

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POROZ ORTAMDA ISI VE KÜTLE GEÇİŞİNİN
TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

MURAT KANTAŞ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. HASAN ALPAY HEPERKAN**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POROZ ORTAMDA ISI VE KÜTLE GEÇİŞİNİN
TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

Murat KANTAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 28.07.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Zeynep Duriye BİLGE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyhan ONBAŞIOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Derya ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu tez çalışmasının deneysel ve nümerik çalışmaları, Arçelik AŞ Merkez ARGE altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

ÖNSÖZ

Piştirme, gıdadaki belirli kimyasal reaksiyonların optimum şekilde oluşması için gıdaya ısı transfer edilmesi olarak tanımlanabilir. Piştirme sırasında gıdada birçok kimyasal değişim eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Bir poroz ortam olan hamurlu gıdaların pişirilmesinde bu reaksiyonlar sonrasında kabarma, yüzey renk değişimi, kütle kaybı ve kabuk oluşumu gözlenmektedir. Bu doktora tezi çalışmasında kağıtta kek piştirme işleminin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

Maddi manevi desteklerini hiçbir zaman üzerimden eksik etmeden, büyük özveride bulunarak beni yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan, AİLEME en içten şükranlarımı sunarım.

Bu doktora tez çalışmasına olanak sağlayan, yorumları ve eleştirileriyle çalışmaya yön veren, çalışmanın farklı aşamalarında bilgi ve tecrübesini paylaştan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hasan HEPERKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Öneri ve yorumlarıyla çalışmama destek olan Sayın Prof. Dr. Seyhan Onbaşıoğlu'na katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışma konusu seçiminde beni yönlendiren ve çalışmama olanak sağlayan Sayın Dr. Levent AKDAĞ'a, çalışmamı destekleyen ve beni bu yönde teşvik eden Sayın Dr. Faruk BAYRAKTAR'a, deneysel çalışmalardaki katkılarından dolayı Sayın Mehmet Maraşlı ve Sayın Nihat Kandemir'e teşekkür ederim.

Her türlü problemimde yanımda olan, teknik ve manevi desteklerini esirgemeyen tüm Arçelik Arge Akışkanlar Dinamiği Teknolojileri Ailesi'ne teşekkür ederim.

Temmuz, 2016

Murat KANTAŞ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 Pişirme Üzerindeki Etkin Parametreler	4
BÖLÜM 3	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	8
3.1 Kabuk Kalınlığı ve Renk Ölçümü	8
3.2 Yükseklik ve Hacim Değişimi	20
3.3 Isı ve Kütle Transferi	31
3.4 Kimyasal Reaksiyonlar	47
3.5 Gözeneklilik	63
BÖLÜM 4	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	73

4.1	Yükseklik Ölçümü Deney Düzenegi	73
4.1.1	Cetvel ile Yükseklik Ölçümü	74
4.1.2	Görüntü İşleme Yöntemi ile Yükseklik Ölçümü	75
4.2	Görüntü İşleme Yöntemi ile Kabuk Kalınlığının Belirlenmesi	78
4.3	Üst Yüzey Renk Ölçüm Deney Düzenegi	82
4.4	Poroz Özelliklerin Ölçümü ve Rüzgar Tüneli Deney Düzenegi	86
4.5	Pişirme Üzerindeki Etkin Parametrelerin İncelenmesi	91
4.5.1	Yükseklik Üzerindeki Etkili Parametreler	94
4.5.2	Kütle Kaybı Üzerindeki Etkili Parametreler	95
4.5.3	Yüzey Rengi Üzerindeki Etkili Parametreler	97
4.5.4	Kabuk Kalınlığı Üzerindeki Etkili Parametreler	99
4.6	Kabarmanın Sonlandığı Sürenin Belirlenmesi	101
4.7	Üst Yüzey Rengi ile Yüzey Sıcaklığı İlişkisinin Belirlenmesi	101
 BÖLÜM 5		
MODELLEME ÇALIŞMALARI		107
5.1	Çalışmanın Amacı	107
5.2	Fırın Modelleme Çalışmaları	108
5.3	Kek Modelleme Çalışmaları	111
5.3.1	Geometri ve Çözüm ağı	112
5.3.2	Sınır Şartları	112
5.3.3	Hareketli Ağ Yapısı	115
5.3.4	Kütle Transferi Modeli	117
5.3.5	Başlangıç Koşulları (Initialization)	119
5.3.6	Analiz Sonuçları	119
SONUÇ VE ÖNERİLER		128
KAYNAKLAR		136
ÖZGEÇMİŞ		140

SİMGE LİSTESİ

ΔE_{∞}	Asimptotik kahverengileşme değeri
ΔE_t	t anındaki kahverengileşme
ΔP	Basınç farkı
ε	Geçirgenlik
ν	Hamurun kinematik viskozitesi
σ	Viskoz gerilim
ρ	Yoğunluk
∇T	İncelenen sıcaklık değeri ile faz değişim sıcaklığı arasındaki farkı
a_w	Kütle transferini tetikleyen kuvvet
C_p	Özgül ısı
$C_{release}^{CO_2}$	Numuneden çıkan karbondioksit konsantrasyonu
d	Çap
E^*	Toplam renk değişimi
E_s	Özgül enerji
f_{kabuk}	Kabuk formasyon faktörü
H	Kek yüksekliği
k	Kahverengileşme oranı
K	Hamurun veya kabuğun geçirgenliği
k_1	Darcy geçirgenlik parametresi
k_2	Non-Darcy geçirgenlik parametresi
L^*	Renk açıklığı
L_{maks}	Maksimum genişlik
m	Kütle
m_0	Başlangıç kütlesi
m_t	t anındaki kütle
Nu	Nusselt Sayısı
Pr	Prandtl sayısı
P_{tot}	Toplam basınç
Re	Reynolds sayısı
r_g	Kütle merkezinin eksenenden uzaklığı
S_{exch}	CO2 salınımının gerçekleştiği yüzey alanı
t	Zaman
T	Sıcaklık

T_f	Faz değişim sıcaklığı
T_η	Hamurun dış yüzeyinin kurumaya ve sertleşmeye başladığı sıcaklık
u	Akışkanın lineer hızı
V	Hacim
v	Hız
V_0	İlk hacim
V_{oven}	Fırın hacmi
V_T	Toplam hacim
W_L	Kütle kaybı
X	Kütlesel oran

KISALTMA LİSTESİ

BSI	British Standards Institution
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIE	Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
CIELab	Uluslararası Aydınlatma Komisyonu renk uzayı
CT	Renk sıcaklığı (Color Temperature)
DMTA	Dynamic Mechanical Thermal Analysis
DO	Discrete Ordinate
DOE	Design of Experiment – Deney tasarımı
EN	Avrupa Standartları
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HSI	H-Hue açısı, S-doygunluk, I-yoğunluk
ICC	Uluslararası Renk Komisyonu
MRI	Magnetic Resonance Imaging
RANS	Reynolds Avarage Navier Stokes
RGB	Renk Uzayı (Red-Green-Blue)
RPM	Devir/dakika
RUC	Representative Unit Cell (Temsili Birim Hücre)
S2S	Surface to surface
UDF	Kullanıcı tanımlı fonksiyon
XRT	X-Işını mikrotomografi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1	Piştirme sırasında gıdada eş zamanlı gerçekleşen taşınım olayları [1]	2
Şekil 1. 2	Piştirme işleminin temel adımları.....	3
Şekil 2. 1	Piştirmeye etki eden girdi parametreler ve pişme sonucundaki değişimler...	4
Şekil 2. 2	Piştirme sürecinde oluşan reaksiyonlar	5
Şekil 2. 3	Fırının temel komponentleri [4].....	6
Şekil 2. 4	Fırının genel görünümü [4]	6
Şekil 2. 5	Deneyisel çalışmalarda kullanılan fırın [4]	7
Şekil 3. 1	CIELab renk evreni [7]	11
Şekil 3. 2	Ekmeğin renk ölçüm noktaları [7]	14
Şekil 3. 3	185 °C (◆), 195 °C (■) ve 200 °C (▲) piştirme sıcaklığında sırasıyla L,a ve b değerlerinde zamana bağlı değişimi [7].....	15
Şekil 3. 4	Kabuk kalınlığına bağlı olarak L, a, b değerlerindeki değişim [7]	15
Şekil 3. 5	Kabuk kalınlığı ile kabuğun renk değeri arasındaki ilişki [7].....	15
Şekil 3. 6	Patates cipsi görüntü alma düzeneği [12].....	17
Şekil 3. 7	Patates cipsinin renkli (K), gri tonlamalı (J) ve bölünmüş görüntüsü [12] ...	17
Şekil 3. 8	Piştirme süresince L,a,b değerlerinin ve sıcaklığın değişimi [13]	18
Şekil 3. 9	Görüntünün işleme adımları [14]	19
Şekil 3. 10	Lazer kullanılarak kabarmanın belirlenmesi [16]	21
Şekil 3. 11	Görüntü alma amacıyla kullanılan deney düzeneği [17]	23
Şekil 3. 12	Hamur örneği üzerinde görüntü işleme ve sınırların belirlenmesi [17].....	24
Şekil 3. 13	Hamur örneği üzerinde görüntü ve veri toplama deney düzeneği [18]	25
Şekil 3. 14	Maya oranının kabarma üzerindeki etkisi [18]	26
Şekil 3. 15	Hacim ve dış çizgilerin tespiti için kullanılan yükseklik ölçüm aparatı [19] .	26
Şekil 3. 16	Kek yüksekliği ile çap değerlerine bağlı hesaplama [19].....	27
Şekil 3. 17	PH değerleri farklı beş çeşit undan yapılmış keklerin hacimlerinin, farklı hacim ölçme yöntemlerine göre kıyaslanması [19]	28
Şekil 3. 18	Görüntü işleme adımlar [21].....	29
Şekil 3. 19	Ekmeğin hacminin hesaplanabilmesi için oluşturulmuş görüntü [21].....	30
Şekil 3. 20	Fırında ısı ve kütle transferi mekanizması [22]	32
Şekil 3. 21	Sıcaklığa ait deneysel veriler ile modelin kıyaslanması [23]	33
Şekil 3. 22	Neme ait deneysel veriler ile modelin kıyaslanması [23]	33
Şekil 3. 23	Ekmeğin içindeki sıcaklık değişimi [24]	35
Şekil 3. 24	Ekmeğin merkez ve alt yüzeyinde yapılan ölçümler [24].....	35

Şekil 3. 25	Ekmeğin alt yüzeyine 1 cm mesafede yapılan ölçümler [24]	35
Şekil 3. 26	Ekmeğin kabuğunun 1 cm altından yapılan ölçümler [24]	36
Şekil 3. 27	Fırın geometrisi [27]	41
Şekil 3. 28	Farklı ısıtım modellerinin karşılaştırılması [27]	42
Şekil 3. 29	Sıcaklık dağılımı ve nişasta jelatinizasyonunu [27]	42
Şekil 3. 30	Buharlaştırma-yoğuşma mekanizmasının dahil edildiği ve dahil edilmediği simülasyon ile deneysel veriler [28]	44
Şekil 3. 31	Analiz ve deneyde elde edilen veriler [28]	44
Şekil 3. 32	Deney Düzenegi [29]	45
Şekil 3. 33	Ekmeğin pişirme süresince ekmek merkez ve fırın merkez sıcaklıkları [30]	46
Şekil 3. 34	Ekmeğin pişirme süresince ekmek merkez ve üst yüzey sıcaklıkları [30]	47
Şekil 3. 35	Renk değerlerinin ve kütle değişiminin elde edildiği deney düzenegi [11] ..	49
Şekil 3. 36	45, 50 ve 55 mm yüksekliklerde üstü kapatılmış pişirme kalıplarının yandan görünümü [32]	51
Şekil 3. 37	Mikrokapsüllerin hamurdaki dağılımı ve gözenekliliğin hesaplanması [32] ..	51
Şekil 3. 38	Pişirme süresine bağlı olarak renk açıklığının değişimi [33]	54
Şekil 3. 39	Pişirme süresine bağlı olarak yüzey sıcaklık değerleri [33]	55
Şekil 3. 40	Pişirme süresine bağlı olarak yüzey su aktivitesi değeri [33]	56
Şekil 3. 41	Kahverengileşme oranı sabiti k ile sıcaklık ve su aktivitesi arasındaki ilişki ..	56
Şekil 3. 42	Deney düzenegi ve görüntülerin incelenişi [34]	58
Şekil 3. 43	Hamur içeriği farklı numunelerde gözeneklilik ve şekil oranı değişimi [34] ..	59
Şekil 3. 44	XRT yöntemi ile incelenen gözeneklilik değişimi [34]	60
Şekil 3. 45	Kuvvet ve ses basıncı ile zaman arasındaki ilişki [35]	61
Şekil 3. 46	Kabuk, iç kısımdan ayrıldıktan sonra yapılan deneyin sonucu [35]	62
Şekil 3. 47	Prob'un zamana bağlı olarak konumu [35]	63
Şekil 3. 48	Deney düzeneginin genel görünümü [43]	64
Şekil 3. 49	Tanecikli RUC modeli [45]	67
Şekil 3. 50	Ergun-Benzeri denklemlerdeki A katsayısının kıyaslanması [45]	68
Şekil 3. 51	Ergun-Benzeri denklemlerdeki B katsayısının kıyaslanması [45]	68
Şekil 3. 52	Mikro tomografi cihazı ile ekmek gözenekliliğinin ölçümü [47]	72
Şekil 4. 1	Yükseklik ölçüm deney düzenegi	74
Şekil 4. 2	Daldırma yöntemi ile ölçümün yapıldığı kek pişirme deneyi	74
Şekil 4. 3	Cetvel ile ölçümün yapıldığı kek pişirme deneyi	75
Şekil 4. 4	Kek yükseklik ölçümü fotoğraf kabini	75
Şekil 4. 5	Histogram üzerinde eşikleme metodunun uygulanışı [48]	76
Şekil 4. 6	Görüntü işleme yöntemi ile kek yüksekliğinin belirlenmesi	77
Şekil 4. 7	Görüntü işleme yöntemi ile keke ait boyutsal bilgilerin elde edilmesi	77
Şekil 4. 8	Kek üst yüzey profili	78
Şekil 4. 9	Hamurlu gıdaların pişmişliğinin ölçümünde kullanılan BSI renk skalası	78
Şekil 4. 10	CIELab renk evreni [7]	80
Şekil 4. 11	CIELab renk evreninde L=%50 kesidin BSI skalasındaki renklerin dağılımı ..	81
Şekil 4. 12	BSI Renk değeri ile Lab Renk uzayında a ve b değeri filtrelendiği durum için L değerinin değişimi	82
Şekil 4. 13	Kek kabuk kalınlığının analizi	82
Şekil 4. 14	Üst yüzey kızarmışlık ölçüm cihazı	83
Şekil 4. 15	Kek yüzeyindeki renklere karşılık gelen BSI renkleri	84
Şekil 4. 16	Renk ölçüm cihazı ile yapılan ölçüm sonuçları	84

Şekil 4. 17	Fırın üst duvarına yerleştirilen kamera ve aydınlatma	85
Şekil 4. 18	BSI renk ölçüm cihazı kalibrasyon plakaları	85
Şekil 4. 19	Fırın içinden gerçek zamanlı renk ölçümü	86
Şekil 4. 20	Rüzgar tüneli test düzeneğinin genel görünümü.....	87
Şekil 4. 21	Kullanılan mikromanometreler	88
Şekil 4. 22	Ölçüm yapılan kek numunesi	88
Şekil 4. 23	Kek numunesinin rüzgar tüneli üzerindeki yerleşimi.....	89
Şekil 4. 24	Veri toplama yazılımının görünümü.....	90
Şekil 4. 25	Kabuk ve iç bölgede hıza bağlı basınç kaybı grafiği.....	90
Şekil 4. 26	Yükseklik üzerindeki etkin parametreler	94
Şekil 4. 27	Yükseklik için ana etkiler grafiği	95
Şekil 4. 28	Kütle kaybı üzerindeki etkin parametreler	96
Şekil 4. 29	Kütle kaybı için ana etkiler grafiği	97
Şekil 4. 30	Yüzey rengi üzerindeki etkin parametreler.....	98
Şekil 4. 31	Yüzey rengi için ana etkiler grafiği	99
Şekil 4. 32	Kabuk kalınlığı üzerindeki etkin parametreler	100
Şekil 4. 33	Yüzey rengi için ana etkiler grafiği	101
Şekil 4. 34	Yükseklik takibi için fırın kapağına kamera yerleştirilmiş deney düzeneği	102
Şekil 4. 35	Fırın kapağına kameradan kekin görünümü	103
Şekil 4. 36	Kabarmanın tamamlandığı süreyi etkileyen parametreler	103
Şekil 5. 1	Analizlerde kullanılan fırın modeli	108
Şekil 5. 2	Analizlerde kullanılan fırın modelinin kesit görünümü.....	108
Şekil 5. 3	Tepsi düzleminde ve dikey kesitte sıcaklık dağılımı	109
Şekil 5. 4	Analiz modeli ve kek etrafında oluşturulan küp hacmi.....	110
Şekil 5. 5	Kek etrafında oluşturulan hacim.....	110
Şekil 5. 6	Kek etrafında oluşturulan hacimde oluşan hız dağılımı.....	111
Şekil 5. 7	Çözüm ağı yapısı.....	112
Şekil 5. 8	Kek analizindeki sınır koşulları için seçilen küp hacmi	113
Şekil 5. 9	Profil dosyasının oluşturulması	114
Şekil 5. 10	Hız için profilin seçilmesi.....	114
Şekil 5. 11	Sıcaklık için profilin seçilmesi	115
Şekil 5. 12	Hareketli ağı hareketinin aktif hale getirilmesi	116
Şekil 5. 13	Deformasyon koşulu için seçilen parametreler	116
Şekil 5. 14	Kabarma için kullanıcı tanımlı fonksiyonun aktif hale getirilmesi	117
Şekil 5. 15	Multiphase modelin seçimi (Mixture).....	117
Şekil 5. 16	Multiphase modelin seçimi (Phases)	118
Şekil 5. 17	Multiphase modelin seçimi (Interaction).....	118
Şekil 5. 18	Buharlaştırma ve yoğunlaşma modelin seçimi	119
Şekil 5. 19	t=2 sn anında kekin görünümü	120
Şekil 5. 20	t=300 sn anında kekin görünümü	120
Şekil 5. 21	t=450 sn anında kekin görünümü	121
Şekil 5. 22	t=600 sn anında kekin görünümü	121
Şekil 5. 23	t=800 sn anında kekin görünümü	122
Şekil 5. 24	t=1000 sn anında kekin görünümü	122
Şekil 5. 25	t=1200 sn anında kekin görünümü	123
Şekil 5. 26	t=1400 sn anında kekin görünümü	123
Şekil 5. 27	t=1800 sn anında kekin görünümü	124

Şekil 5. 28	t=2200 sn anında kekin görünümü	124
Şekil 5. 29	Analiz sonucunda elde edilen sıcaklık, yükseklik ve kütle değişimi	125
Şekil 5. 30	Analiz ve deneysel olarak elde edilen yüksekliğin karşılaştırılması	126
Şekil 5. 31	Analiz ve deneysel olarak elde edilen üst yüzey sıcaklık değişiminin karşılaştırılması	126
Şekil 5. 32	Analiz ve deneysel olarak elde edilen kütle değişiminin karşılaştırılması	127
Şekil 6. 1	Deneysel olarak gözlemlenen kabuk kalınlığı ile analizlerde gözlemlenen kabuk kalınlığının karşılaştırılması	132
Şekil 6. 2	t=1800 sn anında kekin görünümü	133
Şekil 6. 3	Analiz ve deneysel olarak elde edilen yüksekliğin karşılaştırılması	133
Şekil 6. 4	Analiz ve deneysel olarak elde edilen üst yüzey sıcaklık karşılaştırılması	134
Şekil 6. 5	Analiz ve deneysel olarak elde edilen kütle değişiminin karşılaştırılması	134

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 CIE aydınlatma ve ışık kaynakları için kullanılan üçlü değerler [8]	12
Çizelge 3. 2 Dış kabuk, iç kısım ve iç kabuğa ait renk değerleri [7]	14
Çizelge 3. 3 Hamur içeriği [34]	57
Çizelge 3. 4 Karışım ve deney koşulları [34]	57
Çizelge 4. 1 BSI renk skalasının RGB ve Lab renk uzayına dönüşümü	79
Çizelge 4. 2 Kabuk ve iç bölgede hıza bağlı basınç kaybı	91
Çizelge 4. 3 Deney planı.....	92
Çizelge 4. 4 Deney sonuçları.....	93
Çizelge 4. 5 Deney planı ve sonuçları	102

**PORUZ ORTAMDA ISI VE KÜTLE GEÇİŞİNİN
TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

Murat KANTAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN

Pişirme, gıdadaki belirli kimyasal reaksiyonların optimum şekilde oluşması için gıdaya ısı transfer edilmesi olarak tanımlanabilir. Pişirme sırasında gıdada birçok kimyasal değişim eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Hamurlu gıdaların pişirilmesinde bu reaksiyonlar sonrasında kabarma, yüzey renk değişimi, kütle kaybı ve kabuk oluşumu gözlenmektedir. Bu doktora tez çalışmasında kağıtta kek pişirme işleminin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

Tezin ilk bölümünde, literatürde konu ile ilgili geçmişte yapılan çalışmalar incelenip özetlenmiş ve çalışmaya başlama nedenleri, ulaşılmak istenen sonuçlar genel olarak paylaşılmıştır. Literatür araştırması; kabuk kalınlığı ve renk değişimi, yükseklik ve hacim değişimi, ısı ve kütle transferi, kimyasal reaksiyonlar ve gözeneklilik başlıkları altında yapılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde; pişirmeye girdi teşkil eden sıcaklık, fan devri, pişirme süresi ve nem miktarının pişirme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Eş zamanlı gerçekleşen ısı ve kütle transferini ortaya koymak için pişirme sırasında elde edilen deneysel ölçümlerden (sıcaklık, su içeriği, ağırlık kaybı, kabuk kalınlığı ve yüzey rengi) faydalanılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak kek pişirme işlemi için bir matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, kek pişirme işleminin sonuçlarının tahmin edilebilmesini sağlamaktadır.

Tezin üçüncü bölümünde ise, ev tipi elektrikli bir fırın için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modeli oluşturulmuş ve deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Oluşturulan bu model ile optimum pişirme koşulları için gerekli olan pişirme sıcaklığı, pişirme süresi ve fan devri belirlenebilmektedir.

Tez çalışmasının son bölümünde ise sonuçlar değerlendirilerek öneriler sunulmuştur. Pişirme sıcaklığı, pişirme süresi, fan devri ve nem miktarının; kütle kaybı, yükseklik, kabuk kalınlığı ve yüzey rengi üzerindeki etkileri açıklanmıştır. Doğrulama testleri matematiksel model ve HAD analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Pişirme, kek, modelleme, ısı ve kütle transferi, yüzey rengi, kabuk oluşumu, poroz ortam

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF HEAT AND MASS
TRANSFER IN POROUS MEDIA**

Murat KANTAŞ

Department of Mechanical Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN

Cooking process is defined as the transfer of heat to the food in an optimum way for the formation of certain chemical reactions in food. Several chemical changes take place simultaneously in the food during cooking. After these reactions; changes on cake height, surface color, mass transfer and crust thickness is observed. In this Ph.D. study, effect parameters that are effect to muffin cake cooking investigated experimentally and theoretically .

In the first part of the thesis, past studies on the literature have examined and the reasons for initiating this study, as well as the goal of the work are presented. In the literature research, crust thickness, surface color, cake height and volume changes, heat and mass transfer, chemical reactions and porosity have been examined.

In the second part of the thesis; input parameters of cooking such as cooking temperature, fan speed and amount of moisture was investigated. Experimental data (temperature, water content, weight loss, crust thickness and surface color) obtained during baking is used to well understand the simultaneous heat and mass transfer occurring during the process. A mathematical models for the cake baking process is developed using experimental data. These mathematical models could be a quick tool for the prediction of the baking results of the cup cake.

In the third part of the thesis, CFD (Computational Fluid Dynamics) model was developed for the domestic electric oven and validated with the experimental results. This CFD model of electric oven provides information to achieve the optimum baking conditions such as baking temperature, fan speed and baking time.

In the last part of the thesis, conclusions and advices have been presented. The effect of the baking temperature, baking time, fan speed and moisture content on the mass loss, height, crust thickness and surface color were shared. Verification tests clearly indicates that the results of mathematical and CFD models are in good agreement with the experimental results.

Keywords: Cooking, cake, modelling, heat and mass transfer, surface color, crust formation, porous media

BÖLÜM 1

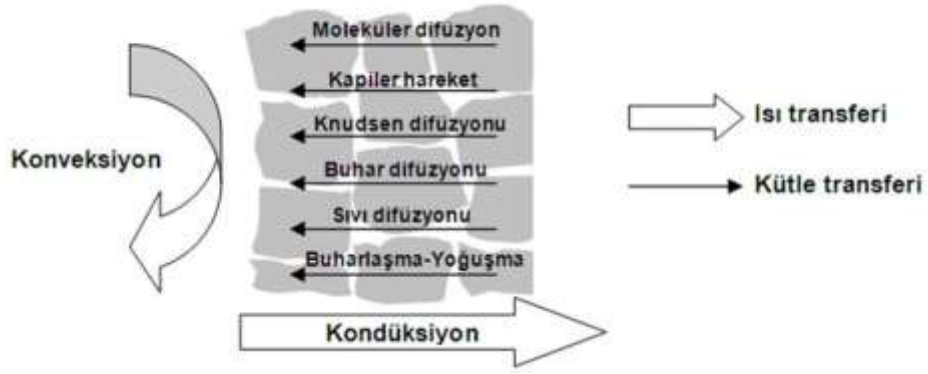
GİRİŞ

Piştirme, gıdadaki belirli kimyasal reaksiyonların optimum şekilde oluşması için gıdaya ısı transfer edilmesi olarak tanımlanabilir. Piştirme sırasında gıdada birçok kimyasal değişim eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Bu değişimlerin en önemlileri, Maillard reaksiyonu, lipid reaksiyonları, protein yapılarında meydana gelen bozunmalar, nişasta yapılarında oluşan değişimler şeklinde özetlenebilir.

Piştirme süresince proteinler ve nişasta gibi yapılardaki değişimler ve kabarma tozundan açığa çıkan gazlar gıdaların pişme esnasında şekilde değiştirmelerine sebep olur. Hamur işlerinin kabarması piştirme sırasında istenen bir şekil değişimi olarak kabul edilebilir. Hamur işi ürünlerde kabuk oluşumu yüksek akılı ısı transferiyle gerçekleşen yapısal bozunmalar sonucunda gözlenen bir şekil değişimidir [1, 2].

Piştirme sırasında gıda içinde ve yüzeyinde nem transferi gözlenmektedir. Gıdalar, mikroyapılarında çoğunlukla hücre ve granül grupları barındırdıkları için belirli bir poroziteye sahip gözenekli maddelerdir. Kütle transferi bu poroz yapı içerisinde gerçekleşir. Kütle transferinde taşınan en önemli bileşen sudur. Bunun dışında gıda içine veya dışarı doğru sıvı yağ ve yağ buharı difüzyonu da gerçekleşmektedir. [2] Piştirme sırasında gıdalarda gerçekleşen ısı-kütle transfer mekanizmaları Şekil 1.1’de gösterilmiştir [3].

Gözenekli ortam boyunca akış uygulandığında gözenekli ortam akışa direnç göstereceğinden ortamın giriş ve çıkışı arasında basınç düşümü gerçekleşmektedir. Bu basınç düşümünde, poroz ortamın viskozite direnci ve atalet direnci ile gözeneklilik değeri etkilidir.



Şekil 1. 1 Pişirme sırasında gıdada eş zamanlı gerçekleşen taşınım olayları [1]

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımlarında gözenekli bir ortamın modellenmesi için atalet ve viskozite katsayısı ile gözeneklilik değerine ihtiyaç vardır. Bu üç parametre gözenekli ortamın yapısına bağlı olduğundan her modelde farklı değerler almaktadır. Bu modeller için atalet ve viskozite katsayılarını hesaplamak için deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

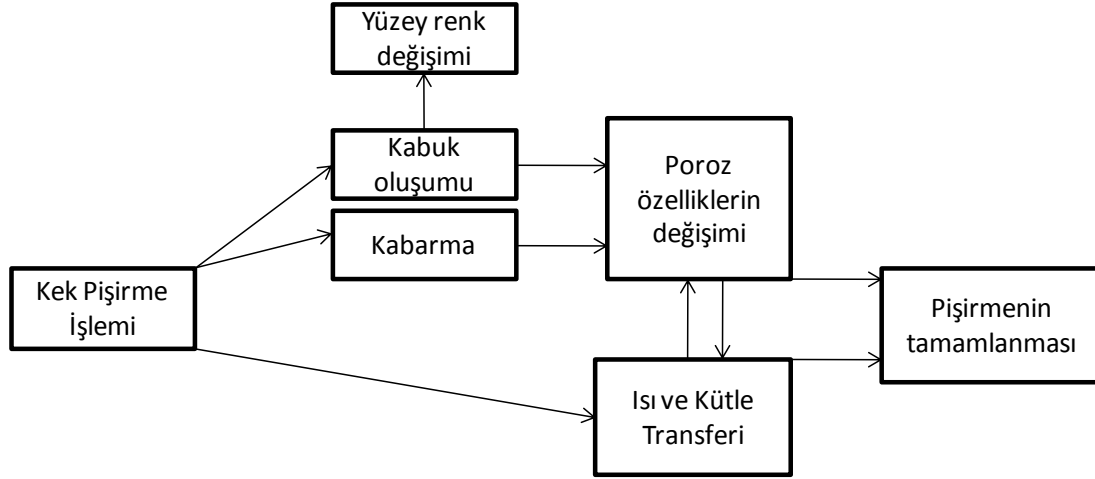
1.1 Literatür Özeti

Literatür araştırması kapsamında beş temel konu üzerine araştırmalar yapılmıştır. Öncelikle, pişirme sonucunda oluşan ürünün kabuk kalınlığının ve renk ölçümünün incelenmesine yönelik olarak kullanılan yöntemler incelenmiştir. Buna ilave olarak yükseklik ve hacimsel değişikliğin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar incelenmiştir. Sonrasında hamurlu gıdalarda meydana gelen ısı / kütle transferi ve kimyasal reaksiyonlar incelenmiştir. Son olarak ise gözenekliliğin belirlenmesine yönelik olarak literatür araştırması yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Literatürde, çeşitli gıda türlerinde ısı ve kütle transferi üzerine çalışmalar olduğu görülmüştür. Bu çalışmaların, fırın içi havanın ve fırın içine konan yükün (yiyeceğin) çeşitli durumları için sıcaklık ve nem değişimini kapsadığı görülmektedir. Modelleme çalışmalarında ise fırın ve fırın benzeri kapalı hacimlerde momentum, ısı ve kütle geçişinin modellenmesine yönelik çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Poroz ortam ile ilgili çalışmalar incelendiğinde ise, çeşitli poroz malzemelerde oluşan basınç kayıplarının

ve malzeme içerisinde oluşan dirençlerin belirlenmesine yönelik sayısal ve deneysel çalışmaların olduğu görülmektedir. Ancak doğrudan, pişirilen gıdada poroz ortam kabulü ve zamana bağlı olarak kabuk oluşumu, yüzey renk değişimi ile birlikte porozite değişimi göz önüne alınmamıştır. Tez kapsamında pişirme işleminin temel adımları göz önüne alınarak modelleme çalışmaları yapılacaktır.



Şekil 1. 2 Pişirme işleminin temel adımları

1.3 Hipotez

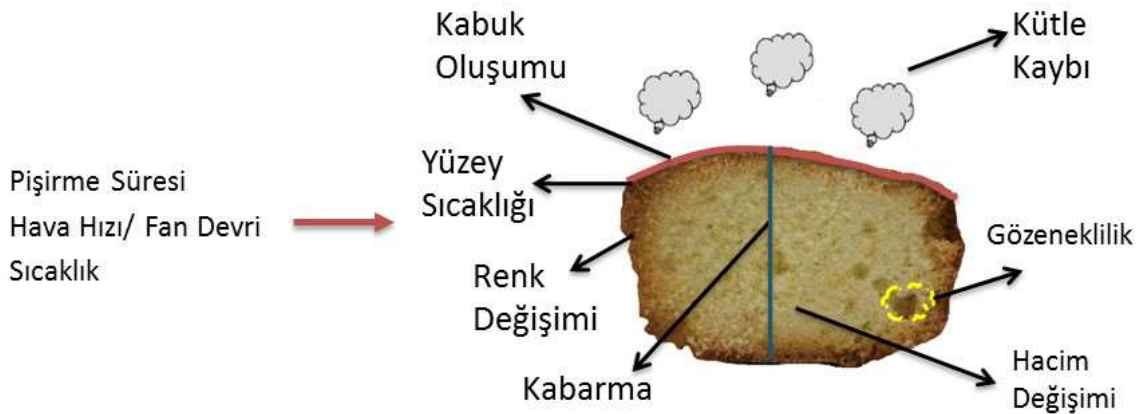
Kek pişirme işlemindeki etkin parametrelerin incelenerek, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımlarıyla modellenmesi ve diğer gıdaların da modellenmesine yönelik alt yapının oluşturulması amaçlanmaktadır. Pişirmenin girdi parametreleri olan fırın fan devri, sıcaklık, süre ile çıktı parametreleri (kütle kaybı, yüzey renk değişimi, kabarma miktarı, kabuk kalınlığı) arasında ilişkiler kurularak, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde tüm bu parametrelerin etkileri görülebilecektir.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1 Pişirme Üzerindeki Etkili Parametreler

Tez kapsamında, bir poroz ortam olan kabaran gıdaların pişirilmesinde etkili parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin hesaplama / ölçme yöntemlerinin incelenmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen bilgiler doğrultusunda, kabaran gıdaların modellenmesinde gerekli parametrelerin ölçülmesi amacıyla deney düzenekleri kurulmuş ve ölçüm metodları geliştirilmiştir. Ayrıca, çeşitli deneysel çalışmalar yapılarak etkin parametrelerin değişimleri incelenmiştir ve birbirleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur.

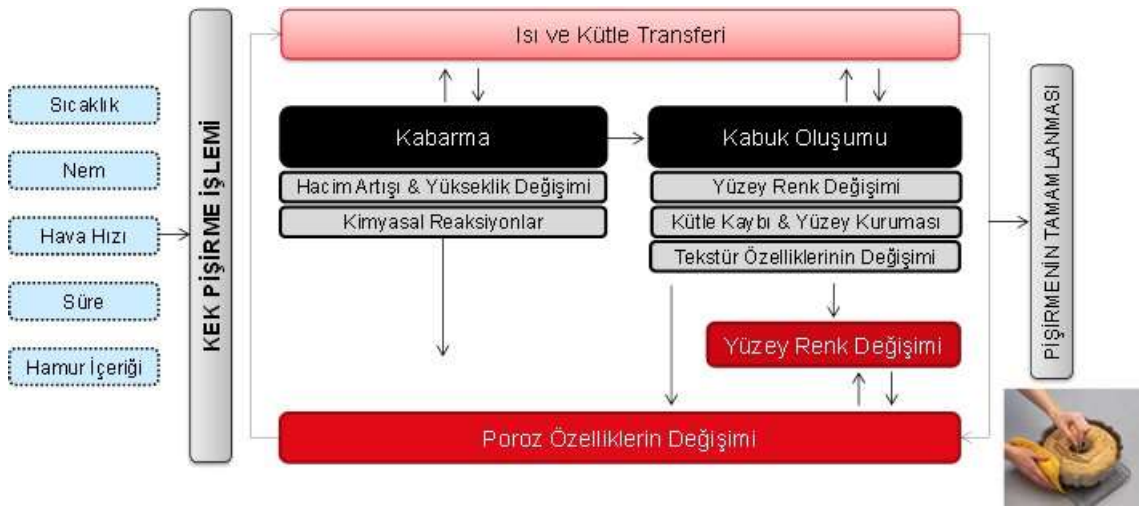


Şekil 2. 1 Pişirmeye etki eden girdi parametreler ve pişirme sonucundaki değişimler

Pişirme işleminde, pişirme şartlarını tanımlayan; sıcaklık, nem, hava hızı, süre, hamur içeriği ve miktarı gibi “girdi parametreler” bulunmaktadır. Ayrıca pişirme sürecinde meydana gelen ısı/kütle transferi ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan “çıktı

parametreler” bulunmaktadır. Tez kapsamında; girdi ve çıktı parametreler arasındaki ilişkinin belirlenmesi, elde edilen bilgiler doğrultusunda pişirme parametrelerine bağlı olarak pişirme sonuçlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

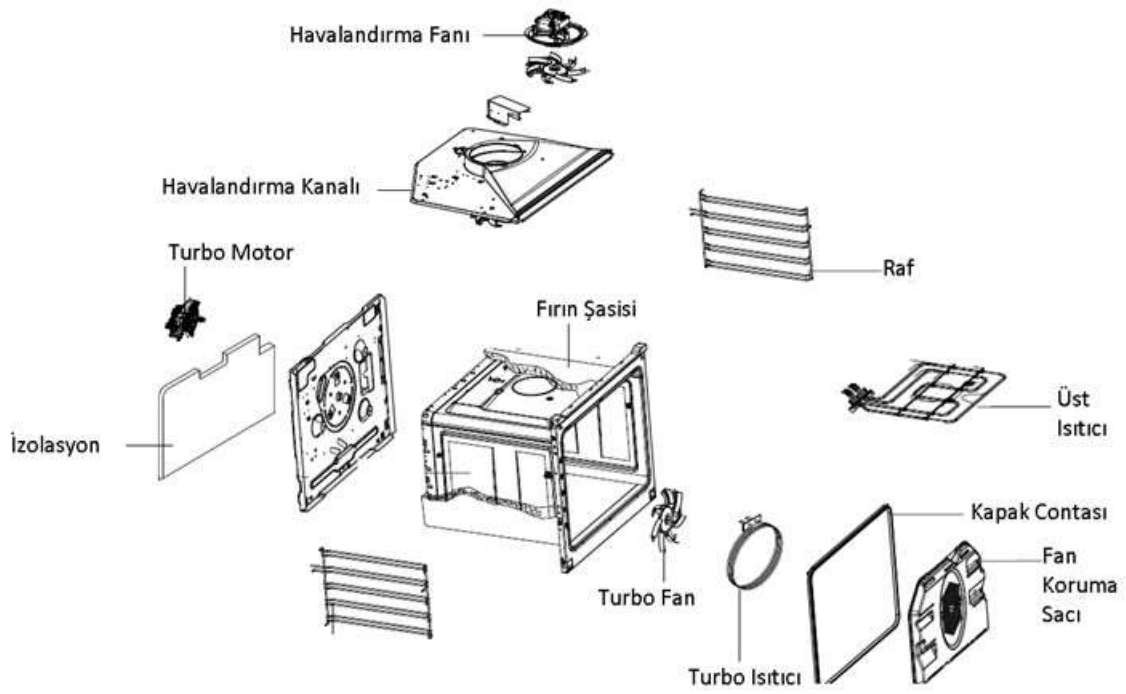
Piştirilen gıda içerisindeki reaksiyonların başlamasında sıcaklık etkili rol oynamaktadır. Ayrıca pişirme sürecindeki birçok parametre sıcaklığa bağlı olarak başlamakta ya da bitmektedir. Bu nedenle pişirme hacminin sıcaklığına ilave olarak kek yüzeyi ve içindeki sıcaklıkların bilinmesi gerekmektedir.



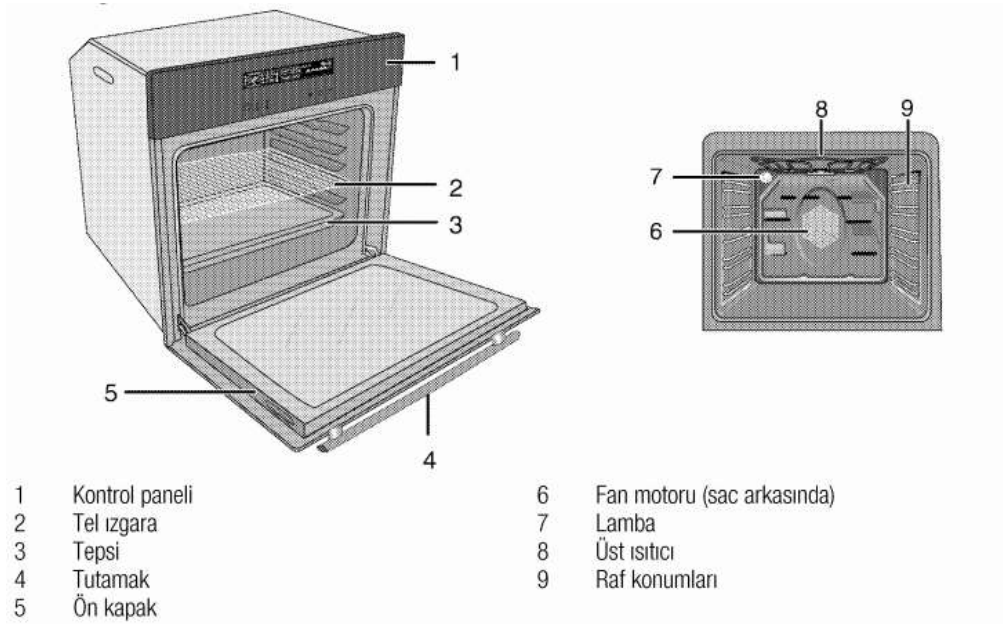
Şekil 2. 2 Pişirme sürecinde oluşan reaksiyonlar

Yapılan deneysel çalışmalarda ev tipi elektrikli bir fırın kullanılmıştır. Bir fırın temel olarak; fırın şasisi (pişirme hacmi) ve üzerindeki ısıtıcılardan oluşmaktadır. Şasi üzerinde statik pişirme için alt ve üst ısıtıcı, ızgara modu için ızgara ısıtıcısı, turbo mod adı verilen zorlanmış taşınım ile pişirmek için ise arka duvarda turbo ısıtıcı ve turbo fan bulunmaktadır [4].

Isı kaybının önlenmesi amacıyla fırın şasisi üzerinde minimum 20 mm olmak üzere cam yünü ya da taş yünü izolasyon bulunmaktadır. Pişirme esnasında oluşan su buharı ve kokunun şasi dışına tahliye edilebilmesi için bir baca bulunmaktadır. Şasinin üst duvarı üzerinde bulunan delikler, şasi üzerinde bulunan havalandırma kanalına bağlıdır. Fırının çalışması esnasında havalandırma kanalındaki fan sayesinde fırın içerisindeki nem ve koku tahliye edilmektedir. Havalandırma kanalının diğer bir görevi ise fırının elektronik komponentlerini soğutmaktır.



Şekil 2. 3 Fırının temel komponentleri [4]



Şekil 2. 4 Fırının genel görünümü [4]

Deneylerde hassas sıcaklık kontrolü yapılabilmesi amacıyla elektronik kontrollü bir fırın kullanılmıştır. Bu fırında ayarlanan sıcaklığın ± 2 K ile kontrol edilmesi mümkündür. Ayrıca pişirme hacmine verilen buharın pişirme üzerindeki etkisinin de görülebilmesi amacıyla, seçilen fırında buhar verme fonksiyonu da bulunmaktadır.



Şekil 2. 5 Deneysel çalışmalarda kullanılan fırın [4]

Piştirme üzerindeki etkin parametreler; sıcaklık, süre, nem ve hava hızı hızıdır. Hava hızının etkisinin belirlenebilmesi amacıyla pişirmeler turbo mod adı verilen fanlı piştirme modunda gerçekleştirilmiştir. Farklı fan devirlerini inceleyebilmek için motor harici olarak voltaj regülatörü üzerinden beslenmiştir.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması kapsamında beş temel konu üzerine araştırmalar yapılmıştır. Öncelikle, pişirme sonucunda oluşan ürünün kabuk kalınlığının ve renk ölçümünün incelenmesine yönelik olarak kullanılan yöntemler incelenmiştir. Buna ilave olarak yükseklik ve hacimsel değişikliğin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar incelenmiştir. Sonrasında hamurlu gıdalarda meydana gelen ısı / kütle transferi ve kimyasal reaksiyonlar incelenmiştir. Son olarak ise gözenekliliğin belirlenmesini yönelik olarak literatür araştırması yapılmıştır. İncelenen çalışmaların tez çalışmasına katkısı ve tezin bu çalışmalara göre farkı da bu bölümde verilmiştir.

3.1 Kabuk Kalınlığı ve Renk Ölçümü

Kabuk, yumuşak ve süngerimsi dokunun dışını kaplayan kuru ve ince tabakaya verilen isimdir. Genellikle açık kırmızı-kahverengine sahiptir (bazı ürünlerde değişiklik gösterebileceği belirtilmiştir, örneğin kepekli ekmek). İç kısımlara kıyasla nem değeri daha düşüktür [5].

İncelenen makalelerde; kumpas, cetvel gibi ölçüm metotlarının yanı sıra alternatif kabuk kalınlığı ölçüm metotları da kullanılmıştır. Bu metotlardan biri de, kek kesitinin fotoğrafının çekilmesi ve bu kesitteki renk dağılımından yola çıkarak kabuk kalınlığının belirlenmesini sağlayan görüntü işleme algoritmalarıdır. Konu ile ilgili olan makalelerde yoğun olarak CIELab renk standardının kullanıldığı görülmektedir. Çekilen fotoğraflar RGB renk uzayında olup, CIELab'a dönüştürmek için çeşitli dönüşümlerin yapılması gerekmektedir.

CIE (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu), kar amacı olmayan bilimsel ve teknik bir kuruluştur. Komisyonun amacı; ışık ve aydınlatma ile ilgili konuları bilimsel ve teknolojik bakımdan tüm yönleriyle ele alacak uluslararası bir forum oluşturmak, ayrıca ülkeler arasında bilgi alışverişini sağlamaktır. [6] CIE renk evreni, her rengi belirli koordinatlarda ifade eden grafiklerdir. CIE tarafından, insanların renk algıları esas alınarak kaydıyla 1931 yılında renkler standartlaştırılmıştır. CIELab renk sistemine ait parametreler sırasıyla; renklerin açık ya da koyuluğuna (L), kırmızıya veya yeşile olan yakınlığına (a), maviye ya da sarıya olan yakınlığına bağlı olarak (b) renk evreni olarak isimlendirilen bir konseptte yerleştirilmesini esas alır [7].

XYZ renk evreni ise, 1931 yılında CIE tarafından kabul edilmiştir. XYZ renk evreni, destek amaçlı olarak görüntü işlemede rol oynar. [8] Renkleri üç boyutlu koordinatlarda tutan ilk uygulama XYZ renk evreni olmuştur. X, Y, Z eksenleri üzerinde renk tanımlaması mümkündür.

Tamamen matematik temelli bu modelde, üç boyutlu koordinatlarda renk dağılımının somut bir biçimde ortaya konulması yani modele bağlı kromatik diyagram oluşturmak çok zor olmuştur. Böylece daha basit algoritmalarla, görselleştirmenin daha kolay olduğu xyz, Yxy gibi kromatik diyagramlar geliştirilmiştir. Ancak bu sistemlerin de yeterince üniform olmadığı anlaşılmıştır. Diyagramda yeşil ve tonlarının kapladığı alan, kırmızı ve tonlarının kapladığı alandan daha fazladır [9]. Yani yeşil tonların bulunduğu bölgede koordinatlar arası geçiş daha yumuşakken, kırmızıda daha serttir.

RGB Renk Evreni ise görüntü işleme (imaj proses) sırasında çokça kullanılan bir çeşit renk evrenidir. Renkli kamera veya tarayıcı gibi cihazlarda veri giriş çıkışları bu renk sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Renk çeşitleri bir küp ile gösterilmiştir. Her bir renk, küpün içinde veya yüzeyinde bir nokta olarak yer almıştır. Üç boyutlu ortogonal renk-vektör evreninde "sıfır vektör" siyahı temsil etmektedir. RGB renk evreninde herhangi bir renk üç komponentten oluşan bir vektör ile temsil edilmiştir. R,G,B (Sırasıyla kırmızı, yeşil ve mavi) uluslararası standartlara bağlı olarak ana renkleri temsil etmektedir. Her bir renk, bu üçlüye bağlı olarak karakterize edilmiştir. $0 \leq R, G, B \leq G_{maksimum} = 255$ olmak kaydı ile belirli bir aralıkta ifade edilmiştir [8].

1996 yılında Uluslararası Renk Komisyonu (ICC) internet için standart sRGB renk evrenini önermiştir. Standart, katot ışın tüplerini barındıran monitörler ve D65 gün ışığına göre ele alınmıştır. sRGB üçlü değerleri, CIEXYZ değerleri ile basit bir lineer kombinasyon içermektedir. Aralarındaki ilişki aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$\begin{pmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,2410 & -1,5370 & -0,4986 \\ -0,9692 & 1,8760 & 0,0416 \\ 0,05556 & -0,2040 & 1,0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Veri aktarımının sRGB üzerinden gerçekleştirilmesi, CIEXYZ ve CIELab'a kıyasla daha hızlıdır, çünkü bilgisayar aynı işi daha az işlem yaparak gerçekleştirmektedir [9, 10].

Proseste ikinci bir basamak olarak lineer olmayan sR'G'B' değerlerine dönüşüm yapılmıştır. [10]

Eğer $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} \leq 0.0034$ ise,

$$sR' = 12,92R_{sRGB} \quad (3.2)$$

$$sG' = 12,92G_{sRGB} \quad (3.3)$$

$$sB' = 12,92B_{sRGB} \quad (3.4)$$

Eğer $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} > 0.0034$ ise,

$$sR' = 1,055R_{sRGB}^{1/2,4} - 0,055 \quad (3.5)$$

$$sG' = 1,055G_{sRGB}^{1/2,4} - 0,055 \quad (3.6)$$

$$sB' = 1,055B_{sRGB}^{1/2,4} - 0,055 \quad (3.7)$$

Son olarak lineer olmayan sR'G'B' değerleri dijital kodlara çevrilmiştir:

$$R = G_{maksimum}sR' \quad (3.8)$$

$$G = G_{maksimum}sG' \quad (3.9)$$

$$B = G_{maksimum}sB' \quad (3.10)$$

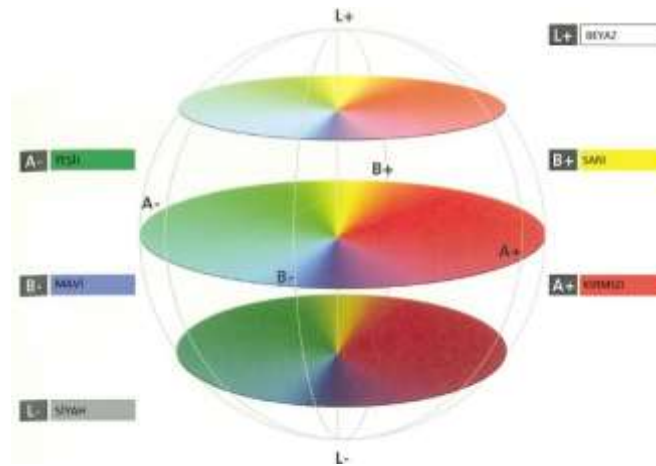
İnternetteki sRGB gün ışığı kurallarına uygun olarak CRT monitörlere göre düzenlenmiştir. Ancak günümüzde LCD gibi gün ışığı kullanmayan sistemler kullanılmaktadır. Yakın zamanda RGB için değişik modifikasyonlar önerilmiştir [10].

Yukarıdaki dönüşüm sırasına tersten gidildiğinde, 0,0034 değeri 0,04045 olarak alınmalıdır [11].

CIELab renk evreni üniform sistemdir [8]. Üniform renk sistemlerinde renklerin koordinatlarına bakıldığı zaman, tonların değişimi gözle fark edilebilecek kadar orantılı bir biçimde değişmektedir. Bu durum RGB gibi sistemler için geçerli değildir [10].

1976'da XYZ modeli matematiksel olarak CIELab renk toleransları ($CIEL^*a^*b$ veya kısaca Lab olarak da isimlendirilmektedir) ile ilişkilendirilmiştir. CIELab renk evreni, bir küre ile görselleştirilmiştir. Bu renk evreninde incelenen her bir düzlemde, açıklık (parlaklık) belirli bir değere sahip olacak biçimde tasarlanmıştır [9].

Lab renk sistemi, renklerin aydınlığına (L), kırmızıya veya yeşile olan yakınlığına (a), maviye ya da sarıya olan yakınlığına bağlı olarak (b) renk evreni olarak isimlendirilen bir konsepte yerleştirilmesini esas alır. L, a ve b değerlerinin her biri aslında koordinat temsil eder. L parametresi 0 ila 100 arası değerler alırken, a ve b parametreleri -120 ila +120 arası değerler alır. L'nin 0'a yaklaşması karanlığı (renğin koyulaşması), 100'e yaklaşması ise rengin açığa çıkmasını esas alır. a değerinin negatif olması yeşile yakınlığı, pozitif olması ise kırmızıya olan yakınlığı temsil eder. Benzer şekilde b değerinin negatif olması maviye yakınlığı, pozitif olması ise sarıya olan yakınlığı temsil eder [7].



Şekil 3. 1 CIELab renk evreni [7]

Kürede en alt noktadan en üst noktaya doğru renkler açılmaktadır. Bu sistem RGB gibi sistemler ile kıyaslandığı zaman spektrumu algılamak daha kolaydır. Bu durum sisteme dair önemli bir avantajdır. Hangi aralıkta hangi rengin kullanıldığını tespit etmek bu sistem ile kolay hale getirilmiştir [9].

CIELab, renk hesaplamalarında da kolaylık sağlamaktadır. Sistem X/X_n , Y/Y_n , Z/Z_n ifadelerinin aldığı değere bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [8, 10].

$$X^* = \sqrt[3]{X/X_n} , \quad X/X_n > 0.008856 \quad (3.11)$$

$$X^* = 7.787(X/X_n) + \frac{16}{116} , \quad X/X_n \leq 0.008856 \quad (3.12)$$

$$Y^* = \sqrt[3]{Y/Y_n} , \quad Y/Y_n > 0.008856 \quad (3.13)$$

$$Y^* = 7.787(Y/Y_n) + \frac{16}{116} , \quad Y/Y_n \leq 0.008856 \quad (3.14)$$

$$Z^* = \sqrt[3]{Z/Z_n} , \quad Z/Z_n > 0.008856 \quad (3.15)$$

$$Z^* = 7.787(Z/Z_n) + \frac{16}{116} , \quad Z/Z_n \leq 0.008856 \quad (3.16)$$

X, Y, Z ve X_n, Y_n, Z_n üçlü değerleri sırasıyla örneğe ve referans beyaza ait değerlerdir. CIE aydınlatma ve ışık kaynakları için genel olarak kullanılan üçlü değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir [8].

Çizelge 3. 1 CIE aydınlatma ve ışık kaynakları için kullanılan üçlü değerler [8]

	CT	X	Y	Z	X ₁₀	Y ₁₀	Z ₁₀
A	2856	109.85	100.0	35.56	111.14	100.0	35.20
C	6774	98.07	100.0	118.23	97.29	100.0	116.15
D₅₀	5000	96.42	100.0	82.49	96.72	100.0	81.41
D₆₅	6500	95.05	100.0	108.88	94.81	100.0	107.30

Çizelge 3.1’de CT ifadesi ile renk sıcaklığı (Color Temperature) belirtilmektedir [10].

$$L^* = (116Y^*) - 16 \quad (3.17)$$

$$a^* = 500(X^* - Y^*) \quad (3.18)$$

$$b^* = 200(Y^* - Z^*) \quad (3.19)$$

L , a ve b değerleri ile ilişkili olan hue açısı (h) ve kroma (C) ifadeleri türetilmiştir [10].

$$h_{ab}^* = \tan^{-1} \left(\frac{a}{b} \right) \quad (3.20)$$

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.21)$$

Hue açısı, bir alan üzerindeki kırmızı-yeşil ve sarı-mavi renklerin oranlarını temsil eden görsel algılama ölçüsüdür ve CIELab renk sisteminde 0°-360° arasında bir değere sahiptir. Hue açısı ile doygunluğa (bir alanın renkliliği ile o alanın parlaklığı arasındaki ilişki) ait eşik değerlerinin saptanması önemlidir.

Renk farklılığı için aşağıdaki ifade bulunmuştur:

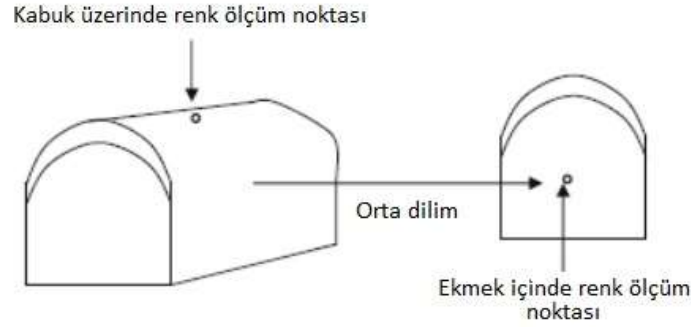
$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3.22)$$

Standart aydınlatmada A ifadesi, tungsten ışık altında aydınlatmayı temsil etmektedir. Renk sıcaklığı 2856K'dir. Ortalama gün ışığına bağlı durumlarda yani 6500K renk sıcaklığında ise referans değerler D65 ile gösterilmektedir. Çok daha eski hesaplama yöntemlerinde ise gün ışığı ile aydınlatma için C (6500K dolaylarında renk sıcaklığına sahiptir) ifadesinin kullanılmakta olduğu belirtilmiştir. D65'in çıkma sebebi olarak, C'nin bütün dalga boylarında hesaplama yapmaya yetmemesi gösterilmiştir. Günümüzde filtrelenmiş kısa ark zenon ışıkları, D65 için gerekli şartlara en yakın aydınlatma aracıdır [8].

Pişirme sonucunda kütle kaybı meydana gelmektedir. Bunun bir sonucu olarak kabuk oluşumu gözlenmektedir. Bu kısımda, ekmeğin kabuk kalınlığının ölçümü için pratik bir yöntem ortaya koyan **Mohd Jusoh Y.M., Chin N.L., Yusof Y.A., Abdul Rahman R., tarafından 2009 yılında hazırlanmış “Bread Crust Thickness Measurement Using Digital Imaging and Lab Colour System” [7]** adlı makale incelenmiştir.

