

**PATATESLERİN KIZARTILMASI SIRASINDA ISI
VE KÜTLE TRANSFER PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

AYGÜN YILDIZ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GIDA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
ARALIK – 2005**

**PATATESLERİN KIZARTILMASI SIRASINDA ISI VE KÜTLE
TRANSFER PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

AYGÜN YILDIZ

**Mersin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Gıda Mühendisliği
Ana Bilim Dalı**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. T. Koray PALAZOĞLU**

MERSİN

Aralık - 2005

ÖZ

Bu çalışmada işlenmiş patates ürünleri arasında önemli yer tutan parmak patatesin kızartılması sırasında meydana gelen eş-zamanlı ısı ve kütle transferi incelenmiştir. Bu amaçla, parmak patates dilimlerinin ($8,5 \times 8,5 \times 70$ mm), 150, 170 ve 190°C 'deki ayçiçek yağı içerisinde kızartılması sırasında etkin ısı (ısı transfer katsayısı) ve kütle transfer (etkin nem difüzyon katsayısı ve kütle transfer katsayısı) parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelerin hesaplanmasında parmak patateslerin kızartılması sırasında deneysel olarak elde edilen boyutsuz sıcaklık ve nem içeriği oranları kullanılmıştır. Ayrıca, aynı geometriye sahip bir alüminyum parçacık ($9,5 \times 9,5 \times 68,8$ mm) kullanılarak Lumped sistem yöntemi ile kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda ısı transfer katsayısı bulunmuştur. Etkin ısı transfer katsayısının yağ sıcaklığının artması ile azaldığı, Lumped sistem yöntemi ile kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda bulunan ısı transfer katsayısı değerlerinin ise yağ sıcaklığının artması ile arttığı belirlenmiştir. Etkin kütle transfer katsayısı yağ sıcaklığının artması ile doğrusal olarak, etkin nem difüzyon katsayısı ise üstel olarak artmıştır. Etkin nem difüzyon katsayısı ve yağ sıcaklığı arasında Arrhenius tipi bir ilişki belirlenmiştir.

Çalışmada aynı zamanda kızartma işlemi için sonlu farklar yöntemini kullanarak bir ısı ve kütle transfer modeli geliştirilmiştir. Bulunan transfer parametre değerleri geliştirilen modelde kullanılmış, elde edilen nem içeriği ve sıcaklık değişimleri deneysel veriler ile karşılaştırıldığında uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Parmak patates, kızartma, ısı transfer katsayısı, kütle transfer katsayısı, nem difüzyon katsayısı

ABSTRACT

Simultaneous heat and mass transfer during frying of French fries was investigated in this study. Effective heat (heat transfer coefficient) and mass transfer (mass transfer coefficient and moisture diffusivity) parameters were determined during frying of potato slices ($8,5 \times 8,5 \times 70$ mm) in sunflower oil at 150, 170 and 190°C. These parameters were evaluated from the plots of dimensionless temperature and concentration ratios against time. Heat transfer coefficient was also determined through Lumped system analysis with and without bubbles using an aluminum piece with the same geometry ($9,5 \times 9,5 \times 68,8$ mm). Effective heat transfer coefficient was found to decrease with increasing oil temperature. However, heat transfer coefficient determined with the aluminum piece increased with an increase in oil temperature both in the presence and absence of bubbles. Effective mass transfer coefficient increased linearly whereas, effective moisture diffusivity increased exponentially with an increase in frying temperature. An Arrhenius type of relationship was found between the frying temperature and the effective moisture diffusivity.

In this study, a heat and mass transfer model for the frying process was developed using the finite difference method. Experimentally determined heat and mass transfer parameter values were used in the model, and an agreement was found between the simulated and experimental temperature and moisture content data.

Keywords: French fries, frying, heat transfer coefficient, mass transfer coefficient, moisture diffusivity.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasından yazılmasına kadar, her aşamada büyük emeği geçen ve bana her konuda yaratıcı fikirleri ve sonsuz sabrı ile yol gösteren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Koray Palazoğlu' na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda beni yönlendirmesi ve hiçbir zaman esirgemediği yardımları için Doç. Dr. Ferruh Erdoğdu'ya teşekkür ederim.

Tezimin laboratuvar çalışmalarının yürütülmesinde bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan bölüm başkanım Prof Dr. Mahir Turhan'a, Gıda Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve öğretim elemanı arkadaşlarıma, çalışmam boyunca bana sağladıkları motivasyon ile bana destek sağlayan sevgili oda arkadaşlarım Arş. Gör. Belgin Erdoğdu ve Arş. Gör. Sevim Sağol Yörük'e ve her anlamda sağladıkları eşsiz destekleri ve dostlukları için Arş. Gör. Gönül Akkaya ve Arş. Gör. Başak Kırıt'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamda kullandığım cihazların temininde katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Canım aileme hayatım boyunca bana duydukları güven, sağladıkları destek ve esirgemedikleri sabırları için sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	3
2.1. PATATES.....	3
2.2. KIZARTMA İŞLEMİ.....	3
2.2.1. Kızartma Sırasında Eş-zamanlı Isı ve Kütle Transferi.....	4
2.2.2. Kızartma Sırasında Meydana Gelen Değişimler.....	5
2.3. KÜTLE TRANSFER PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.....	7
2.4. ISI TRANSFER KATSAYISININ BELİRLENMESİ.....	9
3. MATERYAL ve METOD	14
3.1. MATERYAL.....	14
3.1.1. Parmak Patateslerin Hazırlanması.....	14
3.2. METOD.....	14

3.2.1. Kızartma İşleminin Gerçekleştirilmesi	14
3.2.2. Kütle Transfer Parametrelerinin Belirlenmesi.....	14
3.2.2.1. Kızartma sırasında parmak patateslerde nem içeriğinin belirlenmesi	14
3.2.2.2. Matematiksel Yöntem.....	15
3.2.3. Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi.....	20
3.2.3.1. Parmak patates kullanılarak ısı transfer katsayısının belirlenmesi	20
3.2.3.2. Lumped sistem yöntemi ile ısı transfer katsayısının belirlenmesi.....	24
3.2.4. Kızartma İşleminin Modellenmesi.....	27
3.2.4.1. Kütle transferinin modellenmesi.....	27
3.2.4.2. Isı transferinin modellenmesi.....	30
3.2.4.3. Model ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	34
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	36
4.1. KÜTLE TRANSFER PARAMETRELERİ.....	36
4.1.1. Etkin Nem Difüzyon Katsayısı.....	36
4.1.1.1. Kızartma sırasında parmak patatesin nem içeriğindeki değişim.....	36
4.1.1.2. Matematiksel Sonuçlar.....	39
4.1.2. Kütle transfer katsayısı.....	42
4.2. ISI TRANSFER KATSAYISININ BELİRLENMESİ.....	43
4.2.1. Parmak Patates Kullanılarak Isı transfer Katsayısının Belirlenmesi..	43
4.2.1.1. Kızartma sırasında parmak patateslerdeki sıcaklık değişimi.	43
4.2.1.2. Matematiksel sonuç.....	45
4.2.2. Lumped Sistem Yöntemi ile Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi.	50

4.2.2.1. Alüminyum parçacığın sıcaklık değişimi.....	50
4.2.2.2. Matematiksel sonuçlar.....	53
4.3.GELİŞTİRİLEN MODELİN DENEYSEL SONUÇLAR İLE UYUMLULUĞUNUN TEST EDİLMESİ.....	56
4.3.1. Kütle Transferi Modelinin Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırılması...	57
4.3.2. Isı Transferi Modelinin Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırılması.....	58
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
EKLER	68
ÖZGEÇMİŞ	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>		<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1.	Farklı sıcaklıklarda yapılan kızartma deneyleri için hesaplanan Biot sayısı, etkin nem difüzyon ve kütle transfer katsayısı değerleri.....	40
Çizelge 4.2.	Patatesin termofiziksel özellikleri.....	45
Çizelge 4.3.	Farklı sıcaklıklarda yapılan kızartma deneyleri için hesaplanan Biot sayısı ve etkin ısı transfer katsayısı değerleri	48
Çizelge 4.4.	Lumped sistem yöntemi ile farklı sıcaklıklarda kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda hesaplanan Biot sayısı ve ısı transfer katsayısı değerleri.....	54
Çizelge 4.5.	Farklı yağ sıcaklıklarında hesaplanan ısı transfer katsayısı ve etkin ısı transfer katsayısı değerlerinin karşılaştırılması.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>SEKİL</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1.	Patates dilimi.....	15
Şekil 3.2.	Parmak patates geometrisi.....	18
Şekil 3.3.	Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.4.	İçerisine ısıçiftler yerleştirilmiş parmak patates.....	21
Şekil 3.5.	İçerisine ısıçift yerleştirilmiş alüminyum parçacık.....	25
Şekil 3.6.	Patates dilimi ile oluşturulan kabarcık ortamı.....	26
Şekil 3.7.	Modellemede kullanılan hacim.....	27
Şekil 3.8.	Kütle transferinin modellenmesinde oluşturulan nodlar.....	28
Şekil 3.9.	Isı transferinin modellenmesinde oluşturulan nodlar.....	31
Şekil 4.1.	Farklı sıcaklıklarda elde edilen tipik $\frac{C}{C_i}$ -t grafikleri.....	37
Şekil 4.2.	Farklı kızartma sıcaklıklarında yüzeydeki bir noktanın sıcaklığı.....	38
Şekil 4.3.	Farklı kızartma sıcaklıklarında elde edilen patates iç sıcaklıkları.....	38
Şekil 4.4.	Farklı kızartma sıcaklıklarında elde edilen tipik $\ln \frac{C - C_\infty}{C_i - C_\infty} - t$ grafikleri.....	39
Şekil 4.5.	Difüzyon katsayısının sıcaklıkla ilişkisi.....	41
Şekil 4.6.	Kızartma sırasında patates ve yağ sıcaklığı (150°C).....	44
Şekil 4.7.	Kızartma sırasında patates ve yağ sıcaklığı (170°C).....	44
Şekil 4.8.	Kızartma sırasında patates ve yağ sıcaklığı (190°C).....	45
Şekil 4.9.	Parmak patatesin farklı yağ sıcaklıklarında kızartılması sırasında elde edilen $\ln \left(\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right)$ -zaman grafikleri.....	46

Şekil 4.10.	Patateslerin farklı sıcaklıklarda kızartılması sırasında elde edilen $\left(\ln \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right) - t$ grafiklerinin doğrusal kısımları.....	47
Şekil 4.11.	Kondüksiyon hatasının test edilmesi.....	49
Şekil 4.12.	Kondüksiyon hatasının test edilmesi için yapılan deneylerden elde edilen $\ln \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right) - t$ grafikleri.....	50
Şekil 4.13.	150 °C’de alüminyum parçacık kullanılarak kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık verileri.....	51
Şekil 4.14.	170 °C’de alüminyum parçacık kullanılarak kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık verileri.....	52
Şekil 4.15.	190 °C’de alüminyum parçacık kullanılarak kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık verileri.....	52
Şekil 4.16.	Kabarcıksız ortamda her üç yağ sıcaklığı için elde edilen $\ln \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right) - t$ grafikleri.....	53
Şekil 4.17.	Kabarcıklı ortamda her üç yağ sıcaklığı için elde edilen $\ln \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right) - t$ grafikleri.....	54
Şekil 4.18.	150 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen nem içeriği değişimi.....	57
Şekil 4.19.	170 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen nem içeriği değişimi.....	57
Şekil 4.20.	190 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen nem içeriği değişimi.....	58
Şekil 4.21.	150 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen sıcaklık değişimi.....	59
Şekil 4.22.	170 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen sıcaklık değişimi.....	59

Şekil 4.23.	190°C için model ile ve deneysel olarak elde edilen sıcaklık değişimi.....	60
Şekil Ek1.1.	Patates dilimlerinin kızartılması sırasında elde edilen tipik $\ln\left(\frac{\bar{C}(t)-C_\infty}{C_i-C_\infty}\right)$ - t grafiği (170°C).....	69
Şekil Ek2.1.	Patates diliminin kızartılması sırasında elde edilen tipik $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)$ - t grafiği (170°C).....	71
Şekil Ek3.1.	Farklı iki noktadan elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)$ - t grafikleri (150°C).....	73
Şekil Ek3.2.	Farklı iki noktadan elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)$ - t grafikleri (170°C).....	74
Şekil Ek3.3.	Farklı iki noktadan elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)$ - t grafikleri (190 °C).....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Alüminyum parçacığın toplam yüzey alanı (m ²)
A _E	: Nodların doğu yönündeki yüzey alanı (m ²)
A _N	: Nodların kuzey yönündeki yüzey alanı (m ²)
A _S	: Nodların güney yönündeki yüzey alanı (m ²)
A _W	: Nodların batı yönündeki yüzey alanı (m ²)
A _B	: Nodların arka yüzey alanı (m ²)
A _F	: Nodların ön yüzey alanı (m ²)
B	: $M^2 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{L}\right) \cos\left(\mu_1 \frac{y}{L}\right)$
Bi _h	: Isı transferi Biot sayısı
Bi _m	: Kütle transferi Biot sayısı
C	: Nem derişimi (g nem / g kuru madde)
C _∞	: Kızartma ortamının nem derişimi (g nem / g kuru madde)
$\bar{C}(t)$: Herhangi bir anda ortalama nem derişimi (g nem / g kuru madde)
C(x,t)	: Herhangi bir anda herhangi bir konumdaki derişim (g nem / g kuru madde)
C _i	: Başlangıç nem derişimi (g nem / g kuru madde)
c _p	: Özgül ısı (J / kg °C)
D	: Nem difüzyon katsayısı (m ² / s)
D _e	: Etkin nem difüzyon katsayısı (m ² / s)
E	: $\frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1 [\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1]}$
h	: Isı transfer katsayısı (W / m ² °C)
h _e	: Etkin ısı transfer katsayısı (W / m ² °C)
k _c	: Kütle transfer katsayısı (m / s)
k _e	: Etkin kütle transfer katsayısı (m / s)
L	: Yarı kalınlık(m)
L _c	: Karakteristik boyut (V/A) (m)
m	: Alüminyum parçacığın kütlesi (g)

M	: $\frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1}$
R _h	: Isı transferine olan dirençler (°C / W)
R _m	: Kütle transferine olan dirençler (s / m ³)
R _g	: Evrensel gaz sabiti (Pa m ³ / kg mol K)
t	: Zaman (s)
T	: Sıcaklık (°C)
T _∞	: Kızartma yağı sıcaklığı (°C)
T (x,t)	: Sonsuz plaka içerisinde herhangi bir anda herhangi bir konumdaki sıcaklık (°C)
T (x,y,t)	: Parmak patates geometrisinde herhangi bir anda herhangi bir konumdaki sıcaklık (°C)
T(t)	: Herhangi bir andaki sıcaklık (°C)
T _i	: Başlangıç sıcaklığı (°C)
V	: Hacim (m ³)
W	: Ortalama nem derişimi (kg / m ³)
x	: x yönündeki konum (m)
y	: y yönündeki konum(m)
y ₀	: x = 0' da y değeri
α	: Isıl yayınım katsayısı (m ² / s)
Δx,	: Nodlar arası yatay uzaklık (m)
Δy	: Nodlar arası dikey uzaklık (m)
Δt	: Zaman aralığı (s)
λ	: Suyun buharlaşma gizli ısısı (kJ / kg)
ρ	: Yoğunluk (kg / m ³)
μ _n	: Bi = μ × tan μ denkleminin kökleri

ALT VE ÜST İNDİSLER

- i : x yönündeki nod numarası
 i_{max} : x yönündeki nod sayısı
 j : y yönündeki nod numarası
 j_{max} : y yönündeki nod sayısı
 k : z yönündeki nod numarası
 k_{max} : z yönündeki nod sayısı
 $n, n+1$: Zaman basamağı indisi

1. GİRİŞ

Kızartma, en eski pişirme yöntemlerinden birisidir. Ürüne kazandırdığı karakteristik tat ve yapısal özelliklerin tüketiciler tarafından beğenilmesi, yaygın olarak kullanımına neden olmuştur. Kızartılarak işlenen ürünler arasında patates önemli bir yer tutar. Genellikle cips olarak tanımlanan ince dilimler ve parmak patates olarak bilinen dikdörtgenler prizması halinde kızartılmaktadır.

Kızartma, gıdanın yenilebilir kızgın yağ (150 – 200 °C) içerisine daldırılarak pişirilmesi işlemidir [1]. Kızartma işlemi ısı ve kütle transferinin aynı anda görüldüğü bir pişirme prosesidir. Sıcak yağdan gıdaya ısı transferi olurken, gıdadan da yağa doğru kütle transferi meydana gelir. Kızartma işlemi ilerledikçe ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve düşük nem koşulları, parmak patatesin karakteristik özellikleri olan renk, tekstür ve aromanın oluşmasını sağlar. Son yıllarda yapılan çalışmalar kızartma sırasında oluşan bu koşulların aynı zamanda potansiyel karsinojen bir madde olan akrilamidin oluşmasına neden olduğunu göstermiştir [2]. Bu nedenle, yüksek sıcaklık ve düşük nem koşullarının oluşmasında etkili olan proses parametrelerinin bilinmesi, ürün güvenliği ve kalitesi açısından önem taşımaktadır.

Literatürde patateslerin kızartılması sırasında ısı ve kütle transfer parametrelerinin belirlenmesi konusunda yeterli çalışma yoktur. Çalışmaların büyük çoğunluğu da Lumped sistem yöntemi veya parmak patates geometrisine göre daha basit bir geometri kullanılarak ısı transfer katsayısının belirlenmesine yöneliktir. Bu nedenle kızartmada olduğu gibi ısı ve kütle transferinin eş-zamanlı olarak gerçekleştiği proseslerde, ısı ve kütle transferinin bir arada incelenerek, gerçek prosesi yansıtan bir yaklaşımla bu taşınım olaylarına ait parametrelerin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Isı ve kütle transfer parametrelerinin bilinmesi, proses tasarımı ve modellenmesi açısından önem taşır.

Bu çalışmanın başlıca amacı, patateslerin kızartılması sırasında ısı (ısı transfer katsayısı) ve kütle transfer parametrelerinin (nem difüzyon katsayısı ve kütle transfer katsayısı) farklı yağ sıcaklıklarında (150, 170, 190 °C) belirlenmesidir.

Çalışmanın diğler bir amacı ise kızzartma işleml için geliştirilen bir ısı ve kütle transferi modelinde, bulunan parametre değlerlerini kullanarak sıcaklık ve nem içeriği profillerini elde etmek ve bunları deneysel bulgular ile karşılaştırarak modelin doğruluğunu test etmektir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. PATATES

Patates, *Solanum tuberosum* olarak da adlandırılan bir kök bitkidir. Patateste nem içeriği genelde % 75-80 arasındadır [3]. Geri kalan kısım % 18 karbohidrat, % 1-2 protein ve aminoasit, % 0,1 yağ, % 0,1' den az oranda da vitamin ve mineral içermektedir [4]. Toplam kuru ağırlığın yaklaşık % 80'ini oluŐturan karbohidratların, ortalama % 70'i nişasta, % 0,5-1'i sukroz, % 0,5-2'si indirgen Şeker ve % 6-8'i diyet lifidir. Sukroz, glukoz ve fruktoz patateste bulunan başlıca Őekerlerdir. Patatesteki protein ve aminoasit miktarının yarısına yakınıni asparajin ve glutamin oluşturmaktadır. 100 g taze patateste 2,1 g protein (N x 6,25), 71,7 kcal enerji, 25 mg C vitamini, 0,1 g tiamin, 0,02 g riboflavin, 0,5 mg nikotinic asit ve 1 mg demir bulunmaktadır [4].

Patates, hayvan yemi olarak veya taze olarak tketelebildiği gibi, gıda sanayiinde de değişik amaçlarla kullanılabilir. İŐlenerek patates granülü, nişastası ve unu Şeklinde, küp Şeklinde doğranarak garnitür konservelerinin içerisinde veya patates cipsi ve parmak patates Şeklinde tüketicie ulaŐtırılmaktadır. Parmak patates ve patates cipsi, patateslerin kızartılması ile elde edilen ürünler olup, işlenmiş patates ürünleri arasında önemli yer tutarlar. Patates cipsi nem oranı düşük, yağ oranı yüksek, kuru ve gevrek bir üründür. Parmak patatesler ise daha hacimli, nem oranları daha yüksek, yağ oranları cipslere göre daha düşük, kabuk kısmı kuru ve gevrek, iç kısmı nemli yapıya sahip ürünlerdir.

2.2. KIZARTMA İŞLEMİ

Kızartma, gıdanın 150 - 200 °C arasındaki sıcaklıkta yenilebilir yağ içerisine daldırılarak pişirilmesi işlemidir [1]. Kızartma sırasında ürünün yağ içerisine daldırılması ile beraber sıcak yağdan gıdaya ısı transferi gerçekleŐmekte ve üründe sıcaklığın artması ile birçok fiziksel ve kimyasal tepkime meydana gelmektedir [1, 5].

2.2.1. Kızartma Sırasında Eş-zamanlı Isı ve Kütle Transferi

Kızartma işlemi ısı ve kütle transferinin eş-zamanlı olarak gerçekleştiği bir ısıl işlemdir. Eş-zamanlı ısı ve kütle transferinin gerçekleşmesi kızartma işlemini anlaşılması zor temel işlemlerden biri haline getirmektedir [6].

Kızartma işleminde ürünün ısınmasında etkili olan ısı transfer mekanizmaları konveksiyon ve kondüksiyondur. Isının yağdan gıda materyaline konveksiyon ve gıda içerisinde de kondüksiyon ile taşınması sonucu, gıdanın sıcaklığında artma gözlenir. Gıda yağ içerisine daldırıldıktan sonra, yüzey sıcaklığı hızla suyun kaynama sıcaklığına yükselir ve yüzeydeki serbest nem buharlaşmaya başlar. Patateslerin kızartılması sırasında oluşan su buharı patatesin yüzeyinden kızgın yağın içerisine buhar kabarcıkları olarak uzaklaşır. Su buharlaşmasına bağlı olarak, yüzey kurur ve yüzey boyunca kabuk tabakası oluşur [7, 8, 9]. Kabuk oluşumundan sonra yüzey sıcaklığı yükselmeye başlar. Kızartma işlemi ilerledikçe yüzeyde su kaybı başlar ve oluşan kabuğun kalınlığı giderek artar. Patatesi çevreleyen bu kabuk, su buharının kaçışını engeller. Bu da patatesin iç kısmında su buharı oluşumuna bağlı olarak basıncın artmasına sebep olur. İç kısımdaki bu su buharı, oluşturduğu basıncın etkisiyle, patatesin yüzeyinde bazı noktalarda delikler oluşturarak uzaklaşır. İç kısım hala nem içerdiğinden, ürün içerisinde sıcaklık uzunca bir süre suyun kaynama sıcaklığına yakın bir değerde sabit kalır [10]. Budžaki ve Seruga [11] yaptıkları çalışmada içerisindeki çözünen madde miktarına bağlı olarak patates içerisindeki suyun kaynama noktasının saf suyun kaynama noktasından biraz daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Vitrac ve ark. [12] ise kaynama sıcaklığının 100-104 °C arası değişen değerler olduğunu belirtmiştir.

Patateslerin kızartılması sırasında ısı ve kütle transferini, iç kısımda ve kabukta ayrı ayrı ele alan çalışmalar bulunmaktadır [1, 13, 14]. Kızartma sırasında ürünü kabuk ve iç kısım olarak ikiye ayrılırsa her iki bölge de dinamik bir durumdadır. Vijayan ve Singh [14] patates granüllerinden hazırladıkları plaka şeklindeki hamur örneklerini kullanarak yaptıkları kızartma işleminde, kızartma başladıktan kısa bir süre sonra kabuk ve iç kısmın bir ara-yüzey ile ayrıldığını ve ara-

yüzeyin kızartma boyunca merkeze doğru ilerlediğini gözlemişlerdir. Kızartma süresi ilerledikçe kabuk kalınlığı artmakta, iç kısım kalınlığı azalmaktadır. Her iki bölgede de derişim ve sıcaklık farklarına bağılı olarak eş-zamanlı ısı ve kütle transferi meydana gelmektedir [1].

2.2.2. Kızartma Sırasında Meydana Gelen Değişimler

Kızartma sırasında ısı etkisiyle meydana gelen değişimler nişasta jelatinizasyonu, protein denatürasyonu, renk ve aroma gelişimi, nem içeriğinin azalması, sıcaklığın artması, kabuk tabakasının oluşumu ve gelişimi, ve ürünün büzüşmesi veya kabarması olarak sayılabilir [1, 15]. Çiğ patates nişastası granüller halindedir. Nişasta belli sıcaklık ve nem derişimi üzerinde jelatinizasyon olarak bilinen geri - dönüşümsüz yapısal değişime uğrar [16]. Böylece yapısına su alarak şişen nişasta sindirime hazır hale gelir [17]. Patatesin kızartılması sırasında patates içerisindeki sıcaklığın 58-65 °C'ye gelmesi ile birlikte [18] nişasta jelatinizasyonu başlar.

Kızgın yağdan patatese aktarılan enerjinin büyük bir kısmı suyun buharlaşması için kullanılmaktadır. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda araştırmacılar kızartma sırasında meydana gelen nişasta jelatinizasyonu, protein denatürasyonu gibi kimyasal değişiklikler için gerekli ısının suyun buharlaşması için gereken ısıdan çok düşük olduğunu kabul ederek matematiksel modeller geliştirmişlerdir [6, 14, 19]. Yine yapılan bir çalışmada patates nişastası için jelatinizasyon ısısının 16,8 J / g [20] olduğu rapor edilmiştir. Suyun buharlaşması için harcanan enerjinin suyun kaynama sıcaklığında 2257 J / g [3] olduğu düşünülürse jelatinizasyon için harcanan enerjinin önemsiz kaldığı görülmektedir. Bu nedenle bazı çalışmalarda yapıldığı gibi kimyasal tepkimelerde kullanılan enerji ihmal edilebilir.

