

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**SÜREKLİ SİSTEM OHMİK PIŞIRME İŞLEMİNİN
ENERJETİK VE EKSERJETİK PERFORMANS
DEĞERLENDİRMESİ, MATEMATİKSEL
MODELLENMESİ**

Ender Hikmet ARSERİM

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Filiz İÇİER

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 614.02.00

Sunuş Tarihi : 30.07.2013

Bornova-İZMİR

2013

Ender Hikmet ARSERİM tarafından YÜKSEK LİSANS tezi olarak sunulan “**Sürekli Sistem Ohmik Pişirme İşleminin Enerjetik ve Ekserjetik Performans Değerlendirmesi, Matematiksel Modellenmesi**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği il E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 30.07.2013 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğuyla ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

İmza

Jüri Başkanı :

Raportör Üye :

Üye :

ÖZET

SÜREKLİ SİSTEM OHMİK PIŞIRME İŞLEMİNİN ENERJETİK VE EKSERJETİK PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ, MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

ARSERİM, Ender Hikmet

Yüksek Lisans Tezi, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Filiz İÇİER

Temmuz 2013, 141 sayfa

Bu tez çalışmasında, köfte örneklerinin sürekli sistem ohmik pişirme işlemi ile 3 farklı voltaj gradyanı uygulamasında (15, 20, 25 V/cm) pişirilmesi deneysel ve kuramsal olarak incelenmiştir.

Ohmik pişirme işlemi uygulanmış köfte örneklerinde işlemin etkisini belirlemek amacı ile ağırlık ve boyut ölçümleri, temaslı-temassız sıcaklık ölçümleri, voltaj, akım ve güç ölçümleri ve kompozisyon analizi gerçekleştirilmiştir. Ohmik pişirme işlemi matematiksel olarak modellenerek, sıcaklık dağılımları elde edilmiş; temaslı ve temassız sıcaklık ölçümlerinden elde edilen deneysel sıcaklık dağılımları karşılaştırılmıştır. Elektriksel iletkenlik değerinin sıcaklıkla değişim ilişkileri elde edilmiştir. Elektriksel pişirme sisteminin enerjetik ve ekserjetik değerlendirmesi gerçekleştirilerek, sadece gıda kalitesi açısından değil enerji verimliliği açısından da yüksek olan bir sistemin geliştirilmesine çalışılmıştır.

Temaslı sıcaklık ölçümleri ile başlangıçta merkez sıcaklığı 20°C olan örneklerin ohmik pişirme işlemi sonunda merkez sıcaklığının 75°C'ye, yüzey ortalama sıcaklığının ise 15, 20, 25 V/cm'de sırasıyla 59.16, 54.30 ve 54.55 °C'ye ulaşabildiği tespit edilmiştir. Sıcaklık homojenliğinin düşük voltaj gradyanlarında 1.28 değerine ulaştığı tespit edilmiş; bu sonuç temassız sıcaklık ölçümleri sonucu elde edilen termal kamera görüntüleri ile de desteklenmiştir. İşlem sonunda elde

edilen temaslı-temassız sıcaklık ölçüm sonuçları arasındaki fark % 0.85-34.89 arasında değişmektedir.

Maksimum ekserji verimi olarak ise % 57.10 değerine 25 V/cm voltaj gradyanı parametresinde ulaşılmıştır. Matematiksel model sıcaklık öngörülerini ile deneysel ölçümler arasındaki korelasyon katsayılarının 0.98 ile 1 arasında olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışması ile elde edilen verilerin pilot ve endüstriyel çapta sürekli sistem ohmik pişirme sistemlerinin kurulması için alt yapı oluşturması amaçlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Ohmik, ekserji, pişirme, modelleme

ABSTRACT**ENERGETIC AND EXERGETIC PERFORMANS EVALUATION
AND MATHEMATICAL MODELLING OF CONTINUOUS TYPE
OHMIC COOKING PROCESS**

ARSERİM, Ender Hikmet

MSc in Food Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Filiz İÇİER

July 2013, 141 pages

In this thesis, continuous type ohmic cooking process of meatball sample applied at three different voltage gradients (15, 20, 25 V/Cm) was investigated experimentally and theoretically.

Dimensional and gravimetric measurements; contact and noninvasive temperature measurements; voltage, current and power measurements; compositional analysis were performed for determining effects of the ohmic cooking process on meatballs. Ohmic cooking process was mathematically modeled, the simulation results of the temperature distribution was compared with the experimental contact and noninvasive measurements. Electrical conductivity-temperature relations were determined. Since energetic and exergetic evaluation of electrical cooking system was performed, it was aimed to set up high efficiency system within not only in terms of food safety but also in terms of energy productivity.

According to the results of contact temperature measurements, , meatball samples having initial temperature of 20°C reached to the center temperature of 75 °C whenever the surface temperatures of samples cooked at 15, 20 and 25 V/cm voltage gradients could reached to 59.16, 54.30 and 54.5 °C, respectively.. Temperature homogeneity was obtained as 1.28 at low voltage gradients. This result was supported with thermal camera measurements. Difference between the contact and noninvasive temperature measurements at the end of the cooking process were in the range of % 0.85-% 34.89.

Maximum exergy efficiency was determined as % 57.10 at 25 V/cm voltage gradient. Correlation coefficients between model and experimental results was established between 0.98 and 1. It was aimed that the results of this study will be helpful to design pilot scale and industrial continuous type ohmic cooking units.

Key words : Ohmic, exergy, cooking, modelling

TEŞEKKÜR

Bu tez projesi, TÜBİTAK 110 O 068 nolu proje, Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 11 MÜH 075 ve EBİLTEM 11 BİL 021 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Bilimsel gelişimime yön veren, özveri ile katkıda bulunan danışman Hocam Doç. Dr. Filiz İÇİER'e, huzurlu bir laboratuvar ortamı sağlayan çalışma arkadaşlarıma, TUBİTAK TOVAG grubuna ve Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Şube Müdürlüğü'ne

Hem hayatta hem de tez çalışmamda gösterdiği anlayış ve yardımları için Merve ESER'e

Nerede olursam olayım, maddi ve manevi destekleri hep benimle olan aileme, her durumda yanımda olan arkadaşlarıma ve başarımda katkısı bulunan herkese teşekkür ederim.

Gıda Mühendisi

Ender Hikmet ARSERİM

İzmir-2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Ohmik Isıtma	4
2.1. 1. Ohmik Isıtmanın Et Ürünlerinde Kullanımı	6
2.2. Ohmik Pişirme	9
2.2.1. Ohmik Pişirmenin Et Ürünlerinde Kullanımı	10
2.3. Ohmik İşlemenin Modellenmesi	12
2.4. Ohmik İşlemede Enerji	18
2.5. Gıda İşleme65de Ekserji	20
3. GEREÇ VE YÖNTEM	24
3.1. Malzeme	24
3.2. Yöntem	25
3.2.1. Sürekli sistem ohmik pişirme ünitesi	25
3.2.2. Ohmik pişirme yöntemi	26
3.2.3. Pişme süresinin tespiti	27
3.2.4 Sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi	27
3.2.5. Hammaddeye ve Ürüne Uygulanan Fiziksel ve Kimyasal Analizler	29
3.2.6. Elektriksel iletkenlik tespiti	30
3.2.7. Kuramsal çalışma	30
3.2.8. İstatistiksel değerlendirme	45

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	46
4.1. Uygulanan Voltaj Gradyanının Kompozisyon Üzerine Etkisi	46
4.2. Uygulanan Voltaj Gradyanının Ağırlık ve Boyut Değişimi Üzerine Etkisi	47
4.3. Uygulanan Voltaj Gradyanının Pişme Süresi ve Sıcaklık Dağılımı Üzerine Etkisi	48
4.3.1. Temaslı sıcaklık ölçümleri.....	48
4.3.2. Temassız sıcaklık ölçümleri.....	52
4.3.2. Temaslı ve temassız sıcaklık ölçümleri arasındaki uyum	53
4.4 Ohmik Pişirme Sırasındaki Elektriksel İletkenlik Değişimleri	54
4.5. Kuramsal İnceleme.....	58
4.5.1 Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesi.....	58
4.5.2. Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin enerjetik ve ekserjetik performans değerlendirmesi	60
4.5.3. Matematiksel modelleme	65
5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR DİZİNİ	72
ÖZGEÇMİŞ.....	84
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

3.1. Pilot ölçekli sürekli sistem ohmik pişirme ünitesinin şematik gösterimi.....	26
3.2. Sürekli sistem ohmik pişirme işlemi incelenen sistemin şematik gösterimi	32
4.1. Farklı voltaj gradyanlarındaki ortalama merkez ve yüzey sıcaklık değişimi a) 15 V/cm b) 20 V/cm c) 25 V/cm	49
4.2. Farklı voltaj gradyanlarında pişme sırasındaki ortalama sıcaklık homojenliğinin değişimi	51
4.3. Voltaj gradyanı farklılığının ohmik pişirme sıcaklığının değişimi üzerine etkisi (Temassız ölçümler)	53
4.4. Farklı voltaj gradyanlarında ohmik pişirme sırasında köftenin elektriksel iletkenlik değerinin sıcaklık ile değişimi.....	56
4.5. Voltaj gradyanının ohmik pişirme sırasında köfte örneklerinin ortalama elektriksel iletkenlik değeri üzerine etkisi.....	56
4.6. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin enerji verimlilikleri	60
4.7. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin ekserji verimlilikleri	61
4.8. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin ekserji kayıpları.....	62
4.9. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin tersinmez ekserjileri	62
4.10. Farklı voltaj gradyanlarındaki geliştirme potansiyelleri	63
4.11. 25 V/cm voltaj gradyanı uygulanan ohmik pişirme sırasında deneysel ve öngörülen sıcaklık değerleri.....	66
4.12. 20 V/cm voltaj gradyanı uygulanan ohmik pişirme sırasında ölçülen ve öngörülen sıcaklık değerleri.....	67
4.13. 15 V/cm voltaj gradyanı uygulanan ohmik pişirme sırasında ölçülen ve öngörülen sıcaklık değerleri.....	67

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)**Şekil****Sayfa**

- 4.14.** Farklı voltaj gradyanlarında ohmik pişme süreleri sonunda örnek içi sıcaklık dağılımları (yarıçap=1.25 cm)..... 68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge

Sayfa

3.1	Piştirme işlemi öncesi hazırlanan köfte hamurunun kimyasal kompozisyonu ve bazı özellikleri.....	25
3.2.	Termal görüntülerin alındığı piştirme aşamaları	28
3.3.	Elektriksel iletkenlik değişiminde kullanılan ampirik modeller.....	31
4.1.	Farklı voltaj gradyanlarında piştirilen köftelerin kompozisyon değerleri.....	46
4.2.	Farklı voltaj gradyanlarında ürünlerdeki çap, ağırlık ve boyut değişimi.....	47
4.3.	Köftenin farklı voltaj gradyanlarında pişme süreleri.....	50
4.4.	Ohmik işlem sonrasında ölçülen temaslı ölçüm sıcaklık değerleri	51
4.5.	Ohmik piştirme sırasında alınan termal görüntüleme değerlendirme sonuçları.....	55
4.6.	Ohmik piştirme sırasında eş zamanlı kaydedilen temaslı ve temassız sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	55
4.7.	Temaslı ve temassız sıcaklar arasındaki uyum (% fark).....	55
4.8.	Elektriksel iletkenliğin değişiminin modellenmesinde kullanılan modellerdeki katsayılar	58
4.9.	Deneysel ve öngörülen elektriksel iletkenlik değerleri arasındaki istatistiksel uyum.....	59
4.10.	Farklı voltaj gradyanlarındaki enerji ve ekserji girdi ve çıktıların ortalama değerleri.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
C_p	özgül ısı (J/kg.K)
E	enerji(J)
Ex	ekserji (J/kg)
h	entalpi (J/kg)
h	taşınilmla ısı aktarım katsayısı (W/m ² K)
k	iletim ısı transfer katsayısı (W/mK)
η	verim
Q	performans analizinde gerekli enerji transfer hızı (W)
Q_v	sistem tarafından tüketilen enerji (J)
r	radyal yönde ısı transfer uzaklığı (m)
S	entropi (J/°C) (Denklem 47)
t	süre (s)
T	sıcaklık (°C)
ρ	yoğunluk (kg/m ³)
Δ	gradyan
V	volt (V)
I	akım (A)
D	çap ölçümü (m)
V_e	deneysel değer
V_c	hesaplanan değer

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ(devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
w	su
K _c	hücre sabiti
L	örneğin uzunluğu (m)
A _e	örneğin elektrota temas ettiği alan (m ²)
m	kütle (kg)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
pr	protein
kr	karbonhidrat
Eİ	elektriksel iletkenlik
ü	ürün
ky	kayıp
hm	hammadde

1. GİRİŞ

Gıdaların üretiminde uygulanan ısısal işlemlerin amacı, gıdanın tüketiciye ulaşana kadar kalite özelliklerinin ve besin değerinin azami kayıp ile muhafaza edilmesi, gıdanın mikrobiyolojik ve toksikolojik açıdan güvenilir olmasını sağlamaktır. Gıda endüstrisinde üreticilerin daha kaliteli ürünler ile birlikte verimi daha yüksek ve ekonomik olan üretim talepleri gün geçtikçe artmaktadır (Sheridan and Shilton, 1999).

Tüketicinin güvenilir, besin değeri yüksek ve tüketimi kolay gıda talebi; üreticinin ise yüksek verimli, ekonomik ve hızlı üretim talebi gıdaya uygulanan ısısal işlemlerin iyileştirilmesi ve alternatif yöntemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalara talebi oluşmuştur. Gıda işlemede ürün kalitesinin korunarak güvenli gıda üretiminin sağlanmasındaki bu yaklaşımlardan biri “minimum işlem” olarak adlandırılmaktadır. Minimum işlem teknikleri içerisinde yer alan elektriksel yöntemlerle ilgili çalışmaların son yıllarda oldukça yoğunluk kazandığı dikkat çekmektedir. Özellikle ohmik ısıtma, dielektrik ısıtma ve kızılötesi ısıtma gibi elektriksel yöntemlerin gıdaların işlenmesinde ısıtma, haşlama, pişirme, verim arttırma, kaliteyi iyileştirme ve enzim/mikrobiyal inaktivasyon amaçlar için alternatif oluşturabileceği üzerinde durulmaktadır (Baysal vd., 2011). Bir işlemin minimum işlem tekniği olarak nitelendirilebilmesi için;

- gıdanın kalitesinin korunması,
- istenilen değişikliklerin oluşmasını sağlaması,
- kısa sürede gerçekleşmesi,
- mümkün olduğunca az enerji kullanılması,
- enerji veriminin yüksek olması,
- istenen amaca mümkün olduğunca az işlem basamağı ile ulaşılması,
- pratik olması,
- alternatif bir sistem olarak uygulanabilir olması (ticari uygulanabilir, ekonomik ve geçerli olabilmesi),
- çevreye duyarlı olması

gibi özellikler taşıması gerekmektedir (Baysal vd., 2011).

Ohmik elektriksel işleme yöntemi, homojen ve hızlı ısıtmanın yanı sıra, maliyeti düşük ve atık potansiyeli az minimal işleme yöntemi olarak son yıllarda tüm dünyada önem kazanmış durumdadır. Ohmik ısıtma teknolojisinin gıda endüstrisindeki taleplere yönelik uygun alternatif yöntemlerden biri olduğu düşünülmektedir.

Ohmik ısıtma, sistemden elektriksel alternatif akım geçirilirken, devreyi tamamlayan bir parça olan gıdanın elektriksel dirence bağlı olarak ısıtılması ilkesine dayanan elektriksel ısıtma tekniğidir. 1989 yılı itibariyle ticari patentli sistemlerin oluşturulması sonucunda bu konuda yapılan çalışmalar ivme kazanmıştır. Elde edilen veriler bu işlemin sıvı gıdalara uygulanabilirliğini ortaya koymuş olup, FDA ve USDA gibi kurum/kuruluşlar tarafından da sıvı gıdaların pastörizasyon/sterilizasyonunda kullanılmasına izin verilmiştir. Bununla birlikte ohmik ısıtmanın katı gıdalar üzerine etkisinin incelendiği sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu yöntemin sıvı gıdalarda olduğu gibi katı gıdalarda da yasal olarak kullanımını sağlayacak yeterlilikteki verilere henüz literatürde rastlanmamaktadır.

Genellikle ısıl işlem uygulanarak tüketilen et ve et ürünlerinde kaliteli ürün elde edebilmek için öncelikle pişme sırasında meydana gelen fiziksel değişimlerin belirlenmesi gereklidir. Davey and Gilbert (1974), etin pişme işlemini, proteinlerin denatüre olacağı etkin sıcaklığa kadar ısıtılması olarak tanımlamışlardır. Sıcaklık, uygulama süresi ve pişirme yöntemi, pişme sırasında etin kalitesini ve fiziksel özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdendir (Garcı'a-Segovia et al., 2007).

Bu çalışmada köfte örneklerinin farklı voltaj gradyanlarında sürekli sistem ohmik pişirme sisteminde merkez sıcaklığının 20 °C'den 75 °C'ye gelene dek

pişirilmesinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Örneklerin pişme sırasındaki sıcaklık dağılımlarının temaslı (ısıölçer) ve temassız (termal kamera) sıcaklık ölçerler ile tespiti yapılarak ölçümler arasındaki uyum belirlenmiştir. Uygulanan voltaj gradyanının köfte örneklerinin bazı kalite özellikleri (boyut ve ağırlıktaki yüzde değişim, kompozisyon) üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca ohmik pişirme işleminin enerjetik ve ekserjetik verimlilikleri incelenerek, modellenmiş ve işlem parametrelerinin elektriksel pişirme sisteminin performans özelliğindeki değişim üzerine etkisi belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Ohmik Isıtma

Ohmik ısıtma sistemden elektriksel alternatif akım geçirilirken devreyi tamamlayan bir parça olan gıda materyalinin elektriksel direncine bağlı olarak ısınması prensibine dayanan bir elektriksel ısıtma yöntemidir (İcier, 2003). Bu teknikle gıdanın kısa sürede yüksek sıcaklıklara ulaşması, duyuşal özelliklerinin tercih edilen özelliklere daha yakın olması, gıdanın daha az zarar görmesi sağlanabilmektedir (Parrott, 1992). Ohmik işleme teknolojisi kurutma, haşlama, ekstraksiyon, evaporasyon, enzimatik inaktivasyon, fermentasyon, pastörizasyon ve sterilizasyon amacıyla uygulanmaktadır (Sastry and Barach, 2001; Sensoy and Sastry, 2004; İcier et al., 2006; Jun and Sastry, 2007; Yıldız et al., 2009; Bozkurt and İcier, 2009b; Yıldız-Turp et al., 2013).

Elektriksel dirence dayalı ısıtma yöntemi olan ohmik ısıtma son yıllarda üzerinde çalışmaların arttığı bir yöntem olmasına rağmen temelleri 19. yüzyıl sonlarına dayanmaktadır. Durağan sıvı gıdaların ve konserve gıdaların sterilizasyonunda doğrudan direnç ısıtma yöntemi denenmiş, ancak o dönemdeki teknolojik yöntemlerin ve materyallerin yeterli olmaması nedeniyle, endüstriyel olarak kullanılmasına olanak bulunamamıştır (Baysal vd., 2011). Teknolojik gelişme ile paralel olarak hedeflenen sistem kurulumları ve uygulamalar da artmıştır. 1990 yılında ilk olarak AVP şirketi patentli bir sistem geliştirmiş ve alternatif bir sistem olarak endüstriye sunmuştur (Bozkurt, 2009). Endüstriyel kullanımının başlaması ile sistem geliştirme ve optimizasyon amaçlı araştırmalar devam etmiştir. 2000 yılından itibaren ohmik ısıtma sisteminin gıda kalitesindeki etkileri, sürekli sistemlerdeki sıcaklık kontrolleri ve işlem parametreleri konusunda bilimsel araştırmaların arttığı dikkat çekmektedir (Bozkurt, 2009). Yapılan çalışmalar sonucunda uygulanabilirliği arttırılan ohmik ısıtma A.B.D., İngiltere, Japonya ve İtalya’da meyve suyu, süt, hazır yemek gibi daha çok sıvı gıdaların ağırlıklı olduğu alanlarda ısıtma, pastörizasyon, haşlama, evaporasyon,

kurutma, fermentasyon, ekstraksiyon amaçlı pilot ve endüstriyel çapta kullanılmaya başlanmıştır. Ancak ohmik ısıtma teknolojisi sıvı gıdalar için başarılı bir proses olmasına rağmen et ürünleri gibi düşük asitli gıdalar için henüz endüstriyel kullanıma geçilmemiş olup, bu konudaki çalışmalar halen araştırma aşamasındadır (Piette et al., 2004; Marra et al., 2009; Bozkurt and İcier 2008; Bozkurt and İcier 2009b; Yıldız-Turp et al., 2013).

Ohmik ısıtma işleminde gıda materyalinin sıcaklığa ve elektriksel iletkenliğe bağlı olarak değişimi, gıdanın termofiziksel özellikleri ısıtma sisteminin tasarımı, elektriksel alan şiddeti, uygulama süresi, iç kısımdaki sıvı hareketi işlemin etkinliğini belirlemektedir (Sastry and Barach, 2001; İcier, 2003). Bu teknikte ısınma hızı elektriksel alan şiddetinin karesiyle ve elektriksel iletkenlikle doğru orantılı olarak değişmektedir.

Elektrotlar arası mesafenin ve uygulanan voltaj değerinin değiştirilmesiyle elektriksel alan şiddeti ayarlanabilmektedir (İcier and İlicali, 2005a;b). Ohmik ısıtma tekniğinin uygulanabilirliğinin gıdanın elektriksel iletkenlik değerine bağlı olduğu, fakat gıdada çözünmüş tuz iyonları içeren serbest su bulunduğu için gıdanın bu teknikle ısıtılmasında iletkenlik bakımından bir sorun olmadığı belirtilmektedir (Parrott, 1992). Ohmik ısıtma tekniğinin geleneksel ısıtma tekniklerine göre birkaç avantajı bulunmaktadır. Sistemin kullanılması oldukça pratiktir, diğer sistemlere göre daha az yer teşkil etmekte ve sessiz çalışmaktadır. Uygulanan akım kesildiği zaman ısı birikimi durmakta, karıştırma işlemine gerek duyulmadan ısıtma gerçekleştirilebilmektedir. Sistemin hareketli parçası yoktur. Yatırım ve işletme maliyeti farklı ısı transfer ekipmanlarına oranla oldukça düşüktür (Reznick, 2000). Fakat ohmik ısıtma sistemlerinin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar; elektriksel izolasyonun iyi olması gereksinimi, sistemde yaşanabilecek sorunlara önlem alabilecek yetişmiş personel ihtiyacı, elektrik kullanımından dolayı özel tasarımlı çalışma giysisi, iyi bir kontrol sistemi, optimize edilmiş işlem hattı ve özel materyallerin gerekliliği, ürüne göre farklı çalışma şartlarına uygulanabilirliğinin sağlanması ve ohmik işleme teknolojisinin hala çalışma ve araştırma aşamasında olması şeklinde belirtilebilir.

Stirling (1987) ve Biss et al. (1989), ohmik sistemlerin tasarımı ve tanıtımı konusunda daha sonra birçok araştırmacı tarafından yararlanılacak önemli çalışmalarda bulunmuşlardır. 1989 yılından itibaren ohmik ısıtma konusunda yapılan çalışmalar ve pilot çapta kurulan sistemler artmıştır (Fryer, 1995). Kesikli ve sürekli ohmik ısıtma sistemlerinin modellenmesi ve sistemin karakterize edilmesi, proses kontrolü önem kazanmaya başlamıştır. Ohmik ısıtma işleminin farklı sıvı gıda işleme hatlarında farklı işlemlere etkisi ve elektriksel iletkenlik verilerinin elde edilmesi konusunda yapılan çalışmalar endüstriyel uygulamaya geçilebilmesi için gerekli altyapıyı oluşturmuştur. Ayrıca ohmik ısıtmada enerjinin dönüşüm verimi sıvı gıdalarda yüksek olup, % 90 düzeyindedir (Ruan et al., 2004; Icier and Ilicali, 2005a).

2.1. 1. Ohmik Isıtmanın Et Ürünlerinde Kullanımı

Ohmik ısıtma işleminin et ürünlerine uygulanması için yapılan çalışmalarda homojen yapı ve sıcaklık dağılımına ulaşmak amacıyla genellikle domuz eti parçacıkları, biftek, tavuk eti ve balık kıyması gibi heterojen yapının daha az görüldüğü et ürünleri kullanılmıştır. Yapılan ve yapılmakta olan çalışmaların ortak özelliği, frekans, voltaj gradyanı, su içeriği, tuz içeriği, sıcaklık gibi seçilen parametrelerin materyalin elektriksel iletkenlik değişimine etkilerinin incelemiş olmalarıdır.

Domuz eti ile yağı, patates, patlıcan, çeşitli meyveler ve şeker pancarı dilimlerinin statik hücrede tuzlu çözelti içinde sabit voltaj gradyanı (10.87 V/cm) ile ısıtılması incelenmiştir (Halden et al., 1990). Nişasta jelleşmesinin ısıtma hızına etkisi olduğu, elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla doğrusal değiştiği ve yapısal bozulmaların gözlemlendiği saptanmıştır. Benzer şekilde, Palaniappan and Sastry (1991), et örneklerinde 60 V/cm voltaj gradyanında elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla doğrusal değiştiğini rapor etmiştir.

Balık ezmesinden üretilen surimi örneklerinde elektriksel iletkenliğin, eklenen tuz konsantrasyonuna ve nem içeriğine bağlı olduğunu belirtirken, 3.3-

13.3 V/cm aralığında voltaj gradyanının elektriksel iletkenliğe etkisi olmadığı saptanmıştır (Yongsawatdigul et al., 1995). Diğer yandan, Wu et al. (1998) surimi ürününün 30 Hz-1 MHz frekans aralığında ohmik ısıtılmasında, doğru akımda, tuz konsantrasyonu ve sıcaklık arttıkça elektriksel iletkenlik değerinin arttığını belirtmişlerdir.

Yaser and Kolbe (2000), surimi ezmesinin ısıtılmasında 1200 V/cm'de ohmik ısıtma uygulamanın 90 °C'de su banyosundaki ısıtmaya oranla 11 kat daha hızlı olduğunu saptamıştır.

Yapılan farklı bir çalışmada “*chilli con carne*” türü et örneklerinin ohmik ısıtma ile sterilizasyonu gerçekleştirilmiştir (Zuber, 1999). Sonuçlar geleneksel ısıtma ile sterilizasyon işlemi ile karşılaştırıldığında, ohmik ısıtmanın daha kısa işlem sürelerinde besinsel ve duyuşsal özellikleri korumasının yanında mikrobiyal açıdan da güvenilir ürün eldesi sağladığı rapor edilmiştir.

Ürün geometrisi, et ürünleri işlemede kullanılacak ohmik ısıtma ünitenin tasarımında önemli bir yere sahiptir. Zuber (1999) pompalanabilir bir sistemde 2 cm et kalınlığının uygun olabileceğini belirtmiştir. Bunun yanında ürünün kompozisyonu, asitliği gibi ürün özelliklerinin sistem etkinliğini belirlemek adına önemli olduğu vurgulanmıştır (Zuber, 1999).

Shirsat et al. (2004a) farklı yağ içeriklerinde domuz etinin elektriksel iletkenliğini ölçmüşlerdir. Yağ içeriğinin artmasıyla elektriksel iletkenlik değerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Icier and Ilıcalı (2005b) ohmik ısıtma hızını etkileyen en önemli faktörün voltaj gradyanı, sıcaklık ve yağ içeriği olduğunu vurgulamışlardır. Aynı şekilde, McKenna et al. (2006) farklı oranlarda yağ içeriğine sahip domuz etinin 3.6 V/cm sabit voltaj gradyanında, 50 Hz'de 85 °C'ye kadar ohmik ısıtılması sırasında ürünün yapısal özelliklerinin elektriksel iletkenliğe etkisini incelemişlerdir. Yağ miktarı arttıkça ürünün elektriksel

iletkenliğinin azaldığını ve et örneğinin elektriksel iletkenlik değerini etkilediğini belirtmişlerdir.

Tulsiyan et al. (2008) “chowmein” adı verilen tavuk sosu karışımının 60 Hz ve 15-20 V/cm voltaj gradyanında 140 °C’ye kadar ohmik ısıtılması sırasında, karışımı oluşturan her bir bileşenin elektriksel iletkenliğe etkisini incelemişlerdir. Karışımın elektriksel iletkenliğinin, karışımı oluşturan her bir bileşenin elektriksel iletkenliğinden daha yüksek değere sahip olduğunu ve sos karışımının yüksek elektriksel iletkenlik değerine sahip olmasının sebebinin içindeki tuz ve soya sosundan kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir.

Sarang et al. (2008) elektriksel işlem süresince elektriksel iletkenlik değerinde meydana gelen artışın ürün yapısında meydana gelen değişikliklerin neden olduğu iyonik hareketlilikten kaynaklandığını rapor etmiştir. Bu elektriksel iletkenlik değişimi homojen bir yapıda olmayan et ürünlerinde soğuk noktaların oluşumunun da temel sebebidir. Et ürünleri işlemede başarılı bir ısıtma sisteminin tasarımında ürün yapısındaki olası homojensizlikten kaynaklanabilecek soğuk nokta riskinin dikkate alınması gerekmektedir.

Ohmik ısıtmada sadece sıcaklık ve voltaj gradyanı değil aynı zamanda frekans da işlem etkinliğini etkileyen faktörlerden biridir. Alternatif akım iyonların sinusoidal hareketine sebep olarak ve bu doğrultuda bir ısı oluşumuna sebep olmaktadır. Bunun yanında düşük frekanslı alternatif akımın, direk akımdan daha az şiddette elektrolitik etkisi bulunmaktadır. En önemli elektrolitik etki ise metal elektrotların ürünü kontamine etmesidir. Bu sorunu ortadan kaldırmanın bir yolu 100 kHz’in altında alternatif akım kullanmaktır. Ayrıca paslanmaz çelik, saf karbon, platin kaplı titanyum elektrot kullanımının bu sorunu ortadan kaldırdığı bildirilmektedir (Sastry and Salengke, 1998; Zhao and Kolbe, 1999). Isıl işlem süresince elektrolizin oluşması zehirli bileşiklerin oluşmasına ayrıca ürün duyusal ve besinsel özelliklerinde olumsuzluklara neden olabilmektedir. İşlem yapılan

frekans aralığı üründe oluşabilecek olumsuzlukları önlemek ve/veya sebep olması nedeniyle dikkate alınması gereken bir faktördür (Park, 1995).

Ohmik ısıtma işlemi sırasında uygulanan elektrik enerjisi, fiziksel ve kimyasal değişikliklere neden olmaktadır (Assiry et al., 2003). Düşük enerji kaybı, yüksek performansı nitelerken, sistemi tanımlamakta kullanılan sistem performans katsayısı (SPK) sistemin kullanılabilir enerji verimliliğini tanımlar, enerjetik ve ekserjetik optimizasyonda önem taşımaktadır. Sistem performans katsayısı sıvı ürünlere göre et ürünlerinde oldukça düşüktür; et ve et ürününün kompozisyonu ve çalışma parametrelerinden doğrudan etkilenmektedir (Icier and Ilicali, 2005b). Kıyma örnekleri için SPK değerleri 0.36-0.48 aralığındadır, bu değer sisteme verilen toplam elektrik enerjisinin % 36-48'inin üründe sıcaklık artışına sebep olan ısı enerjisine dönüştüğünü ifade etmektedir.