Bu çalışmada, ekmeğin kabuk kalınlığının ölçümü için pratik bir yöntem ortaya koyulmuştur. CIELab renk ölçüm yöntemi sayesinde kabuk ve iç kısmın renk farklılıklarından yola çıkarak, kabuk kalınlığı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Pişirme sırasında ekmek hamurunun sıcaklığa bağlı olarak fiziksel ve biyokimyasal değişimi sonucunda iki esas yapı oluşumu gözlemlenmiştir. Bunlar kabuk ve iç kısımlardır. Kabuk, koyulaşmış ve sertleşmiş dış yüzeyi oluştururken, süngerimsi yapıyı andıran ve nispeten açık renkli yumuşak taraf ise ekmeğin iç kısmını oluşturmaktadır. Nem kaybının ve raf ömrü açısından kabuk kalınlığının, incelenen önemli parametrelerden biri olduğu belirtilmiştir. Renk ölçer cihaz (Konica Minolta) ile ekmeklerin kabuk ve iç kısımlarının L*a*b değerleri ölçülüp ortalaması alınmıştır. Böylece L*a*b cinsinden ortalama kabuk renk değerleri ile ortalama iç renk değerleri elde edilmiştir. Kabuk üst kısmı renk değerleri ile ekmeğin iç

kısım renk değeri arasındaki değerlere sahip olacak biçimde iç kabuk değerleri belirlenmiştir [7].



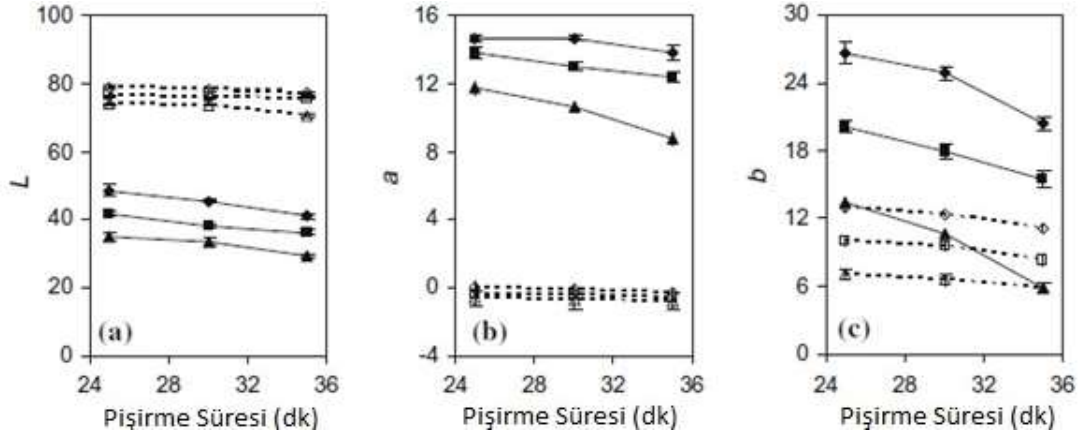
Şekil 3. 2 Ekmeğin renk ölçüm noktaları [7]

Çizelge 3. 2 Dış kabuk, iç kısım ve iç kabuğa ait renk değerleri [7]

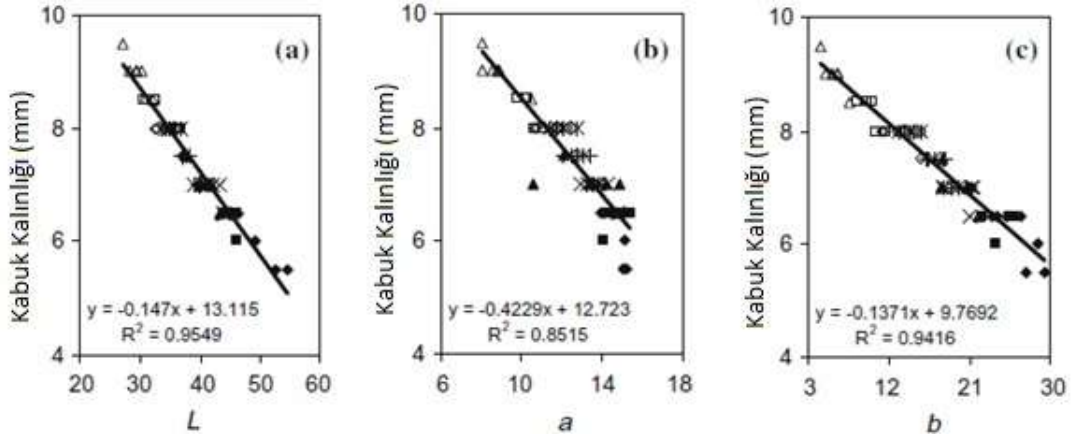
Bölge	L Değeri	a değeri	b değeri
Dış Kabuk	29.41-48.66	8.78-14.66	5.80-26.65
İç Kısım	70.50-79.00	-0,81'den 0.00'a	5.90-13.00
İç Kabuk	48.66-70.50	>0.00	>13.00

Ekmek dilimleri (kesitleri) tarayıcı vasıtası ile bilgisayar ortamında Tiff formatında kaydedilmiştir. Görüntüler Adobe Photoshop yazılımıyla RGB'den CIELab renk uzayına dönüştürülmüştür. Bu fotoğraf üzerinden kabuktan iç bölgeye kadar CIELab renk değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın devamında, farklı sıcaklık değerlerinde kabuk ve iç kısma ait farklı renk değerleri ölçülmüş ve kıyaslamalar yapılmıştır. İç ve kabuk kısmı için L ve a değerleri her sıcaklıkta oldukça farklı değerler alırken, pişirme sıcaklığının ve süresinin yükselmesine bağlı olarak b değerinin iç ve kabuk bölgeler arasındaki farkı gitgide azalmaktadır. Kabuk renk değerleri pişirme koşullarına karşı daha hassasken, iç kısımlar, kabuğa kıyasla daha az duyarlıdır. Buna sebep olarak iç kısmın kabukla çevrili olması ve iç kısmın kabuk tarafından izole edilmiş olması gösterilmiştir [7].

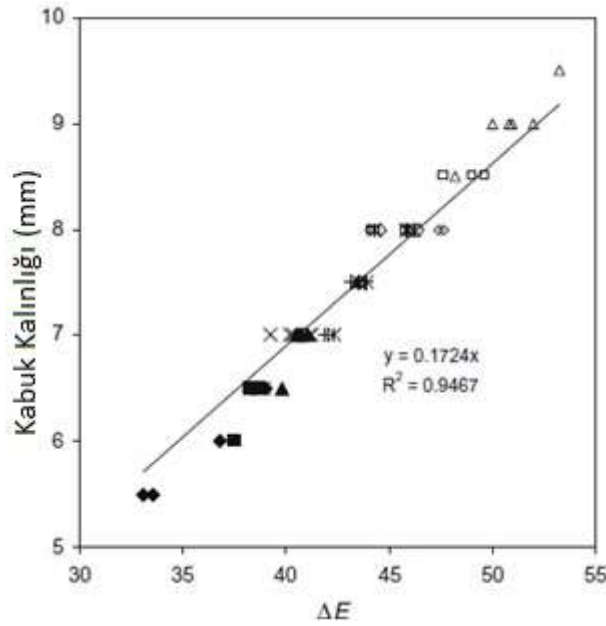
Farklı pişirme sıcaklığı ve sürelerine bağlı renk değişimi ($\blacklozenge$ =185 °C, 25 dakika, $\blacktriangle$ =185 °C, 35 dakika, $\times$ =195 °C, 25 dakika, $+$ =195°C, 30 dakika, $\blacklozenge$ =205°C, 25 dakika, $\square$ =205°C, 30 dakika ve Δ =205°C, 35 dakika) Şekil 3.3'de verilmiştir. Kabuk kalınlığı arttıkça, kabuk renginin koyuluğunu belirten L, a, ve b değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. Bu ilişkiden yola çıkılarak korelasyonlar oluşturulabileceği belirtilmiştir.



Şekil 3. 3 185 °C (◆), 195 °C (■) ve 200 °C (▲) pişirme sıcaklığında sırasıyla L,a ve b değerlerinde zamana bağlı değişimi [7]



Şekil 3. 4 Kabuk kalınlığına bağlı olarak L, a, b değerlerindeki değişim [7]



Şekil 3. 5 Kabuk kalınlığı ile kabuğun renk değeri arasındaki ilişki [7]

Toplam renk değeri ile kabuk kalınlık değerinin değışimi arasındaki ilişki gösterilmiştir. Renk değerlerindeki değışimden yola çıkılarak kabuk kalınlığı değerinin elde edilebileceğı görölmüştür [7].

Piştirme sonunda renk dağılımı heterojen olan patates gibi bir yiyeceğın renk değerlerini bilgisayarlı görüntüleme yöntemi ile inceleyen **Pedreschi F., Leon J., Mery D., Moyano P., tarafından 2006 yılında hazırlanmış “Development of a Computer Vision System to Measure the Color of Potato Chips” [12]** adlı makale incelenmiştir.

Bilgisayarlı görüntüleme sistemi için bir adet bilgisayar, dijital kamera ve Matlab programı kullanılmıştır. Matlab programı ile çekilen görüntülerin RGB cinsinden renk değerleri L^*a^*b cinsinden renk değerlerine çevrilmiştir [12].

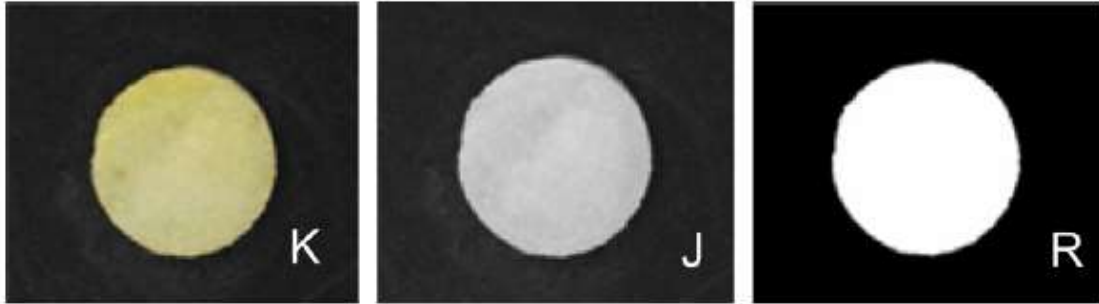
Deneyler dört farklı piştirme sıcaklıklarında (120° - 140° - 160° - 180°) gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi patateslerin ortalama nem değeri, korunma değeri ve koşulları verilmiştir. Bir makine ile birbirine yakın kalınlıkta ve dairesel kesitte kesilmişlerdir. Piştirme öncesi yağın ısıtılma sürelerinin sabit olduğu belirtilmiştir [12].

Dijital kamera ile çekim için bir düzenek hazırlanmıştır. Dört adet flüoresan lambanın uzunluğu (600 mm), ışığın gücü, şiddeti (18W, 6500 K), renksel geriverim indisi (%95'e yakın) ve numuneye geliş açısı (45°), numuneye olan uzaklığı (350 mm) sabittir ve eşit miktardadır. Kamera ise ışık ile 45° açı yapacak biçimde, ışık ve yansımadan korunmak amacıyla, içi siyaha boyalı tahta bir kutu içerisinde ve numuneye 225 mm uzaklıkta bulunmaktadır. Kameranın beyazlık dengesi, Kodak tarafından standartlaştırılmış olan gri renk tablosuna göre ayarlanmıştır. Işıklandırma ve kameranın ayarını kontrol etmek için belirli aralıklarda renk standartlarının fotoğrafları çekilmiştir. Çekilen görüntüler bilgisayara USB bağlantısıyla aktarılmıştır ve sıkıştırma yapılmaksızın, tiff formatında kaydedilmiştir [12].

Deney numunesinin sadece incelenen kısmını ele alıp, arka planda kalan yerlerin atılması amaçlanmıştır. Görüntüde ayırklaştırılması gereken alanın tespiti için önceden elde edilmiş olan yoğun görüntü kullanılmıştır. Bu bölünmüş görüntü sadece siyah ve beyaz pikseller içeren, siyahın "0", beyazın ise "1" olduğu ikili görüntüdür. Görüntünün bölünmesi (patates cipsinin gerçek resminin arka plandan ayırklaştırılması), Laplace-Gauss filtresi temeline dayanan kenar saptama tekniğine dayalı olduğu belirtilmiştir [12].



Şekil 3. 6 Patates cipsi görüntü alma düzeneği [12]



Şekil 3. 7 Patates cipsinin renkli (K), gri tonlamalı (J) ve bölünmüş görüntüsü [12]

Yapılan çalışmalarda elde edilen L^*a^*b değerlerinden yola çıkılarak ΔE değeri hesaplanmıştır.

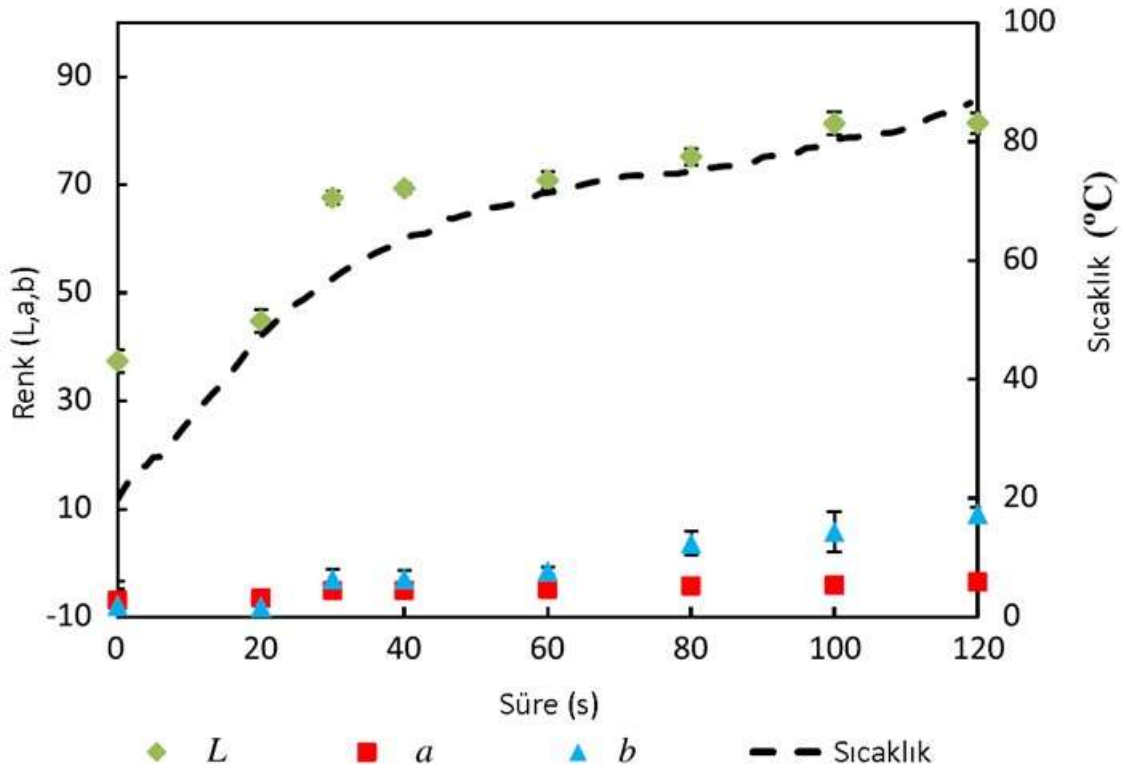
$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (3.23)$$

Burada $L_0a_0b_0$ değerleri patatesin pişirme öncesindeki renk değerleridir. Deneysel verilerden yola çıkılarak ΔE değeri aşağıdaki hale getirilmiştir:

$$\Delta E = b_1 + b_2 \exp\left(\frac{-t}{b_3}\right) \quad (3.24)$$

Her deney üç kez tekrarlanmıştır. t pişirme süresi, b_1 , b_2 , b_3 parametrelerinin ise regresyon katsayıları olduğu belirtilmiştir. ΔE değerinin, düşen pişirme sıcaklığına bağlı olarak azaldığı, bunun da sebebinin enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonunun etkisi olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma ile patates içerisinde, sıcaklığa bağlı olarak etkisini gösteren akrilamid miktarının incelenmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir [12].

Piştirme esnasında proteinlerin bozulmasına bağılı olarak yüzey renk değışimini inceleyen **Yu X., Llave Y., Fukuoka M., Sakai N., 'nin 2014 yılında hazırlanmış olduğı "Estimation of color changes in fish surface at the beginning of grilling based on the degree of protein denaturation" [13]** adlı makale incelenmiştir. Işınım ile piştirme yapan bir fırında farklı koşullarda yapılan piştirmelerde, piştirme süresi boyunca yüzeydeki renk değışimi CIE Lab renk uzayında L, a, b parametrelerine göre incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde a ve b değıerlerinin sıcaklığı ve zamana bağılı olarak ciddi değışmediğı görölmektedir. Parlaklık değıeri olan L ise, sıcaklık artışına bağılı olarak artış göstermektedir [13].



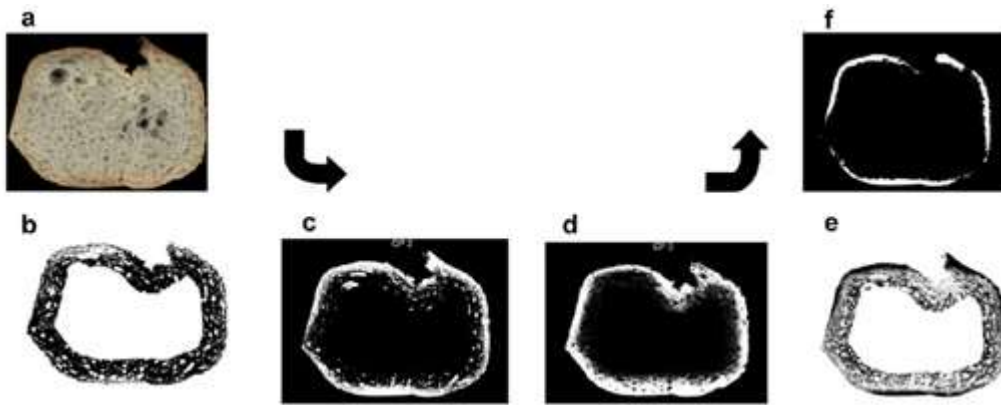
Şekil 3. 8 Piştirme süresince L, a, b değıerlerinin ve sıcaklığın değışimi [13]

Çok katı bir fırında piştirilen baget tipi ekmeklerin ısı ve kütle transferi ile birlikte kabuk yapısının incelenmesine yönelik bir çalışma yapan **Della V.G., Chiron H., Jury V., Raitière M., Réguerre A.L., 'nin 2012 yılında hazırlanmış olduğı "Kinetics of Crust Formation During Conventional French Bread Baking" [14]** adlı makale incelenmiştir.

Bu makalede, çok katı bir fırında piştirilen baget tipi ekmeklerin ısı ve kütle transferi (hidrotermal) ile birlikte kabuk yapısı incelenmiştir. K tipi termalçift ile iç sıcaklıkları, fırın kapağıının hızlı bir biçimde açılıp kapatılması sırasında pirometre kullanarak dış sıcaklıklar tespit edilmiştir. Kolza tohumu kullanımı ile hacim ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Jelatinizasyona uğramamış nişasta tayini için ise diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC-Differential Scanning Calorimetry) testleri uygulanmıştır [14].

Konica Minolta CR-400 renk ölçüm cihazı kullanımı ile L^*a^*b cinsinden renk ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kabuğun yan, üst ve alt kabuktan ölçümler alınmıştır. Sonrasında 10 dilim kesilmiş ve tarayıcılarda 400 dpi çözünürlükte görüntüler alınmıştır. Bu görüntünün ilgilenilmeyen kısımlarının atılması yoluna gidilmiştir. Ekmeğin iç kısmı tamamen görüntüden çıkarılmıştır. Bu sayede kabuk kısmı ile ilgilenmenin daha kolay hale geldiği belirtilmiştir. RGB cinsinden elde edilen veriler L^*a^*b değerlerine dönüştürülmüştür ve HSI (H-Hue açısı, S-doygunluk, I-yoğunluk) değerleri elde edilmiştir [14].



Şekil 3. 9 Görüntünün işlenme adımları [14]

Şekil 3.9'da (a) 30 dakika pişirilmiş ekmeğin kesit görüntüsü, (b) ilgilenilen bölgenin görüntü yoğunluğu, (c) mavi renge zıt yönde doygunluk, (d) mavi renge zıt yönde kırmızı, (e) kırmızı ve mavi yöne zıt yönde yeşil, (f) eşikleme ve c-d-e görüntülerinden yola çıkılarak iç kısımların maskelenmesi işleminin sonucu gösterilmiştir. b resminde, iç kısma ait karanlık, boşluklu bölgeler atılmış ve kabuk ile iç kısım tamamen ayrıştırılmıştır. Ancak yine de kabuk ve iç kısım birbirlerinden tam olarak ayrıştırılamamıştır. Şekilde yer alan c resminde ise doygunluk ve mavi renk verileri üzerinden hesaplama yapılması sonucu durum görülmektedir. d resminde ise mavi ve kırmızı üzerinden yapılan ayarlamalarda kabuğun daha net görüldüğü gözlemlenmiştir. Şekildeki e resminde ise yeşil rengin de dahil edilmesi ile birlikte kabuğun dışa bakan kısımları ile birlikte bir miktar gözenekli yapı da görüntüye dahil olmuştur. Son olarak f resminde c-d-e görüntülerinin hepsinin de kullanımı sonucu ortaya çıkmıştır. c ve d resimlerinden beyaz pikseller, e resminden siyah pikseller eklenmiştir.

3.2 Yükseklik ve Hacim Değişimi

Gıdalarda önemli bir nitelik olan boyut ve şeklin, ısı ve kütle transferi hesaplamalarında önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Gıdalarda boyutun yaklaşık olarak hesaplanacağı durumlarda basit bir ölçüm metodu seçmek mümkündür. Mayalı ürünlerin ve kalıpta pişirilmiş keklerin hacimleri inceleneceği zaman en pratik ölçümün yükseklik tespiti ile olacağı belirtilmiştir. Sebep olarak kalıpta pişen numunenin zaten kalıp şekline uygun biçimde yükselmesi gösterilmiştir. Çünkü kalıp boyutlarının değişmemesi, kabaran numunenin sadece yukarı hareket etmesine sebep olmaktadır. Gazın hamur içinden dışarı doğru çıkma isteği ve bunun sonucu olarak da hamurun kabarması yükseklik değişiminin temel sebebi olarak gösterilmiştir [15].

Fırıncılık ürünlerinde, basit bir metot olan su seviyesi değişiminin uygulanamayacağı, bunun yerine hacmi bilinen bir kaba dökülen tohumların (kanola veya kolza bitkisi tohumları) sonradan ayrı bir kaba dökülmesi ve boşalan kaba numunenin yerleştirilip tohumların tekrar bu kaba dökülmesi sonucunda, aradaki farktan yola çıkılarak hesap yapılabileceği belirtilmiştir. Bunun dışında TexVol gibi, numuneleri sıkıştırmaya gerek kalmadan hacim ölçebilen gelişmiş cihazlardan da faydalanılabilmektedir [5]. Bu yöntemler dışında, numunelere ait görüntülerin bilgisayarda işlenmesi ile hacim değişimleri belirlenebilmektedir [15].

Ktenioudaki A., Butler F., Gonzales-Barron U., McCarthy U., Gallagher E., tarafından 2009 yılında hazırlanan “Monitoring the Dynamic Density of Wheat Dough During Fermentation” [16] isimli çalışmada, hamurun mayalanması süresince hacimdeki değişimin ölçülmesine yönelik üç farklı yöntem ele alınmıştır. Bu yöntemler sırasıyla silikon yağa daldırma, ışıklandırma ile görüntü üzerinden hacim ölçme ve Chopin reofermentometresi kullanımı ile zamana bağlı hacim ölçümü incelenmiştir [16].

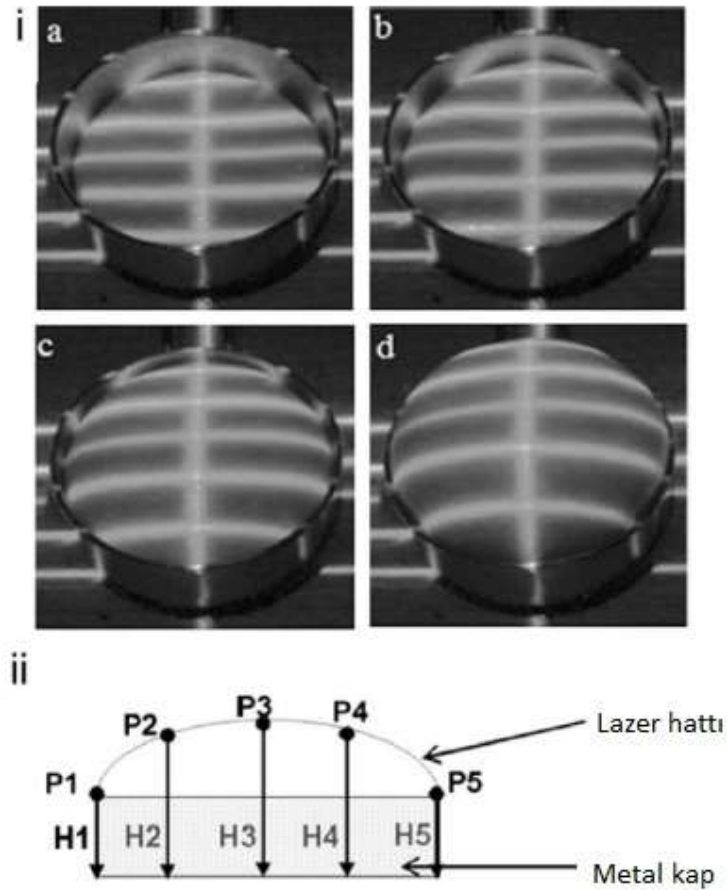
Silikon yağa daldırmayı esas alan yağ değişim metodu uygulanırken, başlangıçta metal bir çerçeveye bağlı kabloya tutturulmuş hamur örneği yerleştirilmiştir. Ceketli beher, su banyosu ile bağlantılı olacak biçimde ayarlanmıştır. Metal kabloya bağlı bulunan numune, içi silikon yağ dolu kabın hemen üzerine durmaktadır. Henüz batırılmamış haldeki ağırlık ile batırılmış haldeki ağırlıklar kaydedilmiştir. Buradan yola çıkılarak yoğunluk hesaplanmıştır [16].

Lazer metodu ise 45 dakika boyunca mayalanan hamurun değişimini incelemek amacıyla yapılmıştır. Bilgisayara bağlı bir adet dijital kamera, numuneye belirli bir mesafeden ve belirli bir açı ile yerleştirilmiştir. Ölçümlerde her bir lazerin aydınlattığı yerin piksel genişliği ve silindir kek kalıbının ölçüleri bilindiği için, kalibrasyon faktörleri elde edilmiştir. Sonrasında bir yazılım ile beş dakikada bir görüntüler alınarak, lazerlerin kesişim noktaları kayıt altına alınmıştır. Bu görüntülerden beş adet lazer hattının da birbirlerine eşit uzaklıkta olan beş noktasından yükseklikleri hesaplatılmış, sonrasında Simpson kuralı ile profiller elde edilmiştir [16].

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + f(x_4)] \quad (3.25)$$

Beş hat için de yapılan bu işlemin ardından prizmoidal kuralı (Hacim hesaplaması için Simpson kuralı olarak da bilinir) ile hesaplanmıştır.

$$\int_s^t f(g)dg \approx \frac{10}{3} [f(g_0) + 4f(g_1) + 2f(g_2) + 4f(g_3) + f(g_4)] \quad (3.26)$$



Şekil 3. 10 Lazer kullanılarak kabarmanın belirlenmesi [16]

Şekil 3.10'da (i) Fermantasyon sonucu kabaran hamura ait sırasıyla 0. (a), 15. (b), 30. (c), 45. (d) dakikalarda elde edilmiş görüntüler ve (ii) lazer hattı altında kalan alanın hesaplanması gösterilmiştir.

Son olarak kenarlarda kalan hesaplanmamış bölümler dikey pozisyonda bir silindire ait parçalar gibi düşünülmüştür. Böylece toplam hacim hesaplanmıştır. Toplam kütle bilindiği için yoğunluk kolaylıkla hesaplanmıştır.

Son olarak reofermentometre yönteminden bahsedilmiştir. Chopin reofermentometresi ile bu cihazın içindeki numunenin yükseklik değişimi incelenmiştir. Fermantasyon sırasında kütle değişimi hesaba katılmaksızın, piston ile içinde bulunduğu ve çapı bilinen kabın şeklini almış olan hamurun kabardıkça hacmi hesaplanmıştır. Kütle bilindiği için yoğunluk bulunmuştur [16].

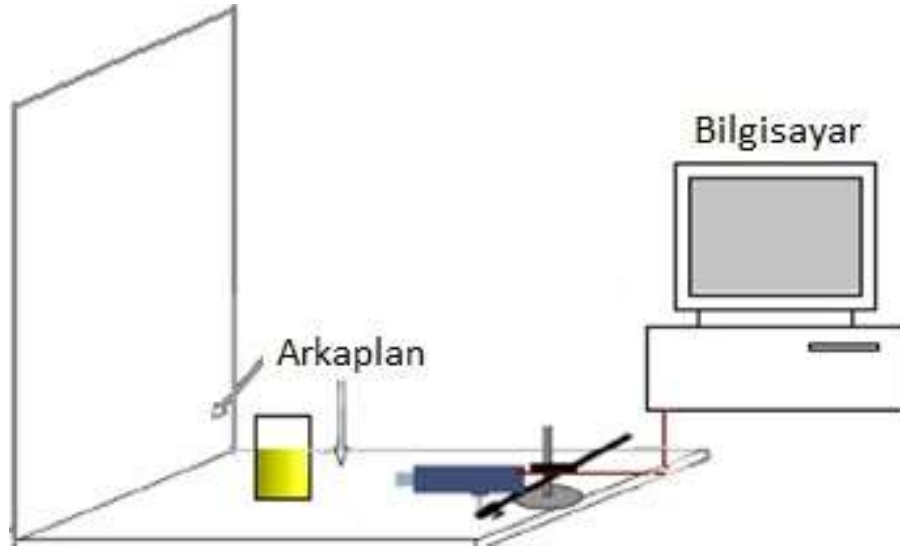
Ayrıca, lazer metodunun gerek ucuzluğu, gerek farklı numuneler için uygulanabilir oluşundan dolayı daha iyi bir yöntem olduğuna değinilmiştir. Bu yöntemin daha cıvık hamur için de uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Reofermentometre metodunun gaz çıkışının gözlemlenebilmesi açısından avantajlı olabileceği de belirtilmiştir [16].

Fermantasyon sebebiyle kabaran hamurun yoğunluk değerini bulmak amacıyla hacim değişimini inceleyen **Soleimani Pour-Damanab A.R., Jafary A., Rafiee Sh., tarafından 2011 yılında hazırlanmış “Monitoring the Dynamic Density of Dough During Fermentation Using Digital Imaging Method” [17]** adlı makale incelenmiştir.

Bu makale; fermantasyon sebebiyle kabaran hamurun yoğunluk değerinin hesaplanabilmesi için gerekli olan hacim ölçümünün, numuneye zarar vermeden ve düşük maliyetli gerçekleştirilmesinden bahsetmektedir. Fermantasyon fırınına yerleştirilmiş ekmek hamuru; belirli bir süre, belirli bir sıcaklıkta bekletilmiştir. Bekletilme süresine bağlı olarak hamur hacmi değişmiştir. Numuneler düz bir yüzeye sahip siyah arka fonun olduğu bir çekim ortamına yerleştirilmiştir. Bilgisayara bağlı dijital kamera ise numunenin önüne yerleştirilmiştir [17].

Arka plan renginin seçiminin, yapılan işlemler için önemli olduğu belirtilmiştir. Sebebi ise, arka plan ile numune arasında daha fazla kontrast elde edebilme durumudur. Kamera, görüntünün alınacağı yere, numuneye dik olacak bir açı ile yerleştirilmiştir. Tartı, düzeneğin altına yerleştirildiği için numunenin kütlesi çekim sırasında

alınabilmektedir. Yaklaşık 5 saniye süren çekim ve tartma işleminin ardından fermantasyon fırınından çıkarılmış olan numune, tekrar fırına yerleştirilmiştir.

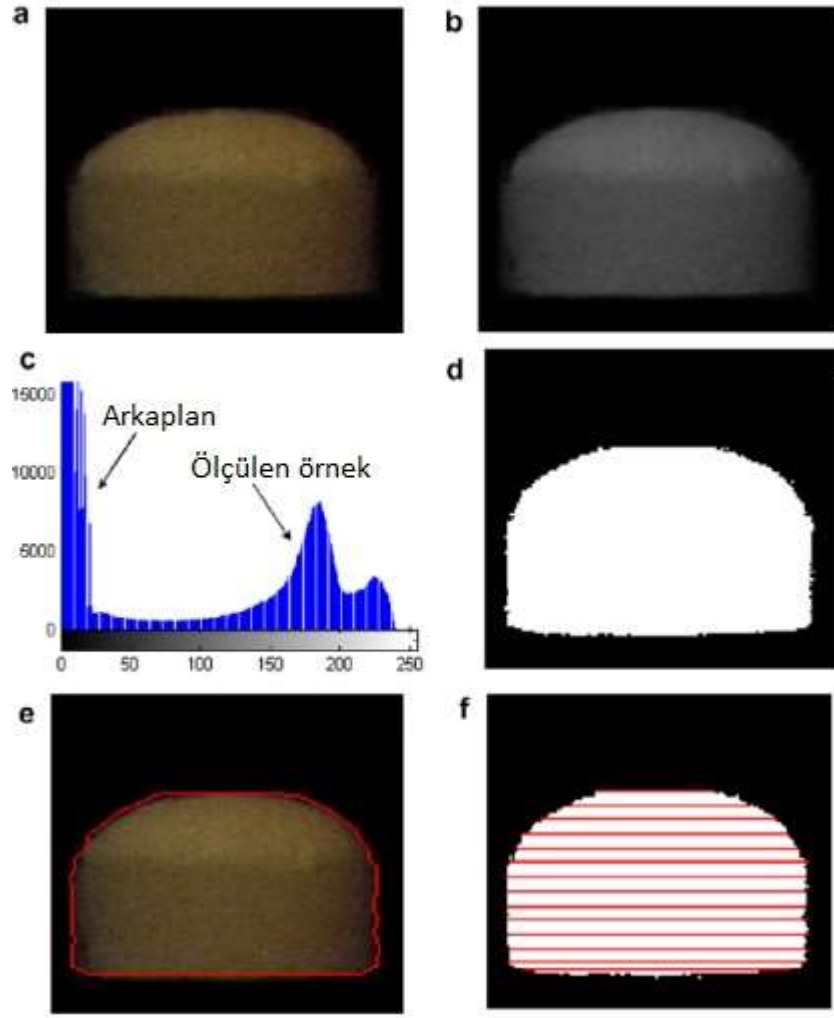


Şekil 3. 11 Görüntü alma amacıyla kullanılan deney düzeneği [17]

Görüntülerin işlenmesi amacıyla MATLAB 7.0.4 yazılımı kullanılmıştır. Tam olarak düzgün bir şekli olmayan bu numunelerin dış çizgileri çıkarılarak hacimleri hesaplanmıştır. İşlemler aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmiştir:

- Orijinal RGB fotoğrafları gri tonlamalı hale getirilmiştir.
- 3 x 3 filtre ile fotoğraftaki kumlanma giderilmiştir.
- Gri tonlamalı fotoğrafın renk değerleri, histogram ile tespit edilerek, eşik değerlerine ulaşılmıştır. Eşik değerler belirlendikten sonra arka planın sadece siyah, numunenin sadece beyaz olması sağlanmıştır.
- Sınırlar oluşturularak numune 20 piksellik (1.14 mm) parçalara ayrılmıştır. Böylece silindir ve kubbeli şekiller elde edilmiştir [17].

Düzenekteki kamera ile çekilmiş numunenin fotoğrafı (a), RGB'den gri tonlamalı görüntüye dönüşüm (b), gri tonlamalı görüntünün histogramı (c), iki renkli görüntü (d), orijinal fotoğraf ve yaklaşık sınırları (e), hacminin tespiti için numunenin siyah-beyaz görüntüsünün enine parçalara ayrılması (f) olarak gösterilmiştir. Dönüşüm faktörü belirlenmesiyle piksel sayısından yola çıkılarak cisim boyutlandırılmıştır.



Şekil 3. 12 Hamur örneği üzerinde görüntü işleme ve sınırların belirlenmesi [17]

Böylece hacim hesaplaması işlemine geçilmiştir. İlk önce kesik koninin hacmi hesaplanmıştır. V_i ile kesik koninin hacmi, R_i ve R_j ile çap değerleri, dh ile kesik koninin yükseklik değeri ifade edilmiştir [17].

$$V_i = (\pi/3)dh[(R_i^2 + R_iR_j + R_j^2)] \quad (3.27)$$

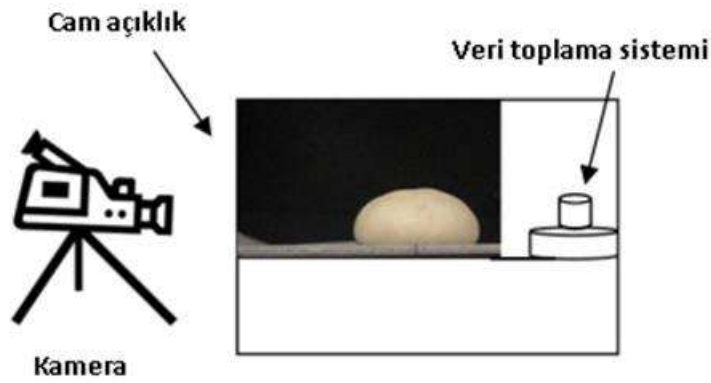
Toplam hacim, kesik konilerin hacimlerinin toplamı ile elde edilmiş ve buradan yoğunluk hesaplanmıştır. [17]

$$V_T = \sum V_i \quad (3.28)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.29)$$

Romano A., Toraldo G., Cavella S. Masi P., tarafından 2007 yılında hazırlanan “Description of Leavening of Bread Dough with Mathematical Modelling” [18] isimli

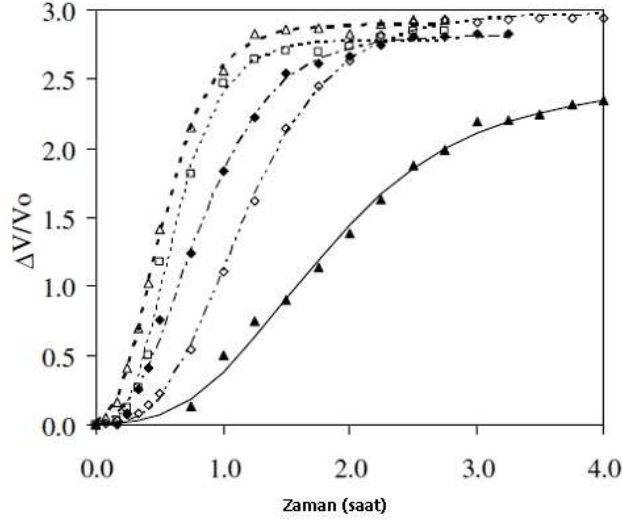
çalışmada ekmek hamurunun hacim değişiminin zamana bağlı fonksiyonu, mayalanma ile açıklanmaya çalışılmıştır. Mayalanma üçe ayrılmıştır. Sırasıyla başlangıç evresi, pozitif ivmelenme evresi, negatif ivmelenme evresi olarak tanımlanmıştır. Mayalanma sırasında yapısal değişim, görüntü işleme vasıtası ile incelenmiş olup, analitik yaklaşımla uygun bir matematiksel modelleme yapılmıştır. Plastik bir kabın içerisine 45 gramlık numune konulmuştur. Maksimum mayalanma için gerekli sürenin bilindiği belirtilmiştir. Mayalanma için gerektiği kadar beklenmiştir. Görüntüler kamera, nem ise veri toplama sistemi vasıtası ile alınmaktadır.



Şekil 3. 13 Hamur örneği üzerinde görüntü ve veri toplama deney düzeneği [18]

$$V = 2\pi A r_g \quad (3.30)$$

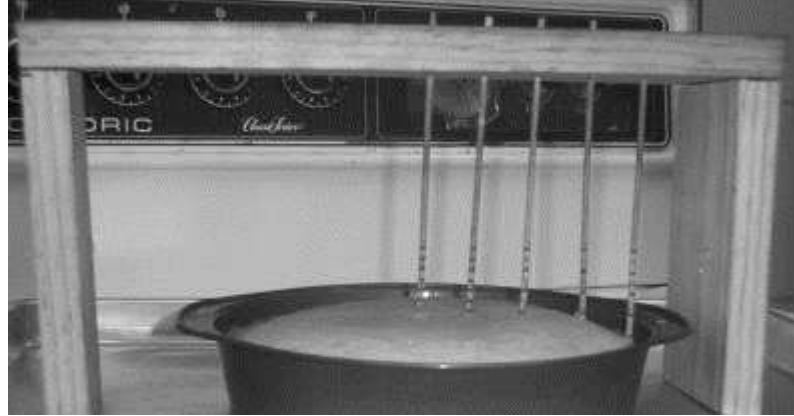
A' 'nın yüzeyi, r_g 'nin kütle merkezinin eksenden uzaklığı temsil ettiği belirtilmiştir. Alan ve kütle merkezi Jandel Sigma Scan adlı görüntü işleme programı tarafından belirlenmiştir. CurveExpert 1.3 adlı program ile eğriler uydurulmuştur. Bu eğriler deneysel verilerden yola çıkılarak bulunmuştur. Amaç mayalanma deneylerinden yola çıkılarak modifiye Gompertz modeli oluşturabilmektir. Yazarların yapmış oldukları literatür çalışmasında, hamurdaki karbondioksit üretimi ve çıkışının yol açtığı hava kabarcıklarının, köpük benzeri yapıya dönüşüme sebep olduğu belirtilmiştir. Karbondioksit çıkışının enzim metabolizmasına bağlı olduğu ve şekerin tüketimi ile alakalı olduğuna değinilmiştir. Kabarmaya ait grafik verilmiş olup, artışın önce eksponansiyel olduğu, devamında ise durduğu belirtilmiştir. Hacimdeki düşüşlerin bu çalışmada yer almadığı da belirtilmiştir [18].



Şekil 3. 14 Maya oranının kabarma üzerindeki etkisi [18]

Şekilde ▲ sembolüyle %0.6, ◊ sembolüyle %1.1, ◆ sembolüyle %1.7, Δ sembolüyle %3.4, □ sembolüyle %2.3 gösterilmiştir. Sonuç olarak buğday unu ile yapılmış hamurun fermantasyon kinetiği incelenmiş olup, modelin doğruluğu gözlemlenmiştir [18].

Un içerisindeki klor miktarına bağlı olarak hamur hacmindeki değişimini inceleyen **Whitaker A.M., Barringer S.A., tarafından 2004 yılında hazırlanmış “Measurement of Contour and Volume Changes During Cake Baking” [19]** adlı makale incelenmiştir.



Şekil 3. 15 Hacim ve dış çizgilerin tespiti için kullanılan yükseklik ölçüm aparatı [19]

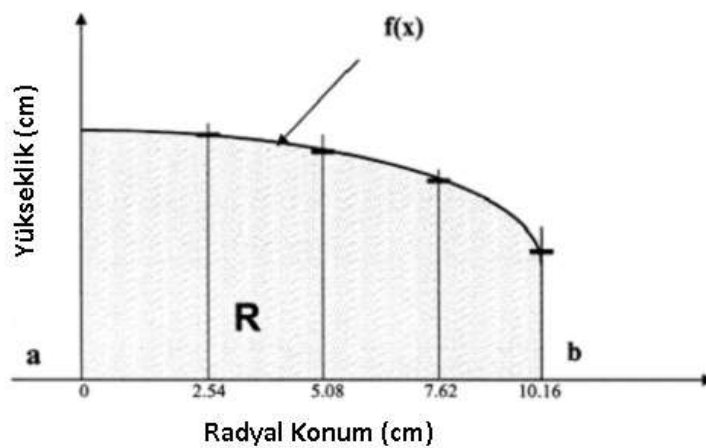
Üç farklı hacim ölçüm metodu kıyaslanmıştır. Çalışma sırasında keklerin belirli bir süre sonra çökmesi göz ardı edilmiştir. Bu yöntemler kolza tohumu, profil takibi ve yükseklik tespiti şeklinde sıralanmıştır. Klor değişimi, unun PH değerini değiştirmiştir. Bu değişim pişirme sonunda kek hacmini doğrudan etkilemiştir. Kolza tohumu yöntemi; hacmi ölçülmek istenen nesnenin, büyük bir metal kabın içine yerleştirilmesi ve toplam hacmi

bilinen kolza tohumunun, bahsedilen yere bir huni yardımı ile dökülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Diğer iki yöntem ise görüntüsü elde edilen bir düzenek ile gerçekleştirilmiştir [19].

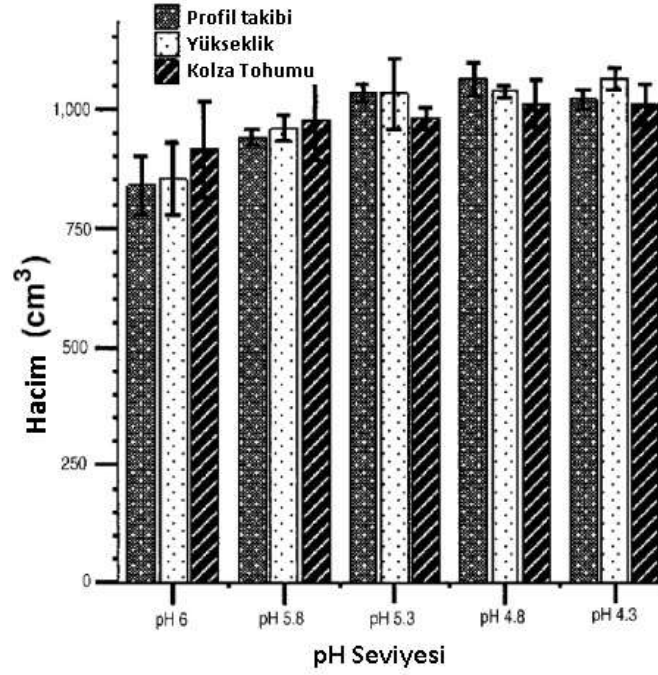
Tahtadan yapılmış bir desteğe, birbirleri arasındaki mesafe 2.54 cm olacak biçimde beş adet tahta çivi yerleştirilmiş olup, bunların üzerine 5 mm aralıklarla kalıcı boya yerleştirilmiştir. İkinci yöntemde takip yöntemi adı verilmiştir. Bu yöntemde dijital fotoğraf makinesi ile görüntüler elde edilmiştir. Üzeri çizgilerle işaretli çiviler kullanılarak çap-yükseklik değerleri tespit edilmiştir. Keki en üst bölgesi profilden incelenmiş olup, üst yüzeye ait eğriler oluşturulmuştur. Ardından y eksenini $x=b$ doğrusu arasındaki alan hesaplanmıştır. Ölçüm yapılan her bir pişirme süresi için $f(x)$ polinomal eğrileri uydurulmuştur.

$$V_{cake} = \int_{10,16}^0 2\pi x f(x) dx \quad (3.31)$$

Yükseklik yöntemi adı verilen diğer yöntemde de fotoğraf makinesi kullanılmaktadır. Fakat bu sefer ölçüme yardımcı olan çiviler kullanılmamıştır. Kamera ile elde edilen görüntülerden yola çıkılarak yükseklik belirlenmiştir. Çap-yükseklik ilişkisinden yola çıkılarak (tıpkı takip yönteminde olduğu gibi) hacim hesaplanmıştır. Kolza tohumu ile yapılan hacim ölçümü yöntemi ile bu yöntem kıyaslanmıştır. Çalışmanın devamında bu üç yöntemde göre hesaplanmış olan hacim değerleri, unun PH değerleri de göz önünde bulundurularak, kıyaslanmıştır.



Şekil 3. 16 Kek yüksekliği ile çap değerlerine bağlı hesaplama [19]

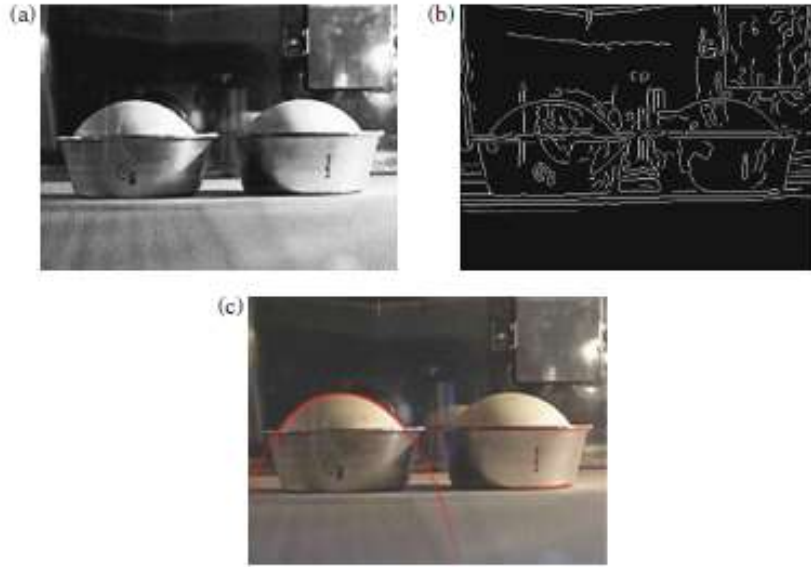


Şekil 3. 17 PH değerleri farklı beş çeşit undan yapılmış keklerin hacimlerinin farklı hacim ölçme yöntemlerine göre kıyaslanması [19]

Cloke J.D., Davis E.A., Gordon J., tarafından 1984 yılında hazırlanmış “Volume Measurements Calculated by Several Methods Using Cross-Sectional Tracing of Cake” [20] adlı çalışmada, yine kolza tohumu kullanılarak kek hacmi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kolza tohumu ile hacim ölçümü sırasında, kolza tohumlarının kek yüzeyi için sert olduğuna ve kekin şeklini değiştirebildiğine dikkat çekilmiştir. Bu duruma önlem olarak kekler düşük sıcaklıklara soğutulmuştur. Böylece kekler sertleştirilmiştir. Bu durumda ise kek kabuğunun, hacim ölçümü sırasında ağırlıktan dolayı çatlayabileceği belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda bu sorun ile karşılaşmıştır. Keklerin hacimlerinin soğutulmaksızın, kolza tohumu ile ölçülmesi durumunda, keklerin üst bölgesi takip edilmiştir. İlk yöntemle kıyasla daha küçük değerler elde edilmiştir. Bunun sebebinin kolza tohumlarının, yumuşak olan kek hacmini küçültmesi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kek üst bölgesinin takip edilerek hacminin ölçüldüğü yöntemde ise, simetri koşulunun oluşmaması durumunda sonucun yanlış çıkabileceği belirtilmiştir.

Bai X., Zhou W., tarafından 2005 yılında hazırlanmış “Study of the Bread Oven Rise by On-Line Image Analysis” [21] adlı makalede, görüntü analizinden yola çıkılarak pişirilmekte olan ekmeğin kabarmasını ve bu parametrenin pişirme karakteristiği ile olan ilişkisi ele alınmaktadır. Pişirme prosesi sırasında hacim değişimi, dijital kamera ile elde

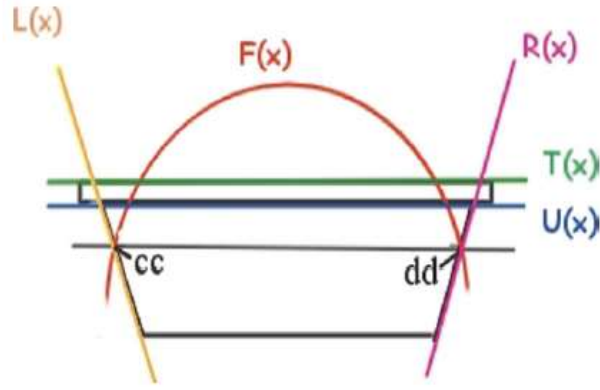
edilen görüntünün bölünerek analiz edilmesi esas alınarak incelenmiştir. Ayrıca ekmeğin pişme karakteristiğini doğrudan etkileyebilen bir madde olarak yeşil çay özü kullanılmıştır. Bu maddenin kabarmaya olan katkısını incelenmiştir. Pişirilmiş olan ekmek, dijital kamera ile 11 dakika boyunca takip edilmiştir. Kayıt sırasında kameranın pozisyonu, ekmek kalıbının kenarlarını yatay görececek biçimde ayarlanmıştır.



Şekil 3. 18 Görüntü işleme adımlar [21]

Görüntüler üzerinde yapılmış olan gerekli işlemler Matlab 6.5 ile gerçekleştirilmiştir. Bütün görüntüler gri tonlamalı hale getirilmiştir. Ardından görüntüdeki kontörler taranarak, ekmeğe ait piksellerin konumları kayıt altına alınmıştır. Elde edilen bu veriler ile ekmek hacmine ait tek bir açıdan iki boyutlu noktalar kümesi elde edilmiştir. Buradan da eğriler oluşturulmuştur. Şekil 3.18’de videodan elde edilmiş görüntünün gri tonlamalı hale getirilişi (a), kenarların saptanması (b) ve eğrilerin görüntü üstünde saptanması (c) işlemi gösterilmiştir.

$F(x)$, $R(x)$, $T(x)$, $U(x)$ ve $L(x)$ fonksiyonlarının, ekmeğin ve kalıbın sınırlarını tanımlayan ve x 'e bağlı lineer fonksiyonlar olduğu belirtilmiştir. Ayrıca $F(x)$ 'in, x 'e bağlı bir polinom olduğu belirtilmiştir. Görüntüdeki yatay koordinatlar x değişkeniyle temsil edilmiştir. Dilimleme adı verilen bir metot ile hacim hesaplanacaktır. Hacim birimi piksel olacaktır. Metot, her bir diskin 0.5 piksel yükseklikte ve değişen çaplarda olduğu esasında dayandırılmıştır.



Şekil 3. 19 Ekmek hacminin hesaplanabilmesi için oluşturulmuş görüntü [21]

Üst kısımlara ait çap değerleri için $F(x)$ fonksiyonları oluşturulmuştur. Altta, yani kalıp içinde kalan kısımlar için $L(x)$, $R(x)$, $T(x)$ ve $U(x)$ fonksiyonları ile cc ve dd noktaları arasında kalan ayırım çizgisi kullanılarak hesaplanmıştır. Bahsi geçen disklerin hacimlerinin toplanması ile toplam hacim elde edilmiştir. Piksel biriminde uzunluk ölçülerinden faydalanılarak yapılan hacim hesabı, mm^3 cinsine çevrilmiştir. Bu işlem, standart kalıp ölçüleri referans alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk hacimden son hacime kadar kabarma incelenmiştir. Hacim-zaman ilişkisi kurulmuştur. Bu ilişki eksponansiyel olarak ifade edilmiştir.

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{\text{maksimum}} - \left(\frac{V}{V_0}\right) = Ae^{-kt} \quad (3.32)$$

Anlık hacim için V , ilk hacim için V_0 , ve zaman için t ifadesi kullanılmıştır. A ve k ifadeleri model parametreleridir. $t=0$ olduğu zaman $V/V_0=1$ ve t sonsuza giderken $V/V_0=(V/V_0)_{\text{maksimum}}$ olduğu belirtilmiştir. Bu sebepten dolayı $A=(V/V_0)_{\text{maksimum}}-1$ olarak tanımlanmıştır. Eşitlik aşağıdaki hali almıştır:

$$L_n \left[\frac{\left(\frac{V}{V_0}\right)_{\text{maksimum}} - \left(\frac{V}{V_0}\right)}{\left(\frac{V}{V_0}\right)_{\text{maksimum}} - 1} \right] = -kt \quad (3.33)$$

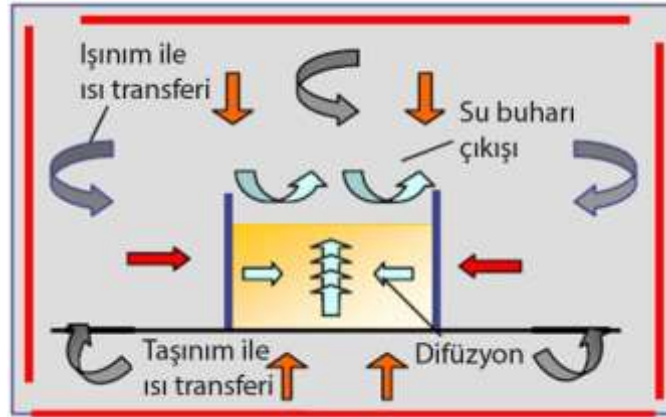
$(V/V_0)_{\text{maksimum}}$ değerinin her bir koşul için sabit bir değere sahip olduğu belirtilmiştir. Böylece hacim hesabının k ifadesi ile karakterize edildiği belirtilmiştir. $\ln[(V/V_0)_{\text{maksimum}} - (V/V_0)] / [(V/V_0)_{\text{maksimum}} - 1]$ ile t arasındaki ilişki grafik haline getirilmiştir. k değeri, elde edilen noktalardan yola çıkılarak uydurulan bir doğru ile ifade edilmiştir. k değeri, hacmin maksimum hacime oranını vermektedir. Bu sebepten dolayı k değeri de koşullara bağlı olarak değişmektedir [21].

3.3 Isı ve Kütle Transferi

Fırıncılık ürünlerinin hazırlanışı pişirme esaslı olduğundan, en önemli girdi parametre sıcaklıktır. Ürünün ısı iletim katsayısı ve sahip olduğu hacim, ısı transferini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca kek hamurunun pişirilmesi gibi bazı durumlarda ısı taşınımı da oldukça önemli bir parametredir. Isı transferi, ürün kalitesini doğrudan etkileyen nem kaybını ve hamurdan süngerimsi yapıya geçişini doğrudan etkilemektedir [5].