Moyano ve ark.[5] yaptıkları çalışmada tekstür, renk, aroma ve yağ içeriğinin parmak patateslerdeki başlıca kalite kriterleri olduğunu belirtmişlerdir. Ürünün karakteristik özellikleri renk, aroma ve tekstür olarak kızartma sırasında oluşan

kabuk tarafından sağlanmaktadır [1]. Kabuk oluşumu ile üründe kuru ve gevrek, gözenekli bir yapı gelişimi gözlenir [7].

Kızarmış patates ve patates cipslerinin en belirgin kalite özelliklerinden biri renktir [21]. Isı transferi sonucu oluşan karamelizasyon ve Maillard tepkimesi gibi enzimatik olmayan esmerleşme tepkimeleri ile ürüne özgü renk ve aroma oluşur [5, 6]. Maillard tepkimesi amino asitler ve indirgen şekerler arasında yüksek sıcaklıkta gerçekleşen bir tepkimedir. Maillard tepkimesi serbest aminoasit, peptid veya proteinlerin yapısında bulunan serbest amino grubu ile indirgen şekerler arasında başlayıp, esmer renkli azotlu polimerlerin oluşması ile tamamlanır [22]. Karamelizasyon ise şekerlerin azotlu maddelerin olmadığı ortamlarda şekerlerin dehidrasyonu ile başlar. Isıtılmaları ile bir dizi tepkime meydana gelir ve renkleri koyulaşarak kahverengiye dönüşür [22]. Krokida ve ark. [21] yaptıkları çalışmada yağ sıcaklığı ve patates dilimi kalınlığının rengi etkileyen parametreler olduğunu ve yağ sıcaklığının artması ve dilim kalınlığının azalması ile esmerleşmenin arttığını belirlemişlerdir [21].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda gıdalara uygulanan kızartma, fırınlama ve kavurma gibi işlemler sırasında yüksek sıcaklık ve düşük nem koşullarına bağlı olarak, potansiyel karsinojen bir madde olan akrilamidin oluştuğu belirlenmiştir [2]. Akrilamidin indirgen şekerler ve asparajin arasındaki Maillard tepkimesi sırasında oluştuğu ve asparajinin akrilamid oluşumu için gerekli olduğu düşünülmektedir. Becalski ve ark. [23] akrilamid oluşumunun sağlanması için 100 °C'nin üzerinde sıcaklıklara ihtiyaç olduğunu, Tareke ve ark. [24] ise patates cipsi, parmak patates gibi nişastalı gıdalarda akrilamidin 120 °C'nin üzeri sıcaklıklara çıktığında oluştuğunu belirtmişlerdir [25]. Patates, yüksek miktarda asparajin ve indirgen şeker içerdiğinden kızarmış patates ürünlerinde yüksek miktarda akrilamid bulunmaktadır. [26].

Kızartma işlemi, ürünün karakteristik özelliklerini sağlaması ile beraber, insan sağlığı açısından tehlikeli olabilecek maddelerin de oluştuğu bir işlemdir. Bu nedenle işlemin tasarımının yapılması önemlidir. Kızartma prosesinin tasarımı,

prosesin matematiksel modellemesi ile mümkündür. Modelin başarısı ise, kızartma sırasında ısı transfer katsayısı, kütle transfer katsayısı ve nem difüzyon katsayısı gibi proses parametrelerinin doğru olarak bilinmesine bağlıdır. Isı transferi etkisiyle üründeki su uzaklaşmakta ve karakteristik özelliklerini sağlayan fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelmektedir. Ayrıca ürün yapısında bulunan enzimlerin ve mikroorganizmaların inaktive olması ile ürün güvenliği de sağlanmaktadır. Ürün kalitesi ve güvenliği açısından, üründeki sıcaklık artışını kontrol eden ısı ve kütle transfer olaylarının bir arada incelenmesi ve transfer parametrelerinin gerçekçi bir yaklaşımla belirlenmesi gerekmektedir.

2.3. KÜTLE TRANSFER PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Kızartma sırasında iki farklı kütle transferinden söz edilebilir. Bunlar, patatesten nemin uzaklaşması ve yağın patates içerisine difüzyonu olarak tanımlanabilir.

Hubbard ve Farkas [6] yaptıkları çalışmada kızartma işlemini ilk ısıtma, yüzeyde kaynama, azalan hız ve kabarcık bitim noktası aşaması olmak üzere dört aşamaya ayırarak incelemişlerdir. Gıda maddesi sıcak yağa daldırıldıktan sonraki ilk ısıtma aşamasında gıdanın sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığına yükselir. Yüzeyde kaynama aşamasında artık ürün yüzeyi kaynama sıcaklığına ulaşmıştır ve yüzeydeki serbest su aniden buharlaşır ve kabuk oluşmaya başlar. Azalan hız aşamasında zamanla oluşan kabuk etkisiyle suyun buharlaşmasında ve kabarcık oluşumunda azalma gözlenir. Bir süre sonra da kabarcık oluşumunun durduğu kabarcık bitim noktası aşaması başlamaktadır.

Kızartma sırasında buhar kabarcıklarının oluşumu nem kaybı hızına bağlıdır. Nem kaybı hızı arttıkça kabarcık oluşumu artmaktadır. Kızartma süresince kabarcık oluşumu maksimum bir değere ulaşır ve daha sonra azalır [8]. Yüzey nemi uzaklaştıktan sonra, kabuk oluşumu başlar. Kabuk kızartma boyunca kalınlığı artan gözenekli bir yapı olarak kabul edilebilir [19]. Farkas ve Hubbard [19] yaptıkları çalışmada materyaldeki suyun sadece kabuk – iç kısım ara-yüzeyinde buharlaştığını

ve yüzeye buhar olarak taşındığını ve bu nedenle iç kısmın serbest nem içerdiğini, nem kaybının kabuk - iç kısım ara-yüzeyindeki suyun buharlaşması ve oluşan buharın kabuk boyunca yüzeye doğru hareketi ile gerçekleştiğini belirtmişlerdir [19].

Literatürde kızartma sırasında nem kaybının farklı şekilde modellendiği çalışmalar bulunmaktadır. Singh ve Heldman [3] kızartma sırasında ürüne aktarılan tüm enerjinin suyun buharlaşmasında kullanıldığı varsayımını yaparak, kızartma sırasındaki nem kaybını modellemişler, kullandıkları eşitliğin elde ettikleri deneysel sonuçları desteklemekle beraber, kabuk oluşumunu ve yatışkın olmayan durumdaki nem ve sıcaklık profillerini doğrulamadığını gözlemlemişlerdir [1]. Kozempel ve ark. (1991) [1] kızartmada Fick'in difüzyon eşitliğinin sonsuz seri çözümünün ilk terimini kullanarak nem kaybını modellemişlerdir. Çalışmada difüzyon katsayısının yağ sıcaklığının bir fonksiyonu olduğu ve Arrhenius tipi bir eşitlikle yağ sıcaklığı ile ilişkilendirilebileceği belirtilmiştir [1]. Costa ve ark. [27] nem kaybının Fick'in ikinci yasasını kullanarak kızartma sırasında üründe nem difüzyon katsayısını hesaplamışlardır. Rice ve Gamble [28] patateslerin kızartılması sırasında Fick'in ikinci yasasının sonsuz seri çözümünün ilk terimini kullanarak ve kütle transfer katsayısını sonsuz kabul ederek, difüzyon katsayısını belirlemişlerdir.

Kütle transferinin yağ transferini de içerdiği ürünün yağ içeriğinin artması ile görülmektedir [7, 29, 30, 31]. Ancak yağ alımının belirlenmesi için ekstraksiyon yöntemi ile yapılan yağ analizleri, ürün yağdan çıkartıldıktan sonra yapıldığından kızartılmış ürünlerde bulunan yağın ürün kızartılırken mi yoksa kızartma sonrasında mı ürüne alındığı konusunda farklı çalışmalar bulunmaktadır. Saguy ve Dana [32] yağ alımının, buharlaşan su ve yağın yer değiştirmesi ve kızartma sonrası yağın absorpsiyonu şeklinde olduğunu belirtmiştir. Saguy ve Dana [32], su ve yağın yer değiştirmesinin McDonough ve ark. (1993) ve Moreira ve ark. (1997) 'nın belirttiği gibi kızartma işlemi sırasında üründeki suyun buharlaşması sonucu oluşan kanalcıklara yağın absorbe edilmesi şeklinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Bu şekilde olan yağ alımının büyük bir miktarı kızartmanın ilk 20 s içinde gerçekleştiği bildirilmiştir [32]. Yine aynı çalışmada buhar oluştuğu sürece, su buharının yüzeye doğru hareketi sonucu, yağın oluşan bu kanalcıkları doldurmasının engellendiği ve

yağ alımının büyük kısmının soğutma sırasında kapiler hareket etkisi ile gerçekleştiği belirtilmiştir.

Krokida ve ark. [31] yaptıkları çalışmada birinci dereceden kinetik model ve korelasyonlar ile doğrusal olmayan regresyon analizini kullanarak nem kaybı ve yağ alımını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada yağ analizi Soxhlet ekstraksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Ancak analiz işlemi ürün yağdan uzaklaştırıldıktan sonra gerçekleştirildiğinden, yağın ürün içerisine kızartma sırasında mı alındığı, yoksa patates yağdan çıkartıldıktan sonra mı absorbe edildiği belli değildir.

Yağ alımının belirlenmesi için yapılan diğer bir çalışmada Ufheil ve ark. [30], patatesleri boyanmış ve boyanmamış yağlarda kızartarak, kızartmanın değişik aşamalarında alınan örneklerde refraktometrik ve spektrofotometrik yöntemlerle yağ analizi yapıp yağ alımının kızartma işleminin hangi aşamalarında gerçekleştiğini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yağ alımının büyük kısmının ürün yağ içerisinden çıkartıldıktan sonra gerçekleştiği belirlenmiştir [30]. Moreira, Sun ve Chen [33] de yaptıkları bir çalışmada yine yağın büyük kısmının kızartma sırasında değil de sonrasında ürün yapısına geçtiğini belirlemişlerdir. Yine, Bunger ve ark. [34] yapmış oldukları çalışmada kızartma sırasında patates diliminin yağ içeriğinin değişmediğini rapor etmişlerdir. Isı transfer katsayısının belirlenmesi sırasında parmak patateslerde ürün yeterince kalın olduğundan alınan yağ miktarının ihmal edildiği çalışmalar da bulunmaktadır [1, 6, 19]. Bu bulgular ışığında kızartma sırasında patatesin yağ içeriğinde, kızartma süresine bağlı bir değişim beklenemeyeceğinden bu çalışmada kütle transfer parametrelerinin belirlenmesi nem difüzyon katsayısı ve nemin transferine ait kütle transfer katsayısı ile sınırlandırılmıştır.

2.4. ISI TRANSFER KATSAYISININ BELİRLENMESİ

Patateslerin kızartılması sırasında, ürün yağa daldırıldığı andan itibaren yağdan ürüne ısı transferi gerçekleşmeye başlar. Kızarmış patates ürünlerinin renk, aroma ve tekstür özellikleri ısının aktarılması ile üründe meydana gelen fiziksel ve

kimyasal değişimler sonucu meydana gelir. Dolayısıyla elde edilen ürünün kalite özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla kızartma prosesinin optimizasyonu için ısı transfer katsayısının bilinmesi gerekmektedir.

Daldırarak kızartma sırasında ısı transfer katsayısının belirlenmesi için lumped sistem yöntemi kullanılması kızartma işleminde gıdadan nem difüzyonu sonucu oluşan kaynama aşamasını temsil edememektedir. Bu aşamadaki ısı transferi ürünün karakteristik duyuşsal özelliklerinin oluşmasında kritik rol oynamaktadır. Bu aşama sırasındaki bilgi eksikliği, ısı transfer katsayısı belirlenmesi için izlenmesi gereken yolun oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır [6].

Literatürde kızartma sırasında transfer katsayısına ilişkin yapılan çalışmalarda genellikle lumped sistem yaklaşımı veya parmak patates geometrisi yerine daha basit geometriler (sonsuz plaka ve sonsuz silindir) kullanılmıştır. Araştırmacılar [6, 8, 11, 19, 35, 36] farklı geometrilerdeki patates dilimlerinin kızartılması sırasındaki ısı transfer katsayısını değişik matematiksel yöntemler kullanarak belirlemişlerdir. Isı transfer katsayısının belirlenmesine ilişkin lumped sistem yönteminin kullanıldığı [8], kızartma işleminin hareketli-sınır problemi gibi ele alınıp kabuk ve iç kısım için ayrı ayrı kısmi diferansiyel denklemlerin elde edildiği [1], sonlu farklar yöntemi kullanılarak ısı transfer katsayısının deneme yanılma yoluyla bulunup deneysel sıcaklık-zaman verileri ile doğrulandığı [35, 36], ürüne aktarılan enerjinin, ürünün ısınmasında ve suyun buharlaşmasında kullanıldığı varsayılarak makroskobik enerji denklemleri ile ısı transfer katsayısının belirlendiği çalışmalar bulunmaktadır [6, 19].

Gıdaların kızartılması sırasında gıdanın yapısındaki suyun buharlaşmasından kaynaklanan kabarcıklar gözlenmektedir. Lumped sistem kullanılarak yapılan deneylerde ise kızartma ortamında böyle bir kabarcık oluşumu söz konusu değildir. Bu nedenle lumped sistem ile gerçekleştirilen deneylerin gerçek prosesi yansıtmaması beklenemez. Costa ve ark. [8] lumped sistem ile yaptıkları deneylerde kabarcık ortamı yaratmak amacı ile, $10 \times 10 \times 50$ mm boyutlarında çelik bir parçacığı, kızartma yağının içerisinde bulunan patates dilimlerinin 5-10 mm üzerine yerleştirmişlerdir. $140 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de yaptıkları kızartma işleminde lumped sistem

yaklaşımı ve yüzey sıcaklık verilerini kullanarak nem kaybının ısı transfer katsayısı üzerine etkilerini incelemişler ve ısı transfer katsayısının parmak patateslerin kızartılması sırasında 140°C’de maksimum 640 W/m²K değerine ulaştığını belirlemişlerdir. Lumped sistem yöntemini kullandıklarında ise ısı transfer katsayısını 140 °C’de maksimum 443 W/m²K ve 180°C’de maksimum 650 W/m²K olarak bulmuşlardır. Kızartma sırasında kabarcık hareketlerinin ısı transferini hızlandırabileceği gibi, nem kaybı hızının maksimuma ulaştığı sırada ısı transferinin de engellenebileceğini gözlemlemişlerdir. Kızarmakta olan patates diliminin alt ve üst kısımda kabarcık hareketlerinin farklı olmasından dolayı ısı transfer katsayısının alt ve üst yüzeyde farklı olmasını beklediklerini, bu nedenle buldukları ısı transfer katsayısı değerlerinin ortalama değerler olduğunu belirtmişlerdir.

Sahin ve ark. [35] alt ve üst yüzey için ısı transfer katsayıları belirlemişler ve bu değerlerin birbirinden farklı olduğunu rapor etmişlerdir. Sonsuz plaka şeklindeki (50 × 50 × 5 mm) patates dilimleri kullanarak 150 - 190 °C arasında yaptıkları kızartma değerlerinde ısı transfer katsayısını alt yüzey için 450 - 480 W/m²K, üst yüzey için ise 300 - 335 W/m²K olarak belirlemişlerdir. 150 ve 190°C arasında alüminyum yünü ve patates püresi kullanarak hazırladıkları tek boyutlu model (50 × 50 × 3 mm) ile yaptıkları kızartma işleminde ise ısı transfer katsayısının 90 - 200 W/m²K arasında değiştiğini gözlemişlerdir. Yapılan çalışmada yağ sıcaklığı arttıkça nem içeriği ve ısıl iletkenliğin azaldığı ancak ısı transfer katsayısının arttığı belirtilmiştir [36].

Ngadi ve İkediala [37], tavuk budu şeklinde alüminyum parçacık kullanarak Lumped sistem yöntemi ile ortalama ısı transfer katsayısı değerlerini 67-103 W/m²°C arasında değişen değerler olarak bulmuşlardır.

Baik ve Mittal [38] tofu kızartılması sırasında konvektif ısı transfer katsayısının belirlenmesine ilişkin yaptıkları çalışmada 147 – 172 °C arasındaki kızartma işlemlerinde, ısı transfer katsayısının alt yüzey için 644 – 724 W/m²K, üst yüzey için 722 – 827 W/m²K arasında olduğunu belirlemişlerdir. Üst yüzey renginin

alt yüzeyden daha koyu olmasının ve üst yüzeyde nem içeriğinin daha az olmasının bunu destekleyen sonuçlar olduğunu belirtmişlerdir.

Hubbard ve Farkas [6] sonsuz silindir şekilli patateslerin 180°C’de kızartılması sırasında elde ettikleri ürün yüzey sıcaklık verilerini kullanarak ısı transfer katsayısının kızartma işlemi boyunca 300 W/m²K’den başlayarak 1100 W/m²K’e kadar artan değerler aldığını belirlemişlerdir. Bu çalışmada ısı transfer katsayısı hesaplanmasında patates yüzey sıcaklığı, yağ sıcaklığı ve nem kaybı değerlerinin ölçümüne dayanan basitleştirilmiş enerji denkliği (Denklik 2.1) kullanılmışlardır. Hesaplama kullanılan enerji denkliğinde yağ alımına bağlı olarak kazanılan enerjinin kabuk kısmının ısınmasındaki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilmiştir. Bu ihmal, Moreira ve ark. [33] ve Ufheil ve Escher [30] tarafından yapılan çalışmalarda yağ alımının materyal fritözden çıkartıldıktan sonra gerçekleştiğinin bulunmasına dayandırılmıştır. Enerji denkliği yapılarak ısı transfer katsayısı hesaplanması mümkün görünmesine rağmen birikim teriminde yer alan termodinamik terimlerin (ρ , k , c_p) değerlerinin tam olarak belirlenememesi ve ayrıca zaman ve konuma bağlı olarak bu değerlerin değişmesi nedeniyle zor olduğu belirtilmiştir. Hubbard ve Farkas [6], buhar ile ısıtarak kaynama sıcaklığına getirdikleri patatesleri kullanarak yaptıkları kızartmada yüzey sıcaklığı yağ sıcaklığına ulaştığında su kaybının durduğu kabul edilerek yağdan aktarılan enerjinin tamamının suyun buharlaşmasında kullanıldığını varsayıp kaynama aşamasındaki ısı transfer katsayısını hesaplamışlardır.

$$h_{fp} = \frac{dm}{dt} = \frac{\Delta H_{vap}}{A(T_{\phi} - T_{x=L})} \quad (2.1)$$

Daha önce yapılan çalışmalardan görüldüğü gibi kızartma işleminde transfer parametrelerinin belirlenmesi için farklı yöntemler kullanılmıştır. Lumped sistem yaklaşımı veya parmak patatese göre daha basit bir geometrinin kullanıldığı bu çalışmalar, gerçek proses koşullarından uzaktır. Parmak patateslerin kızartılması sırasında ısı ve kütle transfer parametrelerinin daha gerçekçi bir yaklaşımla bulunması amacı ile yapılan bu çalışmada, parmak patates geometrisi kullanılmış ve

bu geometriye uygun bir matematiksel yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde kızartma sırasında kaydedilen sıcaklık ve ağırlık değişimlerinden yola çıkarak zamana karşı oluşturulan boyutsuz sıcaklık ve derişim oranı grafikleri kullanılmıştır.

3. MATERYAL ve METOD

3.1. MATERYAL

3.1.1. Parmak Patateslerin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan patatesler yerel marketten temin edilmiştir. Patatesler soyulduktan sonra yıkanmış ve bir kağıt havlu yardımıyla kurulandıktan sonra patates dilimleyici kullanılarak $8,5 \times 8,5$ mm kenarlı dilimler elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu patates dilimleri bir bıçak yardımıyla 70 mm uzunluğunda kesilerek, $8,5 \times 8,5 \times 70$ mm boyutlarında parmak patatesler hazırlanmıştır. Parmak patatesler kızartma deneyleri gerçekleştirilene kadar enzimatik esmerleşme tepkimelerine uğramamaları için alüminyum folyo ile sarılarak bekletilmiştir.

3.2. METOD

3.2.1. Kızartma İşleminin Gerçekleştirilmesi

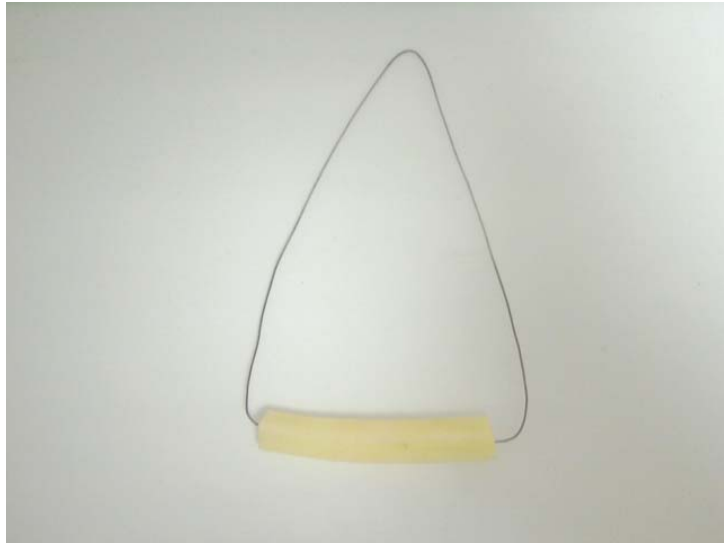
Kızartma deneyleri, yerel marketten temin edilen ayçiçek yağı (Ona, Marsa Karft Foods, Sabancı Gıda Sanayi ve Ticaret A.Ş., Adana) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kızartma ünitesi olarak $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtma yapabilen 5 L hacimli bir yağ banyosu (Precistern, J.P. Selecta, Spain) kullanılmıştır.

3.2.2. Kütle Transfer Parametrelerinin Belirlenmesi

3.2.2.1. Kızartma sırasında parmak patateslerde nem içeriğinin belirlenmesi

Parmak patatesler 3.1.1'de belirtilen şekilde hazırlandıktan sonra başlangıç nem içeriği patatesten hazırlanan örneklerin $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki etüvde (Memmert Ule-500, Schwabach, Almanya) sabit tartıma gelinceye kadar bekletilerek belirlenmiştir [39].

Kızartma sırasında nem içeriğindeki değişimin belirlenmesi için patates dilimleri farklı sürelerde kızartılarak nem tayinine tabi tutulmuştur. Bu amaçla Şekil 3.1 de görüldüğü gibi ince paslanmaz çelik bir tele tutturulan patates dilimi kızartma sıcaklığına getirilmiş yağ içerisine daldırılarak kızartılmıştır. Parmak patatesler her seferinde bir dilim daldırmak sureti ile 150 ± 1 °C’de 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90 ve izleyen her 30 saniyede bir 480 saniye, 170 ± 1 °C’de 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90 ve izleyen her 30 saniyede bir 360 saniye kadar, 190 ± 1 °C’de 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90 ve izleyen her 30 saniyede bir 240 saniye süre ile kızartılmıştır.



Şekil 3.1. Patates dilimi

Farklı sürelerde kızartılan patates dilimleri kızartma yağından çıkartıldıktan sonra yüzeylerindeki yağ kağıt havlu ile alınmış, ağırlıkları belirlenmiş (Scaltec-SPB54, 0,01 d., Gettinger, Almanya) ve nem tayini için 105 ± 2 °C’deki etüvde sabit tartıma gelinceye kadar bekletilmiştir [39]. Deneyler her sıcaklık için 4 paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nem içeriği değerleri difüzyon katsayısı ve kütle transfer katsayısı hesaplamasında kullanılmıştır.

3.2.2.2. Matematiksel yöntem

Bu bölümde deneysel verilerden etkin kütle transfer parametrelerinin belirlenmesine ilişkin yöntem verilmiştir. Kızartma sırasında üründen olan nem

kaybı, yüzeydeki nemin ani uzaklaşmasını [31] ve ürün içerisinde suyun ve su buharının ara-yüzeye ve ara-yüzeyden kızartma ortamına difüzyonunu içerdiği [13] ve iç kısımda kapiler hareket de suyun taşınmasında etkili olabileceği belirtilmektedir [7]. Bu nedenle sayılan tüm bu nem transfer mekanizmalarını içeren bir “etkin nem difüzyon katsayısı” tanımlanması ihtiyacı doğmaktadır [40]. Ayrıca etkin nem difüzyon katsayısından hesaplanan kütle transfer katsayısı da etkin kütle transfer katsayısıdır.

Nem difüzyon katsayısı'nın belirlenmesi: Kütle transfer parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan matematiksel yöntemde kızartma işlemi için çeşitli varsayımlar yapılmıştır. Bunlar aşağıda sıralandığı gibidir.

- 1) Kızartma sırasında parmak patates boyutlarının değişmediği kabul edilmiştir.
- 2) Kızartma sırasındaki ağırlık değişiminin yalnızca nem kaybından kaynaklandığı kabul edilmiştir.
- 3) Kızartma sırasında nem difüzyon katsayısının değişmediği kabul edilmiştir.
- 4) Başlangıç nem değerinin dilimin her yerinde aynı olduğu kabul edilmiştir.