2.2. Ohmik Pişirme

Endüstriyel ölçekte et pişirme işlemleri günümüzde, genellikle geleneksel pişirme yöntemlerine dayanmaktadır. Geleneksel pişirme işlemi, uzun işlem süresi ve enerji tüketiminin yoğun olduğu işlemlerdir (Singh, 1986). Hazır yemek sektöründe mikrobiyal bozunmayı önlemek amacıyla köfte örnekleri dondurulmakta ve çözünme-pişirme işlemi birlikte gerçekleştirilmektedir. Pişirme işleminin uzun sürede gerçekleşmiş olması ürünün mikrobiyal açıdan güvenilirliği açısından risk taşımakta, ayrıca yüksek oranda enerji sarfiyatına neden olmaktadır. Üründe duyusal ve besinsel özellikleri için de istenilmeyen özelliklere yol açmaktadır (Goullieux and Pain, 2005).

Endüstriyel ölçekte et işlemedeki sorunlar, üründe besinsel, duyusal ve mikrobiyal özellikler bakımından istenilen ürün eldesi sağlayan alternatif et işleme yöntemlerini gündeme getirmiştir (de Halleux et al., 2005). Fakat gıda maddesinin bileşimini oluşturan öğelerin düşük ısı iletkenliği, elektriksel ısıtma

uygulamalarında sorun oluşturabilmektedir. Özellikle de et ürünlerindeki yağ bileşeninin elektriksel iletkenliği ile kas yapının elektriksel iletkenliğinin farklı olması ile “soğuk bölgeler” pişmiş üründe problemdir (Shirsat et al., 2004a).

Et ürünlerinin homojen olmayan yapısı nedeniyle ohmik ısıtma teknolojisinin et ürünleri düşük asitli gıdalarda pişirme amaçlı kullanımının endüstriyel olarak kullanımını geçiktirmiştir ve bu konudaki çalışmalar halen araştırma aşamasındadır (Piette et al., 2004; İçier ve ark., 2013).

2.2.1. Ohmik Pişirmenin Et Ürünlerinde Kullanımı

Et ürünleri işlemede ohmik pişirme işleminin uygulanabilirliğini inceleyen çalışmalar son yıllarda oldukça artmıştır. Ancak mikrobiyal açıdan güvenilirliğini inceleyen çalışma sayısı oldukça azdır. Ohmik işlemede mikrobiyal inaktivasyonda temel mekanizmanın ısı etki olduğu, ancak elektriksel etkinin olabileceği belirtilmektedir (Cho et al., 1996).

Ozkan et al. (2004) tarafından yapılan çalışmada, hamburger köftelerinin pişirilmesi amacıyla özel olarak geliştirmiş oldukları elektriksel-geleneksel kombine bir sistem (Patent no:WO 02/102215 A1) kullanılmıştır. Bu amaçla maksimum olarak 50 V ve yaklaşık 15 A alternatif akım maksimum değerlerinde çalışabilen ohmik pişirme sistemini, 180 °C’lik yüzey sıcaklığına sahip gril ile kombine etmişlerdir. Böylece geleneksel pişirme işlemine alternatif olarak hamburger köftelerinin daha homojen pişirilmesi sağlanmıştır. Geleneksel ve kombine yöntemle pişirilen hamburgerlerin toplam katı madde, nem ve yağ özellikleri gibi kalite özellikleri arasında fark olmadığı belirtilmiştir.

Shirsat et al. (2004b) et emülsiyonlarını (1 kg) 15 °C’den 75°C’ye farklı voltaj gradyanları (3, 5 ve 7 V/cm) kullanarak ohmik ve buharla pişirme

yöntemleri kullanarak pişirmeyi incelemişlerdir. Teknikler arasındaki farkları tespit etmek için pişmiş ürünlerde su tutma kapasitesi, yapısal ve dielektrik özellikleri incelenmiştir. Buharda pişirilen örneklerin duysal olarak saptanabilecek özellikte nem içeriği yüksek bulunmuş ve bu örneklerin daha yüksek dielektriksel özellikler gösterdikleri rapor edilmiştir. Ayrıca ohmik işlenen ürünlerin daha fazla yapısal bozunma gösterdiğini belirtmişlerdir.

Piette et al. (2004) hazırladıkları et emülsiyonu örneklerini geleneksel ve ohmik pişirme işlemi uygulayarak pişirmiş olup, her iki yöntem arasındaki farklılıkları renk, doku, pH, süzüntü kaybı, ransidite gibi ürün özellikleri açısından incelemişlerdir. Geleneksel yöntemde gerçekleştirdikleri pişirme işleminde buhar kullanmışlardır. İlk aşamada 60 °C’de 1 saat tutulan ürün ikinci aşamada 65 °C’de bir saat tutulmuş olup ardından merkez noktasındaki sıcaklık değeri 70 °C’ye gelene kadar 75 °C’de yaklaşık 1.25 saat bekletmişlerdir. Pişirme işleminin ardından pişmiş ürün soğutma aşamasından geçirilmiştir. Ayrıca başka bir metod olarak örnekler 64, 76 ve 103 V voltaj uygulanarak 3.9, 5.6 ve 10.3°C/dk ısınma hızlarında ohmik işlem uygulanarak merkez noktaları 70 °C’ye gelinceye kadar pişirilmişlerdir. Her iki yöntemle pişirilmiş ürünlerin dokusal özellikleri arasında fark olmadığını, işlem faktörlerinin ürünün kalite özellikleri ve gerekli mikrobiyal inaktivasyonun sağlanması açısından fark oluşturmadığını rapor etmişlerdir.

Wills et al. (2006) biftek örneklerini fırında ve ticari olarak kullanılan ohmik pişirme ünitesinde pişirerek, pişmiş üründe renk, yağ oksidasyonu ve doku özelliklerini incelemişlerdir. Ohmik pişirilmiş biftek örneklerinin fırında pişirilmiş biftek örneklerine göre daha parlak, daha sert, daha çiğnenebilir ve daha iç yapışkanlık özelliğine sahip olduğu, yağ oksidasyonunun ohmik pişirilmiş köfte örneklerinde daha fazla gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Geleneksel ve ohmik pişirme işlemi kombine olarak kullanılmıştır (Ozkan et al., 2004; Gin and Farid, 2007; Liu et al., 2007). Ohmik pişirmenin tek işlem olarak uygulandığı çalışmalar oldukça azdır (Piette et al., 2004; Shirsat et al., 2004a; de Halleux et al., 2005; Bozkurt and Icier, 2009c;d;e). Kombine bir sistemin kullanımının daha kısa sürede homojen sıcaklık dağılımı, daha az doku deformasyonu ve güvenilir ürün

eldesi sağlayabileceği belirtilmektedir (Ozkan et al., 2004; Gin and Farid, 2007; Liu et al., 2007).

Araştırmalarda ohmik pişirme işleminin enerjetik açıdan değerlendirilen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. de Halleux et al. (2005) domuz sosisi örneklerini 20 °C'den 71, 76 veya 81°C'ye kadar 64, 76 ve 103 V uygulayarak ohmik pişirip, işlem etkinliğini enerjetik ve mikrobiyal açıdan incelemişlerdir. Mikrobiyal açıdan güvenli ürün eldesi için pişme zamanının 70-81°C aralığında 10-15 dakika arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Ohmik pişirme sonucu pişme süresinde % 90-95, enerji verimliliğinde % 82-97 kazanç sağlandığı belirtilmiştir.

Ohmik ısıtmada olduğu gibi ohmik pişirme işleminde de sistem için uygun faktörlerin belirlenmesi başarılı ve etkin bir sistem tasarımı için kaçınılmazdır. Ancak bu konuda sınırlı sayıdaki araştırmaların çoğunda, geleneksel ve ohmik pişirme işlemi kombine olarak kullanılmıştır (Ozkan et al., 2004; Gin and Farid, 2007; Liu et al., 2007, Bozkurt, 2009).

2.3. Ohmik İşlemenin Modellenmesi

Ohmik işlemenin matematiksel modellenmesi sistemin karakterizasyonunu sağlamakla beraber endüstriyel uygulamaların tasarımının da temelini oluşturmaktadır. Tamamen güvenli ohmik islenmiş ürün eldesinin ön şartı işlem süresince ısıl işleminin karakterize edilmesidir. Özellikle et işlemede oluşabilecek olası sıcak ve soğuk noktaların öngörülmesi ve kontrolü açısından da, matematiksel modelleme oldukça önemli fayda sağlamaktadır.

Literatürde ohmik işlemenin matematiksel modellenmesine dair yapılan çalışmaların kapsamını genellikle sıvı gıdalar ve bununla birlikte sıvı içerisinde katı parçacık içeren gıda karışımları oluşturmaktadır (Marra et al., 2009).

Ohmik işlemede kurulacak olan matematiksel modelde dikkate alınması gereken birçok bağımsız değişken bulunmaktadır. Bu nedenle oluşturulan matematiksel modellerin çözümünde bilgisayar destekli nümerik yöntemlerden yararlanmak oldukça önem taşımaktadır.

Literatürde ohmik ısıtmanın matematiksel modellenmesinde kullanılan iki önemli yaklaşım vardır. Bunlardan biri Laplace Modeli (de Alwis and Fryer, 1990; 1992a; Zhang and Fryer, 1993) diğeri ise Devre Analojisi (CAMF) modeli olarak karşımıza çıkmaktadır (Sastry and Palaniappan, 1992; Sastry, 1992; Orangi et al., 1998).

de Alwis and Fryer (1990; 1992a) gıdaların ohmik ısıtılması sırasında ısı jenerasyonu ve genel ısı aktarımını analiz etmiştir. Sonlu element yöntemiyle çözerek geliştirmiş oldukları modeli sonucunda statik ohmik ısıtma sisteminde partikül şekli ve yerleşiminin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Aynı zamanda partikül ve sıvıların elektriksel iletkenliklerin farklı olduğu durumlardaki sıcaklık dağılımlarını öngörmüşlerdir. de Alwis and Fryer (1992b) daha önceki çalışmalarında geliştirmiş oldukları model sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar, elektriksel iletkenliği homojen olmayan gıdalara model olması açısından kompozit partiküllerin sıvı içindeki ohmik ısıtılmasını incelemişlerdir. Oldukça yüksek veya düşük elektriksel iletkenliğe sahip katkıların bulunduğu karışımlarda katı-sıvı arasında sıcaklık farkının oluşabileceği belirlenmiştir.

Sastry and Palaniappan (1992) statik bir ohmik ısıtıcıda sıvı- katı karışımlarının ısıtılmasını deneysel ve kuramsal olarak incelemişlerdir. Modelde enerji denklemleri sıvı ve katı için ayrı ayrı yazılmış, pozisyon için üç boyutlu sonlu element yöntemiyle, zaman için sonlu farklar yöntemiyle çözülmüştür. Sistemde var olabilecek birden fazla partikül için devre analojisi oluşturulmuş, sıvı ve partikül dirençleri paralel devrelere benzetilmiştir. Deneysel çalışma kısmında farklı miktarlarda patates küpleri içeren farklı molaritedeki sodyum fosfat çözeltileri kullanılmıştır. Partikül iletkenliği düşük ise, düşük

konsantrasyonlarda partiküllerin sıvıdan daha geç ısındığı tespit edilmiştir. Ancak partikül konsantrasyonu arttıkça, partiküllerden daha fazla akım geçeceği ve dolayısıyla daha hızlı ısınacakları saptanmıştır. Partikül yerleşiminin önemli olduğu, akıma dik yerleştirilen dörtgen kesitli partikülün sıvıdan daha çabuk ısınacağı, akıma paralel olarak yerleştirildiğinde ise ısınmanın sıvı ile katının elektriksel iletkenliğine bağlı olacağı bildirilmiştir.

Sastry (1992) sürekli akışa sahip ohmik ısıtıcılarda sıvı-partikül karışımlarının ısıtılması üzerine modelleme çalışması yapmıştır. Daha önce Sastry and Palaniappan (1992) tarafından geliştirilen model, yüksek partikül konsantrasyonuna sahip karışımların sürekli akış sisteminde ohmik ısıtılması için modifiye edilmiştir. Katı partiküllerin sıvılardan daha hızlı ısındığı öngörülmüştür.

Zaror et al. (1993) ohmik ısıtmanın sterilizasyon amaçlı kullanımı için matematiksel model çalışmasında bulunmuştur. Sürekli akışa sahip ohmik ısıtma ünitesinde katı ve sıvı fazlar için enerji denklemleri ayrı ayrı çözülmüştür. Sterilizasyon bekletme kısmı için de enerji denklemleri boyutsuz forma dönüştürülerek ele alınmıştır. Mikrobiyolojik ölüm oranı, birinci dereceden kinetik ilişki ile ifade edilmiştir. Sıvı fazın 135 °C'ye ulaşması için ohmik ısıtıcıda kalma süresi ve belirlenmiş mikrobiyolojik ölüm oranına ulaşmak için bekletme bölümündeki kalma süreleri (tutma süreleri) model ile hesaplatılmıştır. 160 °C'de doygun buharın kullanıldığı ve toplam ısı transfer katsayısı 3000 W/m²K olan adyabatik sterilizasyon sistemi sonuçlarıyla model sonuçları karşılaştırılmıştır. Partikülün yalıtkan olduğu durum için bile model sonuçlarının daha hızlı ısıtma hızları öngördüğü bulunmuştur.

Fryer et al. (1993) katı-sıvı karışımları üzerine yaptıkları kuramsal çalışmanın sonuçlarını karşılaştırmak için bu çalışmalarında deneysel veriler elde etmişlerdir. Sıvı olarak tuz eklenmiş CMC çözeltileri, yalıtkan katı olarak ahşap parçacıklar kullanmışlardır. Statik test hücresinde sıvı içinde yalıtkan madde

olması durumunu, düşük elektriksel iletkenliğe sahip katı maddelerin ohmik ısıtılmasına ait model sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Modelde katı içinde ısı iletiminin olmadığı ve sıvı içinde oldukça hızlı ısı iletimi ve konveksiyonunun olduğu durumlar için sıcaklık profilleri öngörmüşlerdir.

Sastry and McFate (1993) de katı-sıvı gıda karışımlarının sürekli ohmik ısıtma sistemi ile sterilizasyonunu incelemişlerdir. Karışım içindeki partikül-sıvı oranlarının ve partikül yerleşiminin ısıtma hızına etkisi deneysel ve kuramsal olarak incelenmiştir. Statik ohmik ısıtıcıda, karışım içindeki sıcaklık farkının sıvı kristaller ile ölçülmesi, CMC çözeltilerinin viskozitesinin etkisi ve patateslerin jelleşmesi incelemiştir. Sürekli ohmik ısıtıcıda ise, tuz eklenmiş Na-CMC jelleri ile agar jel küpleri materyal olarak kullanılmıştır. Geliştirilen modelin deneysel sonuçlara çok yakın sıcaklık profili öngördüğü belirtilmiştir. Bazı koşullarda modelin daha düşük sıcaklıklar öngörmesinin nedeni olarak sıvı-partikül konvektif ısı transferi varsayımları olduğunun düşünüldüğü rapor edilmiştir. Ayrıca viskozitenin artısının elektriksel iletkenliği değiştirmediği ancak katı-sıvı faz dağılımını önlediği ve daha homojen ısıtma sağlamaya yardımcı olduğu vurgulanmıştır. Karışım gıdalarda viskozitesi yüksek sıvıların kullanımının, geleneksel ısıtma sistemlerinin tersine ohmik ısıtmada avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Quarini (1995) ohmik ısıtma kolonunun termo-hidrolik özelliklerini incelemiş ve matematiksel model geliştirmiştir. Momentum ve ısı denkliklerini eşzamanlı çözmüştür. Sıvıların ohmik ısıtılması sırasında, kolon içi hız dağılımının sıcaklık profili üzerinde etkili olduğu ve kolon duvarlarının soğutulmasının homojen sıcaklık profili sağlamaya yararı olduğu belirtilmiştir. Hacimsel ısı jenerasyon hızı sıcaklığın doğrusal fonksiyonu olarak yazılmış ve yüksek sıcaklık bölgelerinde düşük sıcaklık bölgelerinden daha fazla ısı jenerasyonu olduğu vurgulanmıştır.

Fryer (1995) katı-sıvı karışımlarının ohmik ısıtma ile ısıtılması konusunda yaptıkları tüm kuramsal çalışmaları derlemiş ve karşılaştırmalı olarak vermiştir. Zhang and Fryer (1995) katı-sıvı karışımlarında ısı jenerasyonunun farklı öngörüldüğü iki çalışmanın sonuçlarını karşılaştırmıştır. Zhang and Fryer (1993)'deki Laplace denklemi öngörülleri ile Sastry (1992)'deki devre analojisi öngörülleri incelemiştir. Düşük katı oranlarında devre analojisinin ısıtma hızını doğru öngörmediği belirtilmiştir.

Sastry and Salengke (1998) de Zhang and Fryer (1995)'de olduğu gibi daha önceden geliştirilmiş olan Laplace denklemi yaklaşımı (Zhang and Fryer, 1993) ve devre analojisi yaklaşımını (Sastry,1992) karşılaştırmıştır. Katı-sıvı karışımlarında olabilecek en kötü ısıtma koşullarının sıvı ve katının birbirlerinin ısınmasını engellemesi olduğu belirtilmiş, “en yavaş ısınan bölge” tanımlaması yapılmıştır. Devre analojisinde iyi karışmış akışkan varsayımının olmasına rağmen, Laplace denklemi yaklaşımında konvektif etkilerin dikkate alınmadığı vurgulanmıştır. Katı ve sıvı elektriksel iletkenliklerinin aynı olduğu durumlarda, her iki model yaklaşım öngörülleri ve analitik çözüm sonuçları birbirine yakın saptanmıştır. Devre analojisinin, sıvıdan daha düşük elektriksel iletkenliğe sahip katı madde olması koşulunda, deneysel verilere Laplace denkleminin konvektif etkiyi ihmal ettiği durumdan daha yakın sonuçlar öngördüğü saptanmıştır. Katının sıvıdan daha yüksek iletkenliğe sahip olduğu durumlarda da Laplace yaklaşımının deneysel verilere devre analojisi yaklaşımından daha yakın öngörülerde bulunduğu belirlenmiştir. Her iki model, pratik kullanımı, deneysel sonuçlara yakınlıkları ve hesaplama zamanları açısından karşılaştırılmıştır.

Fu and Hsieh (1999) statik ohmik ısıtma ünitesinde iki boyutlu sıcaklık dağılımını incelemiştir. ANSYS sonlu element paket programı kullanılarak, dörtgen kesitli ohmik ısıtma sisteminde partikül-sıvı sıcaklık profili öngörülmüştür. Dörtgen kesitli patates partiküllerinin merkez noktalarının en soğuk nokta olduğu ve hücre içinde sıcaklık gradyanının olduğu belirlenmiştir. Matematiksel modelde öngörülen sıcaklık değerlerinin deneysel sonuçlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık gradyanının ise deneysel olarak daha

yüksek ölçüldüğü, aradaki farkın dış ortama olan ısı kayıplarından kaynaklandığı vurgulanmıştır. Ohmik ısıtma test hücresinin üst yüzeyinin açık olması nedeniyle partiküllerin yüzeyinde kısmi kurumanın olabileceği, bunun da sıcaklık ölçümlerini etkileyebileceği belirtilmiştir. Ek olarak, elektriksel iletkenliği yüksek olan katıdan daha fazla akım geçeceği, sıvının daha az ısınacağı belirtilmiştir.

Katı gıda maddelerinin sahip oldukları düzensiz geometri, ısı denkliklerinin çözümünde karşılaşılan zorluklardan birisidir (Erdogdu et al., 1998a;b). Bu bağlamda literatürde düzensiz geometriler için sonlu farklar yöntemin kullanılarak ısı denkliğini çözen çalışmalar bulunmaktadır (Manson et al., 1974; Simpson et al., 1989; Califano and Zaritzky, 1993; Sheen et al., 1993; Akterian and Fikiin, 1994; Kim and Teixeira, 1997; Erdogan et al., 2003). Bu çalışmalardan Erdogan et al. (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kontrol element yaklaşımıyla eliptik geometrideki ürünün ısı denkliği güç eğrileri kullanılarak çözülmüştür. Bu çalışmanın özelliği belirledikleri sınır koşulları ile ürünün ısısal işlem süresince iç ve dış yüzeyi arasındaki termofiziksel homojensizlikleri dikkate almış olmalarıdır.

Gıda maddelerinin pişirme işlemini matematiksel modellerle karakterize edebilmek bazı zorluklar içermektedir. İşlem süresince ürünün yapısında meydana gelen kabuk oluşumu, protein denatürasyonu, su salınımı, ısıtıcı yüzeye yapışma vb. gibi birçok değişim genellikle ihmal edilmektedir (Dagerskog et al., 1978; Lawrie, 1991).

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda da Zorrilla and Singh (2000a;b; Zorrilla et al., 2003) köfte örneklerinin pişirilmesi işlemi için etkili her bir parametrenin değişken olarak dikkate alınmasının ve sistemdeki tüm mekanizmaları modele dahil etmenin denklemin çözümünü zorlaştırmakla birlikte, model uyumluluğunda çok da önemli düzeyde artışa neden olmadığını belirtmişlerdir. Uyumlu bir model için gerekli olan sistemi karakterize edebilecek fiziksel koşulların çok iyi saptanması ve bu durumların başlangıç ve sınır koşulu olarak modele dahil edilmesidir.

Bozkurt and Icier (2009c), yapmış oldukları çalışmada, yağsız kıyma (2%) örneklerinin 20 V/cm voltaj gradyanında ohmik pişirilmesi işleminin matematiksel modellenmesini farklı sınır koşulları ile incelemiş olup, ohmik pişirme işleminin matematiksel modellenmesinde konvektif sınır koşulunun dikkate alınmasının önemini vurgulamışlardır.

Ohmik işlemin katı gıda örneklerinde pişirme amaçlı kullanımı araştırmacıların son yıllarda ilgilenmeye başladığı konulardan birisidir. Sistem uygunluğunun belirlenmesinin ardından matematiksel modelleme ile ilgili gerçekleştirilecek çalışmaların gelecek yıllarda artacağı düşünülmektedir. Marra et al. (2009) katı gıdalarda ohmik işleme sırasında meydana gelen ısı transferini incelemişlerdir. Homojen bir yapıya sahip oluşu ve termofiziksel özelliklerinin daha önceki çalışmalarda tanımlanmış olmasından dolayı örnek olarak rekonstitute patates tozunu kullanmışlardır. Statik sistemde sabit voltajda gerçekleştirilen ısıtma işlemini modellemek amacıyla ürünün termofiziksel özelliklerini sıcaklığın fonksiyonu olarak dikkate alıp, iki boyutlu silindirik düzlemde gerçekleşen kararsız hal ısı transferini nümerik olarak sonlu element yöntemiyle çözmüşlerdir. FEMLAB 3.1 Paket programını (Comsol AB, Stockholm, Sweeden) kullanarak elde ettikleri çözümleri deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Model verileri ile deneysel veriler arasında uyumluluk gözlenirken, test hücresi yüzeyi ve elektrot yüzeyinde meydana gelen ısı kayıplarının daha detaylı incelenmesinin model uyumluluğunu arttıracaklarını öngörmüşlerdir.

2.4. Ohmik İşlemede Enerji

Son yıllarda araştırmacıların ve politikacıların önem verdiği konuların başında enerji gelmektedir. Günümüzde enerjinin üretiminde kullanılan başlıca kaynak olan fosil yakıt nedeniyle oluşan enerji kıtlığı ve çevre kirliliği tehlikesinin çözümü olarak alternatif enerji kaynakları, özellikle de yenilenebilir enerji kaynakları önerilmektedir. Bu konuda yapılan araştırmalar ve geliştirilen sistemlerle önemli yol katedilmiş olmakla birlikte, halen yüksek kurulum

masrafları sorunu aşılammamıştır. Araştırmaların odaklandığı bir diğer eksen ise asıl olarak çözümün “ENERJİ TÜKETMEMEK” değil, tüketilen enerjinin ve var olan sistemlerin verimliliğinin yükseltilmesinin gerekliliğidir. Bu şekilde hem enerji kaynaklarının tükenmesi geciktirilmekte, hem de çevreye verdikleri zarar azaltılmaktadır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmalar ile enerji masrafları azaltılabildiği gibi, geliştirilen sistemlerin kurulum masrafları da yüksek olmadığından uygulanabilirliğinin yüksek olduğu görülmektedir (Bozkurt, 2009).

Bu çerçevede yapılan çalışmalardaki en etkin araçlardan birisi olarak son yıllarda ekserji analizi öne çıkmıştır. Mevcut işlemlerin, ekipmanların ve sistemlerin verimsizliklerinin belirlenmesinde ve düzeltilme olanaklarının ortaya çıkarılmasında önemli avantajlar sağlayan ekserji analizi, aynı zamanda tasarım ve optimizasyonda da başarılı şekilde kullanılabilir (Dinçer ve Şahin, 2004). Termodinamik bakış açısından ekserji; bir referans çevreyle denge haline gelirken, bir sistem ya da madde veya enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktardaki ıstır. Yani ekserji, referans çevreye göre tamamen kararlı dengede olmamanın sonucu olarak, değişime neden olan akış ya da sistemin potansiyelinin ölçüsüdür. Prosesle ilgili tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropiye orantılı olarak ekserji tüketilir. Bu özellikleriyle termodinamiğin 2.yasasını da kullanarak yapılan ekserji analizleri, enerji analizlerinden çok daha somut ve pratiğe uygulanabilir sonuçlar vermektedir (Cengel et al., 2002).

Ohmik pişirme teknolojisinin önemli avantajlarından birisi de geleneksel yöntemlere nazaran daha az enerji tüketimi ile pişirme sağlayabilme potansiyelidir. Ohmik pişirmenin geleneksel yöntemlerle kombinasyonun yanı sıra daha verimli ve hızlı yeni alternatif teknolojilerle kombinasyonu konusu incelenmemiştir. Diğer yandan, ohmik veya kombinasyon oluşturduğu pişirme sistemlerinin geliştirilmesi, enerjetik ve ekserjetik açıdan değerlendirilmesi oldukça önemlidir.

2.5. Gıda İşlemede Ekserji

Ülkemizde tüketilen enerjinin büyük bölümü termal sistemlerde harcanmaktadır. Tersinmezlikler, enerji dönüşümü sırasında oluşan düzensizliklerden dolayı meydana gelmektedir. İç enerji, ısı enerjisi ve kimyasal enerji düzensizliklerin çok olduğu enerji türleridir. Bu enerjilerin dönüşümü sırasında, enerjinin önemli bir kısmı tersinmezliklere, yani kullanılmayan enerji olarak harcanmaktadır. Gıda işleme işlemleri, bu enerjilerin bütününe kapsadığından bu işlemler süresince büyük boyutta tersinmezlikler meydana gelmektedir. Bunun için gıda işlemede enerjinin kullanılabilirliği, yani ekserji analizi oldukça önem arz etmektedir. Gıda işlemede geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen pişirme işlemleri uzun pişirme sürelerine sahip ve enerji tüketiminin yoğun olduğu ısısal işlemlerdir. Özellikle sanayide kullanılan enerjinin büyük bir kısmı pişirme amaçlı ısısal işlemlerde kullanılırken, kullanılan bu enerjilerin ısı verimlilikleri ise çok yüksek değildir. Enerji tasarrufu ve nitelikli enerji kullanımına dair pişirme işlem etkinliğinin değerlendirilebilmesi ve iyileştirme yapılabilmesi amacıyla ekserji analizleri gerçekleştirilmektedir.

Literatürde ekserji uygulamalarına dair yapılan oldukça fazla çalışma olmasına karşın, özgün bir alan olarak gıda işlemede ekserji uygulamaları çalışmaları oldukça sınırlı kalmıştır. Ekserji analizinin gıda işlemlerine uygulamasında ise öncelikle enerjinin yoğun tüketildiği işlemler öne çıkmıştır. Bu kapsamda gıda işlemlerini ekserjetik açıdan değerlendiren ilk çalışma Fang et al. (1995)'e aittir. Süt işlemede kullanılan ekipmanların enerji kullanımı inceledikleri çalışmalarında, enerji verimliliğin arttırılabilmesi için homojenizatördeki basınç düşüşünün minimize ve ısı değiştiricideki ısı transfer katsayısının da maksimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Tekin and Bayramoglu (1998) şeker üretim hattı ve ham meyve suyu üretim hatlarının ekserjetik performans değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Her bir sistem için difüzyon sıcaklığının, başlangıç buhar basıncının ve kaynama ünitesinin etkinliğinin ekserji kayıplarının oluşumunda etkili olduğunu belirtmişlerdir. İlgili sistemlerin belirtilen bu

kısımlarında yapılacak bir optimizasyon çalışması ile ekserji kaybının % 4.21 azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Syahrul et al. (2003) mısır ve buğdayın akışkan yatak kurutucu sisteminde kurutulması işleminin ekserjetik analizini yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada hava giriş sıcaklığı, akışkanlaşma hızı ve başlangıç nem içeriği değerlerinin enerji ve ekserji verimliliğine etkisini değerlendirmişlerdir. Başlangıç nem içeriği değeri arttıkça ekserji veriminin arttığını ve bunun yanında da partikül büyüklüğüne göre de hava hızı etkisinin değiştiğini rapor etmişlerdir.

Taprap and Phutthame (2001) Tayland'da kurulu bulunan bir konserve üretim fabrikasını enerjetik ve ekserjetik açıdan değerlendirmişlerdir. Enerjetik ve ekserjetik değerlendirmeyi kaynama ünitesi, gaz ünitesi, salamura ünitesi ve bekletme ünitesi gibi seçmiş oldukları dört ana ünite de gerçekleştirmişlerdir. Ekserjetik açıdan en verimli ünite gaz ünitesi (% 33.64) iken kaynama ünitesinin ise ekserjetik açıdan en verimsiz ünite (% 12.1) ünite olduğunu rapor etmişlerdir.

Midilli and Kucuk (2003) güneş enerjisi ile ısıtılan bir kurutucu kabinde fıstık kurutulmasını ekserji analizi ile incelemişlerdir. Bu amaçla 40-60°C sıcaklık aralığında 1.23 m/s hava hızında gerçekleştirilen kurutma işleminde enerji kaybının 0.15-0.38 kJ/kg olduğunu rapor etmişlerdir. Enerji kullanımının en az olduğu bölgenin enerji kaybının en yoğun gözlemlendiği bölge olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte sistemin ekserji giriş ve ekserji kayıp değerlerini zamana bağlı karakterize etmişlerdir.

Dincer and Sahin (2004) sıcak hava ile kurutma prosesinin ekserjetik modellemesini yapmışlardır. Ekserji verimliliğini kütle ve enerji transferi parametreleri cinsinden türetmişlerdir. Geliştirmiş oldukları modelin uygunluğunu tespit etmek amacıyla farklı kurutma sıcaklıklarında denemeler gerçekleştirmişler ve sonuçları karşılaştırmışlardır.

Akpınar et al. (2005a) bir tepsili kurutucu sistemde 60-80°C sıcaklık aralığında ve 1-1.5 m/s hava hızı aralığında dilimlenmiş patateslerin kurutulması işlemini ekserjetik açıdan incelemiş ve ekserji kayıplarının çeşidini ve şiddetini belirlemeyi amaçlamışlardır. Ekserji kayıplarının birinci ve ikinci tepside artan sıcaklık ve hava hızı değerleriyle beraber arttığını bulgulamışlardır. Kurutucu sistemde elde edilen maksimum ekserji girişi değerinin ise 22 kW olduğunu belirtmişlerdir. Akpınar et al. (2005b) yapmış oldukları bir diğer çalışmada elma dilimlerinin kurutulması işleminde zamanla ekserji değişimini belirleyerek sistem performansını değerlendirmişlerdir. Kurutma koşullarına göre sistem performansının % 41-64 aralığında değiştiğini belirtmişlerdir.

Balkan et al. (2005) üç etkili bir buharlaştırıcıda gıda ürünlerinden suyun uzaklaştırılması işlemini ekserjetik açıdan incelemişlerdir. Dincer et al. (2005) Suudi Arabistan'daki zirai sektörün 12 yılı kapsayan bir süreçteki enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Genel olarak sektördeki ekserji verimliliklerinin (69.20-74.19 %) ilgili enerji verimlilik değerlerinden (% 74.60-74.94) daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Apaiah et al. (2006) kıyılmış domuz eti, kurutulmuş bezelye ve bezelye çorbası kullanarak geliştirilen yeni bir gıda proteininin gıda zincirinde taşınması işlemini ekserjetik açıdan değerlendirmişlerdir. Ducoulombier et al. (2006) gıdaların tepsili tünellerde derinde dondurulması işleminde ekserji gücü ve spesifik yıkım ekserjisi değerlerini incelemişlerdir. Ekserji değerlendirilmesinde gıdanın kütleli akış hızının da hesaba katılmasının gerekliliğini belirtmişlerdir.