Kekin pişirilmesi sırasında meydana gelen ısı ve kütle transferi inceleyen **Sakin M., Kaymak Ertekin F., Ilıcalı C., tarafından 2007 yılında hazırlanmış “Simultaneous Heat and Mass Transfer Simulation Applied to Convective Oven Cup Cake Baking” [22]** adlı makale incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında çok kanallı veri toplama sistemine bağlı J tipi termalçiftler, keklerin farklı noktalarında sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır. Termalçiftler yerleştirilirken, sıcaklık ölçümlerinde alınması hedeflenen noktalardan farklı olarak, yanlışlıkla başka noktalardan veri alınmaması için bant ve ince tahta çubuklar kullanılmıştır. En üst noktadan veri alınırken termalçiftler, hamurun en üst noktasında, ısı ve kütle transferini etkilemeyecek biçimde yerleştirilmiş olup, hamura batmadığı gözlemlenmiştir. Kek yüksekliğindeki değişim kumpas ile incelenmiştir. Alüminyumun yüksek ısı iletkenlik kabiliyeti göz önünde bulundurularak, kek kalıbı malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu seçimi yaparak, eş ısı yayılım ve pişme süresinin kısalması amaçlanmıştır. Turbo modda yapılan pişirme deneylerinde, üç farklı pişirme sıcaklığında (135°C -180°C -225°C) deneyler gerçekleştirilmiştir. Fırın duvarlarında sabit sıcaklık, sabit radyasyon değeri elde etmek amacıyla fırın ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Ohaus MB200 nem ölçüm cihazı ile nem tayini gerçekleştirilmiştir. Kekin tamamının ve kabuğunun nem değeri bulunmuştur. Bu değerler nem tayin cihazı kullanılmadan önce etüv fırını ile yapılan ve 130 °C’de bir saatlik deneylerde de teyit edilmiştir. Deneyler sırasında, numunelerin farklı pişirme sürelerinde incelenebilmesi için, numuneler belirli aralıklarda fırından çıkarılmışlardır. İncelenen yarı mamul halindeki numuneler sonrasında yok edilmiştir. Pişirmenin etkisinin zamana bağlı değişimi incelenirken, belirlenmiş her pişirme süresi için yeni numune kullanılmıştır. Her yeni numune ile yeni deneyler yapılmıştır. Hesaplamalarda bazı kabuller ve açıklamalara yer verilmiştir. Kek bir silindir olarak düşünülmüş olup, açısız simetri kabulü yapılmıştır. Kekin kalıba temas eden dış yüzeylerinin sıcaklığı iç bölgelere kıyasla daha çabuk artar.

Nem kekin üst yüzeyine doğru ve negatif dairesel hareket yapmaktadır. En sonunda kek içindeki nem, taşınım yolu ile kekin üst yüzeyinden ayrılmaktadır.



Şekil 3. 20 Fırında ısı ve kütle transferi mekanizması [22]

Kek kabının nem transferine engel olması, simetri eksenini kabulü yapılmasını sağlamıştır. Nemin dış yüzeylerde daha çabuk azalması, dış yüzeyde kabuk oluşmasını sağlar. Aslında bu durumun her iki transfer mekanizması için de direnç sebep olacağı belirtilmiştir. T sıcaklığın, X ise kilogram cinsinden su kütlesinin, katı kütleyle oranını belirtmekte olup, ısı ve kütle transferi için aşağıdaki denklemler verilmiştir:

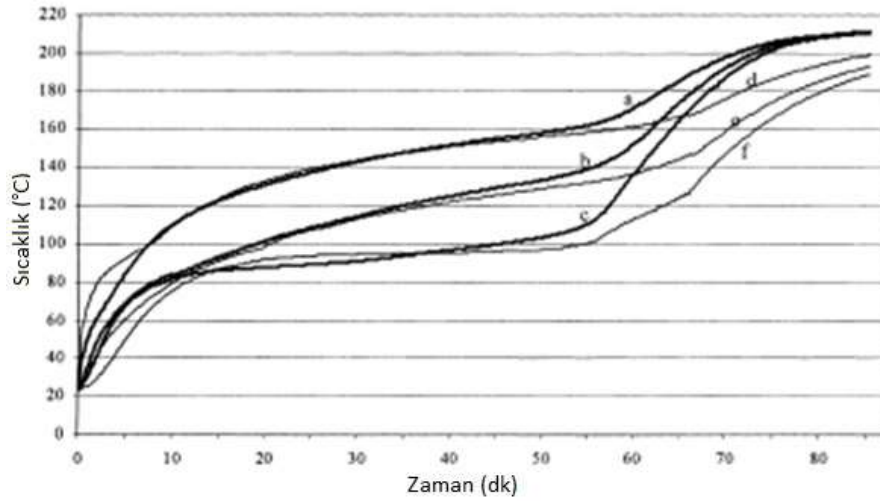
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right) \quad (3.35)$$

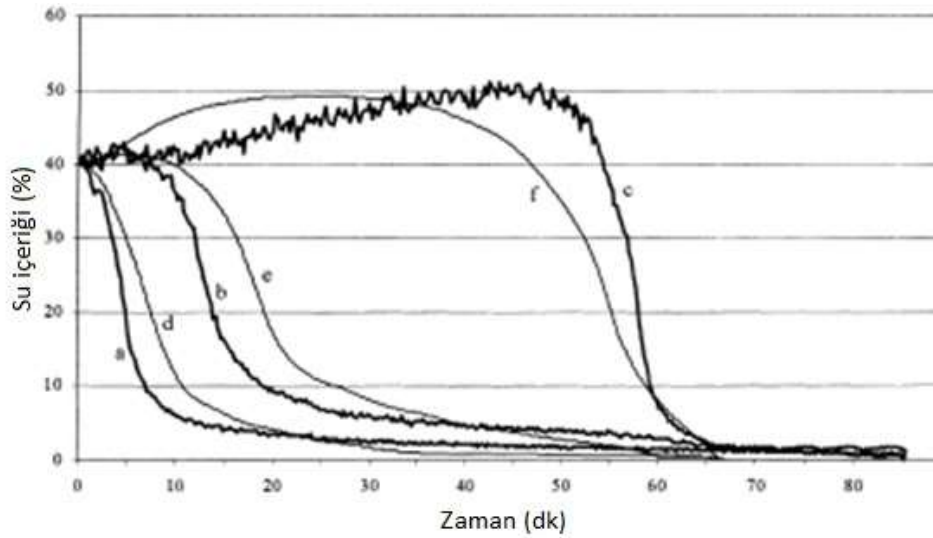
Kekteki hacim artışının, kabartma tozunda bulunan CO₂'nin ve su buharının keki terk etmesi sebebiyle gerçekleştiği belirtilmiştir. Makalede analitik ve nümerik çözümler kiyaslanmış olup, ayrıca deneysel veriler ile kıyaslamalara yer verilmiştir. Sonuç olarak kekin sıcaklığı, nem kaybı ve yükseklik değişimine bağlı olarak elde edilen deneysel sonuçlardan yola çıkılarak, kap kekin pişmesine yönelik modelleme yapılabileceği sonucuna varılmıştır [22].

Thorvaldsson K., Janestad H., tarafından 1999 yılında hazırlanmış “A Model for Simultaneous Heat, Water and Vapour Diffusion” [23] adlı makalede ekmeğin iç kısmından alınmış olan 12x12x2 cm³ hacminde bir numunenin merkez, üst yüzey ve merkez-üst yüzey arası mesafede ısı ve kütle transferi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma ile matematiksel model kıyaslanmıştır. Yapılan matematiksel model tek

boyutludur, ısı ve kütle transferi kabulü yapılmıştır. Üç çeşit denklem kullanılmıştır. Denklemlerden biri ısı transferini, biri su buharı, biri de su transferini incelemektedir. 25°C ve %40 nemli bir ortamda, ekmeğin tahmini karakteristik değerleri bir tablo halinde verilmiştir. Deneylerde tekrarlılığın sağlanması için ekmeğin içeriği kütle cinsinden sabitlenmiştir. Deneylerde sıcaklık ölçümü T tipi termalçiftler ile gerçekleştirilmiştir. Nem için ise fiber optik NIR kullanılmıştır. Merkez, üst yüzey ve merkez-üst yüzey arası mesafede yapılan ölçümler ile kurulan matematiksel model kıyaslanmıştır. Yaklaşık 55 dakikalık pişirme süresince sıcaklık değerlerinde uyumluluk gözlenmişken, daha sonra deneysel veriler ile uyumsuzluk görülmektedir. Nem ölçümünde ise merkez nokta haricinde, belirli bir süreye kadar uyumluluk gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 21 Sıcaklığa ait deneysel veriler ile modelin kıyaslanması [23]



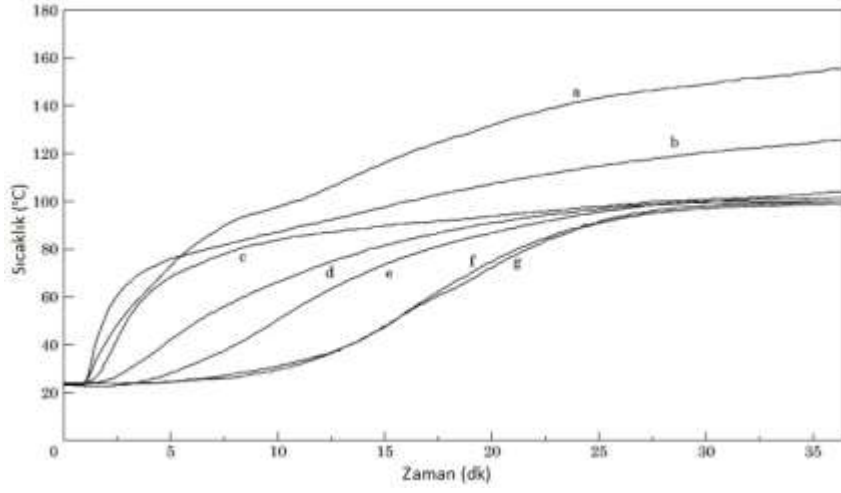
Şekil 3. 22 Neme ait deneysel veriler ile modelin kıyaslanması [23]

Şekil 3.21’de; ölçülen üst yüzeye ait sıcaklık (a), ölçülen üst yüzey-merkez nokta arası sıcaklık (b), ölçülen merkez noktaya ait sıcaklık (c), hesaplanan üst yüzeye ait sıcaklık (d), hesaplanan üst yüzey-merkez nokta arası sıcaklık (e), hesaplanan merkez noktaya ait sıcaklık değerlerinin değişimi (f) gösterilmiştir.

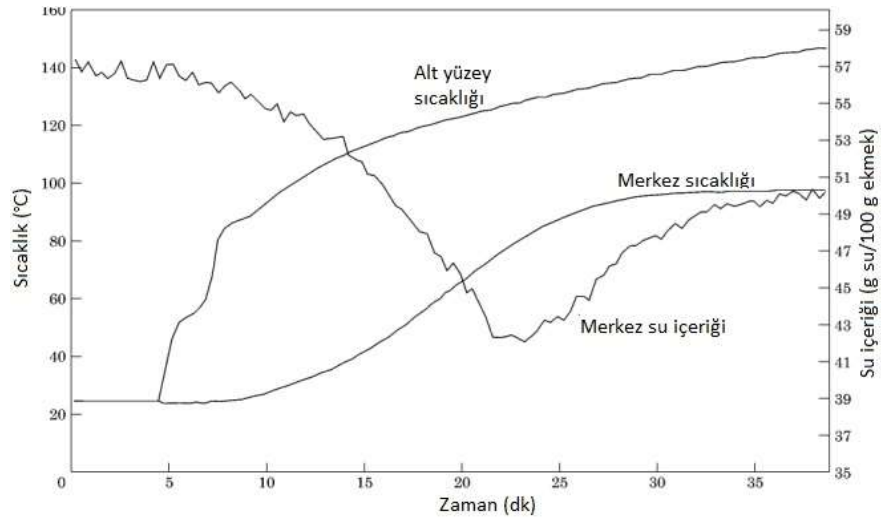
Şekil 3.22’de; ölçülen üst yüzey nem oranı (a), ölçülen üst yüzey-merkez nokta arası nem oranı (b), ölçülen merkez nokta nem oranı (c), hesaplanan üst yüzey nem oranı (d), hesaplanan üst yüzey-merkez nokta arası nem oranı (e), hesaplanan merkez nokta nem oranı (f) gösterilmiştir.

Makalede pişirme boyunca nem dağılımından da bahsedilmektedir. Pişme başladıktan sonra, hamurun dışının ısınmaya içeriden daha erken başladığı gözlemlenmiştir. Bu sırada hamur ise biraz kabarmış haldedir. Hamur içindeki buharın kısmi basıncı kenara yakın yerlerde daha fazlayken, merkezde daha azdır. Dolayısıyla pişirmeye yeni başladığında hareket büyük ölçüde ekmek merkezine doğru olur. (Merkeze yakın kısımlarda). Ekmek merkezine doğru hareketin gerçekleştiği sırada bir miktar yoğuşmanın gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu sefer kek merkezinde su fazla olduğu için, suyun merkezden dışarı doğru hareket ettiği belirtilmiştir. Bu hareketin, buharın merkeze doğru yaptığı harekete kıyasla daha yavaş olduğu söylenmiştir. Sonrasında merkezdeki su da buharlaşmaya başlayacağı için bu kez dışarı doğru hareketlenmenin başladığı belirtilmiştir. Bu sırada ekmek kabarmıştır. Gözenekler açıldıkça buhar daha hızlı dışarı çıkmıştır. Makalede, ısı iletim katsayısının literatürdekilere kıyasla daha küçük olduğu belirtilmiş olup, bunun sebebi olarak da suyun buharlaşması ve buharın yoğuşması olarak iki aşamalı işlem yapılmış olması gösterilmiştir. Bu makaledeki gibi birbirine bağlı pek çok parametre içeren çalışmalarda algoritma yazmanın, pişirmenin modellenmesinde kullanışlı olacağı belirtilmiştir [23].

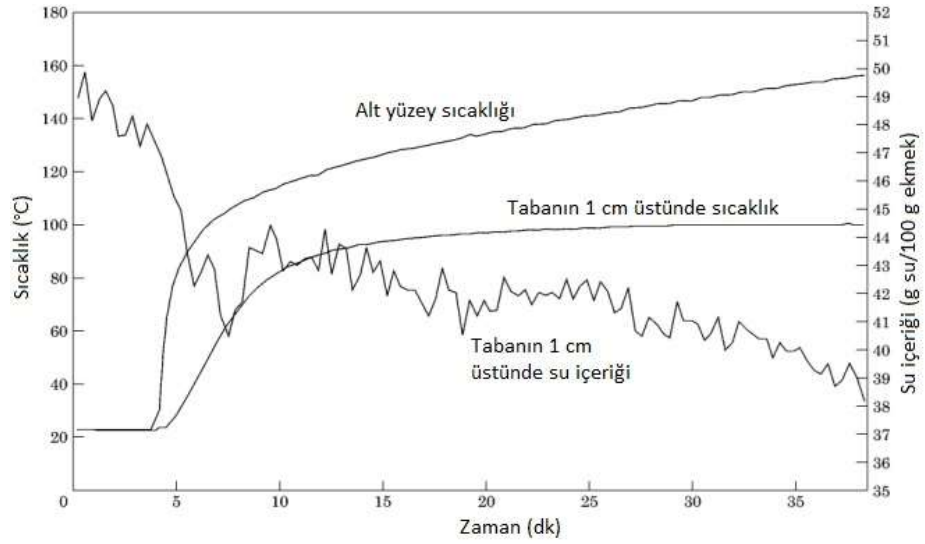
Suyun pişme sırasında ekmek içerisindeki dağılımı, su hareketinin başlangıcı ve yönünü araştıran **Thorvaldsson K., Skjöldebrand C., tarafından 1998 yılında hazırlanmış “Water Diffusion in Bread During Baking” [24]** adlı makale incelenmiştir. Sıcaklık ölçümü için T tipi termalçiftler ve nem ölçümü için fiber optik kullanılmıştır. Ekmeğin içindeki nemin bölge bölge dağılımı, numuneye zarar vermeden incelenmiştir.



Şekil 3. 23 Ekmek içindeki sıcaklık değişimi [24]

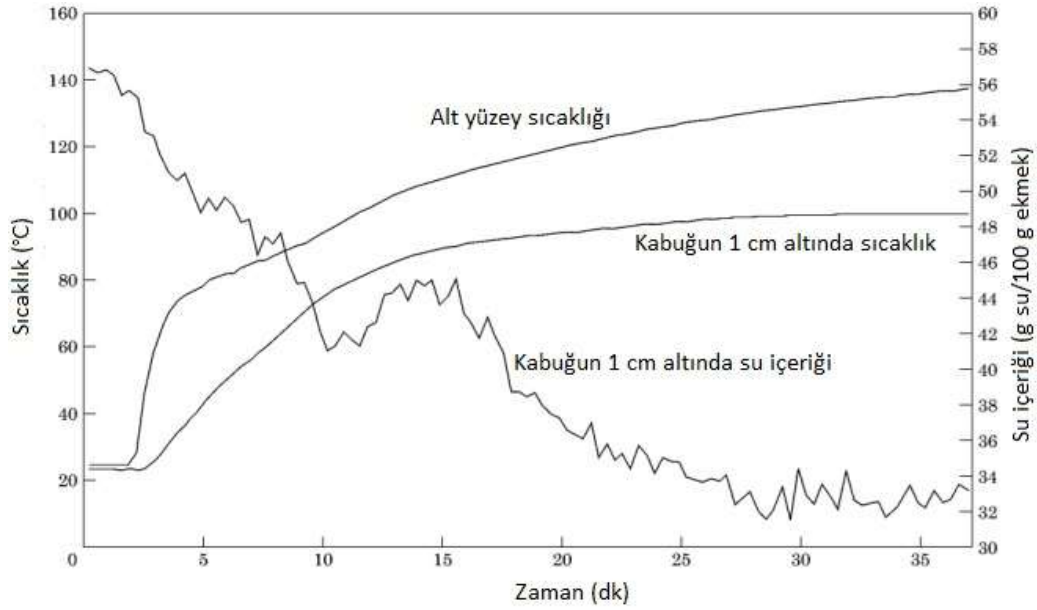


Şekil 3. 24 Ekmeğin merkez ve alt yüzeyinde yapılan ölçümler [24]



Şekil 3. 25 Ekmeğin alt yüzeyine 1 cm mesafede yapılan ölçümler [24]

Şekil 3.23’de üst yüzey (a), alt yüzey (b), yan yüzey (c), alt yüzeyden 10 mm yukarısı (d), alt yüzeyden 68 mm yukarısı (e), merkez yani alt yüzeyden 46 mm yukarısı (f), alt yüzeyden 35 mm yukarısı (g) gösterilmiştir. Toplam yükseklik 90 mm olarak belirtilmiştir.



Şekil 3. 26 Ekmeğin kabuğunun 1 cm altından yapılan ölçümler [24]

Sonuç olarak ekmeğin merkezindeki su yoğunluğu pişirme süresince artış göstermiştir. Buna sebep olarak da yan yüzeylerdeki buharlaşma ve sıcaklık artışı gösterilmiştir. Merkeze doğru harekete geçen suyun, merkez noktanın kısmen daha düşük sıcaklıkta olması sonucu yoğunlaştığı belirtilmiştir. Merkeze doğru olan bu hareketin 70 ± 5 °C’de başladığı gözlemlenmiştir. Burada yapılan yorum, gözeneklilik oluşumu ile beraber ekmeğin iç kısımlarını oluşmaya başladığı yani hamurun ekmeğe dönüşmeye başladığı anın, bu noktanın sıcaklığının 70 ± 5 °C değerine ulaştığı an olduğu belirtilmiştir. Merkezdeki değerleri yansıtan grafiğe bakıldığında zaman 70 ± 5 °C’de başlayan artışın, 100 °C’ye ulaştığı anda durduğu, bunun sebebinin ise sıcaklık gradyanının sıfırlanması olduğu belirtilmiştir [24].

Purlis E., Salvadori V.,O., tarafından 2009 yılında hazırlanmış “Bread Baking as a Moving Boundary Problem. Part 1: Mathematical Modelling” [25] adlı makalede ekmek pişirme için matematiksel model geliştirebilmek adına çalışmalar yapılmıştır. Ekmek pişirme sürecinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler, suyun buharlaşması, gözeneklerin dağılımı, hacmin büyümesi, protein denatürasyonu, jelatinizasyon, kabartma tozu nedeniyle açığa çıkarılan karbondioksit, kabuk yapısı ve kahverengileşme

olarak belirtilmiştir. Yazarların başka makaleleri inceleyerek çıkarmış oldukları proses adımları şunlardır:

- Gözeneklerin sıcak olduğu yerlerde bulunan su, gizli ısı için yeterli gelecek ısıyı çeker ve buharlaşır.
- Su buharı gözeneklerden geçer.
- Gözeneklerin soğuk olduğu yerlerde çektiği gizli ısıyı geri verir.
- Isı ve kütle, iletim ve difüzyon ile aktarılır.

İki farklı pişirme modu tercih edilmiştir. Statik modda ve turbo modda (0.9 m/s) 180, 200, 220 °C sıcaklıkta deneyler gerçekleştirilmiştir. Her 5 saniyede bir ölçüm alınmıştır. Ekmek içindeki ortalama toplam su miktarı, 80 °C sıcaklıktaki bir vakumlu fırına verilmiş olup, kütle değişimi durana dek pişirilmeye devam edilerek bulunmuştur. Kabuk kalınlığı kumpas ile ölçülmüştür. Yapılan deneylerde kaydedilen verilerin ortalaması alınarak ortalama değerler saptanmıştır. Pişirme sırasında kütle kaybı, her beş dakikada bir, tepsi ile birlikte çıkarılan numunenin kütlesinin ölçümü ile saptanmıştır. Her bir test daimi rejimde ikişer defa yapılan ölçümler sonucunda veri olarak yansıtılmıştır. Matematiksel modelleme yapılırken, ekmeğin üç farklı yapı içerdiğinin unutulmaması gerektiği belirtilmiştir:

- İç kısım: Nemli iç bölgedir, sıcaklık 100°C'yi aşmaz ve dehidrasyon gözlenmez.
- Kabuk: Sıcaklığın 100°C'yi aştığı, kuru bölgedir. Dehidrasyon gerçekleşir
- Buharlaşma cephesi: Kabuk ile iç kısım arası bölgedir. 100°C civarında sıcaklık vardır ve su buharlaşır.

Buharlaşma cephesi, hareket eden bir ara yüzey olarak adlandırılmıştır. Buharlaşma cephesinde faz değişiminin meydana geldiği belirtilmiştir. Bütün bu proses hareket eden sınır tabaka (MBP-Moving Boundary Problems) olarak adlandırılır. Buharın kurumuş bölgeden difüzyonu, yukarıdaki ikinci gruba örnektir. Ekmeğin bu sebepten dolayı MBP olarak kabul edileceği bildirilmiştir. Matematiksel olarak bir MBP zamana bağlı problemlerdir. Sınır tabakanın zamana ve yere bağlı fonksiyon olarak belirlenmesi gerektiği söylenmiştir. Makalede tarif edilen MBP formülasyonu temel alınarak, ekmeğin pişirmenin matematiksel formülü çıkarılmıştır. Ara yüzün belirlenmesi için bahsi geçen çıkarımlara herhangi bir deneysel katsayı eklemeye gerek yoktur. Ayrıca ekmekteki

buharlaşma cephesi olarak tarif edilen bölge için herhangi bir ilave koşula ihtiyaç olmadığı söylenmiştir.

Ayrıca, matematiksel modelleme için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Kontrol hacmi homojen ve sürekli. Termofiziksel özelliklere ortamın gözenekli oluşu da eklenmiştir.
- Pişirme boyunca hacim değişimi ihmal edilmiştir. (Yazar daha ileriki bir çalışmasında bu durum üzerine çalışılacağını not dşmştir)
- Yerel termodinamik eşitliklere yer verilmiştir.
- Yüzeyden hacim merkezine doğru, Fourier kuralına uygun olacak biçimde ısı iletimi gerçekleşmektedir. Ancak ısı iletimi buharlaşma-yoğuşma mekanizmasına uygun olarak ele alınmıştır.
- Fırın içi havadan ekmeğe geçen enerji, taşınım ve ışınım ile gerçekleşmiştir.
- İç kısımda sadece sıvının difüzyonu ve kabukta da sadece buhar difüzyonu kabulü yapılmıştır.
- Su, halen sıvı haldeyken, su yoğunluğu gradyanına bağlı olarak merkezden buharlaşma cephesine doğru yol alır. Bu durum Fick kanununa uygun biçimde gerçekleşmiştir.
- Su, 100°C'de buharlaşır.
- Su buharı, kaviteye taşınım ile aktarılmıştır.

Buharlaşma-yoğuşma, gözenekli ortamın karakteristik mekanizması olarak ele alınmıştır. Sıcaklık 100°C'ye ulaşana dek, ortam ister kapalı (hamur) olsun ister açık (i kısım), bu mekanizmanın devam ettiği grlmştir. Ayrıca ekmek pişirme prosesinde gitgide gelişen buharlaşma cephesi varlığı, gelişmekte olan ara yüz, dış kabuğu oluşturmuştur. Yapısal özelliği gereği su buharının ekmekten fırın kavitesine geçişine engel olan kabuk, iç kısmı dehidrasyondan korumuştur.

Son olarak bu çalışmadaki matematiksel modellemenin bisküvi, kek ya da başka ekmek tipleri gibi çeşitli fırıncılık uygulamalarında kullanılabileceği belirtilmiştir [25].

Yine **Purlis E., Salvadori V.,O., tarafından 2009 yılında hazırlanmış “Bread Baking as a Moving Boundary Problem. Part 2: Model Validation and Numerical Simulation” [26]** adlı makalede eşdeğer termofiziksel özellik ve gelişen buharlaşma cephesi içeren,

hareket eden sınır tabaka (MBP-Moving Boundary Problems) probleminin matematiksel modelinin formüle edilişi, buharlaşma-yoğuşma mekanizması ve kabuk oluşumu ile doğrudan ilişkili olduğuna tekrar değinilmiş olup, geliştirilen model ile üç boyutlu düzensiz bir geometriye sahip cismin sıcaklık ve nem kaybı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bu makale, bir önceki makalenin devamı niteliğindedir. Çözümlemeler, bir önceki makalede oluşturulan matematiksel modelleme etrafında gerçekleştirilmiştir. İkincil bir amaç olarak da gelişen sınır tabaka formülleri, parametrelerin tahmin ediliş aşaması ve hassaslık analizi termofiziksel özelliklere bağlı olarak çözülmüştür. Eşdeğer öz ısının sıcaklık, su ve buharın bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Bonacina ve arkadaşları tarafından yazılan bir makale ile Zanoni ve arkadaşları tarafından yazılan bir başka makalede bulunan ifadelerden faydalandığı belirtilmiştir. Faz değişimi sıcaklığına entalpi sıçraması (enthalpy jump) adı verilmiştir. Öz ısı aşağıdaki gibi hesaplanmış olup; alt indislerden s katı (veya yüzey), w ise suyu belirtmektedir:

$$C_p(T, W) = C'_p(T, W) + \lambda W \eta \quad (3.36)$$

$$C'_p(T, W) = C_{p,s}(T) + W C_{p,w}(T) \quad (3.37)$$

$$C_{p,w} = (5,207 - 73,17 \times 10^{-4} T + 1,35 \times 10^{-5} T^2) 1000 \quad (3.38)$$

Kabuk yapısına bağlı olmakla birlikte, su buharının hava içerisindeki difüzyonunu tarif eden bir tanım olarak denilen, f_{kabuk} yani kabuk formasyon faktörü denilen bir parametreden bahsedilmiştir. Bu faktör, ekmek içindeki suyun kaviteye difüze olmasını sınırlayan kabuğun yapısındaki çarpıklık ile ilişkilendirilmiştir. Deneysel sonuçlar ile nümerik çalışmanın sonucunun uyuşması için kabuk formasyon faktörü 0.0013 alınmıştır. Su aktivitesi, belirli bir sıcaklıktaki su buharının basıncı ile saf suyun aynı sıcaklıktaki buhar basıncının su yoğunluğuna kıyaslanması olarak tanımlanmıştır. Su aktivitesi değerinin, bilinmesi gereken önemli parametrelerden biri olduğu belirtilmiştir. Çünkü gıda yüzeyi ile gıdanın bulunduğu ortam arasında gerçekleşen kütle transferini tetikleyen kuvvetin değeri, a_w ile belirlenir. Makalede Oswin adı verilen yöntem kullanılmıştır. Bunun için Lind ve Rask ile Zhang ve Datta'nın makalelerinden alıntılar yapılmıştır.

$$\alpha_w(T, W) = \left[\left(\frac{100W}{\exp(-0,0056T+5,5))} \right)^{\frac{-1}{0,38}} + 1 \right]^{-1} \quad (3.39)$$

Ayrıca Perry ve Green'in arkadaşlarının makalelerine atıfta bulunularak Nusselts sayısının değeri bulunmuştur. Bu değerler, ekmeğin silindir olduğu kabulü ve ortalama yükseklik değeri ile bulunmuştur.

$$Nu = 0,53(GrPr)^{1/4} \quad (3.40)$$

$$Nu = 0,683Re^{0,466}Pr^{1/3} \quad (3.41)$$

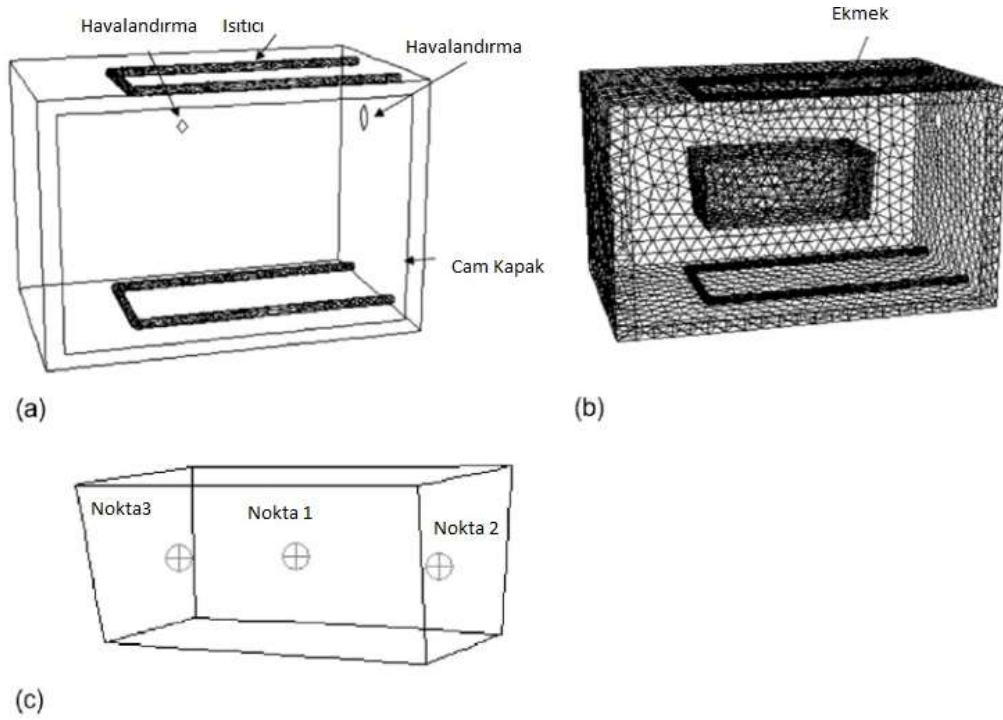
Kütle transferi ilk olarak Chilton-Colburn benzeşimi ile ortaya atılmıştır. Isı transfer katsayısı ve fırın havası özellikleri kullanılmıştır.

$$\frac{h}{k_g^*} = \frac{M_{air}}{M_w} P_{atm} C_{p,air} \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (3.42)$$

Ancak bu denklemden yola çıkılarak yapılmış olan nümerik hesaplar ile deneysel veriler arasında uyumsuzluk görülmüştür. Nümerik sonuçlarda su kaybı değeri daha fazla çıkmıştır. Sebep olarak gitgide kalınlığı artan kabuğun kütle transferini azaltıcı etki oluşturmasını, bahsi geçen ısı-kütle transferi korelasyonunun tam olarak karşılayamamasıdır. Buna çözüm olarak, deneylerde elde edilmiş olan kütle kaybı verilerinden yola çıkılarak, düzeltilmiş kütle transfer katsayısı saptanmıştır. Bu katsayılar sırasıyla 180°C, 200°C ve 220°C'de yapılmış deneylerde bulunmuş katsayılardan yola çıkılarak elde edilmiştir [26].

Ekmek pişirme prosesinin 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizini yapan ve üç farklı ısıtım metodunu inceleyen **Chhanwal N., Anishaparvin A., Indrani D., Raghavarao K.S.M.S., Anandharamakrishnan C.,** tarafından 2010 yılında hazırlanmış “**Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of an Electrical Heating Oven for Bread-Baking Process**” [27] adlı makale incelenmiştir. DTRM yönteminin temel yaklaşımı, yüzeyden ayrılan ve açısı değeri belirli bir aralık içerisinde olan her bir ışının tek bir ışınmış gibi hesaplanması olarak açıklanmıştır. DTRM yönteminde akışkanın içindeki ışıma bağlı enerji kaynağı, akışkanın kontrol hacminde yer alan her bir ışının yoğunluk değişiminden yola çıkılarak hesaplanır. S2S (surface to surface) yönteminde ise sadece yüzeyden yüzeye ısıtım hesaplanırken, absorpsiyon, emisyon ve saçınım ihmal edilmiştir. Doğrudan yayılan ve yansıyan ışının, kaybedilen enerji akısı olduğu

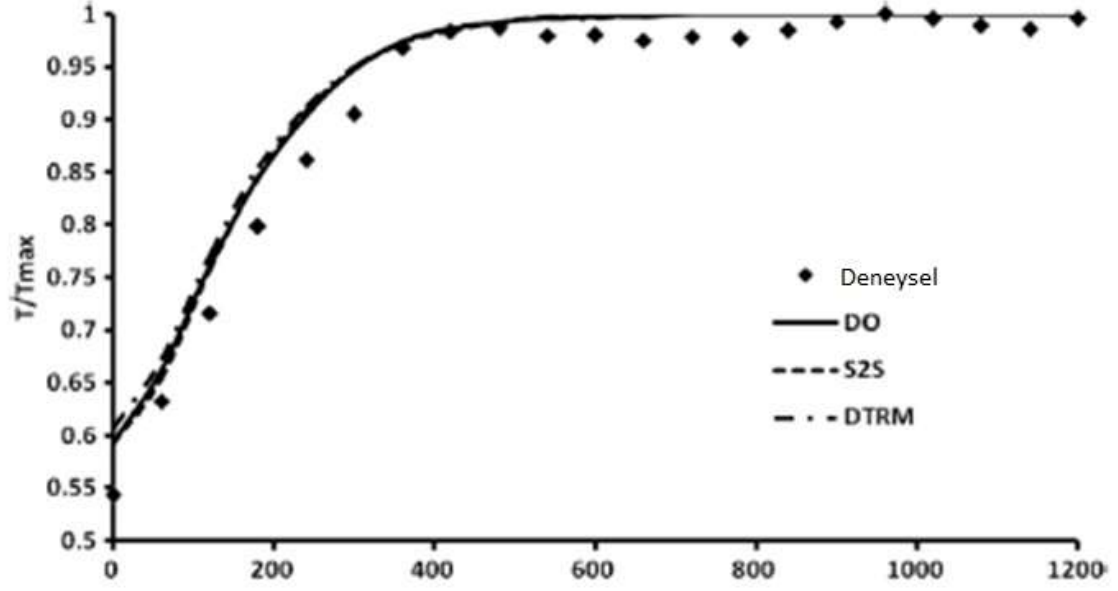
belirtilmiştir. DO (Discrete Ordinate) ise S2S yöntemine ek olarak ortamdaki akışkanı (havayı) ve yarı saydam duvarlarda ışınmı da hesaplayabilen bir ısıtım modelidir. Isı kaynağının bir bölgeye sabitlendiği problem tiplerinde makul olmakla birlikte, daha az bilgisayar performansı gerektirdiği belirtilmiştir.



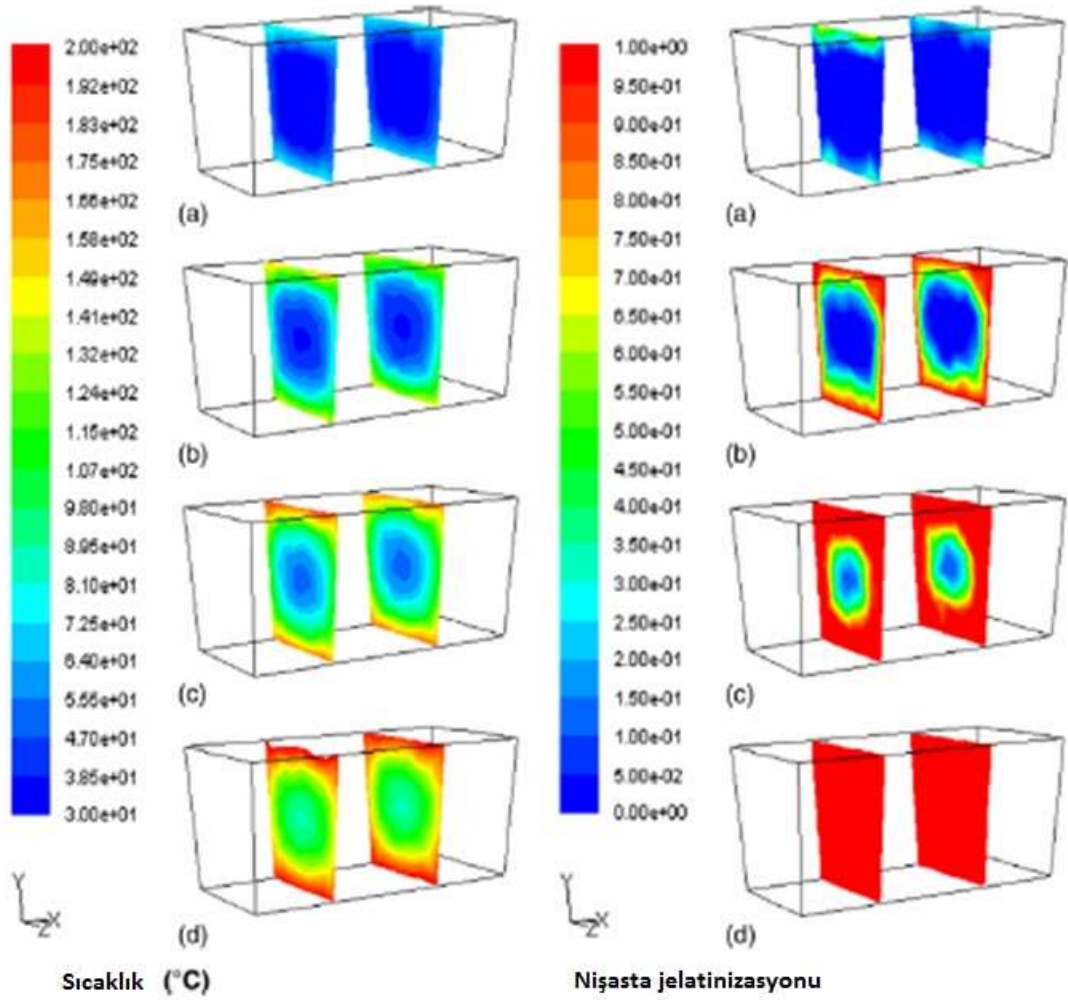
Şekil 3. 27 Fırın geometrisi [27]

Şekil 3.27’de fırının içi boşken (a), içinde ekmek varken çözüm ağı oluşturulmuş hali (b) ve ölçüm yapılan noktalar (c) gösterilmiştir. Analizlerde; iletim, taşınım ve ışınmı ile ısı transferi gerçekleştirilmiştir. Isıtıcılar ısı kaynağı olarak tanıtılmıştır. Fırının cam kapağı ve duvarlarından, taşınım ve ışınmı ile ısı transferi gerçekleştiği kabul edilmiştir. Yiyecek içindeki sıcaklık ve su miktarından etkilenen jelatinizasyonun, tanecikli yapıda yapısal bütünlüğü etkileyen hidrojen bağlarının parçalanmasında doğrudan etkili olduğu belirtilmiştir. Farklı makalelerden yapılan alıntılarda, jelatinizasyonun zamana ve sıcaklığa bağlı olduğu belirtilmiştir. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların iyi uyum sağladığı gözlemlenmiştir.

Şekil 3.28’de a ile 60. saniye, b ile 300. saniye, c ile 600. saniye, d ile 900. saniye sonunda elde edilen veriler gösterilmiştir. Sonuç olarak en uygun simülasyonun DO yöntemi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. 28 Farklı ısıtım modellerinin karşılaştırılması [27]



Şekil 3. 29 Sıcaklık dağılımı ve nişasta jelaletinizasyonunu [27]

Elektrikli fırında ekmek pişirme prosesinde sıcaklık, kahverengileşme ve buharlaşma-yoğuşma mekanizması ve gizli ısı bir arada inceleyen **Chhanwal N., Indrani D., Raghavarao K.S.M.S., Anandharamakrishnan C.,** tarafından 2011 yılında hazırlanmış **“Computational Fluid Dynamics Modeling of Bread Baking Process” [28]** adlı makale incelenmiştir. Sıcaklık ölçümü için T tipi termalçiftler ve nem ölçümü için fiber optik kullanılmıştır. Ekmeğin içindeki nemin bölge bölge dağılımı, numuneye zarar vermeden incelenmiştir. Sıcaklık ölçümleri T tipi termalçiftler ile ölçülmüştür. Termalçiftler kek hacminin ortasına, ortasından itibaren sağ tarafa (6.5 cm) ve kekin merkezinden itibaren yukarıya yerleştirilmiştir (4 cm). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi için toplam hücre sayısının 1,23 milyon adet olduğu belirtilmiştir. DO (discrete ordinate) yöntemi ile problem çözdürülmüştür. Yazarların incelemiş oldukları makalelere göre buharlaşma ve yoğuşmanın ele alınması yerine sadece buharlaşma incelendiğinde, deneysel sonuçlara kıyasla simülasyonda daha yüksek iç kısım sıcaklık değerlerinin elde edilmiş olduğu belirtilmiştir. Sıcaklığa bağlı değişen öz ısı ve sabit nem miktarı kabulü yapılmıştır.

$$C_p = (0,0137T^2 - 0,217T + 4179)X_w + (5T + 1390)(1 - X_w) + \lambda(T - T_F, \nabla T) \quad (3.43)$$

Sıcaklığın 100°C'den küçük ya da büyük olmasına göre sırasıyla,

$$k(T) = \frac{0,9}{1 + \exp(-0,1(t + 353,16))} + 0,2 \quad (3.44)$$

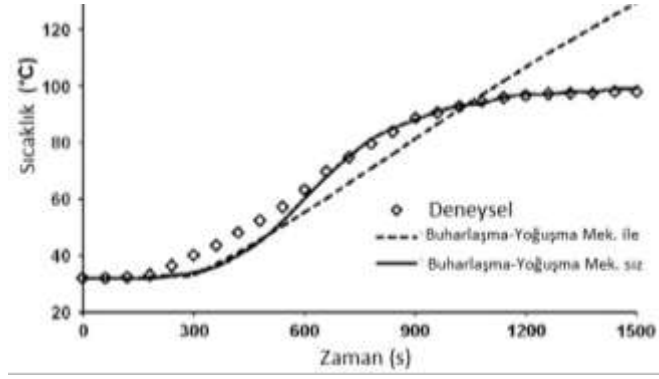
$$k(T) = 0,2 \quad (3.45)$$

Değerlerini aldığı belirtilmiştir. Kahverengileşme indisi de hesaplanmıştır. Tf faz değişim sıcaklığıdır. ∇T , incelenen sıcaklık değeri ile faz değişim sıcaklığı arasındaki farktır.

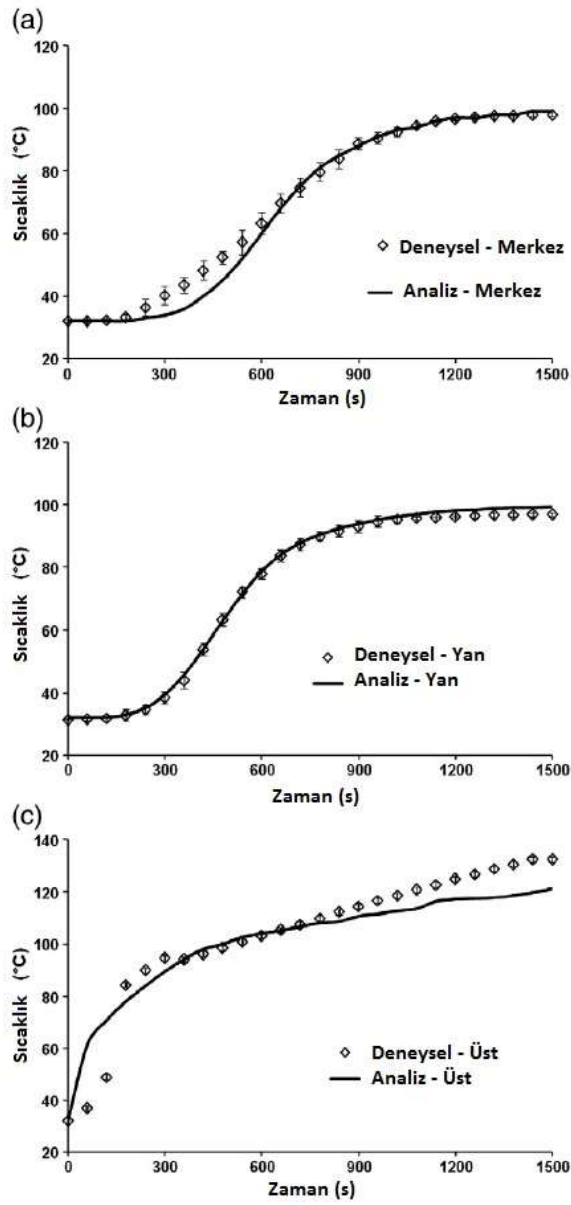
$$\Delta E_\infty - \Delta E_t = (\Delta E_\infty - \Delta E_t) \exp(-k_b \Delta t) \quad (3.46)$$

$$k_b = k_{b0} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.47)$$

k_{b0} , E_a ve ΔE_∞ değerleri makalede verilmiştir. ΔE_∞ asimptotik kahverengileşme değeri, ΔE_t ise t anındaki kahverengileşme indisi [28].

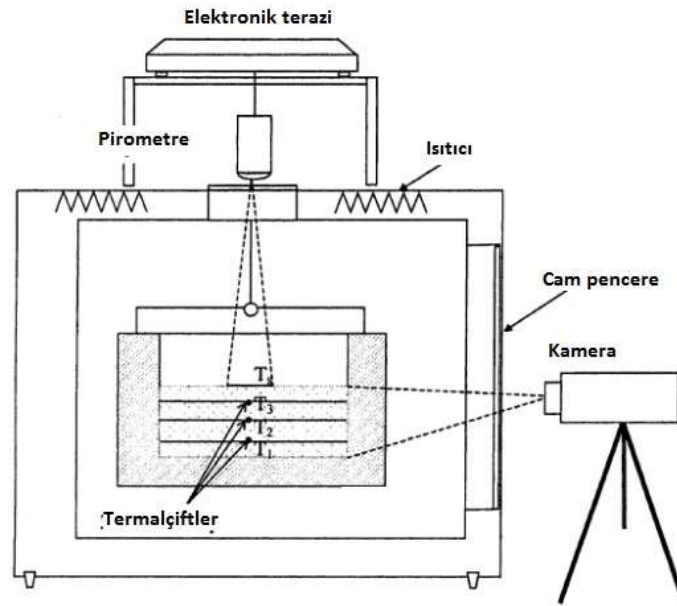


Şekil 3. 30 Buharlaşma-yoğuşma mekanizmasının dahil edildiği ve dahil edilmediği simülasyon ile deneysel veriler [28]



Şekil 3. 31 Analiz ve deneyde elde edilen veriler [28]

Pandispanyanın pişirilmesini inceleyen **Lostie M., Peczalski R., Andrieu J., Laurent M., tarafından 2002 yılında hazırlanmış “Study of Sponge Cake Batter Baking Process. Part I: Experimental Data” [29]** adlı makale incelenmiştir. Üç adet termalçift, izotermal plakalar ve kek kalıbı duvarında geçirilerek, tabandan itibaren 1, 2 ve 3 cm yukarıya doğru yerleştirilmiştir. Kek yüzeyi, yuvası çinko-selenyum malzemedan yapılmış pirometre ile ölçülmüştür. Yüzey emisivitesinin (ϵ) 1'e eşit olması için yüzey ince siyah (karbon) bir tabaka ile kaplanmıştır. Kalibrasyon amacıyla, üzeri fırın içi kaplama malzemesi ile kaplanmış olan bakır blok ile gerçekleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü biçimde yerleştirilmiş elektronik terazi ile kütle kaybı ölçülmüştür. Video kamera ile kek hacmi değişimi incelenmiştir.



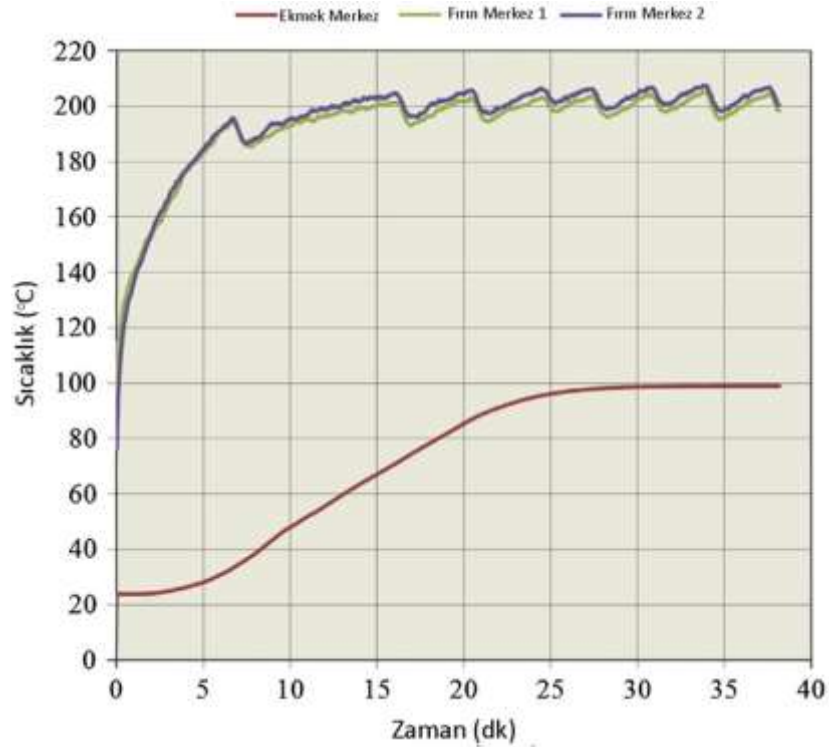
Şekil 3. 32 Deney Düzeneği [29]

Keklerin su aktivitesi cihaz yardımı ile ölçülmüşken, nem miktarları başlangıç anı ile keklerin kurutulması (4 saat-120 °C) sonucu elde edilen veriler doğrultusunda ölçülmüştür. Tekstür analizi yapılırken, kimyasal hazırlık sonrası çok ince dilimlenmiş numuneler, Schiff ayracı ile renklendirilmiştir. Plakalar üzerine yerleştirilmiş numuneler, siyah-beyaz çekim yapan kamera ile incelenmiştir. Çekilen fotoğraflar, bir görüntü işleme yazılımı ile (OPTIMAS) analiz edilmiştir. Gözeneklilik boyutu ve dağılımı, özgül yüzey ve gaz geçirgenliği Kozeny model ile incelenmiştir. Su aktivitesi değerleri, Halsey modeli ile uyumluluk göstermiştir. Halsey modeli aşağıda verilmiştir:

$$a_w = \exp\left(-\frac{B}{(100X)^c}\right) \quad (3.48)$$

Sıcaklık ve nem değişimi incelenirken, pişirmenin iki kademeli olduğu belirlenmiştir. Pişirmenin ilk 10000 saniyesinde sıcaklık sürekli artmış olup, aslında sıcaklık 100°C'ye yaklaştıkça, sıcaklık gradyanı azalma göstermektedir. İkinci aşamada yani 10000 saniyeden sonra ise yüzey sıcaklığı artmaya devam ederken, merkez bölgede sıcaklık değerleri neredeyse sabittir. Kısa bir süre için önce bir miktar azalma, ardından artış gözlemlenmiştir. Nem değişiminde de benzer durum söz konusudur. İlk 10000 saniye ilk periyottur. Nem azalış hızı giderek artmaktadır. 10000. saniyeden sonra kabuk oluşumu başladığı için nem kaybı hızı gitgide azalmaktadır. DMTA yöntemi ile (Dynamic Mechanical Thermal Analysis) yapının sertliği incelenmiştir. Yapının sertliğinin, hacimsel artışın durması ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Kek yüksekliği, sıcaklık 90°C'ye geldiğinde durmuş olur [29].

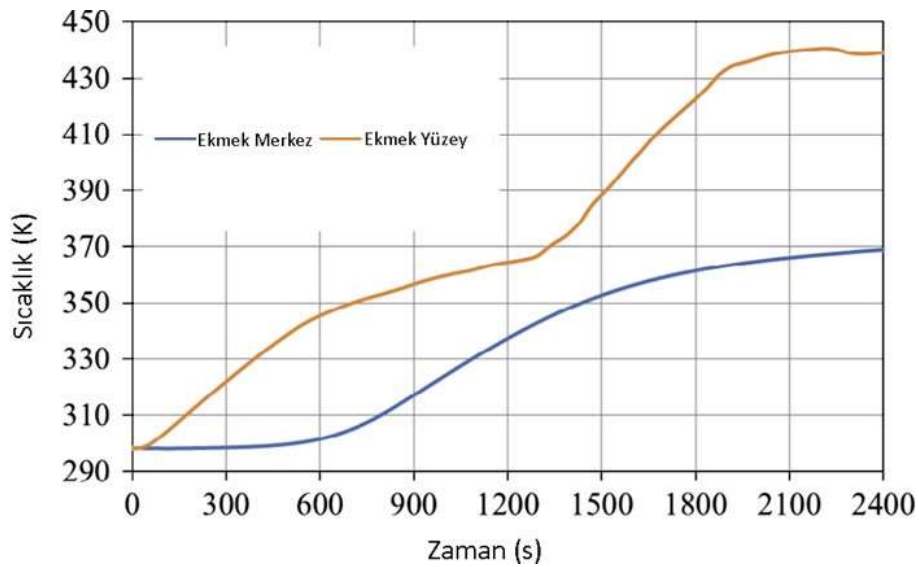
Ekmek pişirme esnasındaki ısı transferi ve kütle transferini inceleyen **Papasidero D., Manenti F., Pierucci S.,** tarafından 2015 yılında hazırlanmış “**Bread baking modeling: Coupling heat transfer and weight loss by the introduction of an explicit vaporization term**” [30] adlı makale incelenmiştir.



Şekil 3. 33 Ekmek pişirme süresince ekmek merkez ve fırın merkez sıcaklıkları [30]

Ekmek pişirme sürecince meydana gelen ısı transferi, kütle transferi ve buharlaşmanın incelenmesi için bir test düzeneği oluşturulmuştur. Deneyler 200°C'ye ayarlanmış bir ticari fırında gerçekleştirilmiştir. Pişirmeler zorlanmış taşınımın olduğu ($v=2$ m/s) durumda yaklaşık 40 dakikada gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneylerde ekmek merkez sıcaklığının pişirme sonuna kadar 100°C'ye kadar yükseldiği ancak bu sıcaklığın üstüne çıkmadığı görülmüştür. Ekmeğin yüzeyinde yapılan sıcaklık ölçümünde, sıcaklığın 100°C'ye kadar yavaşça çıktığı, sonrasında yüzeydeki kurumaya bağlı olarak sıcaklığın hızlıca artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3. 34 Ekmek pişirme süresince ekmek merkez ve üst yüzey sıcaklıkları [30]

3.4 Kimyasal Reaksiyonlar

Pişirme sırasında gerçekleşen kabarmanın nedenleri ve kabarmanın etkileri üzerine çalışan **Deshlahra P., Anurag M., Ghosal D., tarafından 2009 yılında hazırlanmış “ Evolution of Bubble Size Distribution in Baked Foods” [31]** adlı makale incelenmiştir. Fırın içerisindeki hamur ısıtmaya başlandığında, hamur sıcaklığının artmaya başladığı belirtilmiştir. Hamur içerisinde bulunan kabartma tozu ve asitlerin reaksiyonları sonucunda CO₂ oluştuğu belirtilmiştir. Hamurdaki aşırı CO₂ doygunluğu sonucunda, çekirdeklenme ve oluşan balonların büyümesi gözlemlenmiştir. Zamanla, kabartma tozunun azalmasına bağlı olarak büyümenin yavaşladığı ve sonunda durduğu belirtilmiştir. Çalışmada su buharının kabarmaya etkisi ele alınmamıştır. Kabartma tozunun etkisinin, su buharına kıyasla daha dominant olduğu kabul edilerek model oluşturulmuştur. Yani modelleme sırasında kabarmanın sadece CO₂ gazına bağlı olduğu

düşünülmüştür. CO₂ gazının ideal olduğu ve hamuru terk etmediği kabul edilmiştir. Kalıp içerisinde basıncın sabit olduğu ve bu basınç değerinin atmosferik basınca eşit olduğu belirtilmiştir. Hamurun viskoelastik özelliğine bağlı olarak, içeri sıkışan CO₂'in basıncının artışı ihmal edilmiştir. Ayrıca oluşan balonların patlamadığı ya da bütünleşmedikleri kabul edilmiş olup, gerçekte bu durumun sadece pişirmenin başlangıç aşamasına özgü olduğu belirtilmiştir. Sıcaklığın zamanla değiştiği ve pişirme işleminin silindirik koordinatlarda gerçekleştiği kabul edilmiştir. Ayrıca, hamurun gaz çıkışının ihmal edilmesi kaydıyla kütle transfer katsayısı, balon içerisine giren CO₂'nin debisi ve reaksiyon sabitinin hesaplanması hakkında bilgi verilmiştir.