Sonsuz plaka geometrisindeki bir materyalde zamana ve materyal içerisindeki konuma bağlı olarak derişim değişimini veren denklik (Fick'in 2. yasası) aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.1)$$

Burada x, konum (m); t, zaman (s); L, yarı kalınlık (m); C derişim (g nem / g kuru madde); D difüzyon katsayısı (m²/s)' dir. Bu çalışmada Denklik (3.1)'deki difüzyon katsayısının (D) yerini etkin difüzyon katsayısı, (D_e) almıştır.

Denklik (3.1), Denklik (3.2, 3.3. ve 3.4)'te verilen başlangıç ve sınır koşulları için çözüldüğünde Denklik (3.5)'te gösterilen sonsuz seri eşitlik elde edilir.

$$C(x, 0) = C_i \quad (3.2)$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3.3)$$

$$-D_e \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} = k_e (C|_{x=L} - C_\infty) \quad (3.4)$$

$$\frac{C(x, t) - C_\infty}{C_i - C_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos\left(\mu_n \frac{x}{L}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D_e t}{L^2}\right) \quad (3.5)$$

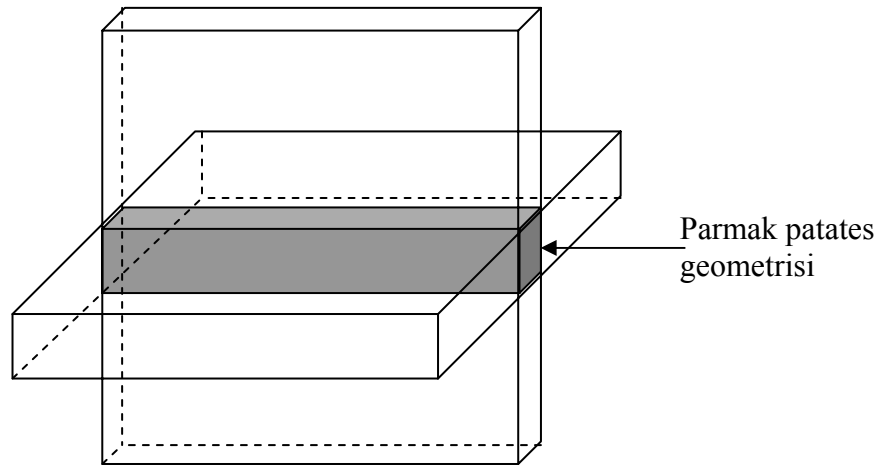
Denklik (3.5) kullanılarak herhangi bir anda sonsuz plaka içerisinde herhangi bir konumdaki derişim bulunabilir. Burada $C(x, t)$, herhangi bir anda herhangi bir konumdaki derişim (g nem / g kuru madde); C_∞ kızartma ortamının nem derişimi (0 g nem / g kuru madde); C_i patatesin başlangıç nem derişimi (g nem / g kuru madde); μ_n $Bi = \mu \tan \mu$ denkleminin (sonsuz plaka için karakteristik eşitlik) kökleri; D_e etkin difüzyon katsayısı (m^2/s)'dir.

Deneysel çalışmalarda, farklı süre kızartılan dilimler içerisindeki ortalama nem içeriği belirlenmiştir. Denklik (3.5)'in bütün hacimde integre edilmesiyle $\left(\frac{1}{V} \int_0^V C(x, t) dV\right)$ herhangi bir anda sonsuz plaka içerisindeki ortalama nem derişimini veren Denklik (3.6) [41] elde edilir.

$$\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin^2 \mu_n}{\mu_n [\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n]} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D_e t}{L^2}\right) \quad (3.6)$$

Burada $\bar{C}(t)$ herhangi bir andaki ortalama nem derişimi (g nem / g kuru madde)'dir.

Fourier sayısı $\left(\frac{D_e t}{L^2}\right)$ 0,1'den büyük olduğunda Denklik (3.6)'daki sonsuz seri eşitliğin birinci terimini kullanmak yeterlidir [42]. Sonsuz plaka için elde edilen bu denklik, süperimpozisyon tekniği uygulanarak, dikdörtgenler prizması şeklinde sonlu geometriye sahip patates içerisindeki ortalama nem derişimini veren denkleğe dönüştürülür. Bu teknikte Şekil 3.2'de görüldüğü gibi iki sonsuz plakanın dik olarak çakıştırılması ile sonlu plaka elde edilir. Bu, matematiksel olarak iki sonsuz plaka eşitliğinin birbirleriyle çarpılmasına eşdeğerdir.



Şekil 3.2. Parmak patates geometrisi

$$\left(\frac{\bar{C}(t)-C_\infty}{C_i-C_\infty}\right)_{\text{sonlu plaka}} = \left(\frac{\bar{C}(t)-C_\infty}{C_i-C_\infty}\right)_{\text{sonsuz plaka1}} \times \left(\frac{\bar{C}(t)-C_\infty}{C_i-C_\infty}\right)_{\text{sonsuz plaka2}} \quad (3.7)$$

Denklik (3.6)'dan yola çıkarak süperimpozisyon tekniği ile (Denklik 3.7) elde edilen parmak patates geometrisi için ortalama nem derişimini veren Denklik (3.8) elde edilmiştir.

$$\left(\frac{\bar{C}(t)-C_\infty}{C_i-C_\infty}\right)_{\text{sonlu plaka}} = E^2 \exp\left(-2\mu_1^2 \frac{D_e t}{L^2}\right) \quad (3.8)$$

Burada $E = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1 [\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1]}$ 'dir.

Denklik (3.8)'in her iki tarafının doğal logaritması alınarak Denklik (3.9) elde edilmiştir.

$$\ln\left(\frac{\bar{C}(t) - C_{\infty}}{C_i - C_{\infty}}\right) = 2 \ln E - 2\mu_1^2 \frac{D_e t}{L^2} \quad (3.9)$$

Denklik (3.9) kullanılarak $\ln\left(\frac{\bar{C}(t) - C_{\infty}}{C_i - C_{\infty}}\right) - t$ grafiği çizildiğinde grafiğin

doğrusal kısmının eğiminin $-2\mu_1^2 \frac{D_e}{L^2}$ ve grafiğin y - eksenini kestiği noktanın da $2 \ln E$ 'ye eşit olduğu görülmektedir. Eğimden etkin difüzyon katsayısı, D_e 'nin hesaplanabilmesi için μ_1 'in bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle ilk olarak grafiğin y - eksenini kestiği noktadan kök bulma yöntemlerinden birini (Newton - Raphson gibi) kullanarak μ_1 bulunur ve daha sonra da eğimden etkin difüzyon katsayısı, D_e , hesaplanır.

Kütle transfer katsayısının belirlenmesi: Kütle transfer katsayısı Biot sayısı kullanılarak hesaplanır. Biot sayısı kartezyen koordinatlarda Denklik (3.10)'daki gibi ifade edilebilir.

$$Bi_m = \mu_1 \tan \mu_1 \quad (3.10)$$

Görüldüğü gibi μ_1 bilinmesi durumunda Biot sayısı ve D_e bilindiğinden Denklik (3.11) kullanılarak kütle transfer katsayısı k_e hesaplanabilir.

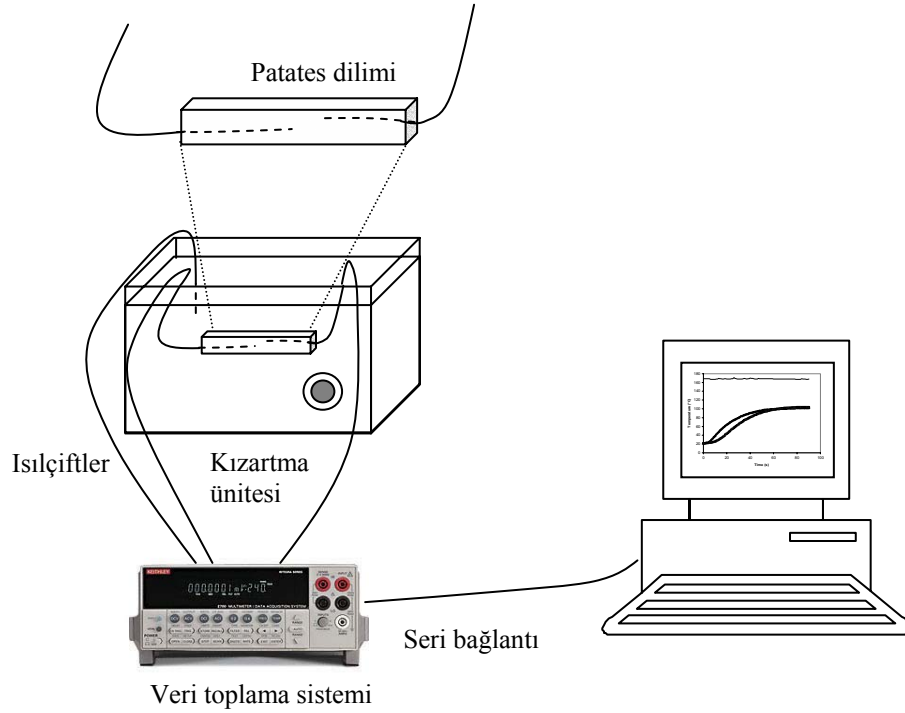
$$Bi_m = \frac{k_e L}{D_e} \quad (3.11)$$

Burada Bi_m , kütle transferi için Biot sayısı; k_e , etkin kütle transfer katsayısı (m/s)'dir.

3.2.3. Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi

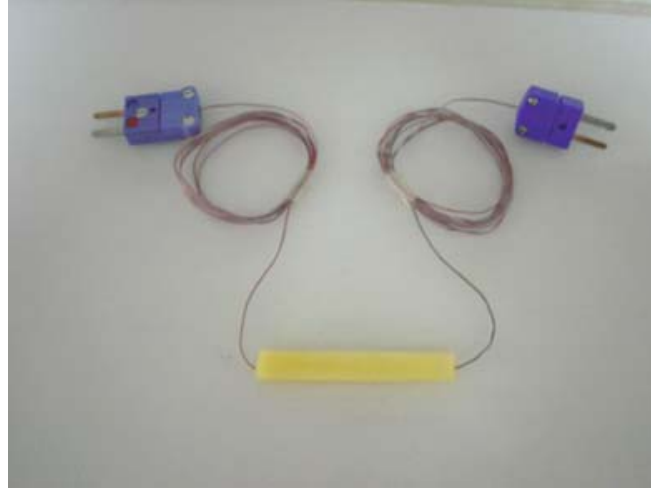
3.2.3.1. Parmak patates kullanılarak ısı transfer katsayısının belirlenmesi

Sıcaklık-zaman verilerinin elde edilmesi: Parmak patatesler 3.1.1.'de belirtilen şekilde hazırlanmış ve kızartma sırasında parmak patates içerisindeki sıcaklık, Şekil 3.3'de görüldüğü gibi patates diliminin her iki ucundan dilimin geometrik merkezine yakın olacak şekilde yerleştirilen ısıçiftler (36 gauge T-tipi, Omega Engineering Inc., Stamford, CT) ile ölçülmüştür. Isıçiftlerin yerleştirilmesi sırasında yüzeyi delerek patates dilimlerinin dışına çıkmamasına özen gösterilmiştir. Üç boyutlu yapıya sahip patates diliminde ısıçiftlerin geometrik merkeze mümkün olduğu kadar yakın yerleştirilmesi ile uçlardan olan ısı transferinin etkisinin ihmal edilmesi ve bu sayede problemin iki boyuta indirgenmesi sağlanmıştır. Bu, aynı zamanda, ısıçiftin yerleştirilmesi sırasında açtığı kanaldan girebilecek yağın, ölçümün yapıldığı noktadaki sıcaklığa etkisinin olmasını engellemiştir. Yağ banyosunun içerisine de yağın kızartma sıcaklığına gelip gelmediğinin kontrolü ve kızartma sırasında yağ sıcaklığının izlenmesi amacı ile bir ısıçift (36 gauge T-tipi) yerleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Kızartma yağının ve patates içerisindeki iki noktanın sıcaklıkları 1 saniye aralıklarla bir veri toplama sistemi ile (Model 2700, Keithley, Cleveland, OH) bilgisayara aktararak kaydedilmiştir. Şekil 3.4.'de kızartma işlemi için hazırlanan patates dilimi görülmektedir. Dilimler yatay konumda olacak şekilde yağ banyosu içerisine daldırılarak kızartılmıştır. Kızartma işlemleri 150 ± 1 , 170 ± 1 ve 190 ± 1 °C sıcaklığa getirilmiş ayçiçek yağında, her sıcaklık değeri için üç paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yüzeyine ısıçift yerleştirilen dilimler kullanılarak kızartma sırasında parmak patateslerin yüzeyindeki sıcaklık değişimi de kaydedilmiştir.



Şekil 3.4. İçerisine ısıçiftler yerleştirilmiş parmak patates

Matematiksel yöntem: Isı transfer katsayısının belirlenmesinde kullanılan matematiksel yöntemde kızartma işlemi için çeşitli varsayımlar yapılmıştır. Bunlar aşağıda sıralandığı gibidir.

- 1) Patatesin termofiziksel özellikleri sabit kabul edilmiştir.
- 2) Kızartma sırasında meydana gelen kimyasal değişimler (nişasta jelatinizasyonu, protein denatürasyonu vb.) için kullanılan enerji ihmal edilmiştir.
- 3) Kızartma sırasında yağın alınması sonucu yapıya aktarılan enerji ihmal edilmiştir.
- 4) Kızartma sırasında parmak patates boyutlarının değişmediği kabul edilmiştir.

- 5) Başlangıç sıcaklığı dilimin her yerinde aynı kabul edilmiştir.
- 6) Kabuk kısmının ısı transferine olan direnci ihmal edilmiştir.

Parmak patateslerin kızartılması sırasında eş-zamanlı ısı ve kütle transferi gerçekleştiğinden, bulunan ısı transfer katsayısı, etkin ısı transfer katsayısıdır. Deneysel olarak parmak patateslerde zamana karşı elde edilen sıcaklık verilerinden etkin ısı transfer katsayısının belirlenmesi için, sonsuz plaka içerisinde herhangi bir zamanda, herhangi bir konumdaki sıcaklığı veren Denklik (3.12)'den yola çıkılmıştır.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.12)$$

Burada x , konum (m); t , zaman (s); L , yarı kalınlık (m); α , ısı yayılım katsayısı (m^2/s)' dir.

Diferansiyel denklik, Denklik (3.13, 3.14 ve 3.15)'te verilen başlangıç koşulu ve sınır koşulları kullanılarak çözüldüğünde Denklik (3.16)'da verilen sonsuz seri eşitlik [41] elde edilir.

$$T(x, 0) = T_i \quad (3.13)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3.14)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h_e (T|_{x=L} - T_\infty) \quad (3.15)$$

$$\left(\frac{T(x, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos \left(\mu_n \frac{x}{L} \right) \exp \left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{L^2} \right) \quad (3.16)$$

Burada μ_n , $Bi = \mu \tan \mu$ denkleminin (sonsuz plaka için karakteristik eşitlik) kökleri; $T(x,t)$, herhangi bir anda herhangi bir konumda sıcaklık ($^{\circ}C$); T_{∞} , yağ sıcaklığı ($^{\circ}C$); T_i , patates başlangıç sıcaklığı ($^{\circ}C$)' dir.

Fourier sayısı $\left(\frac{\alpha t}{L^2}\right) > 0,1$ 'den büyük olduğu durumda sonsuz seri eşitliğin birinci terimin kullanılması yeterli olmaktadır [42]. Elde edilen sonsuz seri eşitliğin, sonlu geometriye sahip patates diliminde kullanılabilmesi için 3.2.2.2.'de verilen süperimpozisyon tekniği uygulanır.

$$\left(\frac{T(x, y, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)_{\text{sonlu plaka}} = \left(\frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)_{\text{sonsuz plaka}} \times \left(\frac{T(y, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)_{\text{sonsuz plaka}} \quad (3.17)$$

Bu amaçla sonsuz plaka için sıcaklık Denklikleri (3.18a) ve (3.18b) birbiriyle çarpılarak Denklik (3.19) elde edilir.

$$\left(\frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right) = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \cos\left(\mu_1 \frac{x}{L}\right) \exp\left(-\mu_1^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right) \quad (3.18a)$$

$$\left(\frac{T(y, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right) = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \cos\left(\mu_1 \frac{y}{L}\right) \exp\left(-\mu_1^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right) \quad (3.18b)$$

$$\left(\frac{T(x, y, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right) = M^2 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{L}\right) \cos\left(\mu_1 \frac{y}{L}\right) \exp\left(-2\mu_1^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right) \quad (3.19)$$

$$\text{Burada } M = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \text{ 'dir.}$$

Denklik (3.19)'un her iki tarafının doğal logaritması alındığında ise (3.20) numaralı denklik elde edilir.

$$\ln\left(\frac{T(x,y,t)-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right) = \ln B - 2\mu_1^2 \frac{\alpha t}{L^2} \quad (3.20)$$

Burada $B = M^2 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{L}\right) \cos\left(\mu_1 \frac{y}{L}\right)$, dir.

Denklik (3.20) kullanılarak $\ln\left(\frac{T(x,y,t)-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right)$, nin zamana karşı grafiği çizildiğinde eğimin $\left(-2\mu_1^2 \frac{\alpha}{L^2}\right)$, ye eşit olduğu görülmektedir. Dolayısıyla grafiğin doğrusal kısmının eğiminden μ_1 bulunabilir.

Isı transfer katsayısı, kütle transfer katsayısı hesaplamasında olduğu gibi Biot sayısından bulunur. Bu amaçla μ_1 sonsuz plaka için karakteristik eşitlikte yerine konarak Biot sayısı ($Bi_h = \mu_1 \tan \mu_1$) hesaplanır. Daha sonra Denklik (3.21) kullanılarak ısı transfer katsayısı (h_e) bulunur.

$$Bi_h = \frac{h_e L}{k} \quad (3.21)$$

Burada Bi_h ısı transferi için Biot sayısı; k , patatesin ısı iletkenlik katsayısı ($W/m^{\circ}C$)'dir.

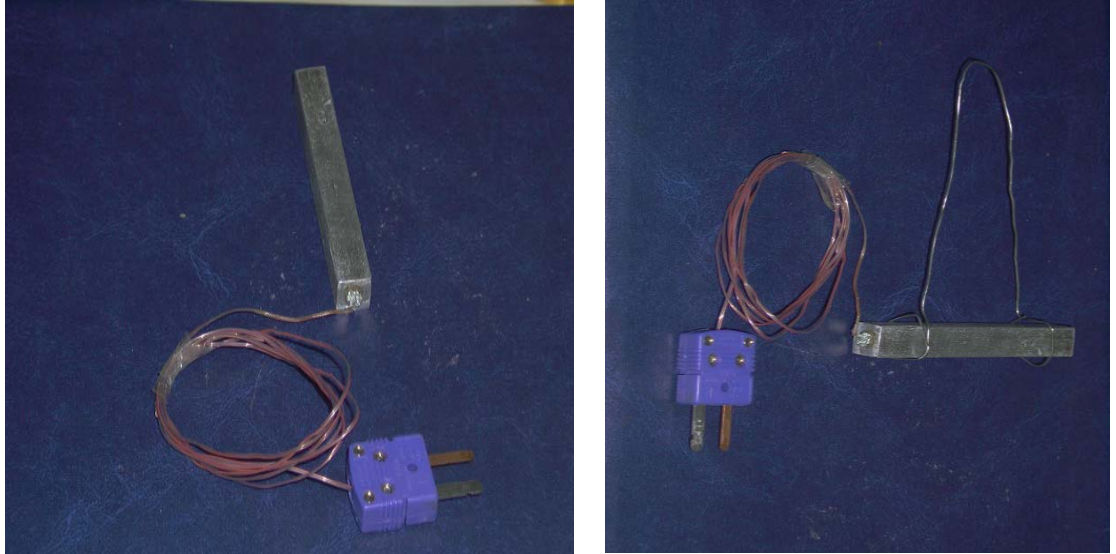
3.2.3.2. Lumped sistem yöntemi ile ısı transfer katsayısının belirlenmesi

Lumped sistem analizi ısıtma ya da soğutmaya maruz bırakılan katı içerisinde sıcaklığın konuma bağlı olarak değişmediği esasına dayanır. Bu da katı içerisinde kondüksiyona olan direncin ihmal edilebilir düzeyde olması ile mümkündür. Biot sayısının $\left(Bi_h = \frac{hL_c}{k}\right)$ 0,1'den küçük olması durumunda, katı materyal içerisindeki sıcaklık farklarının önemsiz olduğu gerçeğinden hareketle ısı transfer katsayısı hesaplanabilmektedir [3, 43]. Bu şart alüminyum, bakır gibi ısı iletkenlik katsayısı

yüksek cisimlerle sağlanabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada Lumped sistem analizinde alüminyum parçacık ($k = 204 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; $\rho = 2707 \text{ kg/m}^3$; $c_p = 869 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$ [3]) kullanılmıştır.

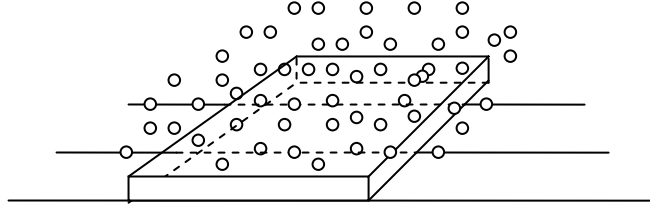
Sıcaklık-zaman verilerinin elde edilmesi: Lumped sistem yöntemi ile ısı transfer katsayısının belirlenmesi için yapılan deneylerde model parmak patates olarak $9,5 \times 9,5 \times 68,8 \text{ mm}$ boyutlarında bir alüminyum dikdörtgenler prizması kullanılmıştır. Deneyler $150, 170$ ve $190 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki ayçiçek yağı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Patateslerin kızartılması sırasında üründen uzaklaşan suyun oluşturduğu su buharı kabarcıklarının ısı transfer katsayısına olan etkisinin belirlenmesi için alüminyum parçacık ile yapılan deneylerin kabarcıklı ve kabarcıksız koşullarda gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

Parmak patates şeklindeki alüminyum parçacığın geometrik merkezine Şekil (3.5)'de görüldüğü gibi bir ısılıçift (36 gauge T-tipi) yerleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, alüminyum parçacık, ince metal bir tel yardımıyla (Şekil 3.5) yatay konumda olacak şekilde yağa daldırılarak, parçacığın sıcaklığı yağ sıcaklığına ulaşınca dek 1 s aralıklarla sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Deneyler üç paralel olacak şekilde yürütülmüştür.



Şekil 3.5. İçerisine ısılıçift yerleştirilmiş alüminyum parçacık

Kızartma sırasında kabarcık oluşumu, kızartma ünitesinin içerisindeki tel sepetin tabanına tutturulan bir patates plakası ($4 \times 3 \times 2$ mm) tarafından sağlanmıştır. Alüminyum parçacık, patates plakasının biraz üzerinde, oluşan kabarcık ortamının (Şekil 3.6) içerisinde tutulmak suretiyle, kabarcıksız koşullardaki deneylerde yapılan şekilde parçacığın zamana karşı sıcaklığı kaydedilmiştir.



Şekil 3.6. Patates dilimi ile oluşturulan kabarcık ortamı

Matematiksel Yöntem: Lumped sistem analizi yöntemine göre kullanılan alüminyum parçacık için genel enerji eşitliği yazıldığında (3.22) numaralı denklik elde edilir.

$$hA(T_{\infty} - T(t)) = m c_p \frac{dT(t)}{dt} \quad (3.22)$$

Burada h , ısı transfer katsayısı ($W/m^2\text{°C}$); A , parçacığın toplam yüzey alanı (m^2); T_{∞} , kızartma yağı sıcaklığı; m , parçacığın kütlesi (kg); c_p , parçacığın özgül ısıdır ($J/kg\text{°C}$).

Denklik (3.22) ($T(0) = T_i$) başlangıç koşulu kullanılarak çözüldüğünde Denklik (3.23) [41] elde edilir.

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \exp\left(-\frac{hA}{m c_p} t\right) \quad (3.23)$$

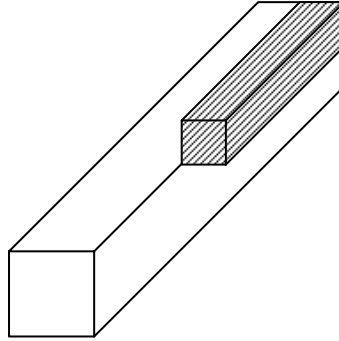
Denklik (3.23)'ün her iki tarafının doğal logaritmasının alınması ile bulunan Denklik (3.24)'teki $\ln\left(\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)$ 'nin zamana karşı grafiği çizildiğinde ortaya çıkan

doğrunun eğimi $\left(-\frac{hA}{m c_p}\right)$ 'dir. Doğrunun eğimi kullanılarak ısı transfer katsayısı (h) hesaplanabilir.

$$\ln\left(\frac{T(t)-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right) = -\frac{hA}{m c_p} t \quad (3.24)$$

3.2.4. Kızartma İşleminin Modellenmesi

Patatesin kızartılması sırasında, sınır koşullarının tüm yüzeyler için aynı olması sebebiyle ısı ve kütle transferi, dilim hacminin yalnızca $\frac{1}{8}$ 'inde (Şekil 3.7'deki taralı hacim) modellenmiştir.