Hancıoğlu ve Hepbaşlı (2007) ise toprak kaynaklı bir ısı pompası ile defne yaprağının kurutulmasını ekserjetik açıdan incelemişlerdir. Colak and Hepbaşlı (2007) ise tepsili kurutucuda ince tabaka prensibiyle, 40, 50, 60 ve 70 °C'de yeşil zeytini kurutmuşlar ve sistemin ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmada kurutucu kabin yüzey sıcaklığı ile kurutma havası sıcaklıklarının ekserji verimliliğine etkisi belirlenmiştir.

Liu et al. (2008) ise Bruttini et al. (2001)'un dondurarak kurutmanın dondurma aşaması için önerdikleri ekserji modelini, her bir aşaması için geliştirerek dondurarak kurutma işleminin tamamının ekserjetik modellemesini tamamlamışlardır.

Bozkurt and Icier (2009b) yapmış oldukları çalışmalarında, farklı yağ içeriğine sahip kıyma örneklerinin ohmik pişirilmesi işleminin ekserjetik optimizasyonunu incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, artan yağ içeriği ile birlikte sistemin ekserjetik verimliliğinde bir azalma olduğunu bulgulamışlardır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışmada ülkemizde yaygın olarak tüketilen bir et ürünü olan köfte seçilmiştir. Köftenin endüstriyel üretiminde hızlı ve homojen olarak alternatif bir yöntem olan ohmik pişirmenin, seçilen parametrelerde incelenmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda, uygulanan yöntemin benzer ürünler ile yapılacak çalışmalara da veri sağlayacağı düşünülmektedir.

3.1. Malzeme

Yağın elektriksel iletkenlik değerinin etten farklı olmasından dolayı köfte formülasyonunda yağlılık oranı çok düşük olan ölüm sertliğini tamamlamış dana karkaslarının nuar kısmı kullanılmıştır. Kullanılan dana eti Burdur Güçbirliği A.Ş. tarafından temin edilmiştir.

Ölüm sertliğini tamamlamış olan etler soğuk zincir ile Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Elektriksel İşlemler Laboratuvarı'na getirilmiştir. Gelen etler 200-500 gramlık parçalara ayrılmış ve kullanılıncaya kadar dondurucuda (-18 °C) muhafaza edilmiştir. Hazırlanma aşamasında ise dondurulmuş parçalar buzdolabında +4 °C'de 24 saatte çözündürülmüştür. Çözündürülen parçalar 3 mm delik çaplı ayna kullanılarak, kıyma makinesi (Tefal, Türkiye) ile kıyılmıştır.

Köfte örneğinin hazırlanmasında, TÜBİTAK 110 O 068 No'lu ve "Ohmik-kızılötesi ısıtma sisteminin kurulumu, performans değerlendirmesi ve köfte pişirilmesinde kullanımının bazı kalite özelliklerine etkisinin incelenmesi" başlıklı araştırma projesinde geliştirilen formülasyon kullanılmıştır. Köfte hamuru ürün bileşimi ise şu şekildedir;

- a. Tuz (%0.5w/w)
- b. Soğan tozu (%1 w/w)
- c. Sodyum karbonat (%0.5 w/w)
- d. Saf su (%2 v/w)

Köfte hamuru belirlenen bileşenlerle yoğurulup, 1 saat bozdolabında dinlendirilmiştir. Ardından, 0.0254 m çap ve 0.05 m uzunluğunda özel pyrex cam kalıp kullanılarak silindir olacak şekilde şekillendirilmiştir. Şekillendirilmiş köfte örneklerinin pişme işlemi öncesi kimyasal kompozisyonu belirlenmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Pişirme işlemi öncesi hazırlanan köfte hamurunun kimyasal kompozisyonu ve bazı özellikleri

Özellik	Değer
Su içeriği (%)	75.85±0.43
Protein (%)	19.85±0.45
Yağ (%)	2.345±0.45
Kül (%)	1.55±0.13
pH	6.47±0.29

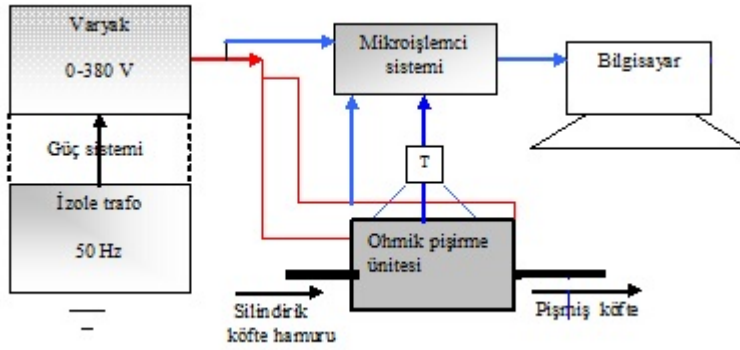
Şekillendirilmiş köfte hamuru (20 °C) sürekli sistem ohmik pişirme ünitesi yardımı ile pişirilmiştir. Merkez sıcaklığının 75°C'ye ulaşması kriter olarak alınmıştır. 3.2 numaralı bölümde uygulanan deneysel ve kuramsal metotlar, kullanılan sistemler ve işlem koşulları ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Sürekli sistem ohmik pişirme ünitesi

TÜBİTAK 107 O 898 no'lu Hızlı Destek projesi kapsamında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Pilot tesisinde kurulmuş olan pilot ölçekli sürekli sistem ohmik pişirme ünitesi, TÜBİTAK 110

O 068 nolu proje kapsamında modifiye edilmiştir. Ohmik pişirme sistemi sürekli modda çalışabilmekte olup, izole trafo, varyak (0-380 V, 10 A, 50 Hz), mikroişlemci, pişirme ünitesi ve bilgisayar bağlantısından oluşmaktadır (Çizelge 3.2).



Şekil 3.1. Pilot ölçekli sürekli sistem ohmik pişirme ünitesinin şematik gösterimi

3.2.2. Ohmik pişirme yöntemi

İşlem öncesi silindirik şekil verilen ($D=0.0254$ m ve $L=0.05$ m) köfte örnekleri bant üzerinde birbirine paralel iki elektrot arasına temas sağlanacak şekilde yerleştirilmiştir.

Tüm pişirme işlemleri 50 Hz’de, 0.02 m/s bant hızında, 15, 20 veya 25 V/cm voltaj gradyanı değerlerinde ve 0.05 m sabit elektrot arası açıklığında gerçekleştirilmiştir.

Silindirik şekil verilen köfte örnekleri farklı voltaj gradyanlarında merkez noktası 20 °C’den 75 °C’ye gelinceye kadar ohmik pişirilmiştir. Ohmik pişirme sırasında üründe hızlı bir şekilde oluşan jenerasyonun köftede meydana getirdiği şekil bozukluklarını azaltmak için örneğin merkez sıcaklığı 60 °C’ye gelmeden

(~55 °C) işlem kesilip 10 s bekledikten sonra merkez sıcaklığı 75 °C'ye gelinceye kadar işleme devam edilmiştir.

Piştirme süresince 1 saniye birim zaman aralığında, örnekten geçen voltaj ve akım değerleri, örneğin merkez ve yüzey noktaları sıcaklıkları, sistemin elektrot ve bant yüzeyindeki sıcaklık değerleri özel tasarım mikroişlemci yardımı ile USB bağlantısı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Piştirme işlemi belirtilen koşullarda (15, 20, 25 V/cm) 20 tekerrür, analizler ise 3 paralel olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.3. Piştirme süresinin tespiti

Bu çalışmada örneklerin merkez sıcaklıklarının 20 °C'den 75 °C sıcaklığa ulaşması için gerekli olan süre 'piştirme süresi' olarak belirlenmiştir.

3.2.4 Sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi

Sürekli sistem ohmik piştirme işlemi süresince örneğin sıcaklık dağılımını belirlemek amacıyla temaslı ve temassız sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ohmik piştirme işlemi süresince zamana bağlı sıcaklık değişimini belirlemek amacıyla örneklerin merkez noktalarına Teflon-PEF kaplı sıcaklık sensörleri (Omega End. Inc., Stanford, CT) yerleştirilmiş olup sıcaklık değerleri mikroişlemci yardımıyla kaydedilmiştir.

Teflon-PEF kaplı sıcaklık sensörleri yardımı ile işlem süresince örneğin merkez ve yüzey noktalarından, sistemin ise bant ve elektrot yüzeylerinden temaslı olarak sıcaklık ölçümleri alınmış ve mikroişlemci yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır.

İşlem süresince pilot çaptaki ohmik pişirme sisteminde köfte örneklerinden elde edilen yüzey kesitlerinin termal kamera (Testo 880-3, Almanya) görüntüleri, cihaza ait görüntü işleme paket programı kullanılarak işlenmiş ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Pişirme sonrasında hızla (10 s içinde), bistüri kullanılarak, örneklerin merkez bölgesi de görüntülenecek şekilde radyal eksene dik kesit alınmış ve kesitteki sıcaklık dağılımı termal kamera ile tespit edilmiştir. Termal görüntülerin alındığı pişirme aşamaları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Temaslı sıcaklık ölçerler kullanılarak belirlenen sıcaklık dağılımları ile termal kamera ile alınan sıcaklık dağılımları karşılaştırılmış, alınan ölçümler arasındaki % fark hesaplanmıştır. Termal kamera ölçümleri ile ohmik pişirme işlemi sırasında örneklerin sıcaklığını görüntüleyebilme özelliği belirlenmiştir. Sıcaklık ölçüm sonuçları temaslı sıcaklık ölçümleri, temassız sıcaklık ölçümleri ve temaslı-temassız sıcaklık ölçüm uyumu olarak ilerleyen bölümlerde (Bölüm 4.3.) ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Çizelge 3.2. Termal görüntülerin alındığı pişirme aşamaları

Termal görüntülerin alındığı pişirme aşaması	Sıcaklık ölçüm noktası adlandırma
Ohmik pişirme işleminin başlangıcındaki dış yüzey görüntüsü	İlk görüntü
60 °C’den önce işlem kesildiği sıradaki dış yüzey görüntüsü	Ara kademe ölçümü
Ohmik pişirme işlemi sonundaki dış yüzey görüntüsü	Son görüntü
Ohmik pişirme işlemi sonrasında 10 s içinde kesilerek alınan merkez görüntüsü	Kesim sonrası görüntü

3.2.5. Hammaddeye ve Ürüne Uygulanan Fiziksel ve Kimyasal Analizler

3.2.5.1. Ağırlık ölçümü

Köfte örneklerinin pişme sonrası ağırlık değişimini tespit etmek amacı ile ohmik pişirme işlemi öncesi ve sonrası ağırlık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkta meydana gelen değişimlerin tespitinde hassas terazi (Sartorius, USA) kullanılmıştır. Ağırlık değişimi alınan ölçümlere göre yüzde olarak Denklem (1)'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır (Murphy et al., 1975).

$$\text{Ağırlık değişimi(\%)} = \left[\frac{\text{Pişme öncesi ağırlık} - \text{Pişme sonrası ağırlık}}{\text{Pişme öncesi ağırlık}} \right] \times 100 \quad (1)$$

3.2.5.2. Boyut Ölçümü

Sürekli sistem ohmik pişirme işlemi uygulanan köfte örneklerinin şeklinde meydana gelen değişimi tespit etmek amacıyla pişme öncesi ve pişme sonrasında ölçüm alınmıştır. Boyut değişimini tespit etmek amacı ile örneklerin boyundan ve çapın 3 farklı noktasından (silindir şeklindeki köftenin her iki ucundan ve ortasından) dijital kumpasla (Mitutoyo, Japan) yardımıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Boyut değişimi alınan ölçümlere göre Denklem (2) ve (3)'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır (Murphy et al., 1975).

$$\text{Uzunluk değişimi(\%)} = \left[\frac{\text{Pişme öncesi uzunluk} - \text{Pişme sonrası uzunluk}}{\text{Pişme öncesi uzunluk}} \right] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Çap değişimi(\%)} = \left[\frac{\text{Pişme öncesi ortalama çap} - \text{Pişme sonrası ortalama çap}}{\text{Pişme öncesi ortalama çap}} \right] \times 100 \quad (3)$$

3.2.5.3. Ürün kompozisyon analizleri

Köfte örneklerinin kompozisyonunu belirlemek amacıyla, hammaddede ve pişmiş üründe nem ve kül tayinleri AOAC (1990)'a, protein tayini Anon (1979)'a göre yapılmıştır. Yağ tayini, kloroform-metanol ekstraksiyonu prensibine dayanan Flynn and Bramblett (1975) tarafından uygulanan yönteme göre gerçekleştirilmiştir.

3.2.6. Elektriksel iletkenlik tespiti

Köfte örneklerin elektriksel iletkenlik değerlerinin pişme sırasında sıcaklıkla değişimi özel tasarım mikroişlemci ile pişirme işlemi sırasında kaydedilen sıcaklık, akım ve voltaj değerlerinin işlenmesi suretiyle belirlenmiştir.

Ohmik pişirme test hücresinin “hücre sabiti, K_c ” teriminin de dikkate alınması ile Eşitlik 4 ve 5 kullanılarak elektriksel iletkenlik değeri (σ) hesaplanabilir;

$$K_c = \frac{L}{A_e} \quad (1/m^2) \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{I}{V} \frac{L}{A_e} \quad (S/m) \quad (5)$$

3.2.7. Kuramsal çalışma

Sürekli sistem ohmik pişirme işleminde yapılan pişirme işlemleri sırasında alınan veriler ile sürekli sistem ohmik pişirme işleminin sıcaklık dağılımları üzerine etkileri, enerjetik ve ekserjetik performans değerlendirmesi gerçekleştirilerek sistemin geliştirme potansiyeli (IP) belirlenmiştir. Ohmik

pişirme işlem koşullarının etkisi kuramsal olarak da incelenip, öngörülen sıcaklık dağılımları ile deneysel sıcaklık dağılımları karşılaştırılmıştır. Elektriksel iletkenlik değerinin sıcaklıkla değişimini ifade eden farklı ampirik modellerin sıcaklık öngörülerini üzerine etkisi irdelenmiştir.

3.2.7.1. Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesi

Köfte örneklerinin farklı voltaj gradyanlarındaki elektriksel iletkenlik değerlerinin değişimi Çizelge 3.3’de verilen farklı ampirik modeller ile incelenmiştir. Sıcaklığın ve voltaj gradyanının elektriksel iletkenlik değeri üzerine etkisi kullanılan modellere göre doğrusal veya doğrusal olmayan regresyon analizleri ile değerlendirilmiştir. Model öngörülerini ile deneysel değerler arasındaki fark istatistiksel olarak belirlenmiştir.

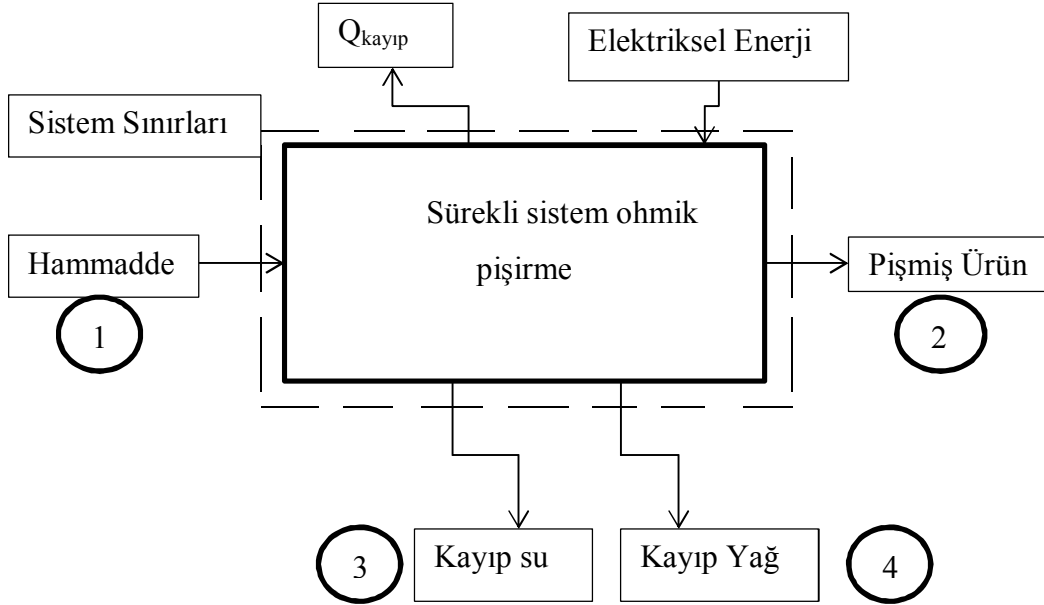
Çizelge 3.3. Elektriksel iletkenlik değişiminde kullanılan ampirik modeller.

Eİ Model No	Eşitlik	Eşitlik No
Model 1	$\sigma = A + BT$	(6)
Model 2	$\sigma = A(\Delta V) + BT + C$	(7)
Model 3	$\sigma = A(\Delta V)^{N1} + BT^{N2} + C$	(8)

3.2.7.2. Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin enerjetik ve ekserjetik performans değerlendirmesi

Sistemin performans analizi için kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denkliklerinden yararlanılır. Ohmik pişirme işlemi süresince diğer geleneksel pişirme işlemlerinden farklı olarak homojen ısı oluşumu vardır. Sistemde oluşan bu ısı iletimle ürün içerisinde dağılırken pişirme ortamı ilede arasında ısı kaybı

söz konusudur. Ekserji analizinin uygulanması amacıyla öncelikle kütle ve enerji denklıkları kurulmuş ardından entropi ve ekserji denklıkları incelenmiştir. Ekserjetik performans katsayılarının tespiti sayesinde ohmik pişirmenin ekserjetik verimliliği ve performans değerlendirmesi yapılabilmektedir. İncelenen sistem Şekil 3.2’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.2. Sürekli sistem ohmik pişirme işlemi incelenen sistemin şematik gösterimi

A) Kütle denklıkları

Pişirme işlemindeki genel kütle korunumu, kontrol hacimde her bir zaman dilimi baz alarak incelenmiştir (Eşitlik (9)). Pişme işlemi süresince ayrılan su buharı ve yağın uzaklaşma miktarı dikkate alınmış, bu miktar pişme öncesi ve sonrasında yapılan kompozisyon analizleri ile belirlenmiştir (Eşitlik (10)).

$$\sum \dot{m}_{giriş} = \sum \dot{m}_{çıkış} \quad (9)$$

$$(\dot{m}_{hm})_1 = (\dot{m}_{\ddot{u}})_2 + (\dot{m}_{kysu})_3 + (\dot{m}_{kyyağ})_4 \quad (10)$$

B) Enerji denklikleri

Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin enerjetik performans değerlendirmesini karakterize etmek için sistemdeki genel enerji denklığı Eşitlik (11)'de verildiği şekilde dikkate alınmıştır (Bozkurt ve İçier, 2010).

$$\sum E_{giren} = \sum E_{çıkan} \quad (11)$$

Sisteme elektrik enerjisinin sağladığı ısı ve ohmik pişirme süresince kaybolan ısı dikkate alındığında genel enerji denklığı Eşitlik (12)'deki gibi düzenlenebilir.

$$\sum E_{giren} + W_{elektrik} = \sum E_{çıkan} + Q_{kayıp} \quad (12)$$

Elektriksel işlem süresince sisteme verilen toplam enerji Eşitlik 13'de ifade edildiği gibidir.

$$W_{elektrik} = \sum VIt \quad (13)$$

Elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü % 99 olarak düşünüldüğünde (Eşitlik 14);

$$Q_{verilen} = 0.99 \times W_{verilen} \quad (14)$$

Sistemde meydana gelen enerji kaybı Eşitlik 15'da gösterildiği şekilde dikkate alınabilir.

$$Q_{kayıp} = Q_{verilen} + (m_{hm})(h_{hm})_1 - (m_{\ddot{u}})(h_{\ddot{u}})_2 \quad (15)$$

Bütün enerji terimleri dikkate alındığında enerji denkliği Eşitlik (16) deki formda yazılabilir.

$$(m_{hm})(h_{hm})_1 + Q_{verilen} = (m_{\ddot{u}})(h_{\ddot{u}})_2 + (m_{kysu})(h_{kysu})_3 + (m_{kyyağ})(h_{kyyağ})_4 + Q_{ky} \quad (16)$$

Köfte hamurunun enerjisi pişme öncesinde belinen herhangi bir sıcaklıkta Eşitlik (17) yardımı ile; ürünün, kayıp suyun ve kayıp yağın enerjisi ise Eşitlik (18)-(20) ile hesaplanmıştır.

$$(h_{hm})_1 = (Cp_{hm})_1(T_{hm})_1 \quad (17)$$

$$(h_{\ddot{u}})_2 = (Cp_{\ddot{u}})_2(T_{\ddot{u}})_2 \quad (18)$$

$$(h_{kysu})_3 = (Cp_{kysu})_3(T_{kysu})_3 \quad (19)$$

$$(h_{kyyağ})_4 = (Cp_{kyyağ})_4(T_{kyyağ})_4 \quad (20)$$

Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin enerji verimliği (η) Eşitlik (21) ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{enerji}(\%) = \frac{(m_{\ddot{u}})(h_{\ddot{u}})}{(m_{hm})(h_{hm}) + Q_{verilen}} \quad (21)$$

C) Entropi denklilikleri

Sistemdeki entropi dengesi Eşitlik (22)'deki gibi yazılmaktadır.

$$\Delta S = S_{giren} - S_{çıkan} + S_{jenerasyon} \quad (22)$$

Köfte örneklerinin özgül entropisi Eşitlik (23) ile hesaplanmıştır.

$$S_{ürün} - S_{referans} = \left(\frac{Cp_{ürün} - Cp_{referans}}{2} \right) \ln \left(\frac{T_{ürün}}{T_0} \right) \quad (23)$$

Eşitlik (24)'de T_0 referans sıcaklığı (K), $T_{ürün}$ ise ürünün sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Bütün hesaplamalarda referans sıcaklık 10 °C, referans basınç 101.325 kPa olarak alınmıştır. Özgül ısı kapasiteleri ve entropi değerlerinin hesaplanması Bölüm 3.2.7.2 E'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

D) Ekserji denklilikleri

Termodinamiğin ikinci yasasının analizi sonucunda ohmik pişirmenin sınırlarının giren-çıkan, yıkım ve kayıp ekserjilerini kapsadığı tahminlenmektedir. Bu çalışmada kullanılan ekserji eşitliği Eşitlik (24) ve (25)'daki gibi düzenlenmiştir (Dinçer and Şahin, 2004).

$$Ex = m \cdot ex \quad (24)$$

Sürekli sistem ohmik pişirme işlemi için genel ekserji dengesi Eşitlik (25)'daki gibi yazılabilir (Bozkurt and İçier, 2010).

$$\sum Ex_{giren} + W_{elektrik} = \sum Ex_{çıkan} + \sum Ex_{yıkım} + Ex_{kayıp} \quad (25)$$

Giren, çıkan ve kayıp ekserji terimleri Eşitlik 26-28'deki gibi tanımlanabilir.

$$Ex_{giren} = (m_{hm})_1(ex_{hm})_1 + W_{elektrik} \quad (26)$$

$$Ex_{çıkan} = (m_{\ddot{u}})_2(ex_{\ddot{u}})_2 + (m_{kysu})_3(ex_{kysu})_3 + (m_{kyyağ})_4(ex_{kyyağ})_4 \quad (27)$$

$$Ex_{kayıp} = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) Q_{kayıp} \quad (28)$$

T_b sistemdeki elektrotların sıcaklığını ifade etmektedir.

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan özgül ekserjiler (ex) entalpi ve entropi değişimi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$(ex_{hm})_1 = [h_{hm}(T, P)_1 - h_{hm}(T, P)_0] - T_0[s_{hm}(T, P)_1 - s_{hm}(T, P)_0] \quad (29)$$

$$(ex_{\ddot{u}})_2 = [h_{\ddot{u}}(T, P)_2 - h_{\ddot{u}}(T, P)_0] - T_0[s_{\ddot{u}}(T, P)_2 - s_h(T, P)_0] \quad (30)$$

$$(ex_{kayıpsu})_3 = [h_{kayıpsu}(T, P)_3 - h_{kayıpsu}(T, P)_0] \quad (31)$$

$$(ex_{kyyağ})_4 = [h_{kyyağ}(T, P)_4 - h_{kyyağ}(T, P)_0] - T_0[s_{kyyağ}(T, P)_4 - s_{kyyağ}(T, P)_0] \quad (32)$$

Ekserji yıkımı, başka bir deyişle tersinmezliği, Eşitlik (33) ile işlemin ekserjetik verimliliği Eşitlik (34) kullanılarak hesaplanmıştır (Bozkurt and İçier, 2010b).

$$Ex_{yıkım} = T_0 S_{jenerasyon} \quad (33)$$

$$\eta_{ekserji}(\%) = \frac{(m_{\ddot{u}})_2(ex_{\ddot{u}})_2}{(m_{hm})_1(ex_{hm})_1 + W_{elektrik}} \quad (34)$$

Ekserji analizinin uygulanma amacına göre, uygulandığı işlem veya sistemdeki geliştirme olanaklarını belirlemek açısından geliştirilmiş olan “geliştirme potansiyeli” terimi de Eşitlik (35)’ya göre hesaplanmıştır. (Hammond and Stapleton, 2001).

$$IP = (1 - n)[[(m_{hm})_1(ex_{hm})_1 + W_{elektrik}] - (m_{\ddot{u}})_2(ex_{\ddot{u}})_2] \quad (35)$$

E) Köfte örneklerinin ısısal ve fiziksel özellikleri ile ilgili hesaplamalar

Yoğunluğun belirlenmesi

Köfte örneklerinin yoğunluklarının belirlenmesi için Choi and Okos (1986) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Eşitlik (36)):

$$\rho = \frac{1}{\sum(x_i/\rho_i)} \quad (36)$$

Saf komponentlerin yoğunlukları ise Rahman (1995)’de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır:

$$\rho_{pr} = 1.3299 \times 10^3 - 5.180 \times 10^{-1}T \quad (37)$$

$$\rho_{yağ} = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}T \quad (38)$$

$$\rho_{kr} = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T \quad (39)$$

$$\rho_{kül} = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T \quad (40)$$

$$\rho_w = 9.9718 \times 10^2 + 3.1439 \times 10^{-3} - 3.7574 \times 10^{-3}T^2 \quad (41)$$

Piştirme işlemi sırasında örneklerin kompozisyonlarında değişim meydana geldiği için örneklerin yoğunlukları sıcaklığın fonksiyonu (Eşitlik (42)) olarak alınmıştır. Yoğunluğun sıcaklığa göre değişimi, enerjetik ve ekserjetik analizlerde ve matematiksel modelleme aşamasında dikkate alınmıştır.

$$\rho_{(T)} = p + q \times T \quad (42)$$

Özgül ısıнын belirlenmesi

Köfte örneklerinin özgül ısılarının belirlenmesinde Choi ve Okos (1986) tarafından önerilmiş yöntem kullanılmıştır (Eşitlik (43) ve (44)):

$$C_p = \sum C_{p,i} X_i \quad (43)$$

$$C_p = C_{p,pr} X_{pr} + C_{p,yağ} X_{yağ} + C_{p,kr} X_{kr} + C_{p,kül} X_{kül} + C_{p,w} X_w \quad (44)$$

Saf komponentlerin özgül ısıları Rahman (1995)'de belirttiği şekilde hesaplanmıştır:

$$C_{p,pr} = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2 \quad (45)$$

$$C_{p,yağ} = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2 \quad (46)$$

$$C_{p,kr} = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2 \quad (47)$$

$$C_{p,kül} = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2 \quad (48)$$

$$C_{p,w} = 4.1762 + 9.0864 \times 10^{-3}T - 5.4731 \times 10^{-6}T^2 \quad (49)$$

Pişme işlemi sırasında köfte örneklerinin özgül ısılarında meydana gelen değişim sıcaklığın fonksiyonu olarak (Eşitlik (50)) karakterize edilmiştir:

$$C_{p,(T)} = k + n \times T \quad (50)$$

Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesi

Köfte örneklerinin pişirme işlemi sırasında ısı iletkenlik değerinde meydana gelen değişim sıcaklığın fonksiyonu olarak (Eşitlik (51)) hesaplanmıştır. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimini veren denklem TÜBİTAK TOVAG 110 O 068 No'lu proje kapsamında deneysel olarak elde edilmiştir (İçier ve ark 2013). Modelleme çalışmalarında ısı iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi Eşitlik (51) kullanılarak hesaplamaya dahil edilmiştir.

$$k = -0.0001T^2 + 0.0152T + 0.131 \quad (51)$$

E) Matematiksel Modelleme

Piştirme işlemi boyunca;

- ürün merkez noktası sıcaklığı
- elektrot sıcaklıkları
- ürün yüzey sıcaklığı
- ortam sıcaklığı
- voltaj
- akım

değerleri 1s aralıklarla mikroişlemci yardımıyla kaydedilmiştir.

Bu çalışmada, pişme sırasında eşzamanlı ölçülen voltaj, akım ve sıcaklık değerleri kullanılarak, elektriksel iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi tespit edilmiştir. Elektriksel iletkenlik değerlerinin değişiminde sıcaklık ve voltaj gradyanı etkilerini karakterize edecek farklı elektriksel iletkenlik modelleri incelenmiş ve modellerin deneysel sonuçlarla uyumu belirlenmiştir (Bölüm 4.5.). İstatistiksel olarak iyi uyum gösterdiği saptanan elektriksel iletkenlik modelleri ohmik piştirme işleminin matematiksel modellenmesinde kullanılmıştır (Eşitlik (6)). Sürekli sistem ohmik pişirmenin kuramsal olarak incelenmesi amacıyla elde edilen kısmi diferansiyel denklemler uygun sınır şartları, termofiziksel özellikler ve diğer yardımcı ilişkilerle nümerik olarak çözülmüştür. Sıcaklığın zamana göre değişimi sabit konumda ileri sonlu farklar, sıcaklığın konuma göre değişimi ise sabit zaman aralığında merkezi farklar temel alınarak ayrıklaştırılmıştır. Elde edilen denklem varsayımlar ve sınır koşulları dikkate alınarak nümerik olarak “kapalı, örtülü işlev” (implicit) yöntemiyle TÜBİTAK TOVAG 110 O 068 No’lu proje kapsamında akademik lisansı temin edilen Matlab (MATLAB, vers. 7.12.0, 2011) paket programında çözülmüştür. Model öngürüleri ile deneysel sıcaklık değerlerinin uyumu incelenmiştir.

İletken bir gıdadan geçen elektrik akımının kararlı olduğu hal için, Ohm Kanunu ile yazılan süreklilik denklemi birleştirilerek iletken gıda içindeki voltaj dağılımı aşağıdaki şekilde yazılabilir (Sastry and Salengke, 1998);

$$\nabla(\sigma \Delta V) = 0 \quad (52)$$

Temel olarak sistemde işlem süresince meydana gelen iletimsel ısı transferi ile sistemde oluşan ısı oluşumunun toplamı, ürünlerdeki sıcaklık artışına ve sistemdeki toplam kayıplara denk olacaktır (Eşitlik 53);

$$\left(\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \left(k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(k \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \dot{Q}_j = \dot{Q}_b \quad (53)$$

$\dot{g}_{element}$ (W/m³) hacimsel ısı oluşum hızıdır.

