntemi, sonlu fark yöntemine göre daha iyi sonuç verdiği halde, işlem süresi açısından sonlu fark yöntemine göre daha dezavantajlıdır. Bu sebeple, üç boyutlu, ısı-kütle transferinin birlikte çözümünün gerektiği çalışmalarda sonlu eleman yöntemi daha az tercih edilmektedir. Sonlu hacim yöntemine dayanan HAD paket programlarının, gıda proseslerinin modellenmesinde kullanılması daha yeni bir konudur. HAD, daha çok konserve gıdaların sterilizasyonu, ısı değiştiricilerde ısıtılan akışkan gıdalar ve fırın içi akış gibi konuların incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır [5].

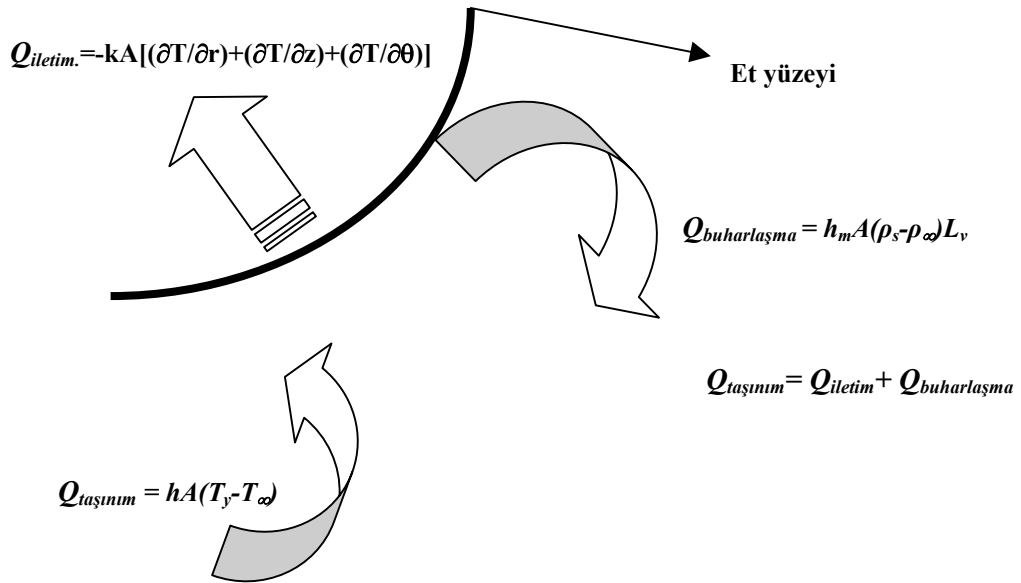
Isıl proseslerin modellenmesi incelendiğinde, yapılan çalışmalar model türüne göre sınıflandırılabilir. Bunlar, tek başına ısı transferi, tek başına kütle transferi, ısı ve kütle transferi birlikte, yalnızca reaksiyon kinetiği ve reaksiyon kinetiği ile birlikte ısı ve/veya kütle transferinin birlikte modellendiği çalışmalardır. Modellerin birbirleriyle entegrasyonunun hatayı azalttığı gözlenmiştir [6].

Gıdalar, mikro yapılarında çoğunlukla hücre, granül grupları barındırdıkları için belirli bir gözenekliliğe sahip maddelerdir. Isı ve kütle transferi bu gözenekli yapı içinde gerçekleşir. Kütle transferinde en önemli bileşen sudur [7]. Suyun yanında gıda içine doğru yağ difüzyonu da gerçekleşmektedir [8]. Gıda içinde ve yüzeyinde su buharı difüzyonu gıdanın çıtırımsı bir doku karakteristiğine sahip olmasında önemli rol oynar. Yüzeyin kurumaması ve nemli kalması, çıtırımsı özellik istenen gıdalarda hedonik değerin düşmesine sebep olan bir durumdur. Şekil 2.5’de gıdalarda gerçekleşen ısı-kütle transfer mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir.



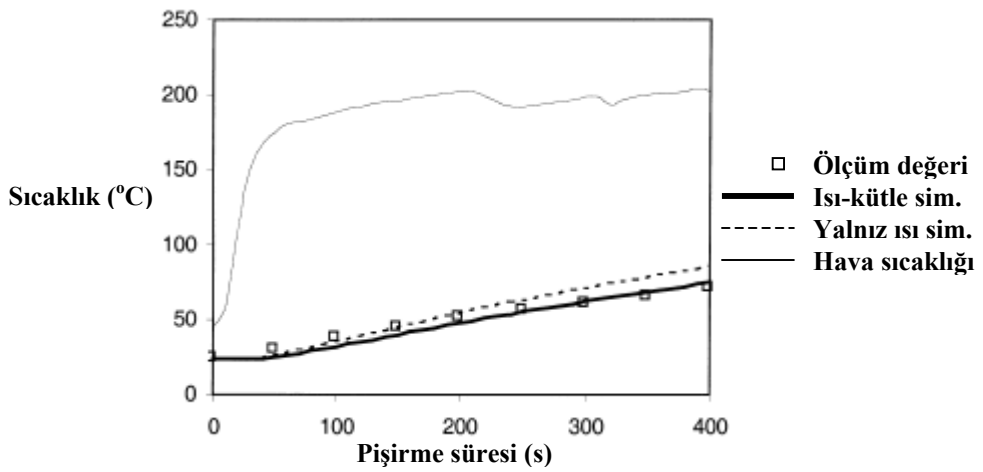
Şekil 2-5 Pişirme sırasında gıdada eş zamanlı gerçekleşen ısı ve kütle transferi

Obuz ve diğ. yaptıkları çalışmada zorlanmış taşınım fırınında sığır rostosunun pişirilmesi sırasında gerçekleşen ısı ve kütle transferi birlikte modellenmiştir [5]. Ancak, kütle transferinde sadece su buharının difüzyonu modele katılmış, sıvı suyun et içindeki difüzyonu ise ihmal edilmiştir. Fırın içindeki sıcak havadan ısıнын taşınım yoluyla rosto yüzeyine, buradan da rosto içine iletimle transfer edildiği kabul edilmiş, bu esnada yüzeydeki buharlaşma da modele katılarak, rosto yüzeyindeki ısı denge oluşturulmuştur (Şekil 2.6). Elde edilen diferansiyel denklemler sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Doğrulama deneyleri sonucunda, hesaplanan ve gözlenen pişirme sürelerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2-6 Rosto yüzeyindeki ısı denge [5]

Chen ve diğ. tarafından yapılan çalışmada ise taşınım ile ısı transferi ile pişirilen düzgün silindirik şekilli tavuk eti köfteleri modellenmiştir [7]. Bu modelde de ısı ve kütle transferi bütünleşik şekilde, sonlu eleman yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Çalışmalarda, model ve deneyler arasındaki farklılık; kütle transferinin modele katılmadığı durumlarda artmıştır. Isı iletim katsayısı, özgül ısı gibi termofiziksel özelliklerin sıcaklık ve nemin fonksiyonları olarak değiştiğinin varsayılması modelin gerçeğe daha yakın olmasını sağlamıştır. Şekil 2.7’te kütle transferinin modele katıldığı ve katılmadığı durumlar için tavuk köftesi merkez noktası sıcaklık değerleri verilmiştir.

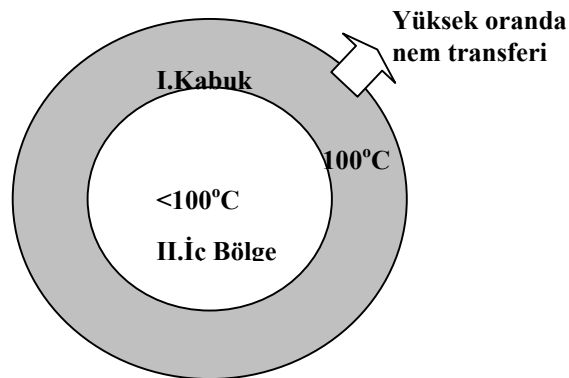


Şekil 2-7 Merkez noktası sıcaklık zaman grafiği model-deney sonuçları [5]

Zhang ve diğ. tarafından yapılan çalışmada buharla pişirilen, gittikçe daralan eliptik kesitli balık modellenmiştir [8]. Sadece ısı transferinin modellendiği çalışmada ton balığının, omurga, et ve karın boşluğundan oluştuğu ve iki boyutlu (açısal ve radyal yönlerde) ısı transferi olduğu varsayılmıştır. Araştırmacılar balık kesitini eliptik ve non-homojen kabul etmişler, kesim işlemi sonrası karın kısmında oluşan boşluğu da hesaplamaya katılmışlardır. Basit geometrilili gıdaların, taşınım ağırlıklı pişirilmelerinde, merkez noktası en zor ısınan ve mikrobiyolojik risk açısından sıcaklık kontrolünün yapılması gereken yer olarak tanımlanırken, balık için bu yerin omurga olduğu belirtilmiştir. Çalışmada sabit termofiziksel özellikler kullanılmış ve denklemler sonlu eleman yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

Kek, ekmek gibi gözenekli yapıdaki gıdalarda kütle transferinin açıklanması açısından önemli olan, Thorvaldsson ve Janestad tarafından gerçekleştirilen çalışmada, doğal taşınım ve ışınlam ile 210°C’de fırında pişirilen fransız tipi ekmek modellenmiştir [9]. Isı ve kütle transferi model denklemleri bütünleşik şekilde

Wählby ve Skjöldebrand tarafından gerçekleştirilen çalışmada, pişirme karakteristiklerinin çöreklerdeki kabuk oluşumuna ve oluşan kabuğun ısı ve kütle transferi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir [10]. Çalışmada mayalı çörekler pişirilerek kabuk oluşumu sağlanmış, daha sonra bir kısım çöreğin kabuğu soyularak aynı boyutlarda kabuklu ve kabuksuz olmak üzere çörekler hazırlanmıştır. Kabuklu ve kabuksuz çörekler tekrar ısıtılarak, çöreklerin farklı davranımları incelenmiştir. Araştırmacılar, kabuğu 100°C'nin üstündeki sıcaklıklarda ve düşük nem değerindeki bölgeler olarak kabul etmişler (Şekil 2.8), renk ve kalınlık gibi kabuk karakteristiklerinin farklı ısı transfer modlarının kullanılmasıyla kontrol edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Gıda yüzeyi sıcaklığı 100°C'nin üstüne çıktığı andan itibaren merkez noktası sıcaklığında hangi oranda ısı transferi uygulanırsa uygulansın önemli bir yükselme gözlenmediği rapor edilmiştir.



Merkez noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi gözlenerek kabuk oluşumunun etkileri incelenmiştir. Kabuksuz çöreklerde kütle transferinin daha kolay gerçekleştiği ve bunun sonucunda nemin daha çok buharlaştığı belirlenmiştir. Kabuksuz çöreklerde transfer edilen ısıнын büyük çoğunluğu buharlaşma için

harcanmaktadır. Kabuklu çöreklerde ise kabuğun kütle transferine karşı bir bariyer oluşturması nedeniyle, nem çıkışını zorlaştırdığı ve ısıнын çörek içinde daha yüksek oranda iletildiği belirlenmiştir. Özetle, kabuklu çöreklerde sıcaklık yükselmesi daha önce başlamakta, daha yüksek bir denge sıcaklığı elde edilmekte ve oluşan kabuk ağırlık kaybını azaltmaktadır. Bu gözlem, çörek nem difüzyon katsayısının kabuk ve iç kısımlarda farklı olması ile açıklanmıştır.

Gıdalarda ısııl işlem esnasında gerçekleşen ısı ve kütle transferinin modellenmesi ile ilgili diğer çalışmalar incelendiğinde, gıdaların pişirilmesi sırasında sadece ısı transferinin modellendiği çalışmaların sayısının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Köfte pişirilmesi, salatalık haşlanması, meyve ısıtılması ve dondurulması, sığır etinin dondurulması ve hindi etinin pişirilmesi ile ilgili yapılmış ısı transferi modellenmesi çalışmaları bulunmaktadır [11–15]. Yapılan çalışmaların bir kısmında sonlu fark, bir kısmında ise sonlu eleman yöntemi kullanılarak çözüm elde edilmiştir.

Gıdaların kurutulması ve nemlendirilmesi gıda sanayi için önemli bir konudur. Bu nedenle, sadece kütle transferinin modellendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Örnek olarak, suda haşlanan tortillalarda gerçekleşen nem difüzyonunun modellenmesi ve sebze kurutulması için tasarlanan dönel bir kurutucu çalışmaları gösterilebilir [16, 17].

3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Enerji Tüketim Deneyi

3.1.1 Tuğla testi standardı

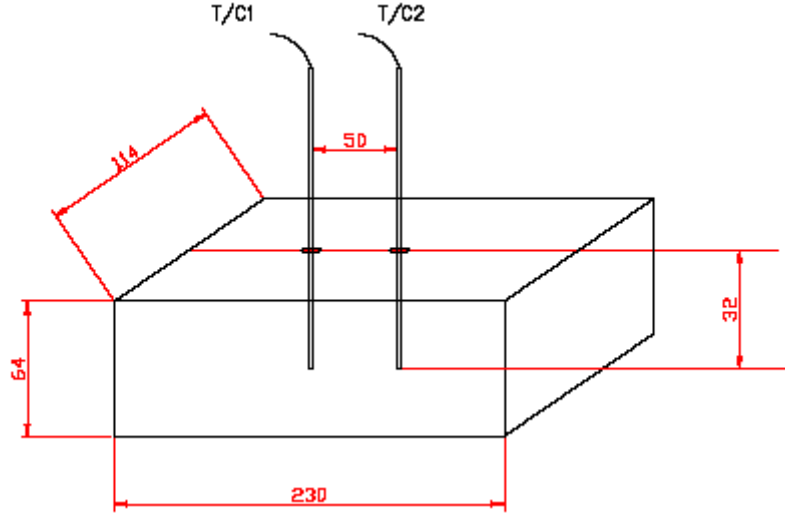
CENELEC tarafından yayınlan EN50304 numaralı standart uyarınca yapılan tuğla testinin amacı, standartlaştırılmış bir test prosedürü boyunca, standartlaştırılmış bir yük kullanılarak enerji tüketiminin hesaplanmasıdır. Ayrıca, incelen fırın için hacim, bir yükü ısıtmak için gerekli süre, pişirme tepsileri alanı gibi özel performans karakteristiklerinin elde edilmesidir. Bunların yanında yasal olarak imalatçının açıkladığı değerlere, izin verilen toleranslar dahilinde, sahip olup olmadığının görülmesini saptamaktadır.

3.1.1.1 Deney hazırlıkları

Testte fırın içerisine yerleştirilen ısı yük olarak tuğla kullanılmaktadır. Tuğla üzerinde sıcaklık ölçümü için 2 adet delik bulunmaktadır. Kullanılan tuğla gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu tuğlanın (HIPOR, Skamol Group A/S, Danimarka) termofiziksel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

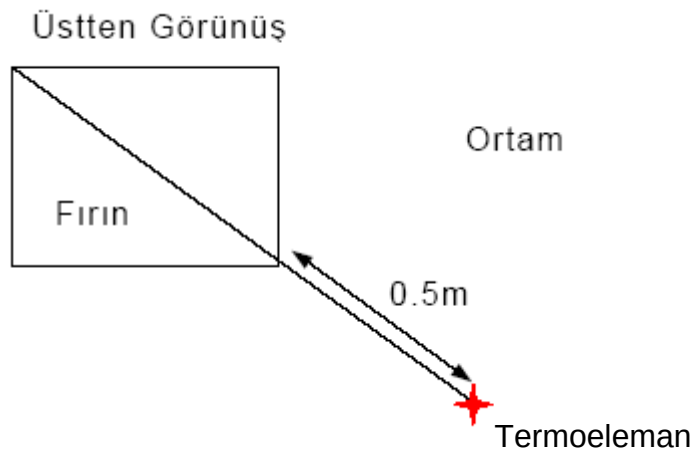
Tablo 3-1 Tuğla malzeme termofiziksel özellikleri [51]

3.1.1.1.1.1.1.1.1 Özellik
Yoğunluk =550 kg/m ³
Özgül ısı = 800 J/kgK
Isıl iletkenlik = 0.091 W/mK (200°C)
Kuru ağırlık = 920 g



Şekil 3-1 Tuğla boyutları ve termoeleman yerleşimi

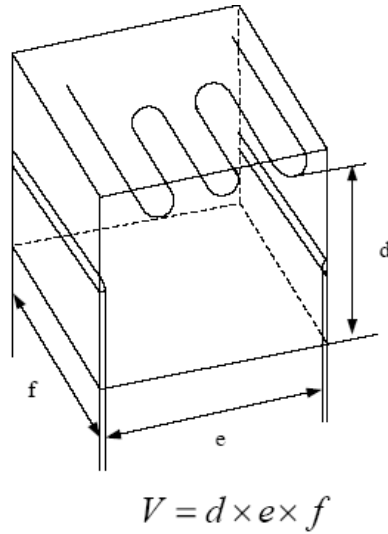
Her testten önce tüm cihaz (malzeme ve izolasyon), ortam sıcaklığında olmalıdır. Testler, içinde havalandırma olmayan ve tüm test boyunca sıcaklığı $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ olan bir odada gerçekleştirilmelidir. Ortalama ortam sıcaklığı, testin başı ile iki ısıl çiftte de merkez sıcaklık artışının 55K olması arasında ölçülen ortam sıcaklıklarının aritmetik ortalamasının alınmasıyla elde edilir. Oda sıcaklığı, fırın pişirme hacminin kullanılan hacminin merkezi ile aynı yükseklikte ve cihazın ön kenarlarından birinden köşegensel olarak 0.5 m mesafede bir noktadan ölçülecektir. Oda sıcaklığının ölçümü fırının kendisinden veya başka bir cihazdan etkilenmeyecektir.



Şekil 3-2 Ortam sıcaklığı ölçümü için termoeleman yerleşimi

Tuğlanın iç sıcaklığı ölçümleri, 1mm çapında çelik tüple sarılmış iki adet ısı çifti ile yapılır. Isıl çiftlerin hassasiyetleri ± 1.5 K olmalıdır ve ısı çiftleri tuğla derinliğinin tam ortasına denk gelecek şekilde yerleştirilmelidir (32mm). Deney süresince ısı çiftlerinin konumlarının sabit kalması sağlanmalıdır. Kılıflı ısı çiftleri ile aynı sonucu verdikleri gösterildiği takdirde bunlar yerine başka tip ısı çiftleri de kullanılabilir. Isıl çiftler silikon damlası veya uygun başka bir yolla tuğlanın yüzeyine yapıştırılabilirler. Tuğlanın porozitesi sebebiyle termoelemanlar çıkarılıp takılırken tuğla deliklerinin büyütülmemesine dikkat edilmelidir. Bir tuğla maksimum 20 test için kullanılabilir.

Fırın hacminin kullanılabilir yüksekliği, derinliği ve genişliği aşağıda 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 elemanı bulunuyorsa ızgara elemanın alanı hesaplanır.



Şekil 3-3 Fırın kullanılabilir hacmi hesaplanması

Fırın boş iken çalıştırılarak, ön ısıtma süresi ve enerji tüketimi değeri ölçülür. Bu testin amacı boş bir fırını ortam sıcaklığından belirlenen bir sıcaklığa çıkarmak için tüketilen güç değerini ve ön ısıtma için geçen süreyi belirlemektir.

Isıl çift kapı aralığından fırın içine gelmeli ve kapı hiç bir ek kuvvet uygulanmadan kapatılabilir. Fırın, sıcaklığındaki artış geleneksel ısıtma için 180K ve zorlanmış hava dolaşımı durumu için 155K olana kadar ısıtılacaktır. Sıcaklık artışı

test başında ve sonundaki fırın içi sıcaklıkları arasındaki farktır. Zaman t_{ph} (dakika ve saniye olarak) ve enerji tüketimi E_{ph} (kWh olarak) ölçülecektir. Fırın içindeki lamba, fan gibi otomatik olarak çalışan komponentlerin enerji tüketimleri de ölçüme eklenecektir.

3.1.1.2 Ölçüm Prosedürü

Tuğlalar kullanılmadan önce sıcaklığı 175°C ve üstü, hacmi 50lt olan fırında, zorlanmış taşınım halinde üç saat kurutulurlar. Aynı anda en fazla iki adet tuğla kurutulabilir. Isıl çiftsiz tamamen kuru tuğlanın m_d kütlesi, fırından çıkarıldıktan sonra ilk 5 dakika içinde ölçülmeli ve gr. olarak not edilmelidir. Kurutulmuş tuğla oda sıcaklığına soğutulduktan sonra, tuğla tamamen suyla kaplanmış olana kadar 20°C altındaki bir su kabına konmalıdır. İçinde tuğla bulunan su kabı en az 8 saat buzdolabı içinde kalmalı ve tuğla merkez sıcaklığı $5\pm 2^{\circ}\text{C}$ olana kadar soğutulmalıdır (Her iki ısı çifti için). Soğutulan ve su emdirilen ısı çiftli tuğla, su kabından çıkarıldığında 1 dakika boyunca fazla su miktarı damlatılmalıdır. Tuğlanın m_w kütlesi ölçülmeli ve tuğla tarafından emilen su miktarı belirlenmelidir. Burada, ısı çifti ağırlıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Tuğlanın merkez sıcaklıkları ölçülerek kaydedilir. Her iki ısı çifti de $(5\pm 2)^{\circ}\text{C}$ okumalıdır.. Burada tuğlanın emdiği su miktarı eşitlik 3.1 ile gösterilmiştir.

$$\Delta_m = m_w - m_d \quad (3.1)$$

Hazırlanan tuğla, cihaz oda sıcaklığındayken, üstündeki ısı çiftleri ile birlikte (ısı çiftleri tuğlanın üst kısmında olmak üzere), kullanılabilir fırın pişirme hacminin geometrik merkezine yerleştirilir. Tuğlanın üstüne konacağı ızgara, tuğlanın merkezi, fırın merkezine mümkün olduğunca yakın olacak şekilde bir raf destek seviyesine yerleştirilir. Tuğlanın uzun eksenini fırın önüne paralel olmalıdır.