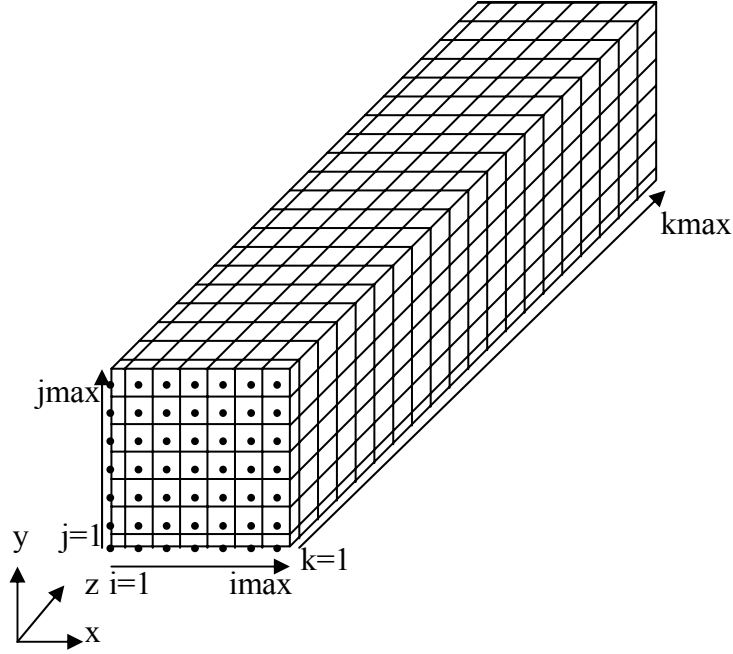


Şekil 3.7. Modellemede kullanılan hacim

3.2.4.1. Kütle transferinin modellenmesi

Parmak patates içerisindeki sıcaklık değişimi konuma bağlı olarak ölçülebilirken, dilim içerisindeki nem içeriğinin değişmesi tüm hacimdeki ortalama nem derişimi olarak bulunabilmektedir. Bu nedenle kütle transferinin modellenmesinde herhangi bir yöndeki değişimin ihmal edilmesi söz konusu değildir. Modelin tüm hacim için oluşturulması gerekmektedir. Bütün dilim

hacminin $\frac{1}{8}$ 'inde (Şekil 3.7) kütle denklikleri yazılabilir. Bu şekilde Şekil 3.8 için 27 farklı kütle denklığı yazılabilir. Genel denklik Denklik (3.25)'te verilmiştir.



Şekil 3.8. Kütle transferinin modellenmesinde oluşturulan nodlar

$$\begin{aligned}
 V_{i,j,k} \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} = & a_1 \frac{C_{\infty} - C_{i,j,k}^n}{R_m e_{i,j,k}} + a_2 \frac{C_{\infty} - C_{i,j,k}^n}{R_m n_{i,j,k}} + a_3 \frac{C_{\infty} - C_{i,j,k}^n}{R_m b_{i,j,k}} \\
 & + a_4 \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{R_m e_{i,j,k}} + a_5 \frac{C_{i-1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{R_m w_{i,j,k}} \\
 & + a_6 \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{R_m n_{i,j,k}} + a_7 \frac{C_{i,j-1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{R_m s_{i,j,k}} \\
 & + a_8 \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{R_m b_{i,j,k}} + a_9 \frac{C_{i,j,k-1}^n - C_{i,j,k}^n}{R_m f_{i,j,k}}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Burada $R_m w$, $R_m e$, $R_m s$, $R_m n$, $R_m b$, $R_m f$ altı farklı yöndeki kütle transferine olan dirençlerdir. a_1 - a_9 nodun konumuna göre 1 veya 0 değerini almaktadır.

$$R_m e_{i \max, j, k} = \frac{1}{k_c A e_{i \max, j, k}} + \frac{\Delta x}{2D_{ef} A e_{i \max, j, k}} \quad (3.26)$$

$$R_m e_{i, j, k} = \frac{\Delta x}{D_{ef} A e_{i, j, k}} \quad 1 \leq i \leq i \max - 1 \quad (3.27)$$

$$R_m n_{i, j \max, k} = \frac{1}{k_c A n_{i, j \max, k}} + \frac{\Delta y}{2D_{ef} A n_{i, j \max, k}} \quad (3.28)$$

$$R_m n_{i, j, k} = \frac{\Delta y}{D_{ef} A n_{i, j, k}} \quad 1 \leq j \leq j \max - 1 \quad (3.29)$$

$$R_m b_{i, j, k \max} = \frac{1}{k_c A b_{i, j, k \max}} + \frac{\Delta z}{2D_{ef} A b_{i, j, k \max}} \quad (3.30)$$

$$R_m b_{i, j, k} = \frac{\Delta z}{D_{ef} A b_{i, j, k}} \quad 1 \leq k \leq k \max - 1 \quad (3.31)$$

$$R_m f_{i, j, k} = \frac{\Delta z}{D_{ef} A f_{i, j, k}} \quad 1 \leq k \leq k \max \quad (3.32)$$

$$R_m w_{i, j, k} = \frac{\Delta x}{D_{ef} A w_{i, j, k}} \quad 1 \leq i \leq i \max \quad (3.33)$$

$$R_m s_{i, j, k} = \frac{\Delta y}{D_{ef} A s_{i, j, k}} \quad 1 \leq j \leq j \max \quad (3.34)$$

Burada A_N , A_E , A_S , A_W , A_B , A_F altı farklı yöndeki alanlar (m^2); Δx , Δy , Δz , nodlar arası uzaklık (m)'tir.

Bu çalışmada kullanılan sonlu farklar yöntemi ile sayısal çözüm yapılabilmesi için Denklik (3.35)'te verilen şartın sağlanması gerekmektedir. Sayısal çözümde kullanılacak Δt bu denklik yardımıyla seçilir.

$$\frac{V}{\Delta t} \geq \frac{1}{R_{m w}} + \frac{1}{R_{m e}} + \frac{1}{R_{m n}} + \frac{1}{R_{m s}} + \frac{1}{R_{m f}} + \frac{1}{R_{m b}} \quad (3.35)$$

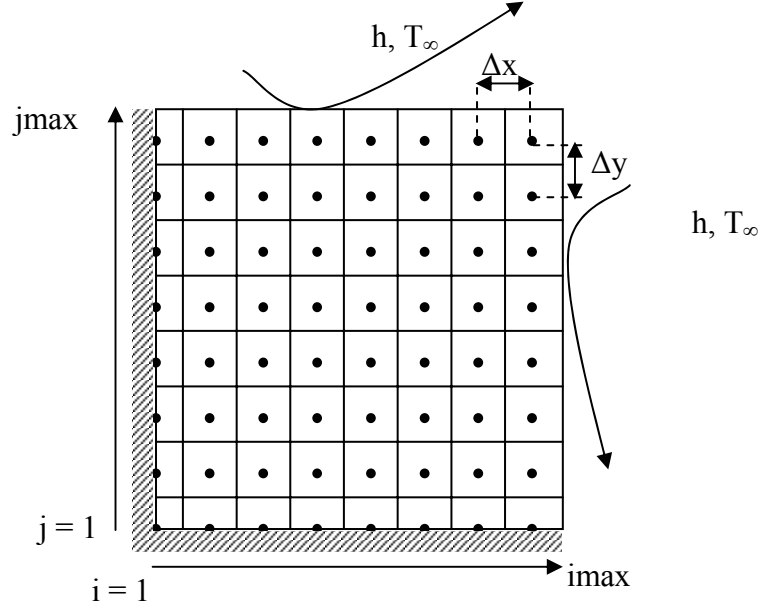
3.2.4.2. Isı transferinin modellenmesi

Patates diliminin uçlarından olan ısı transferinin uçlardan yeterince uzaktaki bir noktanın ısınmasına etkisi ihmal edilebilir. Bu, dilim uzunluğunun dilim kalınlığına göre çok daha büyük olmasının bir sonucudur. Buradan hareketle, gerçekte 3-boyutlu olan patates dilimi için ısı transferi 2-boyuta indirgenebilir. İki boyutlu ısı transferini modellemek için patates diliminin Şekil 3.7'deki taralı hacmin kesit alanında oluşturulan nodlarda enerji denklıkları yazılmıştır. Her iki yöndeki nod sayısı ne kadar artırılırsa artırılın, sınır koşullarına bağlı olarak Şekil 3.9'da görülen nodlar için dokuz farklı enerji denkliği yazılabilir.

Bu çalışmada kullanılan sonlu farklar yöntemi ile sayısal çözüm yapılabilmesi için Denklik (3.36)'da verilen şartın sağlanması gerekmektedir. Sayısal çözümde kullanılacak zaman aralığına (Δt), bu denklik kullanılarak karar verilmiştir.

$$\frac{\rho V c_p}{\Delta t} \geq \frac{1}{R_{h w}} + \frac{1}{R_{h e}} + \frac{1}{R_{h n}} + \frac{1}{R_{h s}} \quad (3.36)$$

Burada $R_{h w}$, $R_{h e}$, $R_{h s}$, $R_{h n}$, dört farklı yöndeki ısı transferine olan dirençler; Δt , zaman aralığı (s)'dir.



Şekil 3.9. Isı transferinin modellenmesinde oluşturulan nodlar

Denklik (3.36) kullanılarak her nod için hesaplanan Δt 'lerin en küçüğü modelde kullanılmak üzere seçilmiştir.

imax, jmax

$$\rho V_{imax,jmax} c_p \frac{T_{imax,jmax}^{n+1} - T_{imax,jmax}^n}{\Delta t} = \frac{T_\infty - T_{imax,jmax}^n}{\frac{1}{hA_N} + \frac{\Delta y}{2kA_N}} + \frac{T_\infty - T_{imax,jmax}^n}{\frac{1}{hA_W} + \frac{\Delta x}{2kA_W}} + \frac{kA_E}{\Delta x} (T_{imax-1,jmax}^n - T_{imax,jmax}^n) + \frac{kA_S}{\Delta y} (T_{imax,jmax-1}^n - T_{imax,jmax}^n) \quad (3.37)$$

imax, j = 2 → jmax-1

$$\rho V_{imax,j} c_p \frac{T_{imax,j}^{n+1} - T_{imax,j}^n}{\Delta t} = \frac{T_\infty - T_{imax,j}^n}{\frac{1}{hA_W} + \frac{\Delta x}{2kA_W}} + \frac{kA_E}{\Delta x} (T_{imax-1,j}^n - T_{imax,j}^n) + \frac{kA_N}{\Delta y} (T_{imax,j+1}^n - T_{imax,j}^n) + \frac{kA_S}{\Delta y} (T_{imax,j-1}^n - T_{imax,j}^n) \quad (3.38)$$

$i = 2 \rightarrow i_{\max}, j_{\max}$

$$\begin{aligned} \rho V_{i,j_{\max}} c_p \frac{T_{i,j_{\max}}^{n+1} - T_{i,j_{\max}}^n}{\Delta t} &= \frac{T_{\infty} - T_{i,j_{\max}}^n}{\frac{1}{hA_N} + \frac{\Delta y}{2kA_N}} + \frac{kA_E}{\Delta x} (T_{i-1,j_{\max}}^n - T_{i,j_{\max}}^n) \\ &+ \frac{kA_W}{\Delta x} (T_{i+1,j_{\max}}^n - T_{i,j_{\max}}^n) \\ &+ \frac{kA_S}{\Delta y} (T_{i,j_{\max}-1}^n - T_{i,j_{\max}}^n) \end{aligned} \quad (3.39)$$

$i=1, j_{\max}$

$$\begin{aligned} \rho V_{1,j_{\max}} c_p \frac{T_{1,j_{\max}}^{n+1} - T_{1,j_{\max}}^n}{\Delta t} &= \frac{T_{\infty} - T_{1,j_{\max}}^n}{\frac{1}{h\frac{A_N}{2}} + \frac{\Delta y}{2k\frac{A_N}{2}}} + \frac{kA_W}{\Delta x} (T_{2,j_{\max}}^n - T_{1,j_{\max}}^n) \\ &+ \frac{kA_S}{2\Delta y} (T_{1,j_{\max}-1}^n - T_{1,j_{\max}}^n) \end{aligned} \quad (3.40)$$

$i_{\max}, j = 1$

$$\begin{aligned} \rho V_{i_{\max},1} c_p \frac{T_{i_{\max},1}^{n+1} - T_{i_{\max},1}^n}{\Delta t} &= \frac{T_{\infty} - T_{i_{\max},1}^n}{\frac{1}{h\frac{A_W}{2}} + \frac{\Delta x}{2k\frac{A_W}{2}}} + \frac{kA_E}{2\Delta x} (T_{i_{\max}-1,1}^n - T_{i_{\max},1}^n) \\ &+ \frac{kA_N}{\Delta y} (T_{i_{\max},2}^n - T_{i_{\max},1}^n) \end{aligned} \quad (3.41)$$

$i = 2 \rightarrow i_{\max}-1, j = 2 \rightarrow j_{\max}-1$

$$\begin{aligned} \rho V_{i,j} c_p \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} &= \frac{kA_W}{\Delta x} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{kA_N}{\Delta y} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) \\ &+ \frac{kA_E}{\Delta y} (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{kA_S}{\Delta y} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\underline{i = 2 \rightarrow \text{imax}-1, j = 1}$$

$$\rho V_{i,l} c_p \frac{T_{i,l}^{n+1} - T_{i,l}^n}{\Delta t} = \frac{kA_W}{2\Delta x} (T_{i+1,l}^n - T_{i,l}^n) + \frac{kA_N}{\Delta y} (T_{i,2}^n - T_{i,l}^n) + \frac{kA_E}{2\Delta y} (T_{i-1,l}^n - T_{i,l}^n) \quad (3.43)$$

$$\underline{i = 1, j = 2 \rightarrow \text{jmax}-1}$$

$$\rho V_{1,j} c_p \frac{T_{1,j}^{n+1} - T_{1,j}^n}{\Delta t} = \frac{kA_N}{2\Delta y} (T_{1,j+1}^n - T_{1,j}^n) + \frac{kA_S}{2\Delta y} (T_{1,j-1}^n - T_{1,j}^n) + \frac{kA_W}{\Delta x} (T_{2,j}^n - T_{1,j}^n) \quad (3.44)$$

$$\underline{i = 1, j = 1}$$

$$\rho V_{1,1} c_p \frac{T_{1,1}^{n+1} - T_{1,1}^n}{\Delta t} = \frac{kA_N}{2\Delta y} (T_{1,2}^n - T_{1,1}^n) + \frac{kA_W}{2\Delta x} (T_{2,1}^n - T_{1,1}^n) \quad (3.45)$$

Burada A_N , A_E , A_S , A_W , dört farklı yöndeki alanlar (m^2); Δx , Δy , x ve y yönünde nodlar arasındaki uzaklık (m); ρ , patatesin yoğunluğu (kg/m^3); c_p , patatesin özgül ısısı, ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)'dir.

Modelde kütle transferinin sıcaklık değişimine etkisi, sıcaklığı kaynama sıcaklığına ($103^\circ C$) ulaşan nodlarda, denkliklere (Denklik 3.37 - 3.45) buharlaşma terimi eklenmesi ile sağlanmıştır. Eklenen buharlaşma terimi Denklik 3.46'da verilmiştir.

$$\frac{\lambda}{\rho c_p} [W_{i,j,k}^{n+1} - W_{i,j,k}^n] \quad (3.46)$$

Burada λ , suyun 103 °C'deki buharlaşma gizli ısı (2249 kJ/kg); W, ortalama nem derişimi (kg/m³)dir.

3.2.4.3. Model ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Kütle transferi modeli ile deneysel verilerin karşılaştırılması için kızartma deneylerinde zamana karşı elde edilen ortalama nem içerikleri kullanılmıştır. Isı transferi modelinin deneysel verilere uygunluğunun test edilmesi, deneyler sırasında sıcaklığın ölçüldüğü noktanın yerinin, bir başka deyişle ısıçiftin konumunun, bilinmesini gerektirir.

Isıçift konumunun belirlenmesi: Deneysel sıcaklık-zaman verileri kullanılarak ısıçiftin konumunu belirlemek mümkündür. Bunun için ilk olarak Denklik (3.19)'un her iki tarafının doğal logaritması alınmış (Denklik 3.47) ve

$\ln\left(\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty}\right)$ zamana karşı grafiğe geçirilmiştir.

$$\left(\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty}\right) = M^2 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{L}\right) \cos\left(\mu_1 \frac{y}{L}\right) \exp\left(-2\mu_1^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right) \quad (3.19)$$

$$\ln\left(\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty}\right) = \ln\left(M^2 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{L}\right) \cos\left(\mu_1 \frac{y}{L}\right)\right) - 2\mu_1^2 \frac{\alpha t}{L^2} \quad (3.47)$$

Burada $M = \left[\left(\frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1}\right)\right]$ 'dir.

Grafiğin eğiminin $\left(-\frac{2\mu_1^2 \alpha}{L^2}\right)$ olduğu görülmektedir. Buradan bulunan μ_1 , grafiğin doğrusal kısmının y-eksenini kestiği noktayı veren (y_0) Denklik (3.48)'de yerine konur.

$$y_0 = \ln \left[M^2 \cos \left(\mu_1 \frac{x}{L} \right) \cos \left(\mu_1 \frac{y}{L} \right) \right] \quad (3.48)$$

Denklik (3.47) yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki eşitlik (Denklik 3.49) elde edilir.

$$\cos \left(\mu_1 \frac{x}{L} \right) \cos \left(\mu_1 \frac{y}{L} \right) = \frac{e^{y_0}}{M^2} \quad (3.49)$$

Denklik (3.49) incelendiğinde bu eşitliği birden fazla (x,y) kombinasyonunun sağlayabileceği görülmektedir. Bu kombinasyonlarda x ve y değerleri farklı olabileceği gibi birbirine eşit de olabilir. Bu eşitliği sağlayan her (x,y) kombinasyonu için sıcaklık profili aynı olacağından, bu gerçekten hareketle, Denklik (3.49)'daki x ve y değerleri birbirine eşit alınmıştır. Bu şekilde elde edilen Denklik (3.50) ve (3.51) kullanılarak ısılıçiftin konumu belirlenmiştir.

$$\cos^2 \left(\mu_1 \frac{x}{L} \right) = \frac{e^{y_0}}{M^2} \quad (3.50)$$

$$x = \frac{L}{\mu_1} \arccos \sqrt{\frac{e^{y_0}}{M^2}} \quad (3.51)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

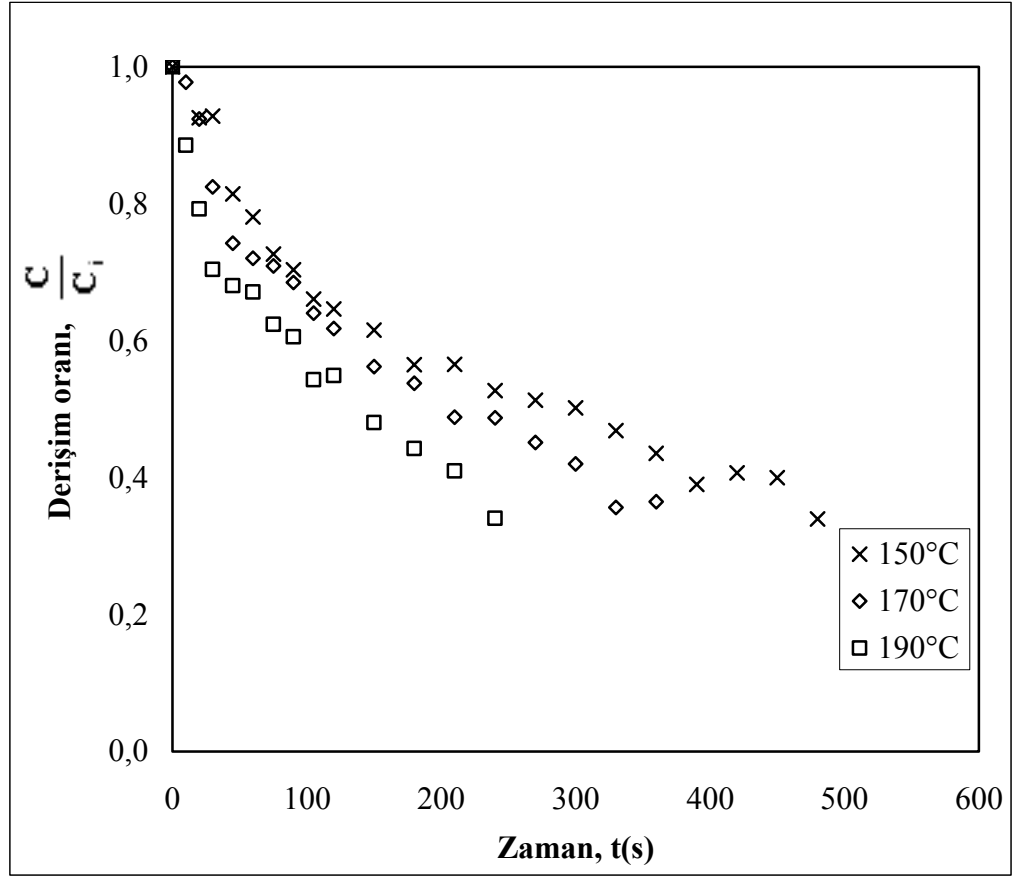
4.1. KÜTLE TRANSFER PARAMETRELERİ

4.1.1. Etkin Nem Difüzyon Katsayısı

4.1.1.1. Kızartma sırasında parmak patatesin nem içeriğindeki değişim

Kızartma işlemleri sırasında parmak patatesin yağın içerisine daldırılmasından kısa bir süre sonra kabarcık çıkışının başladığı gözlenmiştir. Kabarcık oluşumunun başlaması 150 °C'deki yağda yapılan kızartma işleminde, patates yağ içerisine daldırıldıktan yaklaşık 6 s, 170°C'de yaklaşık 4 s, 190 °C'de ise yaklaşık 2 s sonra olmuştur. Su buharı kabarcıklarının sayısı kızartmanın ilk aşamalarında giderek artmış ve maksimum bir değere ulaştıktan sonra belli bir süre boyunca oluşan kabarcık sayısının hemen hemen sabit olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra ise kabuk oluşumu ve kızartma ortamı ile patates arasındaki derişim farkının azalması nedeniyle kabarcık sayısı azalmış, ilerleyen sürelerde de patatesin sadece bazı bölgelerinden su buharı kabarcıkları çıkışı olduğu gözlenmiştir. Kabarcıkların oluşum hızında bu şekilde gözle görünür bir değişim olması, nem difüzyon katsayısının ve kütle transfer katsayısının kızartma boyunca değişen değerler alabileceğini göstermektedir.

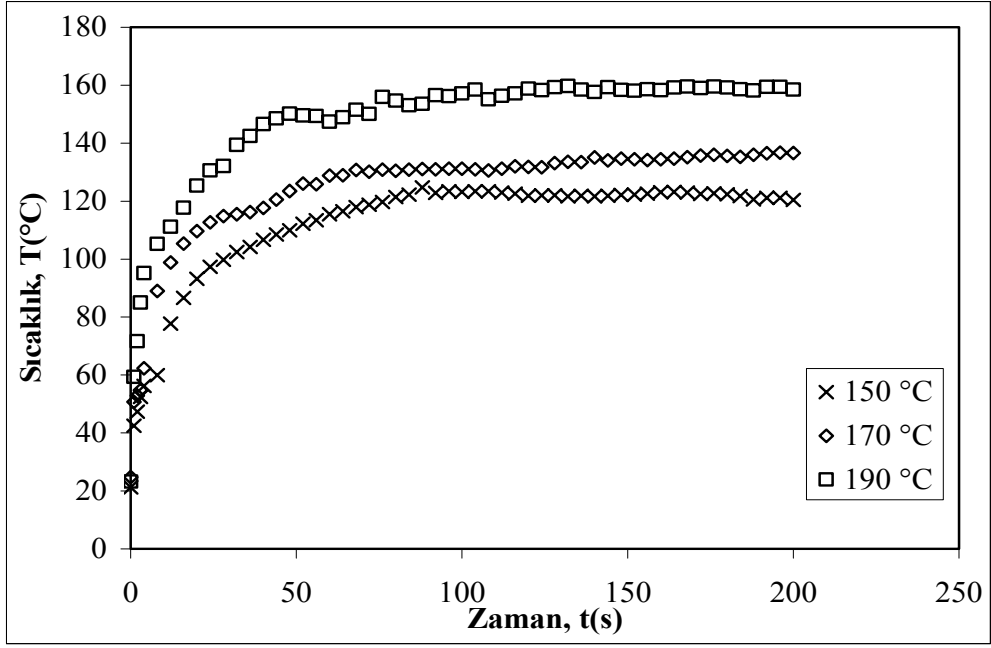
Patatesin başlangıç nem içeriği, C_i , ve farklı sürelerde kızartılan örneklerin nem içerikleri, C , kullanılarak oluşturulan parmak patateslerin zamana karşı nem içeriği değerleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Grafiklerden, nem kaybının, kızartmanın başlangıcında daha hızlı olduğu ve aynı kızartma süresi için parmak patateslerdeki nem içeriğinin, yüksek yağ sıcaklığında daha düşük olduğu görülmektedir. Bu da, yağ sıcaklığının artması ile parmak patateslerde nem kaybı hızının arttığına işaret eder. Bu bulgu, Krokida ve ark. [31], Costa ve ark. [8] ve Sahin ve ark. [36] tarafından yapılan çalışmaların sonuçları ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.1. Farklı sıcaklıklarda elde edilen tipik $\frac{C}{C_i}$ -t grafikleri

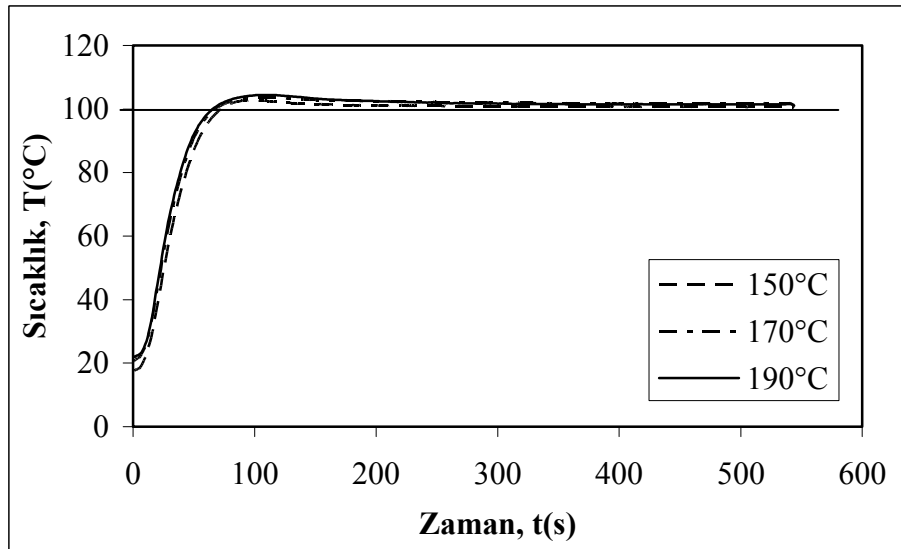
Kızartma işleminin ilk safhalarında serbest yüzey neminin ani uzaklaşması nedeniyle grafiğin ilk bölümlerinde eğimlerin daha büyük olduğu görülmektedir. Hubbard ve Farkas [6], yüzeydeki serbest nemin uzaklaşmasından sonra, kurutma işlemlerinde gözlenen azalan hız bölgesine benzer bir aşamanın başladığını rapor etmişlerdir. Nitekim Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi her üç yağ sıcaklığında yapılan kızartma işlemlerinde nem içerikleri başlangıçta hızla azalmış ve daha sonra ise nem kaybı hızında azalma gözlenmiştir.