Örnek içinde hacimsel ve tekdüze bir ısı oluşumu olduğu varsayılarak ısı transfer hızı hesaplanabilir. Eğer örnek içinde ısı transferinin iletimle oldukça hızlı gerçekleştiği kabul edilirse, örneğin tüm noktalarında sıcaklık tekdüze olacaktır. Bu durumda Eşitlik (53), Eşitlik (54) şeklinde yazılabilir (Bozkurt, 2009);

$$\dot{g}_{element} = \rho_{element} C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (54)$$

Denklemin her iki tarafı kontrol hacimle çarpılırsa ısı oluşum hızı $\dot{Q}_j$ (W);

$$\dot{Q}_j = v \dot{g}_{element} = v \rho_{element} C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (55)$$

Hacimsel ısı oluşum hızı (W/m^3) sabit voltaj gradyanı uygulandığı durumda;

$$\dot{g}_{element} = \sigma |\nabla V|^2 \quad (56)$$

şeklinde yazılabilir. Ürün içerisindeki ortalama voltaj gradyanı Eşitlik (57)'deki gibi yazılabilir (İçier, 2003);

$$\nabla V = \frac{\Delta V}{L} \quad (57)$$

Kullanılan sürekli sistem ohmik pişirmede tasarım parametresi olarak elde edilen hücre sabiti (K_c) de Eşitlik (4) ile verildiğinde; ısı oluşum hızı (W) elektriksel iletkenlik değeri, hücre sabiti ve voltaj farkı cinsinden yazılabilmektedir (Eşitlik 58);

$$\dot{Q}_j = \frac{\sigma |\nabla V|^2}{K_c} \quad (58)$$

Elektriksel işlem sırasında herhangi bir anda üründe meydana gelen sıcaklık artışı Eşitlik (59) ile bulunabilir.

$$\dot{Q}_b = m C_p \frac{dT}{dx} \quad (59)$$

Kullanılan modelde temel alınan varsayımlar;

- Örneklerdeki elektriksel iletkenliklerinin voltaj değişiminden etkilenmediği,
- örneklerinin başlangıçtaki sıcaklık değerinin dağılımının tekdüze olduğu,
- pişirme işlemi sırasında köfte içerisinde tekdüze ısı enerjisi oluşumunun meydana geldiği,
- köfte örneklerinin elektriksel iletkenlik değerlerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak değiştiği,
- işlemi süresince radyal yönde pozisyona bağlı iletimle ısı aktarım mekanizmasının etkili olduğu,
- köfte örneklerinin termofiziksel özelliklerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak değiştiği,
- pişirme işlemi süresince elektrot yüzey sıcaklığının sabit olduğu, pişirme işlemi süresince ürün yüzeyi ile ortam arasında taşınım ile ısı aktarımından dolayı ısı kaybının olduğu varsayımlar kabul edilmiştir.

Yukarıda belirtilmiş olan varsayımlar doğrultusunda sistemde gerçekleşen ısı transferi denkliği (Eşitlik 53) düzenlenerek Eşitlik (60)'e dönüşür;

$$\left(\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \frac{\Delta V^2 \sigma_{(T)}}{K_c v} = \rho_{(T)} C_{p(T)} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (60)$$

Ohmik pişirme işleminin matematiksel modellenmesi sırasında konvektif sınır koşulu olarak sadece test hücresi yüzeyi ile ortam arasında meydana gelen ısı kaybı dikkate alınacak olup, ilgili denklik Eşitlik 61'deki gibidir.

$$Q_k = \bar{h} A (\bar{T}_y - T_{ortam}) \Delta t \quad (61)$$

ve ortalama ısı transfer katsayısı, geçerli Gr.Pr. aralığı için basitleştirilmiş denklem ile hesaplanabilir (İçier, 2003);

$$\bar{h} = 1.32 \left(\frac{\Delta \bar{T}}{D} \right)^{1/4} \quad (62)$$

ΔT , ürünün dış yüzeyi ile ortam arasındaki başlangıç ve son sıcaklık farklarının ortalaması olarak alınmıştır.

Burada sistemdeki oluşumu tanımlayacak olan bir f fonksiyonu tanımlanır (Eşitlik 63);

$$f(x, r, t, T) = \frac{\Delta V^2 \sigma_{(T)}}{K_c v} \quad (63)$$

Elde edilen bu eşitlikte sıcaklığın zamana göre değişimi sabit konumda ileri sonlu farklar, sıcaklığın konuma göre değişimi ise sabit zaman aralığında merkezi farklar temel alınarak ayrıştırılmıştır. Denklem çözümünde kullanılacak olan başlangıç ve sınır koşulları ise;

$$IC = T(r, z, 0) = 20 \text{ } ^\circ C \quad (64)$$

$$BC(1) \Rightarrow \partial T / \partial r = 0 \text{ } (r = 0) \quad (65)$$

$$BC(2) \Rightarrow T'_{i,j} = \frac{\left[f(r, t, T) - \left(\frac{hA(T_{i,j} - T_{ortam})}{V} \right) \right] \Delta t}{\rho_{(T)} C_{p(T)}} + T_{i,j} \text{ } (r = R) \quad (66)$$

Elde edilen eşitlik nümerik olarak “kapalı,örtülü işlev” (implicit) olarak çözülerek yapılan varsayımlar doğrultusunda elde edilen model uyumluluğu tespit edilmiştir.

3.2.8. İstatistiksel değerlendirme

Bulgular, SPSS 16.0 istatistik paket programı (SPSS, 2007) kullanılarak varyans analizi (ANOVA) ve t testine tabi tutulmuş ve elde edilen veriler Duncan ve Tukey çoklu karşılaştırma testine göre % 95 güven aralığında değerlendirilmiştir. Ampirik model katsayılarının bulunmasında regresyon yöntemi uygulanmıştır. Model öngörülerinin deneysel verilere uyumluluğu korelasyon sabiti (r), % hata, hata karelerinin ortalama karekökü (RMSE) ve indirgenmiş ki-kare (χ^2 , reduced chi-square) değerlerine göre belirlenmiştir (Erbay ve İçier,2008). Temel uyum değeri olarak korelasyon sabitinin 1’e yakın olması dikkate alınmıştır. Aynı zamanda % hata, indirgenmiş χ^2 ve RMSE değerleri de hesaplanarak, bu değerlerin düşüklüğü uyumun ikincil göstergesi olarak kabul edilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_n - V_e)^2} \quad (67)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (V_n - V_e)^2}{N - n} \quad (68)$$

$$\% \text{ Hata} = 100 \frac{(V_n - V_e)}{V_e} \quad (69)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N V_n V_e - \sum_{i=1}^N V_n \sum_{i=1}^N V_e}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N V_n^2 - \left(\sum_{i=1}^N V_n \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N V_e^2 - \left(\sum_{i=1}^N V_e \right)^2 \right)}} \quad (70)$$

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

4.1. Uygulanan Voltaj Gradyanının Kompozisyon Üzerine Etkisi

Köfte örneklerinin ohmik pişirilmesi işleminde ekserji verimliliğinin tespitinde ve kuramsal inceleme aşamasında pişirme sırasında termofiziksel özelliklerde meydana gelen değişimleri dikkate alabilmek amacıyla, örneklerin pişme öncesinde ve sonrasında kompozisyon analizi yapılmıştır (Çizelge 4.1).

Pişmiş etlerdeki nem oranı, özellikle lezzeti etkilemesi bakımından önem taşımakta olup, aynı zamanda pişme derecesinin de göstergesi olmaktadır. Yetersiz pişen köfteler sulu, aşırı pişen köfteler ise sert ve kuru olmaktadır.

Çizelge 4.1. Farklı voltaj gradyanlarında pişirilen köftelerin kompozisyon değerleri

Voltaj Gradyanı (V/cm)	% Kül	% Nem	% Yağ	% Protein
Köfte Hamuru	1.55 ± 0.13	75.85 ± 0.43	2.34 ± 0.45	19.85 ± 0.45
15	1.61 ± 0.23	74.42 ± 0.26	2.19 ± 0.13	21.54 ± 1.16
20	1.72 ± 0.15	75.01 ± 0.30	2.23 ± 0.07	21.24 ± 1.05
25	1.59 ± 0.03	74.44 ± 0.38	2.23 ± 0.17	22.43 ± 0.36

Voltaj gradyanının kompozisyon değişimi üzerine etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen istatistiksel değerlendirme sonucuna göre voltaj gradyanı değişiminin ürünün kompozisyon değişimi üzerine önemli düzeyde etkisinin olmadığı tespit edilmiştir ($p>0.05$) (Ek-1). Kompozisyondaki değişim, enerji ve ekserji hesaplamalarında ve matematiksel modelleme aşamasında sıcaklığa bağlı özgül ısının hesaplanmasında dikkate alınmıştır.

Özkan et al. (2004), hamburger köftelerinin pişirilmesi amacıyla özel olarak geliştirmiş oldukları elektriksel-geleneksel kombine bir sistemi (Patent no:WO

02/102215 A1) kullanmışlardır. Bu amaçla 50 V ve yaklaşık 15 A alternatif akım maksimum değerlerinde çalışabilen ohmik pişirme sistemini, ızgara (geleneksel temas ısıtma) ile kombine etmişlerdir. Hem kombine hem de geleneksel yöntemle pişirilen hamburgerlerin nem, yağ ve toplam katı madde içeriklerinde önemli bir farklılık belirlenmemiştir. Benzer şekilde Shirsat ve ark. (2004a), ohmik yöntemle pişirilen et emülsiyonu örneklerinin kimyasal kompozisyonunun buharda pişirilen örneklerden önemli oranda farklılık göstermediğini belirtmişlerdir.

4.2. Uygulanan Voltaj Gradyanının Ağırlık ve Boyut Değişimi Üzerine Etkisi

Köfte örneklerinin ohmik pişirilmesi işleminde ekserji ve enerji verimliliğinin tespitinde pişirme sırasında üründe meydana gelen değişimleri dikkate alabilmek amacıyla, örneklerin pişme öncesinde ve sonrasında ağırlık ve boyut ölçümü yapılmıştır (Çizelge 4.2).

Sürekli sistemde ohmik pişirme işlemi sonucunda ürünün çap, boy ve ağırlığında meydana gelen yüzde değişimler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Ohmik pişirme işleminde voltaj gradyanı değişiminin ürünün çap, boy ve ağırlığı üzerine istatistiksel olarak önemli düzeyde etkisinin olmadığı gözlenmiştir ($p>0.05$) (Çizelge 4.2) (Ek-1).

Çizelge 4.2. Farklı voltaj gradyanlarında üründeki çap, ağırlık ve boyut değişimi

Voltaj Gradyanı (V/cm)	Ağırlık Değişimi (g)	Boy Değişimi (cm)	Çap Değişimi (cm)
15	0.32 ± 0.20	0.39 ± 0.32	0.19 ± 0.08
20	0.93 ± 0.49	0.34 ± 0.22	0.20 ± 0.14
25	0.27 ± 0.17	0.39 ± 0.16	0.21 ± 0.08

4.3. Uygulanan Voltaj Gradyanının Pişme Süresi ve Sıcaklık Dağılımı Üzerine Etkisi

Silindirik şekil verilen köfte hamuru örnekleri sürekli sistem ohmik pişirme ünitesinde hareketli bant üzerinde iki elektrot arasına sıkıştırılıp, farklı voltaj gradyanları (15, 20 ve 25 V/cm) uygulanarak pişirilmiştir. Pişirme işlemi boyunca ürünün merkezinden ve yüzeyinden temaslı ve temassız olarak sıcaklık ölçümleri alınmıştır.

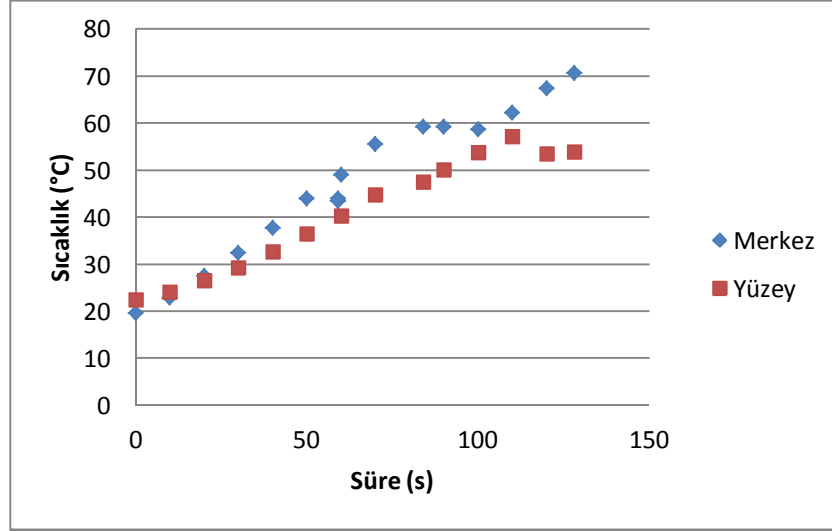
4.3.1. Temaslı sıcaklık ölçümleri

Pişirme işlemi süresi boyunca ürünün merkezinden ve yüzeyinden mikroişlemci yardımıyla 1 s aralıklarla sıcaklık ölçümü alınmıştır. Uygulanan voltaj gradyanının ürünün pişme süresi üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli düzeyde olduğu saptanmıştır ($p < 0.05$) (Ek-2). Şekil 4.2’de görüldüğü gibi artan voltaj gradyanı ile istenen sıcaklığa ulaşma süresi arasında ters ilişki gözlenmektedir (Ek-3).

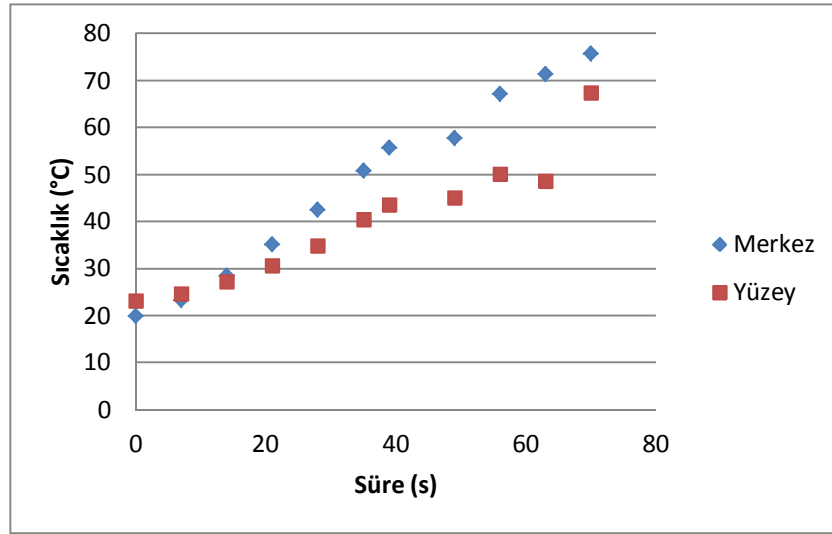
Ohmik işlemede meydana gelen ısı oluşumu artan voltaj ve akım değeriyle doğrudan ilişkilidir (Sastry and Li, 1996). Birçok araştırmacı benzer şekilde ohmik işlemede ısıtma süresinin artan voltaj gradyanı ile birlikte azaldığını belirtmişlerdir (İcier, 2003; Piette et al., 2004; Shirsat et al., 2004b; de Halleux et al., 2005; İcier ve Ilicali, 2005b; Gin and Farid, 2007; Bozkurt, 2009).

Shirsat et al. (2004b) sistem özelliklerinin ohmik pişirmedeki etkilerini vurguladıkları çalışmalarında, 3-7 V/cm voltaj gradyanı aralığında emülsiyonlarının ısınma hızının $4.66-25\text{ }^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ aralığında değiştiğini rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Özkan et al. (2004) tasarlamış oldukları kombine elektriksel ve geleneksel pişirme ünitesinde yağ oranı % 52 olan hamburger tipi köfte örneklerinin sabit voltajda (50 V) pişme süresini 117 s olarak rapor

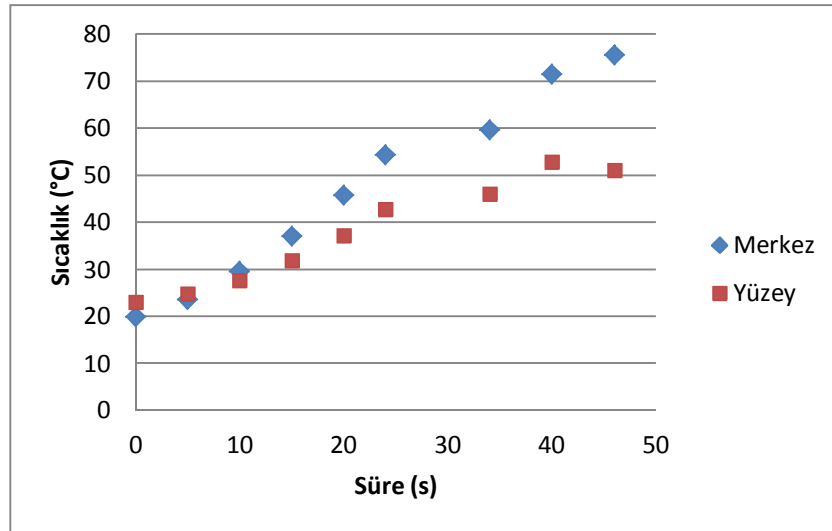
a)



b)



c)



Şekil 4.1. Farklı voltaj gradyanlarındaki ortalama merkez ve yüzey sıcaklık değişimi a) 15 V/cm b) 20 V/cm c) 25 V/cm

etmişlerdir. Rapor edilen bu değer bu tez çalışmasındaki en yüksek voltaj gradyanı (25 V/cm) ile elde edilen süreye göre çok farklıdır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Köftenin farklı voltaj gradyanlarında pişme süreleri

Voltaj Gradyanı (V/cm)	Süre (s)
15	109.15 ± 9.07
20	62.45 ± 3.95
25	41.5 ± 2.37

Bu farklılığın temel nedeninin verilen enerji düzeyinin farklılığı ile ürünün bileşim, boyut ve şekil farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan voltaj gradyanı ile birlikte işlem süresindeki azalma, ürün yapısında meydana gelen pişme reaksiyonları olarak adlandırılan birçok değişimin gözlenememesine neden olmaktadır. Bu nedenden dolayı araştırmacıların son yıllarda odaklandıkları nokta, sistem parametrelerinin ohmik pişirme işlemi üzerine etkinliğini saptamak olmuştur (Bozkurt, 2009).

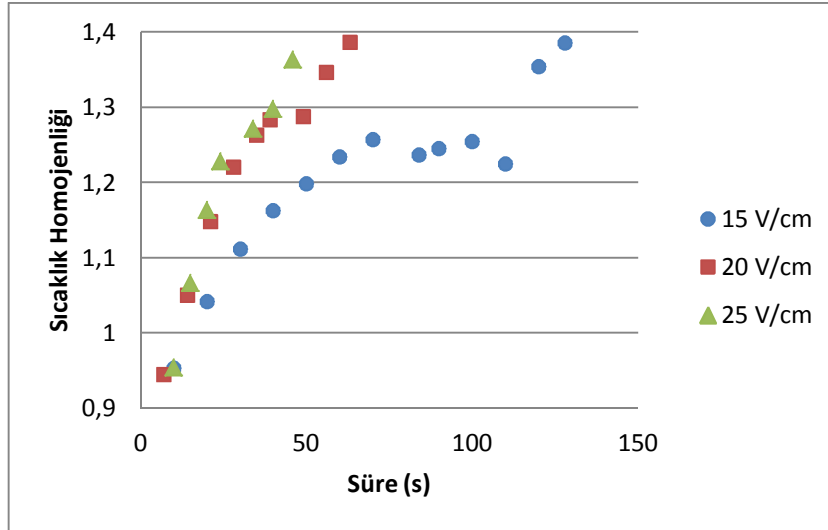
Farklı voltaj gradyanlarında pişirilen örneklerin merkez ve dış yüzeyi ile bant yüzeyi, elektrot ve ortam sıcaklıkları da temaslı sıcaklık ölçerler kullanılarak ölçülmüş ve köftenin ohmik pişirme sırasındaki sıcaklık homojenlik değerindeki değişim saptanmıştır. 15 V/cm voltaj gradyanında en yüksek bant sıcaklığına ulaşıldığı, bunun sebebinin 15 V/cm'de en uzun işlem süresinin olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Pişirme işlemlerinde homojen bir pişirme için ürünün merkez ve yüzey sıcaklarının oranının (sıcaklık homojenliği) 1'e eşit olması istenir. 20 V/cm voltaj gradyanında da en yüksek elektrot sıcaklığını ulaşıldığı saptanmıştır. 1'e yakın olması istenen sıcaklık homojenliğinin düşük voltaj gradyanlarında daha uzun süren ısınma süresi nedeniyle daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Ohmik işlem sonrasında ölçülen temaslı ölçüm sıcaklık değerleri

Voltaj Gradyanı (V/cm)	Merkez (°C)	Yüzey (°C)	Bant (°C)	Elektrot (°C)	Ortam (°C)	Sıcaklık Homojenliği (°C)
15	75.09±0.19	59.16 ± 4.61	30.02 ± 6.95	34.89 ± 3.75	21.75±0.20	1.28 ± 0.09
20	75.53±0.56	54.30 ± 5.80	27.19 ± 3.26	38.01 ± 7.32	21.80±0.00	1.41 ± 0.15
25	75.84±0.80	54.55 ± 4.42	29.92 ± 6.37	36.27 ± 4.75	21.85± 0.12	1.40 ± 0.12

Merkez ile yüzey arasındaki sıcak farklılıkların temel nedeni, hareketli sistemde yumuşak olan köfte hamurunun şeklinin bozulması olduğu düşünülmektedir. Şekil bozukluğunun olduğu yüzeylerde akım geçebileceği en kolay noktadan ilerlemekte, şeklin bozulduğu yüzeyin bazı kısımlarından geçemediği için merkez ve yüzey arasında daha fazla sıcaklık farkı oluşmaktadır. Artan voltaj ile ısınma süreleri azaldığı ve ürünlerdeki sıcaklık artış hızı arttığı için sıcaklık homojenliği değerleri 1’den uzaklaşmaktadır (Şekil 4.2.).

**Şekil 4.2.** Farklı voltaj gradyanlarında pişme sırasındaki ortalama sıcaklık homojenliğinin değişimi

Voltaj gradyanındaki farklılığın bant ve elektrot sıcaklıkları üzerine istatistiksel olarak önemli düzeyde etkisinin olmadığı ($p>0.05$), ancak sıcaklık homojenliği üzerine önemli düzeyde etkili olduğu saptanmıştır ($p<0.05$). Artan

voltaj gradyanı ile ürünün pişirme işlemi sonundaki merkez ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının arttığı saptanmıştır (Çizelge 4.4; Ek-4).

4.3.2. Temassız sıcaklık ölçümleri

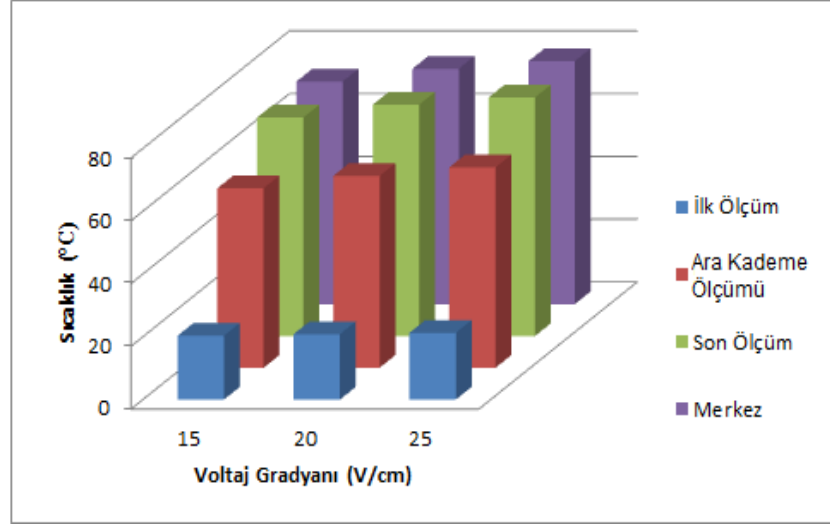
Termal görüntü işleme tekniğinin sürekli sistem ohmik pişirme sırasında uygulanabilirliğinin belirlenmesi amacıyla, temaslı ölçümlerin yanı sıra, termal kamera kullanımı ile örnek yüzeyi ve merkezinin sıcaklık dağılımları da incelenmiştir. Örnek içi sıcaklık ölçümleri ile termal kamera görüntülemeleri eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Termal kamera ölçümlerinin istatistiksel değerlendirmesi cihaza ait özel yazılım ile alınabilmekte ve minimum-ortalama-maksimum sıcaklıklar tespit edilebilmektedir (Çizelge 4.5).

Termal kamera görüntüleme tekniği, gıda sektöründe son yıllarda kullanımı artan bir sıcaklık ölçüm yöntemidir. Bu yöntem gıda örneklerinde direk uygulanabilir bir yöntemdir (Nott and Hall, 1999; Gowen et. al., 2010). Termal görüntüleme tekniğinin prensibi sıcaklık ve ısı akışının ölçümüne dayanmaktadır. Yöntemin diğer sıcaklık ölçüm yöntemlerine göre avantajları; temassız ölçüm sağlaması, hiçbir zararlı radyasyona neden olmaması, kolay taşınabilir olması ve anlık görüntü elde edilebilmesidir (Gowen et. al., 2010). Kullanımın eğitim gerektirmesi ve pahalı bir sistem olması da dezavantajları olarak sayılabilmektedir (Gowen et. al., 2010).

Farklı voltaj gradyanlarının kaydedilen temassız sıcaklık ölçüm değerleri üzerine etkisi incelendiğinde, merkez ve ortalama yüzey sıcaklığının artan voltaj gradyanı ile orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir ($p<0.05$) (Ek 5; Şekil 4.3).

Ayrıca farklı voltaj gradyanları için ayrı ayrı işlem süresince termal kamera ile alınan görüntüler işlenmiş ve Ek 6’ da verilmiştir. Sıcaklık skalası (0-100 °C) olarak gökkuşağı renkleri seçilip yeşil soğuk, kırmızı sıcaklığı temsil etmektedir. Pişirme işlemi boyunca alınan görüntüler de istatistiksel sonuçları desteklemektedir.



Şekil 4.3. Voltaj gradyanı farklılığının ohmik pişirme sıcaklığının değişimi üzerine etkisi (Temassız ölçümler)

4.3.2. Temaslı ve temassız sıcaklık ölçümleri arasındaki uyum

Bu tez çalışması kapsamında kaydedilen temaslı ve temassız sıcaklık ölçümleri yardımıyla uygulanan voltaj gradyanı farklılığının köfte örneklerinin sürekli sistemde ohmik pişirilmesi sırasındaki sıcaklık artışı üzerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Eş zamanlı ölçülen sıcaklık değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. İki farklı yöntem uygulanarak alınan sıcaklık ölçümlerinin birbirleri ile uyumları değerlendirildiğinde ise temaslı-temassız sıcaklık ölçümleri arasındaki % fark Çizelge 4.7’de verilmiştir. Uygulanan voltaj gradyanı arttıkça farklı yöntemlerle alınan sıcaklık ölçümleri arasındaki % farkın da arttığı belirlenmiştir.

Köfte merkezinden temaslı olarak alınan sıcaklık ölçümü ile temassız görüntüler arasında uyumun iyi olmasına rağmen, yüzeyden alınan ölçümlerde temaslı ve temassız sıcaklıklar arasındaki farkın çok yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 4.7).

Yüzey sıcaklık farkının işlem parametrelerine göre farklılık göstermesinin nedeninin temaslı sıcaklık ölçümlerinde ısıleşlerin köfte yüzeyine sadece temas ettiği noktadaki sıcaklık değişimini ölçmüş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Çizelge 4.6). Noktasal sıcaklık ölçümünden kaynaklanan hataların minimize edilmesi ile sıcaklık dağılımının daha net ve görsel olarak elde edilmesi amacıyla temassız sıcaklık ölçümlerinin daha detaylı bilgi verdiği düşünülmektedir. Bu bulgu, özellikle katı gıdalar gibi homojen yapıya sahip olmayan ve ohmik pişirme sırasında sıcaklık ölçümü problemlili olan örneklerde temassız sıcaklık ölçümü amacıyla termal kameranın uygulanabileceğini ortaya koymaktadır.

4.4 Ohmik Pişirme Sırasındaki Elektriksel İletkenlik Değişimleri

Ohmik işleme teknolojisinin uygulanabilirliğinin en önemli göstergesi ürünün elektriksel iletkenlik değerinin işlem sırasındaki değişim aralığıdır (De Alwis and Fryer, 1992). İşlenecek olan gıda materyalinin elektriksel iletkenlik değerinin 0.01 S/m'den az 10 S/m'den fazla olması durumunda bu teknoloji pratikte uygulanamamaktadır. İşlenecek ürünün elektriksel iletkenlik değerinin çok yüksek ya da çok düşük olması durumunda üründe istenilen sıcaklık artışını sağlamak için çok yüksek akım ve çok yüksek voltaj değerlerine ihtiyaç duyulacaktır (Piette et al. 2004). Tüm bunların yanında ürün yapısı ve çeşidi ile ilgili farklılıklar da elektriksel iletkenlik değişimine neden olmaktadır (Sarang et al. 2008).

Bu çalışmada pişme süresince farklı voltaj gradyanlarında (15, 20, 25 V/cm) 20-75 °C arasında üründeki elektriksel iletkenlik değişimi incelenmiştir.

Çizelge 4.5. Ohmik pişirme sırasında alınan termal görüntüleme değerlendirme sonuçları

Voltaj Gradyanı (V/cm)	Yüzey									Merkez(°C)		
	İlk Ölçüm(°C)			Ara kademe Ölçümü °C'de			Son Ölçüm(°C)			min	max	ort
	min	max	ort	min	max	ort	min	max	ort			
15	18.5±1.03	24.3±2.20	20.4±1.43	46.2±4.56	70.6±6.24	57.2±1.99	54.2±4.65	88.1±4.98	69.6±1.71	48.3±4.89	83.2±3.83	70.9±3.59
20	18.5±0.96	23.9±1.28	20.8±1.17	47.6±5.25	76.1±6.30	61.1±3.14	58.2±4.80	93.1±3.51	73.7±3.03	52.1±11.9	86.1±4.64	75.0±2.75
25	18.5±2.28	24.5±2.31	21.2±2.28	51.4±4.43	83.6±8.39	63.8±3.62	60.8±2.68	95.1±3.87	76.0±1.65	81.4±4.43	88.4±4.63	77.7±3.42

Çizelge 4.6. Ohmik pişirme sırasında eş zamanlı kaydedilen temaslı ve temassız sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

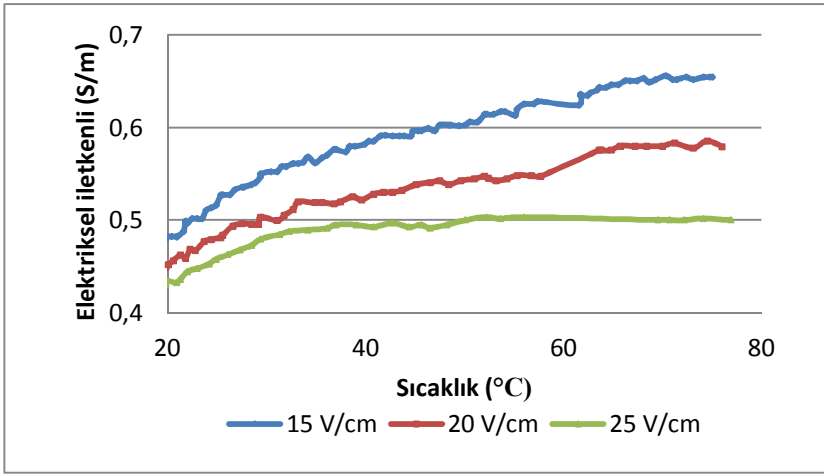
Voltaj Gradyanı (V/cm)	Yüzey						Merkez (°C)	
	İlk Ölçüm (°C)		Ara kademe Ölçümü (°C)		Son Ölçüm (°C)		Temassız	Temaslı
	Temassız	Temaslı	Temassız	Temaslı	Temassız	Temaslı		
15	20.36±1.43	22.70±1.23	57.16±1.99	46.54±3.41	69.56±1.71	59.16±4.61	70.96±3.59	75.09±0.19
20	20.83±1.17	23.14±1.08	61.10±3.14	44.42±3.58	73.70±3.03	52.88±9.43	75.00±2.75	75.53±0.56
25	21.26±2.28	23.00±1.61	63.81±3.62	41.54±3.41	76.02±1.65	54.55±4.42	77.37±3.42	75.84±0.79

Çizelge 4.7. Temaslı ve temassız sıcaklar arasındaki uyum (% fark)

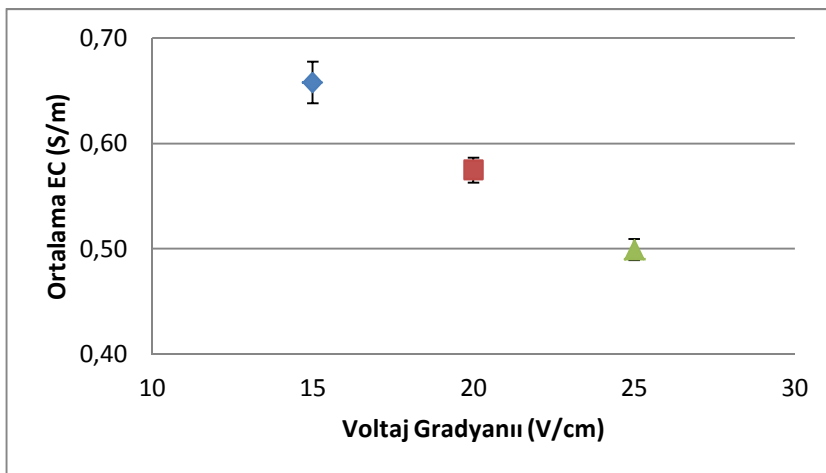
Voltaj Gradyanı (V/cm)	Yüzey			Merkez (%)
	İlk Ölçüm (%)	Ara kademe Ölçümü (%)	Son Ölçüm(%)	
15	12.15±11.24	-18.59±4.78	-14.96±6.09	6.08±5.36
20	11.41±8.37	-27.16±6.55	-26.18±8.71	0.85±4.29
25	9.92±18.39	-34.89±4.03	-28.20±6.04	-1.80±4.57

Ölçülen akım ve voltaj değerleri ile elektriksel iletkenlik değişimi hesaplanmıştır. Seçilen ampirik modeller ile değişim sıcaklık ve voltaj gradyanına bağlı olarak karakterize edilmiştir (Bölüm 4.5).