Ölçümler, tuğla buzdolabından çıkarıldıktan sonra üç dakika içinde fırının çalıştırılmasıyla başlar. Sıcaklık ayarlayıcı pozisyonu, ortalama fırın içi sıcaklığı Tablo 3.2’de tanımlandığı gibi ΔT olacak şekilde ayarlanmalıdır. ΔT , fırın içi sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı arasındaki farktır. Fırın, seçilen modda istenilen fırın içi sıcaklığına set edildikten sonra deney başlatılır. Şebekeden alınan voltaj

değerleri, ısıtıcılara verilen güç değerleri, fırın içi ve tuğla sıcaklıkları deney sırasında kaydedilir. $5\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında fırına konan tuğlanın iç sıcaklığındaki artış 55K ' ye ulaştığında (her iki delik sıcaklığındaki artışın 55K olması gereklidir) tuğla fırından çıkarılır. Tuğlanın çıkarıldığı süre kaydedilir. Fırından çıkarılan tuğlanın kütlesi ölçülerek oda sıcaklığına soğumaya bırakılır.

Tablo 3-2 Ortalama fırın içi sıcaklığı[42]

Sıcaklık Farkı	Çalışma Modları	
	İki ısıtıcı	Turbo
ΔT_1	$(140\pm 10)\text{ K}$	$(135\pm 10)\text{ K}$
ΔT_2	$(180\pm 10)\text{ K}$	$(155\pm 10)\text{ K}$
ΔT_3	$(220\pm 10)\text{ K}$	$(175\pm 10)\text{ K}$

Tuğla, suya her konduğunda aynı miktarda su emer. Bu yüzden, tuğlayı iki kullanım arasında tamamen kurutmak gerekmez. Her ısıtma fonksiyonu için üç test gerçekleştirilir: Her bir sıcaklık ayarı için bir test ve her ısıtma fonksiyonu için ise bir test gerçekleştirilir. Deneyler esnasında ölçülmesi gereken değerler, enerji tüketimi ve süre, tuğla merkez sıcaklıkları ve test başı ve sonunda ortalama sıcaklıklardır.

Yukarıdaki test tamamlandıktan sonra tuğla fırından çıkarılır ve fırın boş halde, ayarlar değiştirilmeden bir süre daha çalıştırılır. Fırın sıcaklığı dengeli hal koşullarında maksimum ve minimum sıcaklıkların arasındaki aritmetik ortalamasıdır. Dengeli halin, termostatin beş çevriminden veya daha az da olsa bir saat sonunda elde edildiği düşünülür. beş çevrim veya bir saat sonunda deney tamamlanır.

Deney sırasında kaydedilecek veriler aşağıda verilmiştir:

- i. Fırının cinsi, mevcut ısıtma fonksiyonları
- ii. Fırının kullanılabilir hacmi (lt.)
- iii. Pişirme tepsisinin veya ızgaranın kullanılabilir alanı (cm^2)
- iv. Ölçümlerin yapıldığı voltaj değerleri
- v. Test edilen fonksiyonlar veya çeşitler
- vi. Boş fırının ön ısıtması için tüketilen enerji E_{ph}

- vii. Ön ısıtma süresi t_{ph}
- viii. Enerji tüketimi(leri) (kWh)
- ix. Zaman (dak)
- x. Tuğlanın emdiği su miktarı

Bu veriler, her ısıtma fonksiyonu ve her sıcaklık için not edilecektir. Bulunan enerji tüketimi, imalatçının bildirdiği değerin yüklü hal için $\%10+0.040$ kWh üstünde olmamalıdır. Boş fırın için ise bu değer $\%15$ 'tir. Fırının ön ısıtma süresi imalatçının bildirdiği değerin $\%15$ fazlasından fazla olmamalıdır. (Yüklü hal). Hacim imalatçının bildirdiği değerden $\%3$ 'ten fazla değişmemelidir. Yüzey alanı imalatçının bildirdiği değerden $\%5$ 'ten fazla değişmemelidir.

Yukarıda belirtilen değerler aşıldığında, testler piyasadan rasgele seçilmiş üç fırın üstünde tekrarlanmalıdır.

3.1.1.3 Ekipmanlar

Tuğla deneyleri, fırının bulunacağı mutfak simüle etmek üzere ölçüleri Bolu Pişirici Cihazlar İşletmesi'nden alınan deney köşesinde gerçekleştirilmiştir. Deney köşesi ölçüleri $Y \times G \times D$: $85 \times 15 \times 70$ cm olan sol yan duvar, $Y \times G$: 85×90 cm olan arka duvar, $Y \times G$: 185×72 cm olan sağ yan duvardan oluşmaktadır ve hepsinin malzemesi de siyaha boyanmış suntadır.

Deneyler, ARÇELİK marka bir fırın üzerinde yapılmıştır. Bu fırının özellikleri aşağıda verilmiştir

- Fırın hacmi: 58 lt.
- $Y \times G \times D$: $85 \times 60 \times 60$ cm

Deney düzeneğinde ölçülen sıcaklık, güç ve kütle değerlerinin kaydedildiği bir veri toplama ünitesi ve buna bağlı bir bilgisayar bulunmaktadır.



Şekil 3-4 Deney ölçüm düzeneği

Fırın ve tuğla sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla yerleştirilen ısıl çift konumları ve tipleri şöyledir:

- Tuğla iç sıcaklığını ölçmek için 2 adet J tipi,
- Fırın merkezinde 1 adet J tipi,
- Dış ortama 1 adet J tipi,

olmak üzere toplam 4 adet ısıl çift mevcuttur.

Fırın ile enerji kaynağı arasına bir güç analizörü yerleştirilerek fırının harcadığı güç, akım, voltaj ve toplam enerji tüketimi değerleri zamana bağlı olarak kaydedilebilmektedir. Bu düzenek yardımıyla tuğla merkez sıcaklığı 55K arttığı andaki enerji tüketimi kaydedilerek fırın enerji sınıfı belirlenebilmektedir.

3.2 Akış Ölçümleri

Pişirme hacmi içerisinde oluşturulan hava hareketinin kaynağı fan olmakla birlikte bu hareket fan koruma sacı üfleme deliklerinden pişirme hacmine iletilmektedir. Bu nedenle üfleme deliklerinin pişirme hacmi içerisindeki akış üzerinde belirgin bir

etkisi vardır. Çalışmanın ilk aşamasında modelleme sonuçlarının doğrulanması amacıyla FKS üfleme deliklerinde hız ölçümü yapılmıştır.

Çalışmanın hedefi olan tuğla ve pişirme hacmi iç duvarları yakınındaki akışın incelenmesi için bu bölgelerde detaylı hız ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde yüzey çevresinde ve birden çok bölgede ölçüm alınması gerektiğinden, akışı bozucu bir uç kullanılmasına gerek duyulmayan ve bir kesitin tamamında tek seferde hız ölçümleri alınabilmesini sağlayan PIV yöntemi ile ölçümler yapılmıştır.

3.2.1 FKS üfleme delikleri

Modelleme çalışması sonuçlarının ilk aşamada değerlendirilebilmesi amacıyla FKS üfleme deliklerinde tek boyutlu hız ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde bir pitot tüpü ve bir mikro manometre kullanılmıştır.

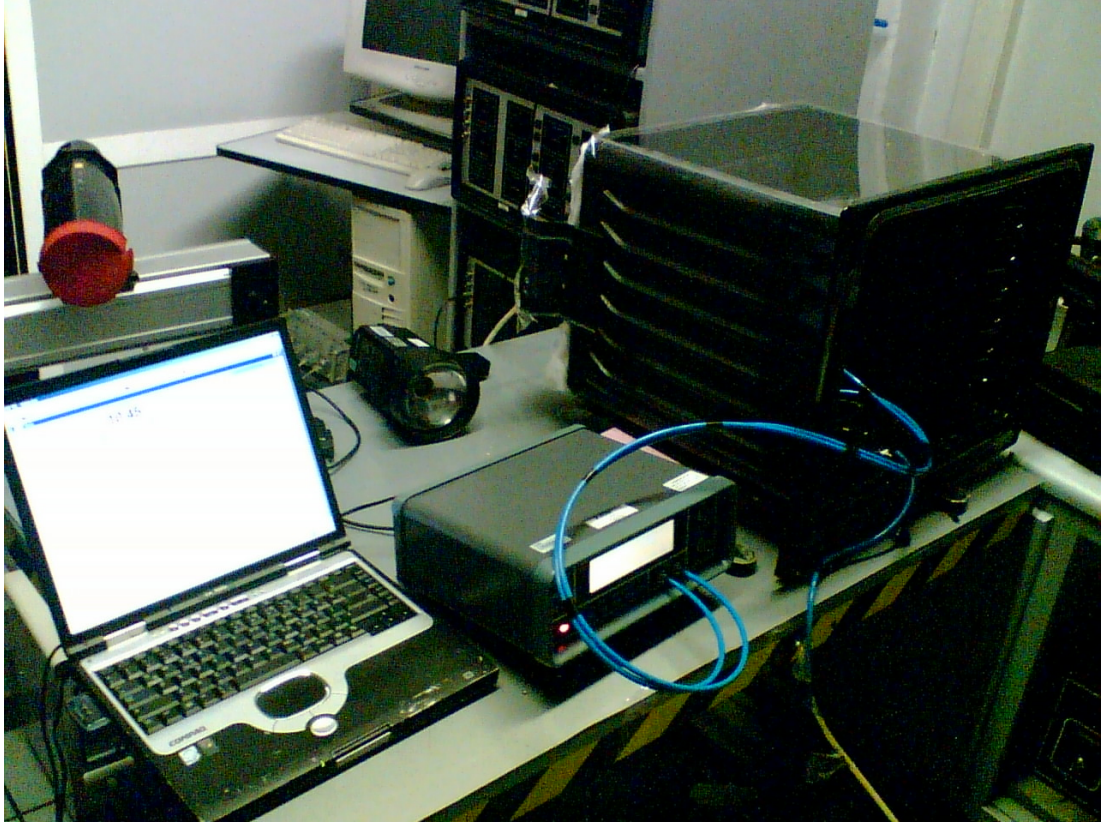
3.2.1.1 Ölçüm Düzeneği

Fırının yalnızca pişirme hacmi içerisindeki bölgesi incelendiğinden bu bölgeyi oluşturan bir ilk örnek pişirme hacmi hazırlanarak bu ilk örneğe fan, fan motoru ve FKS bağlanmıştır. Bu halde hazırlanan prototipe üzerinde hız ölçüm düzeneği ile FKS çıkış deliklerinden hız ölçümleri alınmıştır.

Hız ölçüm düzeneği, bir pitot tüpü, bu pitot tüpünün bağlı olduğu bir mikro manometre ve sonuçların izlenme ve kaydedilmesini sağlayan bir bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil.3–5).

3.2.2 Tuğla ve pişirme hacmi iç duvarı çevresi

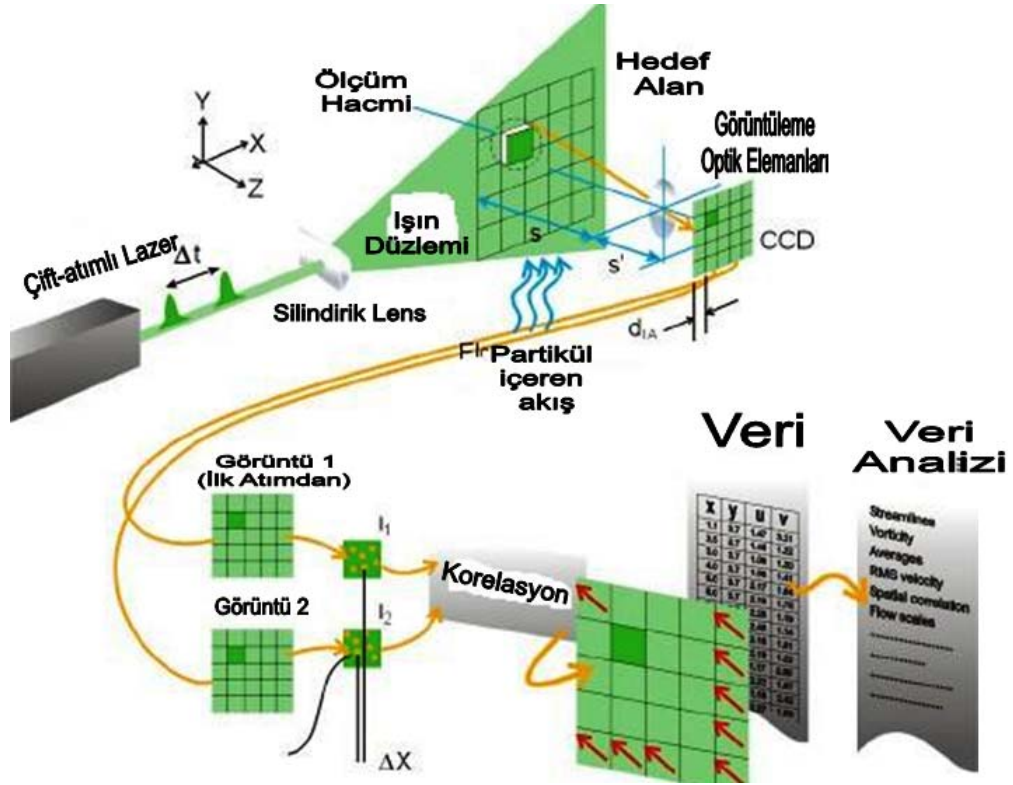
Çalışma kapsamında deney tuğlası ve pişirme hacmi iç duvarları etrafında akış incelendiğinden bu bölgelerde hassas hava hızı ölçümleri alınması amaçlanmıştır. Ayrıca, modellenen bölge dış ortamdan tamamen ayrılmış kapalı bir hacimdir. PIV yöntemi hava hız vektörlerinin belirli bir bölgedeki kesitinde dağılımını hassas ve hızlı bir şekilde ölçülmesini sağlamaktadır. Diğer yandan, akışı bozucu etkisi olabilecek bir uç kullanılmasını gerektirmemektedir. Bu nedenlerle, akışın bu bölgelerinde PIV yöntemi ile hız ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde Dantec Dynamics firmasına ait FlowMap 2D PIV cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 3-5 Pitot hız ölçüm düzeneği

3.2.2.1 PIV (Particle Image Velocimetry)

PIV ölçüm sistemi bir yüksek hızlı kamera, bir yüksek atım frekanslı lazer üretici, bir parçacık (duman) üretici ve kameradan gelen görüntüleri işleyerek ölçüm sonuçlarını hesaplayan ve bu cihazları kontrol edilmesini sağlayan bir bilgisayardan oluşmaktadır. PIV yönteminde incelenecek bölgeye akışı bozmayacak büyüklükte parçacıklar gönderilmekte ve incelenmek istenen kesite düzlemsel bir lazer ışını gönderilmektedir. Bu sırada lazer ışınının gönderildiği kesite dik olarak yerleştirilmiş bir kamera akış kesitinden belirli aralıklarla görüntüler kaydeder. Bu lazer gönderim ve görüntü kayıt işlemleri yüksek frekansta ve belirli bir atım sayısı için tekrarlanarak kesitin birden fazla akış görüntüsü elde edilir.



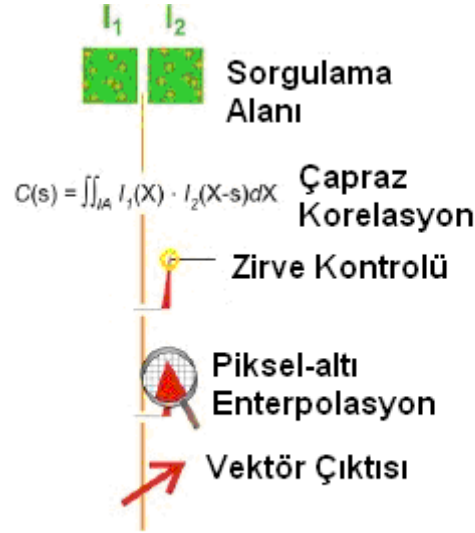
Şekil 3-6 PIV ölçüm yöntemi temel prensibi

Akış görüntüsü sayısal olarak işlenerek her iki atım arasında parçacıkların hareket vektörleri hesaplanır. Bu hesaplamada temel olarak parçacıkların yer değişim vektörleri kullanılır :

$$\vec{V} = \frac{\Delta \vec{X}}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Her bir akış görüntüsünün sayısal olarak işlenmesi bu görüntülerin “Inter-rogation Area” (IA) olarak adlandırılan küçük bölgelere ayrılması ile başlar. Bu ayrılmadan sonra her bir IA çapraz korelasyona tabi tutularak hareket vektörleri (Δx) hesaplanır.

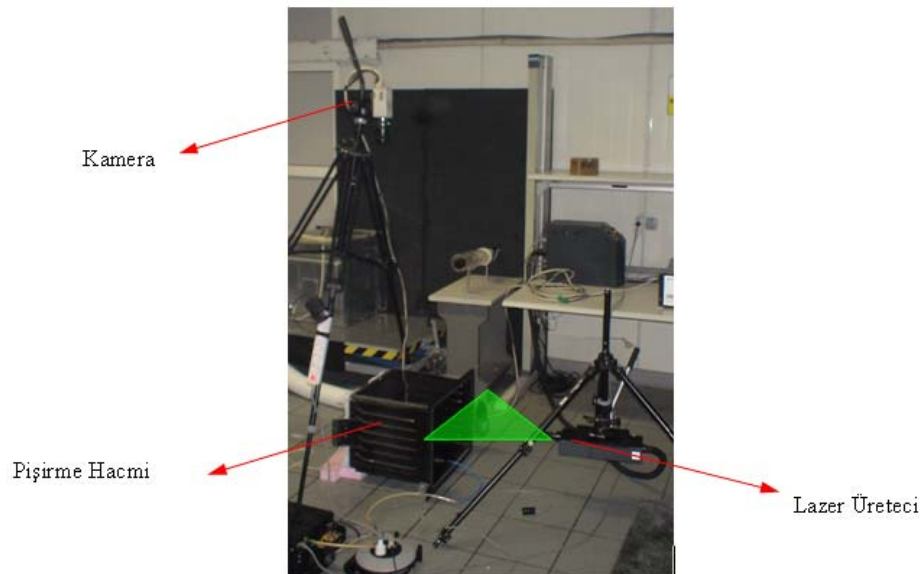
Her bir atım ile elde edilen akış görüntülerinin sayısal işlenmesi sonucu elde edilen hız vektörleri tüm görüntüler için ortalama alınarak akış kesitinin ortalama hız vektörleri elde edilir.



Şekil 3-7 Akış görüntülerinin sayısal işlenmesi

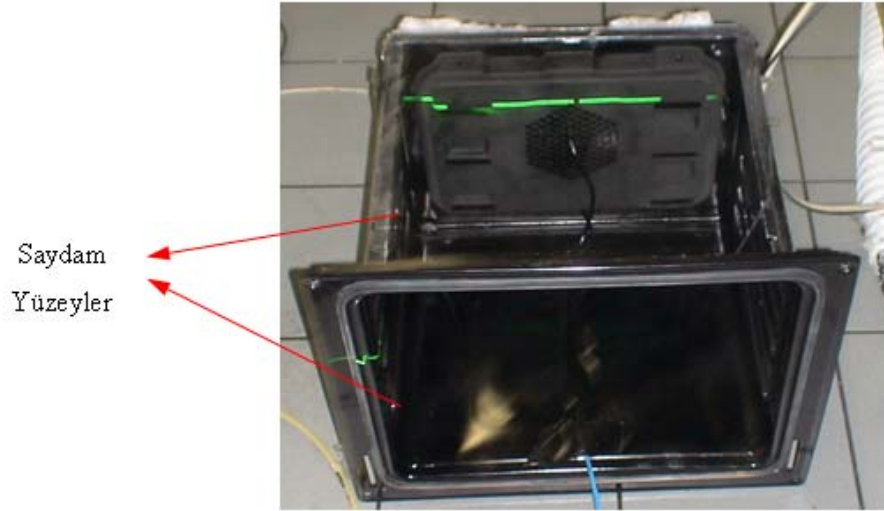
3.2.2.2 PIV ölçüm düzeneği

Yapılacak olan ölçümlerde tuğla ve pişirme hacmi iç duvarları etrafı inceleneceğinden akış görüntüleme kesiti olarak yatay kesit seçilmiştir. Bu kesitte görüntü almak amacıyla prototip pişirme hacmi üst bölgesine, yatay düzlemi görecektir şekilde, kamera yerleştirilmiş ve pişirme hacmi ön kapağından lazer ışını girişi sağlayacak şekilde lazer üretici pişirme hacmi önüne yerleştirilmiştir. Düzeneğin yerleşimi Şekil 3.8’de detaylı olarak görülmektedir.