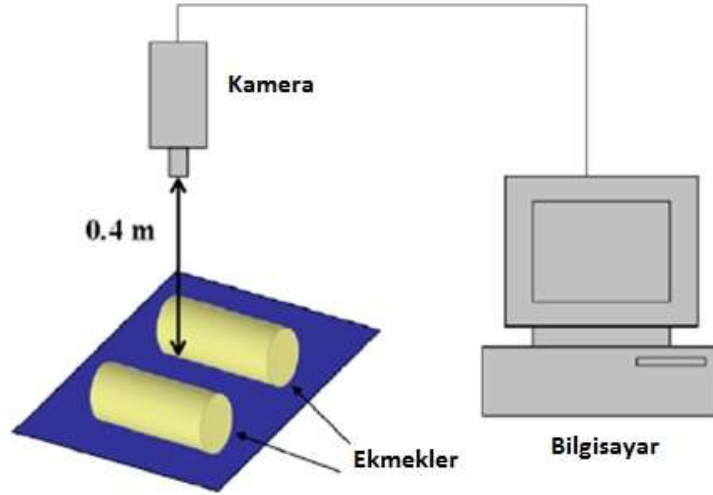
Pişirme sırasında ekmekteki renk değişimini inceleyen **Purlis E., Salvadori V.O., tarafından 2007 yılında hazırlanmış “Bread Browning Kinetics During Baking” [11]** adlı makale incelenmiştir. Altın sarısı renk oluşumu kahverengileşme olarak ifade edilmiştir. Bu dönüşümde karamelizasyonun ve Maillard reaksiyonunun önemi üzerinde durulmuştur. Maillard reaksiyonu için protein, şeker ve bir miktar su olması gerektiği belirtilmiştir. Maillard reaksiyonunun sıcaklığa, neme, pH'a, metalik katyonların varlığına ve şekerin yapısına bağlı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, pişirme boyunca renk değişimi ve kütle kaybı incelenmiştir. Çalışmalar sırasında pişirme işlemi doğal ve zorlanmış (0.3 m/s) taşınım ile gerçekleştirilmiştir. Pişirme sıcaklıkları 180, 200 ve 220 °C olarak belirtilmiştir. Sıcaklık ölçümü için T tipi termalçiftler kullanılmıştır.

Kütle kaybını incelemek için numuneler beş dakikada bir tepsi ile birlikte fırından çıkarılarak tartılmıştır. İlk kütle referans alınarak, kaybedilen kütlenin yüzdelik değerine bakılmıştır. m_0 ile ilk kütle, m_t ile t anındaki kütle referans alınmıştır.

$$W_L(\%) = \left(\frac{m_0 - m_t}{m_0} \right) \quad (3.49)$$

Yüzeydeki kahverengileşme, kameradan görüntü alınarak takip edilmiştir. Bu yöntem düşük maliyetlidir ve pratiktir. Bu sistem için bir adet dijital kamera ve bir adet bilgisayar kullanılmıştır. Ekmek yüzeyinin aydınlatılmasında doğal ışık koşullarından faydalanılmıştır. Kamera, numuneye 0.4 m mesafeden, dik bir açı ile konumlandırılmıştır. Görüntüler, kütlenin ölçümü sırasında alınmaktadır. Kamera, tartının hemen üzerine bakacak biçimde yerleştirilmiştir. Görüntülerin 640x480 piksellik çözünürlüğe sahip olduğu belirtilmiştir. Görüntülerde sadece ekmeklerin yüzeyi incelenmiştir. Kaydedilen

ekmek yüzeyi üzerinden bir dikdörtgen parçası seçilmiştir ve inceleme gerçekleştirilmiştir. Görüntülerin işlenmesi için Matlab 6.5'te algoritma geliştirilmiştir. Kahverengileşme süreci CIE L*a*b renk modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ekmek yüzeyinin rengi ölçülmeden önce sistem kalibre edilmiştir. Bunun için Konica Minolta renk ölçüm cihazı ve kalibrasyon plakaları kullanılmıştır. Böylece kamera parametreleri ayarlanmıştır. Kalibrasyon işlemi her bir deneyden önce gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 35 Renk değerlerinin ve kütle değişiminin ölçüldüğü deney düzeneği [11]

Pişirme boyunca ekmek kabuğundaki renk değişimi matematiksel olarak modellenmiştir. E^* , yani toplam renk değişimi ve kütle kaybı (WL) arasında aşağıdaki ilişki kurulmuştur:

$$E^* = k(WL) \quad (3.50)$$

Burada kahverengileşme oranı olarak adlandırılan ve fırın sıcaklığına bağlı k değeri için aşağıdaki matematiksel ifadeye yer verilmiştir:

$$k = k_0 T_{fırın} + k_1 \quad (3.51)$$

Deneylerde elde edilen verilerin bir bölümü modelde yer alan parametreleri bulmak için, diğer bölümü ise bulunan değerleri doğrulamak için kullanılmıştır. Hata oranı tespit edilmiştir. DeneySEL veriler ve hesaplanan değerler arasında uyum gözlemlenmiştir. Ancak kütle kaybının düşük değere sahip olduğu noktalarda hata oranı yükselmiştir. Kahverengileşmenin birinci basamağında yani bekleme evresinde non-lineerlik olması

bu duruma sebep olarak gösterilmiştir. Renkte koyulaşmanın başlamasından hemen önce kahverengileşme sıcaklığının başladığı belirtilmiştir.

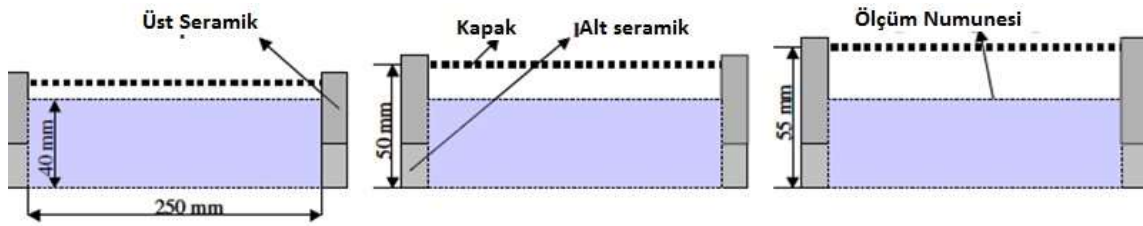
Deneylerde, sadece tek ölçümde pek çok renk değeri alınmıştır. Alınan görüntülerde elde edilen L değeri, 21060 piksel üzerinden hesaplanmıştır. Bu yöntem sayesinde klasik kalorimetre tekniğine kıyasla, numuneleri bilgisayar ile incelemenin pratik olduğu belirtilmiştir. Doğal taşınımına kıyasla, zorlanmış taşınımında renk değişimi daha belirgin olmuştur. Buna sebebi olarak ekmek yüzeyinin daha hızlı pişmesi gösterilmiştir.

Fırın sıcaklığı ve taşınımından bağımsız olarak, aydınlık değeri için iki basamağın söz konusu olabileceğinin altı çizilmiştir. İlk dakikalarda, hamurun fırına yerleştirilmeden önceki haline kıyasla daha açık renge sahip olduğu incelenmiştir. Makale yazarlarının yapmış oldukları literatür çalışmalarında, renk açılmasının yüzeydeki kuruma veya ilk anki hacim değişimi ile ilişkilendirildiği makalelere rastlanmıştır. Yorumların numune yüzeyindeki fiziksel değişime bağlı olarak yapıldığı düşünülmüştür. Denemelerde ekmek yüzeyinin buruştuğu gözlemlenmiştir. Ancak pişirme birkaç dakika daha devam ettiğinde hamur yüzeyinin düzgünleştiği gözlemlenmiştir. Yüzey tekstüründeki bu değişim başlangıç aydınlanması olarak tanımlanmıştır. Parlak ve düzgün bir yüzeyin buruşuk bir yüzeye kıyasla daha fazla yansıtma kabiliyetine sahip olduğu belirtilmiştir.

İkinci basamak olarak Maillard ve karamelizasyon reaksiyonlarına bağlı olarak rengin koyulaşması gösterilmiştir. Esas olarak ekmek yüzeyindeki HMF'nin (hidroksimetilfurfural) kahverengileşmede önemli olduğu belirtilmiştir. Pişirme süresi ile HMF arasında ekmekler için eksponansiyel bir ilişki varken, kurabiyelerde birinci dereceden ilişki olduğu belirtilmiştir. Yine yazarların yaptığı literatür araştırmalarına göre pişirme işlemi sonundaki aydınlık değeri ile yanmış numuneye ait aydınlık değeri arasında asimptotik bir ilişki söz konusu olmuştur [11].

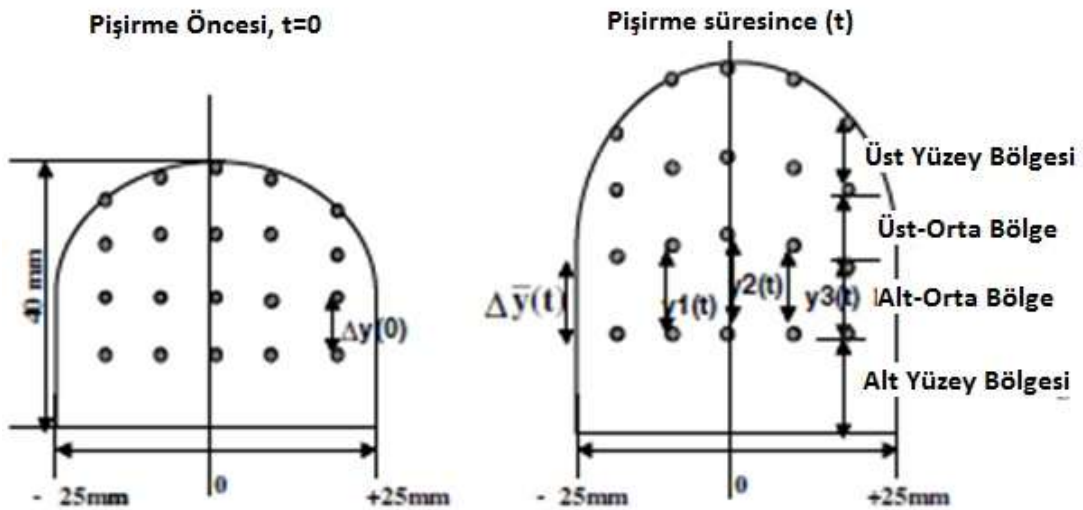
Kabuk sertliğinin ve CO₂ çıkışının, pişirme sırasında ekmeğin yükselişine olan etkisini inceleyen **Zhang L., Lucas T., Doursat C., Flick D., Wagner M., tarafından 2007 yılında hazırlanmış “Effects of Crust Constraints on Bread Baking Expansion and CO₂ Release” [32]** adlı makale incelenmiştir. MRI (Magnetic Resonance Imaging) görüntüleri ile kabuğun gözenekliliğindeki değişim ve kızılötesi dedektörler ile CO₂ çıkışı incelenmiştir. CO₂ çıkışının kabuk oluşumundaki önemi üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Hamur, 182 °C pişirme sıcaklığında, 3 m/s ortalama hızda 45 dakika pişirilmiştir. Bir boyutlu modelleme yapılmıştır. Bu sebeple deneylerde numunelerin kalıplarının yanıl alanları izole edilmiştir. Ayrıca farklı yüksekliklerdeki kalıpların üst kısımları kapatılmıştır. Böylece son yükseklik kontrol altında olmuştur ve her numuneye yükselmeye karşı farklı dirençler oluşturulmuştur. Numuneler hiçbir engel olmadığında 60 ± 2 mm'ye kadar kabarmıştıdır. Kalıpların üst kısımlarındaki engelin, gaz geçişine müsaade ettiğı belirtilmiştir. Bahsi geçen engelin, kalıp yüksekliğı dışındaki faktörlere minimum derecede etki ettiğı belirtilmiştir. Bu koşulları sağlayacak malzemenin bir cam elyaf çeşidi olduğı belirtilmiştir.



Şekil 3. 36 45, 50 ve 55 mm yüksekliklerde üstü kapatılmış pişirme kalıplarının yandan görünümü [32]

MRI tekniğine ait görüntüler alınırken, ayırt edilebilir sinyaller elde edebilmek için yağ mikrokapsülleri kullanılmıştır. Bu kapsüller belirli bir düzende yerleştirilmeye çalışılmıştır. Pişirme boyunca mikrokapsüllerin konumlarının değıştiğı belirtilmiştir.



Şekil 3. 37 Mikrokapsüllerin hamurdaki dağılımı ve gözenekliliğın hesaplanması [32]

ImageJ adlı programın yardımıyla MRI tekniği ile elde edilen verilerden yola çıkılarak, gözeneklilik incelenmiştir. Mikrokapsüller arası boşluğun deneyden deneye farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Fırındaki CO₂ konsantrasyonu (ppm/hacim), kızılötesi dedektör ve çoklu gaz analizörü ile ölçülmüştür. Ardından, fırın içine gelen havanın değişimi de hesaba katılarak, numuneden çıkan konsantrasyon $C_{release}^{CO_2}$ ile gösterilmiştir. ρ_{CO_2} ile CO₂'nin 455K'deki yoğunluğu (1.79g/L), V_{oven} ile fırın hacmi, S_{exch} ile CO₂ salınımının gerçekleştiği yüzey alanı değeri verilmiştir.

$$m_{CO_2} = \frac{C_{release}^{CO_2} V_{oven} \rho_{CO_2}}{S_{exch}} \quad (3.52)$$

Model oluşturulurken, hamurdan ekmeğin iç kısmının oluşumuna geçişte Darcy kuralı göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca model oluşturulurken hamurun dış yüzeyinin kurumaya ve sertleşmeye başladığı bir T_n sıcaklık noktası belirlenmiştir. Bu nokta nişasta jelatinizasyonu ve protein koagülasyonuna bağlı kabul edilmiştir. Hamurdaki kabarmanın durma noktasına, dış basınç ile pişirme sırasında hamur içindeki basıncın farkının da etki ettiği belirtilmiştir. Sıcaklık artışı ile birlikte oluşan nişasta jelatinizasyonu, hamur viskozitesinin artırmıştır. Bu durumda direnç kuvveti de artmıştır. Üstte bulunan kabuğun rijitleşmesi sonucu, kabuk yeterince baskı gösterebildiği an kabarma durmuştur. Bu denge aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmiştir:

$$P_{tot} - \sigma = P_{atm} - f_c \quad (3.53)$$

Balon içindeki toplam basınç P_{tot} ile gösterilmiştir. σ ile viskoz gerilim, f_c ile maksimum yüksekliğin aşılmasına mani olan kuvvet ifade edilmiştir. Son ifade rijitleşmiş kabuk veya deneylerdeki yükselmeyi engelleyen mekanizmanın gösterdiği kuvvettir. Nişasta jelatinizasyonu ve viskozite değişimi doğrultusunda oluşturulmuş olan modelin kabul edilebilir olduğu ancak arkasında daha karmaşık başka biyokimyasal mekanizmaların da olabileceği belirtilmiştir. Sonuçlardaki farklılıkların kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir. Yükseklik sınırı azaltıldıkça, merkezdeki balonların kapalı kaldığı, ancak sıcaklık artışının devam etmesinin ise gaz basıncını daha fazla yükselttiği sonucu çıkarılmıştır. Bu durum Darcy kuralı yardımıyla açıklanmıştır:

$$\dot{m}_{CO_2} = - \frac{X_{CO_2,VAP}}{X_G} \frac{K_g}{v_g} \frac{\partial P_{tot}}{\partial z} \quad (3.54)$$

Denklemden X ile kütle oran, ν ile hamurun kinematik viskozitesi, K ile hamurun veya kabuğun geçirgenliği ifade edilmiştir [32].

Kahverengileşme reaksiyonunun gelişim aşamalarını inceleyen **Purlis E., Salvadori V.O., tarafından 2009 yılında hazırlanmış “Modelling the Browning of Bread During Baking” [33]** adlı makale incelenmiştir. Kahverengileşme reaksiyonunun gelişim aşamalarını incelemek amacıyla numunelerin görüntüleri bilgisayar ile alınmıştır. Bu yöntemin tercih sebebi olarak, renk ölçümü için ekonomik ve otomatik olmasının yanı sıra fırıncılık ürünlerinde kalitenin belirlenmesinde zaten kullanılmakta olması gösterilmiştir. Görüntüler bilgisayar ile alınıyorken numuneye temas etmeye gerek duyulmuyor olması da bu ölçüm yönteminin seçiminde önemli bir kriter olmuştur.

Modelleme sırasında, pişirilen numunenin yüzeyinin sıcaklık değerleri de hesaplara dahil edilmiştir. Buna ek olarak su aktivitesinin renk değişimine olan etkisi de modellemeye dahil edilmiştir. Bilgisayar kullanımı ile görüntü almak için numune yüzeyinden 0.4 m uzaklıkta, numune yüzeyine dik bir açı ile bilgisayara bağlı dijital kamera yerleştirilmiştir. Görüntülerin ideal olmayan ışık altında alındığı belirtilmiştir. Her 5 dakikada bir görüntü alınmıştır. Fırın yanında kurulmuş olan bu düzenek ile görüntü almak her seferinde 5 saniye sürmüştür. Alınan her bir görüntünün 640x480 piksel çözünürlükte ve jpg formatında olduğu belirtilmiştir. Alınan görüntülerden, numune dışında kalan kısımlar atılmıştır. Numunenin alınmış olan görüntüsü üzerinde bir dikdörtgen alan belirlenmiştir ve bu alanın görüntüsü incelenmiştir. Matlab 6.5'te geliştirilen algoritma ile kahverengileşmeye ait renk değerleri hesaplanmıştır. Bilgisayar gelen görüntülerin renk değerleri, RGB renk evreni ile tasvir edilecek cinsten olduğu belirtilmiştir. Bu değerler öncelikle XYZ ardından da L^*a^*b renk evrenine uygun olacak hale getirilmiştir. Renk ölçüm işlemlerinde kalibrasyon amacıyla renk ölçüm cihazı (Minolta CR300) ve kalibrasyon plakaları kullanılmıştır. Bu işlem her bir deneyden önce gerçekleştirilmiştir.

Piştirme için fırın sıcaklıkları olarak 180°C, 200°C, 220°C tercih edilmiştir. Ölçümler için T tipi termalçiftler kullanılmıştır. Sıcaklık-zaman ilişkisi ile renk değişimi arasındaki ilişki, birinci dereceden kahverengileşme reaksiyonu olarak formülize edilmiştir:

$$\frac{dL}{dt} = -kL^* \quad (3.55)$$

Burada L^* ile renk açıklığı, k ile kahverengileşme sabiti temsil edilmiştir. Kahverengileşme sabiti ise, sadece eğriyi uydurmaya yarayan ve fiziksel açıdan hiçbir anlamı olmadığı belirtilmiş olan k_0 ve A parametreleri ile belirtilmiştir:

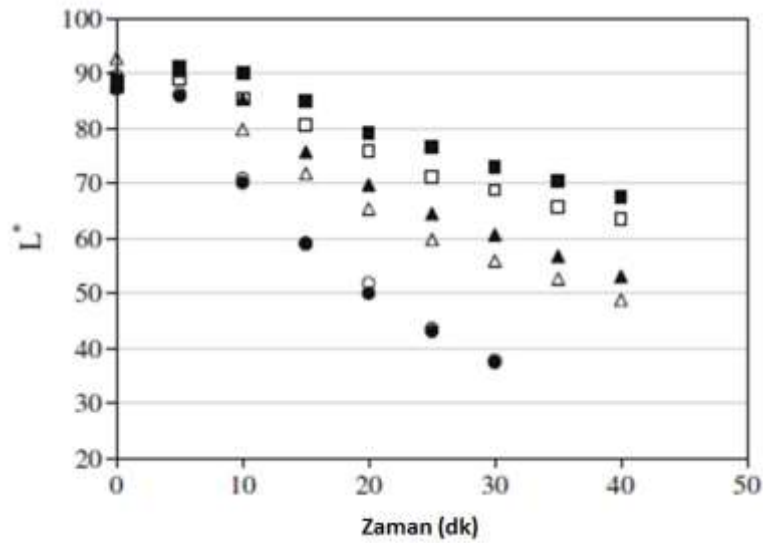
$$k = k_0 \exp\left(-\frac{A}{T(t)}\right) \quad (3.56)$$

Buraya kadar kimyasal bileşenler, kahverengileşmeye dair modellemeye dahil edilmemiştir. Modellemenin buraya kadarki kısmının, Arrhenius denkleminin aktivasyon enerji konsaptine uymaya yeterli gelmeyeceği belirtilmiştir. Su aktivitesinin kahverengileşmeye olan etkisi de eklenmiştir:

$$k_0 = k_1 + \left(\frac{k_2}{a_w(t)}\right) \quad (3.57)$$

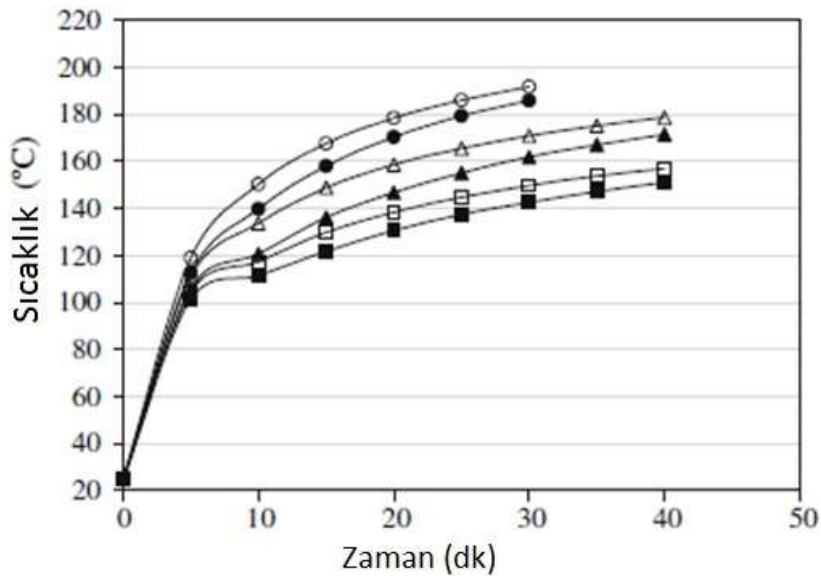
$$A = k_3 + \left(\frac{k_4}{a_w(t)}\right) \quad (3.58)$$

Yüzey sıcaklığını termalçiftler ile ölçmenin ve ekmek halen sıcakken su aktivitesini vakit kaybetmeden doğru biçimde ölçmenin zor olduğu belirtilmiştir. Bu zorluğu aşmak için geçmişte geçerliliği kanıtlanmış ifadelerin kullanıldığı belirtilmiştir. Aşağıdaki şekillerde pişirme süresinin etkisi gösterilmiştir. Kareler ile 180°C, üçgenler ile 200°C, daireler ile 220°C pişirme sıcaklıkları sembolize edilmiştir. Sembollerin içinin boş olması zorlanmış taşınım, dolu olmasıyla doğal taşınım ile pişirme temsil edilmiştir.



Şekil 3. 38 Pişirme süresine bağlı olarak renk açıklığının değişimi [33]

Piştirme sırasında yüzey açıklılık değeriine ait iki evreden bahsedilmiştir. İlk evrede hamur rengi açılmıştır. Yazarlarca yapılmış olan literatür çalışmalarında yüzey kuruması ya da hamur hacminin değişmesine yönelik açıklamalara yer verilmiştir. Makalede bu durumun, numune yüzeyinde piştirme sebebiyle başlayan bir değişimin göstergesi olduğu belirtilmiştir. Bu evrenin sonunda yüzeyin buruştuğu gözlemlenmiştir. Pişirmenin devam etmesi durumunda ise kabarmaya bağlı olarak buruşukluğun kaybolduğu gözlemlenmiştir. Kullanılmakta olan yöntemin, ilk evredeki kahverengileşme reaksiyonunun incelenmesine yönelik yeterliliğinin olmadığı belirtilmiştir.

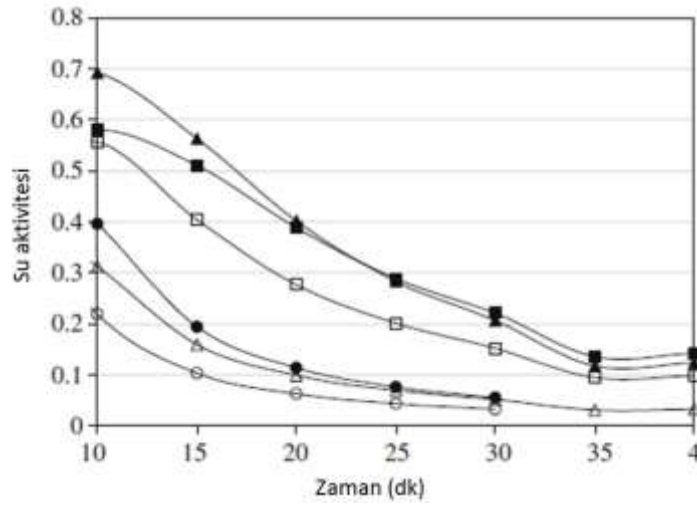


Şekil 3. 39 Piştirme süresine bağlı olarak yüzey sıcaklık değeri [33]

Çalışmada, yüzey sıcaklığının 120°C'yi aşması ile kahverengileşmenin başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kahverengileşme reaksiyonunun başlangıç noktasının su aktivitesi ile alakalı olduğu belirtilmiştir. Yüzey renginin koyulaşması ikinci evrede karakterize edilmiştir. Isı ve kütle geçişi ile bağlantı kurulmuştur.

Yüzey sıcaklığının artışının, bağlanmamış suyun buharlaşmasına, suyun buharlaşmasının nemi düşürdüğüne, nem düşüşünün ise su aktivitesi değeriinin değişmesine sebep olduğu belirtilmiştir. Bu durum melanoidin oluşumuna sebep olan Maillard reaksiyonunu hızlandırmıştır. Bunlara ek olarak, sıcaklığın daha da yükselmesi ve su aktivitesinin daha da düşmesi durumunda ise yüzey rengine etki eden faktörlerden Maillard reaksiyonunun yanında karamelizasyonun da olacağı belirtilmiştir. Yanık

görünüm ile renk açıklığı değerlerindeki düşüklüğe karamelizasyonun sebep olduğu öne sürülmüştür.

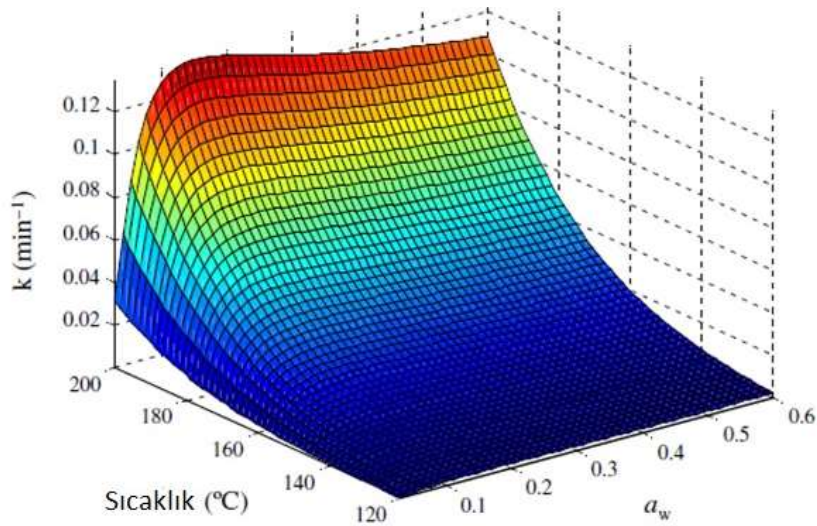


Şekil 3. 40 Pişirme süresine bağlı olarak yüzey su aktivitesi değeri [33]

Renk açıklığını temsil eden birinci dereceden denklem $\frac{dL}{dt} = -kL^*$ Runge-Kutta ile nümerik olarak çözülmüştür. Kahverengileşme oranı sabiti k (dakika⁻¹) yüzeydeki su aktivitesi ve yüzey sıcaklığı cinsinden aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$k = \left(7,923310^6 + \frac{2,739710^6}{a_w} \right) \exp \left(- \frac{\left(8,701510^3 + \frac{49,4738}{a_w} \right)}{T} \right) \quad (3.59)$$

Sıcaklık ve su aktivitesinin kahverengileşme oranı sabiti etkisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3. 41 Kahverengileşme oranı sabiti k ile sıcaklık ve su aktivitesi arasındaki ilişki [33]

Sonuç olarak pişirme boyunca ekmekteki kahverengileşme, bölgesel sıcaklık ve su aktivitesine bağlı olarak açıklanmıştır [33].

Çeşitli hamur içeriği ve hazırlama koşulları altında meydana gelen farklılıkların inceleyen **Shehzad A., Chiron H., Della Valle G., Kansou K., Ndiaye A., Réguerre A.L., tarafından 2010 yılında hazırlanmış “Porosity and Stability of Bread Dough During Proofing Determined by Video Image Analysis for Different Compositions and Mixing Conditions” [34]** adlı makale incelenmiştir. Kurulan düzenek ile ölçülen gözeneklilik değeri ile X-ışını mikrotomografisi ile yapılan ölçüm değerleri kıyaslanmıştır. Dört farklı içeriğe sahip hamur (A_i) kullanılmıştır (Çizelge 3.3). Maya ve tuz oranları yoğunluğun hesaplandığı işleme dahil edilmemiştir. Ayrıca E_s ile özgül enerji temsil edilmiştir. Ayrıca farklı koşullar da göz önünde bulundurularak numuneler hazırlanmıştır.

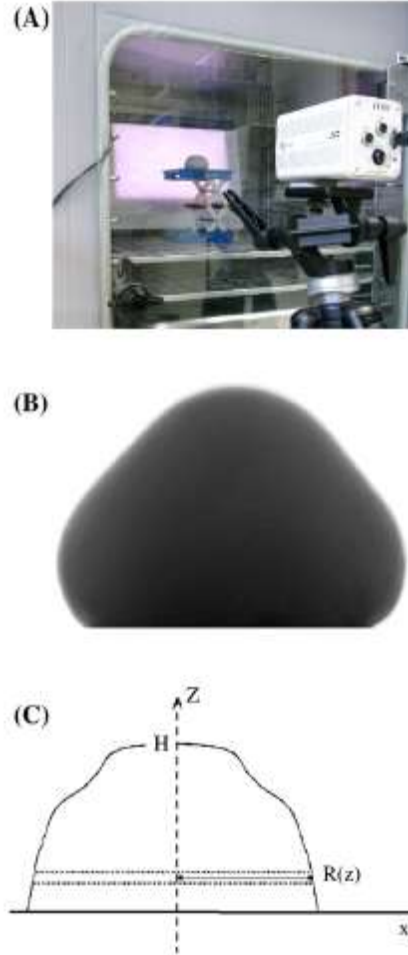
Çizelge 3. 3 Hamur içeriği [34]

Örnek	Su	Şeker	Yağ	Maya	Tuz (g/100g)
A1	60	2	2	3	2.2
A2	60	2	2	1.5	2.2
A3	65	2	2	3	2
A4	65	10	10	3	2
ρ_i (g/cm ³)	1	1.5	0.9	Hesaplanmamıştır	Hesaplanmamıştır

Çizelge 3. 4 Karışım ve deney koşulları [34]

Parametreler		B1	B2	B3	B4
Kütle (kg)	Un	3	3	1,8	1,8
	Su	1,88	1,88	1,116	1,116
Malzemelerin Sıcaklık Değerler (°C)	Un	16,2	18,8	15	3
	Su	6	19,8	5	3,5
	Ortam	24	19,5	22	16
Tekstürü Etkileyen Diğer Özellikleri	Zaman (s)	600	600	660	450
	Hız (RPM)	140	140	200	284
	E_s (kJ/kg)	21,3	21	51,4	53,4
	T_Hamur	21	28,3	28,2	21,1

Şekil 3.42’de deney düzeneği (A), Matlab’de gerçekleştirilen uygulamadan sonraki görüntü (B), görüntü analizlerinin temel prensibi (C) gösterilmiştir. Toplam alan, disklerin dik bir eksen doğrultusunda hesaplanması ile bulunmuştur. dz , 1 piksele eşit olarak gösterilmiştir. Elde edilen görüntüler gri tonlamalı hale getirilip Matlab’de yazılan kodlar ile hesaplanmıştır.



Şekil 3. 42 Deney düzeneği ve görüntülerin incelenişi [34]

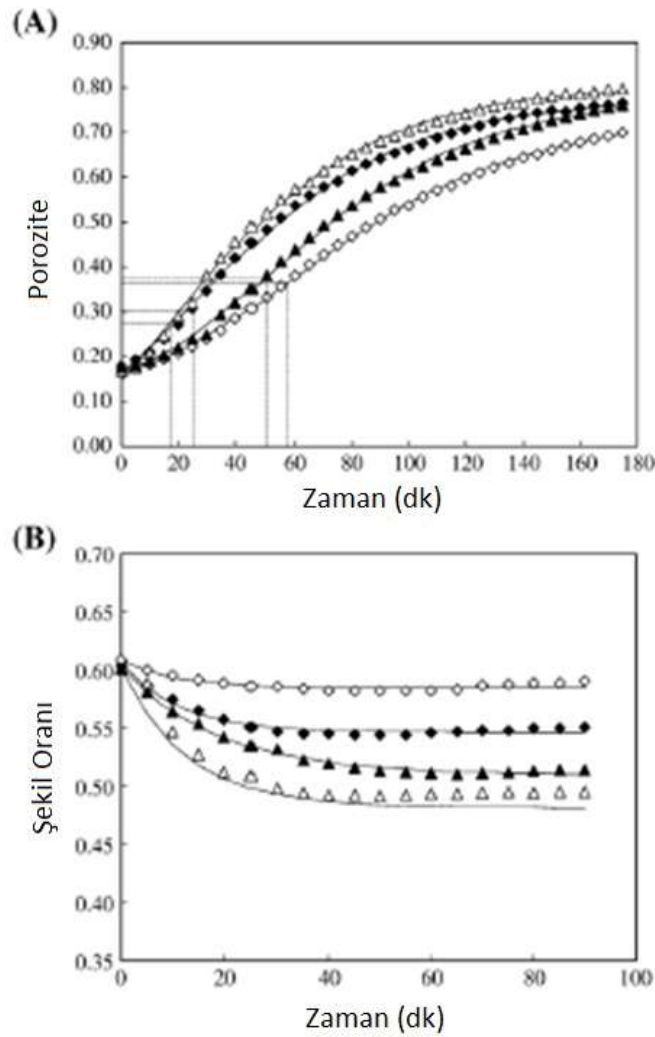
Numunelerin başlangıçtaki kütleleri eşittir. Ayrıca hazırlık aşamasında, hacimleri eşit olacak biçimde ayarlanmıştır. Bunun için graviteli şişe ve deiyonize su kullanılmıştır. Dolayısıyla başlangıç yoğunluğu bilinmektedir. Mayalanma sonrasında açıklanmış olan yöntem ile hacim hesaplanmıştır. Böylece son yoğunluk değerleri de bulunmuştur. Ayrıca gözeneklilik değerleri de hesaplanmıştır.

Görüntülerden elde edilen H ve $L_{maksimum}$ ifadeleri ile sırasıyla yükseklik ve maksimum genişlik ifade edilmiştir. Hamurun stabilitesini belirlemek için numunelerin şekil oranı

hesaplanmıştır. Hacmi en hızlı artan numunenin şekil oranı da hızlı bir biçimde değişmiştir. Şekil oranı:

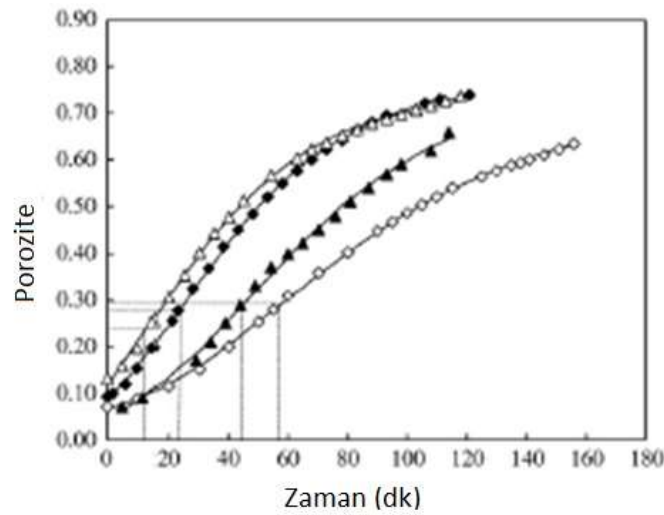
$$R(t) = \frac{H}{L_{maksimum}} \quad (3.60)$$

Deneyler üç kez tekrarlanmıştır ve %5'lik bir sapma ile gözeneklilik değerleri uyumuştur. Gözeneklilik eğrisi sigmoidal olmuştur. Yani gözeneklilik artışı başlangıçta yavaş olmakta, sonrasında hızlanmakta ve son evrede gitgide sabit bir değere yaklaşmaktadır. Bu durum Gompertz denklemi ile ifade edilmiştir. Şişme noktası diye ifade edilmiş olan bölgelerin, gözeneklilik artışının hızlanmaya başladığı anı temsil eden noktalar olduğu belirtilmiştir. Gözeneklilik artışı ve şekil oranının zamana ve hamur içeriğine bağlı değişimi Şekil 4.43'de verilmiştir.



Şekil 3. 43 Hamur içeriği farklı numunelerde gözeneklilik ve şekil oranı değişimi [34]

Şekilde ◆ ile A1, ◇ ile A2, Δ ile A3, ▲ ile A4 ifade edilmiştir. Şişme noktasına, A1 26 dakikada, A2 58 dakikada, A3 18 dakikada ve A4 50 dakikada ulaşmıştır. A2'de kullanılan maya miktarının az olmasının, dolayısıyla CO₂ üretiminin az olmasının etkisi görülmüştür. Şeker ve yağ miktarındaki artışın, gözeneklilikteki artışı olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Şeker miktarındaki artış, mayalanma süresini uzatmıştır. Buraya kadar yapılmış olan incelemeler makro ölçüdedir. Mikro ölçü için X-ışını mikrotomografi (XRT) yöntemi kullanılmıştır. Bu eğrilerin de sigmoidal olduğu görülmüştür. Mikro ve makro düzeyde yapılan ölçümlerin uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Sadece çok düşük gözeneklilik değerinde %17'lik bir sapma gözlemlenmiştir.



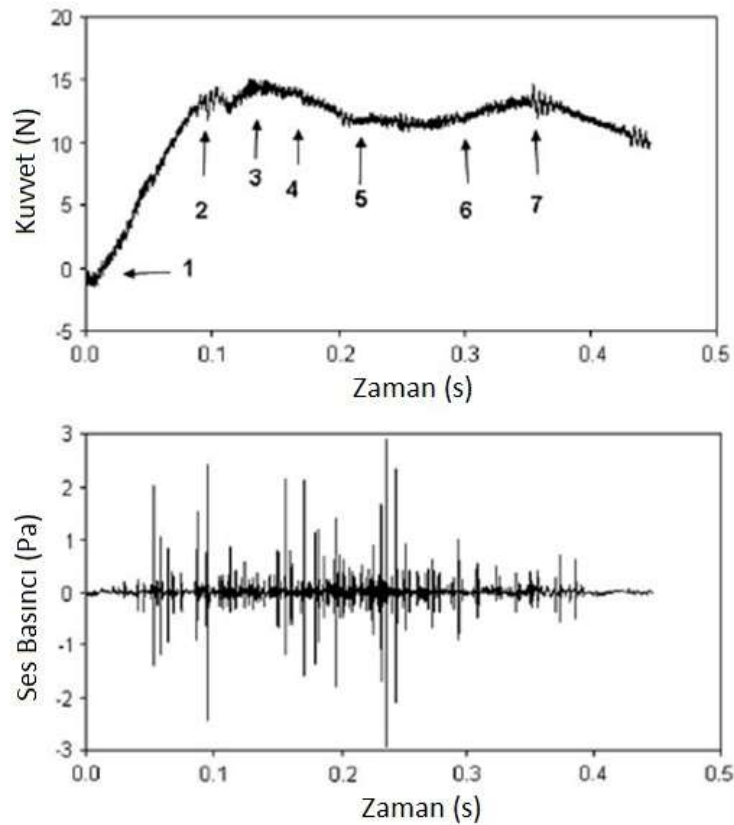
Şekil 3. 44 XRT yöntemi ile incelenen gözeneklilik değişimi [34]

XRT yöntemi ile deney yapmak göreceli olarak daha zor olmasına karşın, bu yöntem ile yapılan deneylerde sonuçların daha kesin olduğu belirtilmiştir. Ancak mikro ve makro ölçüde yapılan sonuçlarda uyumluluk gözlemlenmesi önemli bir bulgu olmuştur. Çünkü makro düzeyde yapılan deneylerin sonuçlarının yorumunun hem kabul edilebilir hem de daha kolay olduğu belirtilmiştir. Kuvvet-zaman ilişkisine bakıldığı zaman değişik büyüklüklerde olmak kaydıyla pek çok pik nokta görülmüştür. Gevrek ve pürüzlü yüzey yapı üzerinde değişken etkiler oluşturmuştur [34].

Farklı hamur içeriklerinin kabuk sertliğine etkisi inceleyen **Primo-Martin C., Beukelaer H., Hamer R. J., Van Vliet T., tarafından 2008 yılında hazırlanmış “Fracture Behaviour of Bread Crust: Effect of Ingredient Modification” [35]** adlı makale incelenmiştir.

Bu makalede, farklı hamur içeriklerinin kabuk sertliğine etkisi incelenmiştir. Deneyler mekanik ve ses ölçümlerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı hamur içeriği oluşturmak için farklı enzimler kullanılmıştır. Böylece enzimlerin kabuk sertliği üzerine etkisi incelenmiştir.

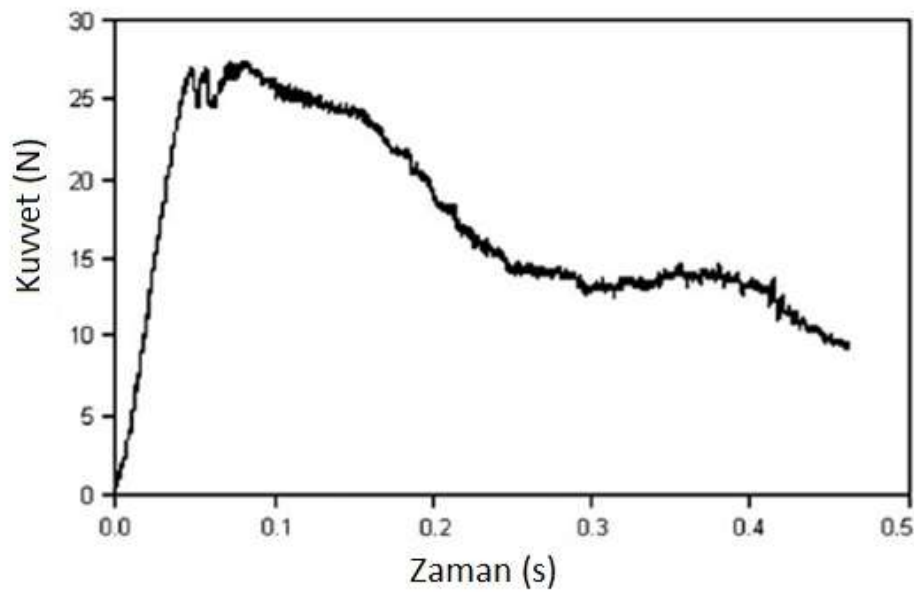
Porozite ölçümü için ekmeklerin katı kısmı ile içlerindeki boşluğun hacmi hesaplanmıştır. Ekmeğin katı kısmının hacmi Ultrapycnometer adlı cihaz ile ölçülmüştür. Özgül hacim hesaplamaları için kolza tohumunun yer değiştirmesi yönteminden faydalanılmıştır. Su aktivitesi, cihaz (Aqua Lab Series 3) ile ölçülmüştür. Numunelerin içindeki nem miktarını ölçmek için fırında 105°C sıcaklıkta 24 saat boyunca pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden önce ve sonra yapılan tartım işlemi sonucunda numunedeki nem miktarı ölçülmüştür. Ayrıca kabuktaki nemin ölçümü için Kett marka (KJT-100) nem ölçer kullanılmıştır. Mekanik testler tekstür analizörü ile gerçekleştirilmiştir. 30° açılı, 15 mm genişliğinde alüminyum prob kullanılmıştır. Ön dişlerin ısırma hızına yakın bir hız olması amacıyla, kesme hızı 40 mm/s olarak belirlenmiştir. Her bir hamur içeriği için 10 deney yapılmıştır. Deneyler dijital kamera ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3. 45 Kuvvet ve ses basıncı ile zaman arasındaki ilişki [35]

Ses deneyleri için dış seslerden yalıtılmış bir ortamda, mikrofon ve preamplifikatör kullanılmıştır. Ses kayıtları sırasında, numune ile mikrofon arasındaki mesafe 5 cm olarak belirlenmiştir. Veriler dijital hale getirilerek bilgisayara aktarılmıştır. Kuvvet-zaman ilişkisine bakıldığı zaman değişik büyüklüklerde olmak kaydıyla pek çok pik nokta görülmüştür. Gevrek ve pürüzlü yüzey yapı üzerinde değişken etkiler oluşturmuştur.

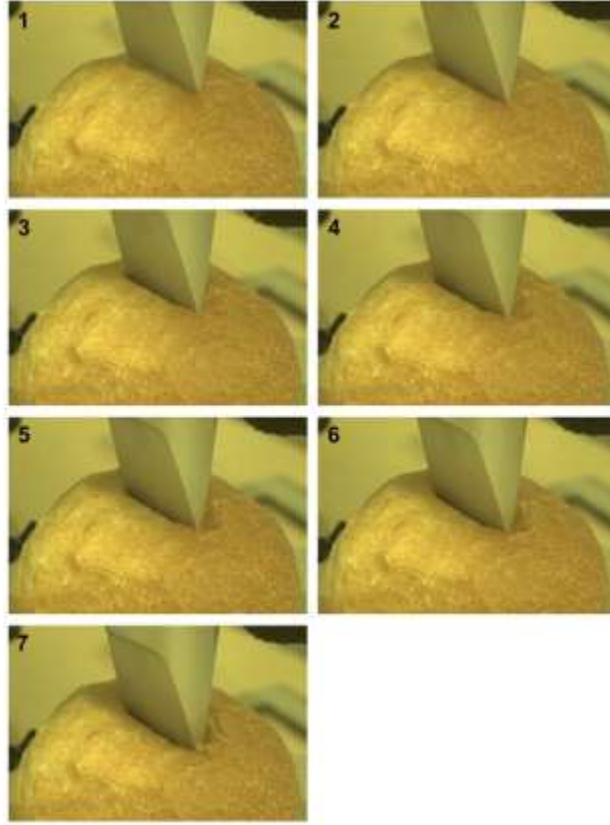
Tamamen gevrek olan (bisküvi, galeta gibi) yapıya ait verilere kıyasla farklı bir grafik ortaya çıkmış olması, çalışmaların devamında kabuk kısmının iç kısımdan ayrılması ve sadece kabuk ile deneylere devam edilmesine sebep olmuştur. Kabuklar, iç kısımlardan yarım küreyi andıracak bir biçimde ayrılmıştır.



Şekil 3. 46 Kabuk, iç kısımdan ayrıldıktan sonra yapılan deneyin sonucu [35]

Kuvvete bağlı grafikler birbirlerine benzese de yumuşak olan iç kısımların yokluğu sonuçları etkilemiştir. Prob, numune içerisinde ilerledikçe yapıdaki şekil değiştirme ses enerjisi olarak açığa çıkmıştır. Sesin büyük kısmının kırılmanın ilk aşamasında açığa çıktığı tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise ses emisyonu düşük olmuştur. Sebep olarak, geriye numunenin sadece yan yüzeylerinde kalan sert dokunun kırılması gösterilmiştir. Ayrıca yapının karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir etken olan hamur içeriği üzerine çalışılmıştır. Hamur içeriği ile gözeneklilik arasında ilişki kurulmuştur.

Aşağıdaki şekilde yer alan resimlerdeki numaralar, kuvvet-zaman ilişkisini veren ilk grafikte belirtilen noktalardır.



Şekil 3. 47 Prob'un zamana bağlı olarak konumu [35]

3.5 Gözeneklilik

Gözeneklilik terimi en basit haliyle, bir cismin içindeki gözeneklerin oluşturduğu hacmin, o cismin toplam hacmine olan oranıdır [36]. Gözenekli ortam, katı bir iskelet içerisinde birbirleri ile irtibatlı boşlukların bulunduğu bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Doğal gözenekli ortam olarak, deniz kumu, kireçtaşı, odun, çavdar ekmeği, akciğer ve dokuları örnek verilebilir [37]. Kimyada katalizör taşıyıcılar, binalar ve havacılıkta ısı yalıtım, düşük emisyon teknolojileri, güneş enerjisi alıcıları, endüstriyel alanda gözenekli ortam uygulamalarına örnektir [38]. Geçirimlilik ise basınç gradyanına bağlı olarak katı içerisinden akışkanın geçişinin makroskopik özelliğidir. [39].

Gözenekli ortamda akış için yapılmış olan genelleştirilmiş denklemlerin temeli, Darcy tarafından 1856 yılında atılmıştır ve sonrasında Darcy'nin modeli çeşitli modifikasyonlara uğramış olup, o zaman hesaba katılmamış pek çok faktör de hesaba katılmıştır [40]. Darcy, kum içerisindeki suyun akışını incelemek amacıyla yaptığı çalışmalar sonucunda denklemler türetmiştir. Bunlardan Darcy denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v \quad (3.61)$$

Burada $1/k_1$ ifadesi Darcy geçirgenlik katsayısıdır. Geçirimlilik, basınç gradyanına bağlı olarak katı içerisinde akışkanın geçişinin makroskopik özelliğidir. Forchheimer denklemi basınç düşüşüne bağlı olarak hız ile basıncın parabolik etkisinin ampirik ilişkisine bir örnektir ve literatürde kabul görmüştür.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v + \frac{\mu}{k_2} v^2 \quad (3.62)$$

Buradaki k_1 ve k_2 değerleri sırasıyla Darcy ve Non-Darcy geçirgenlik parametreleri olarak adlandırılır. [39] Viskoz ve atalet katsayıları olarak da tanımlanmıştır [41].

Ergun denklemi ise Forchheimer denkleminin aşağıdaki forma dönüştürülmüş halidir:

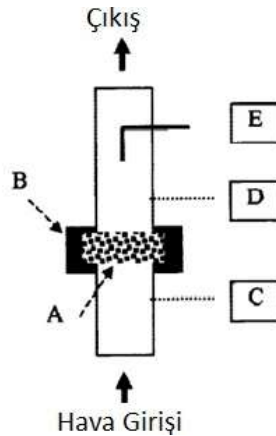
$$-\frac{dp}{dx} = A \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u}{d^2} + B \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho u^2}{d} \quad (3.63)$$

d ile çap, ε ile gözeneklilik ifade edilmiştir. A ve B ile sonuçların uyuşması için türetilmiş katsayılar ifade edilmiştir [40]. A ve B ifadeleri için aşağıdaki eşitlikler verilmiştir [42] :

$$A = \frac{D_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (3.64)$$

$$B = \frac{3,5 (1-\varepsilon)}{D_p} \frac{1}{\varepsilon^3} \quad (3.65)$$

Gözenekli ortama sahip olan seramik köpüğün geçirimlilik özelliğini inceleyen Innocentini M.D.M., Pandolfelli V.C., Coury J.R., tarafından 1999 yılında hazırlanmış **“Assesment of Forchheimer Equation to Predict the Permeability of Ceramic Foams”** [43] adlı makale incelenmiştir.



Şekil 3. 48 Deney düzeneğinin genel görünümü [43]

Akışkan hızı ve basınç düşümü arasındaki lineer olmayan ilişki Forchheimer denklemi yardımı ile kurulmuş olup, viskoz ve atalet katsayıları tespit edilmiştir. Bunun için bir rüzgar tüneli içerisine disk şeklinde kesilmiş bir seramik köpük (A), bir destek (B) vasıtası ile rüzgar tüneline sabitlenmiştir. Köpükten önce ve sonra basınç değerleri dijital manometreler ile (C ve D) ölçülmüş olup, mikromanometreye bağlı bir pitot tüpü (E) ile akışkan olarak kullanılan havanın hızı ölçülmüştür.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v + \frac{\mu}{k_2} v^2 \quad (3.66)$$

Hız değerleri ve o hız değerine karşılık gelen basınç farkı değerleri elde edilmiş ve Forchheimer denkleminde yerleştirilmiştir. Elde edilen verilerden yola çıkılarak atalet ve viskoz katsayılar tespit edilmiştir.

Deneylerdeki hız aralığı 0-27 m/s arasındadır. Hangi hız değerinde hangi katsayının daha fazla önemli olduğunu tespit etmek için keyfi olarak belirli hız değerleri ve bu hız değerlerine karşılık gelen basınç farkı değerleri grafiklere yansıtılmıştır. Söz gelimi 0-4.5 m/s hız aralığı ve bu aralığa karşılık gelen basınç değerleri Forchheimer denkleminde yerleştirilerek katsayılar tespit edilmiştir. Daha sonra seçilen hız aralığına bağlı olarak ileri ekstrapolasyon veya geri ekstrapolasyon yöntemi ile hız aralığı, deney süresince incelenen hız aralığı değerlerine tamamlanmıştır. Söz gelimi 0-4.5 m/s hız aralığı ve buna bağlı olarak basınç değerleri vardır. Forchheimer denklemi ile katsayılar, bu hız aralığındaki verilerden tespit edilmiştir. 0-4.5 m/s hız aralığı 0-27 m/s hız aralığına tamamlanmıştır. Bu durumda sadece 0-4.5 m/s hız değerine bağlı basınç değerleri, ileri ekstrapolasyon yöntemi ile 27 m/s'ye kadar hesaplanmış. Bu verilerden yola çıkılarak atalet ve viskoz katsayılar tespit edilmiştir. Deney boyunca (0-27 m/s) elde edilen hız-basınç değişimi grafiği ile hesaplanan (0-27 m/s) değerlere bağlı hız-basınç değişimi grafiği karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde elde edilen katsayı değerleri de karşılaştırılmıştır. Böylece sapmalar tespit edilmiştir. Hangi hız aralığında hangi katsayının daha önemli olduğu, hangi hız aralığının daha gerçekçi ve sapmanın incelenen hız aralıklarına bağlı olarak değişiminin ne oranda olduğu ortaya çıkarılmıştır [43].

Yüksek sıcaklığa dayanıklı döküm tuğla üzerinde geçirimsizliği inceleyen **Innocentini M.D.M., Pardo A.R.F., Pandolfelli V.C., tarafından 2000 yılında hazırlanmış "Influence of Air Compressibility on the Permeability Evaluation of Refractory Castables" [44]** adlı

makale incelenmiştir. Darcy ve Forchheimer denklemlerinden hangisinin hangi koşulda ne derece daha doğru sonuç verdiği araştırılmış olup, standartlarına bağlı olarak sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akış kabulünün sonuçları nasıl etkilendiği incelenmiştir.

Akışkan olarak hava kullanılmıştır. Numunenin yoğunluk değerinin büyük olması nedeniyle, akışkanın basınç değeri oldukça düşmektedir. Dolayısıyla güvenilir debi değerlerine ulaşmak biraz güç olmaktadır. Bu sebepten dolayı sıkıştırılabilirlik ihmali yapıldığında gözenekliliğe ait katsayıların tespitinde hatalı veriler ortaya çıkmaktadır.

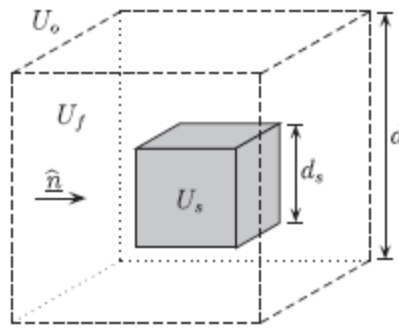
Yoğun refrakter malzemelerin gözenekliliklerinin tespitinde iki uluslararası düzenleme olan U.S. ASTM C577-96 ve European PRE-16th standartları, gözenekliliğe ait katsayıların hesaplanmasında iki farklı yaklaşımı ele almaktadır. Aslında her iki metotta da Darcy yasası kullanılıyor olmasına karşın, ASTM standartlarında sıkıştırılamazlık esas alınmıştır. Dolayısıyla sıkıştırılamazlık ve sıkıştırılabilirlik kabulü öncelikle Darcy yasası üzerinde denenmiştir. Sonrasında Forchheimer denkleminin, Darcy denklemi ile kıyaslanabilmesi amacıyla Forchheimer denklemi hem sıkıştırılamazlık hem de sıkıştırılabilirlik kabulü ile denenmiştir.

Sonuç olarak sıkıştırılabilirlik kabulünün daha doğru bir yaklaşım olduğu ortaya çıkarken, Forchheimer denkleminin Darcy denklemine kıyasla daha doğru sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Forchheimer denkleminin sıkıştırılabilir akış kabulünün, deneysel verilere bu kadar uygunluk göstermiş olması, literatürde belirtilmiş olan refrakter malzemenin gözenekliliğinin ölçümünde, basınç düşüşünün sadece viskoz etkilere dayalı olarak incelenmesi kabulünün tekrar gözden geçirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Testlerde düşük hız değerlerinde dahi atalet etkilerine bağlı ve lineer olmayan hız-basınç ilişkisi, türbülans etkilerinin dikkat çekici olduğunu ve ihmal edilmemesi gerektiğini ortaya koymuştur [44].

Temsili Birim Hücre (RUC - Representative Unit Cell) adlı yöntemle gözenekli ortamlarda incelemeler yapan **Plessis J.D., Woudberg S., tarafından 2008 yılında hazırlanmış “Pore-Scale Derivation of the Ergun Equation to Enhance its Adaptability and Generalization” [45]** adlı makale incelenmiştir. Açılımı Representative Unit Cell (Temsili Birim Hücre) olan RUC yöntemi, parçalı düz akım fonksiyonlarını ve paralel plakalar arasında akışın modellenmesini kolaylaştırmak amacıyla dikdörtgensel geometriye sahip

bir birim hücrenin kabulünü esas alınmıştır. Böylece Hagen-Poiseuille akışı çözüm için seçilmiştir ve akış yönünde toplam hacmi küçük parçalara ayırmak mümkün olmuştur.

Tanecikli RUC modelinin tanecikli dolgu yatağın yaklaşık olarak geometrik özelliklerini kapsayan en küçük kontrol hacmi olduğu belirtilmiştir. Dikdörtgenin kenarları ve keskin köşelerinin oluşu, Ergun denklemi ile yapılacak olan kıyaslamada çok dikkate alınmayacak bir detay olarak belirlenmiştir. Geometrik açıdan yapılmış olan bu kabulün sebebi akım ile aynı yöne bakan ve akıma zıt yönde bakan yüzeylerde yapılacak olan diferansiyel yaklaşımı kolaylaştırmaktır.