Ölçümler sonucunda elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla arttığı (Şekil 4.4), artan voltaj gradyanı ile ortalama elektriksel iletkenlik değerlerinin azaldığı (Şekil 4.5) gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. Farklı voltaj gradyanlarında ohmik pişirme sırasında köftenin elektriksel iletkenlik değerinin sıcaklık ile değişimi



Şekil 4.5. Voltaj gradyanının ohmik pişirme sırasında köfte örneklerinin ortalama elektriksel iletkenlik değeri üzerine etkisi

Köfte örneklerindeki her voltaj gradyanı uygulamasında elektriksel iletkenlik değişimi 50-60 °C'ye kadar kararlı bir şekilde artmasına rağmen bu değerlerden sonra artış ivmesi düşmektedir. Köfte örneklerinde, sıcaklık ve elektrik akımının etkisiyle meydana gelen bazı kimyasal reaksiyonların (pişme reaksiyonları) elektriksel iletkenlikte gözlenen bu düşüşe neden olduğu düşünülmektedir.

Piştirme işlemi sırasında artan sıcaklık ve akımın etkisiyle, ürünün yapısında değişimler meydana gelmiştir. Yapıda meydana gelen ve proteolitik etkiden kaynaklanmayan bu değişimlerden biri protein denatürasyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu değişimler kas lifinde bulunan protein yapıda meydana gelmekte olup, piştirme işlemi tamamlanıncaya kadar devam eder (Aberle et al., 2001). Diğer yandan ürünün bağ dokusunun etrafını çevreleyen kollajen yapıda meydana gelen değişimler de ürünün protein çözünürlüğünü etkilemektedir. Et ürününün pişirilmesi ile ürün yapısında meydana gelen ilk değişim kollajen lif uzunluğunda gözlenen kısalmadır (1:3). Bu değişim düşük sıcaklıklarda (56 °C) başlayıp, 61-62 °C sıcaklıklarda tamamlanmaktadır. Kollajen yapıdaki değişim “kollajen büzüşmesi” olarak adlandırılıp protein çözünürlüğünde artışa neden olmaktadır. Piştirme işlemi devam ettikçe üründen uzaklaşan su miktarı artmakta ve kollajen yapının hidrolize olması nedeniyle yapıda jellesme gözlenmeye başlamaktadır. Kollajen yapının hidrolizi protein çözünürlüğünü azaltmakta olup, aynı zamanda sıcaklığın etkisiyle eriyen yağ moleküllerinin de difüzyonuna olanak sağlamaktadır.

Benzer şekilde Brunton et al. (2005) radyo frekans piştirme işleminin (5-85 °C) biftek örneklerine uygulanması sonucu dielektrik özelliklerinde meydana getirdiği değişimi incelemişlerdir. 55 °C'ye kadar yapıda bir değişim gözlenmezken, bu kritik sıcaklık değerini aştıktan sonra ürün yapısının hızla değiştiğini ve dielektrik özelliklerinin değişmeye başladığını rapor etmişlerdir. Meydana gelen bu değişimin sebebinin piştirme sırasında protein yapıda meydana gelen değişim olduğunu belirtmişlerdir. Birçok araştırmacı ürün yapısında kritik sıcaklık değeri ile birlikte gözlenen yapısal değişimin ürün özelliklerinde neden

olduğu değişimi benzer şekilde açıklamıştır (Tornberg et al., 1989; Erdogdu et al., 2007).

4.5. Kuramsal İnceleme

Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin matematiksel modellenmesi ve performans değerlendirmesi alt başlıklar halinde verilmiştir.

4.5.1 Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesi

Ohmik pişirme sırasında köftenin elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi 3 farklı ampirik model ile incelenmiştir (Çizelge 3.4.). Modellerin katsayıları ve sabitleri lineer olmayan regresyon ile belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlik değişimini karakterize edecek modelin belirlenmesinde korelasyon sabitinin 1'e yakın olması dikkate alınmıştır. Aynı zamanda indirgenmiş χ^2 ve RMSE değerleri de hesaplanarak, bu değerlerin düşüklüğü uyumun ikincil göstergesi olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.8. Elektriksel iletkenliğin değişiminin modellenmesinde kullanılan modellerdeki katsayılar

Voltaj Gradyanı (V/cm)		A	B	C	N ₁	N ₂	R ²
Model 1	15	0.003	0.446	-	-	-	0.704
	20	0.002	0.434	-	-	-	0.808
	25	0.001	0.428	-	-	-	0.333
Model 2	15-25	-0.01	0.002	0.626			0.760
Model 3	15-25	52.282	-2.842	-51.104	-0.003	-0.876	0.776

Elektriksel iletkenliğin sıcaklık bağımlılığının doğrusal olduğunu ifade eden Model 1'de regresyon analizi sonucunda bulunan R² değerleri düşük olmasına

rağmen ($R^2 < 0.9$) (Ek 7), korelasyon sabitinin 1'e yakın olması, aynı zamanda indirgenmiş χ^2 ve RMSE değerlerinin düşüklüğü model uyumunun iyi olduğunu göstermektedir. Model 1'in en iyi uyumunun en yüksek R^2 değeri veren 20 V/cm voltaj gradyanında sağlandığı belirlenmiştir (Çizelge 4.9).

Elektriksel iletkenlik değişiminin sıcaklık ve voltaja bağlı olduğu Model 2'de R^2 değerleri benzer şekilde düşük olmasına rağmen ($R^2 < 0.9$) (Ek 8), korelasyon katsayıları 1'e çok yakındır (Çizelge 4.9).

Elektriksel iletkenlik değişiminin sıcaklık ve voltaj gradyanının polinomal kullanıldığı Model 3'de de benzer bulgular elde edilmiştir. R^2 değerleri düşük olmasına rağmen ($R^2 < 0.9$) (Ek 9), korelasyon katsayıları 1'e çok yakındır. χ^2 ve RMSE değerlerinin çok küçük olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda deneysel veriler ile en iyi uyumu veren modelin Model 3 olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Deneysel ve öngürülen elektriksel iletkenlik değerleri arasındaki istatistiksel uyum

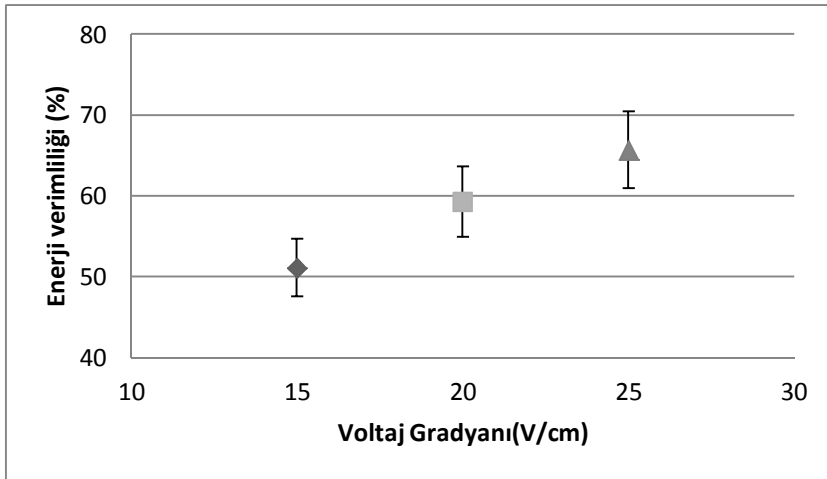
Voltaj Gradyanı (V/cm)		15	20	25
Model 1	χ^2	0.0007±0.0006	0.0003±0.0001	0.0002±0.0001
	RMSE	0.0255±0.0098	0.0178±0.003	0.0144±0.0039
	r	0.99±0.019	0.93±0.031	0.99±0.005
Model 2	χ^2	0.0013±0.0010	0.0012±0.0032	0.0008±0.0002
	RMSE	0.0368±0.0120	0.0258±0.0224	0.0265±0.0038
	r	0.99±0.016	0.94±0.030	0.97±0.007
Model 3	χ^2	0.0017±0.0041	0.0047±0.0014	0.0081±0.0011
	RMSE	0.0613±0.0255	0.0649±0.0098	0.814±0.0056
	r	0.99±0.005	0.99±0.009	0.98±0.006

4.5.2. Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin enerjetik ve ekserjetik performans değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasının deneysel aşamasında elde edilen veriler kullanılarak, farklı voltaj gradyanlarında uygulanan sürekli sistem ohmik pişirme işlemi sırasında kütle, enerji ve ekserji girdi-çıktıları, enerji verimlilikleri, ekserji verimlilikleri ve sistem performans geliştirme potansiyeli (IP) değerlerindeki değişim tespit edilmiştir.

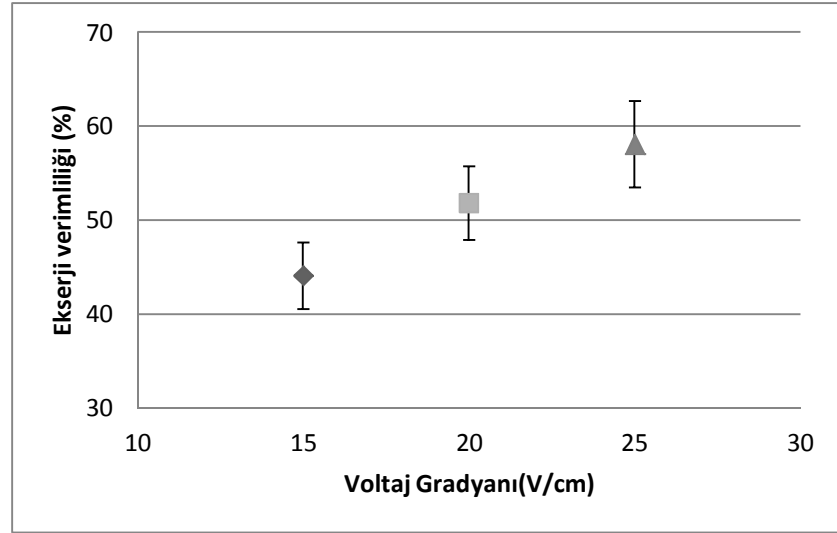
Uygulanan voltaj gradyanındaki farklılığın enerji ve ekserji verimliliği, kayıp enerji ve ekserji, tersinmez ekserji ve geliştirilme potansiyeli üzerinde istatistiksel olarak önemli düzeyde etkili olduğu tespit edilmiştir ($P < 0.05$) (Ek 10).

Voltaj gradyanı değerleri yükseldikçe enerji ve ekserji verimliliklerinin arttığı dikkati çekmektedir. Bu durum, voltaj gradyanı değerleri yükseldikçe işlem süresinin azaldığı, buna bağlı olarak enerji kaybının daha az olduğu ve daha verimli enerji aktarımına neden olduğu şeklinde yorumlanabilmektedir (Şekil 4.6; Şekil 4.7).



Şekil 4.6. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin enerji verimlilikleri

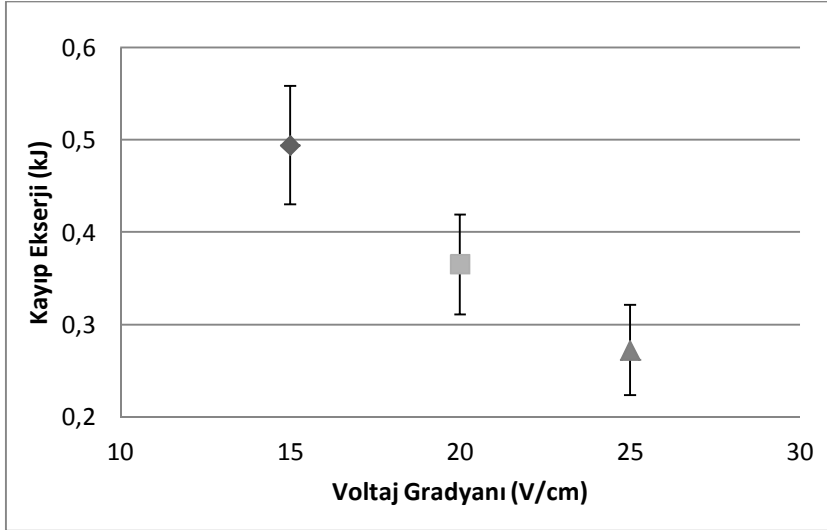
Ekserji verimliliğinin sistemdeki tersinmezlikleri de dikkate alması nedeniyle enerji verimliliğinden düşük olması mantıklıdır. Bu durum, ekserji verimliliğinin sistem performansı hakkında daha gerçekçi bilgi vermesi anlamına gelmektedir. Ekserji verimliliği ile voltaj gradyanı arasında doğru orantı vardır.



Şekil 4.7. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin ekserji verimlilikleri

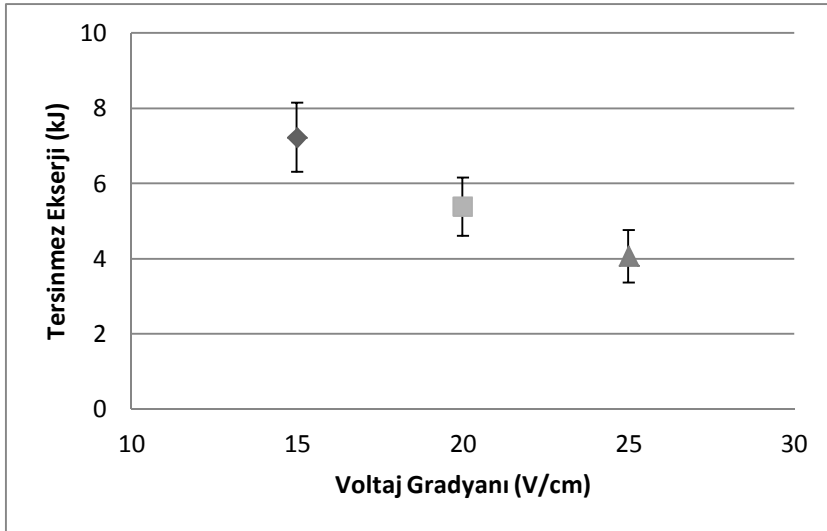
Paralel şekilde voltaj gradyanı azaldıkça artan işlem süresi ile birlikte kayıplar arttığı için sistemdeki tersinmezlikler de artmaktadır (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Başka bir değişle voltaj gradyanı azaldıkça kayıplar artmakta ve tersinmez ekserji ($Ex_{ölü}$) artmaktadır.

Benzer şekilde Bozkurt and İçier (2010), İnegöl köfte örneklerinin ohmik pişirme işlemi sırasında enerjetik ve ekserjetik performans değerlendirmesi yaparak; kısa işlem süresinde sistemdeki enerji kayıplarının azaldığını ve dolayısıyla ekserjetik verimliliğinin arttığını rapor etmişlerdir.



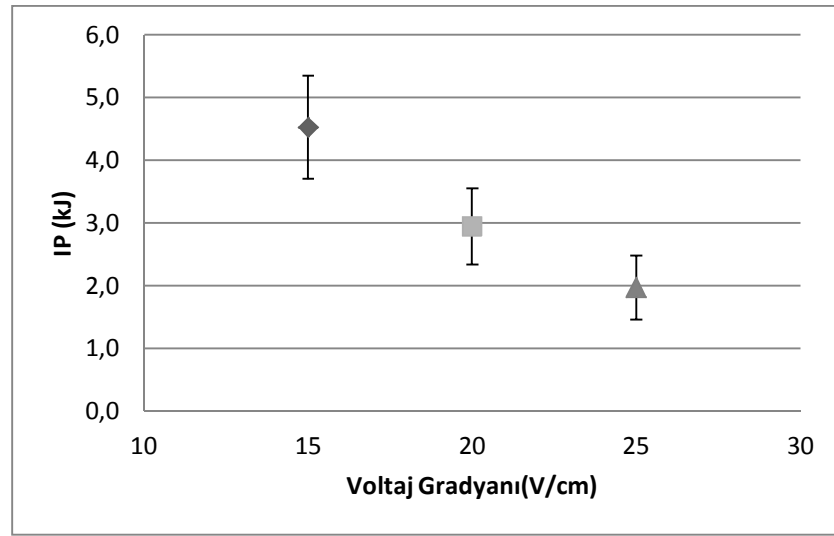
Şekil 4.8. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin ekserji kayıpları

Bozkurt and Icier (2009a) yapmış oldukları çalışmalarında, farklı yağ içeriğine sahip kıyma örneklerinin ohmik pişirilmesi işleminin ekserjetik optimizasyonunu incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, artan yağ içeriği ile birlikte sistemin ekserjetik verimliliğinde bir azalma olduğunu bulgulamışlardır.



Şekil 4.9. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin tersinmez ekserjileri

Sistemin geliştirilme potansiyeli, tersinebilir kayıplarla başka bir değişle sistemdeki kayıp ekserji ile orantılıdır. Voltaj gradyanının geliştirme potansiyeli üzerine etkisi incelendiğinde düşük voltaj gradyanında sistemdeki ekserji kayıpları fazla olduğundan düşük voltajlarda sistemin geliştirilme potansiyelinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Sistemdeki en yüksek geliştirme potansiyelinin (IP), ekserji kaybının en yüksek olduğu 15 V/cm’de olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Farklı voltaj gradyanlarındaki geliştirme potansiyelleri

Sistemlerin maliyet analizleri yapılarak, çevreye verdikleri zarar ve enerji kayıplarının ekserjetik olarak tanımını yapabilecek bir analiz olan eksergoekonomik analizler son yıllarda ortaya koyulan bir değerlendirme yöntemidir (Balkan et al, 2005; Ozgener and Hepbaşlı, 2005, Bozkurt, 2009). Dünyada artan ihtiyaçları karşılamak ve mevcut sistemlerde iyileştirmeler yapılarak daha verimli hale getirilmesi ile hem kısıtlı olan kaynakların efektif kullanılması hem de çevresel ve maliyet açısından önemli bir yere sahiptir. Bu kapsamda ohmik pişirme işlemi içinde daha fazla çalışma yapıp, sistemin eksergoekonomik analizlerinin yapılması son derece önemlidir.

Çizelge 4.10. Farklı voltaj gradyanlarındaki enerji ve ekserji girdi ve çıktıların ortalama değerleri

Voltaj Gradyanı (V/cm)	m_{hammadde} (kg)	m_{ürün} (kg)	m_{kayıpsu} (kg)	m_{kayıpyağ} (kg)	E_{in} (kJ)	E_{out} (kJ)	Q_{kayıp} (kJ)	η_{enerji} (%)	E_{xgiren} (kJ)	E_{xçıkan} (kJ)	η_{ekserji} (%)	E_{xkayıp} (kJ)	E_{xölü} (kJ)	IP (kJ)
15	0.0286	0.03	0.0012	0.00007	15.42	7.88	7.54	51.09	27.69	6.62	44.10	0.49	7.23	4.53
20	0.0293	0.03	0.0011	0.00006	13.63	8.05	5.57	59.25	24.01	6.77	51.79	0.37	5.38	2.95
25	0.0284	0.03	0.0011	0.00005	12.06	7.90	4.16	65.68	20.97	6.64	57.10	0.27	4.07	1.97

4.5.3. Matematiksel modelleme

Matematiksel model çalışmasında varsayımlar ve sınır koşulları dikkate alınarak nümerik olarak “kapalı, örtülü işlev” (implicit) yöntemiyle Matlab (MATLAB, vers. 7.12.0, 2011) paket programında çözümü gerçekleştirilen ısı aktarım modellerinin öngörülerinin deneysel sonuçlarla uyum tablosu Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Sürekli sistem ohmik pişirme işleminde ısı aktarım mekanizması olarak iletim ve taşınım ile ısı aktarımının olduğu ve modele dahil edilmesi gerektiği saptanmıştır. 3 farklı voltaj gradyanlarında (15, 20, 25 V/cm) gerçekleştirilen ohmik pişirme işleminin model çalışmalarında işlem parametrelerinin değişimi ısı aktarım mekanizması açısından modele şu şekilde dahil edilmiştir:

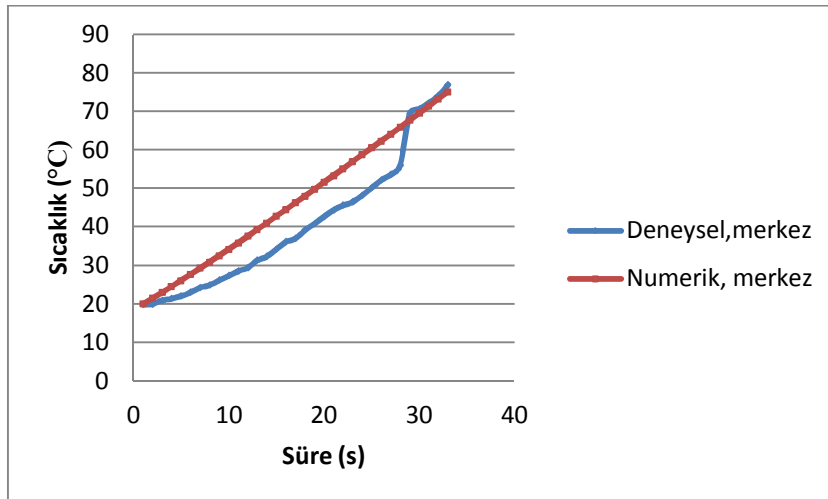
- ✓ 3 farklı voltaj gradyanında ; ısı aktarım denklemi sınır koşulunda yer alan taşınım ısı transferi denklemi ile modele dahil edilmiştir.
- ✓ İşlem parametrelerinin değişiminin modele dahil edilmesinin yanı sıra işlem sırasında ortamda meydana gelen değişimler de dikkate alınmıştır.

Bu amaçla her işlem koşulunda deneysel olarak ölçülen ortam sıcaklığı, ortam nem miktarı ve köftenin sıcaklıkla değişen tüm termodinamik özellikleri, modele dahil edilmiştir.

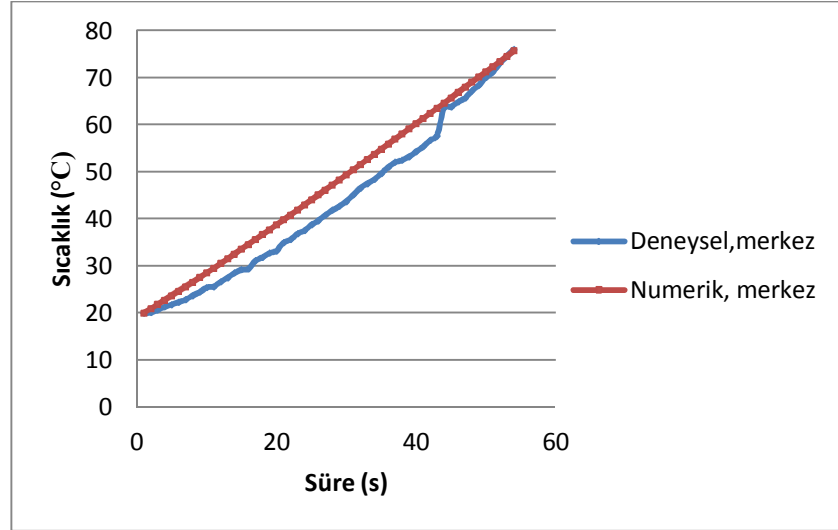
Farklı voltaj gradyanları uygulanarak gerçekleştirilen ohmik pişirme işlemi sonunda köftelerin merkez ve yüzey sıcaklıkları ile matematiksel model öngörülerindeki istatistiksel uyum Çizelge 4.11’de verilmiştir. Deneysel veriler ile model öngörülerindeki fark ürünün merkezinde % -2.96 ile %15.45 arasında yüzeyde ise % 3.42 ile % 26.71 arasında değişmektedir (Ek 11). Oluşan farklılıkların nedeni olabilecek hususlar şu şekilde sıralanabilir;

- farklı işlem parametrelerine göre değişimi modele dahil edilen çevresel faktörlerin dışında başka muhtemel önemli faktörlerin de olması;
- model çalışmasında başlangıç sıcaklığı olarak yüzey ve merkez ortalama sıcaklığının alınmış olması;
- bunun sonucunda merkezden yüzeye doğru gerçekleşen iletimle ısı aktarımının ihmal edilmiş olması,
- deneysel olarak gerçekleştirilen temaslı sıcaklık ölçümlerinde muhtemel ölçüm hataları,
- deneysel sıcaklık ölçümleri ile gerçekleştirilen performans analizlerinde yapılan varsayımların muhtemel % verim değerine etkileri.

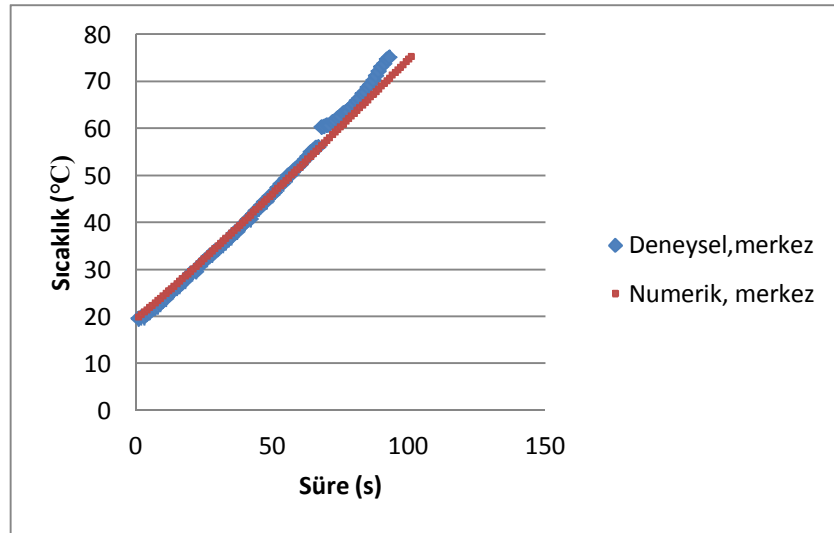
Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13’de öngörülen sıcaklıklar ile deneysel değerler arasındaki ilişki gözlemlenmektedir. 3 farklı voltaj gradyanı ve 20 paralel ile elde edilen sonuçlar ile modelleme çalışması sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmış ve istatistiği Ek 11’de gösterilmiştir. Modelleme çalışması sonucunda en iyi uyumun merkez ve yüzey için en düşük X^2 ve RMSE değeri ile en yüksek korelasyon değerine sahip 15 V/cm voltaj gradyanı uygulanan örneğin olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.11. 25 V/cm voltaj gradyanı uygulanan ohmik pişirme sırasında deneysel ve öngörülen sıcaklık değerleri

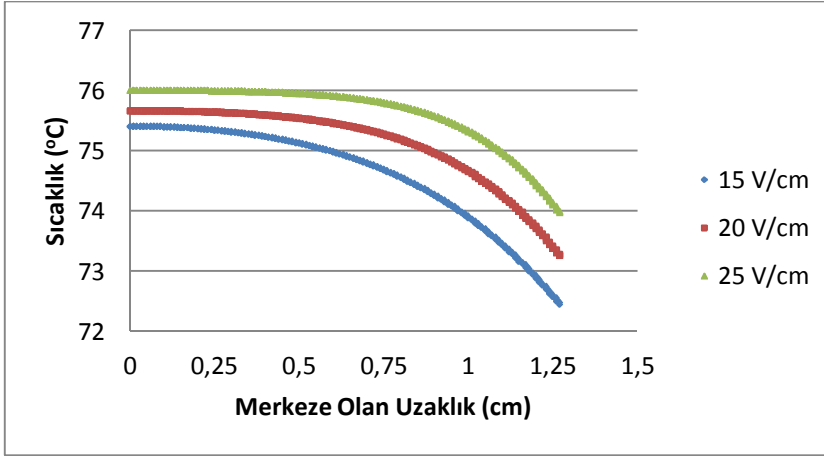


Şekil 4.12. 20 V/cm voltaj gradyanı uygulanan ohmik pişirme sırasında ölçülen ve öngörülen sıcaklık değerleri



Şekil 4.13. 15 V/cm voltaj gradyanı uygulanan ohmik pişirme sırasında ölçülen ve öngörülen sıcaklık değerleri

Kuramsal çalışma ile ohmik pişirme sonunda elde edilen konuma göre sıcaklık değerleri Şekil 4.14'de gözlenmektedir. Merkez ile yüzey arasında oluşan farkın, dış ortam ile temas eden ürünün yüzeyinden havaya doğru gerçekleşen ısı kaybından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.14. Farklı voltaj gradyanlarında ohmik pişme süreleri sonunda örnek içi sıcaklık dağılımları (yarıçap=1.25 cm)

Örneğin merkezi ile yüzeyi arasındaki en düşük farkın en kısa işlem süresine sahip en yüksek voltaj gradyanı olan 25 V/cm’de olduğu gözlenmektedir. 25 V/cm’de işlem süresinin kısa olması, üründen oluşan ısı kaybının diğer daha uzun pişme sürelerine sahip voltaj gradyanlarına göre daha az olduğunu göstermektedir.

Deneysel ve kuramsal yüzey sıcaklıkları arasında farkın yüksek olmasının sebebi kuramsal çalışmada ürünün her noktasından aynı elektrik enerjisinin geçtiği yani örneğin homojen olarak ısındığının varsayılmasından kaynaklanabilir. Bu nedenle daha sonraki modelleme çalışmalarında üründe meydana gelen şekil bozukluklarının dikkate alınması deneysel verilere daha yakın sonuçlar alınmasını sağlayacaktır.