Şekil 4.2'deki her üç yağ sıcaklığı için patatesin yüzeyindeki herhangi bir noktada kaydedilen sıcaklık grafiklerine bakıldığında, yüzeyde sıcaklığın suyun kaynama sıcaklığı olan 100°C'ye ulaşmadan çok önce kabarcık oluşumunun başladığı anlaşılmaktadır. Bunun da patates yüzeyindeki suyun kızgın yağ içerisine difüze olarak ani buharlaşması sonucu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.2. Farklı kızartma sıcaklıklarında yüzeydeki bir noktanın sıcaklığı

Patateslerin iç sıcaklıklarındaki değişim incelendiğinde (Şekil 4.3), sıcaklığın 101-103°C civarında bir değerde sabit kalmadan önce, bu değerlerin üzerine çıktığı anlaşılmaktadır. Patatesin iç kısmında oluşan su buharının belli bir süre dilimi terk edemeyerek iç basıncı artırması sonucu sıcaklığın daha yüksek değerlere çıktığı düşünülmektedir. Buharın dilimi terk etmesi ile beraber iç basıncın düşmesine bağlı olarak sıcaklığın azaldığı ve sabitlendiği görülmektedir.



Şekil 4.3. Farklı kızartma sıcaklıklarında elde edilen patates iç sıcaklıkları

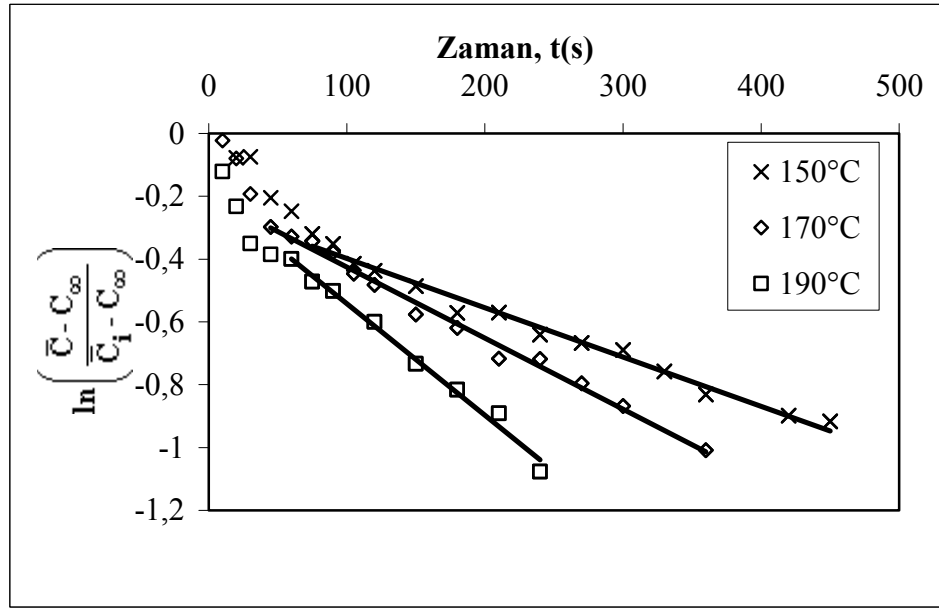
4.1.1.2. Matematiksel Sonuçlar

Materyal ve Metod kısmında Bölüm 3.2.2.2.'de öngörülen yöntemle Denklik

(3.9) kullanılarak $\ln \frac{C - C_{\infty}}{C_i - C_{\infty}} - t$ grafikleri çizilmiş ve grafiklerin doğrusal

kısımlarının eğiminden etkin nem difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplamalar, Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi, ani nem kaybından sonra gözlenen azalan hız bölgesine ait veriler kullanılarak yapılmıştır. Örnek bir hesaplama Ek-1'de verilmiştir.

Kızartma yağı sıcaklığı arttıkça, grafiklerin eğimlerinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Farklı kızartma sıcaklıklarında elde edilen tipik $\ln \frac{C - C_{\infty}}{C_i - C_{\infty}} - t$ grafikleri

Doğru denklemleri kullanılarak yapılan hesaplamalarda, 4 paralel olarak gerçekleştirilen deneylerin (Bölüm 3.2.2.1) her birinden ayrı ayrı Biot sayıları, etkin nem difüzyon ve kütle transfer katsayıları hesaplanmış, bu değerlerin ortalaması ve standart sapması hesaplanarak Çizelge 4.1'de verilen değerler bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda yapılan kızartma deneyleri için hesaplanan Biot sayısı, etkin nem difüzyon ve kütle transfer katsayısı değerleri

Sıcaklık (°C)	Biot Sayısı (Bi _m)	Etkin Nem Difüzyon katsayısı, D _e x10 ⁹ (m ² /s)	Etkin Kütle transfer katsayısı, k _e x10 ⁵ (m/s)
150	5,32 ± 1,54	9,2 ± 1,1	1,12 ± 0,22
170	6,28 ± 1,21	11,0 ± 1,0	1,58 ± 0,23
190	4,84 ± 0,63	18,2 ± 0,7	2,07 ± 0,24

Çizelgeden etkin nem difüzyon katsayılarının yağ sıcaklığının artması ile eksponansiyel olarak arttığı görülmektedir. Rice ve Gamble [28] patateslerin kızartılması sırasında nem difüzyon katsayısını 145 – 185 °C arasında $1,40 \times 10^{-9}$ ve $15,5 \times 10^{-9}$ olarak bulmuşlardır. Bu değerler, bu çalışmada elde edilen difüzyon katsayıları ile uyum içerisindedir.

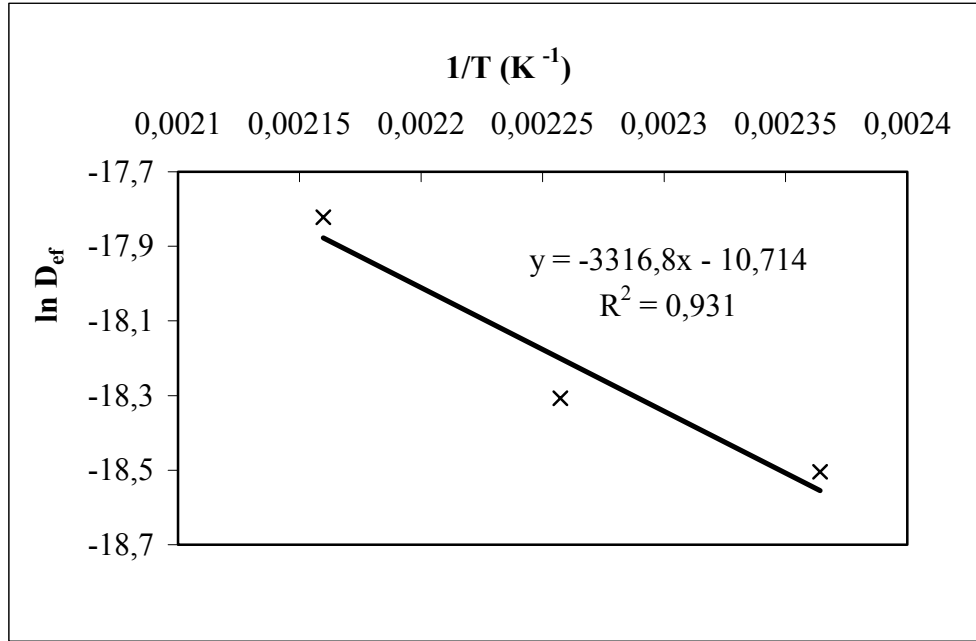
Literatürde difüzyon katsayısının sıcaklıkla artışı genellikle Arrhenius tipi eşitlikle (Denklik 4.1) ifade edilmektedir [1, 44].

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.1)$$

Burada D, D₀ difüzyon katsayıları (m²/s), E_a, aktivasyon enerjisi (kJ / mol), R (kJ / mol°C) gaz sabiti dir.

Her üç sıcaklık için hesaplanan difüzyon katsayılarının doğal logaritması alınarak bu değerler 1/T değerlerine karşı grafiğe geçirilmiştir. Şekil 4.5’de elde edilen bu doğru görülmektedir. Denklik 4.1’den görüldüğü gibi doğrunun eğimi $\left(-\frac{E_a}{R}\right)$ ’ye eşittir. Eğimden aktivasyon enerjisi (E_a) 27,6 kJ / mol olarak (R² = 0,931) hesaplanmıştır. Bu değer McMinn ve Magee [45] tarafından belirtilen patateslerin kurutulması sırasındaki aktivasyon enerjisi (25,2 – 36,2 kJ / mol) değerleri aralığındadır. Aktivasyon enerjisi bir prosesin sıcaklığa ne kadar duyarlı olduğu hakkında fikir verir [46]. Kurutma ve kızartma işlemlerinde benzer aktivasyon

enerjisi değerlerinin elde edilmesi, sıcaklığın her iki işlemde nem difüzyonuna etkisinin benzer olduğunu göstermektedir [46].



Şekil 4.5. Difüzyon katsayısının sıcaklıkla ilişkisi

Biot sayısı 100'den büyük olduğunda kütle transferine olan dış direncin ihmal edilebilir olduğu söylenebilir. Bu da su kaybının iç kısımdaki difüzyon tarafından kontrol edildiğini gösterir [40]. Bu durumda kütle transfer katsayısı sonsuz kabul edilebilir. Biot sayısı 0,1'den küçük olduğunda ise, iç kısımda kütle transferine direnç yoktur ve cismin içerisindeki derişim farkları ihmal edilebilir [47]. Bu çalışmada elde edilen Biot sayılarının 4,84 – 6,28 arasında olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1). Bu Biot değerleri nem kaybında hem difüzyonun hem de konvektif kütle transferinin etkisi olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, difüzyonun etkisi ihmal edilemeyeceğinden, patates içerisindeki nem derişiminin birörnek kabul edilemeyeceği gibi, kütle transferine olan dış direnç de ihmal edilemez. Bu nedenle kütle transfer katsayısının sonsuz kabul edilmesi gibi bir yaklaşım da doğru değildir. Bölüm 4.1.2'de kütle transfer katsayısının deneysel verilerden yola çıkarak hesaplanması verilmiştir.

4.1.2. Kütle transfer katsayısı

Denklik (3.11) kullanılarak hesaplanan etkin kütle transfer katsayıları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi yağ sıcaklığının artması ile etkin kütle transfer katsayısında doğrusal bir artma olmaktadır. Yağ sıcaklığının artması ile patatesteki nem kaybı hızı artmıştır. Yüksek sıcaklıklarda yapılan kızartma işlemlerinde kütle transfer katsayısının daha yüksek olması, yüzeyde su kaybının daha çabuk olmasına ve buna bağlı olarak da kabuk oluşumunun daha erken başlamasına neden olacaktır. Yüzeyde su kaybının daha hızlı olması nedeniyle, iç kısımdan yüzeye doğru nem difüzyonuna neden olan derişim farkı (sürücü güç) daha yüksek olacaktır. Aynı yağ sıcaklığında ise, kütle transfer katsayısının daha yüksek olması durumunda, yüzeyden olan nem kaybı daha fazla olacaktır. Yüzey sıcaklığı da buna bağlı olarak daha düşük olur. Yüzeydeki su kaybı ile beraber yüzey sıcaklığı 100°C’nin üzerine çıkar. Bu aşamada nem kaybı iç kısımdaki buharlaşmadan kaynaklanır. Bu durumda kütle transfer katsayısının yüksek olması nem kaybının artmasına ve dolayısıyla iç kısımda daha düşük sıcaklıkların gözlenmesine neden olur [7].

Literatürde ısı ve kütle transfer katsayılarından bir tanesinin bilinmesi durumunda diğerinin bulunması için kullanılan eşitlikler mevcuttur. Şahin ve ark. [35, 36] geliştirdikleri modelde yüzey sınır şartını yazarken bu eşitliklerden birisi

olan Reynold’s analojisinden ($k_c = \frac{h}{\rho c_p}$) yararlanmışlar ve kütle transfer katsayısını,

ısı transfer katsayısını içeren bir terim ile ifade etmişlerdir. Bu eşitliklerden bir diğeri ise Prandtl sayısı ve Schmidt sayılarının birbirlerinden farklı değerler olabileceği göz önünde bulundurularak geliştirilmiş olan Chilton-Colburn

($k_c = \frac{h}{\rho c_p} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3}$) analojisidir. [41]. Her iki eşitlik de düzgün yüzeyler ve sabit

yüzey derişimi olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Eşitliklerin kullanımını sınırlayan bir diğeri koşul ise meydana gelen konvektif kütle transferinin proses koşullarını etkilememesi gerekliliğidir. Örneğin, hava ile kurutma işlemlerinde olduğu gibi yüzeyde düşük kütle akısının gözlendiği durumlarda bu analogiler

güvenle kullanılabilirken, kızartma gibi yüzey kütle akısının yüksek olduğu ve proses koşullarını etkilediği işlemlerde kullanılmaları doğru değildir [48].

4.2. ISI TRANSFER KATSAYISININ BELİRLENMESİ

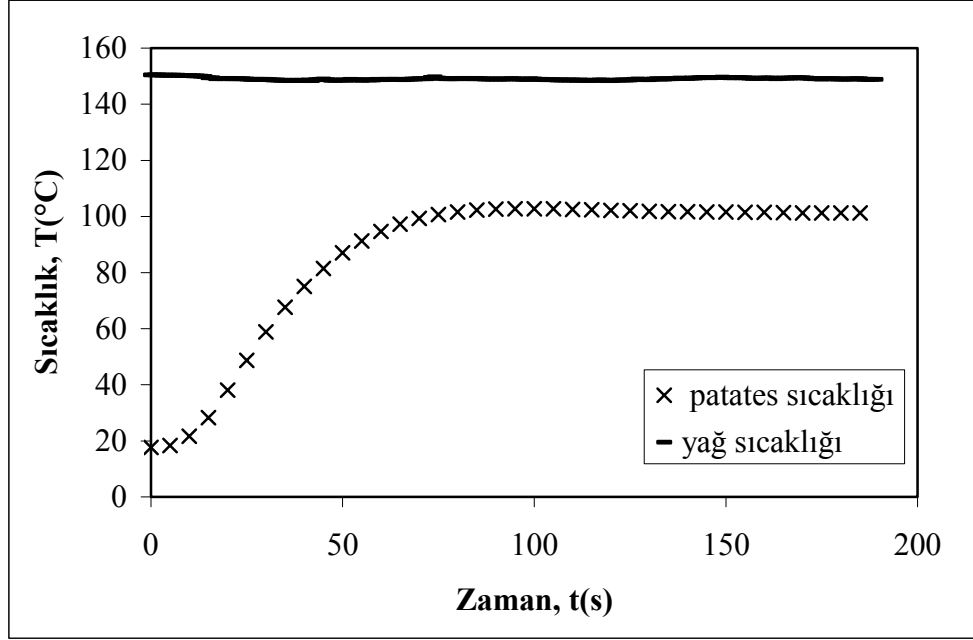
Bu bölümde, her üç yağ sıcaklığında, parmak patatesler ve Lumped sistem yöntemi kullanılarak belirlenmiş ısı transfer katsayıları verilmiştir. Parmak patatesler kullanılarak, etkin ısı transfer katsayısı, Lumped sistem yöntemi kullanılarak ise kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlardaki ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır.

4.2.1. Parmak Patates Kullanılarak Etkin Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi

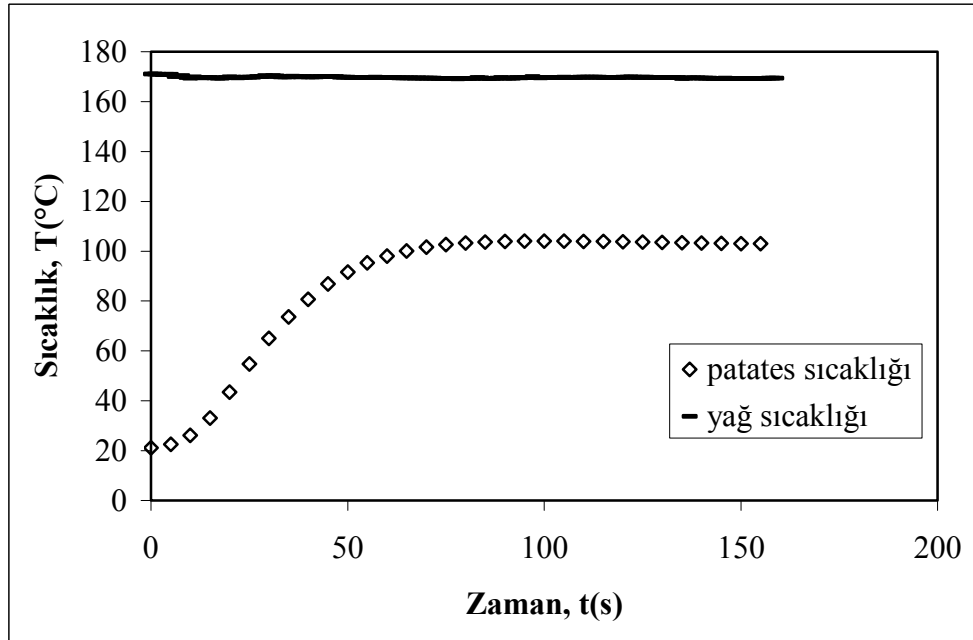
4.2.1.1. Kızartma sırasında parmak patateslerdeki sıcaklık değişimi

Kızartma sırasında patates yağ içerisine daldırıldıktan sonra yağdan patatese olan konveksiyonla yüzey sıcaklığı artmaya başlar. Yüzeyde sıcaklığın artması ile birlikte yüzey ile iç kısım arasında oluşan sıcaklık farkı, iç kısmın kondüksiyon ile ısınmasına neden olur. Patates dilimine olan ısı transferi sonucu meydana gelen sıcaklık değişimleri Bölüm 3.2.3.1.'de belirtilen yöntemle kaydedilmiştir. Gerçekleşen ısı transferi ile iç kısımda bulunan su buharlaşmakta ve iç sıcaklık, Bölüm 4.1.'de belirtildiği gibi suyun buharlaşmasına bağlı olarak iç kısımda oluşan buhar basıncının etkisi ile kaynama sıcaklığının üzerine çıkmaktadır. İç kısımda oluşan bu buharın patatesi terk etmesi ile birlikte sıcaklık normal kaynama sıcaklığına (101 - 103°C) düşer (Şekil 4.3). Her üç yağ sıcaklığında (150, 170 ve 190 °C) yapılan kızartma işlemlerinde elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.6, 4.7, 4.8), patates iç sıcaklığının zamanla arttığı ve 101-103°C civarında bir değere ulaştığında uzunca bir süre bu değerde sabit kaldığı gözlenmiştir. Budžaki ve Seruga [11] yaptıkları çalışmada içerisindeki çözünen madde miktarına bağlı olarak patates içerisindeki suyun kaynama noktasının saf suyun kaynama noktasından biraz daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Claeys, De

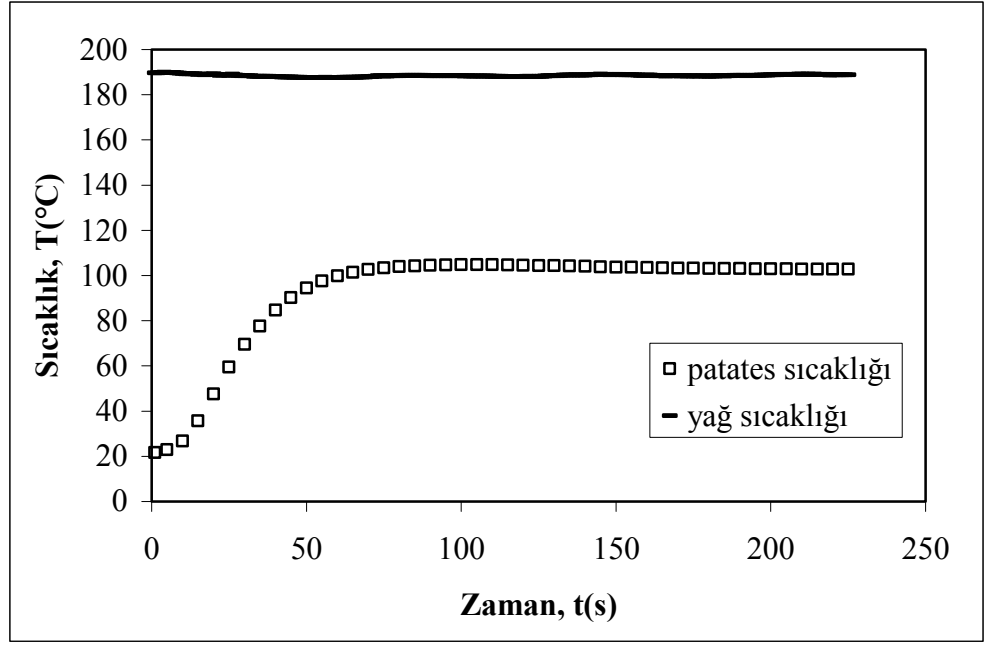
Vleeschouwer ve Henrickx [10] kaynama noktası üzerindeki sıcaklıkların gıdadaki suyun tamamına yakını uzaklaştığında gözlemlendiğini belirtmişlerdir.