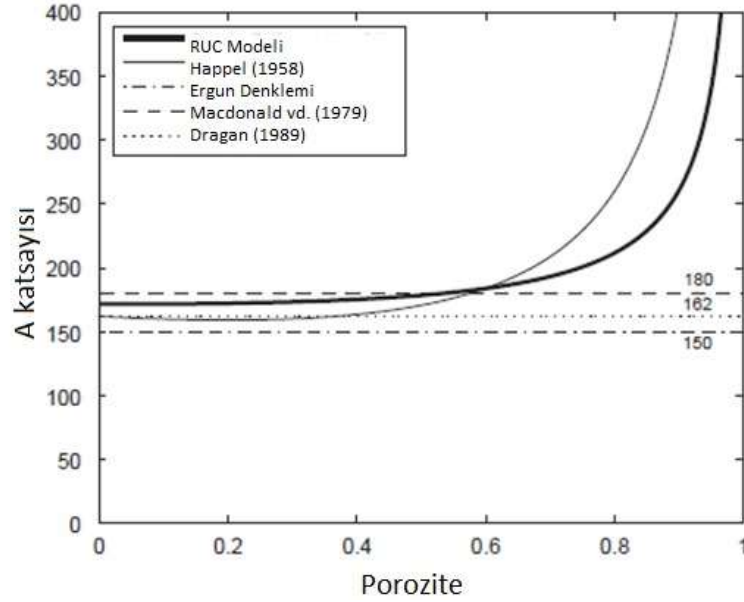


Şekil 3. 49 Tanecikli RUC modeli [45]

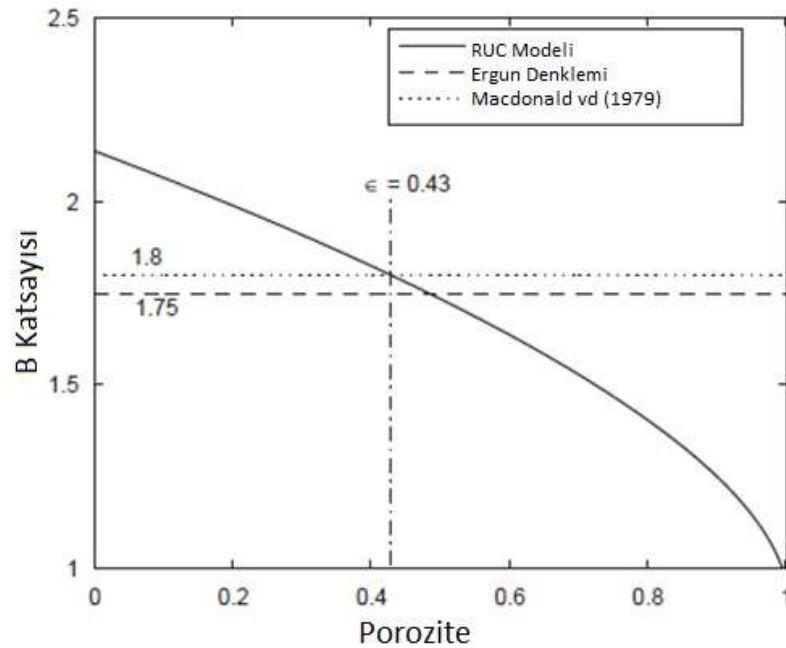
Ergun denklemi, geometrik olarak düzgün bir tüp içerisindeki gözenekli ortamdan geçişi esas alarak türetildiği için, gözenekleri oluşturan yapının kendi içindeki ilişki ve akışın geçtiği bölgedeki çarpıklık tatmin edici bir biçimde, açıkça ifade edilememiştir. Ayrıca Reynolds sayısının laminar akışın (atalet) baskın olduğu aralığa denk geldiği yerlerde atalet etkisi, çoğu kez Forchheimer rejimine karşılık gelir, deneysel sonuçlar göz önünde bulundurularak Reynolds sayısına ve gözenekliliğe bağlı fonksiyon olarak ifade edildiği belirtilmiştir. Forchheimer denkleminin geçerliliği laminar akış durumunda söz konusudur ve türbülansın geçerli olduğu yerlerde Forchheimer denkleminin de uygun olmadığı Du Plessis'in daha önce yazmış olduğu çalışmalarda da belirtilmiştir. Bu eksiklikler, formüllerde yapılacak olan uygun katsayı değişikliklerine bağlı olarak, deneysel sonuçlarla uyum gösterecek biçimde giderilebileceği ifade edilmiştir.

Ergun denkleminin sadece gözenekli yatak deneylerinde, belirli gözeneklilik aralığında geçerli olduğu belirtilmiştir. Bahsi geçen bu aralık 0.38 ile 0.47 aralığındadır ve sadece bir uçtan öteki uca doğru hareket eden Newtonian akış için geçerlidir. Bunun da

ötesinde, gözenekliliğin tanecikli ortam ile oluşturulduğu ve bu ortamla uyumlu olacak biçimde düzenlenmiş olan katsayılara göre elde edilmiş fonksiyon ve Reynolds sayısı formülü yüzünden, Ergun modelinin sadece tanecikli ortam için geçerli olduğu ve köpük benzeri ya da lifli yatak gibi diğer geometrilerde geçerli olmadığı belirtilmiştir. Ergun denkleminin uygulanacağı her bir yeni geometride ve geçen akışta A ve B katsayılarından yeni ampirik değerler türetilmelidir.



Şekil 3. 50 Ergun-Benzeri denklemlerdeki A katsayısının kıyaslanması [45]



Şekil 3. 51 Ergun-Benzeri denklemlerdeki B katsayısının kıyaslanması [45]

Sonuç olarak bu makalede verilen model, Ergun denklemi üzerinde değişiklikler yapmak için yeterli olmamıştır. Yapılacak her farklı uygulamada farklı katsayı değerlerinin bulunması gerektiği sonucu çıkmıştır [45].

Akışkan yatağında enerji kaybına ait genel bir denklemin elde edilme yöntemini ortaya koyan **Ergun S., tarafından 1952 yılında hazırlanmış “Fluid Flow Through Packed Columns” [46]** adlı makale incelenmiştir.

Bu makalede akışkan yatağında enerji kaybına ait genel bir denklemin elde edilmesi anlatılmıştır. Tanecikler aynı kurulu sistemde, farklı gözeneklilik değerlerinde yığılmış olup, ayrı ayrı basınç düşüm ve debi değerleri ölçülmüştür. Bu verilerden yola çıkılarak, a ve b değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu tip bir akışı etkileyen özellikler arasında debi, viskozite, yoğunluk, taneciklerin ne kadar sık olduğu, taneciklerin boyutu, şekli ve yüzey özelliklerinin etkili olduğu belirtilmiştir.

Akışkanın tanecikli olan bu yapı içinden geçmesi sırasında gerçekleşen basınç düşüşü, düşük debi değerlerinde hızla, yüksek hız değerlerinde ise debinin karesi ile orantılı bir biçimde değiştiği belirtilmiştir. Akış sırasında, akışkanın sürtünme sebebiyle oluşan direncin yaratmış olduğu etkinin, akış hızının birinci ve ikinci dereceden değeri ile ilişkisi ilk kez Osborne Reynolds tarafından formülize edilmiştir.

$$\frac{\Delta P}{L} = aU + b\rho U^2 \quad (3.67)$$

Burada L boyunca basınç farkını ΔP , akışkanın yoğunluğunu ρ , akışkanın lineer hızını U temsil etmektedir. Ayrıca a ve b, sistemin işlevini yerine getirmesini sağlayan faktörler olarak belirlenmiştir.

$$\frac{\Delta P}{LU} = a + bG \quad (3.68)$$

ρU , G ile ifade edilmiştir. Hızın sıfıra yaklaşması sonucunda basınç değişiminin sabit bir değer alacağı görülmüştür:

$$\lim_{n \rightarrow 0} \frac{\Delta P/L}{U} = a \quad (3.69)$$

Burada a, viskoz akışta bir koşul olarak tanımlanmıştır. Poiseuille denklemine ve Darcy yasasına göre a, akışkanın viskozitesi ile orantılıdır. bG ise yüksek debi değerlerinde bir koşul olarak tanımlanmıştır. Debi değeri yüksekken bG'nin değerine kıyasla a'nın ihmal

edilebilecek kadar küçük olduğu belirtilmiştir. Bu durumun, kinetik enerji kayıplarının bütün kayıpları oluşturduğu türbülanslı akış için geçerli olduğu belirtilmiştir. En baştaki denklem aşağıdaki hale dönüştürülmüştür:

$$\frac{\Delta P}{L} = a' \mu U + b \rho U^2 \quad (3.70)$$

μ akışkanın viskozitesini, a' ise katıdan katıya değişen bir faktör olarak tanımlanmıştır. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terimin viskoz kayıpları, ikinci terimin ise kinetik kayıpları temsil ettiği belirtilmiştir.

Akışkan yatağında basınç düşüşünün, düşük debi değerlerinde $\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$ ile alakalı olduğu, yüksek debi değerlerinde ise $\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}$ ile alakalı olduğu Levi ve arkadaşları tarafından tespit edilmiştir. [46]

Makalenin devamında, $\frac{\Delta P}{L} = a' \mu U + b \rho U^2$ denklemindeki faktörlerin aşağıdaki gibi olacağı belirtilmiştir:

$$a = a'' \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (3.71)$$

$$b = b'' \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (3.72)$$

Buradan yola çıkılarak, makale başında verilen denklemler düzenlenmiştir:

$$\frac{\Delta P}{L} = a'' \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} U + b'' \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \rho U^2 \quad (3.73)$$

$$\frac{\Delta P}{LU} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} = a'' \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + b'' \frac{G}{1-\varepsilon} \quad (3.74)$$

Bu çalışmada çözülmeye çalışılan problem, farklı yığın yoğunluğuna sahip ancak toplam miktarı bilinen ve aynı forma sahip düzgün dağılmış katı için geçerlidir. Düzgün dağılım için, katı taneciklerin destek ızgarasına yerleştirilmesinden sonra, ızgaranın altından gaz verilmiştir. Bu sırada düzeneğe mekanik titreşimler verilmiştir. Böylece düzgün dağılım sağlanmıştır.

Yazar yapmış olduğu başka çalışmalardan yola çıkarak, basınç düşüşünün hidrolik çap ile alakalı olduğunu ifade etmiştir. Karakteristik boyut kullanımının isteğe bağlı olduğu ve özgül yüzey değeri bilinen bir küre için kullanılan karakteristik boyutun çap olduğu belirtilmiştir.

$$D_p = \frac{6}{s_v} \quad (3.75)$$

Bu dönüşümün denkleme dahil edilmesi ile birlikte

$$\frac{\Delta P g_c}{L} = k_1 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_m}{D_p^2} + k_2 \frac{G U_m}{D_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (3.76)$$

elde edilmiştir. Burada k_1 ve k_2 'nin sırasıyla 72α ve $(3/4)\beta$ değerine eşit olduğu belirtilmiştir. $N_{Re} = D_p G / \mu$ dönüşümü gerçekleştirildiğinde;

$$\frac{\Delta P g_c}{L} \frac{D_p^2}{\mu U_m} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} = k_1 + k_2 \frac{N_{Re}}{1-\varepsilon} \quad (3.77)$$

Eşitliğin sol tarafının, basınç düşüşü ile viskoziteye bağlı enerji kaybı arasındaki oran olduğu belirtilmiştir.

$$f_v = k_1 + k_2 \frac{N_{Re}}{1-\varepsilon} \quad (3.78)$$

olmak üzere,

$$\frac{\Delta P g_c}{L} \frac{D_p^2}{\mu U_m} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} = f_v \quad (3.79)$$

eşitliği elde edilmiştir. 640 deney sonunda elde edilen verilerden yola çıkılarak, k_1 ve k_2 hesaplanmıştır ve sırasıyla 150 ve 1.75'e eşit olduğu tespit edilmiştir. Bu deneyler pülverize kok gibi çeşitli maddeler ve CO₂, N₂, CH₄, H₂ gibi gazlar ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu katsayılar ile genel bir denklem oluşturmak mümkün olmuştur.

Sonuç olarak viskoz enerji kaybı ve kinetik enerji kaybı sırasıyla

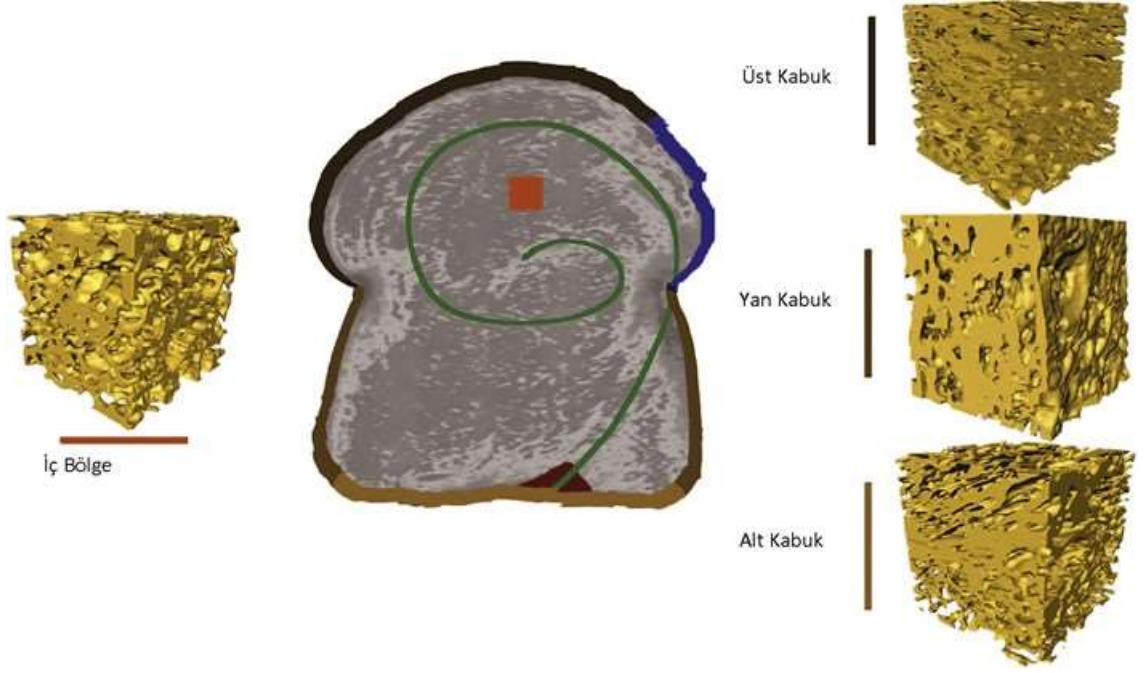
$$150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_m}{D_p^2} \quad (3.80)$$

$$1,75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho U_m^2}{D_p} \quad (3.81)$$

olarak bulunmuştur [46].

X-ray mikro tomografi cihazı ile ekmek içinde gözenekliliğin ölçümü üzerine çalışan **Van Dyck T., Verboven P., Herremans E., Defraeye T., Van Campenhout L., Wevers M., Claes J.,** tarafından 2014 yılında hazırlanmış “Characterisation of structural patterns in bread as evaluated by X-ray computer tomography” [47] adlı makale incelenmiştir. Ölçümler farklı ekmek dilimlerinde 6x6x6 mm³ hacimler için yapılmıştır. Tüm ekmek

dilimi tarandıktan sonra ölçüm sonuçları bilgisayar ortamında birleştirilmiştir. Üç farklı beyaz ekmek numunesi incelenmiştir. Ölçülen bu ekmeklerde toplam gözeneklilik sırasıyla %73.38, %72.77 ve %69,71 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. 52 Mikro tomografi cihazı ile ekmek gözenekliliğinin ölçümü [47]

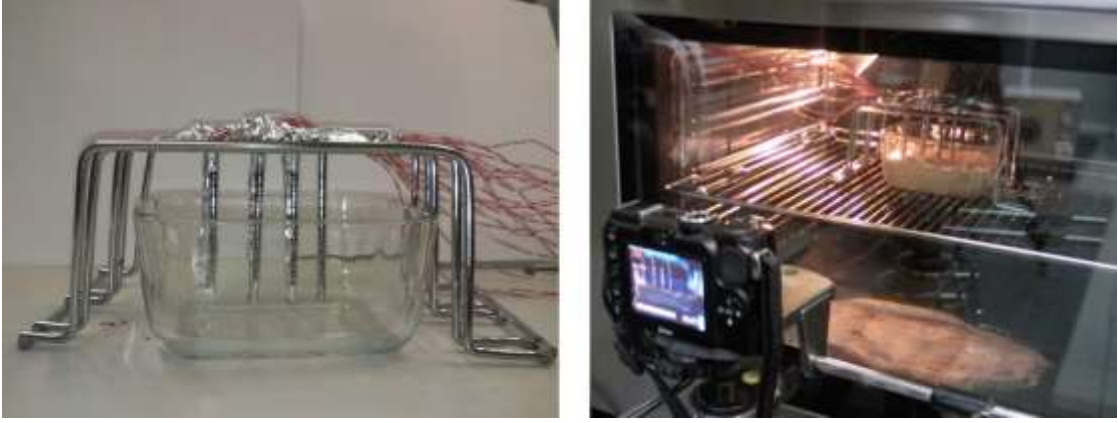
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Yükseklik Ölçümü Deney Düzenegi

İncelenen makalelerde, pişme sonunda oluşan kabarmanın ölçülebilmesi amacıyla farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin başında kumpas, cetvel gibi ölçüm metotları gelmektedir. Bu yöntemler ile sadece pişirme sonunda ölçüm yapılabilmektedir. Bu yöntemlere benzer olarak, pişirme öncesinde hamurun içine saplanan cetvel ya da işaretlenmiş metal çubuklar ile pişme süresince yükseklik takibi yapılabilmektedir. Bu yöntemde ise hamur, içerisine batırılan cetvel ya da çubuğa yapışmakta ve olması gerekenden farklı bir pişme sonucu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca tüm bu yöntemlerde, sadece noktasal ölçüm yapılabildiği için, kekin tam olarak kabarma miktarı net olarak belirlenememektedir. Cetvel ile ölçüme yönelik olarak yapılan ölçüm yeterliliği analizlerinde, bu yöntem ile doğru bir ölçüm yapılamayacağı görülmüştür. Bu nedenle alternatif yöntemler ile ölçüm yapma yoluna gidilmiştir.

Makalelerde rastlanan diğer yöntemler ise görüntü işleme metodları üzerine kurgulanmıştır. Bu yöntemler, kamera ile pişirilen gıdanın fotoğrafının çekilmesi ve çeşitli görüntü işleme algoritmaları ile kabarma miktarının belirlenmesidir.

4.1.1 Cetvel ile Yükseklik Ölçümü



Şekil 4. 1 Yükseklik ölçüm deney düzeneği

Piştirme esnasında kekin kabarmasının ölçülmesi amacıyla, kekin içerisine saplanmış olan dört adet çubuktan oluşan bir düzenek hazırlanmıştır. Ayrıca bu çubuk üzerine her 10 mm’de bir sıcaklık ölçülmesi amacıyla termalçiftler yerleştirilmiştir. Çubukların üzeri birer milimetre arayla işaretlenmiştir. Tüm piştirme süresini kaydetmek amacıyla da bir dijital kamera kullanılmıştır. Diğer bir yöntem olarak cetvel kullanılarak yükseklik ölçümü yapılmıştır.



Şekil 4. 2 Daldırma yöntemi ile ölçümün yapıldığı kek piştirme deneyi

Kullanılan bu yöntemin piştirme üzerinde olumsuz etkileri gözlemlenmiştir. Hamur içine yerleştirilen çubuklar, pişirilen kekin homojen olarak kabarmasına engel olmuş ve

deneylerin tekrarlanabilirliğini ortadan kaldırmıştır. Cetvel kullanıldığı durumda ise ölçüm tekrarlanabilirliği problemli olarak görülmüştür. Bu nedenle alternatif yöntemler ile yüksekliğin ölçülmesine karar verilmiştir.

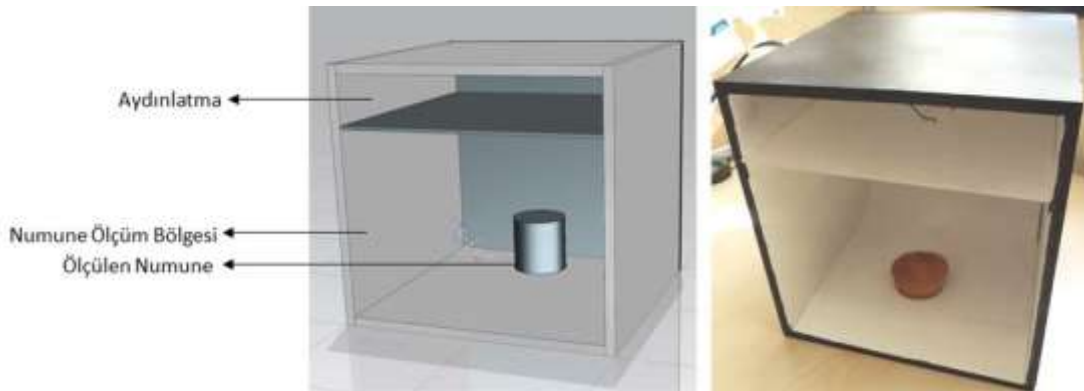


Şekil 4. 3 Cetvel ile ölçümün yapıldığı kek pişirme deneyi

4.1.2 Görüntü İşleme Yöntemi ile Yükseklik Ölçümü

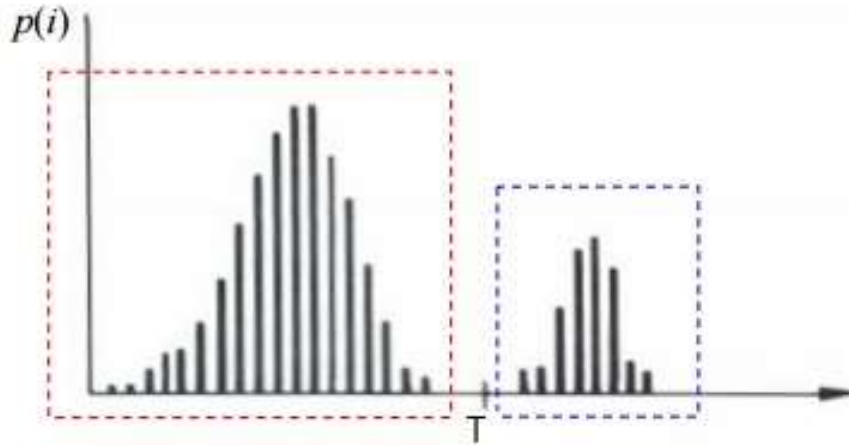
İncelenen makalelerde de görüleceği üzere, pişme sonucunu değiştirmeyecek ve pişirilen gıdaya zarar vermeyen görüntü işleme yöntemleri bulunmaktadır. Cetvel, kumpas benzeri yöntemlerde karşılaşılan olumsuzluklar nedeniyle görüntü işleme yöntemlerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Bu amaçla, sabit bir aydınlatmaya sahip ölçüm kabini hazırlanmıştır. Bu kabine yerleştirilen keklerin fotoğrafları çekilmekte, çekilen fotoğraflar bir görüntü işleme algoritmasından geçirilerek, kekin üst yüzey profili ve ortalama yüksekliği ölçülebilmekte, bu bilgilerden yola çıkılarak yaklaşık olarak kekin gözenekliliği hesaplanabilmektedir.



Şekil 4. 4 Kek yükseklik ölçümü fotoğraf kabini

Hazırlanan görüntü işleme yazılımında, eşikleme (thresholding) metodu kullanılmıştır. Eşikleme, görüntü bölütleme amacı için kullanılan en önemli yaklaşımlardan birisidir. Eşikleme işleminden amaç, görüntü içerisindeki nesneleri görüntü arka planından ayırmaktır. Eşikleme için, görüntüdeki gri seviye dağılımlarını gösteren görüntü histogramından faydalanılır. Örneğin, koyu bir arka plan üzerinde açık renkli nesnelerden oluşan $f(i, j)$ görüntüsüne ilişkin gri seviye histogramı Şekil 4.5'deki biçime sahip olacaktır.



Şekil 4. 5 Histogram üzerinde eşikleme metodunun uygulanışı [48]

Bu histograma göre, nesnelere ve arka plana ait pikseller olmak üzere, görüntüyü iki ana grupta değerlendirmek mümkündür. Bu durumda nesneleri arka plandan ayırmak için en kolay yol, histogramdan göreceli olarak belirlenen bir T eşik değeri ile görüntüdeki piksel değerlerini karşılaştırmak olacaktır. Buna göre, görüntüdeki herhangi bir (i, j) pikseli için; $f(i, j) > T$ ise (i, j) pikseli nesneye ait bir nokta, $f(i, j) \leq T$ ise (i, j) pikseli arka plana ait bir nokta olacaktır.

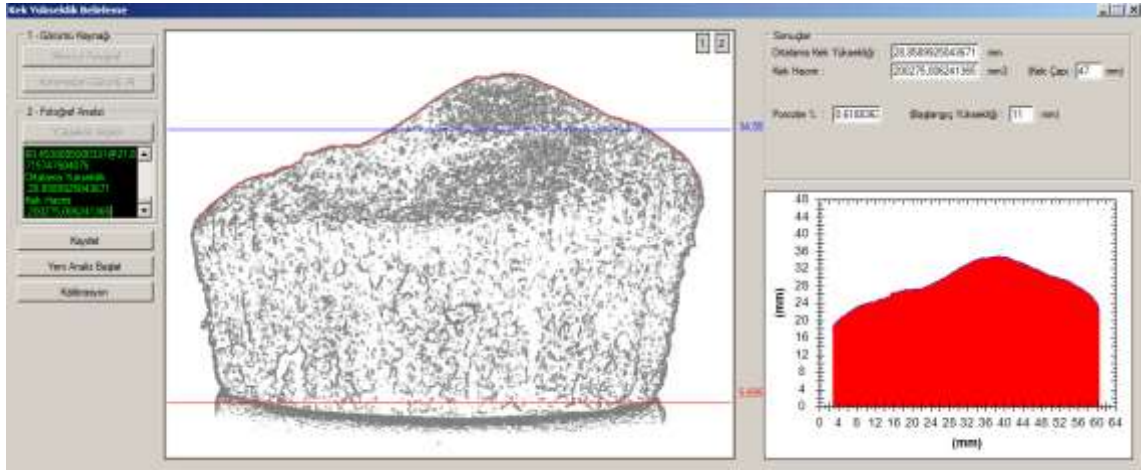
Eşiklenmiş bir $g(x, y)$ görüntüsü,

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } f(x, y) > T \\ 0 & \text{eğer } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (4. 1)$$

biçiminde tanımlanır. Buna göre, 1 ile etiketlenen pikseller nesneye, 0 ile etiketlenenler ise arka plana karşı düşer [48].



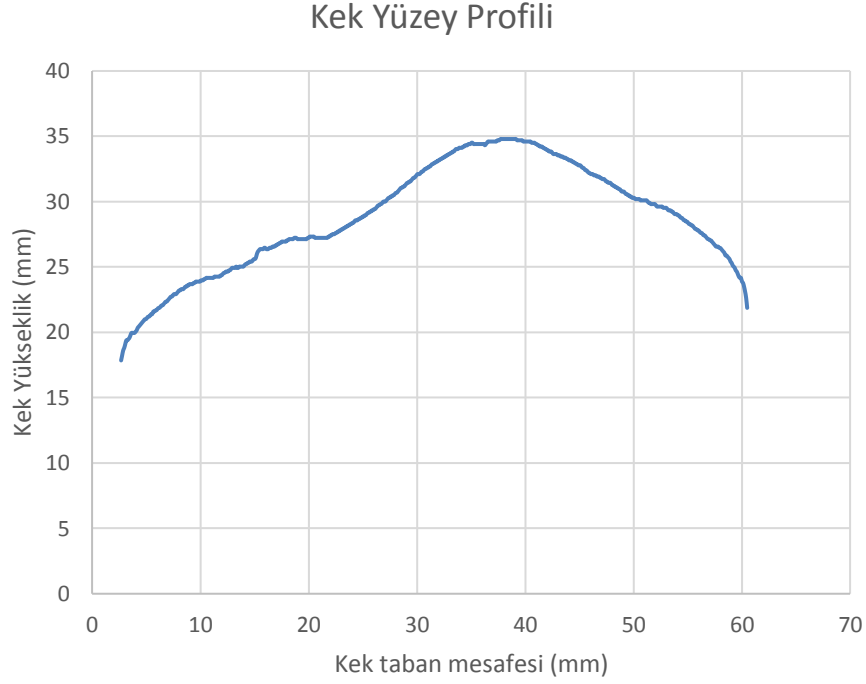
Şekil 4. 6 Görüntü işleme yöntemi ile kek yüksekliğinin belirlenmesi



Şekil 4. 7 Görüntü işleme yöntemi ile keke ait bilgilerin elde edilmesi

Eşikleme (thresholding) metodu kullanılarak hazırlanan görüntü işleme yazılımında, yüklenen kek fotoğrafında belirlenen bir eşikleme değerine göre siyah/beyaz görüntü haline çevrilmektedir. Bu işlemin ardından tüm resimdeki pikseller yukarıdan aşağıya doğru taranmakta ve ilk beyazdan siyaha geçişi olduğu nokta belirlenmektedir. Bu belirlenen noktalar kekin üst yüzey profilini oluşturmaktadır. Bu bilgilerden yola çıkılarak kek yüzey profili sayısal olarak ifade edilebilir hale gelmektedir. Şekil 4.7’de görülmekte olan kekin üst yüzeyine ait grafik Şekil 4.8’de verilmektedir.

Bu yöntem kullanılarak kek kabarma profilleri net olarak çıkartılabilmekte, ayrıca hacimsel artış da hesaplanarak kek içerisindeki yüzdesel boşluk oranı da tahmin edilebilmektedir.



Şekil 4. 8 Kek üst yüzey profili

4.2 Görüntü İşleme Yöntemi ile Kabuk Kalınlığının Belirlenmesi

Ev tipi fırınlarda pişirilen hamurlu gıdaların pişkinliğini ölçme amacıyla İngiliz standartlarında kullanılan bir skala (BSI Shade Gauge) kullanılmaktadır. Bu skala üzerinde hamurlu gıdalarda hamur halinden yanmaya yakın duruma kadar sekiz farklı rengi 4 ile 18 arasında tanımlamaktadır. Pişmiş olarak kabul edilen yüzey rengi 8 ile 12 arasında olup, 8'in altında kalan bölgelerde kabuk oluşumu gözlenmemektedir. Bu ölçüm yöntemi IEC 60350-1 numaralı standartta belirtilmektedir [49].



Şekil 4. 9 Hamurlu gıdaların pişmişliğinin ölçümünde kullanılan BSI renk skalası

Kullanılan bu renk ölçüm yönteminin daha kontrollü olması, kabuğun başlangıç noktasının daha net bir şekilde ortaya konulabilmesi amacıyla, görüntü işleme yöntemleri kullanılarak kabuk kalınlığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

RGB (Red – Green – Blue) renk uzayında her renk, içerdiği kırmızı, yeşil ve mavi renk oranına göre farklılık göstermektedir. RGB skalasında renkler 0,0,0 (siyah) 255,255,255 (beyaz) arasında değişiklik göstermektedir. Aşağıdaki küp şeklinde tanımlanan RGB renk uzayında, birbirine yakın olarak gözüken renklerin tanımlamalarında ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Kahverenginin tonu olarak gözüken iki rengin RGB karşılıkları incelendiğinde R, G ve B renklerinde eş zamanlı olarak değişiklikler olduğu görülmektedir. Sadece renk kodlarına bakarak bu renklerin birbirine benzer olduğunu tespit etmek zordur.

Çizelge 4. 1 BSI renk skalasının RGB ve Lab renk uzayına dönüşümü

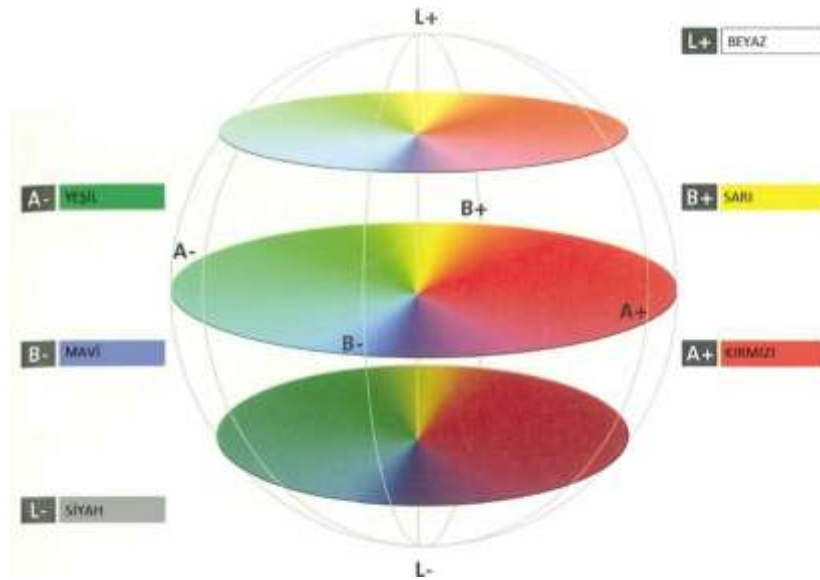
BSI	R	G	B	L	a	b
4	254	255	230	99,3	-4,5	11,8
5	254	255	173	98,3	-12,4	39,2
6	254	255	91	97,4	-19,5	75
7	254	245	95	94,8	-14,4	70,8
8	234	211	95	84,4	-5,7	59
9	213	182	53	74,7	-2	65,5
10	184	147	74	63	5,4	43,3
11	166	143	84	60,2	0,7	34,4
12	156	128	70	55	3,3	35,2
13	145	114	58	49,9	5,4	35,2
14	128	97	66	43,6	8,4	22,5
15	110	92	67	40,2	3,4	17,1
16	84	76	62	32,7	0,7	9,5
17	69	74	67	30,8	-3,6	3,5

Çizelge 4.1’de BSI standartlarına göre tanımlanmış (BSI Shade Gage Skalası), pişmişlik derecesini gösteren renk skalasının RGB karşılıkları görülmektedir. Rakamlar incelendiğinde koyu renklere gidildikçe R, G, B renklerinde de genel olarak azalma görülmektedir. Bir renkten benzer bir renk tonuna geçişte her üç ana renkte de (R,G,B) değişiklik olması, kahverenginin tonlarını belirli bir RGB aralığı arasında filtrelenmesini engellemektedir.

Ayrıca pişirme esnasında RGB renk uzayının belirli aralıklarda filtrelenmesi nedeniyle bir BSI renginden diğer BSI rengine geçerken arada renk kopuklukları olmaktadır. Bu

nedenle pişirilen gıdanın rengi tam olarak belirtilen RGB rengine geldiğinde tanımlanabilmektedir. Bu belirtilen nedenlerden dolayı, belirli renk aralıklarının kolayca filtrelenebileceği ve sadece BSI skalasında tanımla olan renklerin filtrelenmesini kolaylaştıracak bir renk uzayının kullanılması gerekmektedir. Kullanılacak olan renk uzayında, BSI skalasının renkleri arasında geçiş yaparken, yine bu renklerin arasındaki gerçek renklerin elde edilebileceği bir renk uzayının kullanılması gerekmektedir.

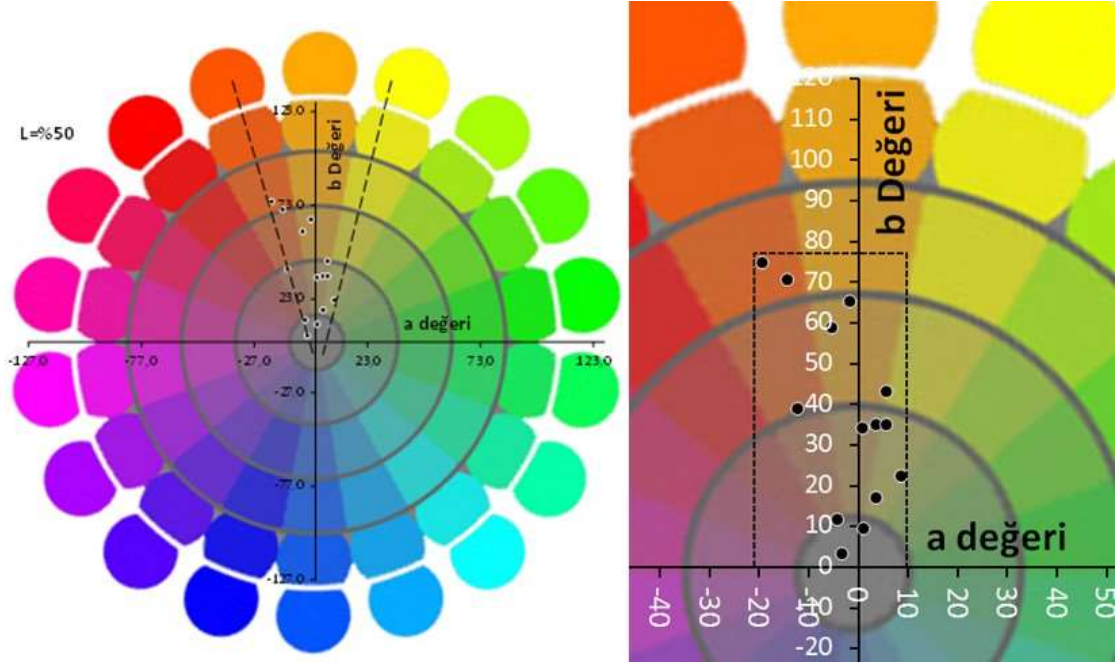
Bahsedilen sebeplerden dolayı, kabuk kalınlığının belirlenebilmesi ve standart BSI skalasındaki renklerle eşleştirilmesi amacıyla CIE L^*a^*b renk uzayının kullanılması gerekmektedir.



Şekil 4. 10 CIELab renk evreni [7]

CIE L^*a^*b renk uzayı bir küre şeklinde tanımlanan a ekseni Kırmızı/Yeşil, b ekseni sarı/mavi renkleri arasında değişen ve L ekseni ise (lightness) aydınlığı göstermektedir. Bu renk uzayı üzerinde a ve b değerlerinin sabitlenmesi ve L değerinin 0-100 değerleri arasında değişmesi durumunda seçilen rengin açık/koyu renk tonları elde edilebilmektedir.

BSI skalasındaki değerlerin CIE L^*a^*b renk skalasındaki karşılıkların incelendiğinde ve bu değerler $L=50$ değeri için grafik çizildiğinde; renk değerlerinin belirli bir bölgede kümелendiği görülmektedir (Şekil 4.10).



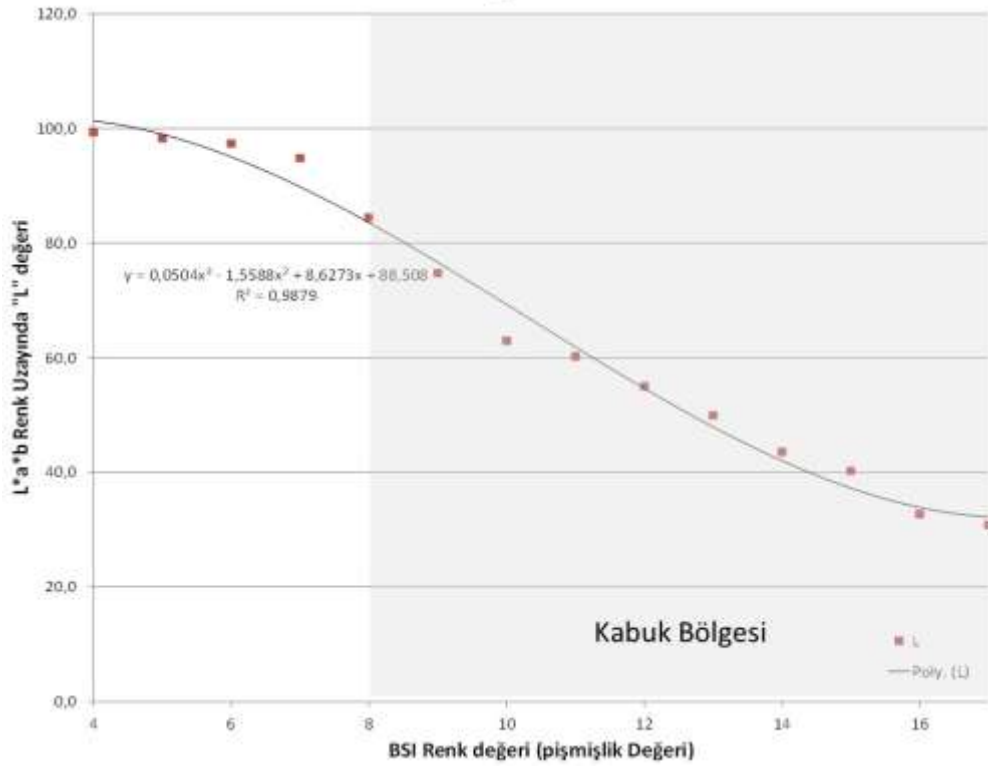
Şekil 4. 11 CIELab renk evreninde L=%50 kesitinin BSI skalasındaki renklerin dağılımı [7]

Çekilen kek kesitinin fotoğrafının a ve b değeri üzerinden filtrelemesi yapıldığında, çekilen fotoğrafta pişirilen gıda dışındaki tüm alanlar filtrelenmektedir. Filtrelenen bölgeler fotoğraftan tamamen uzaklaştırılabileceği gibi, bu piksellerin rengi önceden belirlenmiş bir renk ile de değiştirilebilir. Filtreleme işleminden sonra, belirlenen a ve b aralığı içerisinde kalan bölgelerin L (lightness) değerlerinin ortalaması alınarak, belirlenen aralıklara karşılık gelen BSI değerleri elde edilir. Bu değerler takip edilerek pişirilen gıdanın hangi pişmişlik değerine ulaştığı belirlenir.

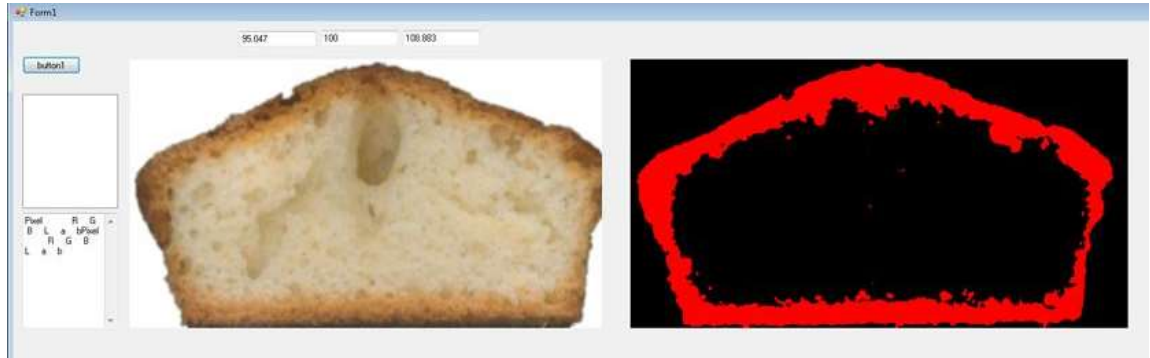
Şekil 4.11’de BSI Renk değeri ile Lab Renk uzayında a ve b değeri filtrelandığı durum için L değerinin değişimi arasında bir korelasyon kurulmuştur. Bu korelasyona göre, L’nin (Lab renk uzayında aydınlık değeri) x’e (BSI skalasında ölçülen 4-18 arasındaki renk değeri) göre değişimi aşağıdaki formül ile ifade edilebilmektedir :

$$L = 0,0504 x^3 - 1,5588x^2 + 8,6273x + 88,508 \quad (4. 2)$$

Belirtilen yöntem kullanılarak oluşturulan görüntü işleme yazılımında kabuk başlangıcı $BSI \geq 8$ olan bölgeler belirlenerek, bu bölgeler kırmızı, geri kalan bölgeler ise siyah olarak yeniden renklendirilmiştir. Bu işlem sonrasında ortalama kabuk kalınlığının hesabı yapılmaktadır.



Şekil 4. 12 BSI Renk değeri ile Lab Renk uzayında a ve b değeri filtrelendiği durum için L değerinin değişimi



Şekil 4. 13 Kek kabuk kalınlığının analizi

4.3 Üst Yüzey Renk Ölçüm Deney Düzeneği

Piştirilen keklerin kızarmışlık seviyesinin sayısal olarak ifade edilmesi için standart bir renk skalası (BSI Shade Gauge) kullanılmaktadır. Fakat bu skalanın kullanımı manuel olarak yapıldığı için, ölçüm yapan kişiye göre ölçüm sonuçları değişiklik göstermekte ve ölçüm yeterliliği sağlanamamaktadır. Bu nedenle bu üst yüzey kızarmışlık ölçümünün yapılması amacıyla IEC 60350-1 numaralı standartta tanımlanan cihaz ile ölçüm yapılmaktadır.

Bu cihaz pişirilen hamurlu gıdaların renk değerleri ve renk dağılımları BSI skalasında ölçülmektedir. Hamurlu gıdaların kızarma/kahverengileşme miktarı ve gıda üzerinde bu kızarmanın dağılımı belirlenebilmektedir.

Düzenek temel olarak görüntüleme kabini ve görüntülerin işlendiği bir bilgisayardan oluşmaktadır. Görüntüleme kabini, ışık yönü ve rengi açısından şartlandırılmış bir görüntüleme ortamı sağlamaktadır. Kabin içerisinde aydınlatılması 10000K renk değerinde floresan ampuller kullanılmaktadır. Ampullerin üzerinde, ışığın eşit dağılımını sağlamak ve lokal parlamaları önlemek amacıyla kullanılan bir difüzör plaka bulunmaktadır. Ayrıca, gıdaların görüntülenmesi amacıyla kabin üst duvarına bir kamera yerleştirilmiştir.

Ölçümün yapılabilmesi için kamera ile algılanan görüntülerin işlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, bir bilgisayar ve bu bilgisayara yüklü görüntü işleme yazılımı kullanılmaktadır. Görüntü işleme yazılımı, hamurlu gıdaların renk ölçümü ile ilgili düzenlemeleri içeren EN60350 normuna uygun analiz algoritmalarını çalıştırarak ölçüm sonuçlarını oluşturur.



Şekil 4. 14 Üst yüzey kızarmışlık ölçüm cihazı

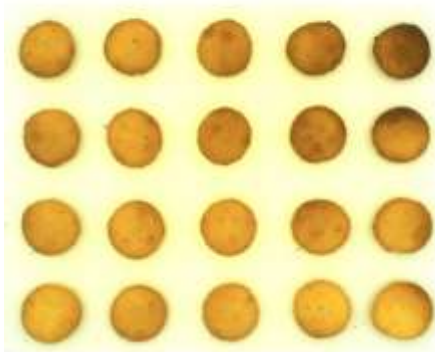
BSI Renk Skalası			
4	5	6	7
8	9	10	11
12	13	14	15
16	17		

Şekil 4. 15 Kek yüzeyindeki renklere karşılık gelen BSI renkleri

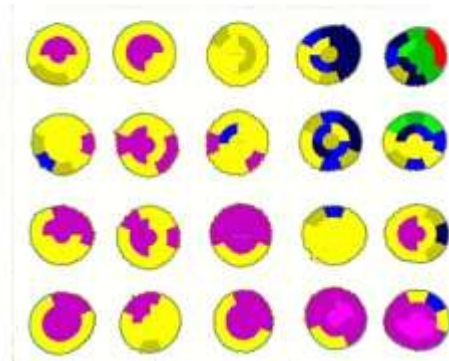
Ölçüm cihazına yerleştirilen keklerin fotoğrafı çekildikten sonra Optimas isimli yazılım kullanılarak her bir kek yüzeyi 13 parçaya ayrılmakta ve bu parçalar ayrı ayrı değerlendirilerek, kızarmışlığa karşılık gelen BSI renk değeri belirlenir. Bu yöntem kullanılarak pişirme sonuçları sayısallaştırılmış olmakta ve farklı pişirmelerin birbiri ile kıyaslanabilmesine olanak sağlanmaktadır.



Orijinal Kek Fotoğrafı



Renk Ölçüm Cihazı (BSI Renk Dağılımı)



Şekil 4. 16 Renk ölçüm cihazı ile yapılan ölçüm sonuçları

Kullanılan bu ölçüm cihazı ile sadece pişirme sonucu oluşan renk dağılımları ölçülebilmektedir. Fırın içerisinde zamana bağlı olarak renk değişiminin de ölçülebilmesi amacıyla benzer ölçüm sistemi geliştirilmiştir.



Şekil 4. 17 Fırın üst duvarına yerleştirilen kamera ve aydınlatma

Fırın tavanına özel soğutma sistemine sahip bir kamera yerleştirilmiştir. Kameranın yanına iki adet lamba yerleştirilmiş olup, fırın içerisinde homojen bir aydınlatma sağlanmıştır. Kabuk kalınlığı ölçüm düzeneğinde kullanılan yazılım üzerinde yapılan bazı değişikliklerle pişirme süresi boyunca eş zamanlı olarak yüzey renk değişimleri ölçümü yapmak amaçlanmıştır.



Şekil 4. 18 BSI renk ölçüm cihazı kalibrasyon plakaları

Fırın kamerası ile alınan görüntülerin kalibrasyonu için standart renk plakaları kullanılmış olup, renk ölçüm cihazı ile aynı ölçümlerin alınması sağlanmıştır.



Şekil 4. 19 Fırın içinden gerçek zamanlı renk ölçümü

4.4 Poroz Özelliklerin Ölçümü ve Rüzgar Tüneli Deney Düzeneği

Keklerin gözenekli içyapısının, geometrik olarak seramik ve metal süngerlere daha çok benzediği görülmüştür. Bu sebeple yapılacak olan deney düzeneği, seramik ve metal köpükler için yapılan deneylerdeki gibi, rüzgar tüneli ile gerçekleştirilmiştir. Basınç farkı ve hız ölçümleri üzerinden atalet ve viskoz katsayıların tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Yapılan literatür araştırmasında yer alan bilgiler doğrultusunda, elde edilmesi amaçlanan atalet ve viskoz katsayılar, Forchheimer denklemi ile tespit edilmiştir. Bu denklemin, dolgulu yataktaki denklemlerden farkı, hidrolik çap veya gözeneklilik değerlerini tespit etmeye gerek duymaksızın viskoz katsayı ve atalet katsayısına erişim kolaylığı sağlamasıdır. Esas olarak Forchheimer denklemi, Ergun denklemi veya Ergun-Tipi denklemlerin genel halidir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde poroz bir ortamın modellenmesi için atalet ve viskoz katsayılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Atalet ve viskoz katsayıları için birim analizi yapıldığında; A ($1/\alpha$), yani viskoz terimin katsayısı $1/m^2$, B (C_2), yani atalet katsayısının terimi $1/m'$ 'dir [51, 52].

$$\frac{\Delta P}{L} = A\mu U + B\rho U^2 \quad (4.3)$$

$$\frac{F/A}{L} = A\mu U + B\rho(U)^2 \quad (4.4)$$

$$\frac{\left(\frac{kg \left(\frac{m}{s^2}\right)}{m^2}\right)}{m} = A \left(\frac{kg}{ms}\right) \left(\frac{m}{s}\right) + B \frac{kg}{m^3} \left(\frac{m}{s}\right)^2 \quad (4.5)$$

$$\frac{kg}{m^2 s^2} = A \frac{kg}{s^2} + B \frac{kg}{ms^2} \quad (4. 6)$$

$$\frac{kg}{m^2 s^2} = \left(\frac{1}{m^2}\right) \frac{kg}{s^2} + \left(\frac{1}{m}\right) \frac{kg}{ms^2} \quad (4. 7)$$

Deneysel olarak, ölçülen numunedeki basınç kaybının hıza göre değişiminin bulunması durumunda $\Delta P = Sabit_1 U + Sabit_2 U^2$ şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda atalet ve viskoz katsayıları hesaplanabilmektedir. Rüzgar tüneli ile yapılacak olan deneylerde, hız (m/s) değerine karşılık basınç kaybı (ΔP) belirlenip, çizilen grafiğe $\Delta P = Sabit_1 U + Sabit_2 U^2$ şeklinde bir eğri uydurulabilmektedir. Bu denklemden yola çıkılarak aşağıdaki denklemler yazılabilir ve $1/\alpha$, yani viskoz terimin katsayısı, C_2 , yani atalet katsayısının terimi hesaplanabilmektedir.

$$Sabit_1 = C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n \quad (4. 8)$$

$$Sabit_2 = \frac{\mu}{\alpha} \Delta n \quad (4. 9)$$

Rüzgar tüneli deney düzeneği; bir adet rüzgar tüneli, tünelin sonunda yani çıkış ağzında bir adet fan, basınç ölçerler ve hız ölçüm düzeneğinden oluşmaktadır. Akışkan olarak hava kullanılmaktadır. Basınç ölçümleri sadece numunenin içinden geçerek kanal içine henüz girmiş olan havanın basınç değeri (Pascal cinsinden) elde edilmiştir.



Şekil 4. 20 Rüzgar tüneli test düzeneğinin genel görünümü

Elde edilen basınç değerinin gözenekli ortam kalınlığına yani kek kalınlığına bölünmesi ile $\Delta P/\Delta L$ değeri elde edilmiştir. Deneylerde kek kalınlığı, tahta kalınlığına eşit olacak

biçimde ayarlanmıştır. Hız değeri yani u ise, debinin lüle alanına bölünmesi sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4. 21 Kullanılan mikromanometreler

Poroz özelliklerin belirleneceği kekler, tünel kapağına monte edilen bir tahtanın ortasına yerleştirilmiştir. Tahta üzerine sadece kekin girebileceği 50 mm çapında bir delik açılmıştır. Ölçülecek olan kek numunelerinin kalınlığı ile tahtanın kalınlığı aynı hale getirilmiştir. Kekin çevresinden hava kaçağı olmaması için kek sıcak silikon ile tahtaya yapıştırılmıştır.



Şekil 4. 22 Ölçüm yapılan kek numunesi

Literatüre bağlı olarak, seçilen kek numunelerinin içinde doğrudan delik olmaması gerekmektedir. Çünkü incelenmiş çalışmalarda, uygulamalar ve formüller gözenekli ortam için geçerlidir. Bununla birlikte kek ile tahtanın ortasındaki deliğin arasından da

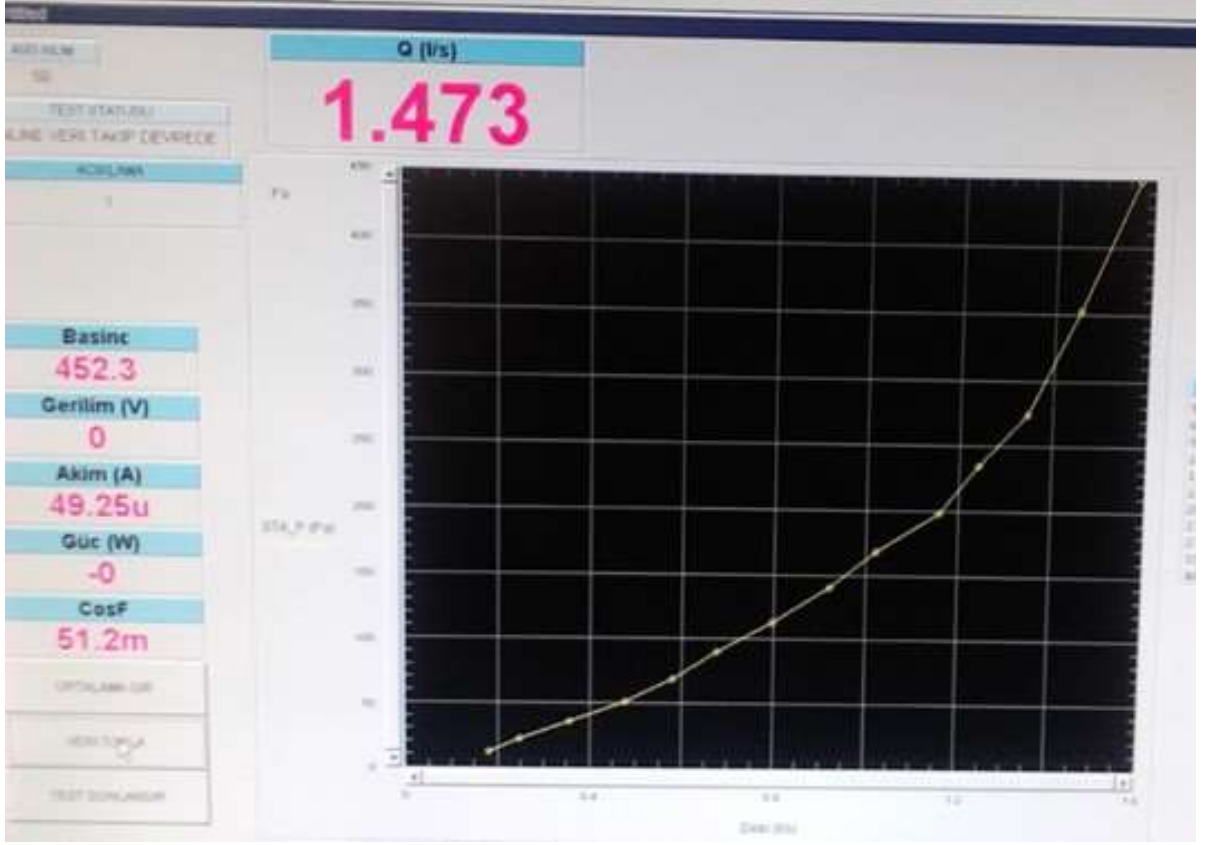
hava sızmamalıdır. Ayrıca kekler tahtadaki deliğe yerleştirildiği zaman, kek içinden geçen akışın tek boyutlu olması gerekmektedir. Bütün bunlar göz önünde bulundurularak, kek ile tahta arasında hava sızdırmazlığı sağlanmıştır.

Deney düzeneğinde hava sızdırmazlığını sağlayabilmek için tahtanın rüzgar tüneli girişi ile aralarında bulunan boşluklar ve tünel konstrüksiyonuna ait bağlantı elemanlarının üzeri (vida yuvaları gibi) alüminyum bant ile kapatılmıştır.