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sürekli sistem ohmik pişirme işlemi farklı voltajlar ile köfte örneklerine pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlemin köfte örneklerinde bazı kalite özelliklerinde meydana getirdiği değişimler ve performans analizleri ile sistem incelenmiştir. Deneysel çalışmaların model ile uyumlulukları kuramsal analizlerle gerçekleştirilmiştir.

Ohmik uygulamaları tek başlarına et ve et ürünlerinin ısıtılması ve pişirilmesi amacıyla teknik açıdan uygulanabilir işlemlerdir.

Pişirme işleminin köftedeki sıcaklık dağılımı üzerine etkisi temaslı ve temassız ölçümlerle belirlenmiş; iki farklı yöntemle elde edilen ölçüm uyumları karşılaştırılmıştır. Temaslı sıcaklık ölçümleri köfte merkez ve köfte yüzeyinden alınmıştır. Temaslı sıcaklık ölçümlerine göre, merkezde artan voltaj gradyanı ile sıcaklığın arttığı tespit edilmiştir. Fakat yüzey sıcaklıklarının voltaj gradyanında bağımlı olarak değiştiği bulgulanmıştır.

Temassız sıcaklık ölçümlerinin temaslı sıcaklık ölçümleri ile paralel gerçekleştirildiği çalışmada elde edilen görüntüler ışığında, sıcaklığın merkezde temaslı sıcaklık ölçüm bulguları ile benzer sonuçlar verdiği, buna rağmen yüzeyden alınan ölçümler tek noktadan alındığı için çok iyi bir uyum göstermediği belirlenmiştir. Temaslı- temassız sıcaklık ölçümleri arasındaki fark işlemin başlangıcında düşük iken işlem yarı süresinde ve işlem sonunda artmıştır.

Noktasal sıcaklık ölçümünden kaynaklanan hataların minimize edilmesi ile sıcaklık dağılımının daha net ve görsel olarak elde edilmesi amacına temassız sıcaklık ölçümlerinin daha detaylı bilgi verdiği düşünülmektedir. Bu bulgu, özellikle katı gıdalar gibi homojen yapıya sahip olmayan ve ohmik pişirme

sırasında sıcaklık ölçümü problemlili olan örneklerde temassız sıcaklık ölçümü amacıyla termal kameranın uygulanabileceğini ortaya koymaktadır.

Ağırlık ve boyut değişimine ohmik işlemin etkisi incelendiğinde alınan çap ölçümlerinde önemli bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir.

Kuramsal analiz kapsamında performans analizi ve modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Performans analizleri enerjetik ve ekserjetik verimi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Performans analizinde en yüksek verim % 57.10 ile maksimum voltaj gradyanında (25 V/cm) elde edilmiştir. Azalan voltaj gradyanı ile birlikte işlemin veriminin azaldığı gözlenmektedir. Bununla birlikte işlemin etkinliğinin de aynı şekilde azaldığı fakat daha az enerji verimine sahip düşük veya orta voltaj gradyanlarında da pişmenin gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Model çalışmasında nümerik çözüm yöntemi olarak kapalı, örtülü işlev (implicit) seçilmiştir. Kuramsal analiz gerçekleştirilerek sonuçların karşılaştırılabilme seçeneklerinin artırılması hedeflenmiştir.

Çalışmalar sonunda elde edilen genel sonuçlar ışığında öneriler ise şu şekildedir:

Uluslararası platformda güncel alternatif yöntemlerin gıda üretiminde uygulanması için yasal düzenlemeler açısından, bu işlemlerin gerek tek başına gerekse kombine halde uygulamaları sırasında, işlem parametrelerinin gıda ürününün bazı özellikleri üzerine etkileri, mikrobiyal inaktivasyon etkinlikleri gibi literatürde kısıtlı bilgi olan konularda verilere ihtiyaç bulunmaktadır. Diğer yandan, pilot ve endüstriyel ölçekli ohmik, kızılötesi ve kombinasyon işlemlerinin tasarımı ve kurulumu için de etkili işlem parametrelerinin deneysel ve kuramsal incelemelerle tespit edilmesi ve optimum işlem koşullarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında “Ohmik-kızılötesi ısıtma sisteminin kurulumu, performans değerlendirmesi ve köfte pişirilmesinde kullanımının bazı

kalite özelliklerine etkisinin incelenmesi” başlıklı TÜBİTAK TOVAG 110 O 068 No’lu projede kullanılmakta olan sistemde çalışılmış, Türkiye’de **ilk kez** pilot ölçekli sürekli ohmik-kızılötesi kombine elektriksel pişirme sistemi sistemi ile köfte pişimi gerçekleştirilmiştir. İşlem parametrelerinin farklı yanıtlar üzerine etkileri incelenmiş ve uygulanabilirlik tespiti yapılmıştır. İşleminin etkinliği ve uygulanabilir olduğu farklı gıda örneklerinde de tespit edilebilir. İşlem sırasında çevresel faktörlerden meydana gelen hataları minimize etmek için daha stabil işlem koşulları ve ortam koşulları sağlanabilir. İşlem sırasında alınan sıcaklık ölçümlerinin daha hassas olması için ölçüm alım noktaları arttırılabilir.

Bu çalışma sürekli sistem ohmik pişirme işleminin et ürünlerinin pişirilmesinde uygulanabilirliğinin incelendiği bir çalışma olması açısından özgün değer taşımaktadır. Hem ülkemiz hem de uluslararası platformda öncelikli araştırma konularından olan güncel işleme tekniklerini uygulayacak bu çalışmanın çıktılarının pilot ölçekli sistemlerin iyileştirilmesi ve endüstriyel ölçekli sistemlerin tasarımında veri sağlayacağı düşünülmektedir. Sürekli sistem ohmik pişirmenin et ürünlerinin pişirilmesine uygulanması ve etkilerinin incelenmesi konusunda elde edilecek veriler literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anon**, (1979) Tekator Manual Kjeltec System 1002, Sweeden.
- AOAC**, 1990, Official Methods of Analysis of the Association of Analitical Chemists, Edit, W. Horwitz. 15th Ed. Washington D.C.
- Aberle, E.D., Forrest, J.C., Gerrard, d.E. and Mills, E.W.**, 2001, Principles of Meat Science, 2nd ed. (pp. 302-310). Dubuque, Kendall Hunt Publications.
- Akpınar, E.K., Midilli, A. and Bicer, Y.**, 2005a, Energy and Exergy of Potato Drying Process Via Cyclone Type Dryer, *Energy Conversion and Management*, 46,2530-2552.
- Akpınar, E.K., Midilli, A. and Bicer, Y.**, 2005b, Thermodynamic Analysis of the Apple drying process, *Proc. IMechE*, Vol. 219, Part E.
- Akterian, S. G. and Fikiin, K. A.** 1994, Numerical Simulation of Unsteady Heat Conduction in Arbitrary Shaped Canned Foods During Sterilization Processes, *Journal of Food Engineering*, 21,343–354.
- Apaiiah, R.K., Linnemann, A.R. and van der Kooi, H.J.**, 2006, Exergy analysis: A tool to study the sustainability of food supply chains, *Food Research International*, 39,1-11.
- Assiry, A., Sastry, S.K. and Samaranayake, C.**, 2003, Degradation kinetics of Ascorbic Acid During Ohmic Heating With Stainless Steel Electrodes, *Journal of Applied Electrochemistry*, 33(2):187–196.
- Balkan, F., Colak, N. and Hepbasli, A.**, 2005, Performance Evaluation of a Triple-effect Evaporator with Forward Feed Using Exergy Analysis, *International Journal of Energy Research*, 29 , (455-470).
- Baysal T., İçier F. ve Baysal A. H.**, 2011, Güncel Elektriksel Isıtma Yöntemleri, 1. Baskı, Sidas Medya, İzmir, 352s

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bozkurt, H.,** 2009, Köfte Üretiminde Ohmik Pişirmenin Uygulanması, Matematiksel Modellenmesi ve Ekserjetik Optimizasyonu, Yüksek Lisans tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 292 p.
- Bozkurt, H. and İcier F.,** 2008. Alternative Thawing Methods; Ohmic Thawing, 1st International Congress of Seafood Technology, 18-21 May, 2008, İzmir-Çesme, pp.261-265.
- Bozkurt, H. and İcier F.,** 2009b, Electrical Conductivity Changes of Minced Beef-Fat Blends during Ohmic Cooking, *Journal of Food Engineering*, 96(1) , (86-92).
- Bozkurt, H. ve İcier F.** 2009c, Et Ürünleri İşlemede Ohmik Pişirmenin Matematiksel Modellenmesi, 17. Ulusal Is Bilimi Kongresi, 24-27 Haziran, Sivas-Türkiye.
- Bozkurt, H. ve İcier, F.** 2009d, İnegöl Köfte Pişirme İşleminin İncelenmesi, 2. Geleneksel Gıdalar Sempozyumu, 27-29 Mayıs, Van-Türkiye, Bildiriler Kitabı.
- Bozkurt, H. ve İcier, F.** 2009e, İnegöl Köfte Üretiminde Ohmik Pişirmenin Uygulanabilirliğinin incelenmesi, *Akademik Gıda*, 7(1),6-12.
- Bozkurt, H. and İcier, F.,** 2010, Ohmic Cooking of Ground Beef, Effects on Quality, *Journal of Food Engineering*, 96, 481-490.
- Brunton, N. P., Lyng, J. G., Li, W., Cronin, D. A., Morgan, D., and McKenna, B.,** 2005, Effect of Radio Frequency (RF) Heating on the Texture, Colour and Sensory Properties of a Comminuted Pork Meat Product, *Food Research International*, 38,337-344.
- Bruttini, O.K., Crosser, K. and Liapis, A.I.,** 2001, Exergy Analysis for the Freezing Stage of the Freeze Drying Process, *Drying Technology*, 19(9),2303-2313.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Califano, A. N. and Zaritzky, N. E.,** 1993, A Numerical Method for Simulating Heat Transfer in Heterogeneous and Irregular Shaped Foodstuffs, *Journal of Food Process Engineering*, 16,159–171.
- Cengel, Y. A. and Boles, M.A.,** 2002, Thermodynamics: An Engineering Approach, 4th Edition, McGraw Hill, 1056p.
- Cho, H.Y., Sastry, S.K. and Yousef, A.E.,** 1996, Growth Kinetics of *Lactobacillus acidophilus* Under Ohmic Heating, *Biotechnology and Bioengineering*, 49(3),334–340.
- Choi, Y. and Okos, M.,** 1986, Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods, In Le Maguer, M and Jelen, P. (Eds), Food Engineering and Process Applications, Transport Phenomena (Vol.1), Elsevier Science, 93-101.
- Colak, N. and Hepbasli, A.,** 2007, Performance Analysis of Drying of Green Olive in a Tray Dryer, *Journal of Food Engineering*, 20,1188-1193.
- Dagerskog, M. and Bengtsson, N. E.,** 1978, Pan Frying of Meat Patties: Relationship Among Crust Formation, Yield, Composition and Processing Conditions, *Lebensmittel–Wissenschaft Technology*, 11,306–311.
- Davey, C. and Gilbert, K.V.,** 1974, Temperature-dependent Toughness in Beef, *Journal of Science Food and Agriculture*, 25,931.
- de Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J.,** 1990, A Finite-Element Analysis of Heat Generation And Transfer During Ohmic Heating Of Foods, *Chemical Engineering Science*, 45(6),1547-1559.
- de Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J.,** 1992a, Mathematical Modeling of the Ohmic Heating Process, in Process Engineering in the Food Industry-2. Convenience Foods and Quality Assurance, (Eds.) R.W. Field and J.A.Howell, Elsevier Applied Science, 45-58.
- de Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J.,** 1992b, Operability of the Ohmic Heating Process, Electrical Conductivity Effects, *Journal of Food* 15, 21-48.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- de Halleux, D., Piette, G., Buteau, M.L. and Dostie, M.,** 2005, Ohmic Cooking of Processed Meats: Energy Evaluation and Food Safety Considerations, *Canadian Biosystem Engineering*, 47,341-347.
- Dinçer, I. and Sahin, A.Z.,** 2004, A New Model for Thermodynamic Analysis of a Drying Process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 645-652.
- Erbay, Z. ve İçier, F.,** 2008, Zeytin Ağacından Faydalanmanın Yeni Bir Yolu Olarak Zeytin Yaprağı ve Gıda Endüstrisindeki Potansiyel Uygulama Alanları. *Akademik Gıda*, 6(3) , (27-36).
- Erdogdu, F., Balaban, M. O. and Chau, K. V.,** 2003, Modeling of Heat Conduction in Elliptical Cross-section (oval shapes) Using Numerical Finite Difference Models. In J. Welty-Chanes, J. F. Ve'lez-Ruiz, & G.V. Barbosa-Ca'novas (Eds.), *Transport phenomena in food processing*. Boca Raton, FL, CRC Press.
- Erdogdu, S.B., Erdogdu, F. and Ekiz, I.,** 2007, Influence of Sodium Tripolyphosphate (STP) Treatment and Cooking Time on Cooke Losses and Textural Properties of Red Meats, *Journal of Food Process Engineering*, 30,685-700.
- Erdogdu, F., Balaban, M.O. and Chau, K.V.,** 1998a, Modeling of Heat Conduction in Elliptical Cross Section: I. Development and Testing of the Model, *Journal of Food Engineering* 38, 223-239.
- Erdogdu, F., Balaban, M.O. and Chau, K.V.,** 1998b, Modeling of Heat Conduction in Elliptical Cross Section: II. Adaptation to Thermal Processing of Shrimp, *Journal of Food Engineering*, 38,241-258.
- Fang, Z., Larson, D. L. and Fleischmen, G.** 1995, Exergy Analysis of a Milk Processing System. *Transactions of the ASAE*, 38(6), 1825–1832.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Flynn, A. W. and Bramblett, V. D.**, 1975, Effects of Frozen Storage Cooking Method and Muscle Quality and Attributes of Pork Loins, *Journal of Food Science*, 40:631–633.
- Fryer, P.**, 1995, Electrical Resistance Heating of Foods. In, *New Methods of Food Preservation*, , First Edition, G.V.Goould (Ed) Chapman and Hall, pp. 205-235.
- Fryer, P.J., de Alwis, A.A.P., Koury, E., Stapley, A.G.F. and Zhang, L.**, 1993, Ohmic Processing of Solid-Liquid Mixtures, Heat Generation and Convection Effects, *Journal of Food Engineering*, 18:101-125.
- Fu, W.R. and Hsieh, C.C.**, 1999, Simulation and Verification of Two-Dimensional Ohmic Heating in Static System, *Journal of Food Science*, 64,946-949.
- García-Segovia, P., Andrés-Bello, A. and Martínez-Monzó, J.**, 2007, Effect of Cooking Method on Mechanical Properties, Colour and Structure of Beef Muscle (M pectoralis), *Journal of Food Engineering*, 80(3), 813-821
- Gin, B. and Farid, M.**, 2007, The Use of Carbon Electrodes in Ohmic Cooking of Meat Patties, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2,474-479.
- Goulieux, A. and Pain, J.P.**, 2005, Emerging Technologies for Food Processing, United Kingdom, UK:Elseiver.
- Gowen, A.A., Tiwari, B. K., Cullen, P. J., McDonnell, K. and O'Donnell, C. P.**, 2010, Applications of Thermal Imaging in Food Quality and Safety Assesment, *Trends in Food Science and Technology*, 21,(190-200).
- Halden, K., de Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J.**, 1990, Changes in the Electrical Conductivity of Foods During Ohmic Heating, *International Journal of Food Science and Technology*, 25,9-25.
- Hammond, G.P. and Stapleton, A.J.**, 2001. Exergy Analysis of the United Kingdom Energy System. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 215 (2), 141–162.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hancioglu, E. and Hepbasli, A.,** 2007, Exergetic Performance Assessment of a Ground-source Heat Pump Drying System, *International Journal of Energy Research*, 31,760-777.
- İcier, F.,** 2003, Gıdaların Ohmik Isıtılmasının Deneysel ve Kuramsal Olarak İncelenmesi, Doktora tezi, *Ege Üniversitesi*, İzmir, 245 s.
- Icier, F. and Ilicali, C.,** 2005a, Temperature Dependent Electrical Conductivities of Fruit Purees During Ohmic Heating, *Food Research. International*, 38(10),1135-1142.
- Icier, F. and Ilicali, C.,** 2005b, The Use of Tylose as a Food Analog in Ohmic Heating Studies, *Journal of Food Engineering*, 69,67–77.
- Icier, F., Yıldız, H. and Baysal, T.,** 2006, Peroxidase Inactivation and Colour Changes During Ohmic Blanching of Pea Puree, *Journal of Food Engineering*, 74,424-429.
- Jones, F.,** 1897, Apparatus for Electrically Treating Liquids, US Patent No. 592735, USA.
- Jun, S. and Sastry, S.K.,** 2007, Reusable Pouch Development for Long Term Space Missions: A 3D Ohmic Model for Verification of Sterilization Efficiency, *Journal of Food Engineering*, 80,1199- 1205.
- Kim, K. H. and Teixeira, A. A.,** 1997, Predicting Internal Temperature Response to Conduction-heating of Odd-shaped Solids, *Journal of Food Engineering*,20,51-63.
- Lawrie, R. A.,** 1991, Meat science (5th ed.). Oxford, Pergamon Press
- Liu, Y., Zhao, Y. and Feng, X.,** 2008, Exergy Analysis for a Freezedrying Process, *Applied Thermal Engineering*, 28,675-690.
- Liu, Z., Jayasingh, S., Gao, W. and Farid, M.,** 2007, Corrosion Mechanism of Electrodes in Ohmic Cooking, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2,487-492.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Manson, J. E., Stumbo, C. R. and Zahradnik, J. W.,** 1974, Evaluation of Thermal Process for Conduction Heating Foods in Pear-shaped Containers, *Journal Food Science*, 39,276–281.
- Marra, F., Zell, M., Lyng, J. G., Morgan, D. J. and Cronin, D. A.,** 2009, Analysis of Heat Transfer During Ohmic Processing, *Journal of Food Engineering*, 91,(56-63).
- MATLAB,** 2011, Release 7.12.0.635(R2011a) , The Mathwork Inc., U.S.
- McKenna, B.M., Lyng, J., Brunton ,N. and Shirsat, N.,** 2006, Advaced in Radio Frequency and Ohmic Heating of Meats, *Journal of Food Engineering*, 77,215-229.
- Midilli, A. and Kucuk, H.,** 2003, Energy and Exergy Analyses of Solar Drying Process of Pistachio, *Energy*, 28,539-556.
- Murphy, E.W., Criner, P.E. and Grey, B.C.,** 1975, Comparison of Methods for Calculating Retentions of Nutrients in Cooked Foods, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 23,(1153–1157).
- Nott, K. P., and Hall, L. D.,** 1999, Advances in Temperature Validation of Foods, *Trends in Food Science and Technology*, 10,(366-374).
- Orangi, S. And Sastrry, S.K.,** 1998, A Numerical Investigation of Electroconductive Heating in Solid-liquid Mixtures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(14),2211-2220.
- Ozgener, O., Hepbasli, A.,** 2005, Exergoeconomic Analysis of a Solar Assisted Ground-source Heat Pump Greenhouse Heating System, *Applied Thermal Engineering*, 25 , (1459-1471).
- Ozkan, N., Ho, I. and Farid, M.,** 2004, Combined Ohmic and Plate Heating of Hamburger Patties: Quality of Cooked Patties, *Journal of Food Engineering*, 63,141-145.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Palaniappan, S. and Sastry, S.K.**, 1991, Electrical Conductivity of Selected Juices: Influences of Temperature, Solids Content, Applied Voltage, and Particle Size, *Journal of Food Process Engineering*, 14,247–260.
- Park, J.W.**, 1995, Surimi Gel Colors as Affected by Moisture Content and Physical Conditions, *Journal of Food Science*, 60,15–18.
- Parrott, D.L.**, 1992, Use of Ohmic Heating for Aseptic Processing of Food Particulates, *Food Tech.*, December 1992,68-72
- Piette, G., Buteau, M.E., Halleux, D., Chiu, L., Raymond, Y., Ramaswany, H.S.**, 2004, Ohmic Cooking of Processed Meats and Its Effects on Product Quality, *Journal of Food Science*, 69,71-78
- Quarini, G.L.**, 1995, Thermohydraulic Aspects of the Ohmic Heating Process, *Journal of Food Engineering*, 24,561-574.
- Rahman, S.**, 1995, Food Properties Handbook, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 225-271.
- Reznick, D.**, 2000, Electroheating, www.raztek.com/elektroheating.html (unpublished).
- Ruan, R., Ye, X., Chen, P. and Doona, C.J.**, 2004, Ohmic Heating. In: P. Richardson, Editor, *Thermal Technologies in Food Processing*, Woodhead Publishing in Food Science and Technology, Cambridge, England p. 294.
- Sarang, S, Sastry, S.K. and Knipe, L.**, 2008, Electrical Conductivity of Fruits and Meats During Ohmic Heating, *Journal of Food Engineering*, 87,351-356.
- Sastry, S.K.**, 1992, A Model For Heating of Liquid-Particle Mixtures in A Continuous Flow Ohmic Heater, *Journal of Food Process Engineering*, 15,263-278.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sastry, S.K. and Barach, J. T.**, 2001, Ohmic and Inductive Heating, *Journal of Food Science Special Supplement: Kinetics Of Microbial Inactivation For Alternative Food Processing Technologies*, 42-46.
- Sastry, S.K. and Li, Q.**, 1996, Modeling the Ohmic Heating of Foods, *Food Technology*, 50,246–248.
- Sastry, S.K. and McFate, K.L.**, 1993, Electroconductive (Ohmic) Heating for Continuous Sterilization of Solid-liquid Food Mixtures, Research Project Final Report, 2782-04, Ohio State University Research Foundation.
- Sastry, S.K. and Salengke, S.**, 1998, Ohmic Heating of Solid-liquid Mixtures: A Comparison of Mathematical Models Under Worst-case Heating Conditions, *Journal of Food Process Engineering*, 21,441–458.
- Sastry, S.K. and Palaniappan, S.**, 1992, Mathematical Modeling and Experimental Studies on Ohmic Heating of Liquid-Particle Mixtures in A Static Heater, *Journal of Food Process Engineering*, 15,241-261.
- Sensoy, I. and Sastry, S.K.**, 2004, Extraction Using Moderate Electric Fields, *Journal of Food Science*, 69,FEP7–FEP13.
- Sheen, S., Tong, C. H., Fu, Y., and Lund, D. B.**, 1993, Lethality of Thermal Processes for Food in Anomalous-shaped Plastic Containers, *Journal of Food Engineering*, 20,199–213.
- Sheridan, P. and Shilton, N.**, 1999, Application of Far Infra-red Radiation to Cooking of Meat Products, *Journal of Food Engineering*, 41,203-208.
- Shirsat, N., Lyng, J.G., Brunton, N.P., and McKenna, B.** 2004a. Ohmic Processing: Electrical Conductivities of Pork Cuts. *Meat Science* 67(3), 507-514.
- Shirsat, N., Brunton, N.P., Lyng, J.G., & McKenna, b.** 2004b, Water Holding Capacity, Dielectric Properties and Light Microscopy of Conventionally and Ohmically Cooked Meat Emulsion Batter. *European Food Research and Technology*, 219,1-5.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Simpson, R., Aris, I. and Torres, J. A.** 1989, Sterilization of Conduction-Heated Foods in Oval-shaped Containers., *Journal of Food Science*, 54,1327–1331.
- Singh, R.P.** 1986, *Energy in Food Processing*. New York, NY, Elsevier.
- SPSS**, 2007, Release 16.0.0 Version Statistical Package, SPSS Inc
- Stirling, R.,** 1987, Ohmic Heating- A New Process for the Food Industry, *Power Engineering Journal*, November, 365-371.
- Syahrul, S., Dincer, I. and Hamdullahpur, F.,** 2003, Thermodynamic Modeling of Fluidized Bed Drying of Moist Particles, *International Journal of Thermal Sciences*, 42,691-701.
- Taprap, R. and Phutthame, K.** 2001, Energy and Exergy Analysis of Canned Food Plant in Thailand, *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok 10520*, Thailand.
- Tekin, T. and Bayramoglu, M.** 1998, Exergy Loss Minimization Analysis of Sugar Production Process From Sugar Beet, *Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Part C, 76(3),149-154.
- Tornberg, E., Olsson, A., and Persson, K.** 1989. A Comparison in Fat Holding Between Hamburgers and Emulsion Sausages. In Proceedings of the 35th *International Congress on Meat Science and Technology* (pp. 753–757), 24–26 September 1989. Denmark, Copenhagen.
- Tulsiyan, P., Sarang, S. and Sastry, S.K.** 2008, Electrical Conductivity of Multicomponent Systems During Ohmic Heating. *International Journal of Food Properties*, DOI, 10.1080/10942910701302580.
- Wills, T.M., Dewitt, C.A.M., Sigfusson, H. and Bellmer, D.,** 2006, Effect of Cooking Method and Ethanolic Tocopherol on Oxidative Stability and Quality of Beef Patties During Refrigerated Storage Oxidative Stability of Cooked Patties), *Journal of Food Science*, 71,109-114.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wu, H., Kolbe, E., Flugstad, B., Park, J.W. and Yongsawatdigul, J., 1998,** Electrical Properties of Fish Mince During Multi-frequency Ohmic Heating, *Journal of Food Science*, 63,1028–1032.
- Yaser, A. and Kolbe, E., 2000,** Analysis of Heat Transfer in Surimi Paste Heated by Conventional and Ohmic Means, *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 9(2),43-54.
- Yildiz, H., Bozkurt, H. and Icier, F. 2009,** Ohmic and Conventional heating of Pomegranate Juice: Effects on Rheology, Colour and Total Phenolics, *International Journal of Food Science and Technology*,. 92,47-65.
- Yildiz-Turp, G., Sengun, I.Y., Kendirci, P., Icier, F. 2013,** Effect of Ohmic Treatment on Quality Characteristic of Meat: A review, *Meat Science*, 93,441–448
- Yongsawatdigul, J., Park, J.W. and Kolbe, E., 1995,** Electrical Conductivity of Pacific Whiting Surimi Paste during Ohmic Heating, *Journal of Food Science*, 60(5),922–925.
- Zaror, C.A., Pyle, D.L. and Molnar, G., 1993,** Mathematical Modelling of An Ohmic Heating Steriliser, *Journal of Food Engineering*, 19,33-53.
- Zhao, Y. and Kolbe, E., 1999,** A Method To Characterise Electrode Corrosion During Ohmic Heating, *Journal of Food Process Engineering*, 22,81-89
- Zhang, L. and Fryer, P.J., 1993,** A Model for Conduction Heat Transfer to Particles in a Hold Tube Using a Moving Mesh Finite Element Method, *Journal of Food Engineering*, 26,193-208.
- Zhang, L. and Fryer, P.J., 1995,** A Comparison of Alternative Formulations For The Prediction Of Electrical Heating Rates Of Solid-Liquid Food Materials, *Journal of Food Process Engineering*, 18,85-97.
- Zorrilla, S. E. and Singh, R. P. 2000a,** Heat Transfer in Meat Patties During Double-Sided Cooking, *Food Science Technology Research*, 6,130–135.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zorrilla, S. E. and Singh, R. P.** 2000b, Heat Transfer in Double-Sided Cooking of Meat Patties Considering Two Dimensional Geometry and Radial Shrinkages. Presented at the Institute of Food Technologists Annual Meeting, Dallas.
- Zorrilla, S. E., Wichchukit, S. and Singh, R. P.,** 2003, Transport Phenomena During Double-sided Cooking of Meat Patties. In J.Welti-Chanes, J. F. Ve'lez-Ruiz, & G. V. Barbosa-Ca'novas (Eds.),Transport phenomena in food processing. Boca Raton, FL, CRCPress.
- Zuber, F., 1999,** Le Chauffage Ohmique Limite la Caisson, *Viandes Produits Carnés* 20,233–239.

ÖZGEÇMİŞ

Ender Hikmet ARSERİM

Adres: Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü
35100 İzmir/TÜRKİYE

E-mail : ender.arserim@rutgers.edu

Doğum Tarihi : 12.04.1987

Doğum Yeri : Şanlıurfa/TÜRKİYE

Uyruğu : T.C.

Medeni Hali : Bekar

Eğitim Durumu :

2011 – 2013 Yüksek Lisans Eğitimi

Ege Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Gıda Müh. A.B.D.