Şekil 3-8 PIV deney düzeneği yerleşimi

PIV ölçümlerinde özellikle kapalı hacimler içerisindeki akışın incelendiği durumlarda lazer ışının hacme girebilmesi ve incelenecek kesitin kamera tarafından görüntülenebilmesi amacıyla en az iki adet saydam bölge oluşturulması zorunludur. Bu nedenle incelenecek fırın pişirme hacmi prototipi buna uygun olarak sırasıyla lazer ışınının hacme verilmesi için ön kapak bölgesi ve kameranın görüntü alabilmesi için üst duvarı saydam olarak hazırlanmıştır. Prototip pişirme hacmi Şekil 3.9’da görülebilir.



Şekil 3-9 Pişirme hacmi saydam yüzeyler

Piştirme hacmi içerisinde akışın göz ile algılanabilir hale gelmesini sağlayan parçacıkların oluşturulması için bir duman üretici kullanılmıştır. (Şekil 3.10) Bu üreteçte parafin yağının yakılması ve belirli oranlarda hava ile karıştırılması sonucu oluşturduğu duman bir boru vasıtasıyla piştirme hacmi içerisine akışı en az etkileyeceği bölge olduğu öngörülen fan emiş bölgesine verilmiştir.



Şekil 3-10 Duman Üreteci

Ölçümler öncesi, akış kesitinin inceleneceği bölgeye uygun olarak lazer üreteci konumlandırması yapılmış ve bu bölgelerdeki hız ölçümleri tamamlanmıştır. (Şekil3.11)



Şekil 3-11 Lazer üreteci konumlandırması

4 MODELLEME ÇALIŞMALARI

4.1 Pişirme Hacmi İçi Akışın Modellenmesi

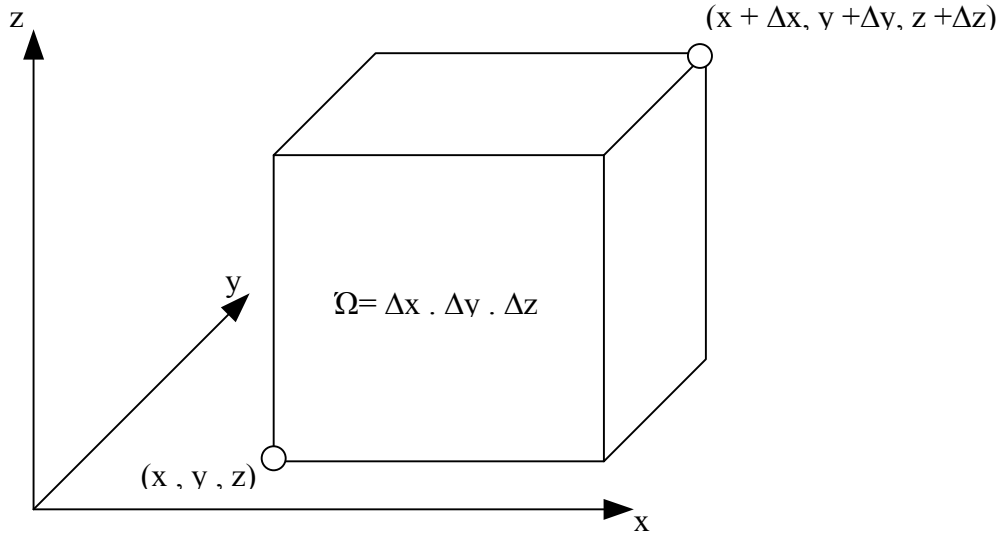
Pişirme hacmi geometrik merkezinde bir deney tuğlası bulunur halde akış modellenmesi yapılmıştır. Bu çalışmada Navier-Stokes ve enerji denklemleri türbülanslı akış için çözülürken, türbülans RNG k- ϵ modeli ile modellenmiştir. Bu şartlar altında test tuğlası etrafındaki akış incelenmiştir. Akış modelleme çalışmasının ilk aşamasında 2-D bir model ile çözümler yapılmış, ancak daha sonra, gerçek durumu daha iyi yansıtabilmesi açısından, 3-D modelleme yapılmıştır.

4.1.1 Matematik Model

4.1.1.1 Korunum denklemleri

Akışkanların davranışını tanımlayan denklemler kütle, momentum ve enerjinin korunumu temeline dayanır. Bu korunum denklemler, Navier-Stokes denklemleri olarak da bilinir. Korunum denklemleri, diferansiyel boyutlarda bir kontrol hacmi ile tanımlanan bir akışkan için üretim, taşınım ve yayılım terimlerinin hesaplanması ile oluşturulur.

Bu diferansiyel kontrol hacminde (Şekil.4.1) bir akış özelliği (ϕ) için; üretim terimi (4.1), taşınım terimi (4.2) ve yayılım (4.3) denklemleri aşağıda verilmiştir. Burada, $Q_{v\phi}$ hacimsel üretim, $Q_{s\phi}$ yüzeysel üretimi simgelemektedir. D_ϕ , yayılım katsayısıdır.



Şekil 4-1 Diferansiyel kontrol hacmi

$$Q_{v\phi}, Q_{s\phi} \quad (4.1)$$

$$F_{t,i} = \rho u_i \phi \quad (4.2)$$

$$F_{y,i} = -\rho D_\phi \frac{\partial}{\partial x_i} \phi \quad (4.3)$$

Diferansiyel kontrol elemanı için denge denklemi yazılarak genel korunum denkleminin temel hali elde edilir :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho \phi \Omega = & (\rho u_i \phi)_{x_i} A_{x_i} - (\rho u_i \phi)_{x_i + \Delta x_i} A_{x_i + \Delta x_i} + \left(-\rho D_\phi \frac{\partial}{\partial x_i} \phi \right)_{x_i} A_{x_i} \\ & - \left(-\rho D_\phi \frac{\partial}{\partial x_i} \phi \right)_{x_i + \Delta x_i} A_{x_i + \Delta x_i} + Q_{v\phi} \Omega + (Q_{s\phi})_{x_i} A_{x_i} - (Q_{s\phi})_{x_i + \Delta x_i} A_{x_i + \Delta x_i} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Alan hesapları (4.5) bu denkleme uygulanır ve tüm denklem diferansiyel hacme (4.6) bölünerek genel korunum denklemi (4.7) elde edilir. Bu denklemde korunum hesabı yapılacak akış özelliği (ϕ) yerine yazılarak kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri elde edilebilir.

$$A_{x_i} = A_{x_i + \Delta x_i} = \Delta x_j \Delta x_k \quad (4.5)$$

$$\Omega = \Delta x_i \cdot \Delta x_j \cdot \Delta x_k \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \phi + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_\phi \frac{\partial}{\partial x_i} \phi \right) + Q_{v\phi} + \frac{\partial}{\partial x_i} (Q_{s\phi}) \quad (4.7)$$

4.1.1.2 Kütlenin korunumu

Genel korunum denkleminde kütle korunum denklemi elde edilmesi için (ϕ) yerine 1 değeri yazılır. Bunu yanında, kütlenin üretilmesi veya yok edilmesi mümkün olmadığından üretim terimi sıfıra eşit olur (4.8). Tek fazlı bir akışkan ile ilgili hesaplamalarda kütlenin yayılımı söz konusu olmadığından yayılım terimi de sıfıra eşit olmaktadır (4.9).

$$Q_{s\phi} = Q_{v\phi} = 0 \quad (4.8)$$

$$F_{y,i} = -\rho D_\phi \frac{\partial}{\partial x_i} \phi = 0 \quad (4.9)$$

Kütle korunum denklemi aşağıdaki şekilde (4.10) elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenecek akış sıkıştırılmaz olduğundan kütle korunum denklemi son halini alır (4.11).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.11)$$

4.1.1.3 Momentum korunumu

Momentum korunum denklemlerinin elde edilebilmesi için akış özelliği olarak hız vektörü (u_j) alınır. Bu şekilde elde edilen denklem hızın alındığı eksenindeki (j) momentum korunumu ifade eder. Momentum yayılımı temelde hız farklarından kaynaklanan viskoz kuvvetler tarafından oluşturulur. Yayılım teriminin hesaplanmasında viskoz gerilmeler tensör (τ) ile ifadesi (4.12) kullanılmaktadır. Momentum korunumunda üretim terimi olarak akışkana etkiyen dış kuvvetler tanımlanmaktadır. Bu kuvvetler ($f_{e,j}$) ile ifade edilmektedir.

$$\tau_{ij} = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}\tau_{ij} + f_{e,j} \quad (4.13)$$

Bu tanımlara göre momentum korunum denklemi (4.14) elde edilir. İncelenen akış sıkıştırılamaz kabulü ile çözüleceğinden denklem (4.11) geçerli olur. Bununla birlikte akışkanın yoğunluğu sabit olduğundan (ρ) kısmi türevlerin dışına çıkarılabilir. Bu işlemler sonucunda momentum korunum denklemi son halini alır. (4.15)

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}u_j + \rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + f_{e,j} \quad (4.14)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}u_j + \rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + f_{e,j} \quad (4.15)$$

Bu çalışmada akış sürekli hal için çözülmekte olduğundan zamana bağlı terimler düşürülmüştür. (4.16)

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + f_{ej} \quad (4.16)$$

Dış kuvvet tanımı içerisinde sınır şartlardan kaynaklanan, örneğin fan, momentum transferi tanımlanabilmektedir. Bununla beraber, eğer akışta etkin ise yerçekimi kuvveti de f_{ej} terimi içerisinde tanımlanabilir. Yerçekimi etkisini hesaba katmanın bir diğer yolu da yerçekimi etkisini de içeren bir basınç terimi oluşturmaktır. Burada tanımlanan yeni basınç terimi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir (4.17).

$$-\frac{\partial p'}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(p + \rho g_j x_j \right) \quad (4.17)$$

4.1.1.4 Enerji korunumu

Genel korunum denkleminde enerji korunum denkleminin elde edilmesi için (ϕ) yerine akışkanın birim kütlesi için iç enerji miktarını ifade eden (E) simgesi yerleştirilmiştir (4.18). Akışkanın toplam enerjisi iç enerji ile kinetik enerjisinin toplamıdır. Ancak, sıkıştırılmaz akışlarda kinetik enerji iç enerjiye oranla ihmal edilebilir büyüklükte olduğundan iç enerji akışkanın toplam enerjisi olarak kabul edilmiştir. Yayınım terimi Fourier kanunu ile belirlenmiş olan sıcaklık iletim denkleminde tanımlanmıştır. Burada akışkanın ısı iletim katsayısı (λ) ile simgelenmektedir. Üretim terimi Q_{ve} ile simgelenmiştir ve akışkan içerisindeki ısı üretimleri bu terim ile ifade edilmektedir. Denklem (4.18)'in son terimi akışkana etki eden viskoz gerilmeler sonucu oluşacak ısınma gücünü ifade eden “viskoz ısınma” olayını hesaba katmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i E) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_{ve} + f_{ej} u_j + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} u_j) \quad (4.18)$$

Enerji korunum denkleminin farklı bir ifade şeklinde toplam enerji (E) yerine entalpi (H) ile hesaplama yapılabilir. Burada entalpi (H)'nin enerji (E) ile olan bağıntısını ifade eden denklem (4.19) ve entalpi (H)'nin sıcaklık ile bağıntısını ifade eden denklem (4.20) kullanılmıştır.

$$H = E + \frac{p}{\rho} \quad (4.19)$$

$$H = C_p (T - T_0) \quad (4.20)$$

İncelenen akış bölgesinde sıcaklık farkları çok yüksek değerlere ulaşmadığından C_p sabit kabul edilmiştir. Bununla beraber, akışkan içerisinde ısı üretimi sağlayacak bir olay, örneğin kimyasal reaksiyon, bulunmadığından Q_{ve} terimi düşmüştür. Viskoz ısınma etkisi, incelen akıştaki hız gradyanları çok yüksek olmadığından ihmal edilmiştir. Bu kabullere göre enerji korunum denkleminin son hali (4.21) elde edilmiştir.

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \quad (4.21)$$

4.1.1.5 k-ε türbülans modeli

Türbülans, akışın belirli Reynolds sayısı değerlerinin üzerindeki hallerinde ortaya çıkan ve fiziksel olarak davranışını tam olarak ifade edilemeyen bir fenomendir. Bu fenomeni ifade eden fiziksel bir denklem bulunmamakla birlikte, belirli akış şartlarında olumlu sonuçlar verebilen türbülans modelleri mevcuttur. Bu modeller türbülansın akış üzerine etkisini ifade etmek amacıyla yeni türbülans terimleri ve büyüklükleri tanımlarlar.

Bu çalışma kapsamında incelediğimiz akışın tipi ve yaklaşık hız mertebeleri göz önüne alındığında k-ε modelinin uygulanmasına karar verilmiştir. k-ε modeli temelde akışa iki yeni büyüklük tanımlanarak bu büyüklükler ile türbülanslı akış hız ve karakteristiğine etkisini sağlar. Burada k (4.22) türbülans yoğunluğu, ε (4.23) ise türbülans yayma oranını simgeler. Akış denklemleri çözülür iken bu iki terim de çözülerek türbülanslı akış çözümü elde edilmiş olur.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (4.22)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.23)$$

Model sabitleri olan C_1 , C_2 ve C_3 için genel değerler bulunmaktadır. Ancak, çözülen probleme göre bu değerler değiştirilerek çözümün doğruluğu artırılabilir.

4.1.2 Sayısal Çözüm

Kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri ile türbülans modeli denklemleri genel transport denklemi formatındadır. Bu denklemlerin sayısal çözümlemesinin yapılması için ilk olarak uygun bir ayrıklaştırma yönteminin kullanılması gereklidir.

Sayısal çözüm için “FLUENT” adlı bir ticari kod kullanılmıştır. Bu kod ayrıklaştırma yöntemi olarak “Finite Volume” kullanılmaktadır.

4.1.2.1 Sonlu Hacim Metodu

Düzgün geometrili alanlarda diferansiyel denklemlerin analitik çözümlerine kolaylıkla elde edilebilmektedir. Ancak kompleks geometrili çözüm alanları için sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bu durumlarda uygun bir ayrıklaştırma yöntemi ile geometri ayrıklaştırılmalıdır. CFD uygulamalarında çoğunlukla “ Finite Volume” Sonlu Hacim yöntemi kullanılmaktadır.

Bu yöntem denklemlerin entegre edilmiş hallerini başlangıç noktası kabul etmektedir. Entegraller, sonlu hacimlerin merkezinde bulunan düğüm noktalarının değeri olarak kabul edilir. Bu yaklaşım, integral almak ve sonlu fark enterpolasyonu yapmayı gerektirir. Bu nedenle sonlu eleman ve sonlu fark yöntemlerinin bir karışımı olarak görülür. Bu çalışmada geometrinin ayrıklaştırılmasında sonlu hacim yöntemi kullanılmıştır.

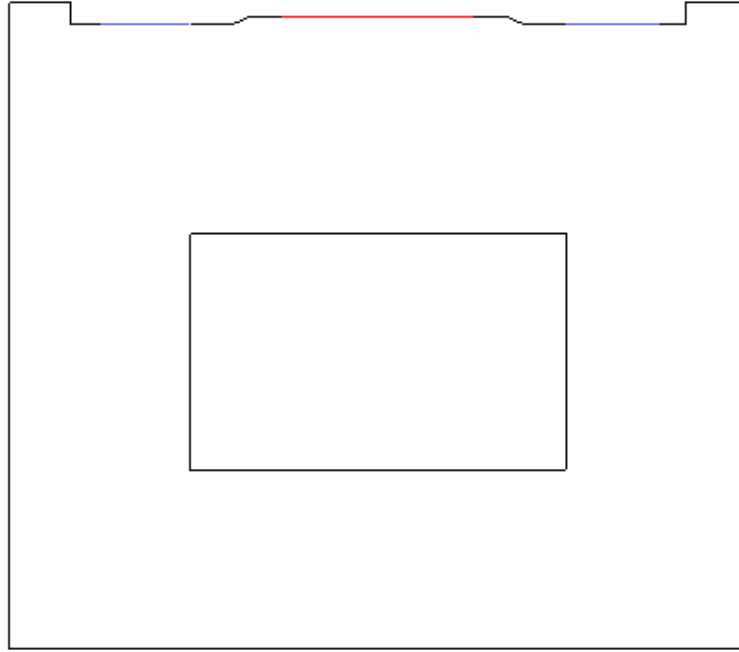
4.1.3 2-D Modelleme

Modelleme çalışmalarının ilk aşaması olarak pişirme hacminin 2-D modellenmesi yapılmıştır. 2-D modelleme fan ve ısıtıcının gerçekçi bir şekilde tanımlanmasına imkan vermemekle birlikte pişirme hacmi içerisindeki temel akış karakterinin elde edilmesi ve problemin kendisi ile ilgili modelleme tecrübesi edinilmesi açısından faydalı olmuştur. Çalışma kapsamında, geometri ve ağ yapısı oluşturulmuştur. Sonrasında problemi temsil eden sınır şartları tanımlanarak çözümleme yapılmıştır. Çözümlemeler iki adet Xeon 3.0 Ghz işlemciye sahip HP xw6230 Workstation bilgisayarda yapılmıştır. 2-D çözümlemeler için harcanan toplam işlem süresi 45 saattir.

4.1.3.1 Geometri ve Ağ yapısı oluşturulması

Çalışmada incelenen fırın pişirme hacmi modellenmiştir. Model 2-D olduğundan pişirme hacminin merkezinden geçen bir yatay kesiti alınmıştır. Pişirme hacmi geometrisindeki akışı etkilemeyecek büyüklük ve konumdaki yapısal detaylar kaldırılarak geometri basitleştirilmiştir. Bu sayede toplam eleman sayısı düşük

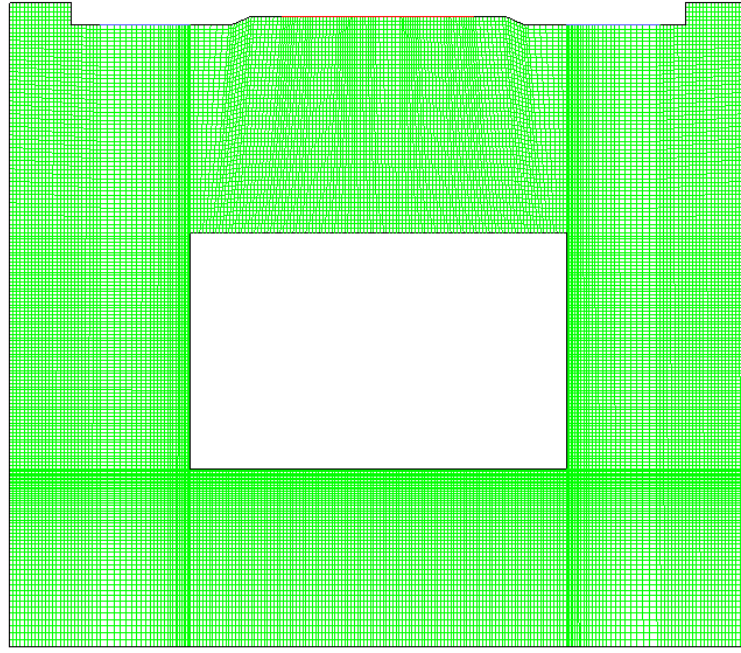
tutulmakta, böylece de analiz için gereken işlem yükü azalmaktadır. Seçilen pişirme hacmi 450 mm genişliğinde ve 510 mm derinliğindedir. Tuğla, pişirme hacmi merkezi ile tuğla merkezi çakışacak şekilde yerleştirilmiştir.