Şekil 4.6. Kızartma sırasında patates ve yağ sıcaklığı (150°C)



Şekil 4.7. Kızartma sırasında patates ve yağ sıcaklığı (170°C)



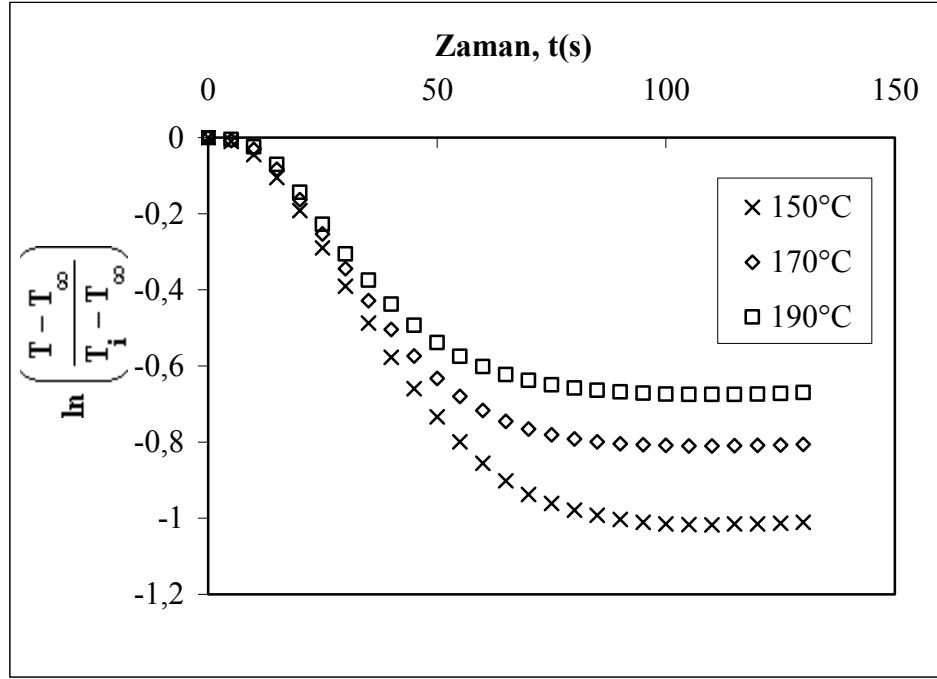
Şekil 4.8. Kızartma sırasında patates ve yağ sıcaklığı (190°C)

4.2.1.2. Matematiksel sonuçlar

Isı transfer katsayısının belirlenmesi için hesaplamalarda kızartma sırasında sabit kaldığı kabul edilen patatese ait termofiziksel özellikler Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Patatesin termofiziksel özellikleri

Özellik	Değer	Kaynak
Isıl iletkenlik katsayısı, k (W/mK)	0,554	Singh ve Heldman [3]
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	1090	Palaniappan ve Sizer [49]
Özgül ısı, c_p (J/kgK)	3517	Singh ve Heldman [3]

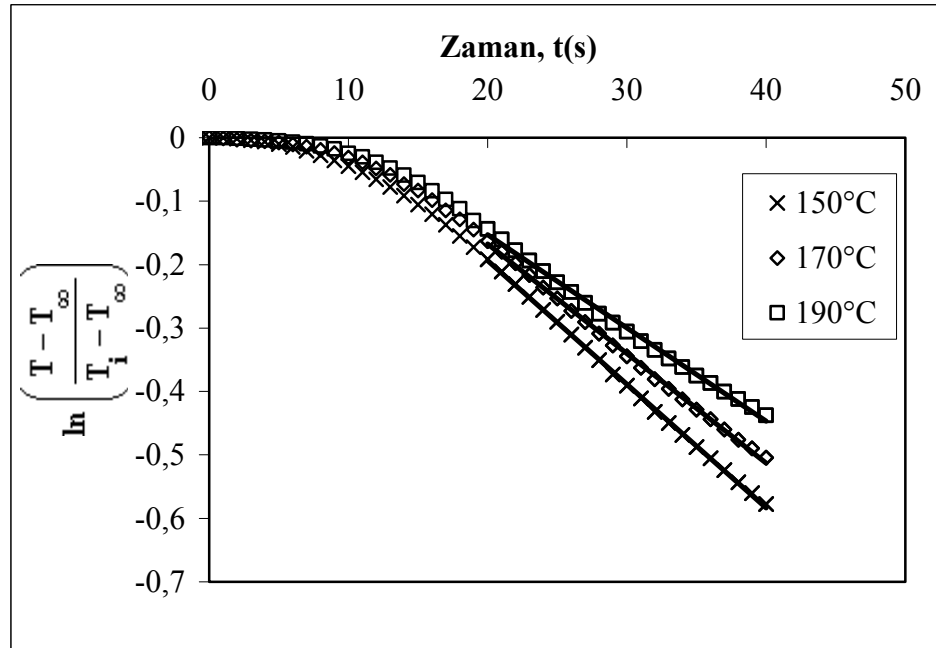


Şekil 4.9. Parmak patatesin farklı yağ sıcaklıklarında kızartılması sırasında elde edilen $\ln\left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)$ - zaman grafikleri

Parmak patateslerde üç farklı kızartma sıcaklığında elde edilen zamana karşı sıcaklık değerleri kullanılarak oluşturulan $\ln\left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right) - t$ grafikleri Şekil 4.9.'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde kızartmanın başlangıcında doğrusal olmayan bir bölge görülmektedir. Bu bölge Fourier sayısının 0,1'den küçük olduğu ve bu nedenle sonsuz seri eşitlikte sadece birincinin kullanılmasının yeterli olmadığı bölgedir. Fourier sayısının 0,1'den büyük olduğu durumda ise grafikler doğrusal hal almaktadır. Kızartma sırasında kabuğun oluşmasıyla, yüzey sıcaklığı kaynama sıcaklığının üzerine çıkar [7]. Yüzey ile iç kısım arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle iç kısımda sıcaklık artmaya devam eder. Oluşan kabuğun hemen altındaki tabaka hala nem içermektedir ve bu tabakada buharlaşma devam eder. Dolayısıyla sıcaklık kaynama sıcaklığındadır. İç kısımda kaynama sıcaklığına ulaşılan her tabakada sırayla buharlaşma başlar ve sıcaklık belli bir süre sabit kalır. Kaynamanın başladığı yüzeye yakın bu bölgeler ile dilimin merkezi arasındaki sıcaklık farkı giderek azaldığından, ısı transferine neden olan sürücü güç de azalır. Bu, grafiklerin eğimlerinde azalmanın başladığı bölgedir. Şekil 4.9.'dan görüldüğü gibi yaklaşık

60 – 80 s. sonra ise iç sıcaklığın kaynama sıcaklığına ulaşması ile beraber $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right)$ değerleri sabit kalır. Sıcaklığın, patates diliminin içerisindeki her noktada suyun kaynama sıcaklığına geldiği bu aşamada iç kısımdaki sıcaklık dağılımı birörnek sayılabilir [7]. Ni ve Datta [7], ısı transfer katsayısının yüzey sıcaklığına etkisinin merkeze göre daha fazla olduğunu ve ısı transfer katsayısı arttıkça, yağdan gıdaya olan ısı akışı artması sonucu yüzey sıcaklığının daha hızlı arttığını ve daha çabuk plato oluşturduğunu belirtmiştir. Isı transfer katsayısının artması ile iç sıcaklığın da arttığını ancak artmanın iç sıcaklığa yüzeydeki kadar belirgin bir etki oluşturmadığını rapor etmişlerdir.

Her üç kızartma sıcaklığı için grafiklerin doğrusal kısımları çizildiğinde yaklaşık 20 s. sonra grafiklerin doğrusal hal aldığı ve yağ sıcaklığının artmasıyla doğruların eğimlerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 4.10.).



Şekil 4.10. Patateslerin farklı sıcaklıklarda kızartılması sırasında elde edilen $\left(\ln\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right)$ -t grafiklerinin doğrusal kısımları

Parmak patatesler kullanılarak yapılan kızartma deneylerinde elde edilen sıcaklık-zaman verilerinden Bölüm 3.2.3.1.'de öngörülen yöntem kullanılarak

hesaplanan Biot sayıları ve etkin ısı transfer katsayısı değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı sıcaklıklarda yapılan kızartma deneyleri için hesaplanan Biot sayısı ve etkin ısı transfer katsayısı değerleri

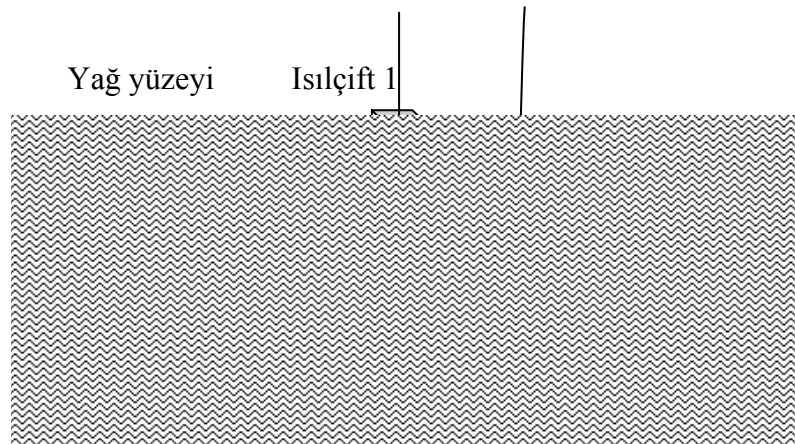
Yağ Sıcaklığı (°C)	Biot Sayısı (Bi_h)	Etkin Isı transfer katsayısı ($W/m^2\cdot C$)
150	$2,20 \pm 0,12$	$286,7 \pm 15,4$
170	$1,74 \pm 0,06$	$227,3 \pm 8,0$
190	$1,39 \pm 0,05$	$181,3 \pm 6,5$

Erdoğdu ve Turhan [50] yaptıkları çalışmada sonsuz geometri varsayımının yapılabilmesi için Biot sayısı 1 iken $\frac{\text{uzunluk}}{\text{kalınlık}}$ oranının 8, Biot sayısı 10 ve daha yüksek olduğunda ise bu oranın 4 olması gerektiğini rapor etmişlerdir. Çizelge 4.3.'ten Biot sayılarının 1,39 - 2,20 arasında değiştiği belirlenmiştir. Deneyler için hazırlanan dilimlerde bu oran $\frac{70}{8,5} = 8,2$ olduğundan, geometrik merkeze yakın bir noktada yapılan sıcaklık ölçümü için uzunluk yönünde olan ısı transferinin etkisi ihmal edilebilir. Ayrıca çizelgeden Biot sayılarının yağ sıcaklığının artması ile azaldığı ve dolayısıyla ısı transfer katsayılarının da azaldığı görülmektedir. Isı transferi gerçekleşen sistemlerde Biot sayısının 0,1'den az olması materyalde ısı transferine olan iç direncin ihmal edilebileceğini gösterir [3]. Böyle durumlarda materyalin her noktasındaki sıcaklık eşit kabul edilir. Kondüksiyona olan direnç konveksiyona göre çok azdır. Biot sayısı 40'dan büyük olduğunda ise sistemde ısı transferine olan dış direnç ihmal edilir. Bu da ısı transfer katsayısının sonsuz olması demektir. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen Biot sayısı değerleri, kızartma işleminde ne konveksiyona ne de kondüksiyona olan direncin göz ardı edilemeyeceğini ve birlikte incelenmeleri gerektiğini göstermektedir.

Çizelgeden görüldüğü gibi yağ sıcaklığının artması etkin ısı transfer katsayısı azalmasına neden olmuştur. Elde edilen bu sonuç ısı transfer katsayısının yağ sıcaklığının artması ile artış gösterdiğini bulan çalışmalar ile [8; 11, 35, 36] çelişmektedir. Kızartma yağından patatese aktarılan ısının büyük bir kısmı suyun

buharlaşmasında kullanılmaktadır. Yağ sıcaklığının artması ile birim zamanda uzaklaşan nem miktarının artması (Şekil 4.1.), yüksek yağ sıcaklığında yapılan kızartma işleminde enerjinin daha büyük bir kısmının suyu buharlaştırmak için harcadığı anlamına gelir. Suyun buharlaşırken patatese aktarılan enerjinin önemli bir kısmını kullanması, patates içerisindeki sıcaklık artışını sınırlamaktadır. Yağdan patatese aktarılan enerjinin bir kısmının suyu buharlaştırmada kullanılmasının patatesin ısınmasını etkilemesi beklenen bir sonuçtur. Çünkü patateslerin kızartılması sırasında yalnızca ısı transferi olmamakta, aynı zamanda suyun buharlaşması sonucu kütle transferi de gerçekleşmektedir. Bu da etkin ısı transfer katsayısının yağ sıcaklığının artması ile azalmasına yol açar. Buradan anlaşılacağı üzere sözünü ettiğimiz ısı transfer katsayısı aslında etkin ısı transfer katsayısıdır.

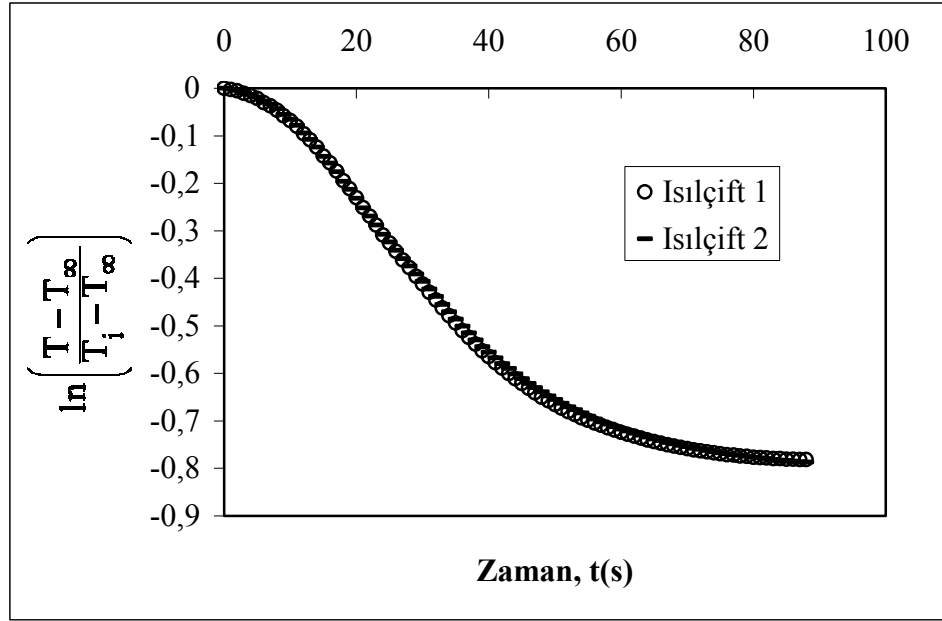
Kondüksiyon hatasının test edilmesi: Kızartma işlemi sırasında patatesin tamamı yağ içerisine daldırılmıştır. Bu durumda dilimler içerisine yerleştirilen ısıçiftlerin de yağ içerisinde olması söz konusudur. Çalışmanın bu bölümü, ısıçiftlerin patatesin dışında fakat yağın içerisinde kalan kısmının patatesin içerisindeki sıcaklık ölçümüne etkisi (kondüksiyon hatası) olup olmadığını test etmek amacı ile yapılmıştır. Costa ve ark. [8] yaptıkları deneylerde kondüksiyon hatasını ortadan kaldırmak düşüncesi ile patatesleri, ısıçiftin yağın dışında kalacağı şekilde belli bir açıyla yağ içerisine daldırmışlardır. Bu çalışmada kondüksiyon hatasının, sıcaklık ölçümlerine etkisinin araştırılması amacı ile patates dilimi içerisine iki ısıçift yerleştirilmiş ve ısıçiftlerin biri yağın dışında, diğeri ise yağın içinde olacak şekilde (Şekil 4.11.) dilim yağa daldırılarak deney yapılmıştır.



Şekil 4.11. Kondüksiyon hatasının test edilmesi

Kaydedilen sıcaklık verileri kullanılarak $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)$ -t grafikleri çizilmiştir

(Şekil 4.12). Şekilden görüldüğü gibi her iki ısılıçift ile elde edilen sıcaklık ölçümleri kullanılarak bulunan doğruların eğimleri aynıdır. Bu nedenle kızartma işlemleri sırasında ısılıçiftlerin yağ içerisine tamamen daldırılmasının kondüksiyon hatasına yol açmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.12. Kondüksiyon hatasının test edilmesi için yapılan deneylerden elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)$ -t grafikleri

4.2.2. Lumped Sistem Yöntemi ile Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi

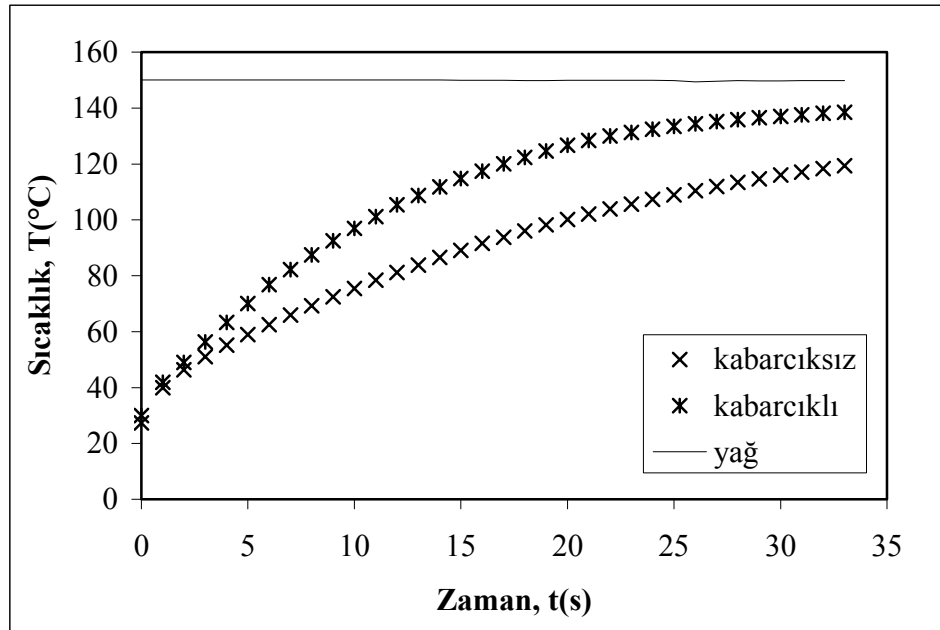
Bu bölümde kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda alüminyum parçacığının sıcaklık değişimleri ve elde edilen ısı transfer katsayısı değerleri verilmiştir.

4.2.2.1. Alüminyum parçacığının sıcaklık değişimi

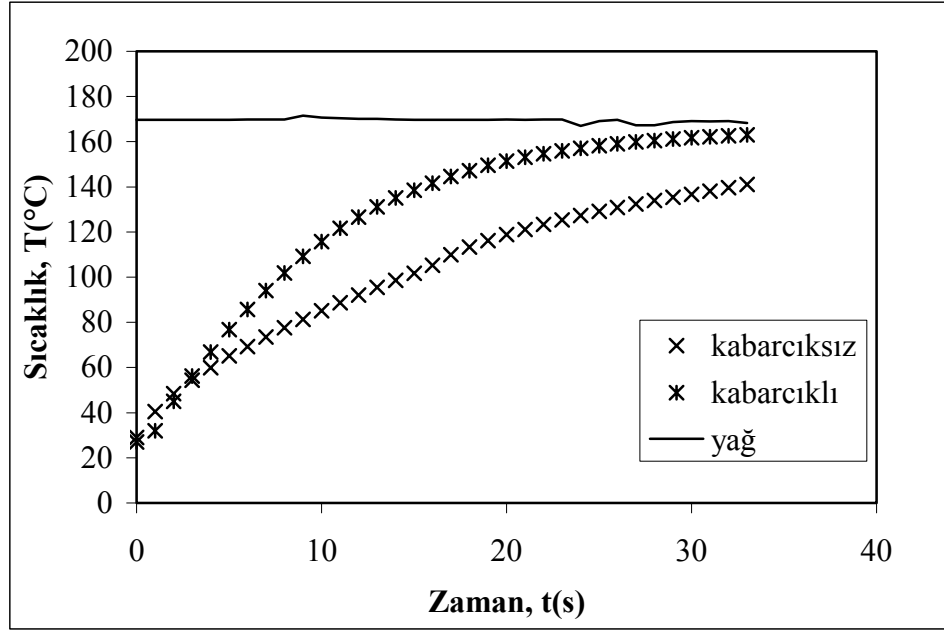
Gıdaların kızartılması sırasında yağdan gıdaya ısı transferinin gerçekleşmesi ile birlikte yapıda bulunan su buharlaşarak, su buharı kabarcıkları halinde gıdadan uzaklaşmaktadır. Lumped sistem yönteminde ise su buharlaşması ve dolayısıyla

buhar kabarcıklarının oluşması söz konusu olmadığından, kabarcık oluşumunun ısı transferine olan etkisi üzerine çalışmak imkansız hale gelmektedir. Ayrıca kızartma sırasında kaynama aşaması, prosesin büyük bir kısmını oluşturmaktadır [13]. Bu nedenle kaynama aşamasında meydana gelen kabarcık çıkışının ısı transferine olan etkisi belirlenmelidir. Bu amaçla alüminyum parçacığın kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda sıcaklık değişimleri belirlenmiştir.

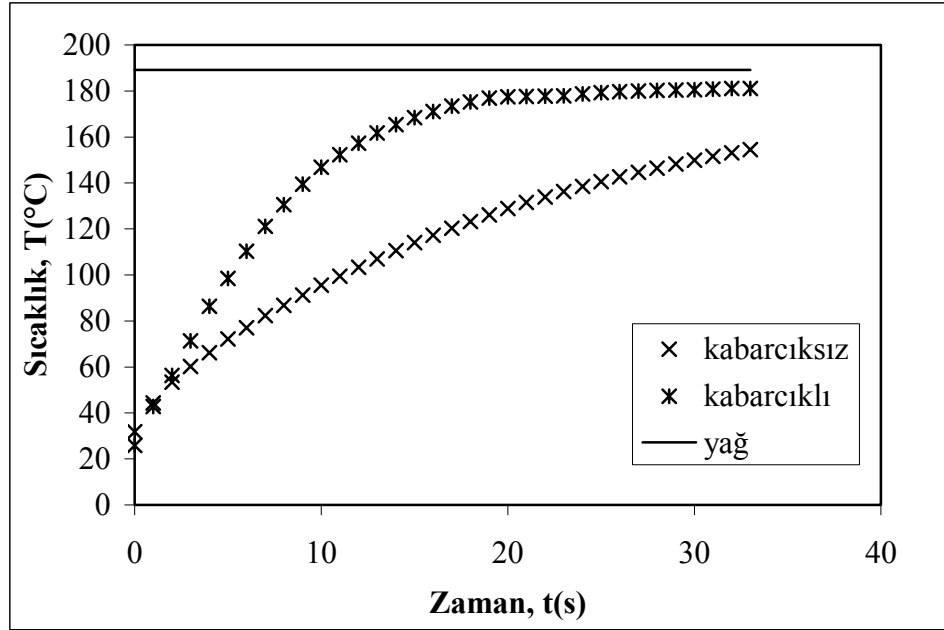
Yapılan deneylerde alüminyum parçacık yağ içerisine daldırılarak sıcaklık değişimi parçacığın sıcaklığı yağ sıcaklığına ulaşana kadar kaydedilmiştir. Parçacık sıcaklığının her üç yağ sıcaklığında da, kabarcıklı ortamda kabarcıksız ortamdakine oranla daha hızlı arttığı görülmektedir (Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15). Deneysel bulgular, kabarcık oluşumunun sıcaklığın daha hızlı artmasına neden olduğunu, başka bir deyişle kabarcıkların ısı transferini artırdığını göstermektedir.



Şekil 4.13. 150 °C'de alüminyum parçacık kullanılarak kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık verileri



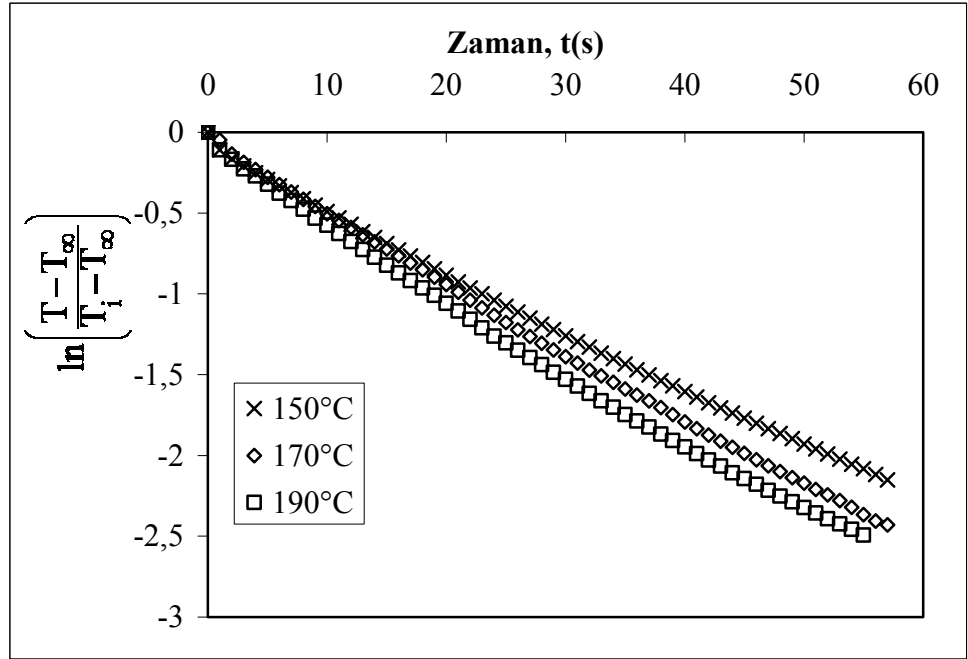
Şekil 4.14. 170 °C'de alüminyum parçacık kullanılarak kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık verileri



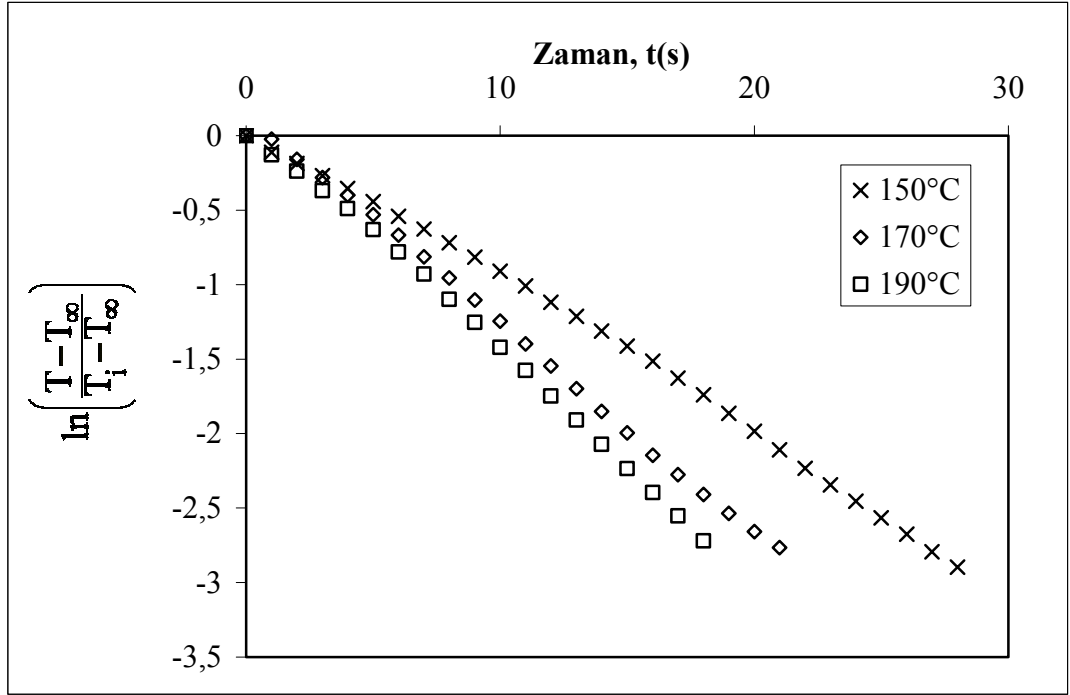
Şekil 4.15. 190 °C'de alüminyum parçacık kullanılarak kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık verileri

4.2.2.2. Matematiksel sonuçlar

Kabarcıksız ve kabarcıklı ortamlarda, her üç yağ sıcaklığı için oluşturulan $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right) - t$ grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.16 ve 4.17), yağ sıcaklığının artması ile doğruların eğimlerin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Kabarcıksız ortamda her üç yağ sıcaklığı için elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right) - t$ grafikleri



Şekil 4.17. Kabarcıklı ortamda her üç yağ sıcaklığı için elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right) - t$ grafikleri

Kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda elde edilen deneysel veriler karşılaştırıldığında, kabarcıksız ortamda doğruların eğimlerinin, kabarcıklı ortamdakinden her üç yağ sıcaklığında da daha düşük olduğu görülmektedir. Eğimlerden de anlaşıldığı üzere kabarcıklı ortamda elde edilen ısı transfer katsayısı değerleri, kabarcıksız ortamdakinden yüksektir. Hesaplanan kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlardaki ısı transfer katsayısı değerleri Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Lumped sistem yöntemi ile farklı sıcaklıklarda kabarcıklı ve kabarcıksız ortamlarda hesaplanan Biot sayısı ve ısı transfer katsayısı değerleri

Yağ sıcaklığı (°C)	Isı transfer katsayısı (W/m ² °C)			
	Biot Sayısı	Lumped sistem yöntemi (kabarcıksız)	Biot Sayısı	Lumped sistem yöntemi (kabarcıklı)
150	0,0048	206,3 ± 3,8	0,0137	587,8 ± 86,0
170	0,0052	223,9 ± 6,0	0,0159	684,5 ± 62,8
190	0,0056	241,2 ± 8,9	0,0177	727,2 ± 14,9

Çizelge 4.4.'den görüldüğü gibi, Biot sayısı değerleri 0,1'den küçüktür. Dolayısıyla Bölüm 3.2.3.2'de belirtildiği gibi kondüksiyona olan direnç ihmal edilerek Lumped sistem yöntemi ile ısı transfer katsayısı hesaplanabilmektedir. Çizelgeden görüldüğü gibi kabarcıksız ortamda ısı transfer katsayısı, yağ sıcaklığının artması ile artmaktadır. Bu durum, yağın sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak viskozitesindeki düşüş ile açıklanabilir. Kabarcıklı ortamda, yağ sıcaklığının artmasının ısı transfer katsayısı üzerine benzer bir etkiye neden olduğu, ancak bu etkinin (paraleller arasındaki standart sapmaların yüksek olması nedeni ile) kabarcıksız ortamdaki kadar belirgin olmadığı görülmektedir. Sıcaklığın artması ile su kaybı hızı ve kabarcık oluşumu da arttığından, ısı transfer katsayısının kabarcıklı ortamda yağ sıcaklığının artması ile daha yüksek değerlere çıktığı söylenebilir. Deneysel sonuçlardan ısı transfer katsayısının kabarcık varlığında önemli şekilde arttığı anlaşılmaktadır. Kabarcıklı sistemde hesaplanan ısı transfer katsayılarının kabarcıksız ortama göre 2-3 kat daha yüksek olduğu Çizelge 4.4'den görülmektedir. Vijayan ve Singh [14] kabarcıkların artmasıyla yüzeyde türbülansın oluşacağını ve oluşan türbülansın ısı transfer katsayısını artıracığını belirtmiştir.