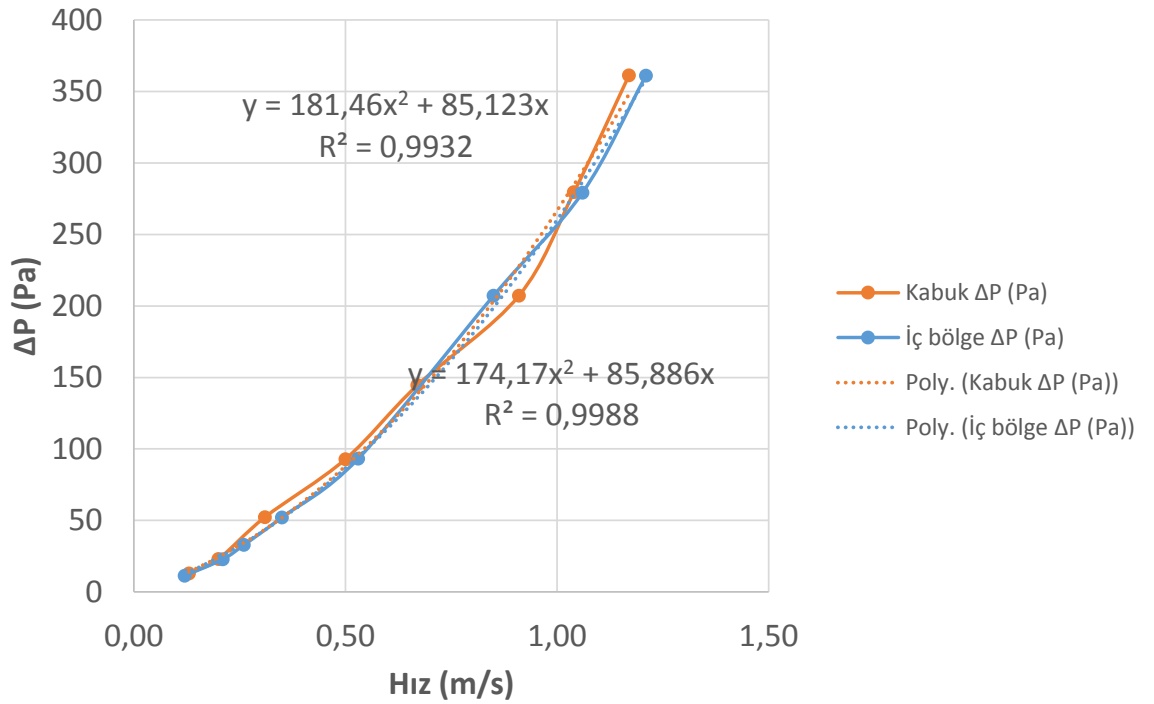


Şekil 4. 23 Kek numunesinin rüzgar tüneli üzerindeki yerleşimi

Hem iç bölge hem de kabuk bölgesi 8 farklı hız değeri için basınç kayıpları ölçülmüştür. Her hız değerinde 50 tekrarlı basınç ölçümü yapılmış ve bunların ortalaması alınarak basınç farkı-debi eğrileri çıkartılmıştır.



Şekil 4. 24 Veri toplama yazılımının görünümü



Şekil 4. 25 Kabuk ve iç bölgede hıza bağlı basınç kaybı grafiği

Çizelge 4. 2 Kabuk ve iç bölgede hıza bağlı basınç kaybı

Kabuk		İç Bölge	
Hız (m/s)	Kabuk ΔP (Pa)	Hız (m/s)	İç Bölge ΔP (Pa)
0,13	12,91	0,12	11,32
0,20	23,08	0,21	22,85
0,31	52,37	0,26	32,87
0,50	92,88	0,35	52,17
0,67	144,60	0,53	93,15
0,91	207,16	0,85	207,15
1,04	279,48	1,06	279,15
1,17	361,18	1,21	360,99

Deney sonucunda kabuk ve iç hacim için sırasıyla aşağıdaki denklemler elde edilmiştir;

$$y = 181,46x^2 + 85,123x \quad (4. 10)$$

$$y = 174,17x^2 + 85,886x \quad (4. 11)$$

Bu denklemlerden yola çıkılarak, iç hacim ve kabuk için $1/\alpha$, yani viskoz terimin katsayısı sırasıyla $1,27E+09$ ve $1,22E+09$, C_2 , yani atalet katsayısı ise 17372 ve 17528 olarak elde edilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde poroz ortam modellemesinde bu değerler kullanılacaktır.

4.5 Pişirme Üzerindeki Etkin Parametrelerin İncelenmesi

Pişirme üzerindeki etkili parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin pişirme sonunda oluşan ürünün özellikleri ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle tam faktöriyel bir deney tasarımı oluşturularak deneyler yapılmıştır.

Pişirme için girdi parametreler fan devri (rpm), pişirme sıcaklığı ($^{\circ}C$), süre (dk), pişirme hacmine verilen nem miktarı (g) olarak seçilmiştir. Pişirme sonucunda incelenen parametreler ise; kek yüksekliği (mm), yüzey rengi (BSI), kabuk kalınlığı (mm) ve kütle kaybı (gr) olarak belirlenmiştir. Deneyler tam faktöriyel, çift tekrarlı ve eğrisellik olup olmadığını görebilmek amacıyla merkez noktası da kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Toplam 34 adet pişirme deneyi yapılmış olup, sonuçları bahsedilen deney düzeneklerinde ölçümlenmiştir. Pişirmeler standartlarda belirtilen tariflere göre yapılmış ve yine standartlarda belirtilen pişirme kağıtları kullanılmıştır. Deney planı Çizelge 4.3’de, deney sonuçları ise Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4. 3 Deney planı

Fan Devri (rpm)	Sıcaklık (°C)	Süre (dak)	Su miktarı (g)
600	160	18	0
2200	160	18	0
600	200	18	0
2200	200	18	0
600	160	35	0
2200	160	35	0
600	200	35	0
2200	200	35	0
600	160	18	200
2200	160	18	200
600	200	18	200
2200	200	18	200
600	160	35	200
2200	160	35	200
600	200	35	200
2200	200	35	200
1400	180	27	100
600	160	18	0
2200	160	18	0
600	200	18	0
2200	200	18	0
600	160	35	0
2200	160	35	0
600	200	35	0
2200	200	35	0
600	160	18	200
2200	160	18	200
600	200	18	200
2200	200	18	200
600	160	35	200
2200	160	35	200
600	200	35	200
2200	200	35	200
1400	180	27	100

Çizelge 4. 4 Deney sonuçları

Fan Devri (rpm)	Sıcaklık (°C)	Süre (dak)	Su miktarı (g)	Kütle Kaybı (g)	Yükseklik (mm)	Renk (BSI)	Kabuk Kalınlığı (mm)
600	160	18	0	31,63	29,3	6,43	0
2200	160	18	0	48,02	33,82	7,21	1,82
600	200	18	0	50	35,39	15,21	2,08
2200	200	18	0	69	37,86	13,88	2,38
600	160	35	0	67	31,25	9,32	2,37
2200	160	35	0	88	33,49	11,38	2,81
600	200	35	0	100	35,27	15,22	2,72
2200	200	35	0	85,59	34,99	16,88	5,37
600	160	18	200	28,22	34,22	6,18	0
2200	160	18	200	46,09	35,34	8,42	1,73
600	200	18	200	48,12	39,22	9,92	2,38
2200	200	18	200	65,41	38,28	13,4	2,37
600	160	35	200	28,83	29,18	6,05	0
2200	160	35	200	84,68	33,52	10,77	2,46
600	200	35	200	92,42	37,87	14,78	3,54
2200	200	35	200	105,03	35,22	16,82	5,46
1400	180	27	100	71,86	37,64	10,95	2,38
600	160	18	0	35	29,92	6,21	0
2200	160	18	0	48	32,94	8,45	1,85
600	200	18	0	55,38	36,06	11,13	2,26
2200	200	18	0	69,68	37,52	13,67	2,3
600	160	35	0	65,39	31,79	9,14	2,02
2200	160	35	0	87,72	32,16	11,33	2,51
600	200	35	0	100,3	36,27	15,2	2,65
2200	200	35	0	111,56	36,97	16,85	6,59
600	160	18	200	28,35	34,83	6,31	0
2200	160	18	200	44,26	33,67	8,03	1,56
600	200	18	200	49,3	39,04	9,59	1,9
2200	200	18	200	65,98	37,21	12,98	2,27
600	160	35	200	65,84	34,6	9,16	2,13
2200	160	35	200	87,19	33,29	10,87	2,23
600	200	35	200	96,15	37,17	15,18	3,39
2200	200	35	200	109,24	35,89	16,78	4,81
1400	180	27	100	90,85	38,29	11,25	2,42

Analizler, bir ticari istatistik yazılımı olan Minitab 17 ile yapılmıştır. Çıktı parametreleri üzerindeki etkin parametreler pasta grafiği ile bu parametrelerin etkileri ise ana etki grafiği ile paylaşılmıştır.

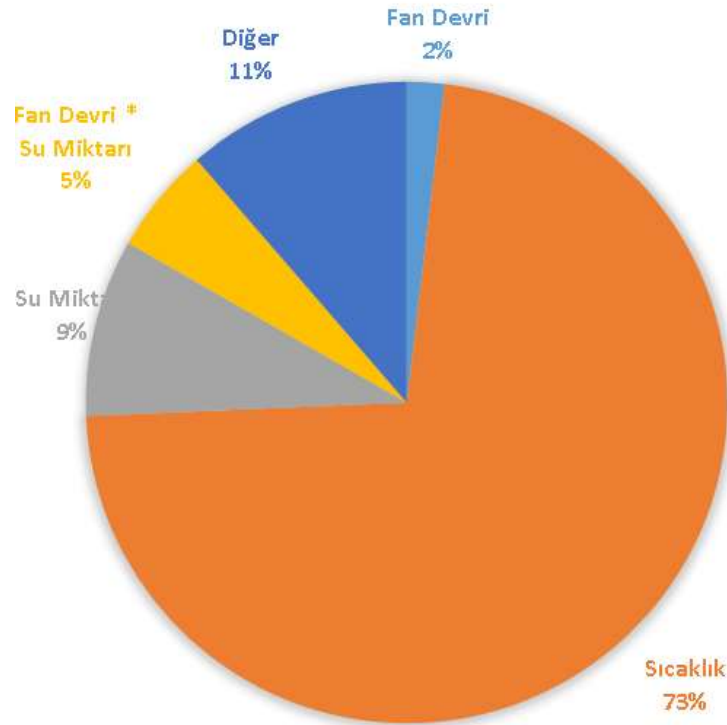
4.5.1 Yükseklik Üzerindeki Etkili Parametreler

Parametrelerin yükseklik üzerindeki etkileri incelendiğinde en baskın parametrenin sıcaklık olduğu görülmüştür. Seçilen sıcaklık aralığı için sürenin yükseklik üzerinde bir etkisine rastlanmamıştır.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	171,237	42,809	17,29	0,000
Linear	3	160,874	53,625	21,66	0,000
Fan Devri (rpm)	1	3,638	3,638	1,47	0,235
Sıcaklık (°C)	1	139,905	139,905	56,51	0,000
Su miktarı (g)	1	17,331	17,331	7,00	0,013
2-Way Interactions	1	10,363	10,363	4,19	0,050
Fan Devri (rpm)*Su miktarı (g)	1	10,363	10,363	4,19	0,050
Error	29	71,794	2,476		
Lack-of-Fit	12	49,877	4,156	3,22	0,014
Pure Error	17	21,917	1,289		
Total	33	243,030			

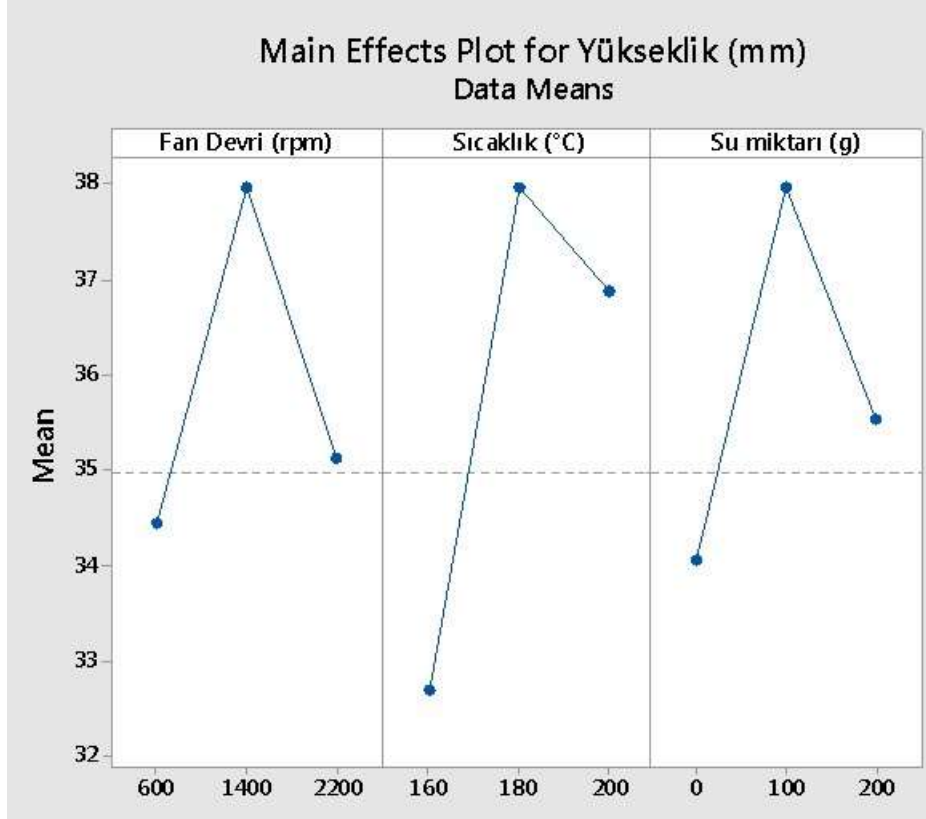
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,57342	70,46%	66,38%	61,18%



Şekil 4. 26 Yükseklik üzerindeki etkin parametreler

Yükseklik için ana etkiler grafiğine (Şekil 4.27) bakıldığında bir eğrisellik olduğu yani bir optimum noktanın olduğu görülmektedir. Yüksek fan devri ve sıcaklıkta erkenden kabuk oluşumu başladığından kabarma olumsuz olarak etkilenmektedir. Maksimum kabarma 1400 rpm fan devri, 180 °C pişirme sıcaklığı ve pişirme hacmine 100 gr su buharı verilmesi durumunda elde edilmektedir.



Şekil 4. 27 Yükseklik için ana etkiler grafiği

Yüksekliğin bu parametrelere bağlı olarak ifade edilebileceği denklem ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\text{Yükseklik (mm)} = 13,84 + 0,001133 \text{ Fan Devri (rpm)} + 0,1045 \text{ Sıcaklık (°C)} + 0,01732 \text{ Su miktarı (g)} - 0,000007 \text{ Fan Devri (rpm)} * \text{Su miktarı (g)} \quad (4.12)$$

4.5.2 Kütle Kaybı Üzerindeki Etkili Parametreler

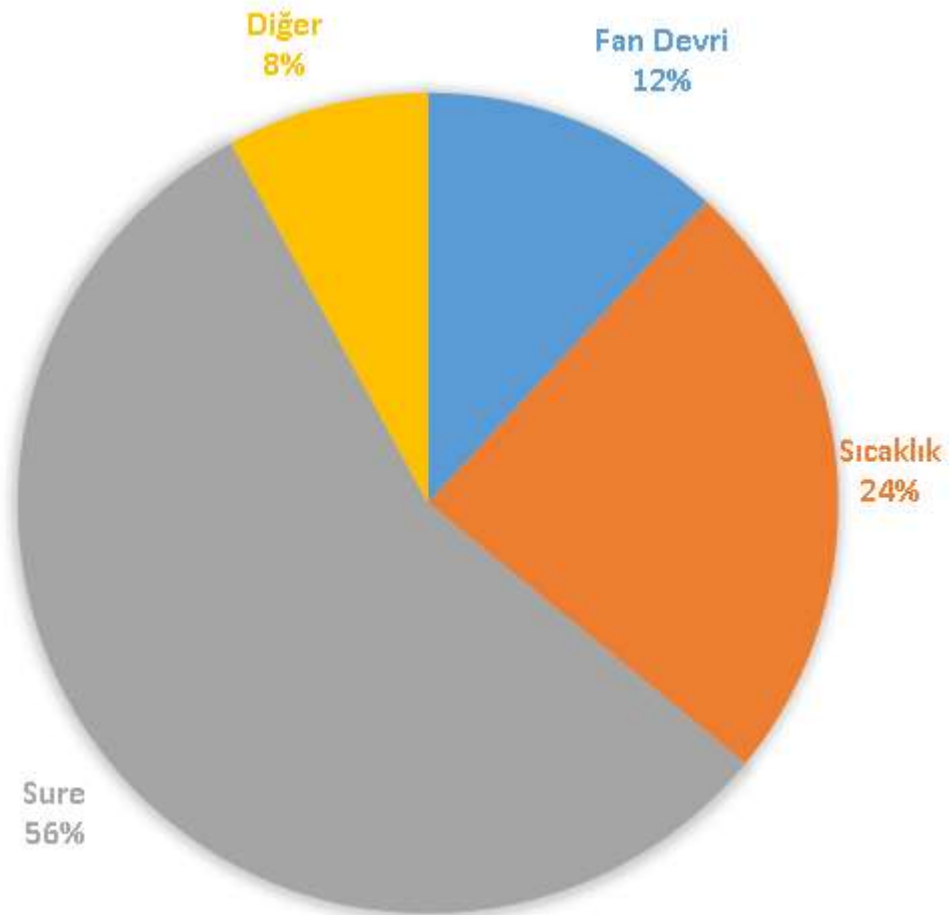
Parametrelerin kütle kaybı üzerindeki etkileri incelendiğinde en baskın parametrenin süre olduğu görülmüştür. Seçilen su miktarı aralığı için su miktarının, kütle kaybı üzerinde bir etkisine rastlanmamıştır.

Analysis of Variance

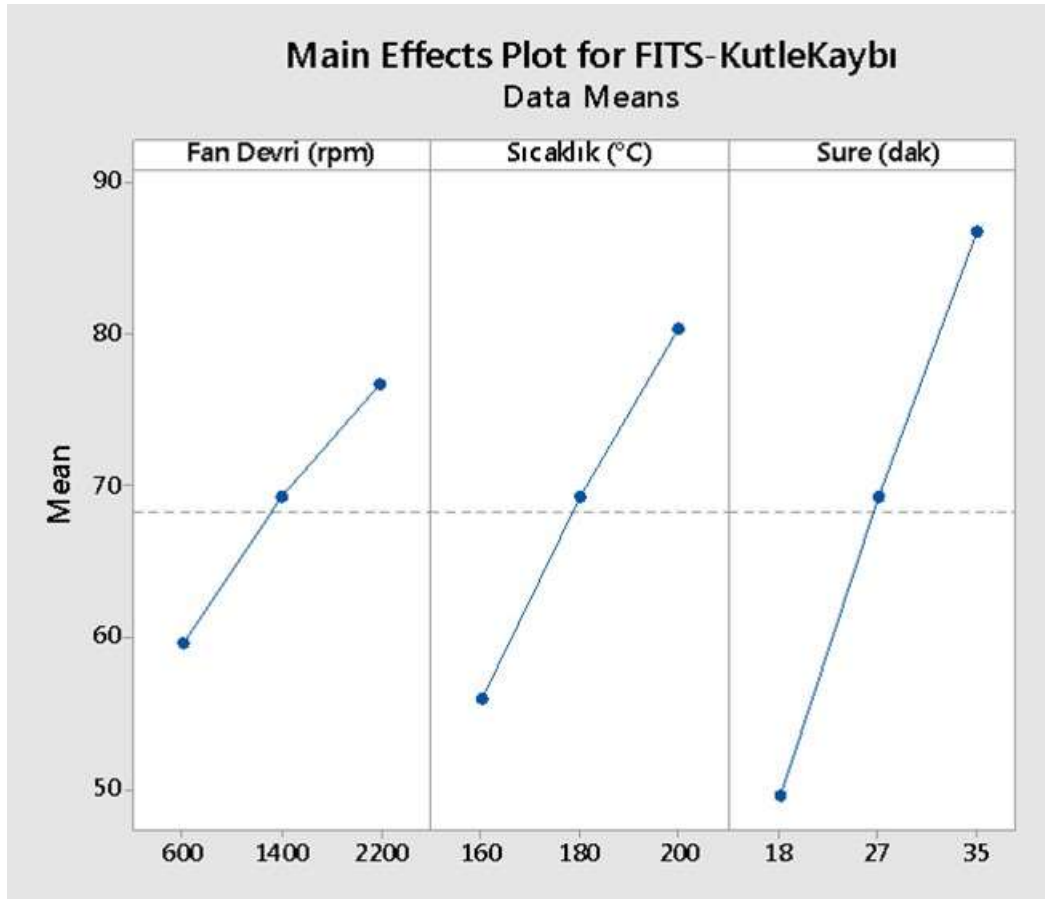
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	18091	6030,2	64,30	0,000
Linear	3	18091	6030,2	64,30	0,000
Fan Devri (rpm)	1	2338	2337,9	24,93	0,000
Sıcaklık (°C)	1	4727	4727,3	50,41	0,000
Sure (dak)	1	11025	11025,5	117,57	0,000
Error	30	2813	93,8		
Lack-of-Fit	13	1568	120,6	1,65	0,166
Pure Error	17	1246	73,3		
Total	33	20904			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
9,68393	86,54%	85,20%	83,04%



Şekil 4. 28 Kütle kaybı üzerindeki etkin parametreler



Şekil 4. 29 Kütle kaybı için ana etkiler grafiği

Kütle kaybı için ana etkiler grafiğine bakıldığında bir tüm parametrelerin artışına bağlı olarak kütle kaybı artış göstermiştir. Kütle kaybının bu parametrelere bağlı olarak ifade edilebileceği denklem ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\text{Kütle Kaybı (g)} = -114,0 + 0,01068 \text{ Fan Devri (rpm)} + 0,6077 \text{ Sıcaklık (°C)} + 2,184 \text{ Sure (dak)} \quad (4.13)$$

4.5.3 Yüzey Rengi Üzerindeki Etkili Parametreler

Parametrelerin kütle kaybı üzerindeki etkileri incelendiğinde en baskın parametrenin sıcaklık olduğu ve düşük oranlarda da olsa tüm parametrelerin kek yüzey rengi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca tekil etkilere ilave olarak ikili ve üçlü etkileşimlerin de yüzey rengi üzerinde etkisi olduğu görülmüştür.

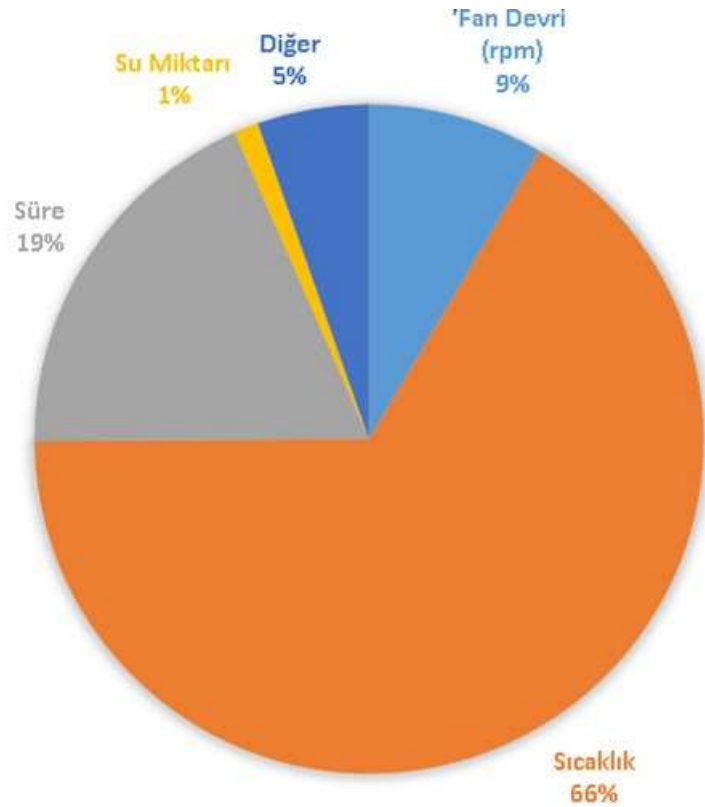
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	385,295	48,162	58,95	0,000
Linear	4	377,975	94,494	115,67	0,000

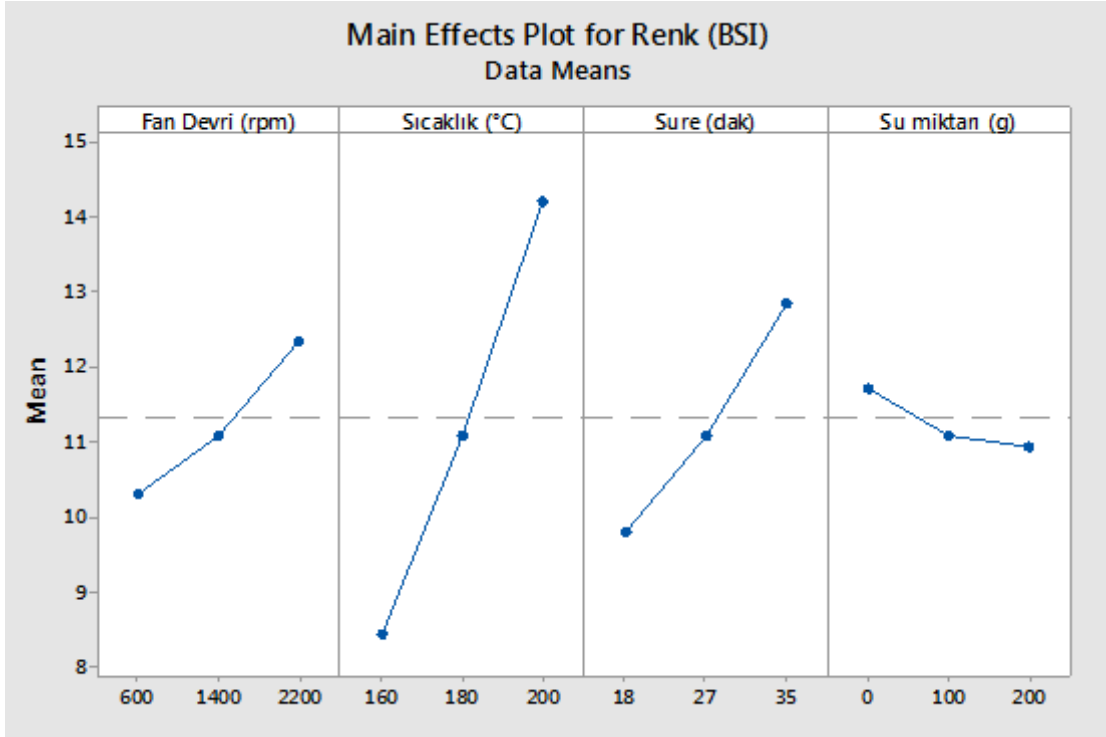
Fan Devri (rpm)	1	33,395	33,395	40,88	0,000
Sıcaklık (°C)	1	265,824	265,824	325,38	0,000
Süre (dak)	1	74,051	74,051	90,64	0,000
Su miktarı (g)	1	4,705	4,705	5,76	0,024
2-Way Interactions	3	2,539	0,846	1,04	0,394
Sıcaklık (°C)*Süre (dak)	1	1,598	1,598	1,96	0,174
Sıcaklık (°C)*Su miktarı (g)	1	0,753	0,753	0,92	0,346
Süre (dak)*Su miktarı (g)	1	0,188	0,188	0,23	0,636
3-Way Interactions	1	4,782	4,782	5,85	0,023
Sıcaklık (°C)*Süre (dak)*Su(g)	1	4,782	4,782	5,85	0,023
Error	25	20,424	0,817		
Lack-of-Fit	8	6,074	0,759	0,90	0,538
Pure Error	17	14,350	0,844		
Total	33	405,719			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,903855	94,97%	93,36%	90,35%



Şekil 4. 30 Yüzey rengi üzerindeki etkin parametreler



Şekil 4. 31 Yüzey rengi için ana etkiler grafiği

Yüzey rengi için ana etkiler grafiğine bakıldığında kaviteye verilen nem/su miktarı hariç tüm parametrelerin artışına bağlı olarak renkte artış göstermiştir. Pişirme ortamına verilen buhar miktarının artması, yüzeyin kurumasını ve kabuk oluşumunu geciktirdiği için renk üzerinde diğer parametrelere göre ters yönde etki yapmıştır.

Yüzey renginin bu parametrelere bağlı olarak ifade edilebileceği denklem ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Renk (BSI)} = & -26,49 + 0,001277 \text{ Fan Devri (rpm)} + 0,1772 \text{ Sıcaklık (°C)} + 0,343 \text{ Sure (dak)} \\ & + 0,1161 \text{ Su miktarı (g)} - 0,00096 \text{ Sıcaklık (°C)} * \text{Sure (dak)} \\ & - 0,000679 \text{ Sıcaklık (°C)} * \text{Su miktarı (g)} - 0,00400 \text{ Sure (dak)} * \text{Su miktarı (g)} \\ & + 0,000023 \text{ Sıcaklık (°C)} * \text{Sure (dak)} * \text{Su miktarı (g)} \end{aligned} \quad (4.14)$$

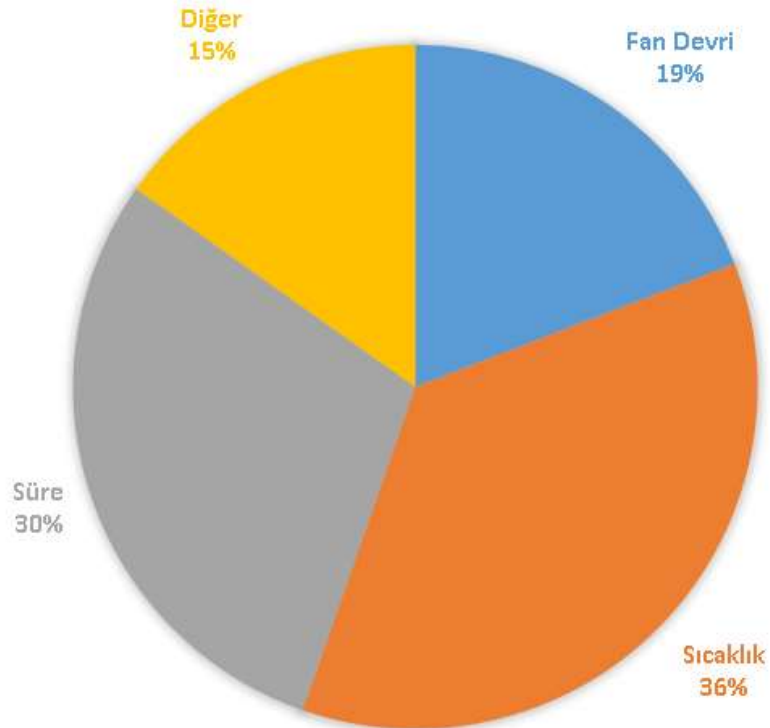
4.5.4 Kabuk Kalınlığı Üzerindeki Etkili Parametreler

Parametrelerin kabuk kalınlığı üzerindeki etkileri incelendiğinde süre ve pişirme sıcaklığının en baskın parametreler olduğu görülmüştür. Fan devrinin de etkisinin sıcaklık ve süreye kıyasla düşük olmasına rağmen baskın bir parametre olduğu belirlenmiştir. Seçilen su miktarı aralığı için su miktarının, kütle kaybı üzerinde bir etkisine rastlanmamıştır. Ayrıca ikili ve üçlü etkileşimler de gözlemlenmiştir.

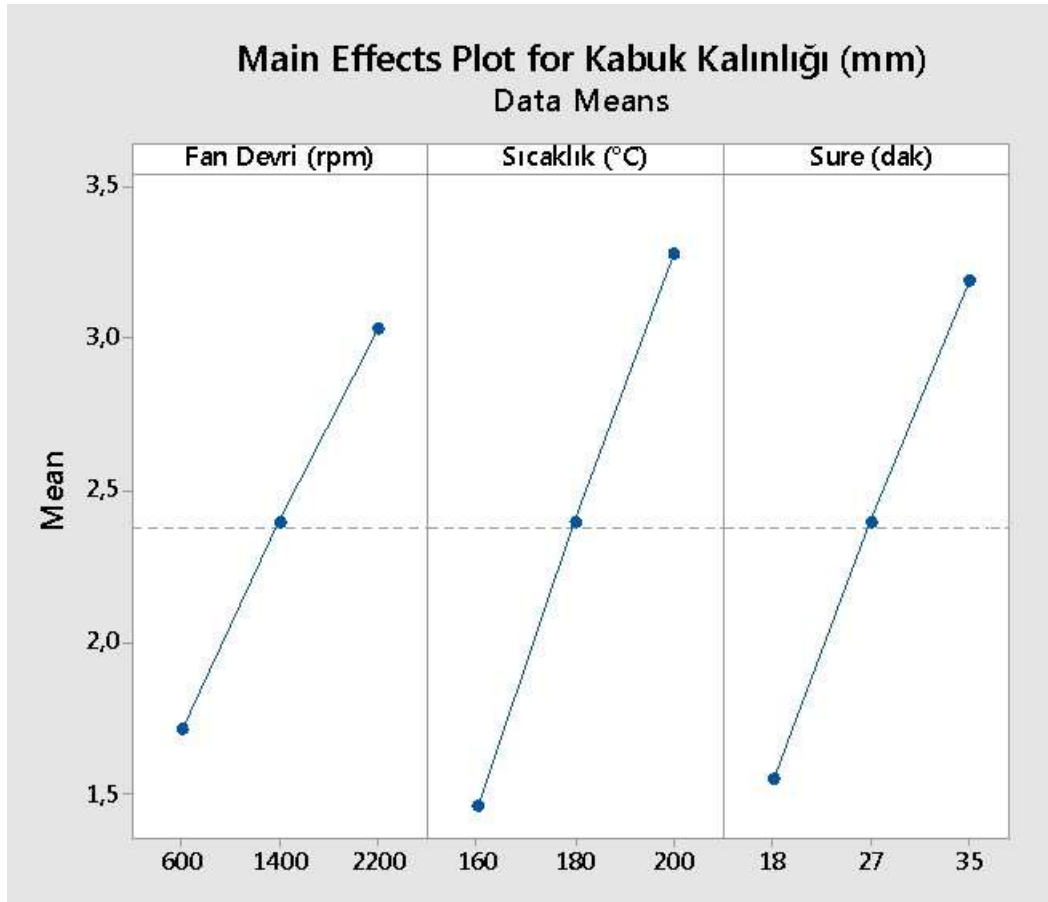
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	69,1358	9,8765	41,00	0,000
Linear	3	61,5177	20,5059	85,13	0,000
Fan Devri (rpm)	1	13,8865	13,8865	57,65	0,000
Sıcaklık (°C)	1	26,2450	26,2450	108,96	0,000
Sure (dak)	1	21,3862	21,3862	88,79	0,000
2-Way Interactions	3	2,5778	0,8593	3,57	0,028
Fan Devri (rpm)*Sıcaklık (°C)	1	0,0010	0,0010	0,00	0,949
Fan Devri (rpm)*Sure (dak)	1	1,0368	1,0368	4,30	0,048
Sıcaklık (°C)*Sure (dak)	1	1,5400	1,5400	6,39	0,018
3-Way Interactions	1	5,0403	5,0403	20,93	0,000
Fan d (rpm)*Sıcaklık(°C)*Sure(dk)	1	5,0403	5,0403	20,93	0,000
Error	26	6,2624	0,2409		
Lack-of-Fit	9	2,7368	0,3041	1,47	0,237
Pure Error	17	3,5256	0,2074		
Total	33	75,3982			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,490778	91,69%	89,46%	85,32%



Şekil 4. 32 Kabuk kalınlığı üzerindeki etkin parametreler



Şekil 4. 33 Yüzey rengi için ana etkiler grafiği

Kabuk kalınlığı için ana etkiler grafiğine bakıldığında tüm parametrelerin artışına bağlı olarak kabuk kalınlığında artış göstermiştir. Yüzey renginin bu parametrelere bağlı olarak ifade edilebileceği denklem ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Kabuk Kalınlığı (mm)} = & -21,74 + 0,01398 \text{ Fan Devri (rpm)} + 0,1189 \text{ Sıcaklık (°C)} \\ & + 0,562 \text{ Sure (dak)} - 0,000077 \text{ Fan Devri(rpm)*Sıcaklık(°C)} \\ & - 0,000499 \text{ Fan Devri (rpm)*Sure (dak)} - 0,00280 \text{ Sıcaklık (°C)} \\ & * \text{Sure (dak)} + 0,000003 \text{ Fan Devri (rpm)*Sıcaklık (°C)*Sure (dak)} \end{aligned} \quad (4.15)$$

4.6 Kabarmanın Sonlandığı Sürenin Belirlenmesi

Kabarma, pişirmenin belirli bir zaman aralığında gerçekleşmektedir. Kabarmanın sonlanmasından sonra yüzey renk değişimi ve kabuk oluşumu başlamaktadır. Bu nedenle kabarmanın sonlandığı süreyi farklı girdi parametrelere bağlı olarak belirlemek ve bunu bir denklem olarak ifade etmek gerekmektedir. Bu nedenle diğer çalışmalarda olduğu gibi farklı pişirme parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Beş farklı fan devri (600, 925, 1400, 1875, 2200 rpm), dört farklı pişirme sıcaklığı (160, 168, 180, 192 °C) ve beş farklı su miktarı (0, 40, 100, 160, 200 gr) olacak şekilde deney planı yapılmıştır.

Çizelge 4. 5 Deney planı ve sonuçları

	GİRDİLER			ÇIKTI
Deney No	Fan Devri (rpm)	Piştirme Sıcaklığı (°C)	Su Miktarı (g)	Süre (saniye)
1	925	168	40	645
2	1875	168	40	571
3	925	192	40	571
4	1875	192	40	531
5	925	168	160	593
6	1875	168	160	556
7	925	192	160	491
8	1875	192	160	471
9	600	180	100	612
10	2200	180	100	505
11	1400	160	100	640
12	1400	200	100	518
13	1400	180	0	628
14	1400	180	200	561
15	1400	180	100	563
16	1400	180	100	560
17	1400	180	100	541
18	1400	180	100	540
19	1400	180	100	562
20	1400	180	100	559

Kabarmanın durduğu süreyi belirleyebilmek için fırın kapağına bir kamera yerleştirilmiş ve saniye de bir yükseklik ölçümü yapılmıştır. Yükseklik değişiminin tamamlandığı süre belirlenerek kayıt altına alınmıştır.

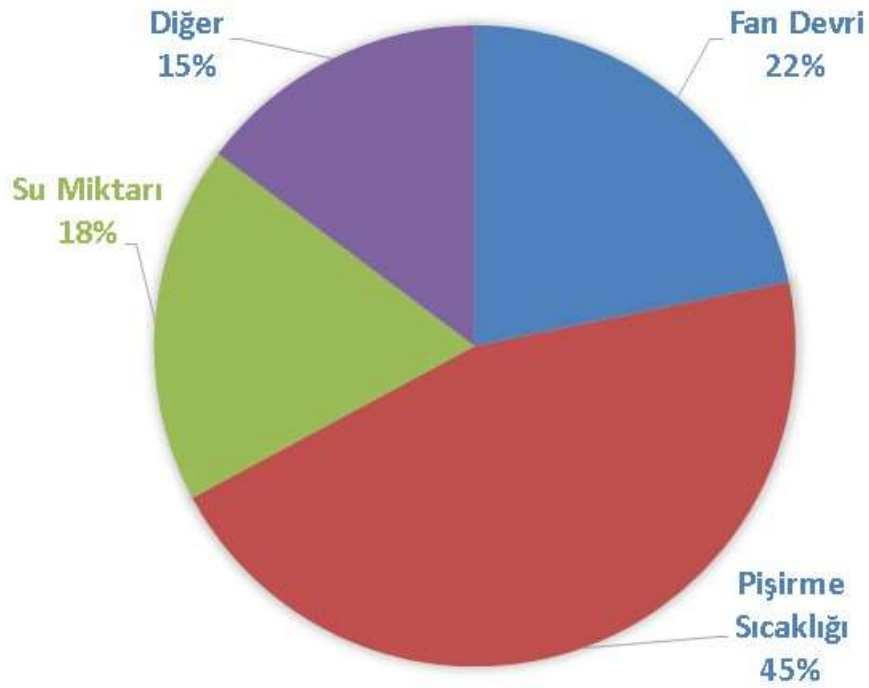


Şekil 4. 34 Yükseklik takibi için fırın kapağına kamera yerleştirilmiş deney düzeneği



Şekil 4. 35 Fırın kapağına kameradan kekin görünümü

Deneysel çalışmaların sonucunda kabarmanın tamamlandığı süre üzerinde en etkili parametrenin sıcaklık olduğu görülmüştür.



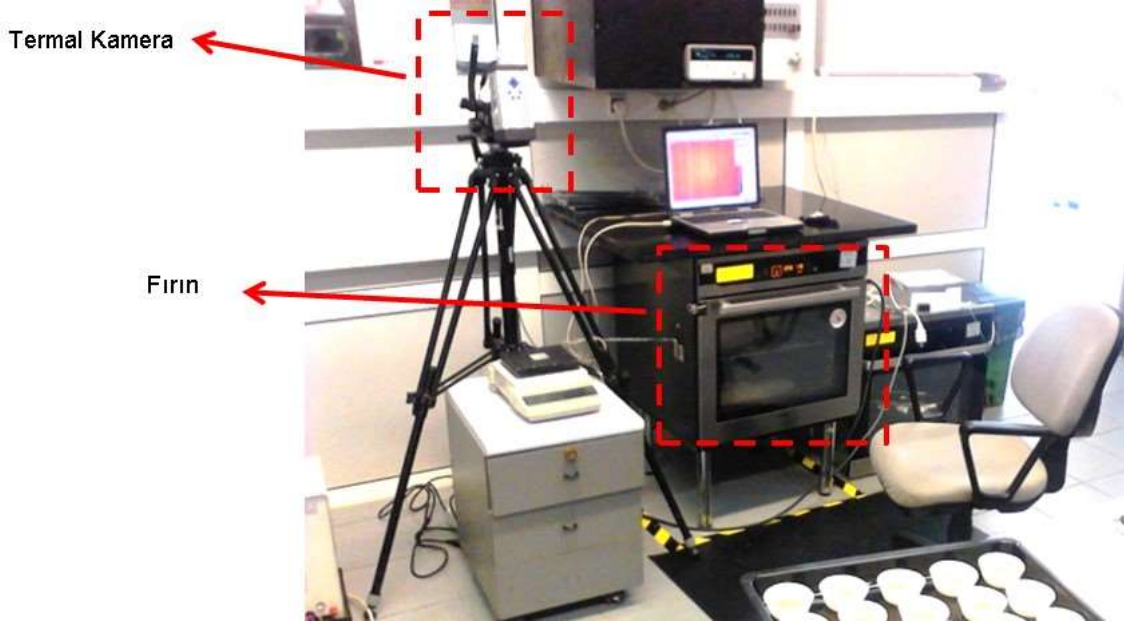
Şekil 4. 36 Kabarmanın tamamlandığı süreyi etkileyen parametreler

Bu verilerden yola çıkılarak kabarmanın durduğu süreyi; fan devri, pişirme sıcaklığı ve su miktarına bağlı olarak veren korelasyon elde edilmiştir.

$$\text{Kabarmayı Durduğu Süre (saniye)} = (1236.91) + (-0.0540231 * \text{Fan Devri}) + (-3.11671 * \text{Pişirme Sıcaklığı}) + (-0.393675 * \text{Su Miktarı}) \quad (4.16)$$

4.7 Üst Yüzey Rengi ile Yüzey Sıcaklığı İlişkisinin Belirlenmesi

Yapılan çalışmalarda üst yüzey rengi üzerindeki en baskın parametrenin (%66) yüzey sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak, üst yüzey ile üst yüzey rengi arasındaki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kurulan deney düzeneğinde, fırın kapağı açılıp kek dışarı çıkartıldığı anda termal kamera ile kek üst yüzey sıcaklıkları ölçülerek bilgisayara kaydedilmektedir.

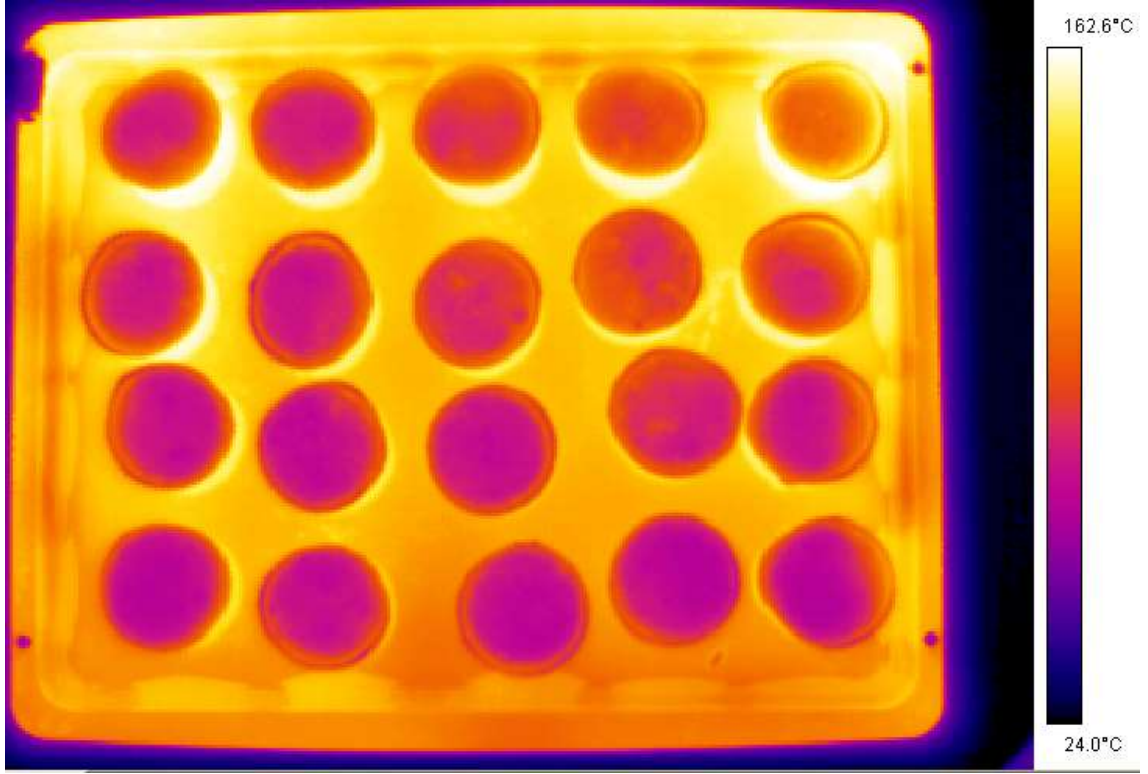


Şekil 4. 37 Termal kamera ile kek üst yüzey sıcaklık ölçümü

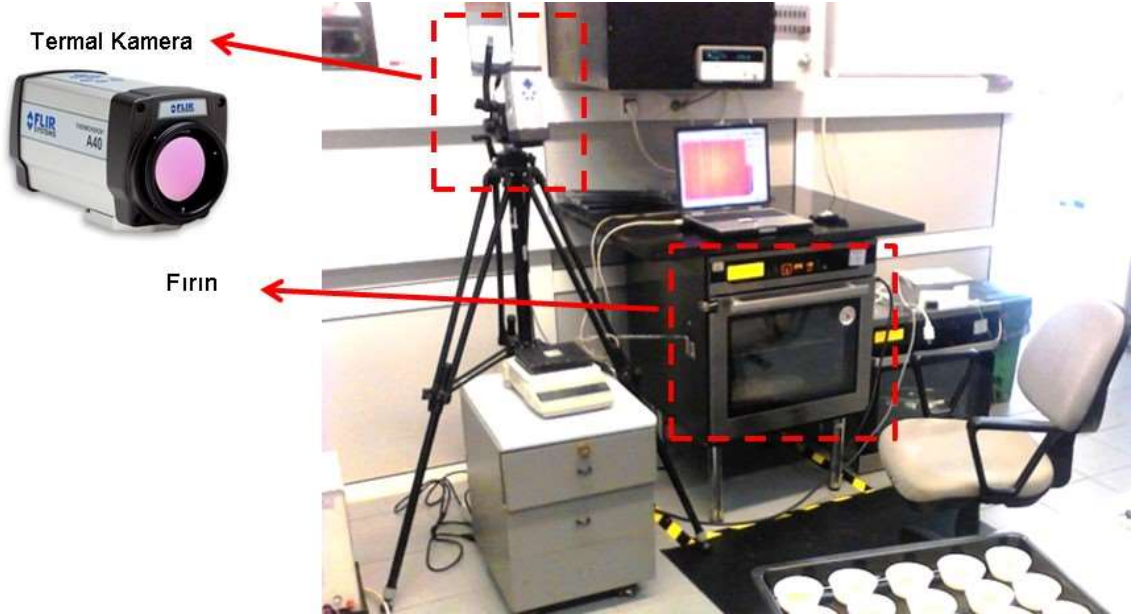
Yapılan çalışmalarda üst yüzey rengi üzerindeki en baskın parametrenin (%66) yüzey sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak, üst yüzey ile üst yüzey rengi arasındaki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kurulan deney düzeneğinde, fırın kapağı açılıp kek dışarı çıkartıldığı anda termal kamera ile kek üst yüzey sıcaklıkları ölçülerek bilgisayara kaydedilmektedir. Farklı pişmişlik değerlerini (BSI skalasında 8-15 arasındaki değerler) elde edebilmek amacıyla 80 adet kek farklı pişirme sürelerinde pişirilmiştir.

Deneylerde Flir A40M termal kamera kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneğinde, fırın kapağı açılıp kek dışarı çekildiği anda sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü yapılan keklerin, daha sonra renk ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri ile renk dağılımları arasındaki ilişki Şekil 4.40'da verilmektedir. İlişki incelendiğinde lineer ve $y=4,23x+68,671$ olarak ifade edilen bir ilişki elde edilmiştir ($R^2=0,8631$). Bu

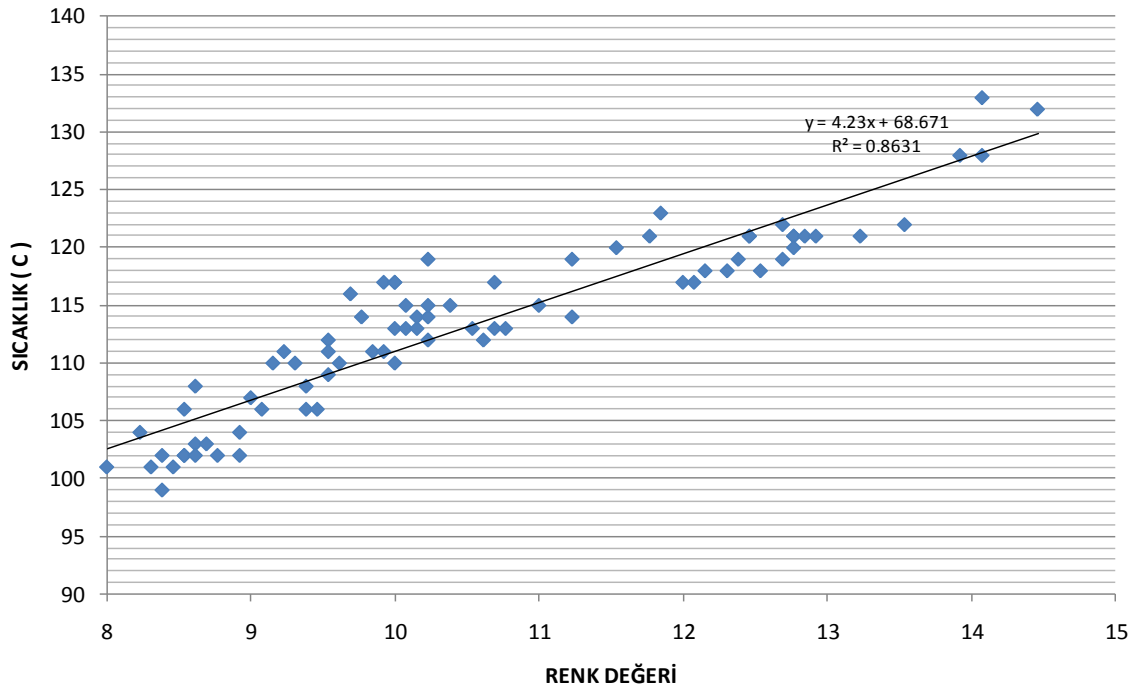
basitleştirilmiş ilişki modelleme sürecinde üst yüzey rengi ve kabuk kalınlığının belirlenmesinde kullanılacaktır.



Şekil 4. 38 Kegin termal kamera ile üst yüzey sıcaklığının ölçülmesi



Şekil 4. 39 Kek orijinal fotoğrafı, renk dağılımı ve sıcaklık dağılımının karşılaştırılması



Şekil 4. 40 Yüzey sıcaklığı ile BSI renk skalasındaki renk değerleri arasındaki ilişki

MODELLEME ÇALIŞMALARI

5.1 Çalışmanın Amacı

Deneysel çalışmalar kapsamında, pişirme üzerindeki etkin parametreler ve bu parametrelerin pişirme sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmaların sonucu olarak kabarma, kabuk kalınlığı, üst yüzey renk değişimi ve kütle kaybını ifade edecek ampirik ifadeler ortaya konulmuştur. Aynı zamanda, bu deneylerden elde edilen bilgiler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için sınır koşulları olarak da kullanılacaktır.

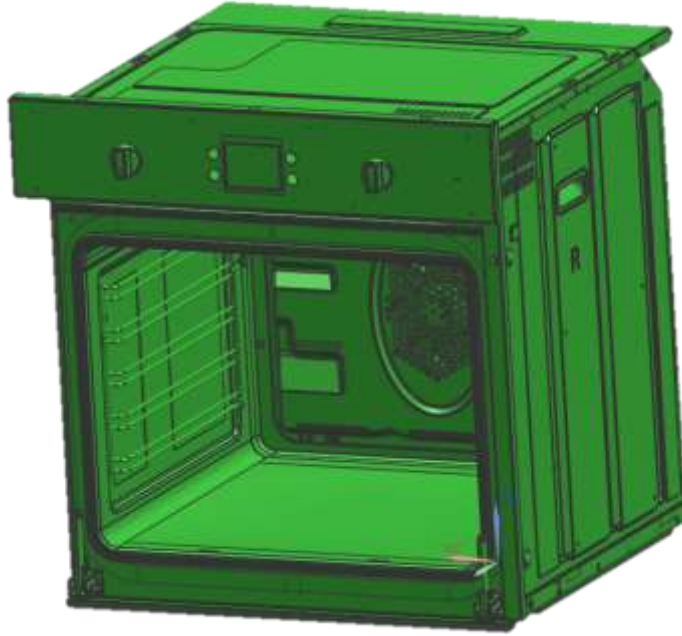
Modelleme çalışmalarında, deneysel çalışmalarda kullanılan kağıtta kekin (cup cake) bilgisayar destekli hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz yazılımı olan Ansys Fluent ile modellenmesi yapılacaktır. Elde edilen sonuçlar ile deneysel olarak ölçülen sonuçların karşılaştırması yapılacaktır.

Kekin pişirilme sürecini modellerken, kekin kabarması ve meydana gelen kütle transferi de analizlere dahil edilecektir. Çözüm süresinin azaltılması amacıyla bazı yaklaşımlar yapılmıştır. Yapılan denemelerde sürekli olarak tüm fırının modellenmesi analiz edilmesi çözüm sürecini çok zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, öncelikli olarak gerçek durumları simüle edecek şekilde komple bir fırın analizi gerçekleştirilmiştir. Seçilen bir kek etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımı kullanılarak, diğer analizlerde sadece bir kekin pişirilmesi modellenmiştir. Böylelikle model yapısının sadeleştirilmesi ve eleman sayısının azaltılması sağlanmıştır.

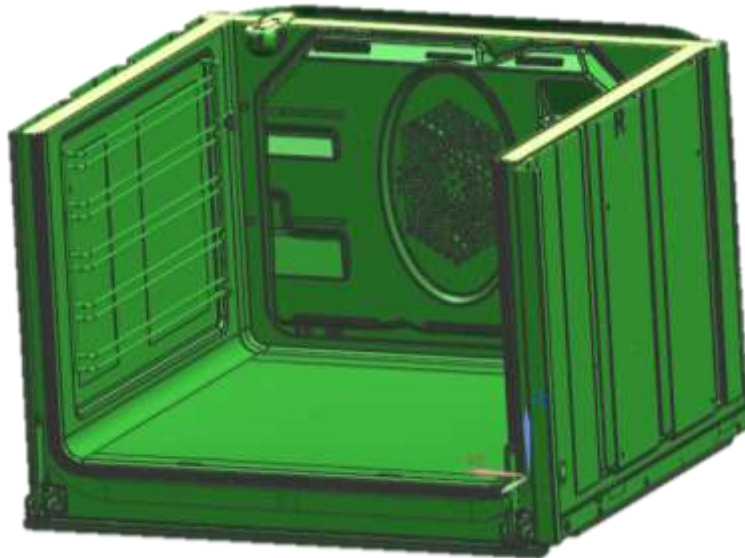
Bu bölümde analiz çalışmalarında kullanılan modeller, çözüm esnasında izlenen yol ve elde edilen sonuçlar paylaşılmaktadır.

5.2 Fırın Modelleme Çalışmaları

Fırın modelleme çalışmalarında, pişirmelerin yapıldığı, zorlanmış taşınım ile pişirme yapan (turbo fan ve ısıtıcı) bir fırın modeli kullanılmıştır.