2005 – 2010 Lisans Eğitimi

Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil :

İngilizce (İleri),

Bilgisayar:

Matlab, SPSS, Design Expert, Microsoft Office (Word, Excel, Power Point)

Görev Aldığı Projeler:

TÜBİTAK TOVAG 110 O 068 No’lu projede bursiyer (2011-2012)

2209-ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİ YURT İÇİ / YURT DIŞI
ARAŞTIRMA PROJELERİ DESTEKLEME PROGRAMI kapsamında
“Alternatif Bir Elektriksel Isıtma Yönteminin Kara Havuç Suyuna
Uygulanabilirliğinin İncelenmesi” başlıklı projede araştırmacı

EKLER

- Ek 1.** Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel analiz sonuçları
- Ek 2.** Voltaj gradyanı değişiminin pişme süresi üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel analiz sonuçları
- Ek 3.** Farklı gradyanlarında örneklerin pişme süreleri a) 15V/cm, b) 20V/cm, c) 25V/cm
- Ek 4.** Voltaj gradyanı değişiminin bant, elektrot ve sıcaklık homojenliği özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel analiz sonuçları
- Ek 5.** Voltaj gradyanı değişiminin temassız alınan sıcaklık değerleri üzerine etkisi
- Ek 6.** Temassız sıcaklık ölçümü görüntüleri a)15 V/cm, b),20 V/cm, c)25 V/cm
- Ek 7.** Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesinde kullanılan Model 1'in uyumluluğu a)15 V/cm, b)20 V/cm, c)25V/cm
- Ek 8.** Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesinde kullanılan Model 2'in uyumluluğu
- Ek 9.** Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesinde kullanılan Model 3'in uyumluluğu
- Ek 10.** Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin enerjetik ve ekserjetik performans değerlendirmesinin belirlenmesi için kullanılan istatistiksel analiz sonuçları
- Ek 11.** Matematiksel model öngörülerinin deneysel sonuçlarla olan istatistiksel uyumu

a) Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Tanımlama testi

			N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Min	Max	Between- Component Variance
							Lower Bound	Upper Bound			
Kül	15.00	3	1.6072	.22873	.13205	1.0390	2.1754	1.41	1.86		
	20.00	3	1.7159	.14514	.08380	1.3554	2.0765	1.56	1.84		
	25.00	3	1.5887	.03394	.01959	1.5044	1.6730	1.56	1.63		
	Total	9	1.6373	.14892	.04964	1.5228	1.7517	1.41	1.86		
	Mode I Fixed Effects Random Effects			.15762	.05254	1.5087	1.7658				
					.05254(a)	1.4112(a)	1.8633(a)				
Nem	15.00	3	74.4162	.26126	.15084	73.7672	75.0652	74.13	74.63		
	20.00	3	75.0135	.30107	.17382	74.2656	75.7614	74.77	75.35		
	25.00	3	74.4377	.38274	.22098	73.4869	75.3885	74.06	74.76		
	Total	9	74.6225	.40305	.13435	74.3127	74.9323	74.01	75.35		
	Mode I Fixed Effects Random Effects			.31906	.10635	74.3623	74.8827				
					.19562	73.7808	75.4642				
Yağ	15.00	3	2.1943	.12838	.07412	1.8754	2.5132	2.09	2.34		
	20.00	3	2.2334	.07232	.04175	2.0537	2.4130	2.15	2.30		
	25.00	3	2.2303	.17197	.09928	1.8031	2.6575	2.11	2.43		
	Total	9	2.2193	.11478	.03826	2.1311	2.3075	2.09	2.43		
	Mode I Fixed Effects Random Effects			.13075	.04358	2.1127	2.3259				
					.04358(a)	2.0318(a)	2.4068(a)				
Protein	15.00	3	21.5367	1.16372	.67187	18.6458	24.4275	20.55	22.82		
	20.00	3	21.2467	1.05339	.60818	18.6299	23.8634	20.11	22.19		
	25.00	3	22.4300	.35763	.20648	21.5416	23.3184	22.05	22.76		
	Total	9	21.7378	.96605	.32202	20.9952	22.4803	20.11	22.82		
	Mode I Fixed Effects Random Effects			.92947	.30982	20.9797	22.4959				
					.35609	20.2056	23.2699				
% ağırlık değişimi	15.00	3	1.1633	.79774	.46058	-.8184	3.1450	.51	2.05		
20.00	3	3.2897	1.67436	.96669	-.8697	7.4490	1.36	4.40			
25.00	3	.9337	.57260	.33059	-.4887	2.3561	.46	1.57			
Total	9	1.7956	1.48578	.49526	.6535	2.9376	.46	4.40			

	Model	Fixed			1.12068	.37356	.8815	2.7096				
	1	Effects										
		Random				.74999	-1.4314	5.0225				1.26882
		Effects										
% Boyut Değişimi	15.00	3	7.7733	6.49659	3.75081	-8.3651	23.9118	3.62	15.26			
	20.00	3	6.8667	4.32270	2.49571	-3.8715	17.6048	1.90	9.78			
	25.00	3	7.7533	3.17278	1.83181	-.1283	15.6350	4.66	11.00			
	Total	9	7.4644	4.23563	1.41188	4.2086	10.7202	1.90	15.26			
	Model	Fixed			4.86340	1.62113	3.4977	11.4312				
	1	Effects										
		Random				1.62113(a)	.4893(a)	14.4396(a)				-7.61612
		Effects										
% Çap Değişimi	15.00	3	7.9216	3.15110	1.81929	.0938	15.7494	5.38	11.45			
	20.00	3	7.9922	5.93885	3.42879	-6.7607	22.7451	1.97	13.85			
	25.00	3	8.0191	3.39137	1.95801	-.4056	16.4437	5.62	11.90			
	Total	9	7.9776	3.76525	1.25508	5.0834	10.8719	1.97	13.85			
	Model	Fixed			4.34744	1.44915	4.4317	11.5236				
	1	Effects										
		Random				1.44915(a)	1.7424(a)	14.2128(a)				-6.29755
		Effects										

a Warning: Between-component variance is negative. It was replaced by 0.0 in computing this random effects measure.

b) Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan varyans homojenlik testi

Varyans homojenlik testi

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
% kül	2.836	2	6	.136
% nem	.338	2	6	.726
% yağ	1.808	2	6	.243
% Protein	1.753	2	6	.251
% ağırlık değişimi	3.737	2	6	.088
% boyut değişimi	1.798	2	6	.244
% çap değişimi	.512	2	6	.623

c) Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Anova testi

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
% kül	Between Groups	.028	2	.014	.570	.593
	Within Groups	.149	6	.025		
	Total	.177	8			
% nem	Between Groups	.689	2	.344	3.383	.104
	Within Groups	.611	6	.102		
	Total	1.300	8			
% yağ	Between Groups	.003	2	.001	.083	.921
	Within Groups	.103	6	.017		
	Total	.105	8			
% Protein	Between Groups	2.282	2	1.141	1.321	.335
	Within Groups	5.184	6	.864		
	Total	7.466	8			
% ağırlık değişimi	Between Groups	10.125	2	5.062	4.031	.078
	Within Groups	7.536	6	1.256		
	Total	17.660	8			
% boyut değişimi	Between Groups	1.609	2	.804	.034	.967
	Within Groups	141.916	6	23.653		
	Total	143.525	8			
% çap değişimi	Between Groups	.015	2	.008	.000	1.000
	Within Groups	113.402	6	18.900		
	Total	113.417	8			

d) Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesinde Çoklu Karşılaştırma Testi

Çoklu Karşılaştırma Testi

Dependent Variable		(I) Voltaj	(J) Voltaj	Mean Differenc e (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
							Upper Bound	Lower Bound
Kül	Tukey HSD	15.00	20.00	-.10872	.12870	.691	-.5036	.2862
			25.00	.01847	.12870	.989	-.3764	.4134
		20.00	15.00	.10872	.12870	.691	-.2862	.5036
			25.00	.12720	.12870	.610	-.2677	.5221
			25.00	-.01847	.12870	.989	-.4134	.3764
			20.00	-.12720	.12870	.610	-.5221	.2677
Nem	Tukey HSD	15.00	20.00	-.59729	.26051	.133	-1.3966	.2020
			25.00	-.02143	.26051	.996	-.8207	.7779
		20.00	15.00	.59729	.26051	.133	-.2020	1.3966
			25.00	.57586	.26051	.148	-.2234	1.3752
			25.00	.02143	.26051	.996	-.7779	.8207
			20.00	-.57586	.26051	.148	-1.3752	.2234
Yağ	Tukey HSD	15.00	20.00	-.03911	.10675	.930	-.3667	.2884
			25.00	-.03599	.10675	.940	-.3635	.2916
		20.00	15.00	.03911	.10675	.930	-.2884	.3667
			25.00	.00311	.10675	1.000	-.3244	.3307
			25.00	.03599	.10675	.940	-.2916	.3635
			20.00	-.00311	.10675	1.000	-.3307	.3244
Protein	Tukey HSD	15.00	20.00	.29000	.75891	.924	-2.0386	2.6186
			25.00	-.89333	.75891	.507	-3.2219	1.4352
		20.00	15.00	-.29000	.75891	.924	-2.6186	2.0386
			25.00	-1.18333	.75891	.332	-3.5119	1.1452
			25.00	.89333	.75891	.507	-1.4352	3.2219
			20.00	1.18333	.75891	.332	-1.1452	3.5119
% ağırlık Değişimi	Tukey HSD	15.00	20.00	-2.12633	.91503	.128	-4.9339	.6812
			25.00	.22967	.91503	.966	-2.5779	3.0372
		20.00	15.00	2.12633	.91503	.128	-.6812	4.9339
			25.00	2.35600	.91503	.093	-.4516	5.1636
			25.00	-.22967	.91503	.966	-3.0372	2.5779
			20.00	-2.35600	.91503	.093	-5.1636	.4516
% Boyut Değişimi	Tukey HSD	15.00	20.00	.90667	3.97095	.972	-11.2773	13.0906
			25.00	.02000	3.97095	1.000	-12.1640	12.2040
		20.00	15.00	-.90667	3.97095	.972	-13.0906	11.2773
			25.00	-.88667	3.97095	.973	-13.0706	11.2973
			25.00	-.02000	3.97095	1.000	-12.2040	12.1640
			20.00	.88667	3.97095	.973	-11.2973	13.0706
% Çap değişimi	Tukey HSD	15.00	20.00	-.07061	3.54967	1.000	-10.9620	10.8208
			25.00	-.09748	3.54967	1.000	-10.9888	10.7939
		20.00	15.00	.07061	3.54967	1.000	-10.8208	10.9620
			25.00	-.02687	3.54967	1.000	-10.9182	10.8645
			25.00	.09748	3.54967	1.000	-10.7939	10.9888
			20.00	.02687	3.54967	1.000	-10.8645	10.9182

- e) Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesinde Homojenlik testleri a) % kül b) % nem c) % yağ d) % protein e) % ağırlık değişimi f) % boyut değişimi g) % çap değişimi

a) % kül

Voltaj		N	Subset for alpha = .05
			1
Tukey HSD(a)	25.00	3	1.5887
	15.00	3	1.6072
	20.00	3	1.7159
	Sig.		.610
Duncan(a)	25.00	3	1.5887
	15.00	3	1.6072
	20.00	3	1.7159
	Sig.		.376

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

f) % nem

Voltaj		N	Subset for alpha = .05
			1
Tukey HSD(a)	15.00	3	74.4162
	25.00	3	74.4377
	20.00	3	75.0135
	Sig.		.133
Duncan(a)	15.00	3	74.4162
	25.00	3	74.4377
	20.00	3	75.0135
	Sig.		.069

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

g) % yağ

Voltaj		N	Subset for alpha = .05
			1
Tukey HSD(a)	15.00	3	2.1943
	25.00	3	2.2303
	20.00	3	2.2334
	Sig.		.930
Duncan(a)	15.00	3	2.1943
	25.00	3	2.2303
	20.00	3	2.2334
	Sig.		.735

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

h) Protein

Voltaj		N	Subset for alpha = .05
			1
Tukey HSD(a)	20.00	3	21.2467
	15.00	3	21.5367
	25.00	3	22.4300
	Sig.		.332
Duncan(a)	20.00	3	21.2467
	15.00	3	21.5367
	25.00	3	22.4300
	Sig.		.182

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

i) % ağırlık değişimi

Voltaj		N	Subset for alpha = .05	
			1	2
Tukey HSD(a)	25.00	3	.9337	
	15.00	3	1.1633	
	20.00	3	3.2897	
	Sig.		.093	
Duncan(a)	25.00	3	.9337	
	15.00	3	1.1633	1.1633
	20.00	3		3.2897
	Sig.		.810	.059

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

j) % boyut değişimi

Voltaj		N	Subset for alpha = .05
			1
Tukey HSD(a)	20.00	3	6.8667
	25.00	3	7.7533
	15.00	3	7.7733
	Sig.		.972
Duncan(a)	20.00	3	6.8667
	25.00	3	7.7533
	15.00	3	7.7733
	Sig.		.832

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

k) % çap değişimi

Voltaj		N	Subset for alpha = .05
			1
Tukey HSD(a)	15.00	3	7.9216
	20.00	3	7.9922
	25.00	3	8.0191
	Sig.		1.000
Duncan(a)	15.00	3	7.9216
	20.00	3	7.9922
	25.00	3	8.0191
	Sig.		.980

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Ek 2. Voltaj gradyanı değişiminin pişme süresi üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel analiz sonuçları

a) Voltaj gradyanı değişiminin pişme süresi üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Tanımlama testi

Tanımlama

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Min	Max	<i>Between-Component Variance</i>
					Lower Bound	Upper Bound			
15.00	20	100.15	9.07	2.03	95.90	104.40	93	127	
20.00	20	53.45	3.95	.884	51.60	55.30	54	70	
25.00	20	32.50	2.37	.531	31.39	33.61	36	45	
Total	60	62.03	29.10	3.76	54.52	69.55	27	119	
Model			5.88	.76	60.51	63.55			
Fixed Effects				19.99	-23.99	148.06			1197.66
Random Effects									

b) Voltaj gradyanı değişiminin pişme süresi üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan varyans homojenlik testi

Varyans homojenlik testi

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
21.384	2	57	.000

c) Voltaj gradyanı değişiminin pişme süresi üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Anova testi

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	47975.433	2	23987.717	694.590	.000
Within Groups	1968.500	57	34.535		
Total	49943.933	59			

d) Voltaj gradyanı değişiminin pişme süresi üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Çoklu karşılaştırma testi

Çoklu karşılaştırma

Bağımlı Değişken: Süre

(I) voltaj		(J) voltaj	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Upper Bound	Lower Bound
Tukey HSD	15.00	20.00	46.70000(*)	1.85836	.000	42.2280	51.1720
		25.00	67.65000(*)	1.85836	.000	63.1780	72.1220
	20.00	15.00	-46.70000(*)	1.85836	.000	-51.1720	-42.2280
		25.00	20.95000(*)	1.85836	.000	16.4780	25.4220
	25.00	15.00	-67.65000(*)	1.85836	.000	-72.1220	-63.1780
		20.00	-20.95000(*)	1.85836	.000	-25.4220	-16.4780

* The mean difference is significant at the .05 level

e) Voltaj gradyanı değişiminin pişme süresi üzerine etkisinin belirlenmesinde homojenlik testi

Süre

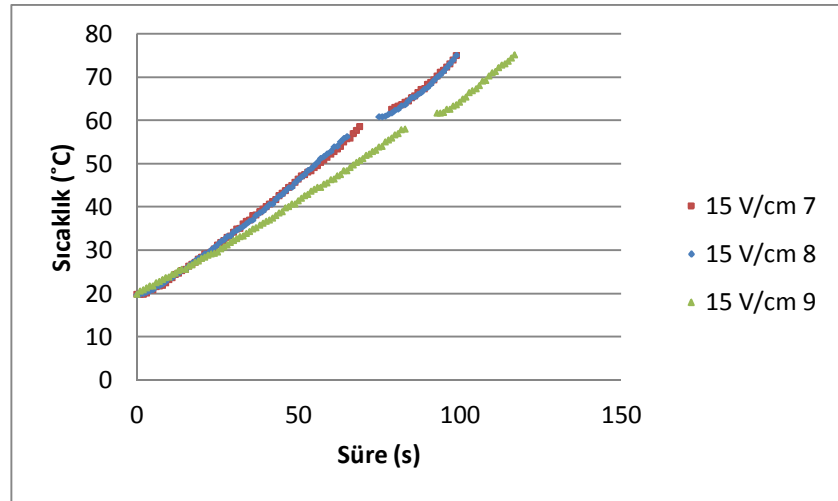
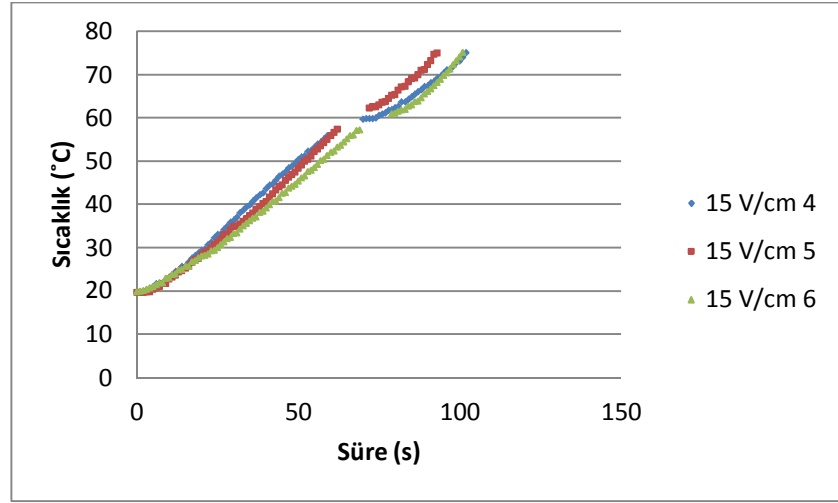
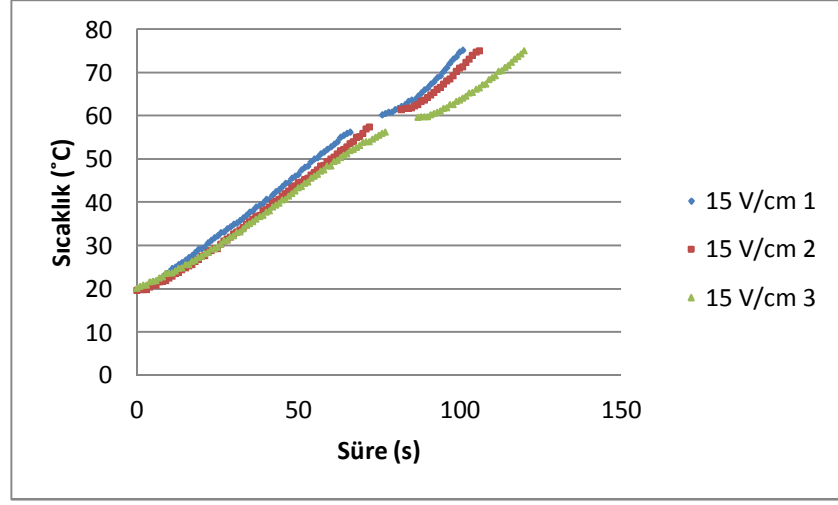
Voltaj		N	Subset for alpha = .05		
			1	2	3
Tukey HSD(a)	25.00	20	32.5000		
	20.00	20		53.4500	
	15.00	20			100.1500
	Sig.		1.000	1.000	1.000
Duncan(a)	25.00	20	32.5000		
	20.00	20		53.4500	
	15.00	20			100.1500
	Sig.		1.000	1.000	1.000

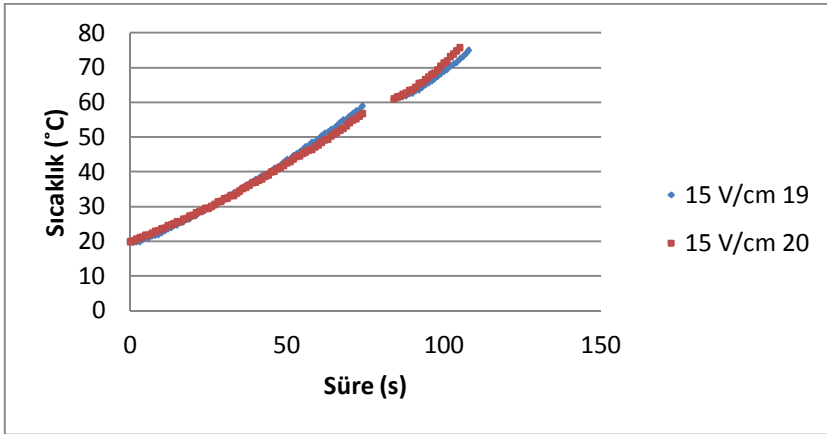
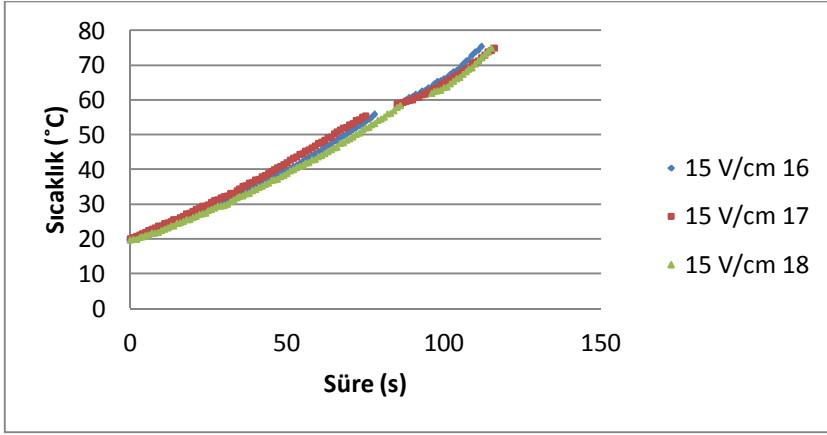
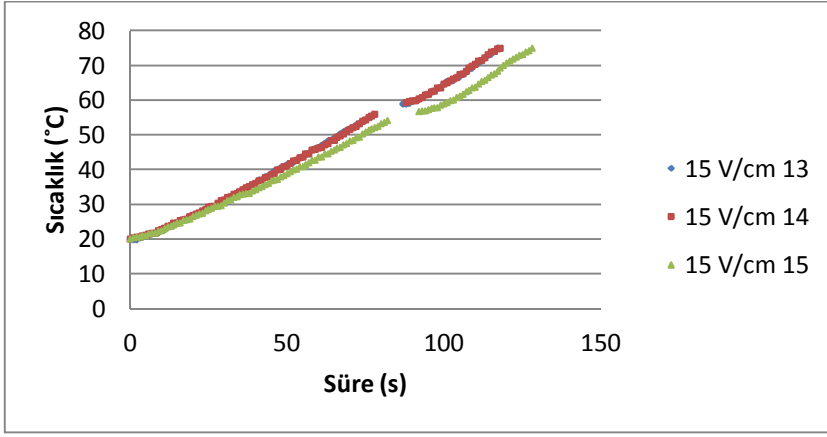
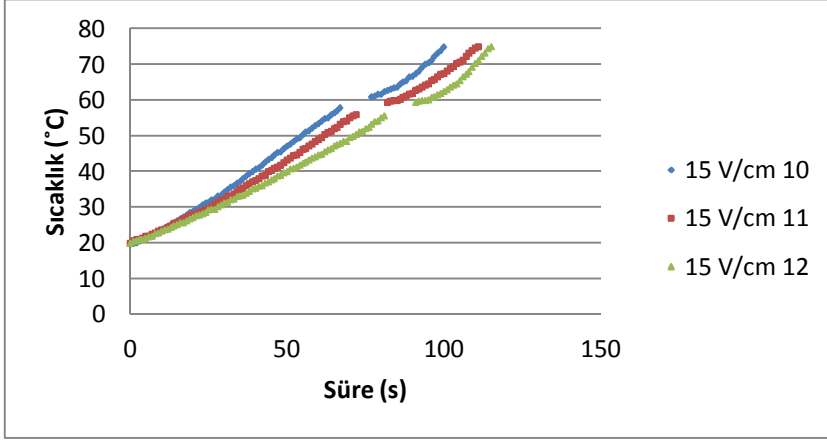
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20.000.

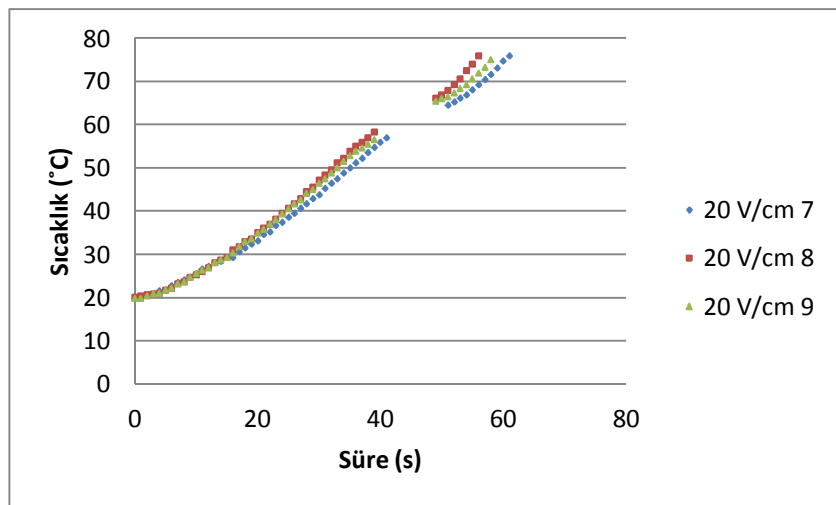
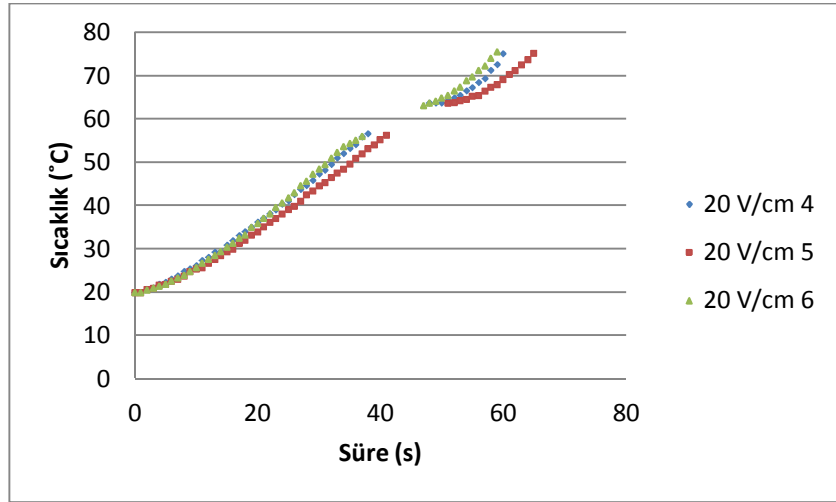
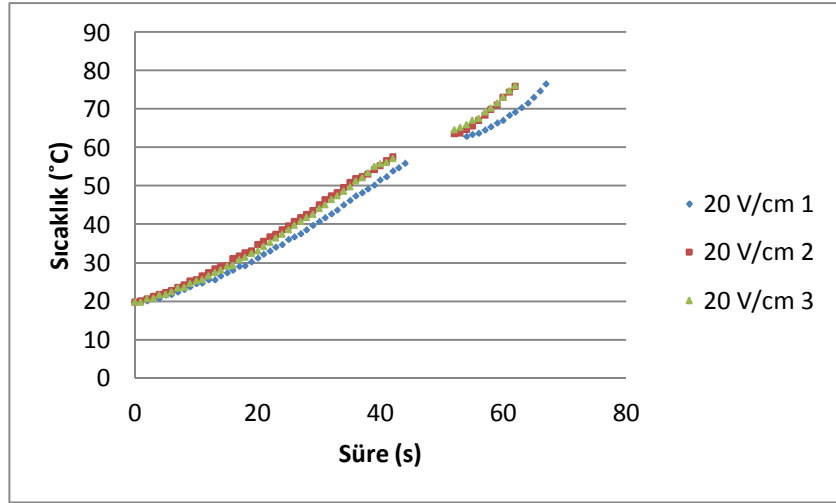
Ek 3. Farklı gradyanlarında örneklerin pişme süreleri a) 15V/cm, b) 20V/cm, c) 25V/cm

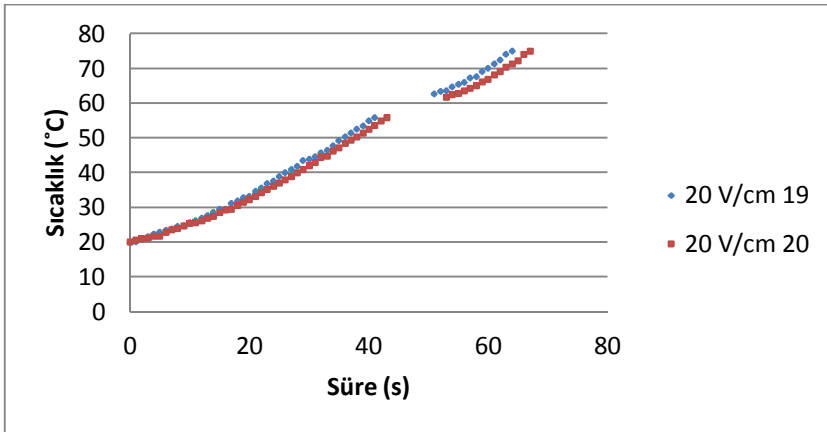
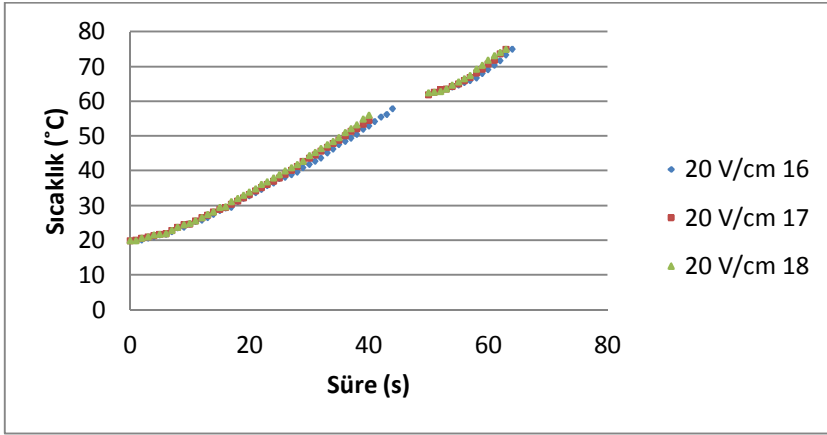
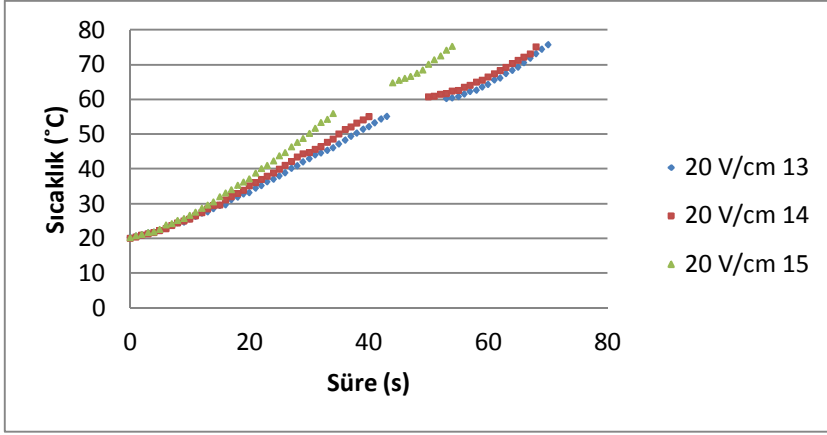
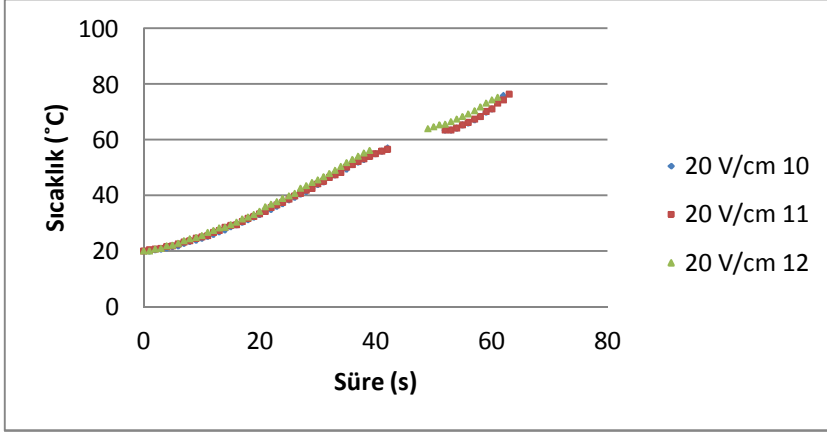
a) 15V/cm



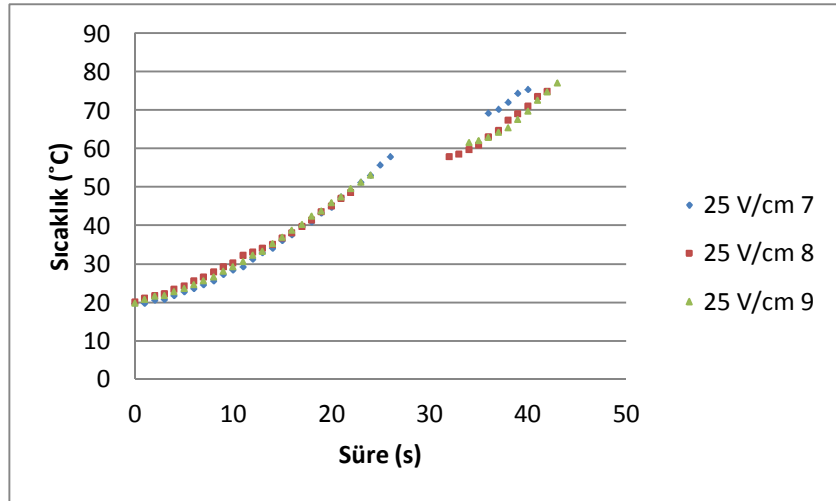
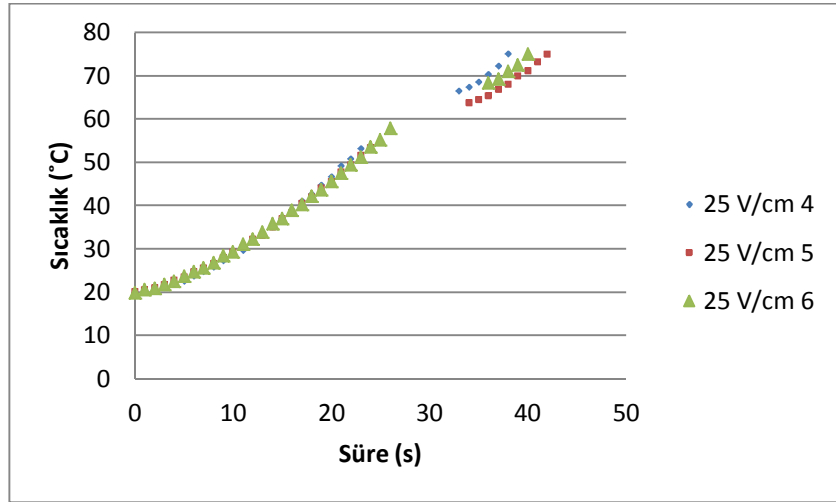
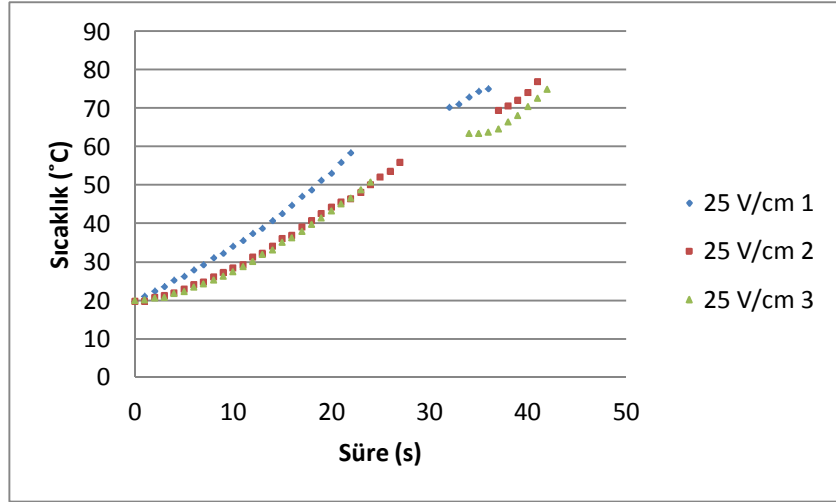