Etkin ısı transfer katsayılarının ve Lumped sistem yöntemi ile bulunan ısı transfer katsayısı değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.5.'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı yağ sıcaklıklarında hesaplanan ısı transfer katsayısı ve etkin ısı transfer katsayısı değerlerinin karşılaştırılması

Yağ sıcaklığı (°C)	Isı transfer katsayısı (W/m ² °C)		Etkin Isı transfer katsayısı (W/m ² °C)
	Lumped sistem yöntemi (kabarcıksız)	Lumped sistem yöntemi (kabarcıklı)	
150	206,3 ± 3,8	587,8 ± 86,0	286,7 ± 15,4
170	223,9 ± 6,0	684,5 ± 62,8	227,3 ± 8,0
190	241,2 ± 8,9	727,2 ± 14,9	181,3 ± 6,5

Costa ve ark.[8] Lumped sistem yöntemi ile kabarcıklı ortamda ısı transfer katsayısını 140°C'de maksimum 443 W/m²°C, 180°C'de ise maksimum 650 W/m²°C olarak bulmuşlardır. Bu değerler, bu çalışmada bulunanlar ile benzerlik

göstermektedir. Ancak, Costa ve ark.[8] tarafından yapılan çalışmada, patates kullanılarak belirlenen ısı transfer katsayısı değerinin, Lumped sistem yöntemi ile (kabarcıklı ortamda) bulunan değerden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu bulgunun, bu çalışmada elde edilen sonuçlar (Çizelge 4.5) ile uyum içerisinde olmadığı görülmektedir. Costa ve ark.[8]'nin öngördükleri yöntemde ısı transfer katsayısı hesaplamasında kullandıkları sıcaklık değerlerinin patates yüzeyinin yaklaşık 0,3 mm altına yerleştirdikleri bir ısılıçift ile kaydetmişlerdir. Ancak, ölçülen bu değerler yüzey sıcaklığı kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca yöntemde dikdörtgenler prizması şeklinde patates dilimi kullanılmıştır. Böyle bir geometrinin ısınması sırasında yüzey sıcaklığının her yerde aynı olmayacağı açıktır. Bu nedenle tek bir noktada sıcaklık ölçümü yapmak ve bu değeri yüzey sıcaklığı olarak kabul etmek hataya neden olabilir.

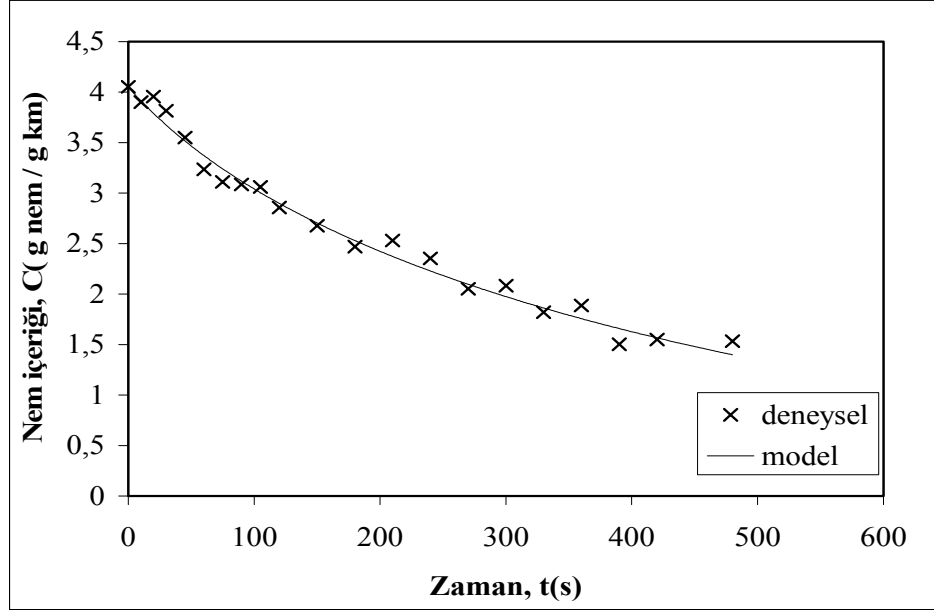
Bu çalışmada ısı transfer katsayısının belirlenmesi için izlenen yol, ısılıçiftin konumunun bilinmesini gerektirmediğinden, yüzey sıcaklığı ölçümü yapılarak ısı transfer katsayısının belirlendiği çalışmalara göre bir avantaj teşkil etmektedir.

4.3. GELİŞTİRİLEN MODELİN DENEYSEL SONUÇLAR İLE UYUMLULUĞUNUN TEST EDİLMESİ

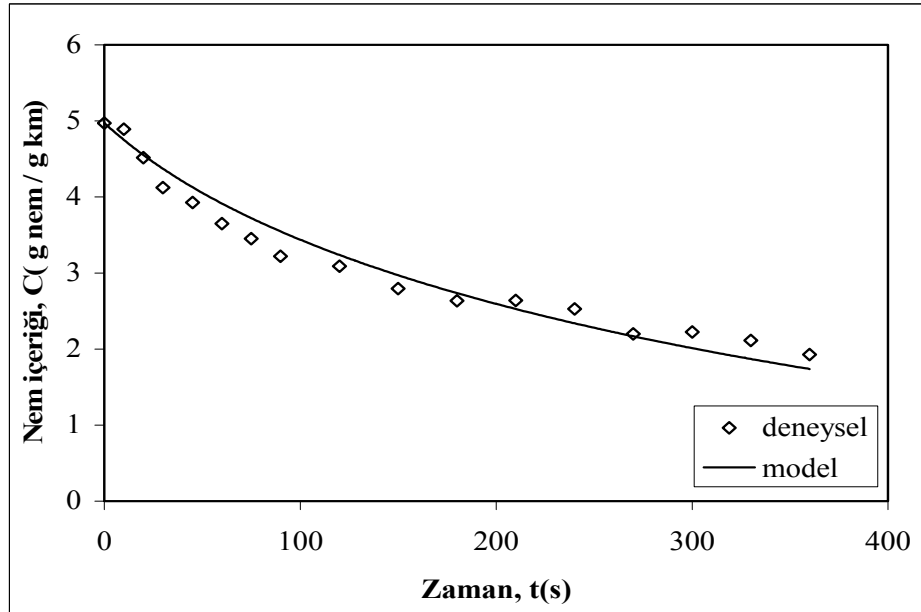
Bölüm 3.2.4.'de verilen denklikler incelendiğinde patates içerisinde zamanla değişen sıcaklık ve nem derişiminin sayısal yöntemler kullanılarak hesaplanması için ısı transfer katsayısı ve kütle transfer parametrelerinin bilinmesi gerektiği görülmektedir. Öngörülen yöntemle bulunan ısı transfer katsayısı, nem difüzyon katsayısı ve kütle transfer katsayısının modelde kullanılması durumunda, deneysel sonuçlar yardımı ile geliştirilen modelin doğrulanması mümkün olacaktır. Bu çalışmada modelleme Microsoft Visual Basic 6.0 kullanılarak hazırlanan program ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen model grafikler deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1. Kütle Transferi Modelinin Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırılması

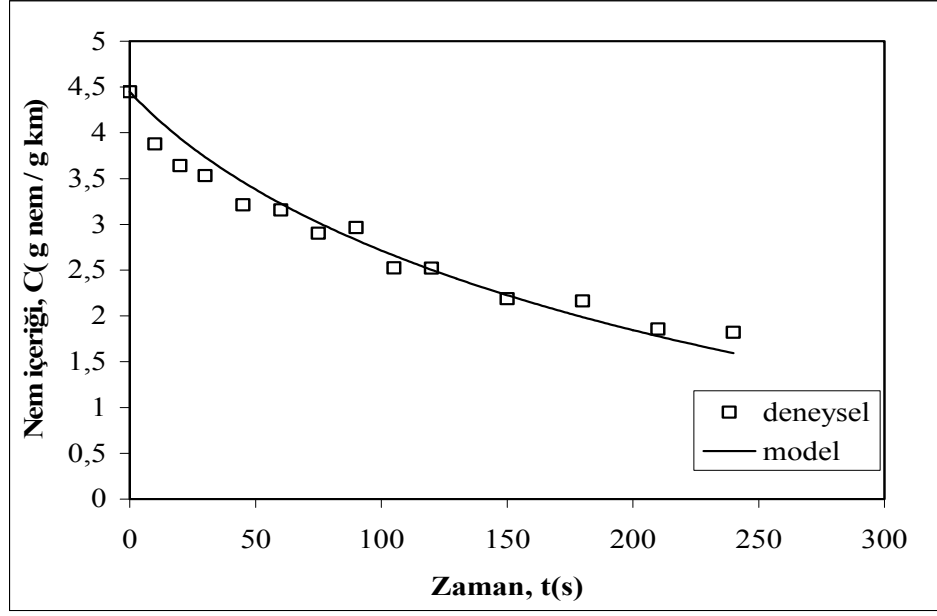
Kütle transferinde her kızartma yağı sıcaklığı için hesaplanan D_e ve k_e değerleri kullanılarak model ile elde edilen nem içeriği değişiminin deneysel veriler ile karşılaştırılması Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.18. 150 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen nem içeriği değişimi



Şekil 4.19. 170 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen nem içeriği değişimi

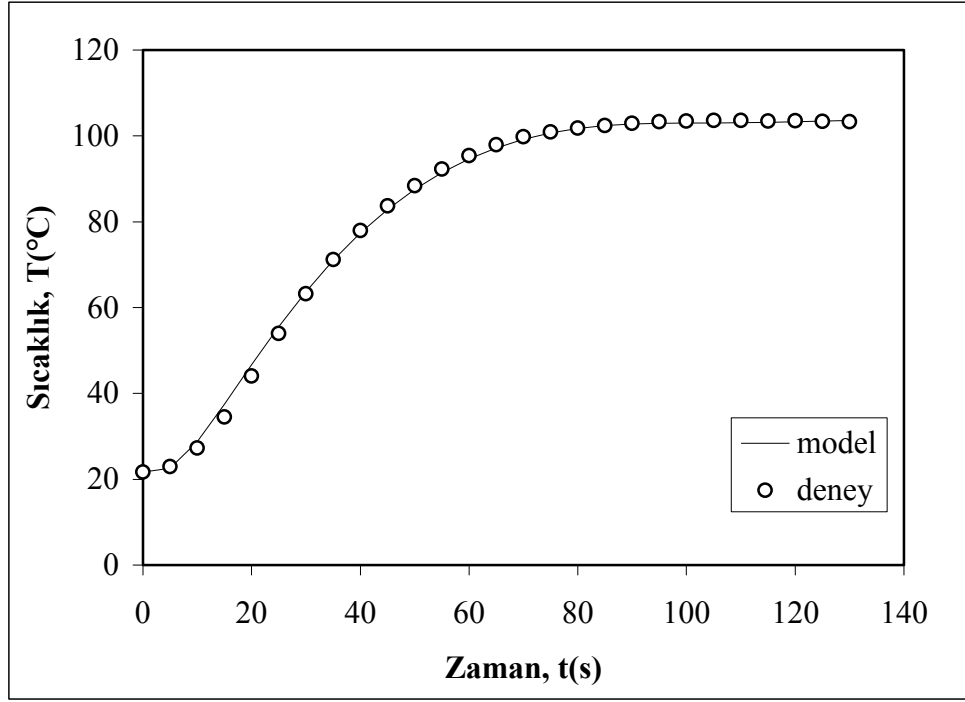


Şekil 4.20. 190 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen nem içeriği değişimi

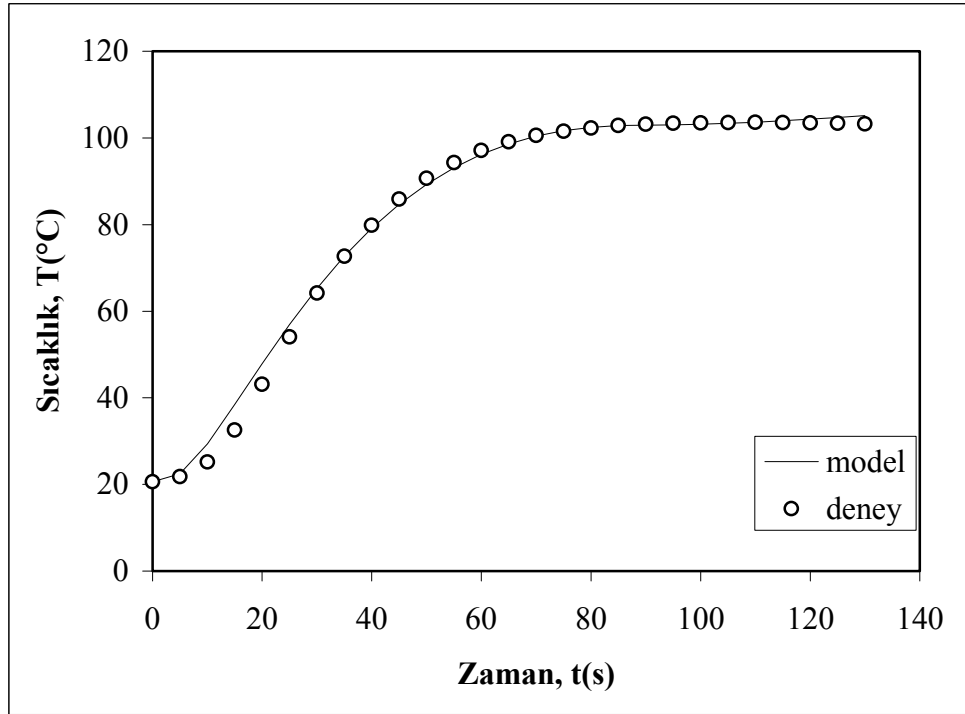
Modelde, deneysel veriler kullanılarak hesaplanan difüzyon katsayısı ve kütle transfer katsayısı değerleri kullanılmıştır. Grafikler incelendiğinde deneysel olarak ve model ile zamana karşı elde edilen nem içeriği değerlerinin birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Deneysel gözlemlerde kabarcık oluşum hızının, kızartma süresince değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum kütle transfer parametrelerinin de değişebileceği anlamına gelmektedir. Kütle transfer parametreleri sabit kaldığı varsayımı yapılarak bulunan değerlerin, deneysel verilerle uyumlu olması, varsayımın geçerliliğini desteklemektedir.

4.3.2. Isı Transferi Modelinin Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırılması

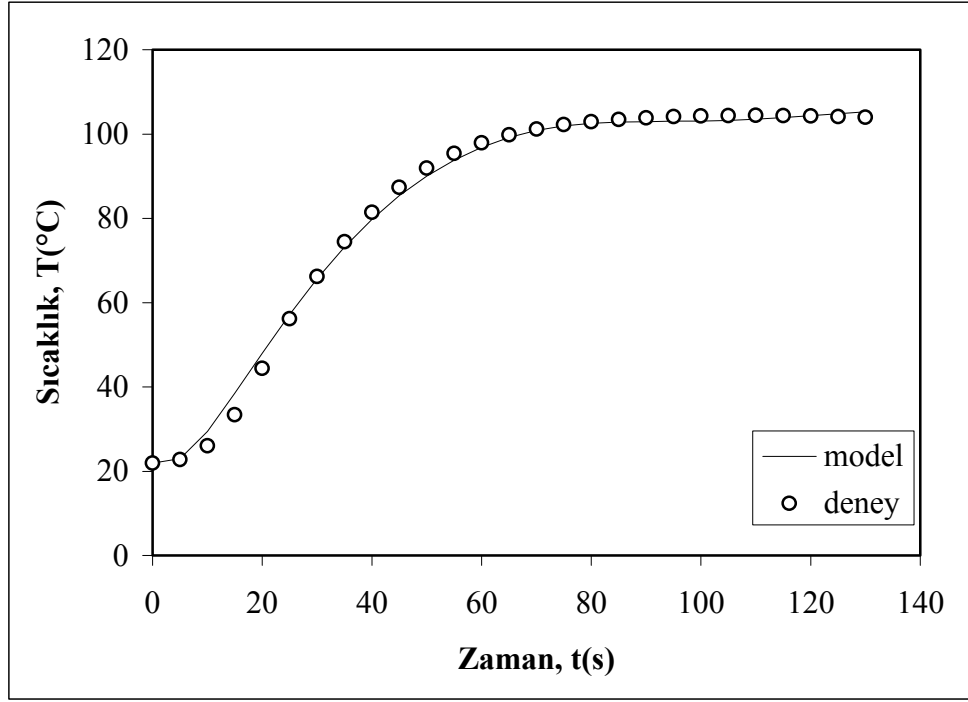
Isı transferinde her kızartma yağı sıcaklığı için hesaplanan h_e değerleri kullanılarak model ile bulunan sıcaklık değişiminin deneysel veriler ile karşılaştırılması Şekil 4.21, 4.22 ve 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.21. 150 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen sıcaklık değişimi



Şekil 4.22. 170 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen sıcaklık değişimi



Şekil 4.23. 190 °C için model ile ve deneysel olarak elde edilen sıcaklık değişimi

Grafiklerden, belirlenen etkin ısı transfer katsayısı değerlerinin modelde kullanılması ile elde edilen sıcaklık değerleri ve deneysel sıcaklık verilerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bulunan ısı transfer katsayısı değerleri, sıcaklık ölçümünün yapıldığı noktada kaynamanın başladığı andan itibaren meydana gelen sıcaklık değişimini de açıklayabilmektedir. Buradan da, öngörülen yöntem kullanıldığında gerçek prosesi yansıtan ısı transfer katsayısı değerlerinin elde edilebileceği sonucu çıkmaktadır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada parmak patateslerin kızartılması sırasında proses tasarımı ve optimizasyonu için kullanılabilen ısı transfer katsayısı, nem difüzyon katsayısı ve kütle transfer katsayısı değerleri belirlenmiştir.

Literatürde bulunan birçok çalışmada ısı transfer katsayısının belirlenmesinde yüzey sıcaklığı verileri kullanılmıştır. Isılçift kullanılarak güvenilir yüzey sıcaklığı verileri elde etmenin bazı zorlukları vardır. Ayrıca, yüzeyde tek bir noktada sıcaklığı belirlemek ve bu değeri tüm yüzeyin sıcaklığı olarak kabul etmek parmak patates geometrisi için doğru değildir. Bu çalışmada önerilen yöntemde ısılçift konumunun bilinmesine gerek duyulmaması, yüzey sıcaklık ölçümüne dayanan yöntemlerin kullanılmasından kaynaklanabilecek hataların önüne geçmektedir.

Isı transfer katsayısının Lumped sistem yönteminde olduğu gibi metal modeller ile belirlenmesi durumunda, gıdalarda suyun buharlaşması ve kabarcıkların oluşmasının etkisi belirlenemediğinden, metal modeller ile yapılan deneyler gerçek prosesi temsil edememektedir. Çalışmada kabarcıklı ve kabarcıksız ortamda yapılan deneylerde ısı transfer katsayısının yağ sıcaklığı ile arttığı, kabarcıksız ortamda elde edilen ısı transfer katsayısı değerlerinin parmak patates kullanılarak elde edilen değerlere yakın ancak tam tersi bir eğilimde olduğu, kabarcıklı ortamda elde edilen değerlerin ise her iki yönteme göre daha yüksek değerler olduğu belirlenmiştir. Parmak patatesler kullanılarak belirlenen ısı transfer katsayısı değerlerinin yağ sıcaklığının artması ile azalması, Lumped sistem yönteminin kızartma işlemini açıklayamadığını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan yöntemin avantajı, parmak patatesler kullanılması durumunda, kızartma sırasında meydana gelen kütle transferinin etkisini de hesaba katarak, gerçek prosesi yansıtan ısı transfer katsayısı değerlerinin elde edilebilmesidir.

Geliştirilen modelin, deneysel olarak belirlenen parametreler kullanıldığında, kızartma sırasında parmak patateste meydana gelen nem içeriği ve sıcaklık değişimini açıklayabildiği ortaya konmuştur. Bu da modelin kızartma prosesinin

tasarımı ve optimizasyonunda kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada parmak patates geometrisi için bulunmuş olan transfer parametreleri, aynı boyut ve geometriye sahip patateslerin kızartılması için kullanılabilir. Böylece kızartma sıcaklığı ve süresinin, parmak patatesteki sıcaklık değişimine bağlı olarak meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler üzerine etkisinin çalışılması mümkün olacaktır. Bu değişimlere (akrilamid oluşumu, renk ve tekstür gelişimi gibi) ait kinetik parametreler bilindiğinde modelin kullanılması ile daha kaliteli ve güvenli ürün eldesi sağlanabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Farkas, B. E., Singh, R. P. ve Rumsey, T. R. "Modelling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying, I, Model Development" Journal of Food Engineering, **29**: 211-226, (1996).
- [2] Gökmen, V., Palazoğlu, T. K. ve Şenyuva, H. Z. (baskıda), "Relation between the acrylamide formation and time-temperature history of surface and core regions of French fries", Journal of Food Engineering, (2005).
- [3] Singh, R. P. ve Heldman, D. R. "Introduction to Food Engineering", Academic Press, Inc., San Diego, 499 s., (1993).
- [4] Jadhav, S. J. ve Kadam, S. S. "Potato", Salunkhe, D. K. ve Kadam, S. S. (ed), "Handbook of Vegetable Science and Technology: production, composition, storage and processing", 1. Baskı, Marcel Dekker Inc., New York, s. 11-24, (1998).
- [5] Moyano, P. C., Rioseco, V. K. ve Gonzalez, P. A. "Kinetics of Crust Color Changes During Deep-fat Frying of Impregnated French Fries", Journal of Food Engineering, **54(3)**: 249-255, (2002).
- [6] Hubbard, L. J. ve Farkas, B. E. "A Method for Determining the Convective Heat Transfer Coefficient During Immersion Frying", Journal of Food Process Engineering, **22**: 201-214, (1999).
- [7] Ni, H. ve Datta, A. K. "Moisture, Oil and Energy Transport During Deep-fat Frying of Food Materials", Institution of Chemical Engineers Trans Ichem E, **77**: (1999).
- [8] Costa, R. M., Oliveira, F. A. R., Delaney, O. ve Gekas, V. "Analysis of the Heat Transfer Coefficient During Potato Frying", Journal of Food Engineering, **39(3)**: 293-299, (1999).
- [9] Fellows, P. J. "Food Processing Technology", Ellis Horwood Limited, England, 505s., (1990).
- [10] Claeys, W. L., De Vleeschouwer, K. ve Henrickx, M. E. "Quantifying the Formation of Carcinogens During Food Processing: acrylamide", Trends in Food Science and Technology, **16(5)**: 181-193, (2005).