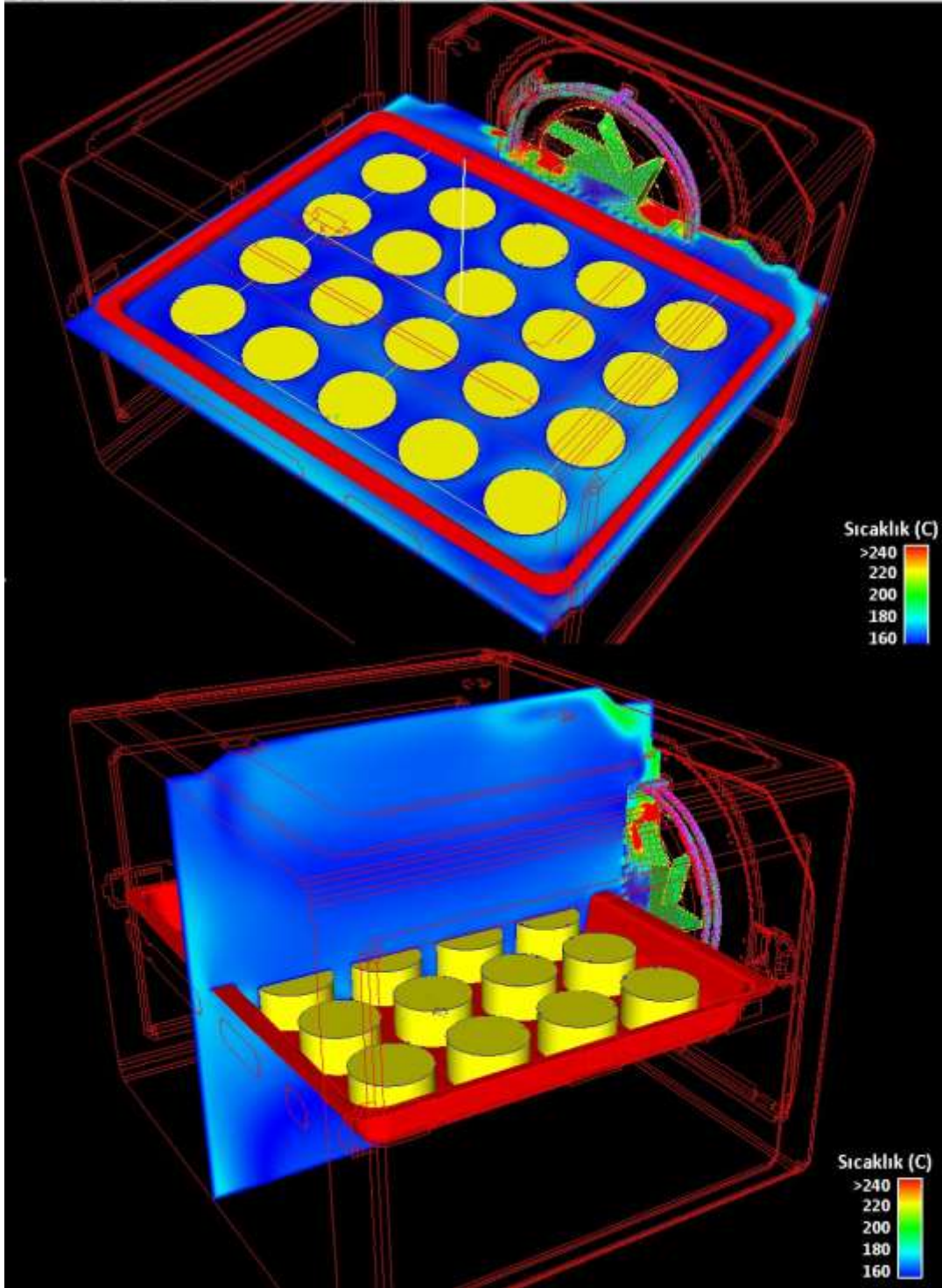


Şekil 5. 1 Analizlerde kullanılan fırın modeli



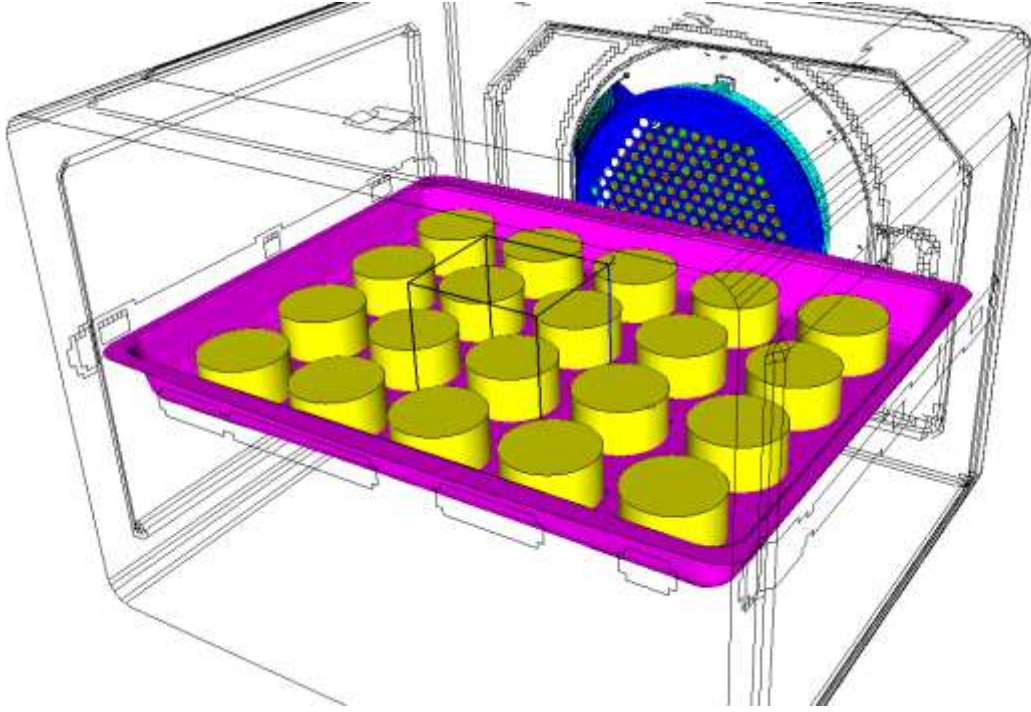
Şekil 5. 2 Analizlerde kullanılan fırın modelinin kesit görünümü

Çözüm ağı için 10 milyon adet üçgen prizma (tet) eleman kullanılmıştır. Hazırlanan modele, izolasyon, fırın şasisi, turbo fan/ısıtıcı, tepsi ve 20 adet kek dahil edilmiştir. Türbülans modeli olarak, "Reynolds Avarage Navier Stokes (RANS)" modellerinden biri olan "Realizable k- ϵ " modeli kullanılmıştır.

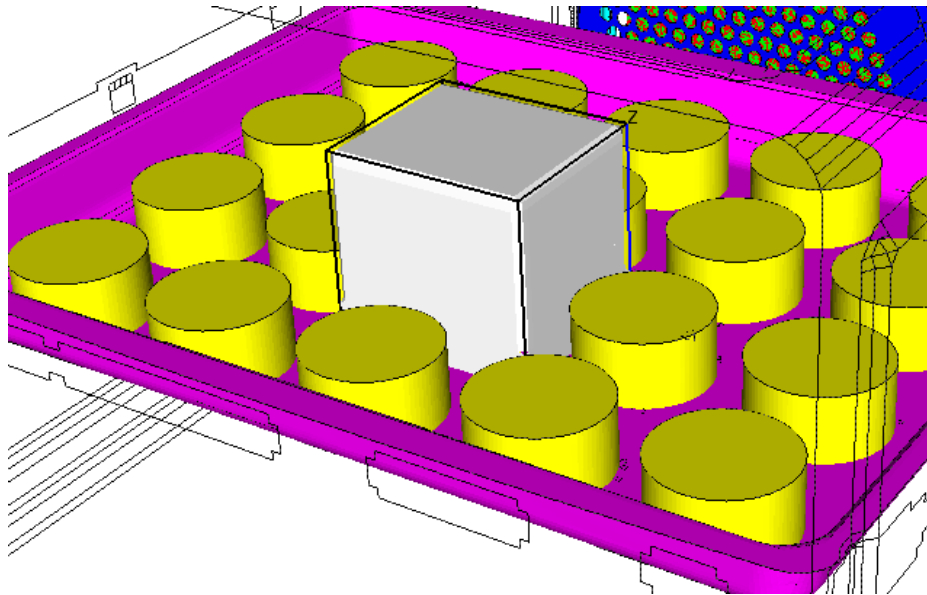


Şekil 5. 3 Tepsi düzleminde ve dikey kesitte sıcaklık dağılımı

Fırın hacmi incelendiğinde genel olarak homojen bir sıcaklık dağılımı olduğu görülmüştür. Bu nedenle seçilen bir kek etrafında bir küp oluşturulmuştur. Bu yüzeyler ayrıca tanımlanarak, yüzeylerdeki hız ve sıcaklık bilgisinin alınması amaçlanmaktadır.



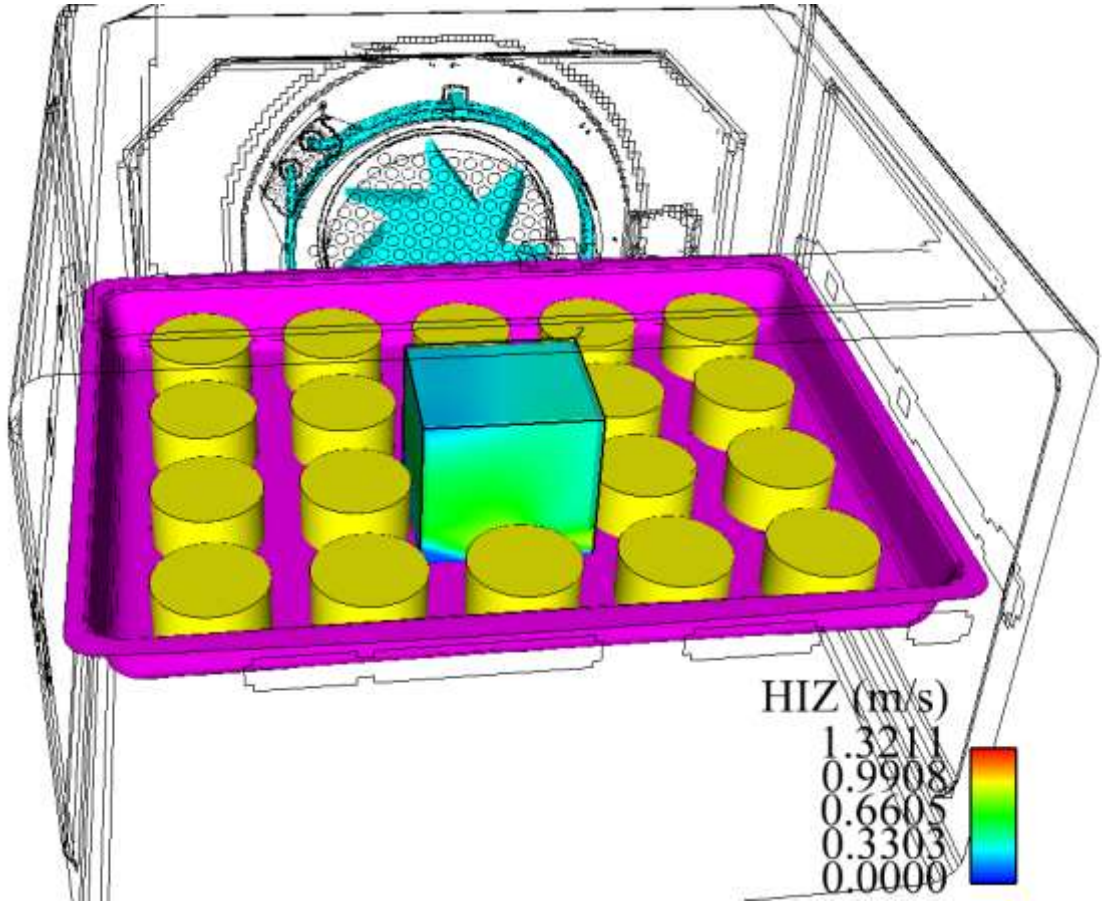
Şekil 5. 4 Analiz modeli ve kek etrafında oluşturulan küp hacmi



Şekil 5. 5 Kek etrafında oluşturulan hacim

Analiz, fırın merkez sıcaklığı 180°C , fan devri 1400 rpm, fırın dışındaki taşınım katsayısı $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ olacak şekilde yapılmıştır. Işınım ile ısı transferi analizlere dahil edilmemiştir.

Tamamlanan analizlerden kek etrafındaki hacmin yüzeylerinde oluşan hız ve sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Bu bilgiler profil dosyası olarak yazdırılmış olup, kek modelleme çalışmalarında sınır koşulu olarak kullanılacaktır.



Şekil 5. 6 Kek etrafında oluşturulan hacimde oluşan hız dağılımı

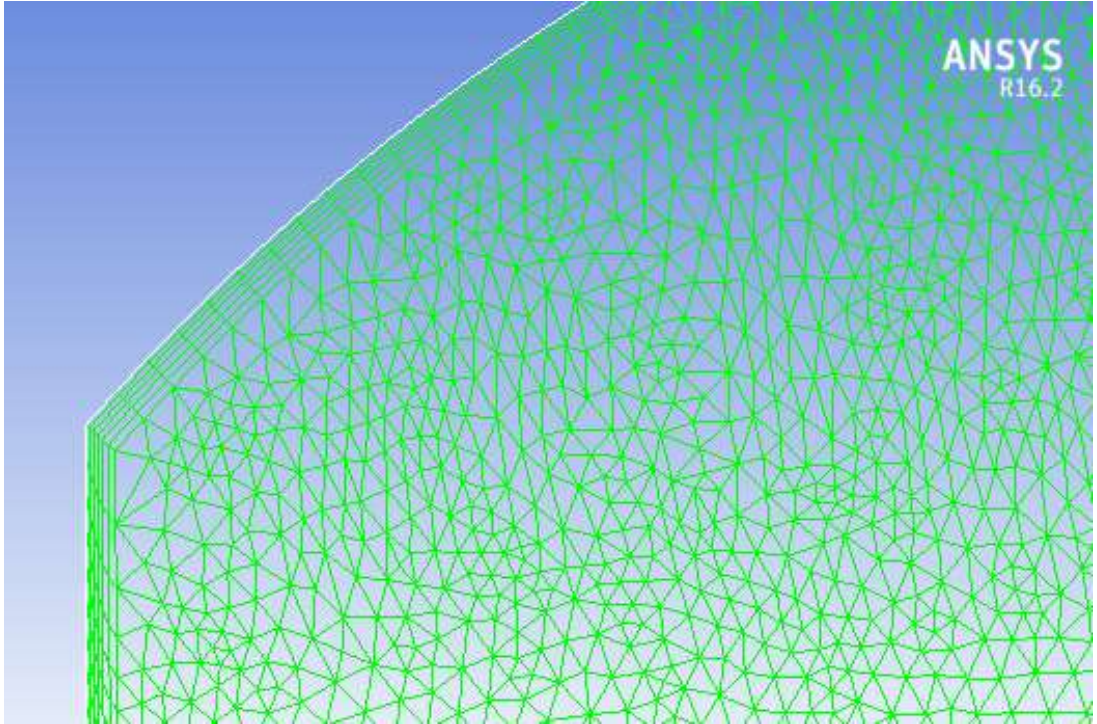
5.3 Kek Modelleme Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında, tek bir kek üzerindeki ısı ve kütle transferi incelenmiştir. Bu analizlerde, deneysel çalışmalarda elde edilen bilgiler doğrultusunda kek üst yüzeyinin kabarması, yüzey renk değişimi, kabuk oluşumu ve kütle kaybı incelenecektir. Çözüm ağındaki eleman sayısının azaltılması ve çözüm hızının artırılması amacıyla; tüm fırın analizinde elde edilen hız ve sıcaklıklar sınır koşulu olarak kullanılacaktır.

Fırın modelleme çalışmasında kullanılan küp ve içindeki tek kek alınarak çözüm ağı oluşturulacaktır. Ayrıca daha önceki deneysel çalışmalarda elde edilen kabarma profilleri, yüzey kızarma davranışları da modelin içerisine dahil edilmiştir.

5.3.1 Geometri ve Çözüm ağı

Analizde kullanılacak olan geometri bir kek ve keki çevreleyen bir dikdörtgenler prizması hacimden oluşmaktadır. Final çözüm ağı oluşturulmadan önce sonuçların çözüm ağına bağılılığı (mesh dependency) incelenmiştir. Çözüm süresini arttırmayacak, aynı zamanda çözüm sonucunu olumsuz olarak etkilemeyecek şekilde eleman sayısı belirlenmiştir. Analizlerde toplam 350.000 üçgen prizma (tet) eleman kullanılmıştır. Kek yüzeylerindeki sınır tabakanın modellenmesi amacıyla 5 katmanlı sınır tabaka ağ yapısı uygulanmıştır.

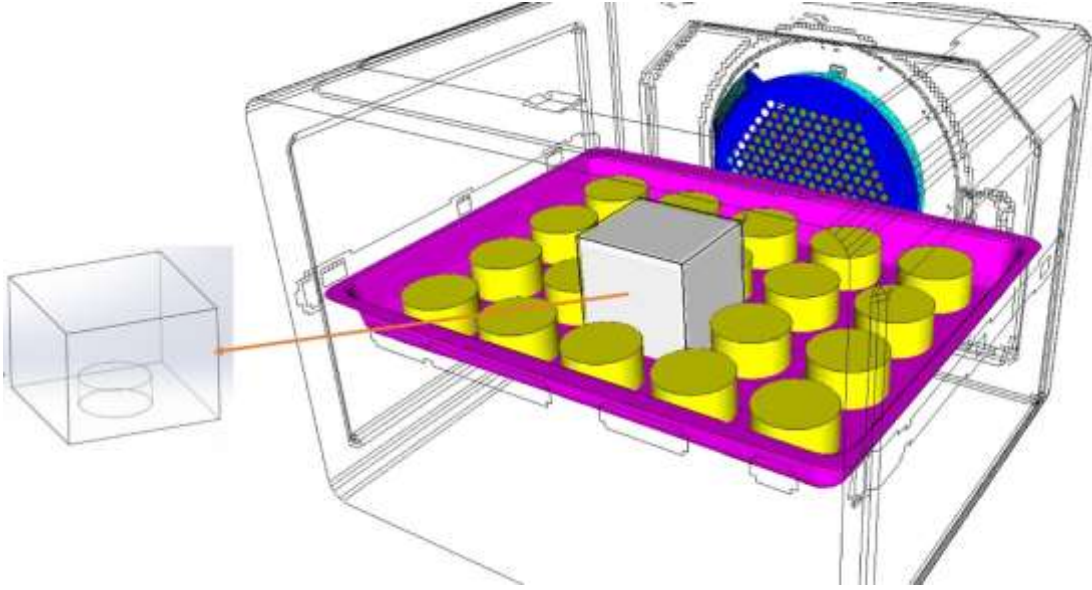


Şekil 5. 7 Çözüm ağı yapısı

5.3.2 Sınır Şartları

Tüm fırın modeli üzerinde yapılan analizlerle, kek etrafındaki hava hızı, hava sıcaklığı gibi parametreler belirlenmiş ve bir profil dosyası oluşturulmuştur. Bu profil dosyası, kek analizinde ise sınır koşulu olarak tanımlanmaktadır. Böylelikle tüm fırın hacminin analizinin yapılması yerine daha düşük eleman sayısına sahip bir hacim için analizlerin daha kısa sürede yapılabilmesi mümkün olmaktadır.

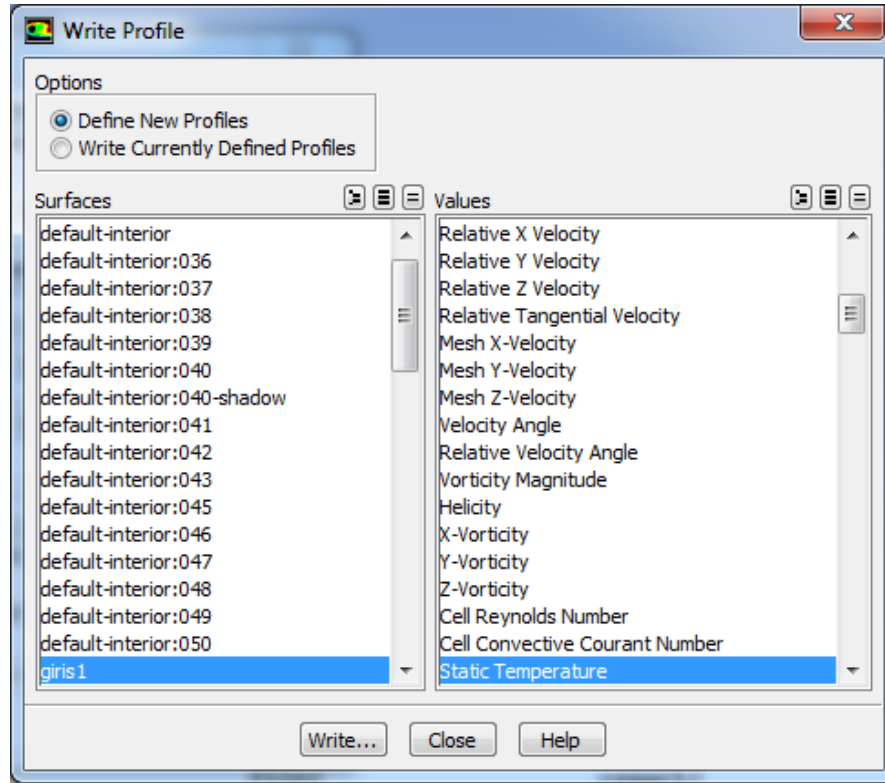
Tüm fırının analizinde, seçilen bir kek 10x10x10 cm'lik bir hacim içine alınmıştır. Bu hacmin yan ve üst duvarları “interior”, kekin tepsiye oturduğu yüzey ise “wall” sınır şartı olarak belirlenmiştir.



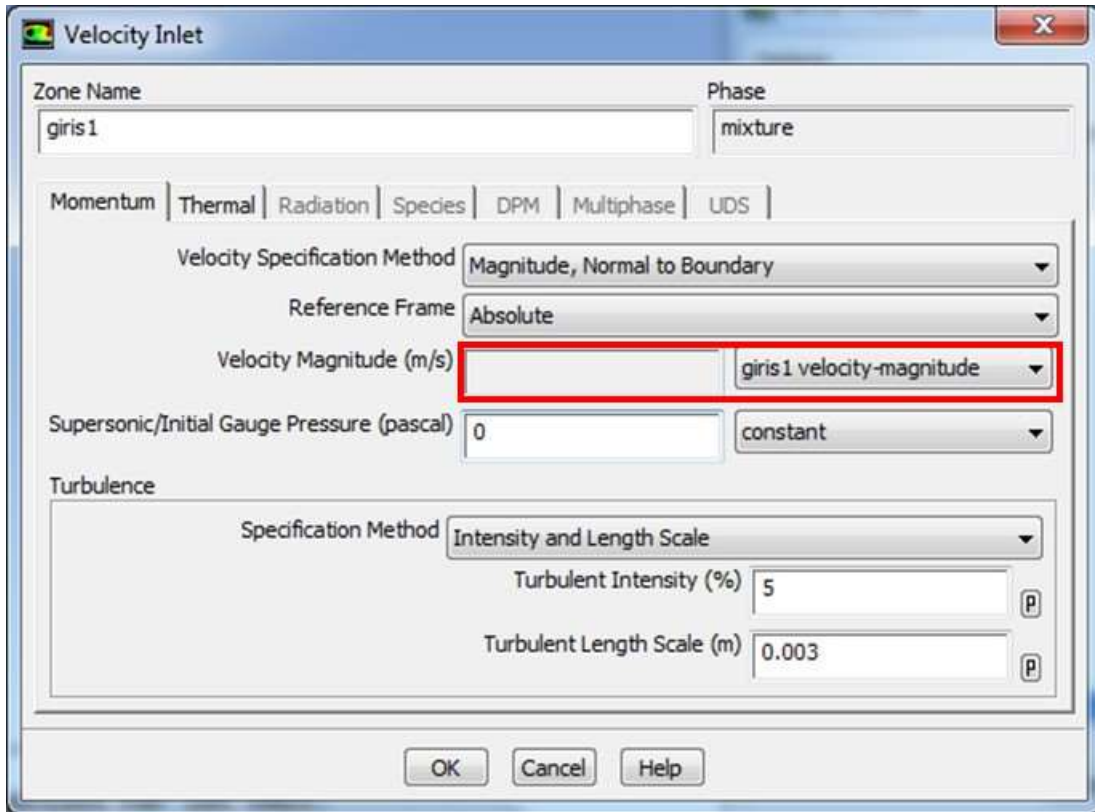
Şekil 5. 8 Kek analizindeki sınır koşulları için seçilen küp hacmi

Tüm fırında, rejim durumu için analiz tamamlandığında küpün 6 duvarı için oluşan sınır koşulları profil dosyası olarak yazdırılmıştır. Bu yüzeyler ayrı ayrı seçilerek, bu yüzeylerdeki sıcaklık ve hız değerleri profil dosyası olarak kaydedilmiştir.

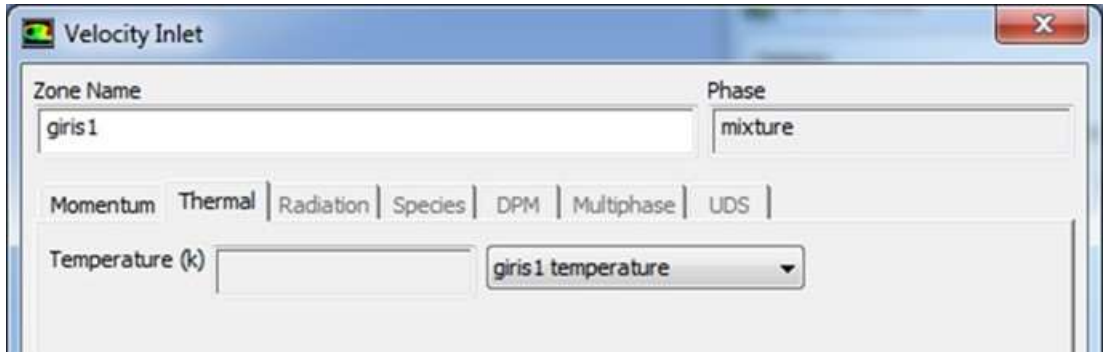
Örnek bir profil dosyası aşağıdaki şekilde oluşmaktadır. “Profil adı” kullanıcının tanımladığı bir isim, “adet” otomatik olarak belirlenen ve seçilen yüzeydeki eleman sayısına bağlı oluşan sayıdır. X ve Y (3 boyutlu ise Z) konum bilgisi, “seçilen büyüklük” yazdırılmak istenilen (hız, sıcaklık vs.) büyüklüktür. Bu profil dosyası okutulup, ilgili yüzey için atandığında, o duvarda bu hız ve sıcaklık değerlerinin oluşturulması sağlanabilmektedir. Kek modelleme çalışmasında zamana bağlı bir analiz yapılmakta olup, tüm analiz süresi boyunca profil dosyasıyla atanan değerler değişim göstermeden sabit kalmaktadır. ((“Profil adı” “adet”) (x x₁ x₂ x₃ x₄) (y y₁ y₂ y₃ y₄) (“seçilen büyüklük” a₁ a₂ a₃ a₄))



Şekil 5. 9 Profil dosyasının oluşturulması



Şekil 5. 10 Hız için profilin seçilmesi



Şekil 5. 11 Sıcaklık için profilin seçilmesi

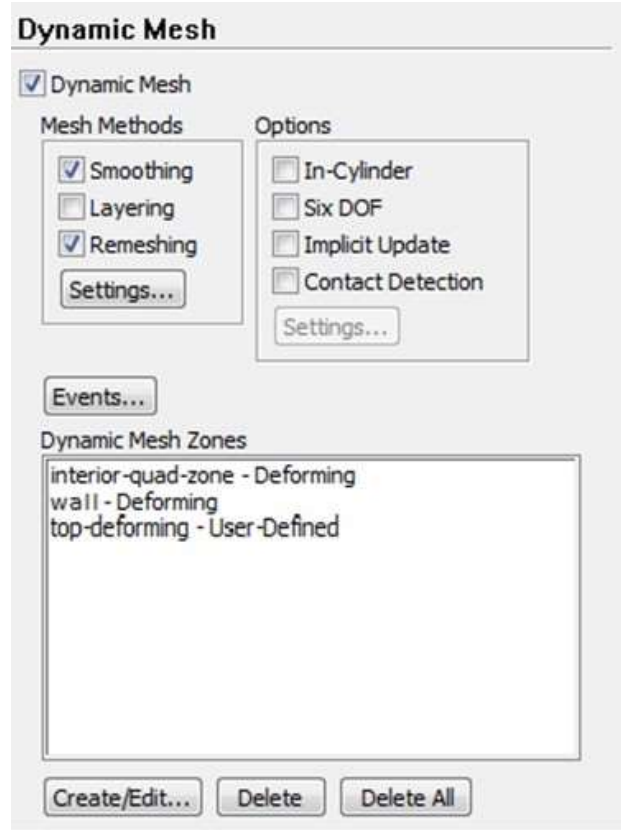
Profil dosyası okutturulduğunda, sınır koşulları seçim penceresinde seçilebilir hale gelmektedir. Alt duvar için duvar sınır koşulu ve profil dosyasından sıcaklık profili seçilmiştir. Fırın kapağı tarafındaki yüzey hariç, diğer yan yüzeyler ve üst yüzey için hız giriş koşulu (velocity inlet) seçilmiştir. Giriş hızı ve giriş sıcaklığı profil dosyasından belirlenmiştir. Fırın kapağı tarafındaki yüzey için basınç sınır koşulu (pressure outlet) seçilmiştir. Deneysel olarak rüzgar tüneline belirlenen gözenekli ortam özellikleri; viskoz terimin katsayısı ($1/\alpha$) $1,27E+09$ ($1/m^2$), atalet katsayısı (C_2) 17372 ($1/m$) olarak kullanılmıştır.

5.3.3 Hareketli Ağ Yapısı

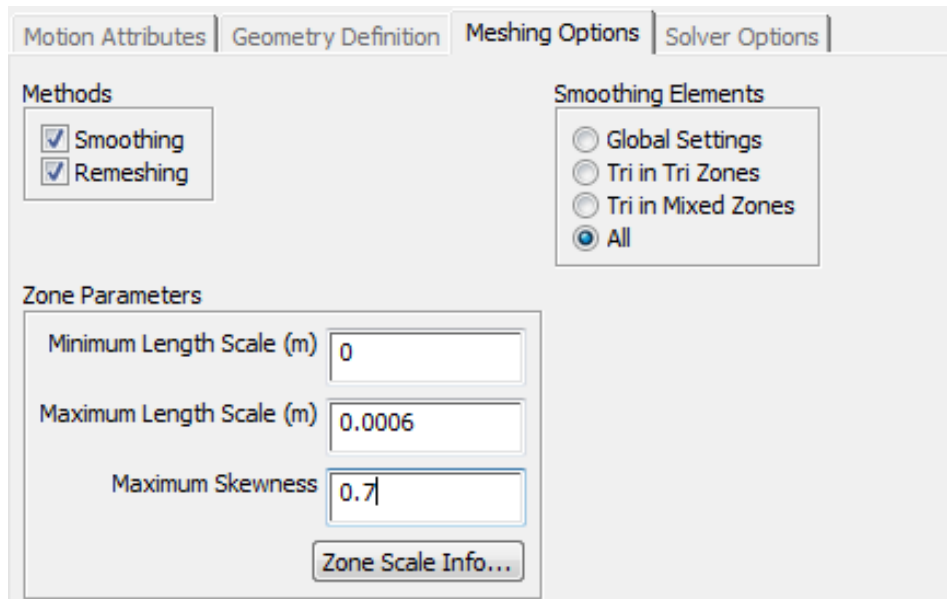
Kekin modellenmesi amacıyla, kek üst yüzeyinde kabarma hareketini modelleyecek şekilde hareketli ağ yapısı kullanılmıştır. Hareketli ağ yapısı için kullanıcı tanımlı fonksiyon oluşturulmuş ve üst yüzeyin hareketi bu tanıma göre gerçekleştirilmiştir. Kabarma profilinin belirlenmesi amacıyla deneysel olarak elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu bilgilerden yola çıkılarak kabarma hızı 0.000026 m/s olarak belirlenmiştir.

Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımında, hareketli ağ metodunun kullanılabilmesi için “Dynamic mesh” seçeneği aktif hale getirilmiştir. Ayrıca, “dynamic mesh” menüsü altında “yeniden ağ yapısı oluşturma” (Remeshing) ve “yumuşatma” (smoothing) seçenekleri aktif hale getirilmiştir. Bu seçenekler ağ yapısının hareketi esnasında ağ yapısının düzeltilmesi ve yeniden oluşturulmasını sağlayarak eleman kalitesinin bozulmasına engel olmaktadır. Kekin yan duvarı, iç hacmi ve kekin dışında kalan hacim için deformasyon sınır koşulu tanımlanmıştır. Çözüm ağ eleman boyutu için

maksimum boyut 0.0006 m ve maksimum bozukluk 0,7 olarak tanımlanmıştır. Çözüm ağının hareketi esnasında, elemanların bu kriterleri aşması durumunda yumuşatma ve yeniden çözüm ağı oluşturma işlemleri otomatik olarak yapılmaktadır.

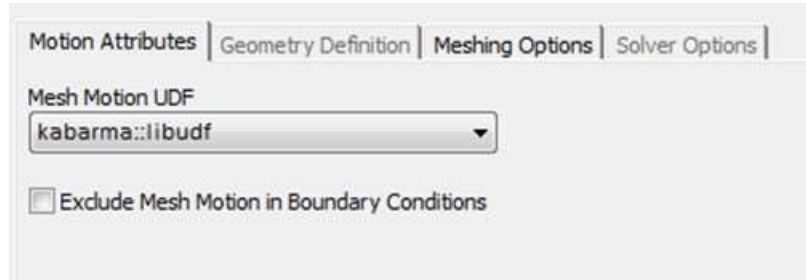


Şekil 5. 12 Hareketli ağ hareketinin aktif hale getirilmesi



Şekil 5. 13 Deformasyon koşulu için seçilen parametreler

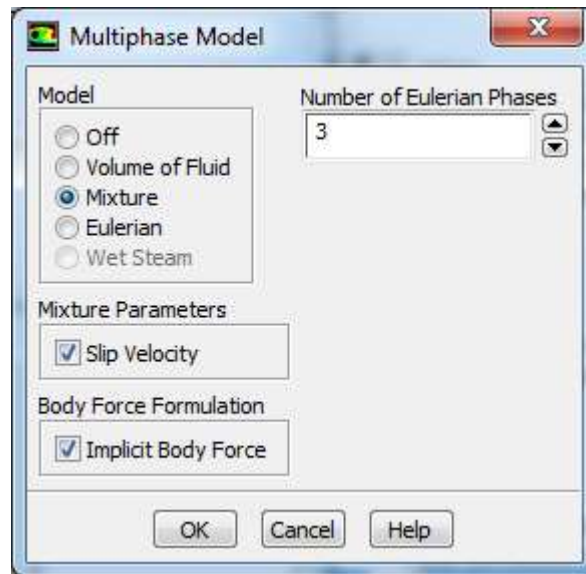
Kabarmanın gerçekleşeceği üst yüzey için kullanıcı tanımlı fonksiyon oluşturulmuş ve yüzey hareketi tanımlanan fonksiyona göre gerçekleşmektedir. Bu hareketin aktif hale getirilmesi için ise “mesh motion UDF” seçeneğinden kullanıcı tanımlı fonksiyon (KTF) seçilmiştir.



Şekil 5. 14 Kabarma için kullanıcı tanımlı fonksiyonun aktif hale getirilmesi

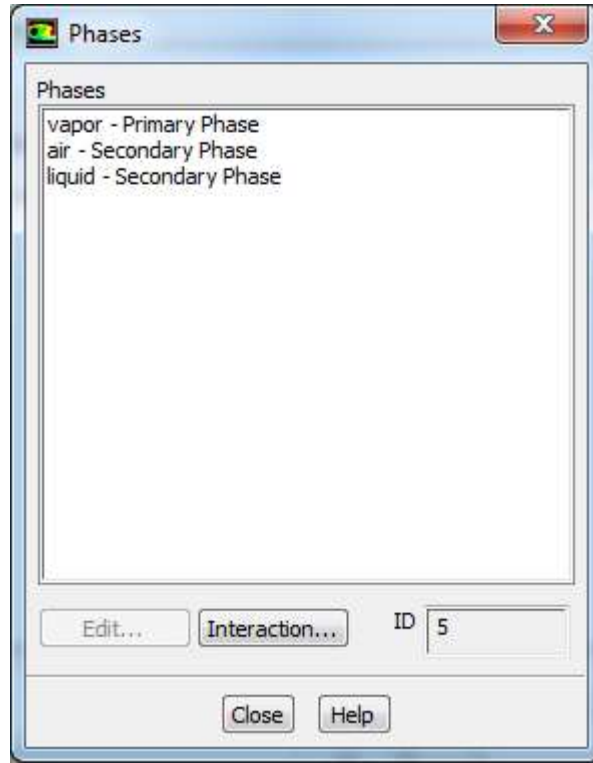
5.3.4 Kütle Transferi Modeli

Kütle transferinin de analizlere dahil edilebilmesi için Ansys Fluent yazılımının dahili kütle transferi modülü aktif hale getirilmiştir. “Multiphase” modülünde “mixture modeli” seçilmiş ve su, su buharı, hava olmak üzere 3 faz seçimi yapılmıştır.

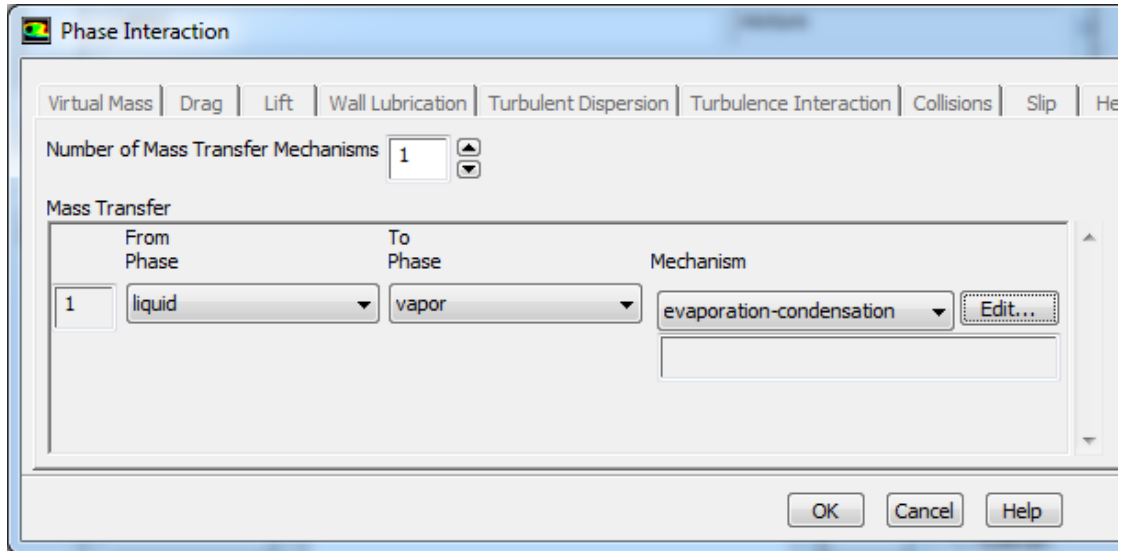


Şekil 5. 15 Multiphase modelin seçimi (Mixture)

Seçilen üç faz için Fluent'teki mevcut malzeme kütüphanesinden malzeme özellikleri alınmıştır. “Phases” menüsü altından kullanılacak olan fazlar ve malzemelerin seçimi yapılmıştır. “Interaction” menüsü üzerinden, buharlaşmanın sudan su buharına doğru olacağı seçilmiştir.

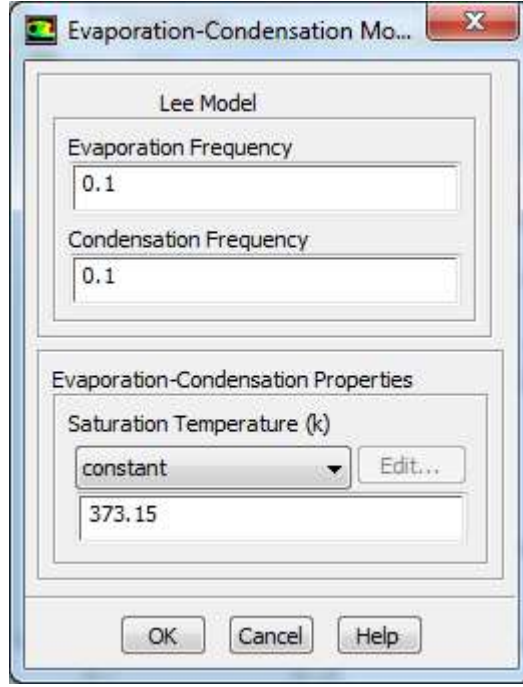


Şekil 5. 16 Multiphase modelin seçimi (Phases)



Şekil 5. 17 Multiphase modelin seçimi (Interaction)

Ansys Fluent yazılımında kütle transferi modeli olarak Lee modeli kullanılmaktadır. buharlaşma ve yoğuşma frekansı olarak 0,1 (mevcut katsayı) kullanılmıştır. Faz değişiminin olduğu sıcaklık 373,15 K olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5. 18 Buharlaşma ve yoğuşma modelin seçimi

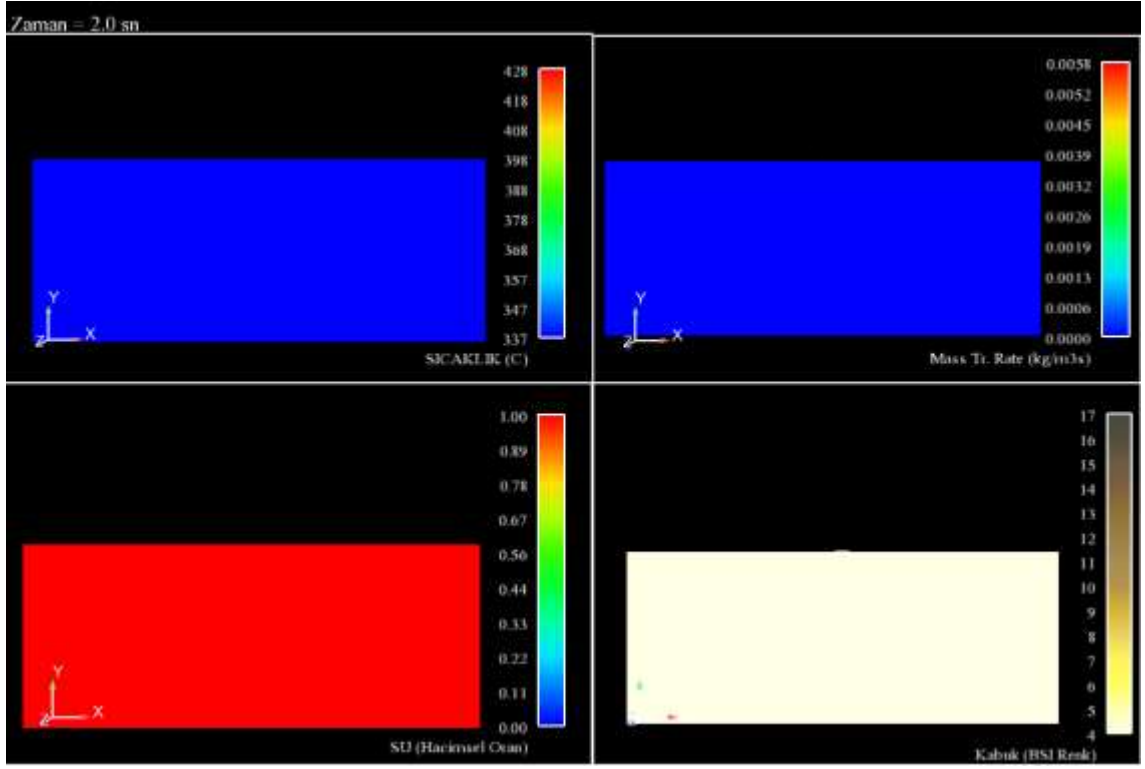
5.3.5 Başlangıç Koşulları (Initialization)

Başlangıç koşullarının belirlenmesi amacıyla “standart Initialization” yöntemi kullanılmıştır. Analizlere tamamen durgun hava ve ortam sıcaklığından başlanacağı için; başlangıç hızları x, y ve z için 0 m/s, başlangıç sıcaklığı 298 K, hava hacimsel oranı 1 ve su hacimsel oranı 0 olarak belirlenmiştir. Patch komutu kullanılarak kekin başlangıç durumu için su hacimsel oranı 1 olarak belirlenerek, kekin pişirme başında tamamen su olduğu kabul edilmiştir.

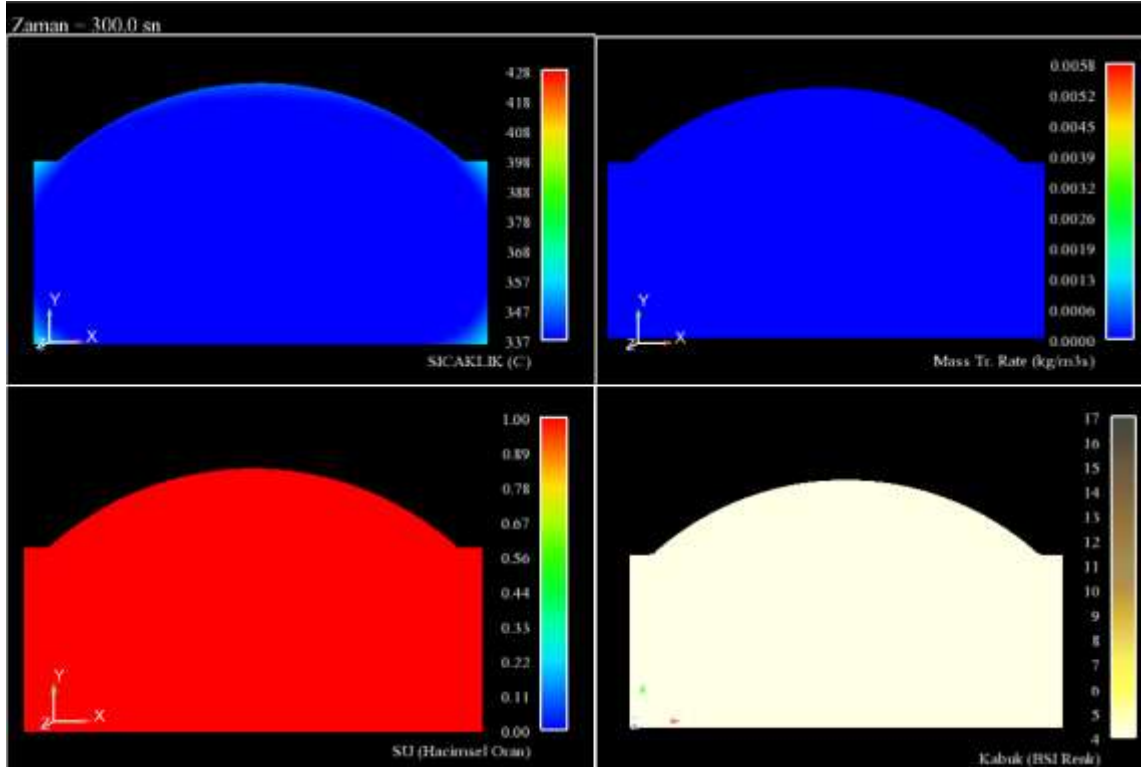
5.3.6 Analiz Sonuçları

Analizler 0,1 saniye zaman adımıyla yapılmıştır. Yakınsama kriteri olarak, enerji için 10^{-6} diğer parametreler için 10^{-3} kullanılmıştır. Her zaman adımında yakınsamanın sağlanmasını garanti altına alabilmek için, her zaman adımı için iterasyon sayısı 500 olarak seçilmiştir. Eğer bu iterasyon sayısından önce yakınsama sağlanırsa bir sonraki zaman adımına geçilmektedir.

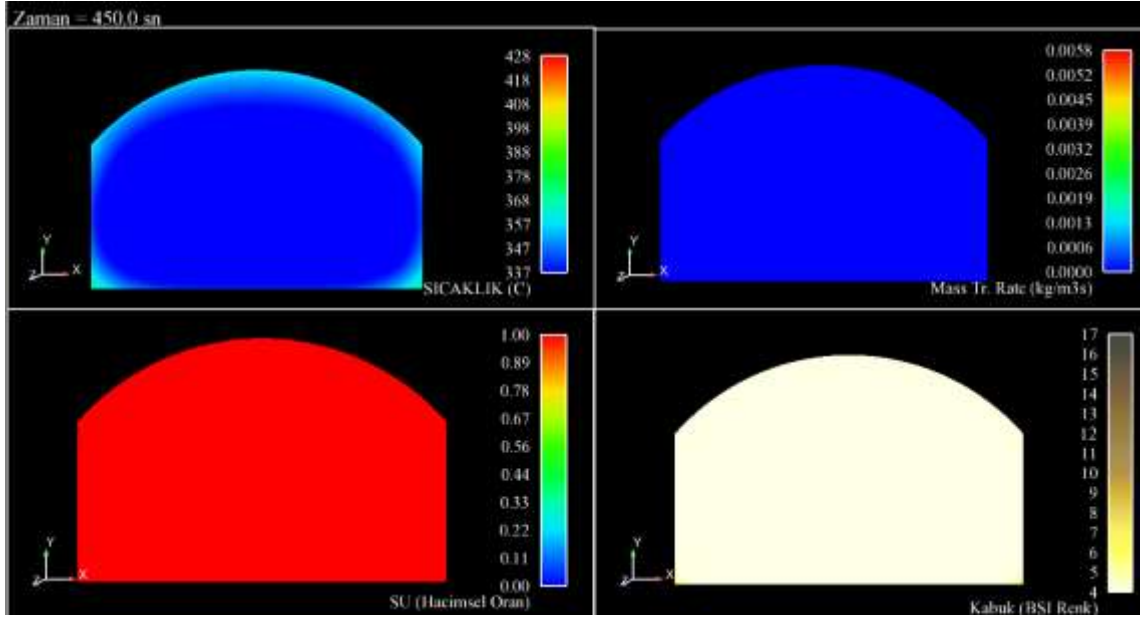
Analiz sonuçlarında, kabarma, kek hacimsel sıcaklık değişimi, kütle transfer oranı, su hacimsel oranı ve kabuk rengindeki değişim zamana bağlı olarak incelenmiştir.