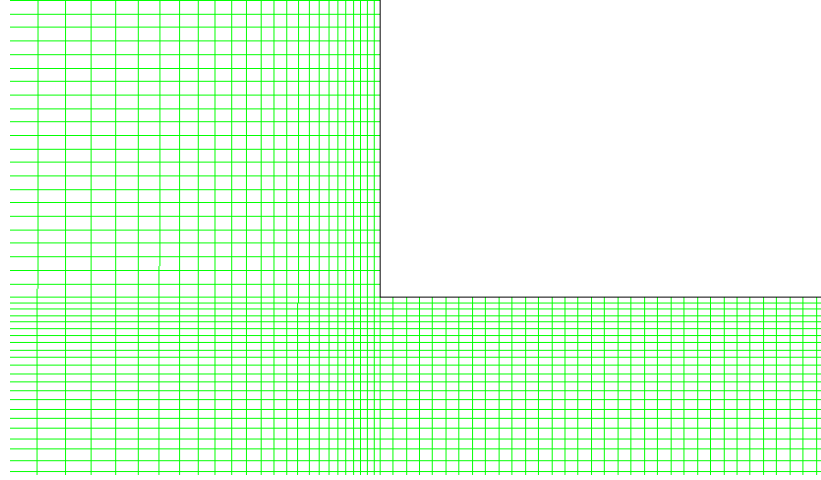
Şekil 4-2 Fırın pişirme hacminin yatay kesiti

Pişirme hacmi içerisinde aslında bir fan ve ısıtıcı bulunmaktadır. Ancak modelin basitleştirilmesi amacıyla bu elemanlar modele yerleştirilmemiştir. Bunun yerine fan koruma sacı olarak tanımlanan sac parça pişirme hacmi sınırı kabul edilerek bu parça üzerindeki üfleme ve emiş delikleri sınır şartları ile bu elemanların etkileri temsil edilmiştir.

Ağ yapısı toplam 29070 eleman ve 29658 düğüm noktası tanımlanarak oluşturulmuştur. Bu eleman ve düğüm noktaları tanımlanırken “mapping” yöntemi kullanılarak duvar sınırı gibi kritik bölgelerde istenilen incelikte elemanlar elde edilebilmiştir. Özellikle tuğla yüzeylerindeki sınır tabakaların doğru hesaplanabilmesi için ince elemanların oluşturulması önemlidir. Bu sayede tuğla yüzeylerindeki taşınım katsayıları doğru biçimde hesaplanabilecektir.



Şekil 4-3 2-D Ağ yapısı



Şekil 4-4 Tuğla yakınında ağ yapısı detayı

4.1.3.2 Sınır Şartlar

Çözümün doğru yapılabilmesi için modelde doğru sınır şartların tanımlanması önemlidir. Bu çalışmada, sınır şartlar deneysel çalışmalardan ve kabuller kullanılarak yapılmış hesaplamalardan elde edilmiştir. Fan ve ısıtıcı modelde bulunmadığından bu elemanların etkisi sınır şartlar kullanılarak tanımlanmıştır.

Model geometrisinde, fırın yan duvarlarını temsil eden iki yan duvar, fırın kapağını temsil eden bir ön duvar ve fan koruma sacını temsil eden bir arka duvar bulunmaktadır.

Yan duvarlar taşınım ile çevreye ısı kaybeden metal duvarlar olarak tanımlanmıştır. Bu duvarlarda izolasyon malzemesi olarak cam yünü kullanılmaktadır. Toplam ısı geçiş katsayısı; pişirme hacmi duvar malzemesi, izolasyon malzemesinden iletim ve bu izolasyon malzemesi üzerinden doğal taşınım ile ısı geçişi ile hesaplanmıştır. Buna göre bu duvarlar için toplam ısı geçiş katsayısı (k_t) çok katmanlı yapılarda denklem (4.24) ile hesaplanır.

$$\frac{1}{k_t} = \frac{d_d}{k_d} + \frac{d_i}{k_i} + \frac{1}{h_i} \quad (4.24)$$

$$d_d = 0,7mm$$

$$d_i = 20mm$$

$$k_d = 120 W/m.K \quad (4.25)$$

$$k_i = 0,050 W/m.K$$

$$h_i = 10 W/m^2.K$$

$$\frac{1}{k_t} = \frac{0,7.10^{-3}}{120} + \frac{0,02}{0,05} + \frac{1}{10} \cong 0,4 \quad (4.26)$$

$$k_t \cong 2 W/m^2.K \quad (4.27)$$

Arka duvar sabit sıcaklıkta bir duvar olarak tanımlanmıştır. Çünkü fan koruma sacını temsil etmektedir ve deney boyunca bu sac yaklaşık ısıtıcı sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta sabit kalmaktadır. Deney sonuçları değerlendirilerek bu duvar için 500K sabit sıcaklık tanımlanmıştır.

Ön duvar taşınım ile çevreye ısı kaybeden bir duvar olarak tanımlanmıştır. Bu duvardaki ısı taşınım katsayısı, gerçek fırındaki cam sayısı ve kalınlıkları da göz önüne alınarak daha önce Özyurt ve diğ. [30] tarafından yapılan çalışmada

belirlenen $20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ olarak kabul edilmiştir. Dış ortam sıcaklığı da oda sıcaklığı olarak 297 K tanımlanmıştır.

Piştirme hacmi içerisindeki hava çevrimimin tanımlanması için arka duvar yanlarda iki üfleme deliği ve ortada bir emiş deliği konumlandırılmıştır.

Üfleme delikleri piştirme hacmine kütle girişi olarak tanımlanmıştır. Turbo fırınlarda, radyal fan kullanılması sebebiyle, iki üfleme deliğinden çıkan havanın debileri ve yönleri arasında küçük farklar vardır. Daha öne yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak sol ve sağ üfleme delikleri için sırasıyla 7.5 kg/s ve 7 kg/s hava debisi kabulü yapılmıştır. Bu debiler yatay kesitin birim uzunlukta uzatılmış hali için tanımlanmıştır. Ayrıca hız vektörü de yan duvarlara doğru 45° açı ile tanımlanmıştır. Isıtıcının etkisinin tanımlanması için kaviteye giren havanın sıcaklığı 500 K olarak kabul edilmiştir.

Arka duvarın ortasındaki emiş deliği ise “pressure-outlet” basınca bağlı çıkış olarak tanımlanarak, hava sirkülasyonu sağlanmıştır.

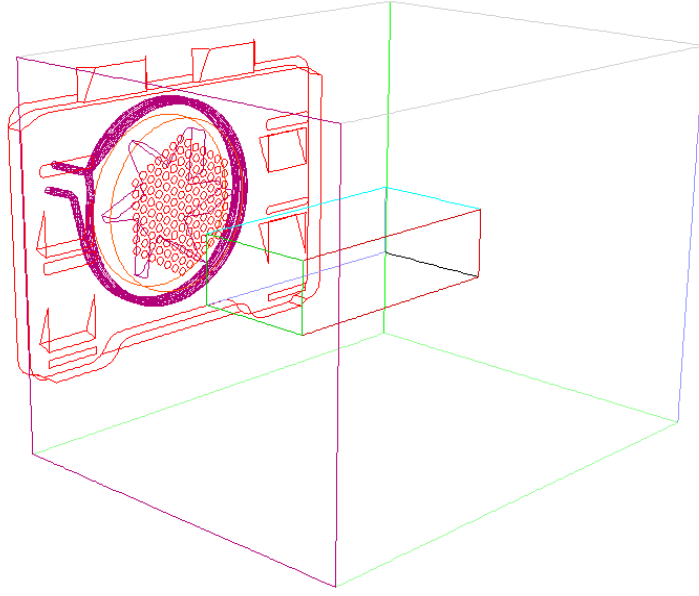
Deney süresinde tuğlaya aktarılan ısınn analizde tanımlanabilmesi için tuğla yüzeyine sabit 350K sıcaklık tanımlanmıştır.

4.1.4 3-D Modelleme

Çalışmanın ilk aşamasında basitleştirilmiş geometri ile yapılan 2-D modelleme çalışması sonrasında problemi daha etkin tanımlanması amacıyla 3-D modelleme çalışması yapılmıştır.

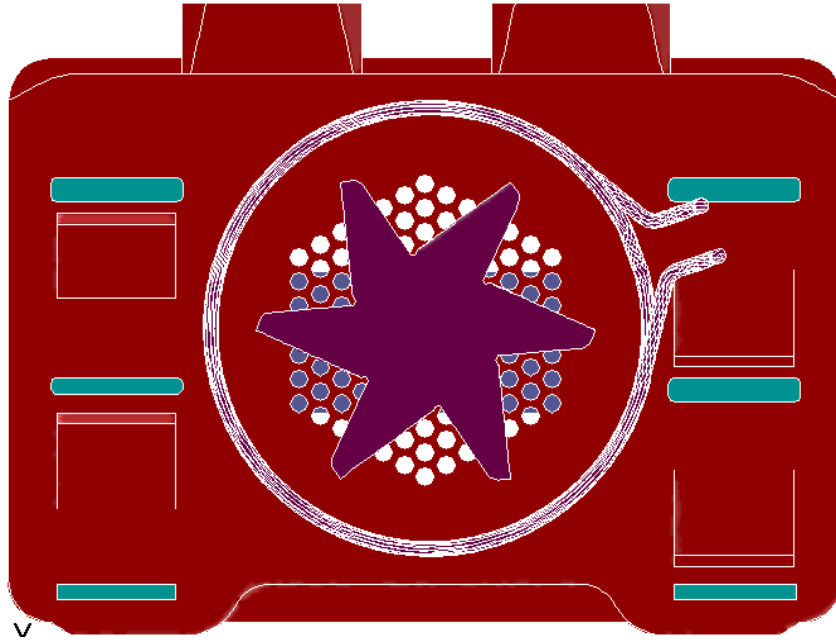
4.1.4.1 Geometri ve Ağ yapı oluşturulması

İncelenen fırının piştirme hacminin tanımlanması amacıyla bu hacmin duvarları ve FKS geometrileri akışı etkilemeyecek yapısal detaylarından temizlenerek modelleme geometrisi oluşturulmuştur (Şekil.4.5).



Şekil 4-5 3-D modelleme geometrisi

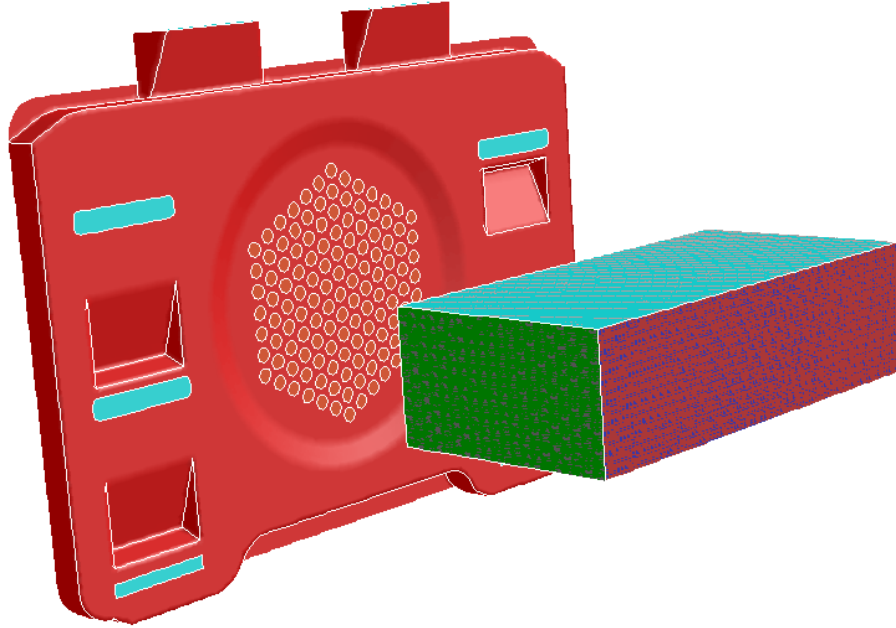
Geometri pişirme hacmini belirleyen dış duvarlar, arka duvara yerleştirilmiş fan, bu fan etrafına yerleştirilmiş çember formu ısıtıcı,(Şekil.4–6) fan ve ısıtıcı pişirme hacminden ayıran FKS ve kullanılabilir pişirme hacminin ortasına yerleştirilmiş tuğlayı (Şekil.4–7) içermektedir.



Şekil 4-6 Fan, ısıtıcı ve FKS

Geometri oluşturulur iken FKS üzerindeki üfleme delikleri üzerinde de ayrı yüzeyler tanımlanarak bu bölgelerin ilerde ayrı ağ yapı grupları tanımlanabilmesi, dolayısıyla

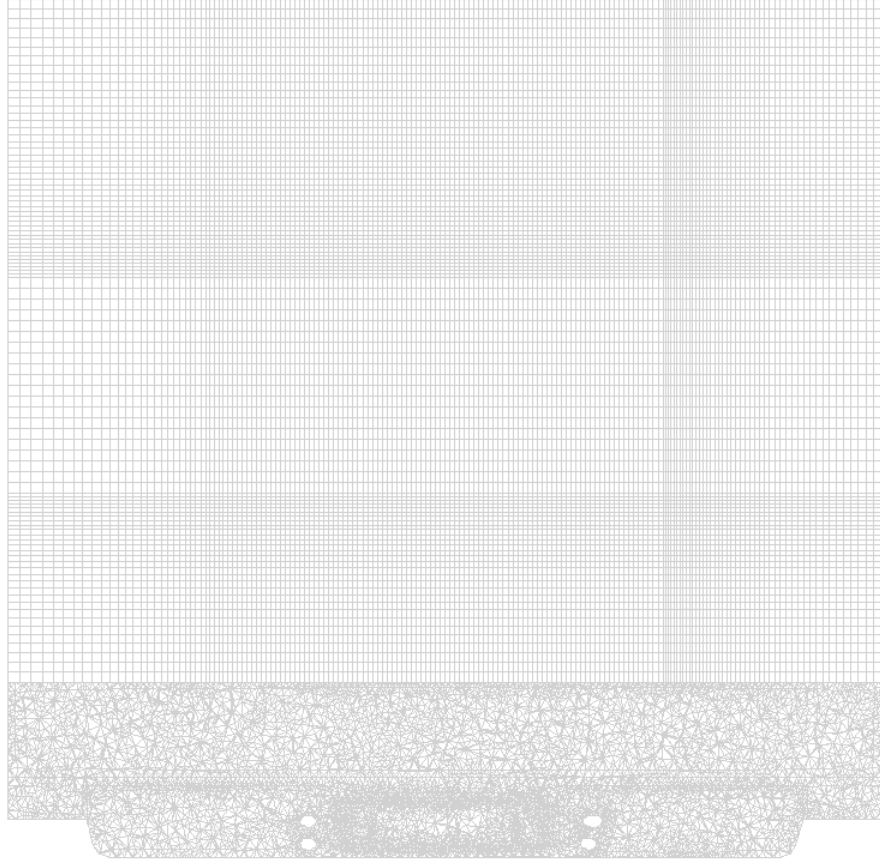
özmlerelerde delik konfigürasyonlarının kolaylıkla tanımlanabilmesi sağlanmıştır.



şekil 4-7 FKS ve Tuğla

Model geometrisinin oluşturulmasının ardından bu geometriyi tanımlayacak ağ yapısı oluşturulmuştur. Çalışmanın amacı tuğla etrafında hava akışının incelenmesi olduğundan bu bölgede yoğun ağ yapısı oluşturulması hedeflenmiştir.

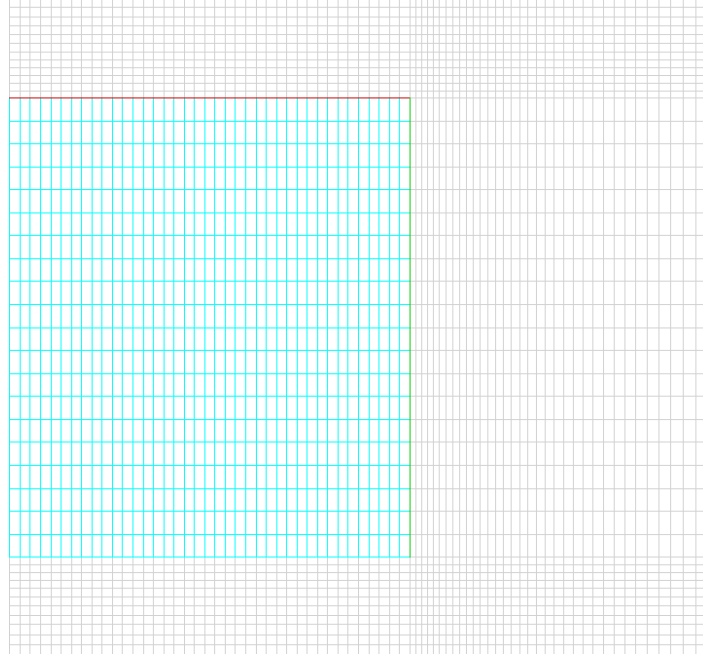
Ağ yapısı temel olarak iki farklı tip hacim elemanı ile oluşturulabilmektedir. Tetragonal ve Hexagonal. Tetragonal hacim elemanları her yüzeyi üçgen olan dört yüzlü bir yapıdır. Bu yapı özellikle karmaşık geometrilerin tanımlanmasında kullanılır. Hexagonal hacim elemanları ile her yüzeyi dörtgen olan altı yüzlü bir yapıdır. Bu elemanlar düzgün geometrilerde kullanıma daha uygun olmakla beraber, özellikle sınır tabakaların incelenmesi amacıyla yüzeylere yığılı ağ yapıların oluşturulmasında kullanılırlar.



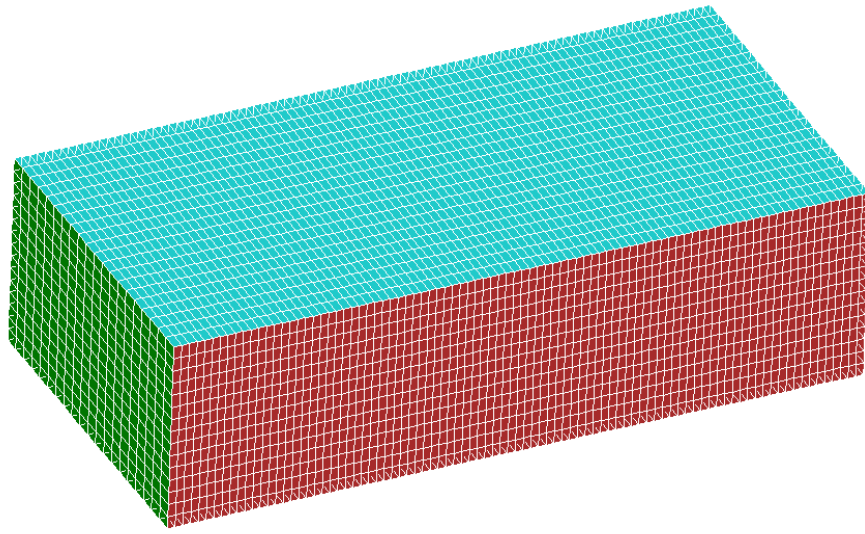
Şekil 4-8 Hibrid ağ yapısı

Bu çalışmada incelenecek olan hacim iki bölgeye ayrılarak tuğlanın bulunduğu pişirme hacminde hexagonal elemanlarla “mapping” yöntemi ile fan ve FKS’nin bulunduğu bölgede ise tetragonal elemanlarla ağ yapısı oluşturulmuştur. (Şekil.4–8) Farklı tiplerde elemanların birlikte kullanıldığı ağ yapılar hibrid ağ yapısı olarak adlandırılır. Bu ağ yapılarında farklı elemanlarla ağ yapısı tanımlanmış bölgelerin ara yüzeyi HAD yazılımına tanıtılarak, her hesaplama adımında bu bölgede enterpolasyon yapılarak bu bölgelerdeki çözümlerin bağlanması sağlanır.

Ağ yapının iki ayrı bölgeye ayrılarak tanımlanması tuğla yüzeylerinde yoğun ağ yapısının düzgün bir şekilde oluşturulmasını sağlar (Şekil.4–9, 4–10).



Şekil 4-9 Tuğla yüzeylerinde yığılı ağ yapısı



Şekil 4-10 Tuğla yüzeyi ağ yapısı

4.1.4.2 Sınır Şartlar

Oluşturulan modelde kapalı bir hacim tanımlandığından akış için kullanılan sınır şart model içerisine yerleştirilen fanın dönme hızıdır. Bu hız iki farklı motor tipi için Tablo 4.1‘de verilen değerlerdedir.

Tablo 4-1 Motor gücü ve fan hızı

Motor Gücü	Hız
(W)	(Devir/dk)
23	1400
38	2200

Bunun yanında FKS üzerindeki üfleme deliklerinin bir kısmı kapatıldığı durumlar incelenmiştir. FKS üfleme delik konfigürasyonu olarak tüm deliklerin açık olduğu ve yalnızca tuğla kesitine üfleyen orta sıra deliklerin açık olduğu iki durum için sınır şartlar tanımlanmıştır. Motor gücü alternatifleri de göz önüne alındığında Tablo 4.2’de tanımlanan 4 farklı konfigürasyon için sınır şartı setleri tanımlanmıştır.

Tablo 4-2 Sınır şart setleri

Konfigürasyon	Motor Gücü (W)	FKS Açık Delikler
1	23W	Tüm
2	23 W	Orta
3	38W	Tüm
4	38W	Orta

Modelde ısııl sınır şartı olarak ısıtıcı üzerinden ısı akısı tanımlanmıştır. Bu akı miktarı bir enerji testi süresince olan ortalama ısıtıcı gücüdür. Bu değer yaklaşık 1000W’dır. Benzer şekilde tuğla hacmine de pişirme hacminden tuğlaya doğru bir ısı akısı tanımlanmıştır.

Pişirme hacmi yan ve ön duvarlarından olan ısı kaybının modellenmesi için sınır şartlar s.35’te belirtildiği gibi kabul edilmiştir.