- [11] Budżaki, S. ve Seruga, B. “Determination of Convective Heat Transfer Coefficient During Potato Frying of Potato Dough”, *Journal of Food Engineering*, **66(3)**: 307-314, (2004).
- [12] Vitrac, O., Trystram, G. ve Raoult-Wack, A.-L. “Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material”, *European Journal of Lipid Technology*, **102**: 529-538, (2000).
- [13] Farkas, B. E., Singh, R. P. ve Rumsey, T. R. “Modelling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying, II, Model Solution and Verification”, *Journal of Food Engineering*, **29**: 227-248, (1996).
- [14] Vijayan, J. ve Singh, R. P. “Heat Transfer During Immersion Frying of Frozen Foods”, *Journal of Food Engineering*, **34**: 293-314, (1997).
- [15] Tangduangdee, C., Bhumiratana, S. ve Tia, S. “Heat and Mass Transfer During Deep-fat Frying of Frozen Composite Foods with Thermal Protein Denaturation as Quality Index”, *ScienceAsia*, **29**: 355-364, (2003).
- [16] Hosney, R. C. “Principles of Cereal Science and Technology”, AACC, t. Paul, MN., 378 s., (1994).
- [17] Goñi, I., Bravo, L., Larrauri, J. A. ve Calixto, F. S. “Resistant Starch in Potatoes Deep-fried in Olive Oil”, *Food Chemistry*, **39(2)**: 269-272, (1997).
- [18] Sağol, S. “Tahıl ve Baklagillerin Jelatinizasyon Sıcaklığının Suyun Transfer Hızından Yaralanarak Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 68s, (2004).
- [19] Farkas, B. E. ve Hubbard, L. J. “Analysis of Convective Heat Transfer During Immersion Frying”, *Drying Technology*, **18(6)**: 1269-1285, (2000).
- [20] Li, J. ve Yeh, A. “Relationships Between Thermal, Rheological Characteristics and Swelling Power for Various Starches”, *Journal of Food Engineering*, **50**: 141-148, (2001).
- [21] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B. ve Marinos-Kouris, D. “Colour Changes During Deep-fat Frying”, *Journal of Food Engineering*, **48(3)**: 219-225, (2001).
- [22] Köksel, H. “Karbonhidratlar”, Saldamlı İ. (ed), Gıda Kimyası, 1. Baskı, Hacettepe Üniversitesi Basımevi, Ankara, s. 60-63, (1998).

- [23] Becalski, A., Lau, B. P., Lewis, D. ve Seaman, S. W. “Acrylamide in Foods: Occurrence, Sources and Modelling”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **51**: 802-808, (2003).
- [24] Tareke, E., Rydberg, P., Karlsson, P., Eriksson, S. ve Tornqvist, M. “Analysis of Acrylamide, a Carcinogen Formed in Heated Foodstuffs”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **50**: 4998-5006, (2002).
- [25] Pedreschi, F., Moyano, P., Kaack, K. ve Granby, K. “Color Changes and Acrylamide Formation in Fried Potato Slices”, *Food Research International*, **38(1)**: 1-9, (2005).
- [26] Williams, J. S. E. “Influence of Variety and Processing Conditions on Acrylamide Levels in Fried Potato Crisps”, *Food Chemistry*, **90(4)**: 875-881, (2005).
- [27] Costa, R. M. ve Oliveira, F. A. R. “Modelling the Kinetics of Water Loss During Potato Frying with a Compartmental Dynamic Model”, *Journal of Food Engineering*, **41(3-4)**: 177-185, (1999).
- [28] Rice, P. ve Gamble, M.H. “Modelling moisture loss during potato slice frying”, *International Journal of Food Science and Technology*, **24**: 183-187, (1989).
- [29] Pedreschi, F. ve Moyano, P. “Oil Uptake and Texture Development in Fried Potato Slices”, *Journal of Food Engineering*, **70**: 557-563, (2005)
- [30] Ufheil, G. ve Escher, F. “Dynamics of Oil Uptake During Deep-Fat Frying of Potato Slices”, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **29(7)**: 640-644, (1996).
- [31] Krokida, M. K., Oreopoulou, V. ve Maroulis, Z. B. “Water Loss and Oil Uptake As a Function of Frying time”, *Journal of Food Engineering*, **44(1)**: 39-46, (2000).
- [32] Saguy, I. S. ve Dana, D. “Integrated Approach to Deep-fat Frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects”, *Journal of Food Engineering*, **56**: 143-152, (2003).
- [33] Moreira, R. G., Sun, X. ve Chen, Y. “Factors Affecting Oil Uptake in Tortilla Chips in Deep Fat Frying”, *Journal of Food Engineering*, **31**: 485-498, (1997).

- [34] Bungler, A., Moyano, P. ve Rioseco, V. “NaCl Soaking Treatment for Improving the Quality of French-fried Potatoes”, *Food Research International*, **36(2)**: 161-166, (2003).
- [35] Sahin, S., Sastry, S. K. ve Bayindirli, L. “Heat Transfer During Frying of Potato Slices”, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **32(1)**: 19-24, (1999).
- [36] Sahin, S., Sastry, S. K. ve Bayindirli, L. “The Determination of Convective Heat Transfer Coefficient During Frying”, *Journal of Food Engineering*, **39(3)**: 307-311, (1999).
- [37] Ngadi, M. ve Ikediala, J. N. “Natural Heat Transfer Coefficients of Chicken Drum Shaped Bodies”, *International Journal of Food Engineering*, **1(3)**, (2005).
- [38] Baik, O. D. ve Mittal, G. S. “Heat Transfer Coefficients During Deep-fat Frying of Tofu Disc”, *American Society of Agricultural and Biological Engineering*, **45(5)**: 1493-1499, (2002).
- [39] AOAC., “Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists”, 12. Baskı, Washington, DC., (1975).
- [40] Srikiatden, J. ve Roberts, J. S. “Measuring Moisture Diffusivity of Potato and Carrot (Core and Cortex) During Convective Hot Air and Isothermal Drying”, *Journal of Food Engineering*, **74(1)**: 143-152, (2006).
- [41] Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E. ve Rorrer G. “Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer”, 4. Baskı, John Wiley & Sons, Inc., New York, 759 s., (2001).
- [42] Crank, J. “The mathematics of diffusion”, Clarendon Press, Oxford, 414 s., (1975).
- [43] Incropera, F. P. ve Dewitt, D. P. “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 3. Baskı, John Wiley & Sons, Inc., New York, 918 s., (1990).
- [44] Budžaki, S. ve Seruga, B. “Moisture Loss and Oil Uptake During deep Fat Frying of “Kroštula” Dough”, *European Food Research Technology*, **220**: 90-95, (2005).
- [45] McMinn, W. A. M. ve Magee, T. R. A. “Air drying kinetics of potato cylinders”, *Drying Technology*, **14(9)**: 2025-2040, (1996).

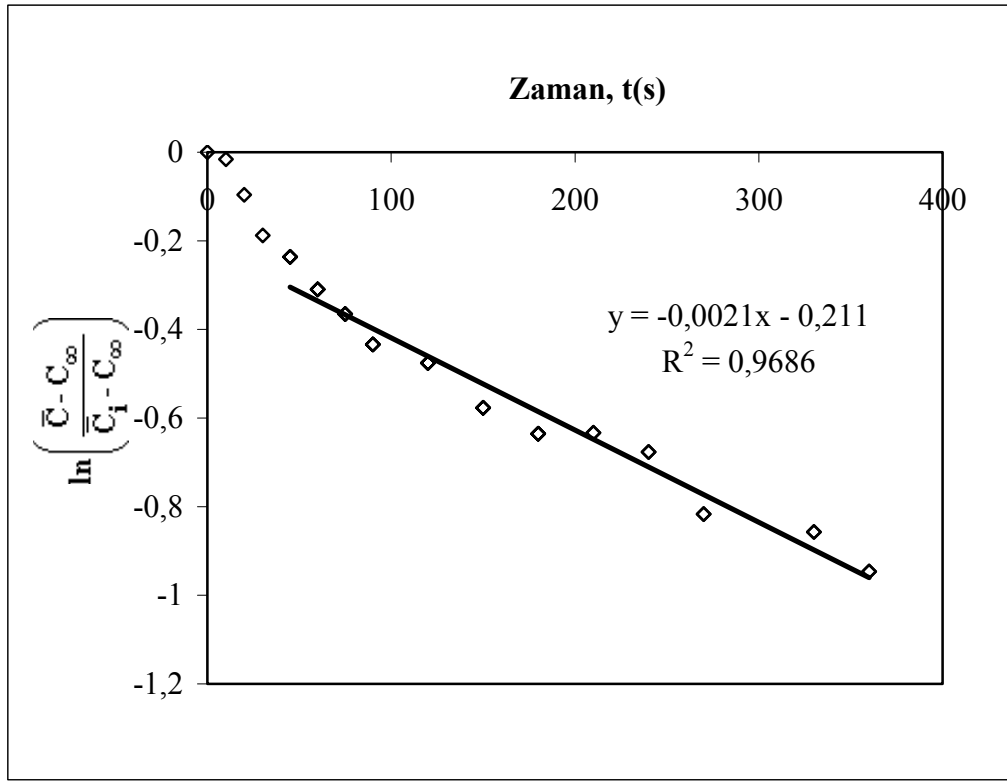
- [46] Turhan, M. ve Gunasekaran, S. “Kinetics of in Situ and in Vitro Gelatinization of Hard and Soft Wheat Starches During Cooking in Water”, *Journal of Food Engineering*, **52**: 1-7, (2002).
- [47] Sander, A., Skansi, D. ve Bolf, N. “Heat and Mass transfer Models in Convection Drying of Clay Slabs”, *Ceramics International*, **29**: 641-653, (2003).
- [48] Çengel, Y. A. “Heat Transfer: A Practical Approach”, Mc Graw Hill Companies Inc., New York, 1005 s., (1998).
- [49] Palaniappan, S. ve Sizer, C.E. “Aseptic process validated for foods containing Particulates”, *Food Technology*, **51(8)**: 60-68, (1997).
- [50] Erdogdu, F. ve Turhan, M. (Baskıda), “Analysis of dimensional ratios of regular geometries for infinite geometry assumptions in conduction heat transfer problems”, *Journal of Food Engineering*.

EKLER		<u>Sayfa No</u>
EK 1.	KÜTLE TRANSFER PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.....	69
EK 2.	ISI TRANSFER KATSAYISI VE ISILÇİFT KONUMUNUN BELİRLENMESİ.....	71
EK 3.	ISILÇİFT KONUMUNUN HESAPLAMALARDAKİ ETKİSİNİN TEST EDİLMESİ.....	73

EK-1. KÜTLE TRANSFER PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖRNEK HESAPLAMA

Patateslerin kızartılması sırasında zamana karşı nem değerleri kullanılarak Materyal ve Metodda öngörülen yöntemle Şekil Ek1.1 elde edilir. Grafiğin denkleminin $y = -0,0021x - 0,211$ olduğu görülmektedir. Denklik (3.7) 'de $(2\ln E)$ grafiğin y eksenini kestiği noktayı, y_0 , vermektedir.



Şekil Ek1.1. Patates dilimlerinin kızartılması sırasında elde edilen tipik

$\ln\left(\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty}\right) - t$ grafiği (170°C)

$$\ln\left(\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty}\right) = 2 \ln E - 2\mu_1^2 \frac{D_e t}{L^2} \quad (3.7)$$

E sayısının μ_1 köküne bağlı olduğu görülmektedir.

$$2 \ln \left(\frac{2 \sin^2(\mu_1)}{\mu_1 [\mu_1 + \sin(\mu_1) \cos(\mu_1)]} \right) = y_0 = 0,211$$

$$\mu = 1,356571$$

$$m = -0,0021$$

$$-0,0021 = 2 \times 1,356570^2 \frac{D_e}{0,00425^2}$$

$$D_e = 10,3 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$$

$$Bi_m = (\mu_1) \tan(\mu_1) = 1,356571 \times 4,59635 = 6,23527$$

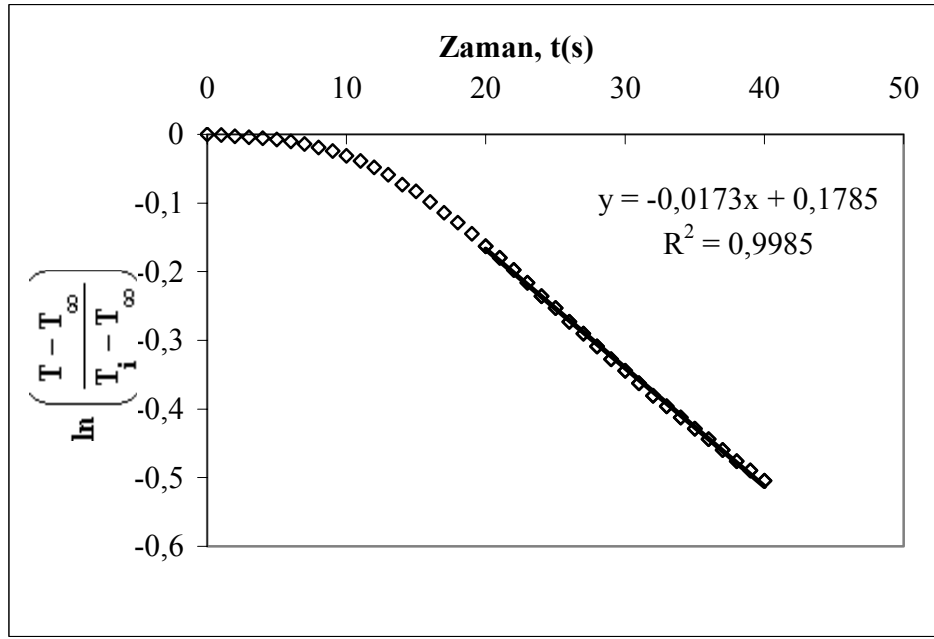
$$Bi_m = \frac{k_e L}{D_e}$$

$$k_e = \frac{6,23527 \times 10,3 \times 10^{-9}}{0,00425} = 1,51 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

EK-2. ISI TRANSFER KATSAYISI VE ISILÇİFT KONUMUNUN BELİRLENMESİ

ÖRNEK HESAPLAMA

Şekil Ek2.1.'de zamana karşı $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right)$ grafiği görülmektedir.



Şekil Ek2.1. Patates diliminin kızartılması sırasında elde edilen tipik $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right) - t$ grafiği (170 °C)

Grafiğin denklemini $y = -0,0173x + 0,1785$ ($y = mx+b$) ve eğim $m = \left(-\frac{2\mu_1^2 \alpha}{L^2}\right)$ dir. Isıl yayılım katsayısı, α , ve karakteristik boyut, L , bilindiğinden

$$\alpha = 1,45 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$L = 0,00425 \text{ m}$$

$$m = -0,0173$$

$$\mu_1 = \sqrt{-\frac{L^2 \times m}{2 \times \alpha}} = \sqrt{\left(-\frac{0,00425^2 \times (-0,0173)}{2 \times 1,45 \times 10^{-7}}\right)} = 1,03804$$

olarak bulunur.

Boyutsuz Biot sayısı $Bi_h = \mu_1 \tan \mu_1$ olduğundan μ_1 bilindiğine göre Biot sayısı ve ısı transfer katsayısı hesaplanabilir.

$$Bi_h = Bi_h = \mu_1 \times \tan \mu_1 = 1,038037 \times 1,695981293 = 1,76049$$

$$k = 0,554 \text{ W / m } ^\circ\text{C}$$

$$h_e = \frac{k \times Bi_h}{L} = \frac{0,554 \times 1,76049}{0,00425} = 229,485 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ olarak bulunur.}$$

Isılçiftin konumunun belirlenmesi için grafiğin denkleminde kesim noktası belirlenir. Bu amaçla Denklik (3.47-3.51)'den yararlanılır.

$$y_0 = 0,1785 \text{ ve}$$

$$e^{y_0} = 1,195423 \text{ bulunur.}$$

$$M = \left(\frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \right) = \left(\frac{2 \times \sin(1,03804)}{1,03804 + \sin(1,03804) \times \cos(1,03804)} \right) = 1,167571$$

$$\frac{e^{y_0}}{M^2} = \frac{e^{0,1785}}{1,167571^2} = 0,87691$$

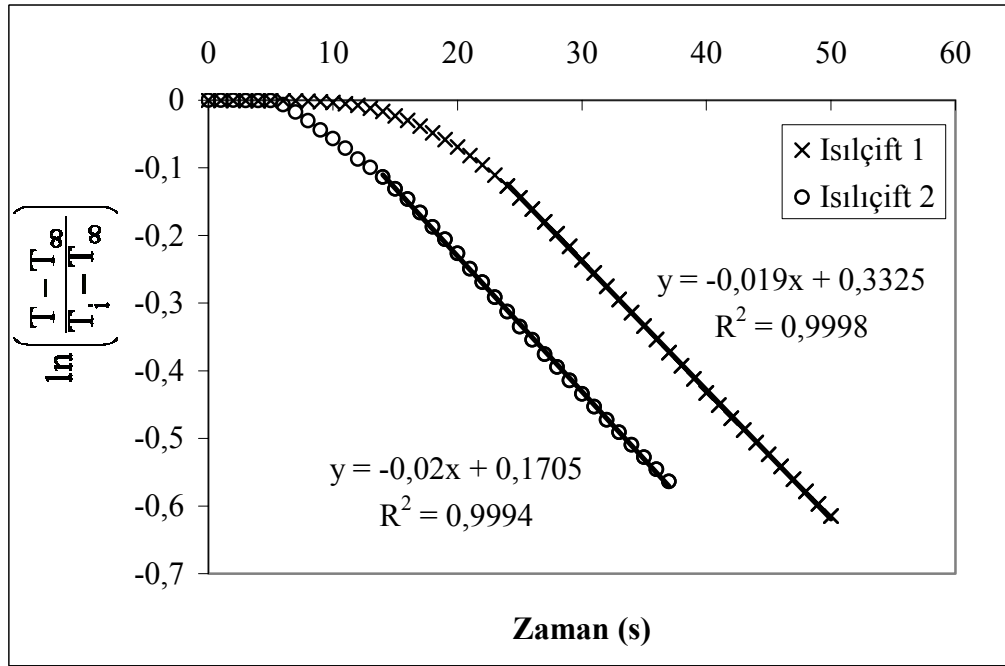
$$x = \frac{L}{\mu_1} \arccos \sqrt{\frac{e^{y_0}}{M^2}} = \frac{0,00425}{1,03804} \arccos \sqrt{0,87691} = 0,001468 \text{ m} = 1,47 \text{ mm}$$

olur. Buradan da ısıılçiftin konumu $x = y = 1,47 \text{ mm}$ olarak bulunur.

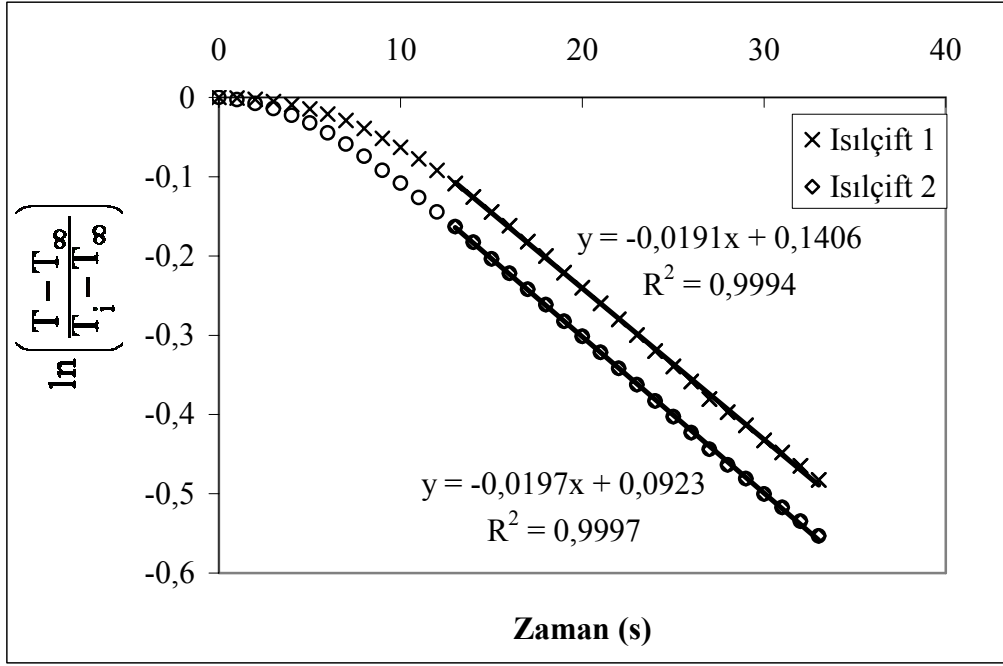
EK-3. ISILÇİFT KONUMUNUN HESAPLAMALARDAKİ ETKİSİNİN TEST EDİLMESİ

Isılçift konumunun ısı transfer katsayısı üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla sıcaklık-zaman verileri her üç yağ sıcaklığı için, patates diliminin her iki ucundan ısılçift yerleştirilerek kaydedilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak

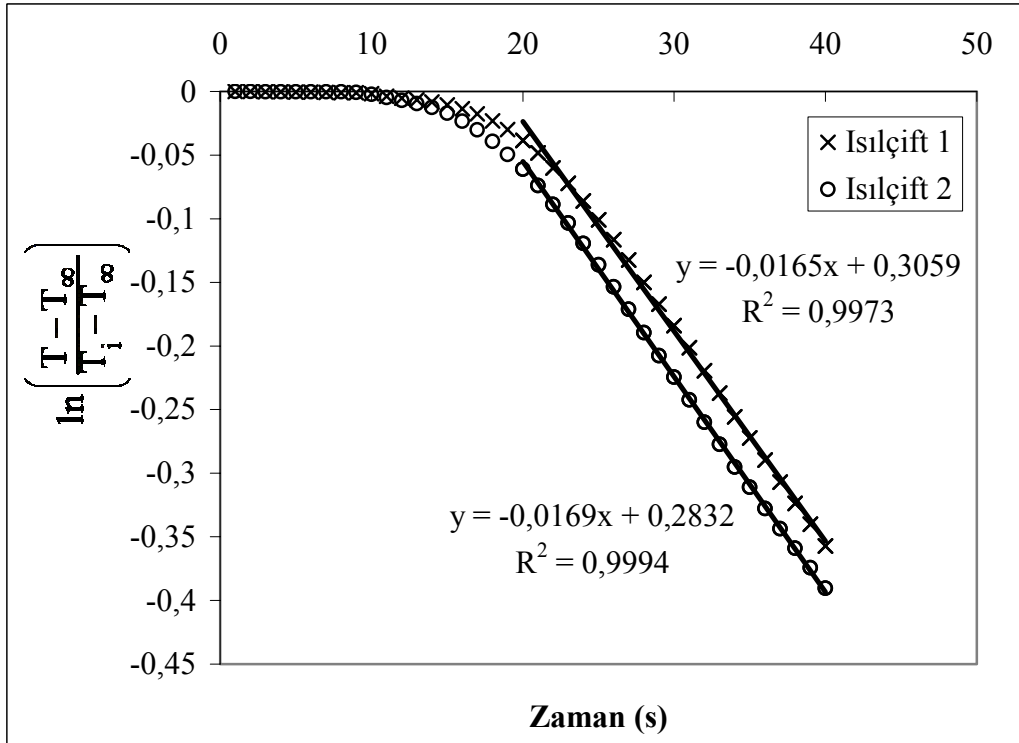
$\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right)$ -t grafikleri çizilmiştir (Şekil Ek3.1., Şekil Ek3.2., Şekil Ek3.3.).



Şekil Ek3.1. Farklı iki noktadan elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right)$ -t grafikleri (150 °C)



Şekil Ek3.2. Farklı iki noktadan elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right)$ -t grafikleri (170 °C)



Şekil Ek3.3. Farklı iki noktadan elde edilen $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}}\right)$ -t grafikleri (190 °C)

Her üç yağ sıcaklığında elde edilen grafikler incelendiğinde aynı dilim içerisindeki farklı iki noktadan elde edilen doğru denklemlerinin eğimlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir (150°C için -0,019 ve -0,02; 170 °C için -0,0191 ve -0,0197; 190 °C için -0,0165 ve -0,0169). Dolayısıyla eğimler kullanılarak hesaplanan ısı transfer katsayısı, h, değerleri de birbirine yakın olacaktır. Bu da ısı çiftin konumunun ısı transfer katsayısı hesaplanmasında önemli olmadığını göstermektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Aygün YILDIZ

Mersin Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Gıda mühendisliği Bölümü
33343 Çiftlikköy, MERSİN

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum yeri ve tarihi: Mersin, 1980

Medeni durum: Bekar

Sürücü belgesi: B

EĞİTİM

Yüksek lisans: Mersin Üniversitesi Gıda Müh. Bölümü, Mersin, 2003-

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Ankara, 1998-2003

YABANCI DİL

İngilizce-İyi derecede

Almanca-Orta derecede

İŞ DENEYİMİ

Mersin Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi 2004-