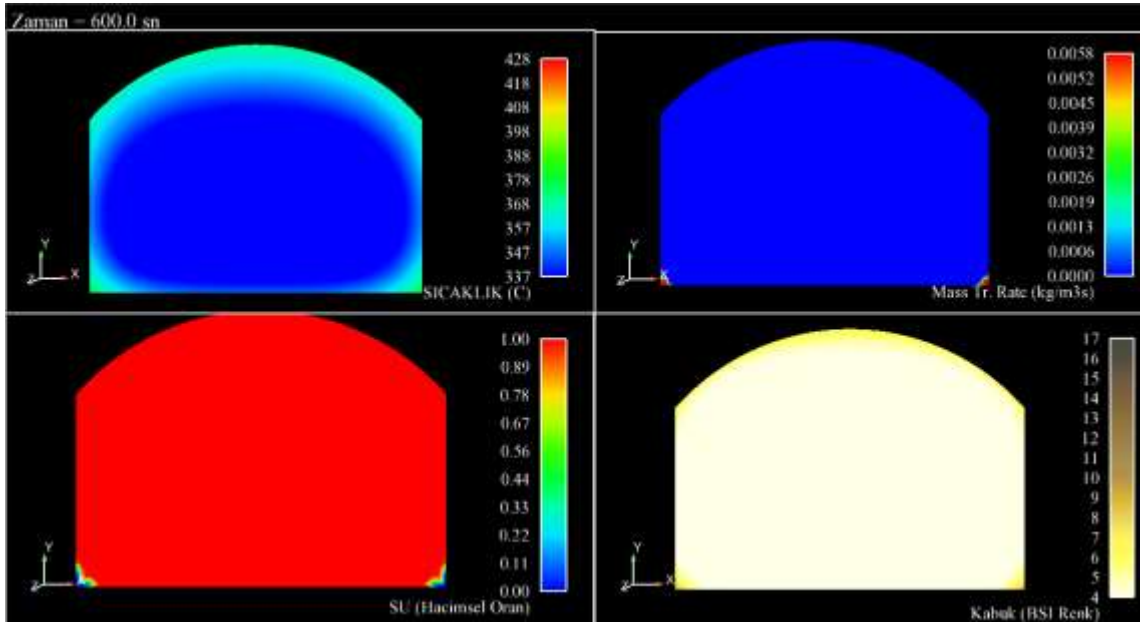
Şekil 5. 19 t=2 sn anında kekin görünümü



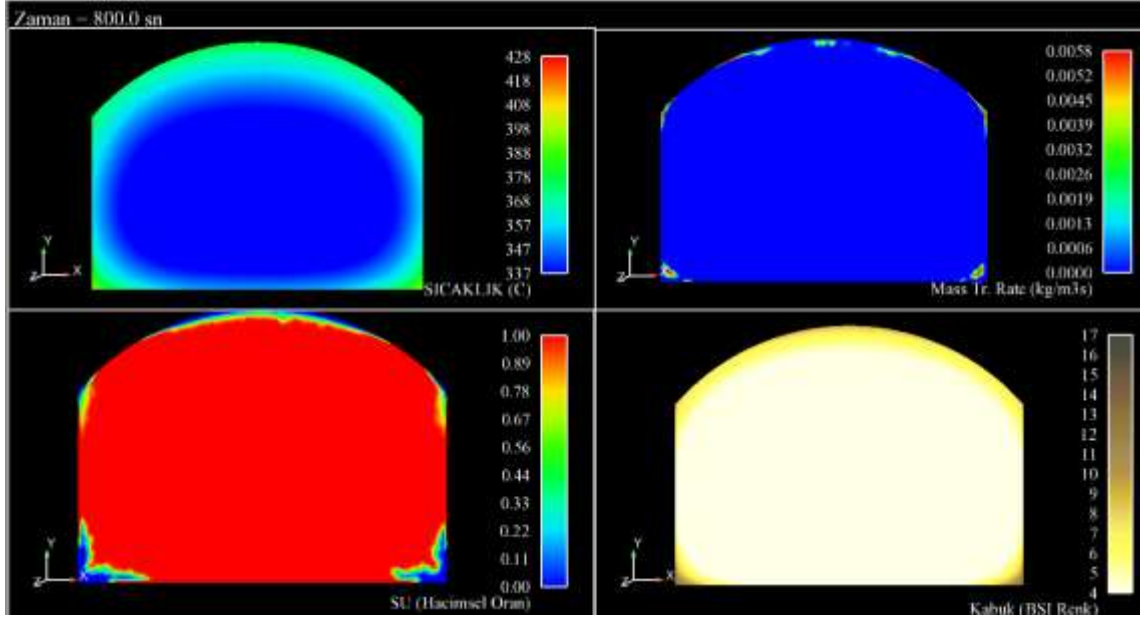
Şekil 5. 20 t=300 sn kekin görünümü



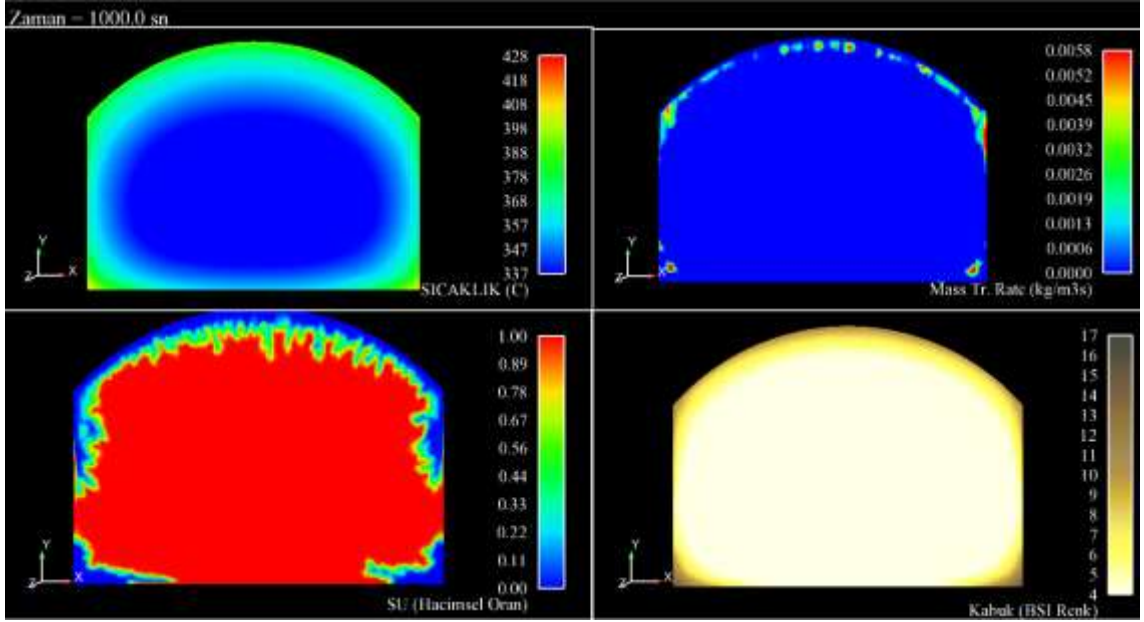
Şekil 5. 21 t=450 sn anında kekin görünümü



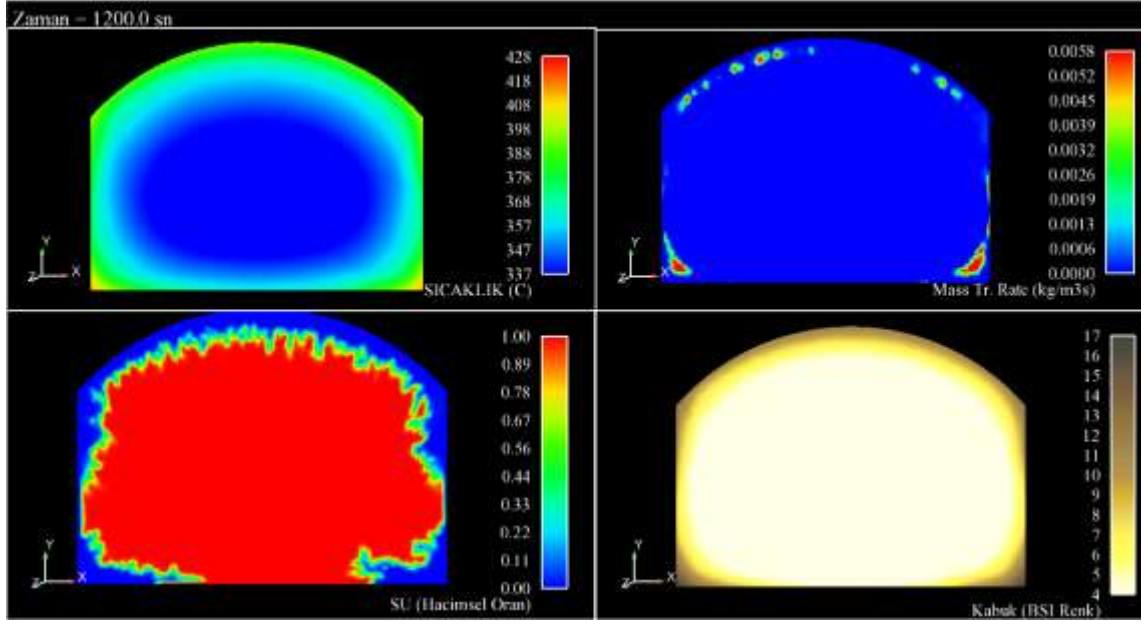
Şekil 5. 22 t=600 sn anında kekin görünümü



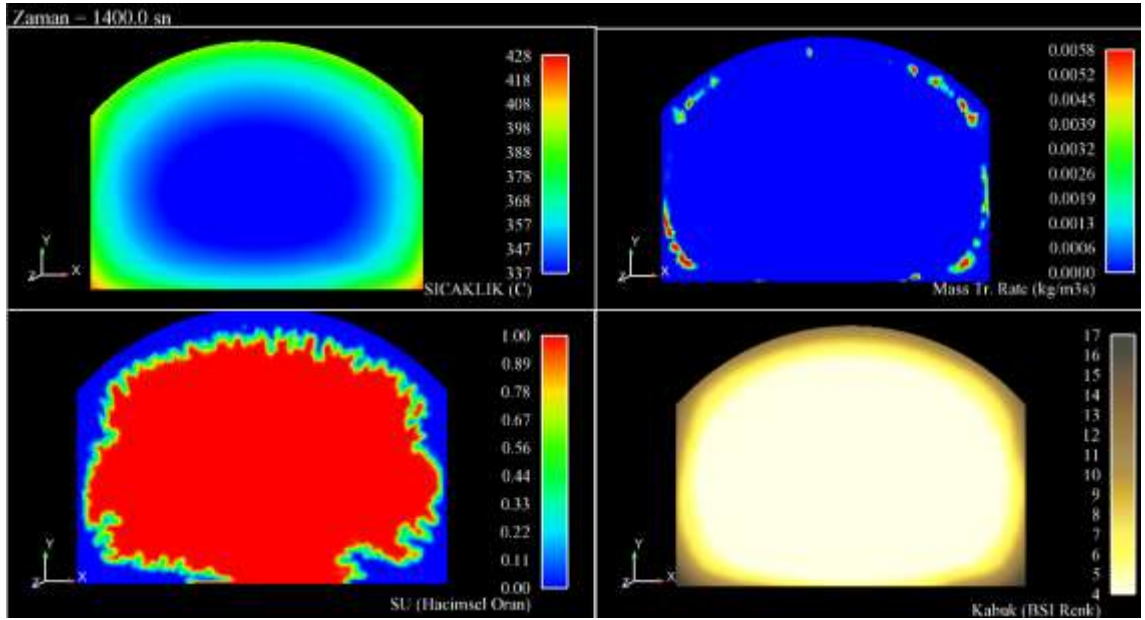
Şekil 5. 23 t=800 sn anında kekin görünümü



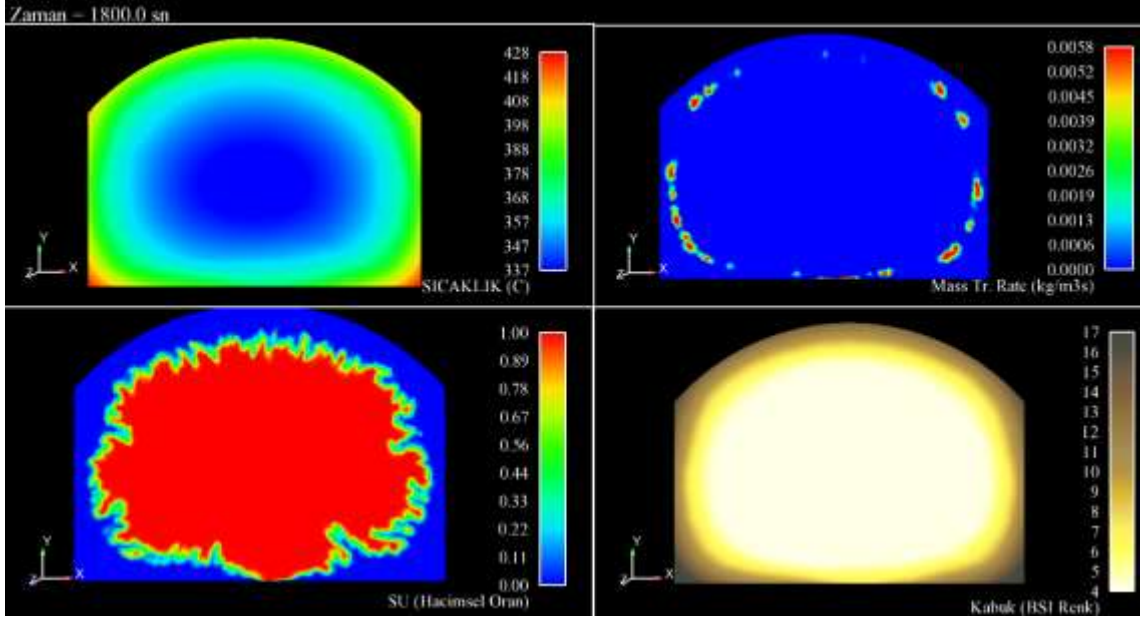
Şekil 5. 24 t=1000 sn anında kekin görünümü



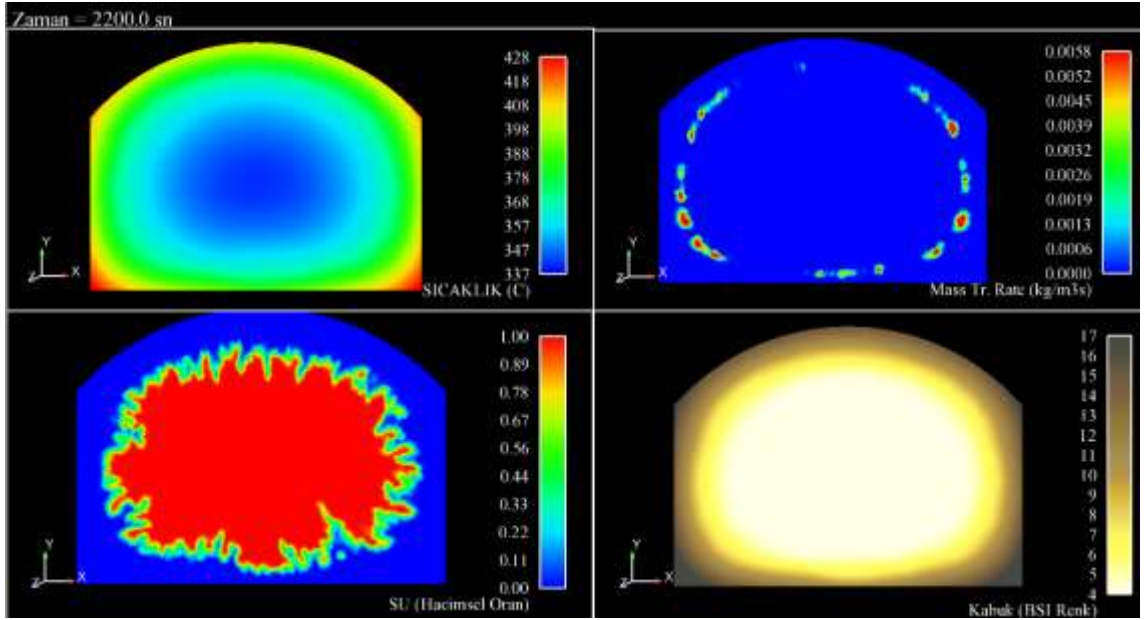
Şekil 5. 25 t=1200 sn anında kekin görünümü



Şekil 5. 26 t=1400 sn anında kekin görünümü



Şekil 5. 27 t=1800 sn anında kekin görünümü

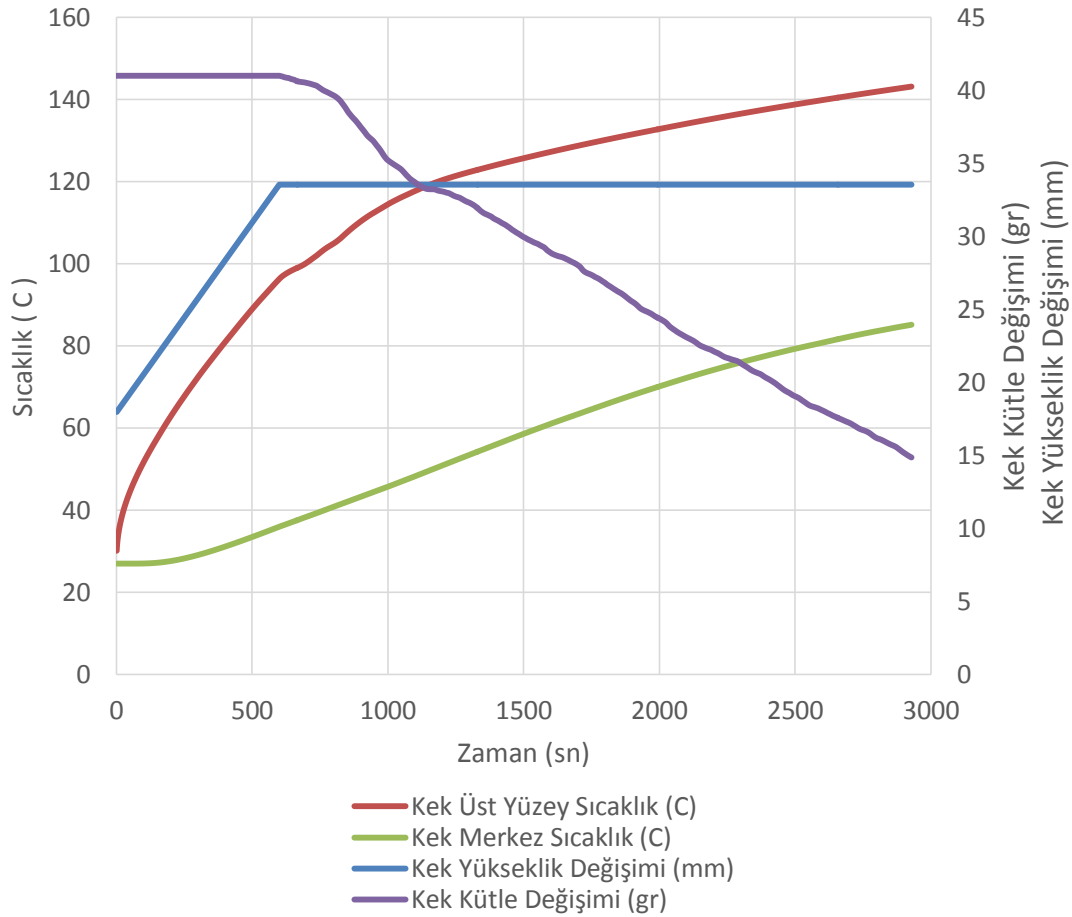


Şekil 5. 28 t=2200 sn anında kekin görünümü

Şekil 5.19 ile Şekil 5.28 arasında farklı zamanlar için kabarma, kek hacimsel sıcaklık değişimi, kütle transfer oranı, su hacimsel oranı ve kabuk rengindeki değişimler gösterilmektedir.

Şekil 5.30'deki deneysel ve analiz sonuçları karşılaştırılmasında, sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. 1080. saniyede kek üst yüzeyinde ve alt yüzeyinde ince bir kabuk oluşumu gözlemlenmiştir. Yan yüzeylerde ise henüz kabuk oluşumu meydana

gelmemiştir. 1560. Saniyede yan yüzeylerde de kabuk oluşumu görülmüştür. 2160. saniye de ise tüm yüzeylerde kabuk kalınlığının arttığı görülmüştür. Analizlerde alt yüzeydeki kabuk kalınlığı, deneysel çalışmalara göre bir miktar daha düşük kalmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan tepsinin ataletinin alt yüzeydeki kabuk kalınlığına etkisi olduğu düşünülmektedir.

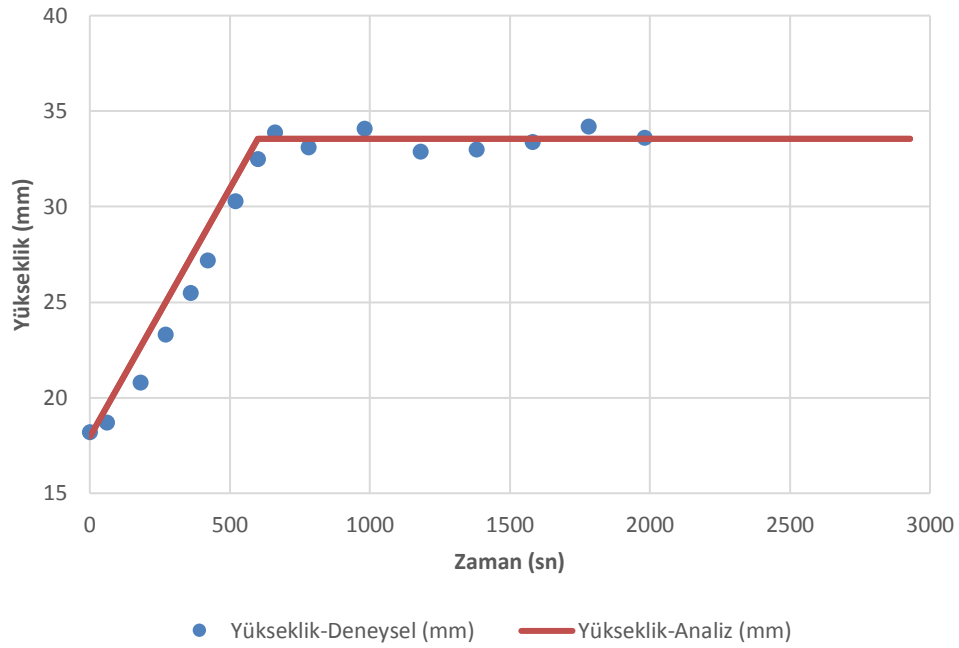


Şekil 5. 29 Analiz sonucunda elde edilen sıcaklık, yükseklik ve kütle değişimi

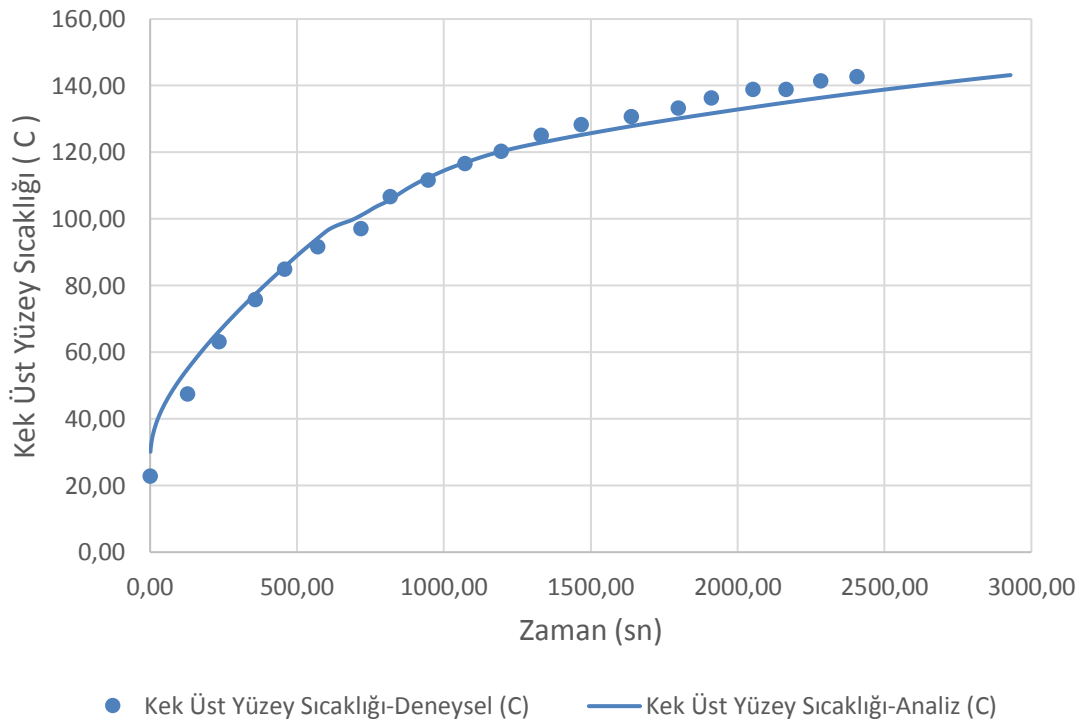
Şekil 5.29'da analiz esnasında zaman bağlı olarak elde edilen üst yüzey sıcaklık, kek merkez sıcaklık, yükseklik ve kütle değişimi grafiği gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde kabarma, kek üst yüzey sıcaklığı 100°C'ye ulaştığında durmuştur. Aynı zamanda kekte kütle kaybı da başlamıştır.

Analiz sonuçları ile deneysel çalışmaların karşılaştırması aşağıdaki grafiklerde verilmektedir. Yükseklik değişimi amacıyla, pişirme süresi boyunca tepsideki kekler teker teker alınarak zaman bağlı yükseklik değişimi incelenmiştir. Her ölçümde farklı bir kek kullanıldığı için kabarmanın durduğu yükseklikte bir miktar saçınıklık görülmüştür.

Kabarmanın başlangıcı incelendiğinde, analizde lineer bir artış görülmektedir. Deneyde ise başlangıçta kabarma hızının analize göre daha düşük olduğu dikkat çekmektedir.

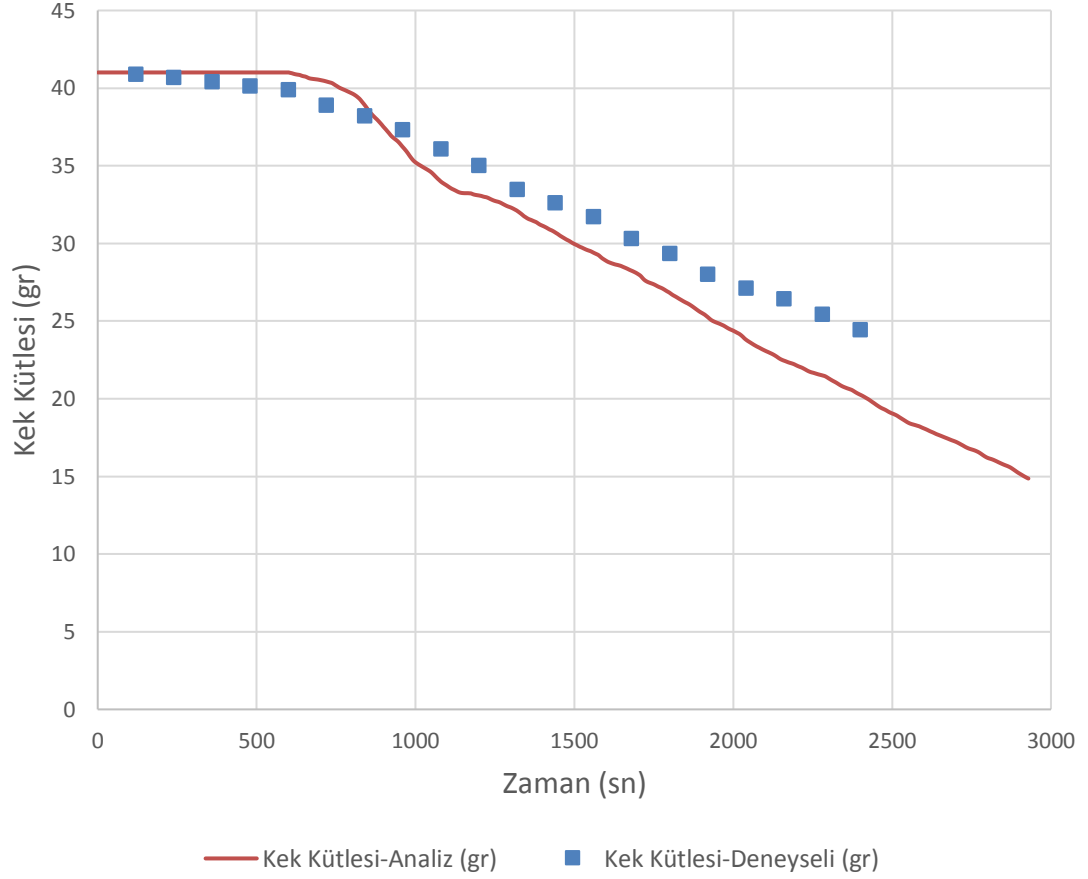


Şekil 5. 30 Analiz ve deneysel olarak elde edilen yüksekliğin karşılaştırılması



Şekil 5. 31 Analiz ve deneysel olarak elde edilen üst yüzey sıcaklık değişiminin karşılaştırılması

Üst yüzey sıcaklık değişimi karşılaştırıldığında, genel davranışın benzer olduğu görülmektedir. Kütle kaybı karşılaştırıldığında, analizlerde kek sıcaklığı 100 °C'ye ulaşıncaya kadar kütle kaybı meydana gelmemektedir. Kek 100°C'ye ulaştığında bölgesel olarak kütle kaybı başlamaktadır. Analizlerde, deneysel çalışmalara göre kütle kaybının bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında, bir poroz ortam olan kabaran gıdaların pişirilmesinde etkili parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin hesaplama / ölçme yöntemlerinin incelenmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen bilgiler doğrultusunda, kabaran gıdaların modellenmesinde gerekli parametrelerin ölçülmesi amacıyla deney düzenekleri kurulmuş ve ölçüm metotları geliştirilmiştir. Ayrıca, çeşitli deneysel çalışmalar yapılarak etkin parametrelerin değişimleri incelenmiştir ve birbirleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur.

Pişirme işleminde, pişirme şartlarını tanımlayan; sıcaklık, nem, hava hızı, süre, hamur içeriği ve miktarı gibi “girdi parametreler” bulunmaktadır. Ayrıca pişirme sürecinde meydana gelen ısı/kütle transferi ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan “çıkış parametreler” bulunmaktadır. Tez kapsamında; girdi ve çıkış parametreler arasındaki ilişkiler belirlenmiş, elde edilen bilgiler doğrultusunda pişirme parametrelerine bağlı pişirme sonuçlarındaki değişimler ortaya konulmuştur.

Yapılan deneysel çalışmalarda ev tipi elektrikli bir fırın kullanılmıştır. Seçilen fırın, arka duvarda turbo ısıtıcı ve turbo fan ile zorlanmış taşınım ile pişiren turbo moda sahiptir.

Literatür araştırması kapsamında beş temel konu üzerine araştırmalar yapılmıştır. Öncelikle, pişirme sonucunda oluşan ürünün kabuk kalınlığının ve renk ölçümünün incelenmesine yönelik olarak kullanılan yöntemler incelenmiştir. Buna ilave olarak yükseklik ve hacimsel değişikliğin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar incelenmiştir. Sonrasında hamurlu gıdalarda meydana gelen ısı / kütle transferi ve kimyasal

reaksiyonlar incelenmiştir. Son olarak ise gözenekliliğin belirlenmesini yönelik olarak literatür araştırması yapılmıştır.

Literatür araştırmalarında elde edilen bilgiler doğrultusunda, deneysel çalışmalarda kullanılacak olan yöntemler belirlenmiştir. Deneysel çalışmaların ilk bölümünde pişirme sonucunda meydana gelen kabarmanın ölçülmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Cetvel, kumpas ya da kek içerisine batırılan çubuklar ile yükseklik ölçümünde, kekin homojen olmayan kabarması nedeniyle ölçüm belirsizliğinin yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle hazırlanan bir fotoğraf kabini ile kekin fotoğrafının çekildiği, bu kekin bilgisayar ortamında görüntü işleme metotları kullanılarak yüksekliğinin ölçüldüğü bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu düzenek yardımıyla, kekin üst yüzey profili bir eğriye dönüştürülmekte ve tüm yüzeyin ortalaması alınarak net bir şekilde yükseklik belirlenebilmektedir.

Pişirme işleminin çıktısı olan diğer bir parametre ise kabuk kalınlığıdır. Kek yüksekliği ölçümüne benzer şekilde cetvel, kumpas benzeri yöntemler ile ölçülmesi durumunda ölçüm yapan operatöre bağlı olarak saçınıklık göstermektedir. Bu nedenle tekrarlanabilirliğin sağlanabileceği bir yöntem geliştirilmesi gerekmektedir. Kabuk kalınlığının belirlenmesi amacıyla yine görüntü işleme metotları kullanılmıştır. Unlu gıdaların renk ölçümünde kullanılan BSI skalasında renk değerleri kullanılarak, kek kesiti içerisindeki renk dağılımları incelenmiştir. BSI standartlarına göre, BSI 8 rengi ve üzerindeki tonlarda kabuğun oluştuğu kabul edilmektedir. Kurulan düzende, kek kesitinin fotoğrafı çekilmekte ve BSI 8 ve üzeri tonlar işaretlenerek kabuk bölgesi ayrıklaştırılmaktadır.

Pişme kararı vermeyi sağlayan en önemli parametrelerden biri de yüzey rengidir. Bu nedenle yüzey rengi ölçümü için de standart bir yöntem kullanılması gerekmektedir. Bu ölçüm için BSI standartlarına göre hazırlanmış bir renk ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz aydınlatılmış bir hacim içerisinde kekin fotoğrafların çekmekte ve her bir keki 13 parçaya bölerek renk dağılımını hesaplamaktadır. Bu ölçüm sonucunda keklerin BSI renk skalasına göre karşılıkları elde edilebilmektedir. Tez kapsamında bu yöntem bir fırına da uygulanmıştır. Fırın içerisine yerleştirilen kamera ve aydınlatmalar yardımıyla, pişirme esnasında fotoğraflar çekilerek, eş zamanlı olarak görüntü analizi yapılmış ve pişirme süresince renk değişimi ortaya konulmuştur.

Piştirme süresince meydana gelen ısı ve kütle transferi üzerindeki en etkili parametre ise kekin poroz özellikleridir. Sayısal modellemenin yapılabilmesi için viskoz ve atalet katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Bu katsayıların belirlenmesi için kek içerisindeki hıza bağlı basınç kayıpları belirlenmiştir. Kek numuneleri iç bölgesi ve kabuk bölgesi rüzgar tüneline ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda kek iç bölgesi ile kabuk bölgesinin aynı poroz özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca analizlerde kullanılacak olan yola iç hacim ve kabuk için $1/\alpha$, yani viskoz terimin katsayısı sırasıyla $1,27E+09$ ve $1,22E+09$, C_2 , yani atalet katsayısı ise 17372 ve 17528 olarak elde edilmiştir.

Piştirme üzerindeki etkili parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin piştirme sonunda oluşan ürünün özellikleri ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle tam faktöriyel bir deney tasarımı oluşturularak deneyler yapılmıştır. Piştirme için girdi parametreler fan devri (rpm), piştirme sıcaklığı ($^{\circ}C$), süre (dk), piştirme hacmine verilen nem miktarı (g) olarak seçilmiştir. Piştirme sonucunda incelenen parametreler ise; kek yüksekliği (mm), yüzey rengi (BSI), kabuk kalınlığı (mm) ve kütle kaybı (gr) olarak belirlenmiştir. Deneyler tam faktöriyel, çift tekrarlı ve eğrisellik olup olmadığını görebilmek amacıyla merkez noktası da kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Toplam 34 tepsi piştirme deneyi yapılmış olup çıktı parametreleri ampirik ifadeler belirlenmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Yükseklik (mm)} &= 13,84 + 0,001133 \text{ Fan Devri (rpm)} + 0,1045 \text{ Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} \\ &+ 0,01732 \text{ Su miktarı (g)} - 0,000007 \text{ Fan Devri (rpm)} * \text{Su miktarı (g)} \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Kütle Kaybı (g)} &= -114,0 + 0,01068 \text{ Fan Devri (rpm)} + 0,6077 \text{ Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} \\ &+ 2,184 \text{ Sure (dak)} \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Renk (BSI)} &= -26,49 + 0,001277 \text{ Fan Devri (rpm)} + 0,1772 \text{ Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} + 0,343 \text{ Sure (dak)} \\ &+ 0,1161 \text{ Su miktarı (g)} - 0,00096 \text{ Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} * \text{Sure (dak)} \\ &- 0,000679 \text{ Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} * \text{Su miktarı (g)} - 0,00400 \text{ Sure (dak)} * \text{Su miktarı (g)} \\ &+ 0,000023 \text{ Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} * \text{Sure (dak)} * \text{Su miktarı (g)} \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Kabuk Kalınlığı (mm)} &= -21,74 + 0,01398 \text{ Fan Devri (rpm)} + 0,1189 \text{ Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} \\ &+ 0,562 \text{ Sure (dak)} - 0,000077 \text{ Fan Devri (rpm)} * \text{Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} \\ &- 0,000499 \text{ Fan Devri (rpm)} * \text{Sure (dak)} - 0,00280 \text{ Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} \\ &* \text{Sure (dak)} + 0,000003 \text{ Fan Devri (rpm)} * \text{Sıcaklık (}^{\circ}C\text{)} * \text{Sure (dak)} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Ayrıca modelleme çalışmalarında kullanmak üzere kabarmanın tamamlandığı süreninde belirlenmesi gerekmektedir. Kabarma, pişirmenin belirli bir zaman aralığında gerçekleşmektedir. Kabarmanın sonlanmasından sonra yüzey renk değişimi ve kabuk oluşumu başlamaktadır. Bu nedenle kabarmanın sonladığı süreyi farklı girdi parametrelere bağlı olarak belirlemek ve bunu bir denklem olarak ifade etmek

gerekmektedir. Bu nedenle diğer çalışmalarda olduğu gibi farklı pişirme parametrelerin etkileri incelenmiştir. Beş farklı fan devri (600, 925, 1400, 1875, 2200 rpm), dört farklı pişirme sıcaklığı (160, 168, 180, 192 °C) ve beş farklı su miktarı (0, 40, 100, 160, 200 gr) olacak şekilde deney planı yapılmıştır. Toplam 20 tepsi kek pişirme yapılarak kabarmanın tamamlandığı süre belirlenmiştir.

$$\text{Kabarmayı Durduğu Süre (saniye)} = (1236.91) + (-0.0540231 * \text{Fan Devri}) + (-3.11671 * \text{Pişirme Sıcaklığı}) + (-0.393675 * \text{Su Miktarı}) \quad (6.5)$$

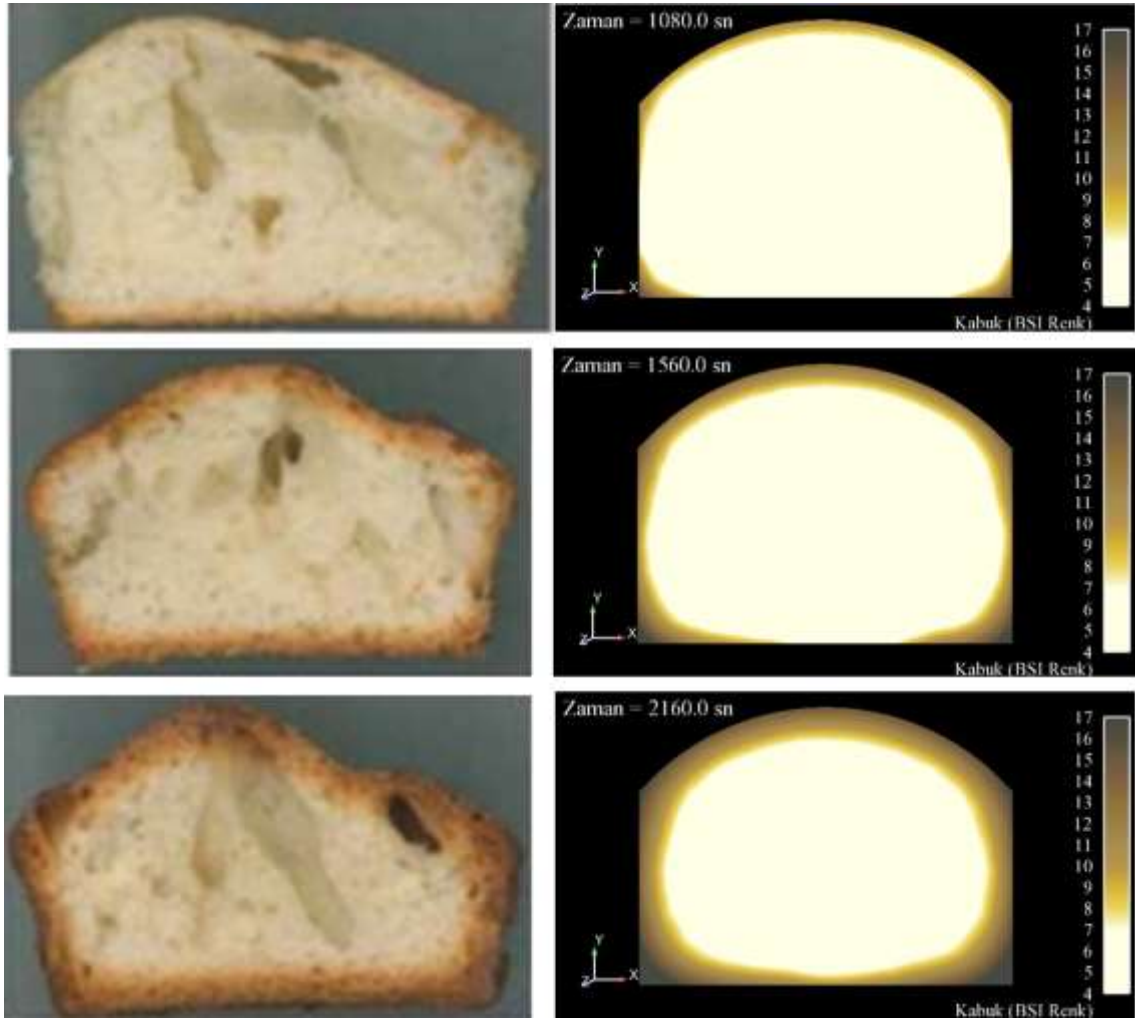
Deneysel çalışmalarda son olarak kek yüzey rengi ile yüzey sıcaklığı arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla Flir A40M termal kamera kullanılarak pişirme sonunda kekin sıcaklık dağılımları ölçülmüş ve yüzey rengi ile aşağıdaki lineer ilişki ortaya konulmuştur. Bu ilişki $\text{Sıcaklık } (^\circ\text{C}) = 4,23 * \text{Yüzey rengi (BSI)} + 68,671$ olarak ifade edilmektedir. ($R^2=0,8631$).

Elde edilen deneysel verilerden ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ANSYS Fluent 16.2 ile CFD analiz çalışmaları yapılmıştır. Kekin pişirilme sürecini modellerken, kekin kabarması ve meydana gelen kütle transferi de analizlere dahil edilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen ampirik ifadelerde kullanılarak, yüzey rengi ve kabuk kalınlığı da analizlere dahil edilmiştir. Çözüm süresinin azaltılması amacıyla bazı yaklaşımlar yapılmıştır. Yapılan denemelerde sürekli olarak tüm fırının modellenmesi analiz edilmesi çözüm sürecini çok zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, öncelikli olarak gerçek durumları simüle edecek şekilde komple bir fırın analizi gerçekleştirilmiştir. Seçilen bir kek etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımı kullanılarak, diğer analizlerde sadece bir kekin pişirilmesi modellenmiştir. Böylelikle model yapısının sadeleştirilmesi ve eleman sayısının azaltılması sağlanmıştır.

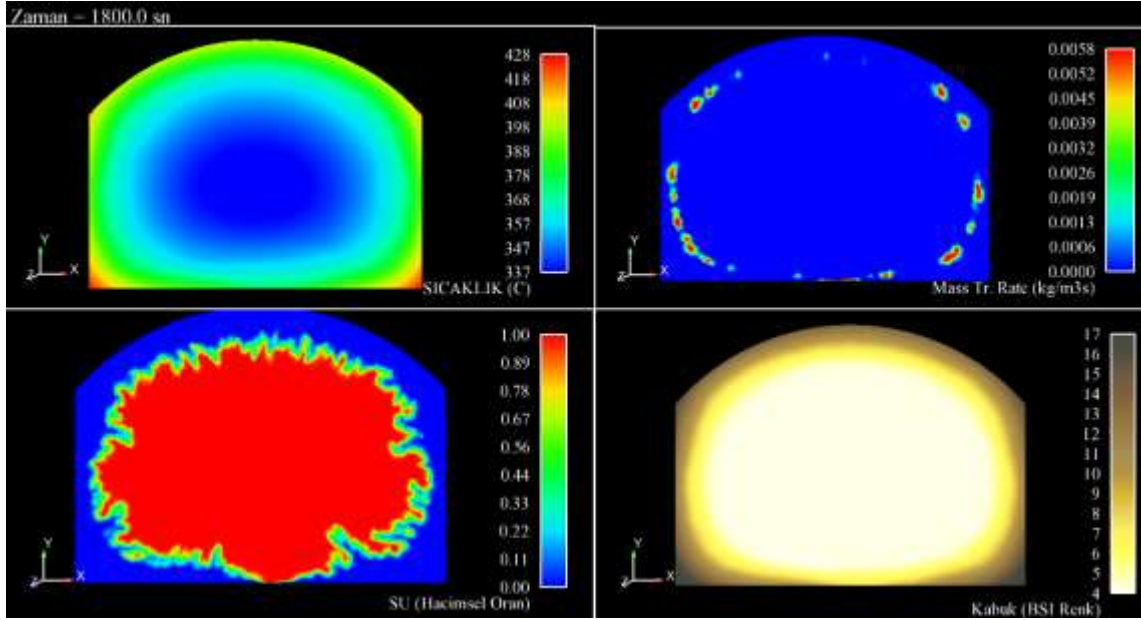
Analiz sonuçları incelendiğinde;

- Kek üst yüzeyi 100° C'ye ulaşmaya kadar kabarma süreci devam etmiştir.
- Kek yüzeylerinin 100° C'ye ulaşması sonrasında kütle transferi başlamıştır. Kütle transferi öncelikli olarak kek tabının köşeleri ve üst yüzeyden başlamış olup, zamanla içeriye doğru ilerlemiştir.
- Deneysel çalışmalarda elde edilen sıcaklık-renk ilişkisi bu analizde uygulandığında, kabuk oluşumu da eş zamanlı olarak gözlemlenebilmiştir.

- Kabuğun başlangıcı olarak belirlenen BSI renk skalasındaki 8 renk değeri için analiz sonuçları incelendiğinde; deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

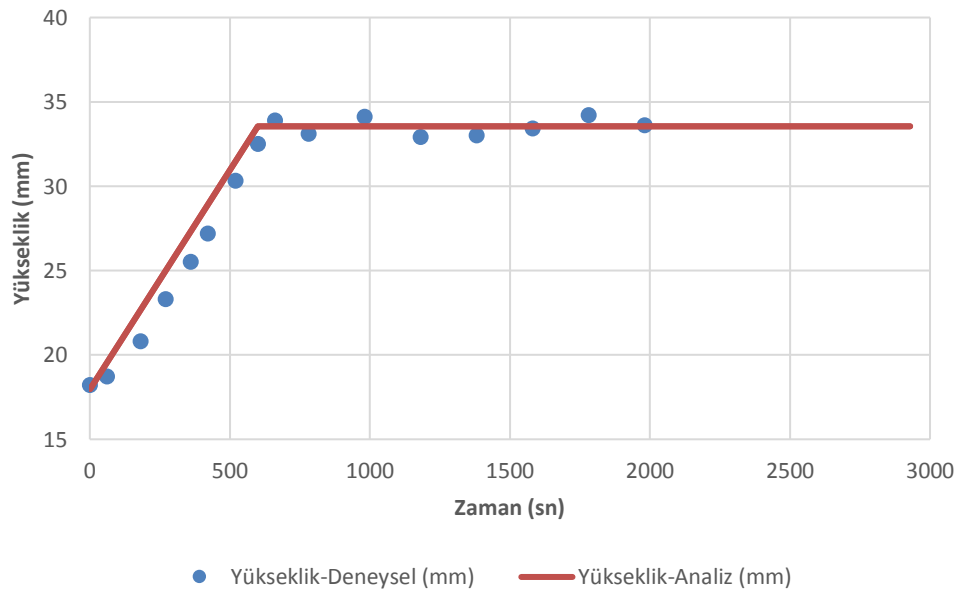


Şekil 6. 1 Deneysel olarak gözlemlenen kabuk kalınlığı ile analizlerde gözlemlenen kabuk kalınlığının karşılaştırılması

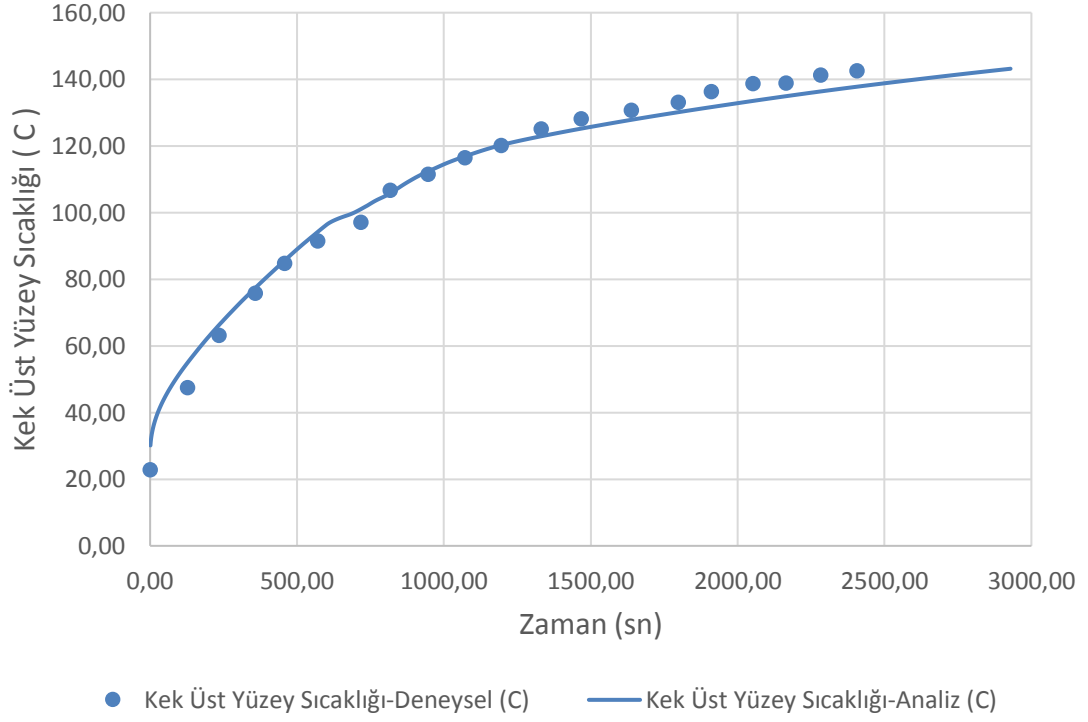


Şekil 6. 2 t=1800 sn anında kekin görünümü

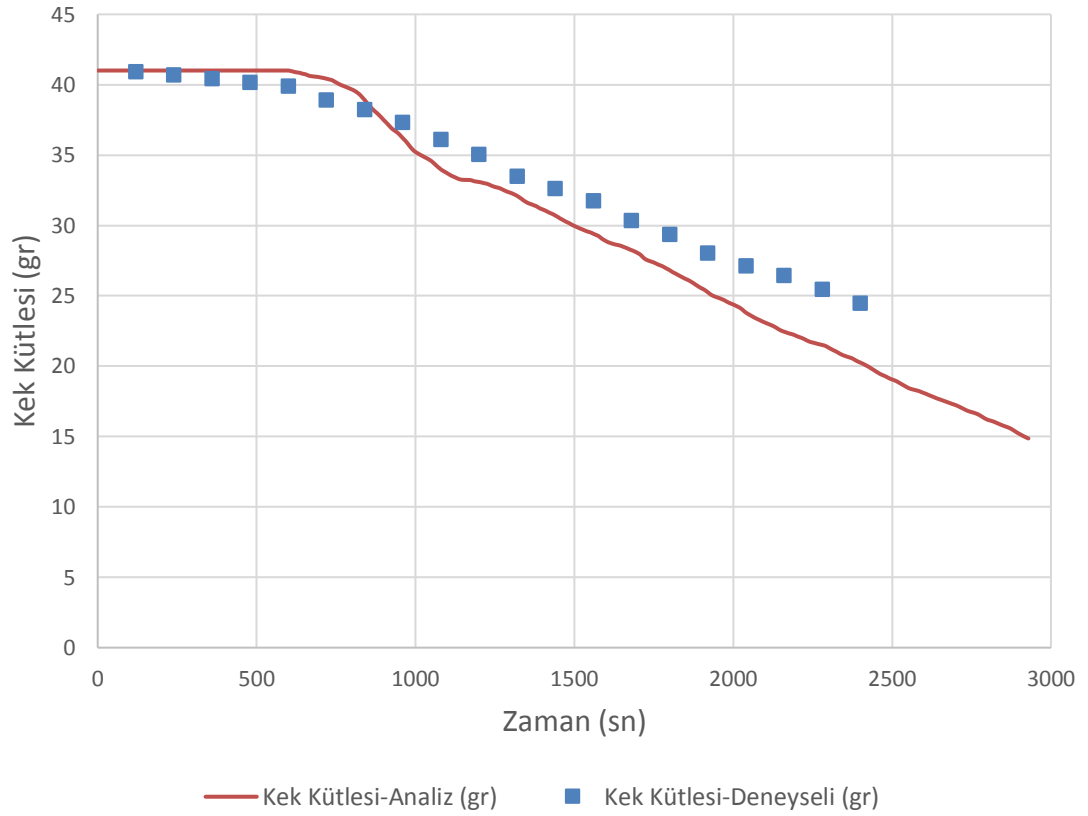
Analiz sonuçları ile deneysel çalışmaların karşılaştırması aşağıdaki grafiklerde verilmektedir. Yükseklik değişimi amacıyla, pişirme süresi boyunca tepsideki kekler teker teker alınarak zaman bağlı yükseklik değişimi incelenmiştir. Her ölçümde farklı bir kek kullanıldığı için kabarmanın durduğu yükseklikte bir miktar saçınıklık görülmüştür. Kabarmanın başlangıcı incelendiğinde, analizde lineer bir artış görülmektedir. Deneyde ise başlangıçta kabarma hızının analize göre daha düşük olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 6. 3 Analiz ve deneysel olarak elde edilen yüksekliğin karşılaştırılması



Şekil 6. 4 Analiz ve deneysel olarak elde edilen üst yüzey sıcaklık karşılaştırılması



Şekil 6. 5 Analiz ve deneysel olarak elde edilen kütle değişiminin karşılaştırılması

Üst yüzey sıcaklık değişimi karşılaştırıldığında, genel davranışın benzer olduğu görülmektedir. Kütle kaybı karşılaştırıldığında, analizlerde kek sıcaklığı 100 °C'ye ulaşıncaya kadar kütle kaybı meydana gelmemektedir. Kek 100°C'ye ulaştığında bölgesel olarak kütle kaybı başlamaktadır. Analizlerde, deneysel çalışmalara göre kütle kaybının bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir.

Bu çalışmanın devamı olarak aşağıdaki çalışmaların yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir:

- Kütle transferi için kullanılmış olan Lee Modeli'nin buharlaşma ve yoğuşma frekansı değerlerinin optimize edilmesi, deneysel ile analiz sonuçları arasındaki farklılıkların azaltılmasını sağlayacaktır. Bu farklılığın diğer bir sebebinin de viskoz ve atalet katsayıları olabileceği bilinmektedir. Rüzgar tüneline ölçülen kek numunelerinin adeti arttırılarak, viskoz ve atalet katsayıları için ortalama bir değer kullanılabilir.
- Kabarma esnasında yüzeye yakın oluşan geniş gözeneklerin üst yüzeyinin olması, beklenenden daha fazla kızarmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle renk ölçümünde ortalama yüzey rengi daha yüksek değerde çıkabilmektedir. Bu nedenle hamur hazırlanırken kek karıştırma süresinin de etkisinin incelenmesi, ya da bu oluşumun görüldüğü keklerin hesaplamalara dahil edilmemesi hata oranının azalmasını sağlayacaktır.
- Artan işlemci güçlerine bağlı olarak tüm fırının modellenerek, her bir kekteki kütle transferi ve kinetik özelliklerin değişiminin incelenmesi faydalı olacaktır.
- Kek tabanındaki sınır koşullarının iyileştirilmesiyle ve o bölgedeki kabuk oluşumunun daha detaylı incelenebilir.
- Turbo pişirme modu dışında ısıtımın baskın olduğu statik pişirme modlarının da modellenmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

-
- [1] Belitz H.D., Grosch W. (1999). Food Chemistry. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
 - [2] Valentas K.J., Rotstein E., Singh R.P. (1997). Handbook of Food Engineering Practice. CRC Press, Florida.
 - [3] Welti-Chanes J., Velez-Ruiz J.F., Barbosa-Canovas G.V. (2003). Transport Phenomena in Food Processing. CRC Press, Florida.
 - [4] Arçelik A.Ş., (2015). Bolu Pişirici Cihazlar İşletmesi-Ürün Geliştirme Bölümü Ürün Tanımları Dökümanı.
 - [5] Cauvain, S., Young, L., (2006). Baked Products-Science, Technology and Practise, Blackwell Publishing.
 - [6] CIE (Internatonal Commission on Illumination) Satutes, (2009).
 - [7] Mohd Jusoh, Y.M., Chin N.L., Yusof, Y.A., Abdul Rahman, R., (2009). "Bread crust thickness measurement using digital imaging and L a b colour system", Journal of Food Engineering, 94:366-371.
 - [8] Sangwine, S., J., Horne, R., E., N., (1998). The colour image processing handbook, Chapman & Hall.
 - [9] Linford, C., (2004). The complete guide to digital color : creative use of color in the digital arts, Harper Design.
 - [10] Koschan, A., Abidi, M., A., (2008). Digital color image processing, Wiley-Interscience.
 - [11] Purlis, E., Salvadori, V.O., (2007). "Bread Browning Kinetics during baking", Journal of Food Engineering, 80:1107-1115.
 - [12] Pedreschi, F., Leon, J., Mery, D., Moyano, P., (2006). "Development of a computer vision system to measure the color of potato chips", Food Research International, 39:1092-1098.
 - [13] Yu, X., Llave, Y., Fukuoka, M., Sakai, N., (2014). "Estimation of color changes in fish surface at the beginning of grilling based on the degree of protein denaturation", Journal of Food Engineering, 129:12–20.

- [14] Della Valle, G., Chiron, H., Jury, V., Raitière, M., Réguerre, A.-L., (2012). "Kinetics of crust formation during conventional French bread baking", *Journal of Cereal Science*, 56:440-444.
- [15] Şahin, S., Sumnu, S.G., (2006)). *Physical Properties of Foods*, Springer, New York.
- [16] Ktenioudaki, A., Butler, F., Gonzales-Barron, U., McCarthy, U., Gallagher, E., (2009). "Monitoring the dynamic density of wheat dough during fermentation", *Journal of Food Engineering*, 95:332-338.
- [17] Soleimani Pour-Damanab, A.R., Jafary, A., Rafiee, Sh., (2011). "Monitoring the dynamic density of dough during fermentation using digital imaging method", *Journal of Food Engineering*, 107:8–13.
- [18] Romano, A., Toraldo, G., Cavella, S., Masi, P., (2007). "Description of leavening of bread dough with mathematical modelling", *Journal of Food Engineering*, 83:142–148.
- [19] Whitaker, A.M., Barringer, S.A., (2004). "Measurement of Contour and Volume Changes During Cake Baking", *Cereal Chemistry*, 81(2):177-180.
- [20] Cloke, J.D., Davis, E.A., Gordon, J., (1984). "Volume Measurements Calculated by Several Methods Using Cross-Sectional Tracing of Cake", *Cereal Chemistry*, 61(4):375-377.
- [21] Bai, X., Zhou, W., (2005). "Study of the Bread Oven Rise by On-Line Image Analysis", *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 1:104-109.
- [22] Sakin, M., Kaymak-Ertekin, F., Ilıcalı, C., (2007). "Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking", *Journal of Food Engineering*, 83:463-474.
- [23] Thorvaldsson, K., Janestad, H., (1999). "A model for simultaneous heat, water and vapour diffusion", *Journal of Food Engineering*, 40:167-172.
- [24] Thorvaldsson, K., Skjöldebrand, C., (1998). "Water Diffusion in Bread During Baking", *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 31:658-663.
- [25] Purlis, E., Salvadori, V.O., (2009). "Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modelling", *Journal of Food Engineering*, 91:428–433.
- [26] Purlis, E., Salvadori, V.O., (2009). "Bread baking as a moving boundary problem. Part 2: Model validation and numerical simulation", *Journal of Food Engineering*, 91:434–442.
- [27] Chhanwal, N., Anishaparvin, A., Indrani, D., Raghavarao, K.S.M.S., Anandharamakrishnan C., (2010). "Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of an Electrical Heating Oven for Bread-Baking Process", *Journal of Food Engineering*, 100:452-460.
- [28] Chhanwal, N., Indrani, D., Raghavarao, K.S.M.S., Anandharamakrishnan C., (2011). "Computational fluid dynamics modeling of bread baking process", *Journal of Food Engineering*, 44:978-983.

- [29] Lostie, M., Peczalski, R., Andrieu, J., Laurent, M., (2002). "Study of Sponge Cake Batter Baking Process. Part I: Experimental Data", *Journal of Food Engineering*, 51:131-137.
- [30] Papasidero, D., Manenti, F., Pierucci, S., (2015). "Bread baking modeling: Coupling heat transfer and weight loss by the introduction of an explicit vaporization term", *Journal of Food Engineering* 147:79–88.
- [31] Deshlahra, P., Anurag, M., Ghosal, D., (2009). "Evolution of Bubble Size Distribution in Baked Foods", *Journal of Food Engineering*, 93:192-199.
- [32] Zhang, L., Lucas, T., Doursat, C., Flick, D., Wagner, M., (2007). "Effects of Crust Constraints on Bread Baking Expansion and CO₂ Release", *Journal of Food Engineering*, 80:1302-1311.
- [33] Purlis, E., Salvadori, V., O., (2009). "Modelling the Browning of Bread During Baking", *Food Research International*, 42:865-870.
- [34] Shehzad, A., Chiron, H., Della Valle, G., Kansou, K., Ndiaye, A., Réguerre, A., L., (2010). "Porosity and Stability of Bread Dough During Proofing Determined by Video Image Analysis for Different Compositions and Mixing Conditions", *Food Research International*, 43:78-83.
- [35] Primo-Martin, C., de Beukelaer, H., Hamer, R., J., Van Vliet, T., (2008). "Fracture Behaviour of Bread Crust: Effect of Ingredient Modification", *Journal of Cereal Science*, 48:604-612.
- [36] BAYTAŞ, C.A., (2006). "Gözenekli ortamlarda taşınım olayı", *İTÜ Dergisi*, 4(1):3-13.
- [37] Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot E.N., (1960). *Transport Phenomena*, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [38] Zhiyong Wu, Z., Caliot, C., Bai, F., Flamant, G., Wang, Z., Zhang, J., Tian, C., (2010). "Experimental and numerical studies of the pressure drop in ceramic foams for volumetric solar receiver applications", *Applied Energy*, 87:504–513.
- [39] Innocentini, M.D.M., Lefebvre L.P., Meloni R.V., E. Baril E., (2010). "Influence of sample thickness and measurement set-up on the experimental evaluation of permeability of metallic foams", *Porous Mater*, 17:491–499.
- [40] Civan, F., (2011). *Porous Media Transport Phenomena*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- [41] Dietrich, B., Schabel, W., Kind, M., Martin, H., (2009). "Pressure Drop Measurements of Ceramic Sponges-Determining the Hydraulic Diameter", *Chemical Engineering Science*, 64:3633-3640.
- [42] ANSYS, (2016). *FLUENT User's Guide*, Release 17.0.
- [43] Innocentini, M.D.M., Pandolfelli, V.C., Coury, J.R., (1999). "Assesment of Forchheimer Equation to Predict the Permeability of Ceramic Foams", *J. Am. Ceram. Soc*, 82:1945–1948.

- [44] Innocentini, M.D.M., Pardo, A.R.F., Pandolfelli, V.C., (2000). "Influence of Air Compressibility on the Permeability Evaluation of Refractory Castables", J. Am. Ceram. Soc, 83:1536–1538.
- [45] Du Plessis J., Woudberg, S., (2008). "Pore-scale derivation of the Ergun equation to enhance its adaptability and generalization", Chemical Engineering Science, 63:2576-2586.
- [46] Ergun, S, (1952). "Fluid Flow Through Packed Columns, Chemical Engineering Progress", Chemical Engineering Progress, 48-2:89-94.
- [47] Van Dyck T., Verboven P., Herremans E., Defraeye T., Van Campenhout L., Wevers M., Claes J., (2014). "Characterisation of structural patterns in bread as evaluated by X-ray computer tomography", Journal of Food Engineering, 123:67–77.
- [48] Kızılkaya A. (2008). EEM 740 Sayısal Görüntü İşleme Ders Notları, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- [49] IEC 60350-1, (2011). Household electric cooking appliances - Part 1: Ranges, ovens, steam ovens and grills - Methods for measuring performance, London.
- [50] DDT-17166_5, (2016). Arçelik Deney Düzeneği Kullanma Talimatı, İstanbul.
- [51] Sobieski, W., Trykozko, A., (2014). "Darcy's and Forchheimer's laws in practice. Part 2. The numerical model", Technical Sciences, 17(4):337–350.
- [52] Prukwarun, W., Khumchoo, W., Seancotr, W., Phupaichitkun, S., (2013). "CFD simulation of fixed bed dryer by using porous media concepts: Unpeeled longan case", Int J Agric & Biol Eng, 6:10-15.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat KANTAŞ
Doğum Tarihi ve Yeri : 14.10.1982 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mkantas@gmail.com / murat.kantas@arcelik.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2007
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2005
Lise	Fen	Halide Edip Adıvar Lisesi	2000

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2006 – 2010	Arçelik AŞ	Arge Mühendisi
2010 – 2013	Arçelik AŞ	Arge Uzman
2013 – 2016	Arçelik AŞ	Kıdemli Arge Uzman

2016 – Devam
ediyor

Arçelik AŞ

Mekatronik Teknolojiler
Takım Lideri