4.2 Tuğla Isı Geçişinin Modellemesi

Enerji tüketimi deneyi ısııl modellenmesi amacıyla yığın model yaklaşımı ile bir matematik model oluşturulmuştur. Tuğla kontrol hacmi kabul edilerek enerji korunum denklemi yazılmıştır. Taşınım ve ışıınım ile olan ısı geçişi denklemleri açılarak korunum denklemi son haline getirilir.

$$E_d = E_g - E_\zeta \quad (4.24)$$

$$\rho V_t C_p \frac{dT}{dt} = Q_{ta\dot{s}} + Q_{t\dot{s}t} \quad (4.28)$$

$$\rho V_t C_p \frac{dT}{dt} = hA_t(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon A_t(T^4 - T_d^4) \quad (4.29)$$

$$\rho V_t C_p \frac{dT}{dt} = hA_t(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon A_t(T^4 - T_d^4) \quad (4.30)$$

5 TAŞINIMLA ISI GEÇİŞ KATSAYISI HESABI

Fırının kullanım amacı olan yemek pişirme, temelde pişirme hacmi içerisine yerleştirilmiş hedef malzeme (yiyecek)'e, yine pişirme hacmi içerisinde bulunan ısıtıcı ile üretilen ısının aktarılması ile gerçekleşir. Burada ısı taşıyıcı ortam olarak hava kullanıldığından, hava ile yiyecek arasındaki ısı transferi kritik öneme sahiptir.

Modelleme çalışmaları sonucu elde edilen hava hız dağılımları kullanılarak pişirme hacmi duvarları ve tuğla (enerji deneyi için hedef malzeme) duvarları üzerindeki taşınım ısı geçişi katsayıları hesaplanmıştır.

Isı taşınım katsayılarının hesaplanmasında boyutsuz akış parametreleri olan Reynolds (Re), Nusselt (Nu) ve Prandtl (Pr) sayıları kullanılır. Reynolds sayısının büyüklüğü akışın türbülanslı veya laminar olduğunun belirlenmesi için kullanılır ve hızın (U) karakteristik uzunlukla (L) çarpımının kinematik viskoziteye (γ) bölünmesi ile elde edilir (5.1). Kinematik viskozite ise dinamik viskozitenin (μ) yoğunluğa bölünmesi ile hesaplanır (5.2). Prandtl sayısı dinamik viskozite (μ) ile özgül ısının (C_p) çarpımının ısı iletim katsayısına (λ) bölünmesi ile hesaplanır (5.3). Nusselt sayısının akış parametreleri kullanılarak hesaplanmasında ampirik korelasyonlar kullanılır (5.4). Belirli Re büyüklükleri ve belirli geometriler için yapılan deneysel çalışmalar sonucu Re ve Pr sayıları ile Nu sayısı arasında Arrhenius tipi bağıntılar oluşturulmuştur. İncelenen akış ve geometriye uygun Nu bağıntıları kullanılarak Nu sayısı hesaplanmaktadır. Ayrıca, Nu sayısı ısı taşınım katsayısı (h) ile karakteristik uzunluğun (L) çarpımı ısı iletim katsayısına (λ) bölünerek hesaplanabilmektedir. (5.5) Buna göre akış ölçümleri yapılmış bir bölge için (5.1–5) denklemleri kullanılarak ısı taşınım katsayısı hesaplanabilir.

$$Re = \frac{UL}{\gamma} \quad (5.1)$$

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.2)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (5.3)$$

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (5.4)$$

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (5.5)$$

Yapılan literatür araştırması sonucunda bir katı etrafında akış için birçok Nu bağıntısı bulunmuştur. Bunlardan (Igarashi, 1987) bir dikdörtgen prizma için L/D oranına göre Nu bağıntılarını vermektedir. (Tablo 5.1) Burada L karakteristik uzunluk, D ise incelenen akış yönüne dik kalınlıktır.

Tablo 5-1 Nu bağıntıları (Igarashi, 1987)

L/D =1	$Nu = 0,140 Re^{2/3}$
L/D =1,33	$Nu = 0,127 Re^{2/3}$
L/D =1,5	$Nu = 0,116 Re^{2/3}$

Bir başka çalışmada (Sato, 1987) Pr sayısının sabit olduğu kuru hava için Nu bağıntılarını vermiştir. Ancak bu bağıntılar $1000 < Re < 3000$ için geçerlidir.

$$Nu = 0,5 Re^{0,54} \quad (5.6)$$

Nemli hava ile yapılan bir başka çalışmada ise (Fraile,1995) D/L oranının $\frac{1}{4}$ olduğu bir dikdörtgen için Nu bağıntısı bulunmuştur. ($2000 < Re < 10000$) (5.7)

$$Nu = 2,37 Re^{0,44} Pr^{0,47} \quad (5.7)$$

Isı taşınım katsayısının bir diğer hesaplanma yolu ise belirli bir bölgeden olan ısı geçişinin hesaplanması ve temel ısı geçiş denklemi (5.6) kullanılarak ısı taşınım

katsayısının belirlenmesidir. Burada toplam ısı geçişinin (Q) ve sınır tabaka dışındaki referans sıcaklığın (T_{∞}) doğru ölçülmesi kritik önem taşımaktadır.

$$Q = h(T_{\infty} - T_y) \quad (5.8)$$

Bu hesaplama yönteminde yüzey sıcaklığının (T_y) tüm yüzey üzerinde eşit olmadığı durumlar için bu sıcaklığın veya sıcaklık farkının (ΔT) yüzey üzerinde entegre edilerek hesaplanması gerekir. Çalışmada kullanılan HAD yazılımı bu hesaplamayı yapabilmektedir. Bu yöntemde yüzeyden geçen ısı miktarı N-S denklemlerinin çözülmesi ile hesaplanmakta ve referans sıcaklık olarak sınır tabaka bitimindeki hava sıcaklığı değeri alınmaktadır.

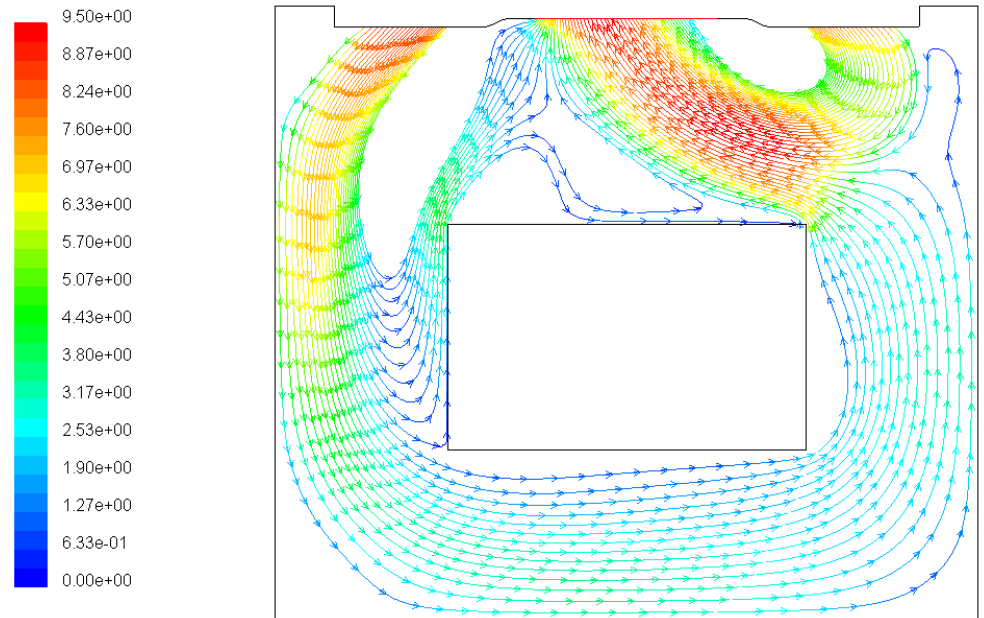
Bu çalışma kapsamında elde edilen hız değerleri kullanılarak; analitik hesaplama ile ve toplam ısı geçişi kullanılarak HAD yazılımı ile tuğla ve pişirme hacmi duvarları üzerinde ısı geçiş katsayıları hesaplanmış ve bu değerler karşılaştırılmıştır. Analitik hesaplamalarda Tablo 5.1 denklem 5.6 ve 5.7’de verilen Nu bağıntıları ile hesaplamalar yapılarak tüm sonuçlar karşılaştırılmıştır.

6 SONUÇLAR VE İRDELEMELER

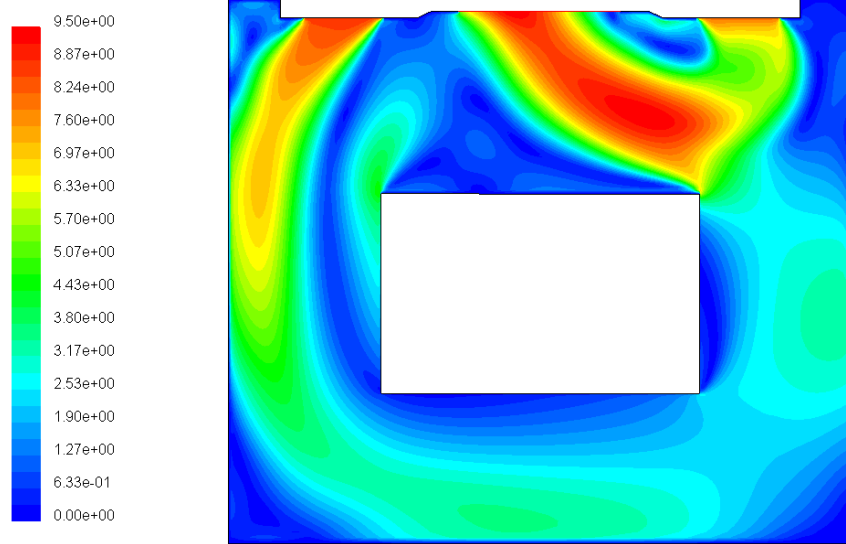
Modelleme çalışmaları sonucunda tanımlanan modellerin çözümleri ARÇELİK ARGE departmanı bünyesinde bulunan HP-UNIX süper bilgisayar ile yapılmıştır. Çözümleme sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak aşağıda sunulmuştur.

6.1 2-D modelleme sonuçları

2-D modelde fan tanımlanmadığından sağ sol üfleme deliklerine farklı hava debileri tanımlanarak fanın dönü yönü sebebi ile olan asimetrinin tanımlanması yoluna gidilmiş idi. Ancak Şekil 6.1’de görülen pişirme hacmi içerisindeki akış dağılımı incelendiğinde, düşük hava debisi tanımlanan delikten çıkan havanın doğrudan emiş deliklerine yöneldiği görülmüştür.

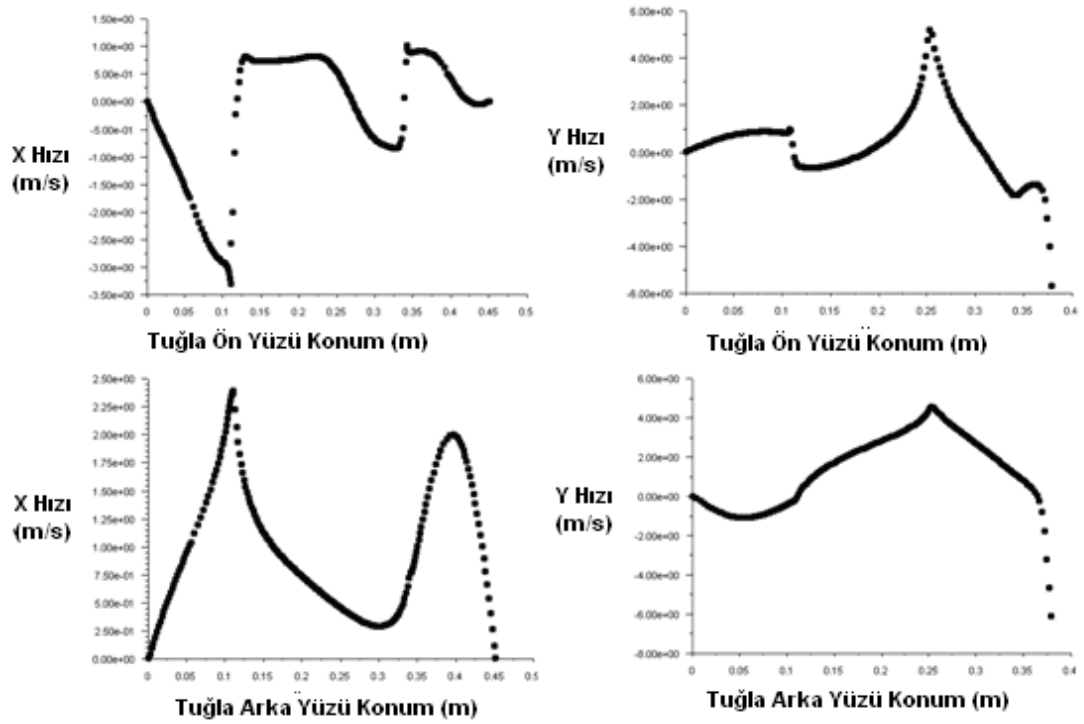


Şekil 6-1 Hıza göre renklendirilmiş akış çizgileri (m/s)



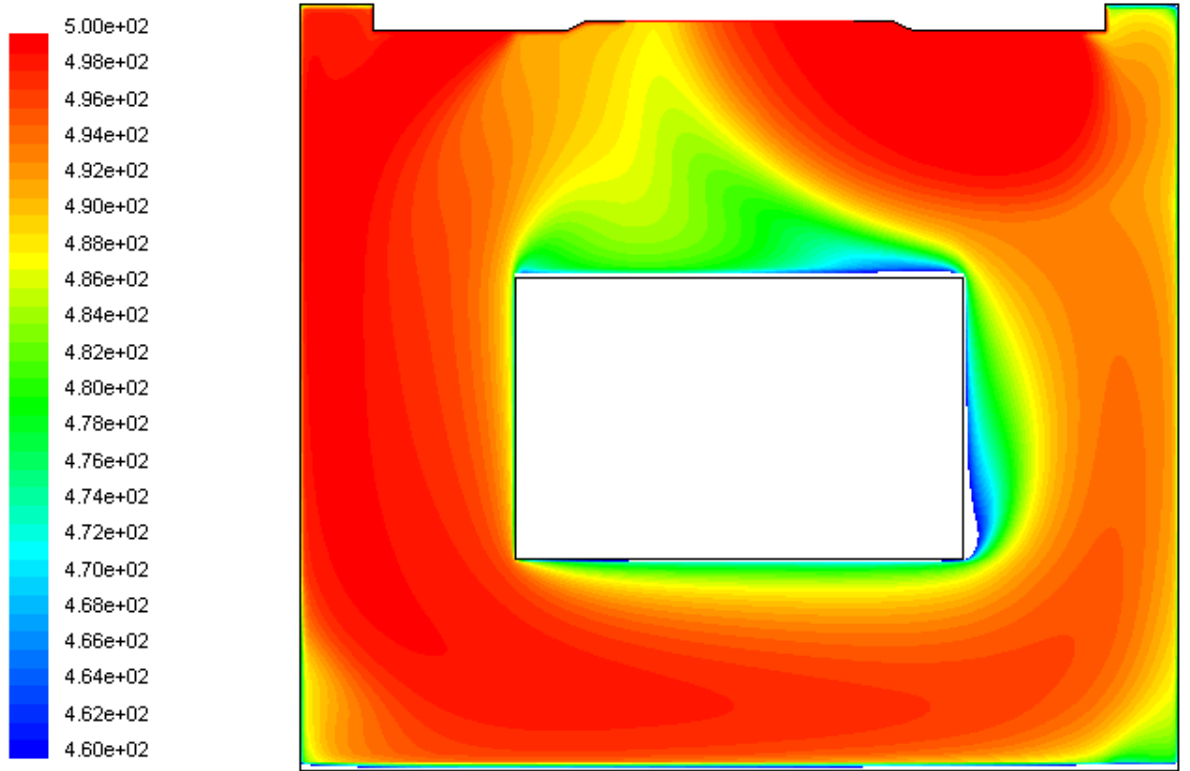
Şekil 6-2 Pişirme hacmi içerisinde hava hızı dağılımı (m/s)

Tuğla yüzeylerindeki hız dağılımı her iki hız bileşeni için Şekil.6-3'te verilmiştir. Hız değerleri tuğla yüzeylerinden 5 mm uzakta oluşturulan sanal yüzeylerden alınmıştır. Tuğla köşelerinde her iki hız bileşeninin de arttığı görülmüştür. Bu hız değerleri ve tuğla boyutları kullanılarak, sırasıyla Re, Nu sayıları ve sonunda taşınım katsayıları elde edilebilir.



Şekil 6-3 Tuğla yüzeyleri hız dağılımı

Piştirme hacmi içerisinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 6-4'te görülmektedir.



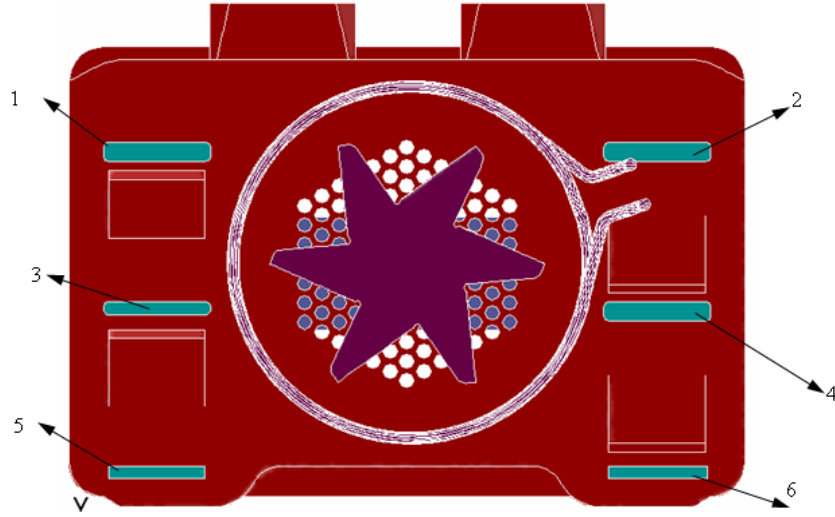
Şekil 6-4 Piştirme hacmi sıcaklık dağılımı (K)

2-D modelleme çalışması sonucunda elde edilen hız ve sıcaklık dağılımları temel bir fikir vermekle beraber istenilen düzeyde detayı sonular elde edilememiştir.

6.2 3-D modelleme sonuçları

Modelleme çalışması sonrasında dört farklı sınır şartı seti için dört konfigürasyonda çözümler yapılmıştır. Bu çözümlerlerde FKS üzerindeki deliklerin bir kısmı kapatıldığı durumlar da incelenmiştir. Şekil 6-5'te FKS üzerindeki deliklerin tanımlanabilmesi için numaralandırılmış hali görülebilir.

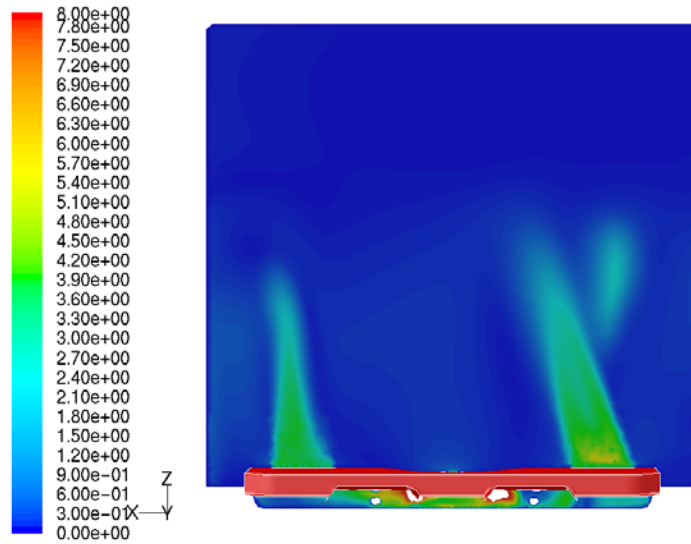
Çözümler sonucunda piştirme hacmi içerisinde üfleme delikleri hizasında yatay kesitte hız dağılımları elde edilmiştir.



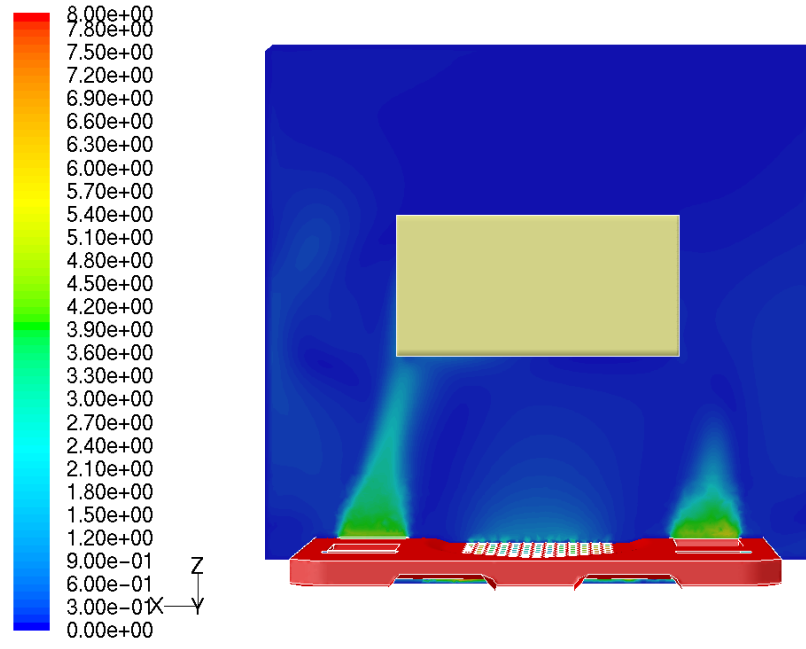
Şekil 6-5 FKS delik numaraları

6.2.1 Konfigürasyon 1

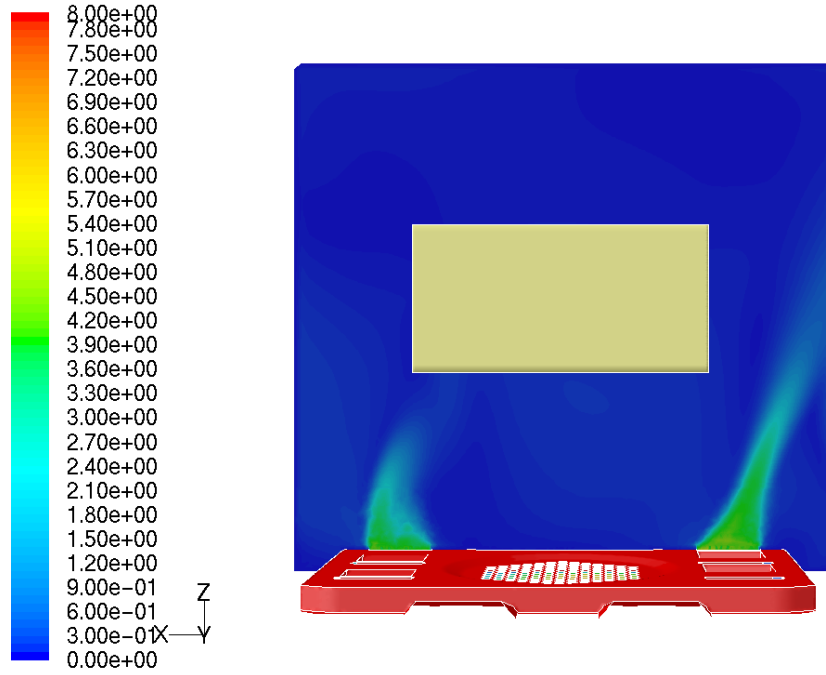
Çözümleme ilk olarak ürün orjinal hali olan 23W gücünde fan motoru ve FKS üzerindeki tü delikler açık olduğu halde yapılmıştır. Bu çözümleme sonucunda Tüm pişirme hacmi içerisindeki hava hız dağılımı elde edilmiştir. Şekil6-6,6-7,6-8 sırasıyla delik numaraları 1-2, 3-4 ve 5-6 daki yatay kesitte hız dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 6-6 1400 rpm tüm delikler açık delik 1-2 hız dağılımı (m/s)

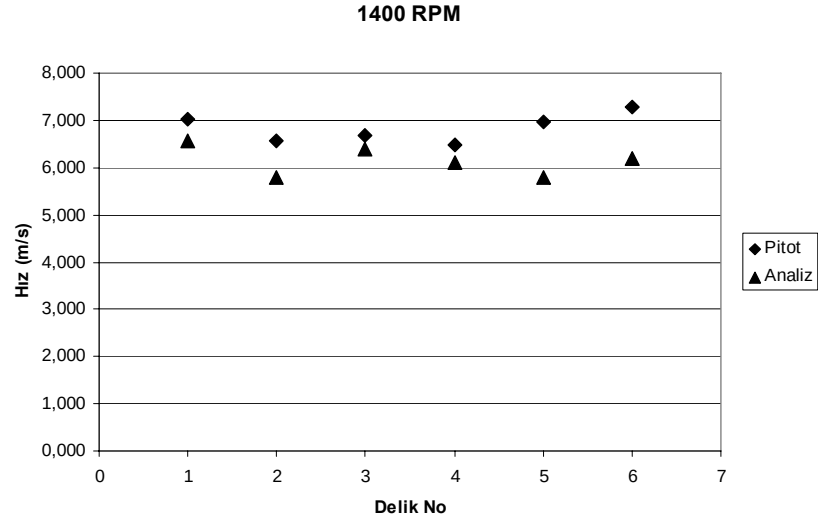


Şekil 6-7 1400 rpm tüm delikler açık delik 3-4 hız dağılımı (m/s)



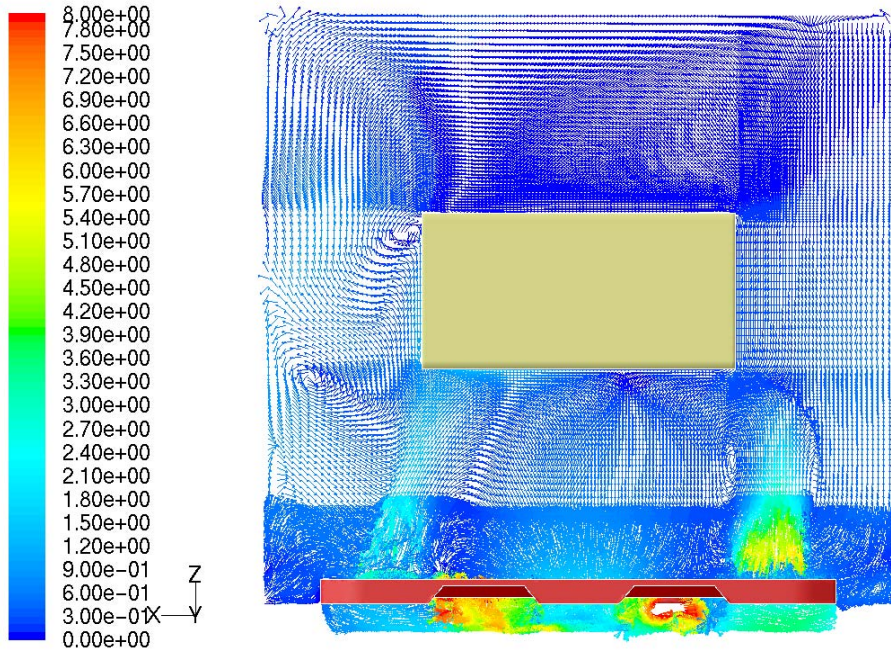
Şekil 6-8 1400 rpm tüm delikler açık delik 5-6 hız dağılımı (m/s)

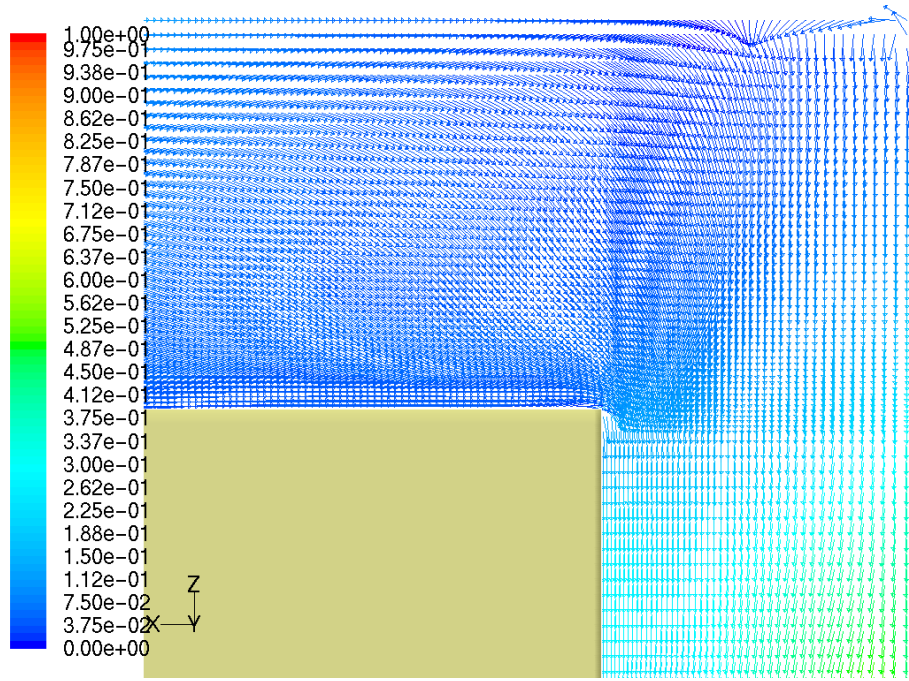
Bu konfigürasyon için her bir delikten çıkan hava debisi değerleri sayısal çözümleme hesaplanmış ve pitot tüpü ile deneysel olarak ölçülmüştür. (Şekil.6-9) Buna göre ortalama hızlarda en büyük fark %17,5 ve en küçük fark %4,5 olmak üzere ortalama %11,3 deneysel sonuçlar ile fark görülmektedir.



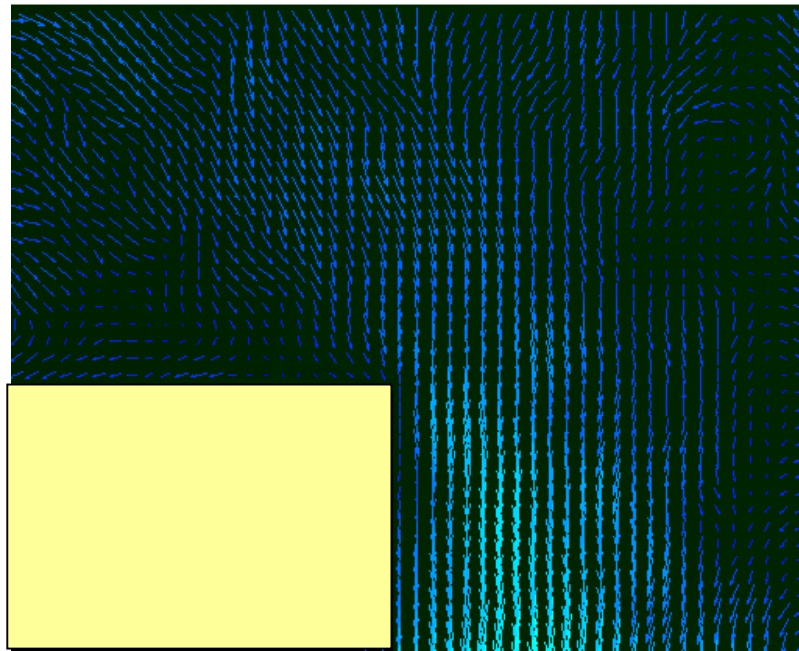
Şekil 6-9 1400 rpm tüm delikler açık üfleme delik ortalama hızları HAD ve deneysel sonuçlar

Tuğla yüzeyleri yakınında hızlar incelendiğinde 0,5 m/s mertebelerinde olduğu görülmüştür. Tuğla sağ yan yüzeyi yakınlarında HAD çözümleri Şekil 6-10'da; PIV sonuçları Şekil.6-11'de görülebilir.





Şekil 6-10 1400 rpm tüm delikler açık HAD vektör dağılımı (m/s)

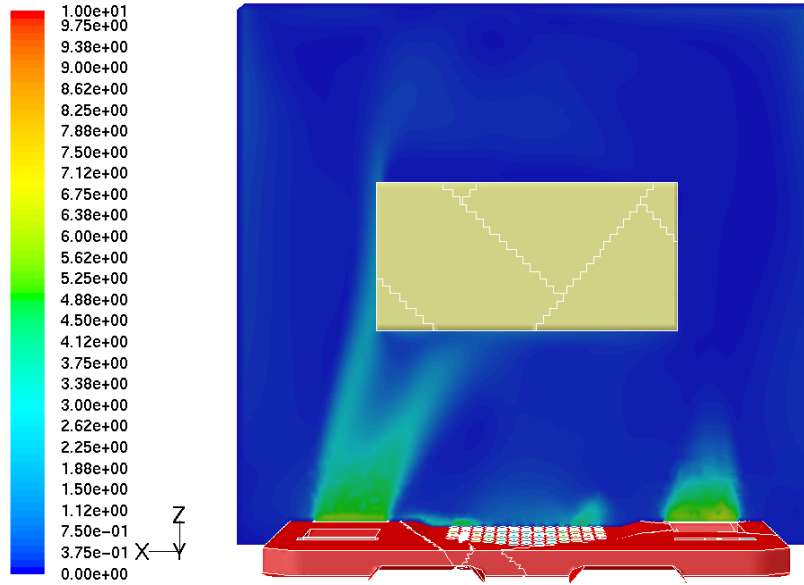


Şekil 6-11 1400 rpm tüm delikler açık PIV vektör dağılımı (m/s)

Tuğla yüzeyinden 5 mm uzaklıkta hava hızının yüzeye paralel bileşeni için HAD ve PIV sonuçları karşılaştırılmıştır. (Şekil 6–11) Buna göre iki sonuçta da üfleme deliklerinden çıkan havanın tuğla sağ yan yüzeyinden geri döndüğü görülmektedir.

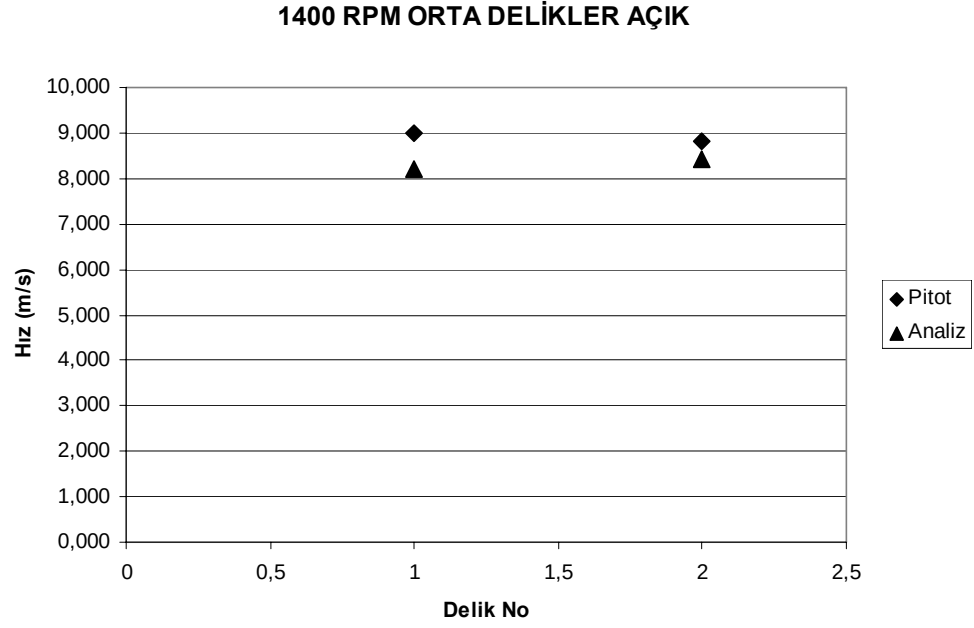
6.2.2 Konfigürasyon 2

23W gücünde fan motoru ve FKS üzerinde yalnızca 3 ve 4 numaralı deliklerin açık olduğu halde yapılmıştır. Bu çözümleme sonucunda tüm pişirme hacmi içerisindeki hava hız dağılımı elde edilmiştir. Şekil6-12 delik numaraları 3-4 deki yatay kesitte hız dağılımını göstermektedir.



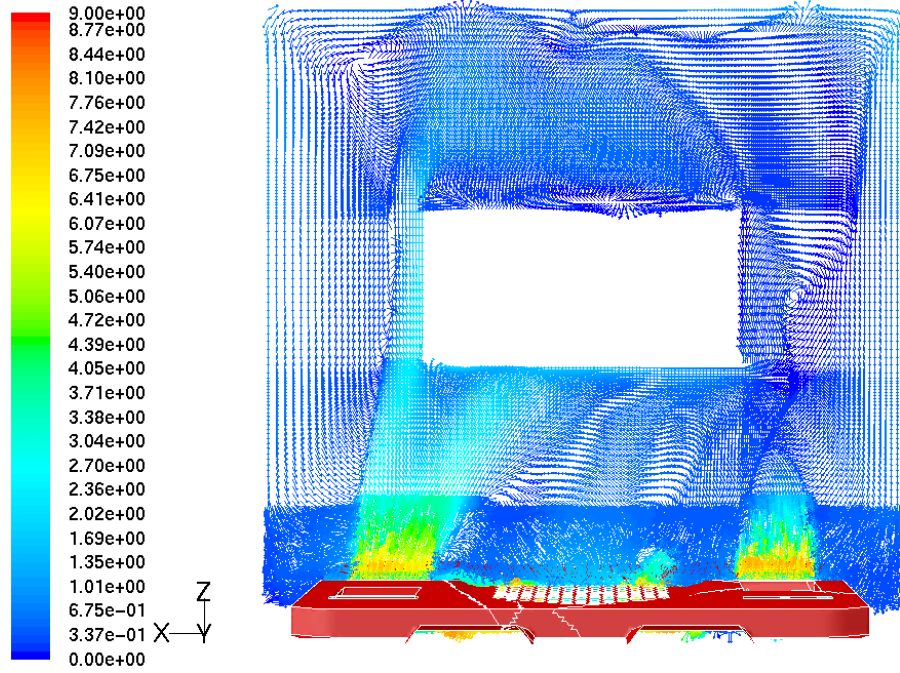
Şekil 6-12 1400 rpm 3ve 4. delikler açık hız dağılımı (m/s)

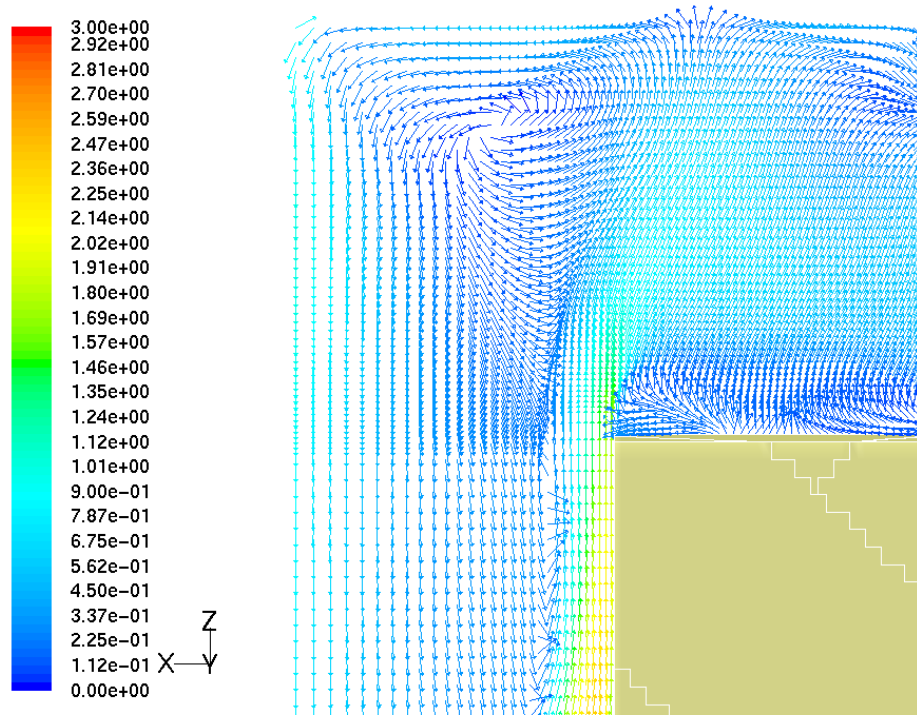
Bu konfigürasyon için her bir delikten çıkan hava debisi değerleri sayısal çözümleme hesaplanmış ve pitot tüpü ile deneysel olarak ölçülmüştür (Şekil.6-13). Buna göre ortalama hızlarda en büyük fark %9,6 ve en küçük fark %4,4 olmak üzere ortalama %7 deneysel sonuçlar ile fark görülmektedir.



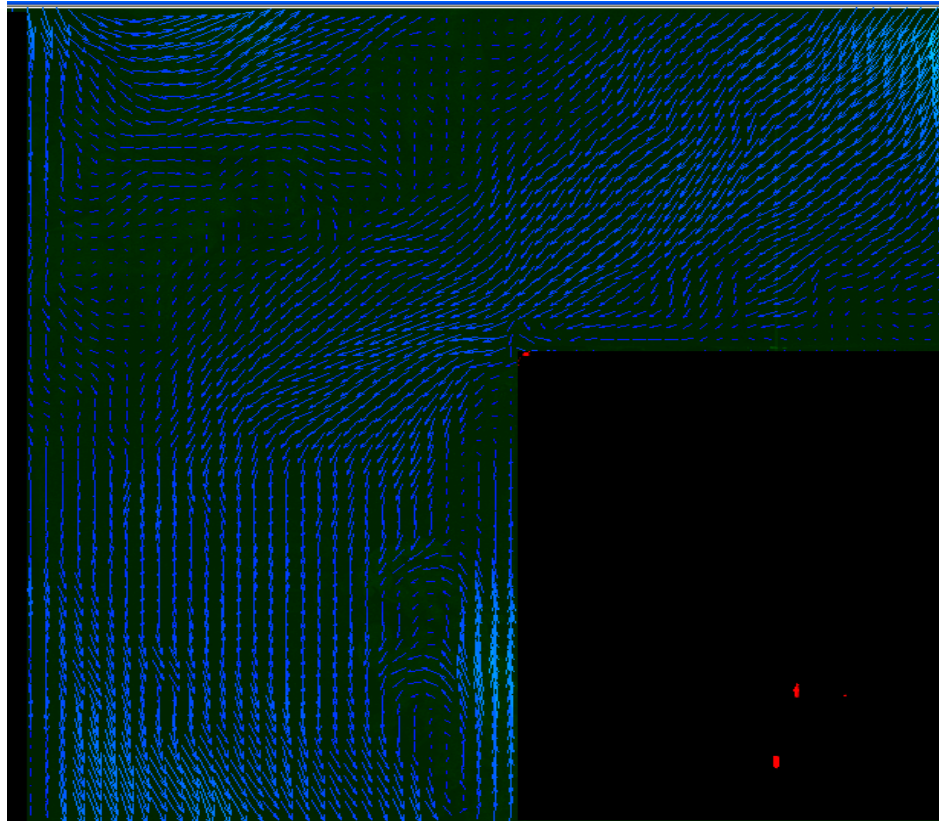
Şekil 6-13 1400 rpm 3. ve 4. delikler açık delik ortalama hava hızları

Tuğla yüzeyleri yakınında hızlar incelendiğinde 3 m/s mertebelerinde olduğu görülmüştür. Tuğla sağ yan yüzeyi yakınlarında HAD çözümleri Şekil 6-14’da; PIV sonuçları Şekil.6-15’de görülebilir. İki sonuçta da orta deliklerin debisinin artışıyla birlikte tuğla yan yüzeylerinde yüksek hızlara ulaşıldığı görülmüştür.





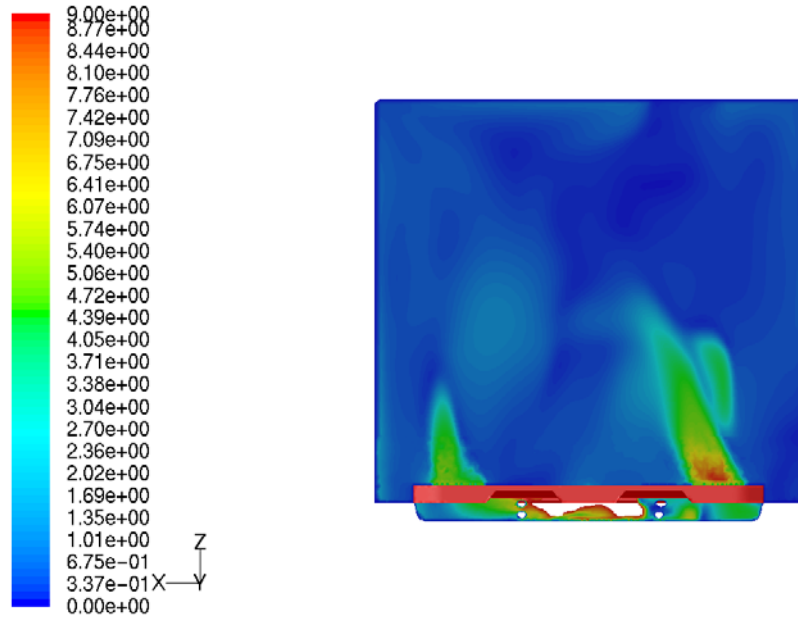
Şekil 6-14 1400 rpm 3. ve 4. delikler açık tuğla yan yüzey HAD vektör alanı (m/s)



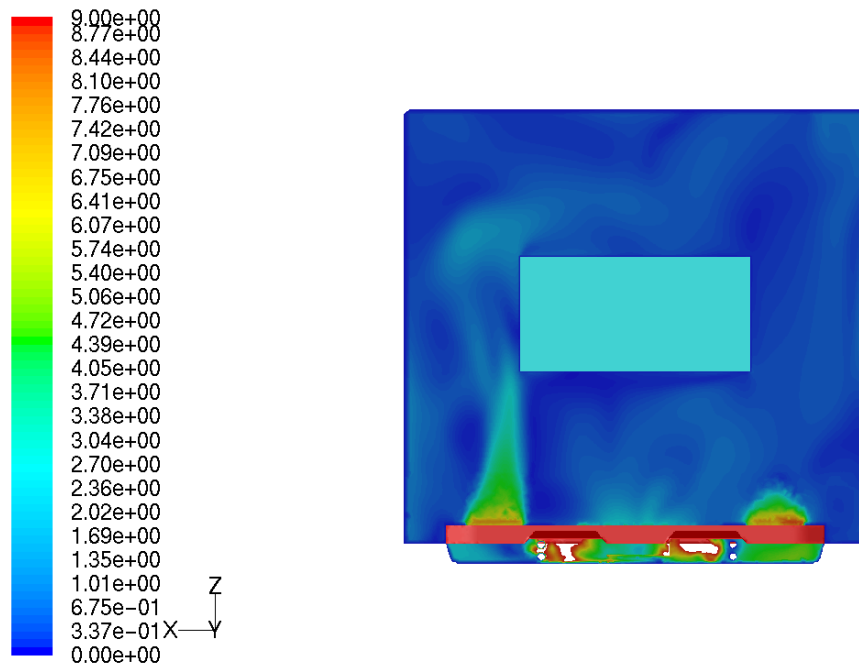
Şekil 6-15 1400 rpm 3. ve 4. delikler açık PIV vektör alanı (m/s)

6.2.3 Konfigürasyon 3

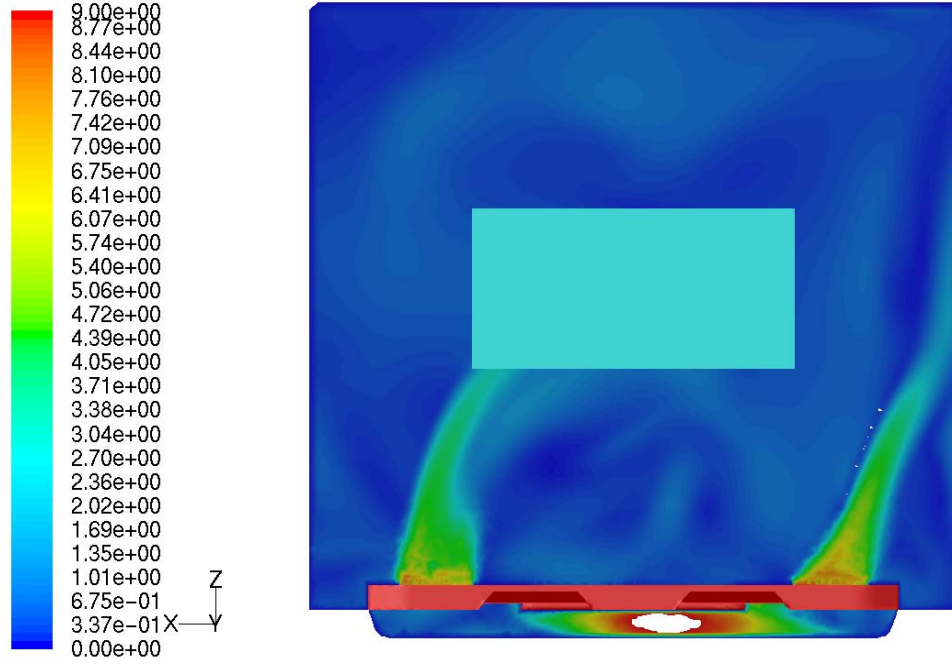
38W gücünde fan motoru ve FKS üzerindeki tü delikler açık olduğu halde yapılmıştır. Bu çözümleme sonucunda Tüm pişirme hacmi içerisindeki hava hız dağılımı elde edilmiştir. Şekil 6-16,6-17,6-18 sırasıyla delik numaraları 1-2, 3-4 ve 5-6 daki yatay kesitte hız dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 6-16 2200 rpm FKS tüm delikler açık 1. ve 2. delik kesitleri hız dağılımı (m/s)

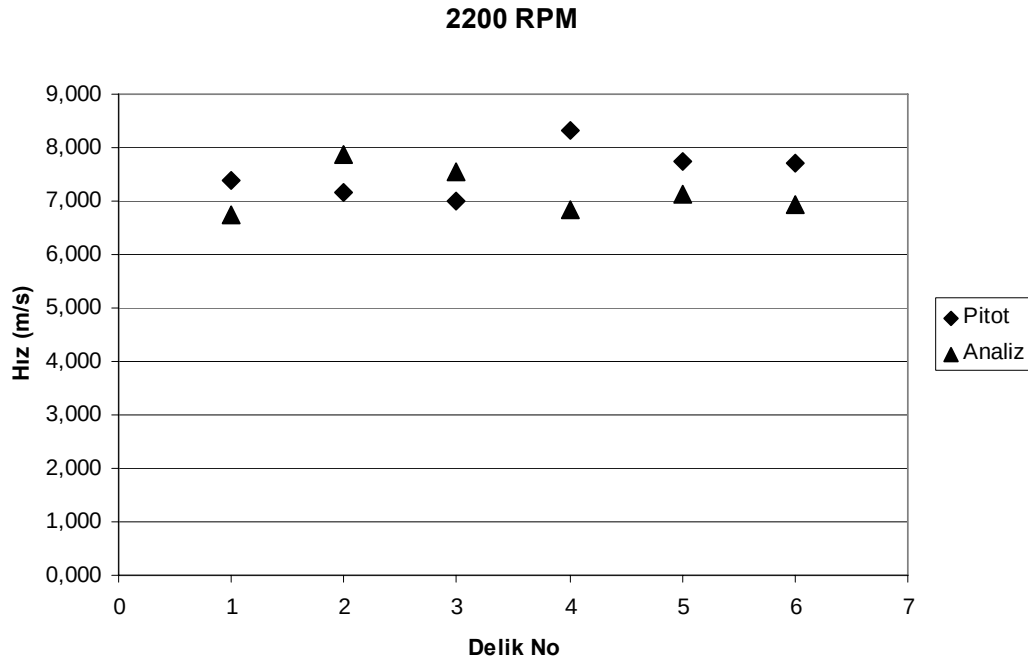


Şekil 6-17 2200 rpm tüm delikler açık 3. ve 4. delikler hız dağılımı (m/s)



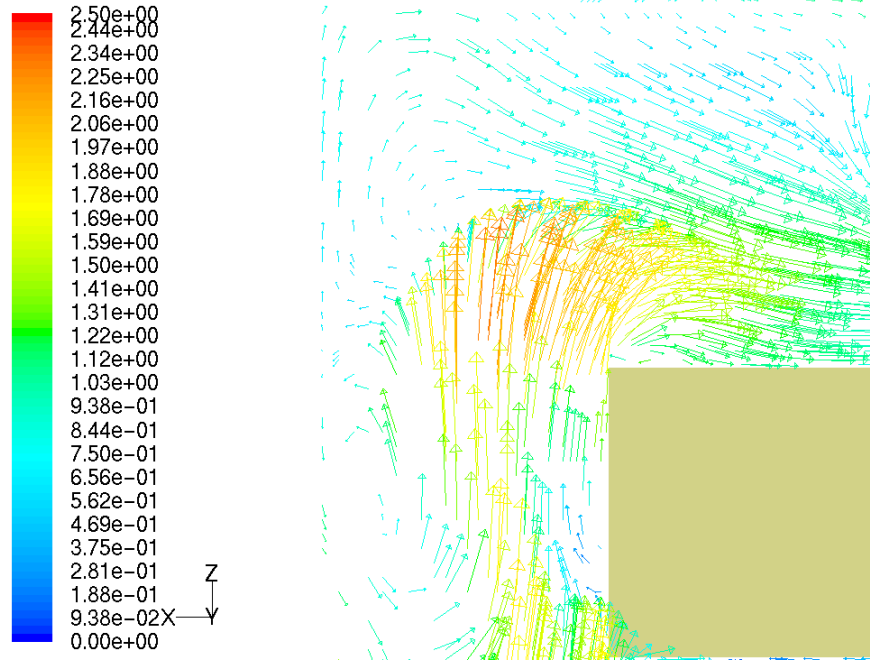
Şekil 6-18 2200 rpm FKS tüm delikler açık 5. ve 6. delik yatay kesit hız dağılımı (m/s)

Bu konfigürasyon için her bir delikten çıkan hava debisi değerleri sayısal çözümleme hesaplanmış ve pitot tüpü ile deneysel olarak ölçülmüştür (Şekil.6-13). Buna göre ortalama hızlarda en büyük fark %21,4 ve en küçük fark %7 olmak üzere ortalama %11 deneysel sonuçlar ile fark görülmektedir.

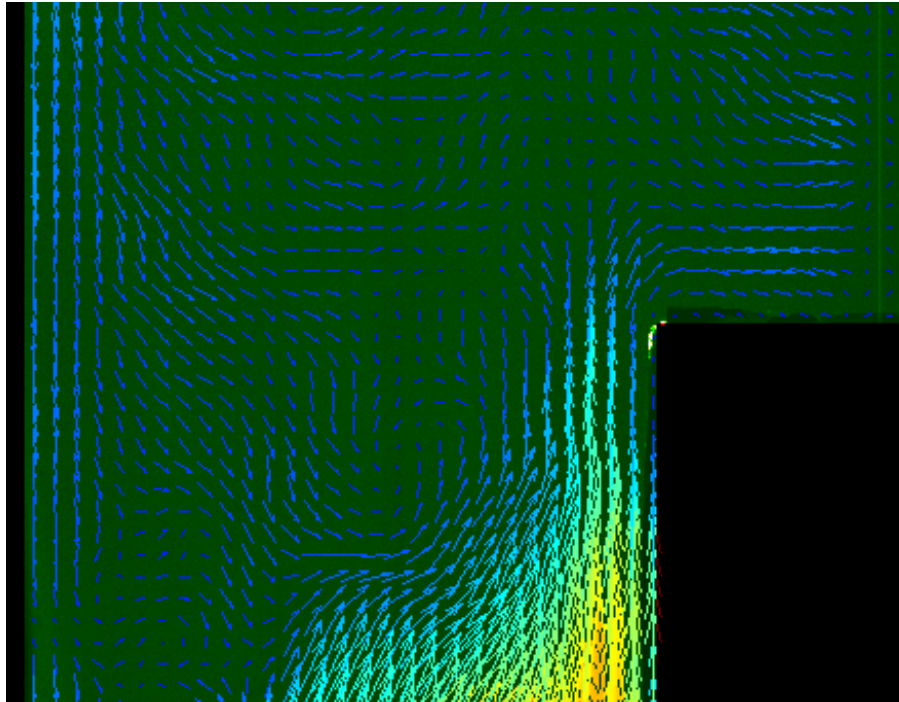


Şekil 6-19 2200 rpm FKS tüm delikler açık delik ortalama hava hızları

Tuğla yüzeyleri yakınında hızlar incelendiğinde 2,5 m/s mertebelerinde olduğu görülmüştür. Tuğla sağ yan yüzeyi yakınlarında HAD çözümleri Şekil 6-120'de; PIV sonuçları Şekil.6-21'de görülebilir. İki vektör alanında da tuğla köşesinde ve yan yüzeyde girdaplar oluştuğu görülebilmektedir.



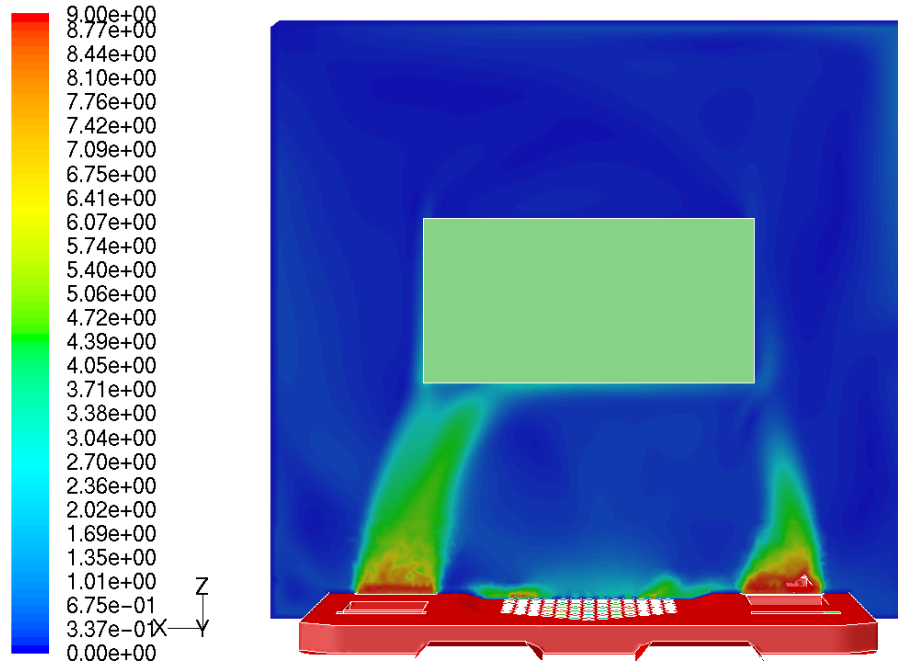
Şekil 6-20 2200 rpm tüm delikler açık tuğla yan yüzeyinde HAD vektör alanı (m/s)



Şekil 6-21 2200 rpm FKS tüm delikler açık tuğla yan yüzeyi PIV vektör alanı (m/s)

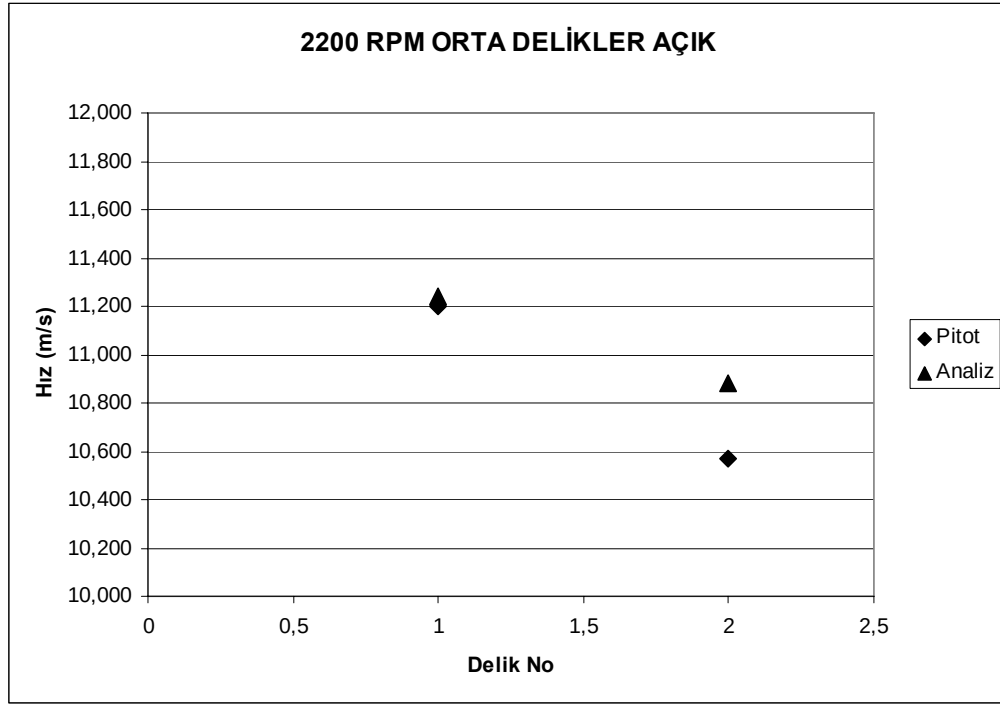
6.2.4 Konfigürasyon 4

38W gücünde fan motoru ve FKS üzerinde yalnız 3. ve 4. delikler açık olduğu halde yapılmıştır. Bu çözümleme sonucunda Tüm pişirme hacmi içerisindeki hava hız dağılımı elde edilmiştir. Şekil 6-22, delik numaraları 3-4'deki yatay kesitte hız dağılımlarını göstermektedir



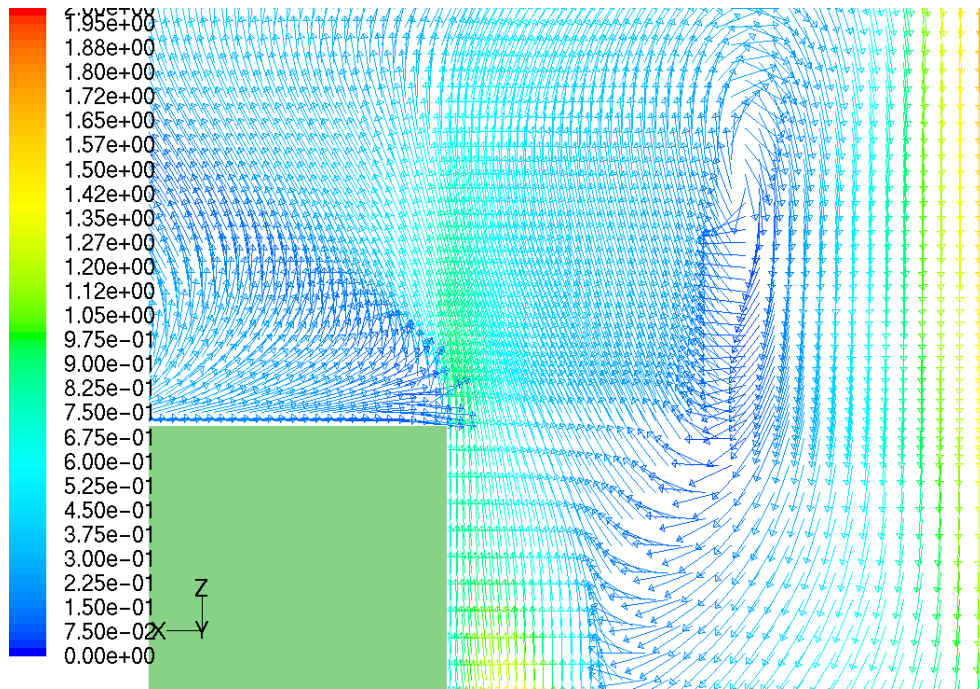
Şekil 6-22 2200 rpm FKS 3. ve 4. delikler açık yatay kesitte hız dağılımı (m/s)

Bu konfigürasyon için her bir delikten çıkan hava debisi değerleri sayısal çözümleme hesaplanmış ve pitot tüpü ile deneysel olarak ölçülmüştür. (Şekil.6–23) Buna göre ortalama hızlarda en büyük fark %2,8 ve en küçük fark %0,4 olmak üzere ortalama %1,6 deneysel sonuçlar ile fark görülmektedir.

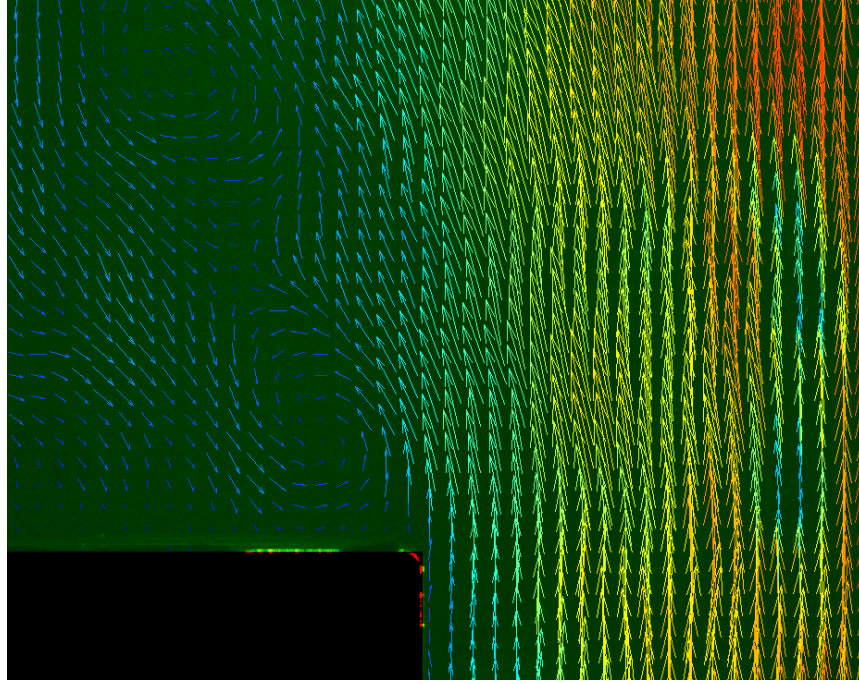


Şekil 6-23 2200 rpm FKS 3. ve 4. delikler açık delik ortalama hız karşılaştırması (m/s)

Tuğla yüzeyleri yakınında hızlar incelendiğinde 1,5 m/s mertebelerinde olduğu görülmüştür. Tuğla sağ yan yüzeyi yakınlarında HAD çözümleri Şekil 6-24'de; PIV sonuçları Şekil.6-25'de görülebilir. İki vektör alanında da tuğla köşesinde ve girdaplar oluştuğu görülebilmektedir.



Şekil 6-24 2200 rpm FKS 3. ve 4. delikler açık tuğla yan yüzey HAD vektör alanı (m/s)



Şekil 6-25 2200 rpm FKS 3. ve 4. delikler açık tuğla yan yüzeyi PIV vektör alanı (m/s)

6.2.5 Isı taşınım katsayısı

Tuğla ve pişirme hacmi yüzeyleri üzerindeki ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında Tablo 5.1 ve denklem (5.6–7) de ifade edilen bağıntılar kullanılmıştır. Bu hesaplamalar sonucu elde edilen ısı taşınım katsayı değeri HAD yazılımının hesapladığı sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Hesaplamalarda kullanılacak hız değerleri hesaplanan yüzeye 5 mm mesafede bulunan bir noktada hızın yüzeye paralel olan bileşeni yüzey boyunca entegre edilerek hesaplanmıştır.

Buna göre, tuğla sağ yan yüzeyi üzerindeki hız değerleri dört konfigürasyon için elde edilmiştir (Tablo. 6–1). Bu hız değerleri ve (5.1–5) denklemleri kullanılarak her bir konfigürasyon için Re sayıları hesaplanmıştır

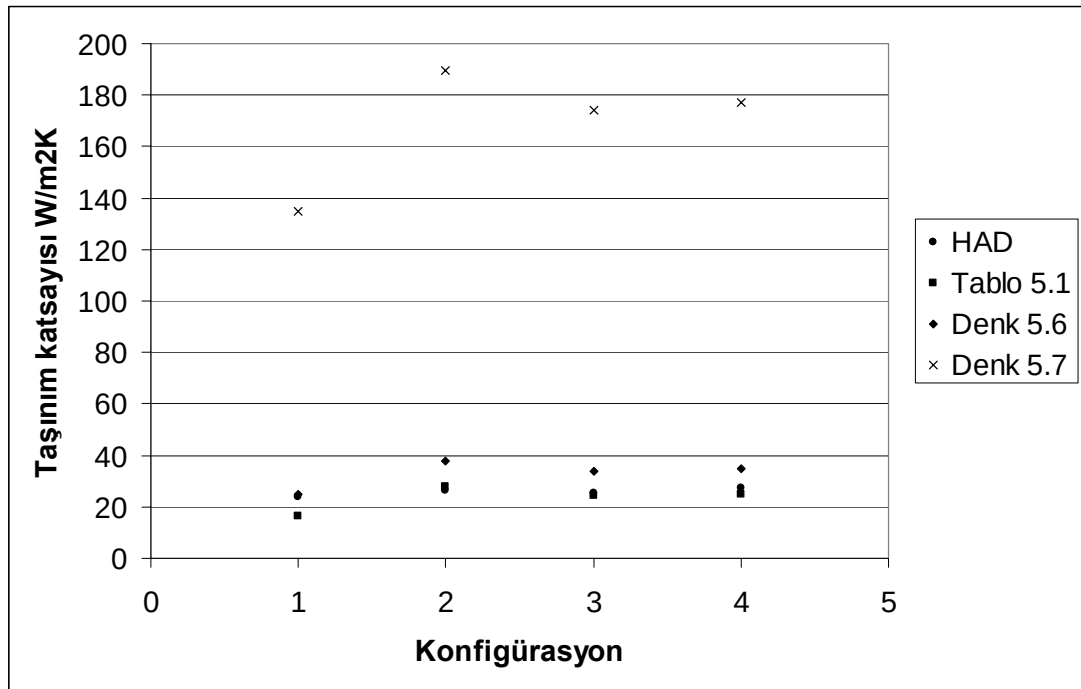
Tablo 6-1 Tuğla sağ yan yüzey entegre hız ve Re değeri

Konfigürasyon	U (m/s)	Re
1	1,09	952
2	2,37	2071
3	1,95	1704
4	2,03	1774

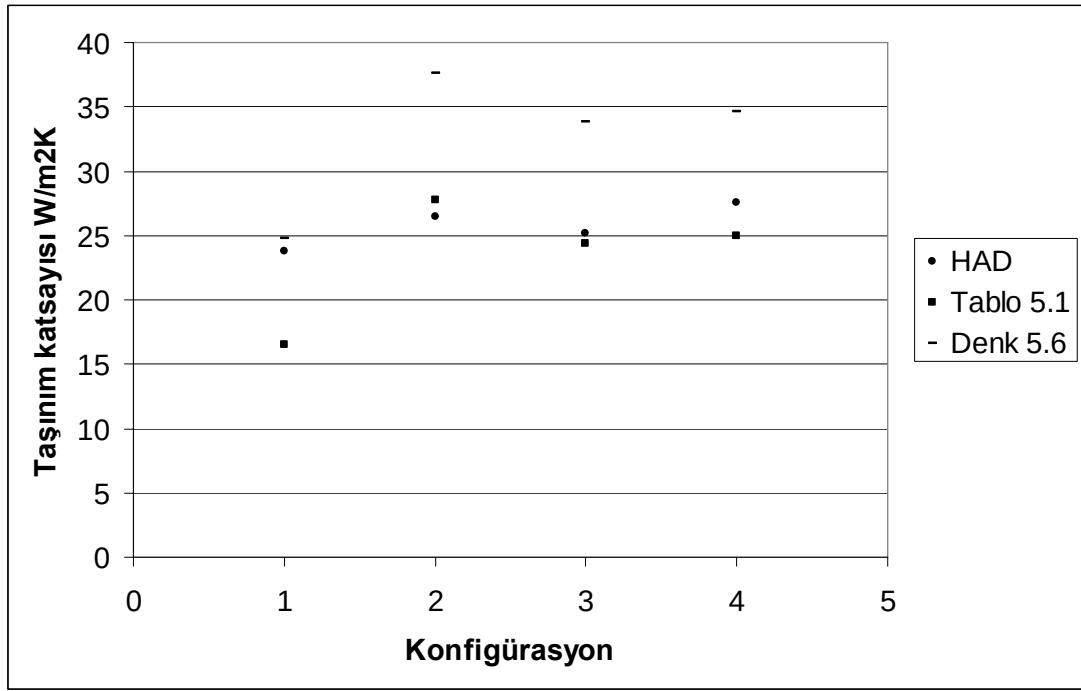
Bu aşamadan sonra eldeki 3 farklı Nu bağıntısı ile tüm konfigürasyonlar için analitik olarak ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır.

Tablo 6-2 Nu ve h ($W/m^2.K$) değerleri

Konfigürasyon	Nu bağıntısı	Nu L	hL
1	5.1	13,6	16,5
1	5.6	20,3	24,7
1	5.7	110,5	134,7
2	5.1	22,7	27,7
2	5.6	30,9	37,6
2	5.7	155,5	189,5
3	5.1	20,0	24,3
3	5.6	27,8	33,9
3	5.7	142,7	174,0
4	5.1	20,5	25,0
4	5.6	28,4	34,6
4	5.7	145,3	177,1



Şekil 6-26 Tuğla sağ yan yüzey ısı taşınım katsayısı analitik hesap ve HAD



Şekil 6-27 Tuğla sağ yan yüzey ısı taşınım katsayısı

HAD sonuçları Tablo5.1’de ifade edilen Nu bağıntısı ile yaklaşık sonuçlar vermektedir. Buna göre diğer yüzeyler için HAD yazılımı ile yüzey taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucu tuğla yan yüzeyleri ve pişirme hacmi yüzeyleri üzerindeki ısı taşınım katsayıları Tablo 6.

Tablo 6-3 Tuğla ve pişirme hacmi yüzeylerinde ısı taşınım katsayıları

Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² K)					
Konfigürasyon		1		3	
Fan Motoru		23 W (1400 rpm)		38W (2300 rpm)	
FKS Açık Delikler		Tüm	3 ve 4	Tüm	3 ve 4
Tuğla	Ön	29,24	29,67	27,03	27,03
	Arka	26,85	26,94	26,63	32,35
	Üst	26,71	25,88	26,01	25,88
	Alt	29,85	27,03	29,68	29,7
	Sol	34,42	34,4	34,4	34,4
	Sağ	23,79	26,42	25,15	27,6
Pişirme Hacmi	Üst	19,45	11,31	19,03	15,83
	Alt	18,35	10,005	15,71	10,68
	Sol	18,28	14,17	15,78	16,57
	Sağ	15	10,48	14,06	9,79
	Kapak	18,88	14,52	13,31	17,42

Yüksek Lisans tez çalışması kapsamında bir elektrikli ev tipi fırın için uygulanan enerji tüketimi testi prosedürü incelenerek bu enerji deneylerinin akış modellemesi yapılmıştır. Yapılan akış modellemesinde farklı akış konfigürasyonları için pişirme hacmi içerisindeki akış alanı ticari bir HAD yazılımı ile çözülmüş ve bu alan içerisindeki hız dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen hız değerleri manometre ve PIV cihazları ile yapılan deneysel çalışmalar ile doğrulanarak kurulan model sınanmıştır. Ayrıca, elde edilen akış alanı bilgileri kullanılarak analitik hesaplamalar ve HAD yazılımı hesaplamaları kullanılarak tüm akış konfigürasyonları için test tuğlası ve pişirme hacmi yüzeylerinde ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır.

6.3 İleri Çalışmalar

Bu çalışma sonucunda elde edilen ısı taşınım katsayıları fırın ısıtıl modellemesi yapılırken kullanılarak farklı akış konfigürasyonları için fırın enerji testleri sonuçları ön görülebilir. Ayrıca, aynı metodoloji kullanılarak pişirme hacmi içerisinde farklı hacim ve şekillerde yiyecekler (Tavuk, börek... vb) tanımlanarak bu yiyecekler üzerindeki akış ve dolayısıyla ısı taşınım katsayıları elde edilebilir. Bu bilgiler ürün üretilmeden pişirme ve enerji tüketimi performanslarının öngörülmesini sağlayacaktır.

7 KAYNAKLAR

- [1] **Verboven P., Scheerlinck N., Baerdemaeker J., Nicola B., 2000,** Computational fluid dynamics modeling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven, *Journal of Food Engineering* **43**
- [2] **Verboven P., Scheerlinck N., Baerdemaeker J., Nicola B., 2000,** The Local Surface Heat Transfer Coefficient in Thermal Food Process Calculations: A CFD Approach, *Journal of Food Engineering* **33**
- [3] **Ward, B., 2000.**Whirpool
- [4] **Datta A.K., 2005.** Transport Phenomena in Food Process Engineering, Yayınlanmamış ders notları.
- [5] **Obuz E., Powell T.H, Dikeman M.E., 2002.** Simulation of cooking cylindrical beef roasts, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **35**, 637-644.
- [6] **Chen H., Marks B.P., Murphy R.Y., 1999.** Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties, *Journal of Food Engineering*, **42**, 139-146.
- [7] **Sahin S., Sastry S. K., Bayındırlı L., 1999.** Heat transfer during frying of potato slices, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **32**, 19-24.
- [8] **Zhang J., Farkas B.E., Hale S.A., 2002.** Precooking and Cooling of Skipjack Tuna (*Katsuwonus pelamis*): A Numerical Simulation, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, **35**, 607-616.
- [9] **Thorvaldsson K., Janestad H., 1999.** A model for simultaneous heat, water and vapour diffusion, *Journal of Food Engineering*, **40**, 167-172.
- [10] **Wählby U., Skjöldebrand C., 2002.** Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation, *Journal of Food Engineering*, **53**, 177-184.
- [11] **Huang E., Mittal G.S., 1995.** Meatball cooking-modeling and simulation, *Journal of Food Engineering*, **24**, 87-100.
- [12] **Fasina O.O., Fleming H.P., 2001.** Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching, *Journal of Food Engineering*, **47**, 203-210.

- [13] **Wang S., Tang J., Cavalieri R.P.**, 2001. Modeling fruit internal heating rates for hot air and hot water treatments, *Postharvest Biology and Technology*, **22**, 257-270.
- [14] **Wang L., Sun D.W.**, 2002. Modelling three-dimensional transient heat transfer of roasted meat during air blast cooling by the finite element method, *Journal of Food Engineering*, **51**, 319-328.
- [15] **Chang H.C., Carpenter J.A., Toledo R.T.**, 1998. Modelling heat transfer during oven roasting of unstuffed turkeys, *Journal of Food Science*, **63**, 257-261.
- [16] **Kayacier A., Singh R.K.**, 2004. Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, **37**, 275-281.
- [17] **Iguaz A., Esnoz A., Martinez G., Lopez A., Virseda P.**, 2003. Mathematical modeling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer, *Journal of Food Engineering*, **59**, 151-160.
- [18] **Verboven P., Scheerlinck N., Datta, A., Nicola B., Anh, N.**, 2000, Computation of airflow effects on heat and mass transfer in a microwave oven, *Journal of Food Engineering* 59
- [19] **Varga S, Oliveira S.**, 2000, Determination of the heat transfer coefficient between bulk medium and packed containers in a batch retort, *Journal of Food Engineering* 44
- [20] **Mackerle, J.**, 1998, Heat transfer analyses by finite element and boundary element methods. A bibliography, *Finite Elements in Analysis and Design* 34
- [21] **Bangay, R. Balsa-Canto, E. Molesy, C. Alonsoy, A.**, 1998, Improving food processing using modern optimization methods, *Trends in Food Science & Technology* 14
- [22] **Scott, R., and Richardson, M.**, 2000, The application of computational fluid dynamics in food industry, *Review*
- [23] **Xia, B., Sun D.**, 2001, Applications of computational fluid dynamics(CFD) in the food industry: a review, *Computers and Electronics in Agriculture* 34

- [24] **John P. Abraham ***, **Ephraim M. Sparrow**, 2000, A simple model and validating experiments for predicting the heat transfer to a load situated in an electrically heated oven, *Journal of Food Engineering* 62
- [25] **Arnoldi A.**, 2001. Thermal processing and food quality: analysis and control, in *Thermal technologies in food processing*, Eds. Richardson P., CRC Press, Florida.
- [26] **Parliament T.H., Morello M.J., McGorin R.J.**, 1994. Thermally Generated Flavors-Maillard, Microwave and Extrusion Processes, ACS Publishers, Washington.
- [27] **Sepuldeva D.R., Barbosa-Canovas G.V.**, 2003. Heat transfer in food products, in *Transport Phenomena in Food Processing*, Eds. Welti-Chanes J., Velez-Ruiz J.F., Barbosa-Canovas G.V., CRC Press, Florida.
- [28] **Lijun Wang, Da-Wen Sun.**, 2003. Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry-a review, *Trends in Food Science & Technology*, **14**, 408-423.
- [31] **Özyurt B., Kayıhan A.**, 2003. FIRSIM 2.1 Fırın Termal Simülasyonu, Arçelik Ar-Ge Raporu, İstanbul.
- [32] **Tolay M., Akar B., İbicek T., Şumnu G., Şahin S., Turabi E.**, 2005. Pişirmenin Modellenmesi Ön Çalışmaları Raporu, Arçelik Ar-Ge Raporu, İstanbul.
- [33] **BS EN-5034**, 2001. Electric ovens for household use-Methods for measuring energy consumption, *British Standards Institution*, London.
- [34] **Patankar S.V.**, 1980. Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, New York.
- [35] **Incropera F.P., DeWitt D.P.**, 2004. Isı ve kütle geçişinin temelleri, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [36] **Saracavos G.D., Maroulis Z.B.**, 2001. Transport Properties of Food, Marcel Dekker Inc., New York.
- [37] **Demirkol E., Erdoğan F., Palazoğlu T.K.**, 2006. Analysis of mass transfer parameters (changes in mass flux, diffusion coefficient and mass transfer coefficient) during baking of cookies, *Journal of Food Engineering*, **72**, 364-371.

8 ÖZGEÇMİŞ

Haluk KARATAŞ, 1980 yılında İstanbul'un Şişli ilçesinde doğdu. 1991 yılında Esentepe Ortaokulu'nda başladığı ortaokul öğrenimini 1994 yılında tamamladı. Özel Yeni Yıldız Lisesi'nde aldığı lise öğrenimini 1998 yılında tamamladı. 1998 yılında girdiği İ.T.Ü. Makina Fakültesi'nden 2003 senesinde Makina Mühendisi olarak mezun oldu ve aynı yıl İ.T.Ü. Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen, Isı-Akışkan programında yüksek lisans öğrencisi olup, "Endüstride Uygulama Destekli Tez Programı" kapsamında Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Direktörlüğü'nde başladığı çalışmalarına Pişirici Cihazlar İşletmesi Ürün Geliştirme Yöneticiliği'nde Ürün Geliştirme Mühendisi olarak devam etmektedir.