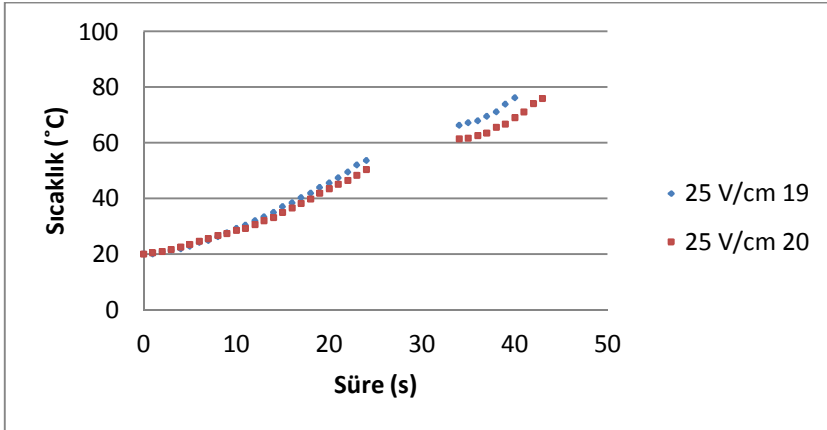
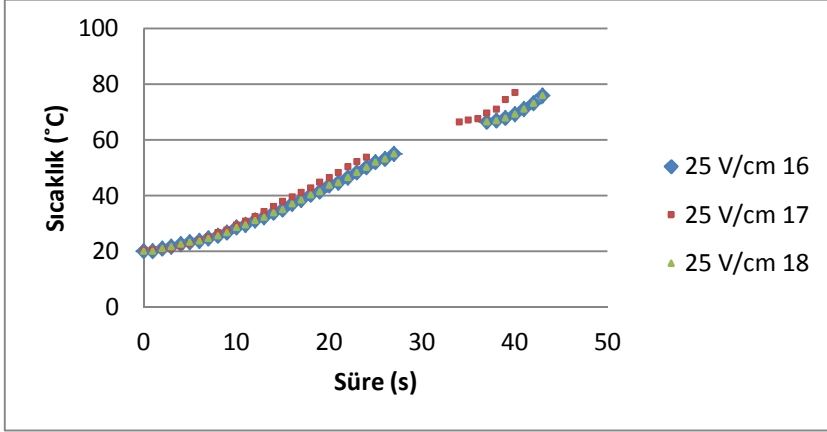
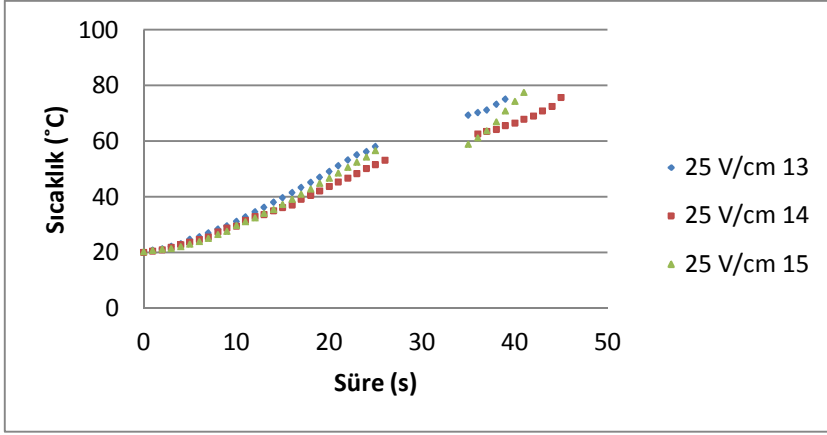
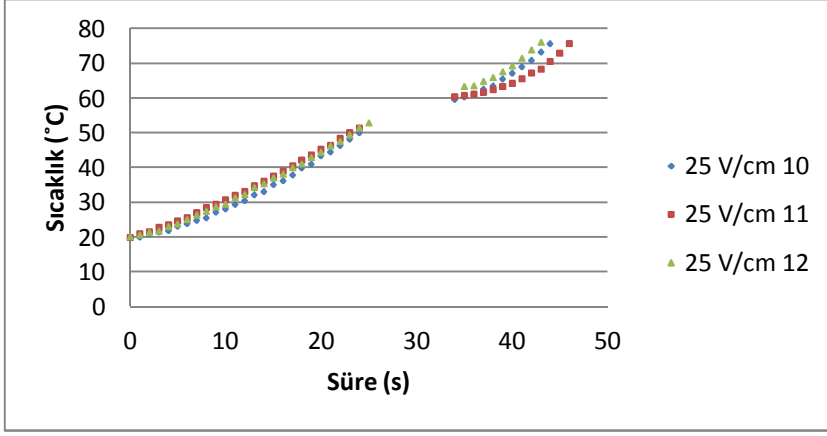
b) 20 V/cm





c) 25 V/cm





Ek 4. Voltaj gradyanı değişiminin bant, elektrot ve sıcaklık homojenliği özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel analiz sonuçları

a) Voltaj gradyanı değişiminin bant, elektrot ve sıcaklık homojenliği özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için tanımlama testi

Tanımlama

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum	Between-Component Variance
						Lower Bound	Upper Bound			
bant	15,00	20	30,0205	6,94905	1,55386	26,7682	33,2728	22,80	50,31	
	20,00	20	27,1850	3,26114	,72921	25,6587	28,7113	22,50	35,10	
	25,00	20	29,9155	6,37174	1,42477	26,9334	32,8976	24,70	50,81	
	Total	60	29,0403	5,81396	,75058	27,5384	30,5422	22,50	50,81	
	Model			5,75973	,74358	27,5513	30,5293			
	Fixed Effects				,92816	25,0468	33,0339			
elektrot	15,00	20	34,8950	3,74945	,83840	33,1402	36,6498	25,60	43,40	
	20,00	20	38,0060	7,32278	1,63742	34,5788	41,4332	26,10	53,21	
	25,00	20	36,2700	4,74742	1,06156	34,0481	38,4919	30,40	48,20	
	Total	60	36,3903	5,54089	,71533	34,9590	37,8217	25,60	53,21	
	Model			5,48390	,70797	34,9727	37,8080			
	Fixed Effects				,90008	32,5176	40,2631			
sh	15,00	20	1,2762	,09229	,02064	1,2330	1,3194	1,06	1,41	
	20,00	20	1,4056	,14722	,03292	1,3367	1,4745	1,12	1,64	
	25,00	20	1,3990	,11717	,02620	1,3442	1,4538	1,25	1,70	
	Total	60	1,3603	,13321	,01720	1,3258	1,3947	1,06	1,70	
	Model			,12099	,01562	1,3290	1,3915			
	Fixed Effects				,04209	1,1792	1,5413			

- b) Voltaj gradyanı değişiminin bant, elektrot ve sıcaklık homojenliği üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan varyans homojenlik testi

Varyans homojenlik testi

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
bant	1,053	2	57	,356
elektrot	3,232	2	57	,047
sh	3,167	2	57	,050

- c) Voltaj gradyanı değişiminin bant, elektrot ve sıcaklık homojenliği üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Anova testi

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
bant	Between Groups	103,378	2	51,689	1,558	,219
	Within Groups	1890,946	57	33,174		
	Total	1994,325	59			
elektrot	Between Groups	97,218	2	48,609	1,616	,208
	Within Groups	1714,171	57	30,073		
	Total	1811,389	59			
sh	Between Groups	,213	2	,106	7,260	,002
	Within Groups	,834	57	,015		
	Total	1,047	59			

d) Voltaj gradyanı değişiminin bant, elektrot ve sıcaklık homojenliği üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Çoklu karşılaştırma testi

Çoklu karşılaştırma

Dependent Variable		(I) voltaj gradyanı	(J) voltaj gradyanı	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
							Upper Bound	Lower Bound
bant	Tukey HSD	15,00	20,00	2,83550	1,82139	,273	-1,5475	7,2185
			25,00	,10500	1,82139	,998	-4,2780	4,4880
			20,00	-2,83550	1,82139	,273	-7,2185	1,5475
			25,00	-2,73050	1,82139	,299	-7,1135	1,6525
		25,00	15,00	-,10500	1,82139	,998	-4,4880	4,2780
			20,00	2,73050	1,82139	,299	-1,6525	7,1135
			20,00	-3,11100	1,73416	,181	-7,2841	1,0621
			25,00	-1,37500	1,73416	,709	-5,5481	2,7981
		20,00	15,00	3,11100	1,73416	,181	1,0621	7,2841
			25,00	1,73600	1,73416	,579	2,4371	5,9091
			25,00	1,37500	1,73416	,709	2,7981	5,5481
			20,00	-1,73600	1,73416	,579	-5,9091	2,4371
elektrot	Tukey HSD	15,00	20,00	-3,11100	1,73416	,181	-7,2841	1,0621
			25,00	-1,37500	1,73416	,709	-5,5481	2,7981
			20,00	3,11100	1,73416	,181	1,0621	7,2841
			25,00	1,73600	1,73416	,579	2,4371	5,9091
		25,00	15,00	1,37500	1,73416	,709	2,7981	5,5481
			20,00	-1,73600	1,73416	,579	-5,9091	2,4371
		20,00	15,00	3,11100	1,73416	,181	1,0621	7,2841
			25,00	1,73600	1,73416	,579	2,4371	5,9091
			25,00	1,37500	1,73416	,709	2,7981	5,5481
			20,00	-1,73600	1,73416	,579	-5,9091	2,4371
		25,00	15,00	1,37500	1,73416	,709	2,7981	5,5481
			20,00	-1,73600	1,73416	,579	-5,9091	2,4371
sh	Tukey HSD	15,00	20,00	-,12944(*)	,03826	,004	-,2215	-,0374
			25,00	-,12281(*)	,03826	,006	-,2149	-,0307
		20,00	15,00	-,12944(*)	,03826	,004	-,0374	-,2215
			25,00	-,00663	,03826	,984	-,0854	-,0987
		25,00	15,00	-,12281(*)	,03826	,006	-,0307	-,2149
			20,00	-,00663	,03826	,984	-,0987	-,0854

* The mean difference is significant at the .05 level.

- e) Voltaj gradyanı değişiminin bant, elektrot ve sıcaklık homojenliği üzerine etkisinin belirlenmesinde homojenlik testi

bant

Voltaj gradyanı		N	Subset for alpha = .05
			1
Tukey HSD(a)	20,00	20	27,1850
	25,00	20	29,9155
	15,00	20	30,0205
	Sig.		,273
Duncan(a)	20,00	20	27,1850
	25,00	20	29,9155
	15,00	20	30,0205
	Sig.		,147

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

elektrot

Voltaj gradyanı		N	Subset for alpha = .05
			1
Tukey HSD(a)	15,00	20	34,8950
	25,00	20	36,2700
	20,00	20	38,0060
	Sig.		,181
Duncan(a)	15,00	20	34,8950
	25,00	20	36,2700
	20,00	20	38,0060
	Sig.		,095

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

sh

voltajgradyanı		N	Subset for alpha = .05	
			1	2
Tukey HSD(a)	15,00	20	1,2762	
	25,00	20		1,3990
	20,00	20		1,4056
	Sig.		1,000	,984
Duncan(a)	15,00	20	1,2762	
	25,00	20		1,3990
	20,00	20		1,4056
	Sig.		1,000	,863

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000

Ek 5. Voltaj gradyanı değişiminin temassız alınan sıcaklık değerleri üzerine etkisi

a) Voltaj gradyanı değişiminin temassız alınan sıcaklık değerleri üzerine etkisinin belirlenmesi için tanımlama testi

			N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum	Between-Component Variance
							Lower Bound	Upper Bound			
55 °C'de	15,00		2	57,15	1,9898	,4449	56,22	58,086	53,00	61,00	10,74850
			0	50	4	4	37	3			
	20,00		2	61,09	3,1367	,7014	59,62	62,563	56,70	68,20	
			0	50	9	1	69	1			
	25,00		2	63,81	3,6234	,8102	62,11	65,505	58,80	72,00	
			0	00	5	3	42	8			
	Total		6	60,68	4,0327	,5206	59,64	61,728	53,00	72,00	
			0	67	7	3	49	4			
	Mo del	Fixed Effec ts Rand om Effec ts			2,9960	,3867	59,91	61,461			
					1	8	21	2			
Son	15,00		2	69,55	1,7129	,3830	68,75	70,356	66,70	73,30	10,47901
			0	50	5	3	33	7			
	20,00		2	73,70	3,0321	,6780	72,28	75,119	68,60	80,40	
			0	00	1	0	09	1			
	25,00		2	76,02	1,6516	,3693	75,24	76,793	72,80	78,40	
			0	00	7	2	70	0			
	Total		6	73,09	3,4722	,4482	72,19	73,988	66,70	80,40	
			0	17	3	6	47	6			
	Mo del	Fixed Effec ts Rand om Effec ts			2,2253	,2872	72,51	73,666			
					0	8	64	9			
Merk ez	15,00		2	70,96	3,5915	,8031	69,27	72,640	64,00	78,40	9,96823
			0	00	7	0	91	9			
	20,00		2	75,00	2,7545	,6159	73,71	76,289	67,40	79,30	
			0	00	2	3	08	2			
	25,00		2	77,37	3,4183	,7643	75,77	78,969	69,30	82,30	
			0	00	9	7	01	9			
	Total		6	74,44	4,1811	,5397	73,36	75,523	64,00	82,30	
			0	33	7	9	32	4			
	Mo del	Fixed Effec ts Rand om Effec ts			3,2747	,4227	73,59	75,289			
					6	7	68	9			

- b) Voltaj gradyanı değişiminin temassız alınan sıcaklık değerleri üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan varyans homojenlik testi

Test of Homogeneity of Variances

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
55 °C'de	4,020	2	57	,023
Son	4,082	2	57	,022
Merkez	,831	2	57	,441

- c) Voltaj gradyanı değişiminin temassız alınan sıcaklık değerleri üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan varyans homojenlik testi

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
55 °C'de	Between Groups	447,892	2	223,946	24,949	,000
	Within Groups	511,637	57	8,976		
	Total	959,529	59			
Son	Between Groups	429,064	2	214,532	43,323	,000
	Within Groups	282,262	57	4,952		
	Total	711,326	59			
Merkez	Between Groups	420,177	2	210,089	19,590	,000
	Within Groups	611,270	57	10,724		
	Total	1031,447	59			

d) Voltaj gradyanı değişiminin temassız alınan sıcaklık değerleri üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Çoklu karşılaştırma testi

Multiple Comparisons

							95% Confidence Interval	
Dependent Variable		(I) Voltaj Gradyani	(J) Voltaj Gradyani	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Upper Bound	Lower Bound
55 °C'de	Tukey HSD	15,00	20,00	-			-	-
			25,00	3,94000(*)	,94742	,000	6,2199	1,6601
		20,00	15,00	-			-	-
			25,00	6,65500(*)	,94742	,000	8,9349	4,3751
		25,00	15,00	3,94000(*)	,94742	,000	1,6601	6,2199
			20,00	-			-	-
	Son	15,00	20,00	2,71500(*)	,94742	,016	4,9949	-,4351
			25,00	6,65500(*)	,94742	,000	4,3751	8,9349
		20,00	15,00	2,71500(*)	,94742	,016	,4351	4,9949
			25,00	-			-	-
		25,00	15,00	4,14500(*)	,70370	,000	5,8384	2,4516
			20,00	-			-	-
Merkez	Tukey HSD	15,00	20,00	6,46500(*)	,70370	,000	8,1584	4,7716
			25,00	4,14500(*)	,70370	,000	2,4516	5,8384
		20,00	15,00	-			-	-
			25,00	2,32000(*)	,70370	,005	4,0134	-,6266
		25,00	15,00	6,46500(*)	,70370	,000	4,7716	8,1584
			20,00	2,32000(*)	,70370	,005	,6266	4,0134
	Tukey HSD	15,00	20,00	-			-	-
			25,00	4,04000(*)	1,03557	,001	6,5320	1,5480
		20,00	15,00	-			-	-
			25,00	6,41000(*)	1,03557	,000	8,9020	3,9180
		25,00	15,00	4,04000(*)	1,03557	,001	1,5480	6,5320
			20,00	-2,37000	1,03557	,066	4,8620	-,1220
Merkez	Tukey HSD	15,00	20,00	6,41000(*)	1,03557	,000	3,9180	8,9020
			25,00	2,37000	1,03557	,066	-,1220	4,8620

* The mean difference is significant at the .05 level.

- e) Voltaj gradyanı değişiminin temassız alınan sıcaklık değerleri üzerine etkisinin belirlenmesinde homojenlik testi

Ara Kademe Ölçümde

Voltaj Gradyanı		N	Subset for alpha = .05		
			1	2	3
Tukey HSD(a)	15,00	20	57,1550		
	20,00	20		61,0950	
	25,00	20			63,8100
Duncan(a)	Sig.		1,000	1,000	1,000
	15,00	20	57,1550		
	20,00	20		61,0950	
	25,00	20			63,8100
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

Son

Voltaj Gradyanı		N	Subset for alpha = .05		
			1	2	3
Tukey HSD(a)	15,00	20	69,5550		
	20,00	20		73,7000	
	25,00	20			76,0200
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	15,00	20	69,5550		
	20,00	20		73,7000	
	25,00	20			76,0200
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

merkez

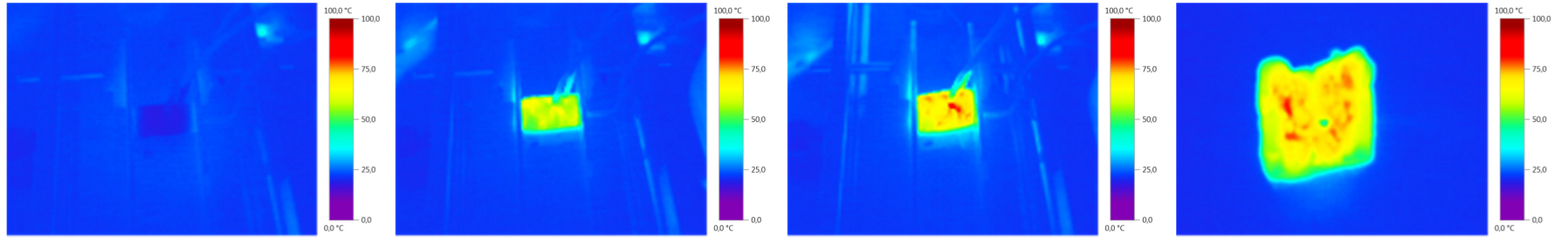
Voltaj Gradyani		N	Subset for alpha = .05		
			1	2	3
Tukey HSD(a)	15,00	20	70,9600		
	20,00	20		75,0000	
	25,00	20		77,3700	
	Sig.		1,000	,066	
Duncan(a)	15,00	20	70,9600		
	20,00	20		75,0000	
	25,00	20			77,3700
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

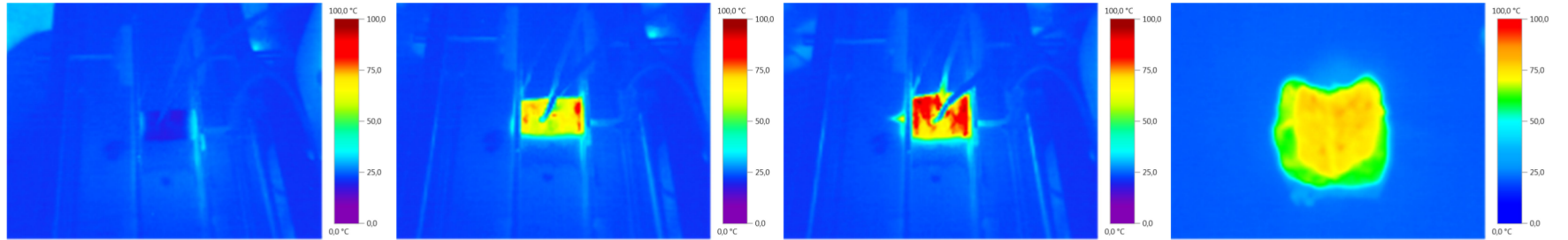
a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

Ek 6. Temassız sıcaklık ölçümü görüntüleri a)15 V/cm, b),20 V/cm, c)25 V/cm

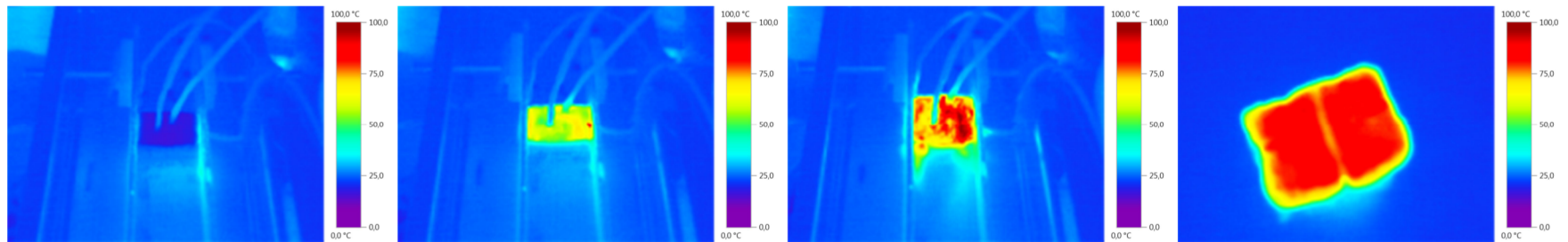
a)15 V/cm



b)20 V/cm



c) 25 V/cm



Ek 7. Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesinde kullanılan Model 1'in uyumluluğu a)15 V/cm, b)20 V/cm, c)25V/cm

a) 15V/cm

Tahminlenen parametreler

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
A	,003	,000	,003	,003
B	,446	,002	,442	,450

Tahminlenen parametrelerin korelasyonu

	A	B
A	1,000	-,938
B	-,938	1,000

ANOVA(a)

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	692,640	2	346,320
Residual	2,170	2021	,001
Uncorrected Total	694,810	2023	
Corrected Total	7,339	2022	

Dependent variable: EC

a R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = ,704.

b) 20 V/cm

Tahminlenen parametreler

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
A	,002	,000	,002	,002
B	,434	,001	,431	,437

Tahminlenen parametrelerin korelasyonu

	a	b
a	1,000	-,930
b	-,930	1,000

ANOVA(a)

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	301,660	2	150,830
Residual	,335	1087	,000
Uncorrected Total	301,995	1089	
Corrected Total	1,742	1088	

Dependent variable: EC

a R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = ,808.

c) 25 V/cm

Tahminlenen parametreler

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
A	,001	,000	,001	,001
B	,428	,003	,422	,433

Tahminlenen parametrelerin korelasyonu

	a	b
a	1,000	-,924
b	-,924	1,000

ANOVA(a)

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	152,381	2	76,190
Residual	,545	668	,001
Uncorrected Total	152,926	670	
Corrected Total	,818	669	

Dependent variable: EC

a R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = ,333.

Ek 8. Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesinde kullanılan Model 2'in uyumluluğu

Tahminlenen parametreler

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
A	-,010	,000	-,010	-,010
B	,002	,000	,002	,002
C	,626	,003	,621	,632

Tahminlenen parametrelerin korelasyonu

	A	B	C
A	1,000	,062	-,871
B	,062	1,000	-,511
C	-,871	-,511	1,000

ANOVA(a)

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	1145,811	3	381,937
Residual	3,920	3779	,001
Uncorrected Total	1149,731	3782	
Corrected Total	16,368	3781	

Dependent variable: EC

a R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = ,760.

Ek 9. Elektriksel iletkenlik değişiminin modellenmesinde kullanılan Model 3'in uyumluluğu

Tahminlenen parametreler

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
A	52,282	806,232	-1528,411	1632,975
B	-2,842	,477	-3,778	-1,906
C	-51,104	806,272	-1631,875	1529,667
N1	-,003	,054	-,110	,103
N2	-,876	,069	-1,012	-,740

Tahminlenen parametrelerin korelasyonu

	A	B	C	N1	N2
A	1,000	,015	-1,000	1,000	,015
B	,015	1,000	-,015	,015	,997
C	-1,000	-,015	1,000	-1,000	-,015
N1	1,000	,015	-1,000	1,000	,015
N2	,015	,997	-,015	,015	1,000

ANOVA(a)

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	1146,059	5	229,212
Residual	3,672	3777	,001
Uncorrected Total	1149,731	3782	
Corrected Total	16,368	3781	

Dependent variable: EC

a $R^2 = 1 - (\text{Residual Sum of Squares}) / (\text{Corrected Sum of Squares}) = ,776$.

a) Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin enerjetik ve ekserjetik performans değerlendirmesinin belirlenmesi için yapılan Tanımlama testi

[illegible]

- b) Sürekli sistem ohmik pişirme işleminin enerjetik ve ekserjetik performans değerlendirmesinin belirlenmesi için yapılan varyans homojenlik testi

Varyans homojenlik testi

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Ekserji_verimliliği	,760	2	57	,472
Enerji_verimliliği	,773	2	57	,466
enerji_kaybi	,834	2	57	,440
Ekserji_kaybi	,834	2	57	,440
Ekserji_ölü	,869	2	57	,425
IP	1,967	2	57	,149

- c) Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için yapılan Anova testi

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Ekserji_verimliliği	Between Groups	1967,829	2	983,915	60,374	,000
	Within Groups	928,931	57	16,297		
	Total	2896,760	59			
Enerji_verimliliği	Between Groups	2136,664	2	1068,332	59,067	,000
	Within Groups	1030,939	57	18,087		
	Total	3167,603	59			
enerji_kaybi	Between Groups	115580665,071	2	57790332,536	78,722	,000
	Within Groups	41843867,990	57	734102,947		
	Total	157424533,062	59			
Ekserji_kaybi	Between Groups	496044,869	2	248022,435	78,722	,000
	Within Groups	179583,774	57	3150,593		
	Total	675628,644	59			
Ekserji_ölü	Between Groups	100917386,699	2	50458693,349	79,403	,000
	Within Groups	36222126,317	57	635475,900		
	Total	137139513,016	59			
IP	Between Groups	66675119,154	2	33337559,577	76,817	,000
	Within Groups	24737282,373	57	433987,410		
	Total	91412401,527	59			

d) Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesinde Çoklu Karşılaştırma Testi

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) Voltaj_grad yani	(J) Voltaj_grad yani	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
							Lower Bound	Upper Bound
Ekserji_verimliliği	Tuk ey HS D	15,00	20,00	-7,69850(*)	1,27660	,000	-10,7705	-4,6265
			25,00	-14,00489(*)	1,27660	,000	-17,0769	-10,9329
		20,00	15,00	7,69850(*)	1,27660	,000	4,6265	10,7705
			25,00	6,30639(*)	1,27660	,000	-9,3784	-3,2344
		25,00	15,00	14,00489(*)	1,27660	,000	10,9329	17,0769
			20,00	6,30639(*)	1,27660	,000	3,2344	9,3784
			20,00	-8,16090(*)	1,34487	,000	-11,3972	-4,9246
			25,00	-14,58281(*)	1,34487	,000	-17,8191	-11,3465
Enerji_verimliliği	Tuk ey HS D	15,00	20,00	-8,16090(*)	1,34487	,000	-11,3972	-4,9246
			25,00	-14,58281(*)	1,34487	,000	-17,8191	-11,3465
		20,00	15,00	8,16090(*)	1,34487	,000	4,9246	11,3972
			25,00	6,42191(*)	1,34487	,000	-9,6582	-3,1856
		25,00	15,00	14,58281(*)	1,34487	,000	11,3465	17,8191
			20,00	6,42191(*)	1,34487	,000	3,1856	9,6582
			20,00	-1969,92850(*)	270,94334	,000	-2621,9315	-1317,9255
			25,00	-3384,56550(*)	270,94334	,000	-4036,5685	-2732,5625
enerji_kaybı	Tuk ey HS D	15,00	20,00	-1969,92850(*)	270,94334	,000	-2621,9315	-1317,9255
			25,00	-1414,63700(*)	270,94334	,000	-2066,6400	-1762,6340
		20,00	15,00	1969,92850(*)	270,94334	,000	1317,9255	2621,9315
			25,00	3384,56550(*)	270,94334	,000	2732,5625	4036,5685
		25,00	15,00	1414,63700(*)	270,94334	,000	1762,6340	2066,6400
			20,00	1969,92850(*)	270,94334	,000	1317,9255	2621,9315
			20,00	-1414,63700(*)	270,94334	,000	-2066,6400	-1762,6340
			25,00	-3384,56550(*)	270,94334	,000	-4036,5685	-2732,5625
Ekserji_kaybı	Tuk ey HS D	15,00	20,00	-129,05316(*)	17,74991	,000	-171,7669	-86,3395
			25,00	-221,72813(*)	17,74991	,000	-264,4418	-179,0144
		20,00	15,00	129,05316(*)	17,74991	,000	86,3395	171,7669
			25,00	221,72813(*)	17,74991	,000	179,0144	264,4418

Ekserji_ölü	Tuk ey HS D	25,00	25,00	92,67496()	17,749 91	,00 0	49,961 3	135,38 87
			15,00	- 221,72813 (*)	17,749 91	,00 0	- 264,44 18	- 179,01 44
			20,00	- 92,67496()	17,749 91	,00 0	- 135,38 87	- 49,961 3
			20,00	1845,0160 0(*)	252,08 647	,00 0	1238,3 905	2451,6 415
		20,00	25,00	3162,0930 0(*)	252,08 647	,00 0	2555,4 675	3768,7 185
			15,00	- 1845,0160 0(*)	252,08 647	,00 0	- 2451,6 415	- 1238,3 905
			25,00	1317,0770 0(*)	252,08 647	,00 0	710,45 15	1923,7 025
			15,00	- 3162,0930 0(*)	252,08 647	,00 0	- 3768,7 185	- 2555,4 675
		15,00	20,00	- 1317,0770 0(*)	252,08 647	,00 0	- 1923,7 025	- 710,45 15
			20,00	1580,8380 0(*)	208,32 364	,00 0	1079,5 242	2082,1 518
			25,00	2558,5670 0(*)	208,32 364	,00 0	2057,2 532	3059,8 808
			15,00	- 1580,8380 0(*)	208,32 364	,00 0	- 2082,1 518	- 1079,5 242
		25,00	25,00	977,72900 (*)	208,32 364	,00 0	476,41 52	1479,0 428
			15,00	- 2558,5670 0(*)	208,32 364	,00 0	- 3059,8 808	- 2057,2 532
			20,00	- 977,72900 (*)	208,32 364	,00 0	- 1479,0 428	- 476,41 52
			20,00	977,72900 (*)	208,32 364	,00 0	1479,0 428	476,41 52

* The mean difference is significant at the .05 level.

- e) Voltaj gradyanı değişiminin kompozisyon ve fiziksel özellikler üzerine etkisinin belirlenmesinde Homojenlik testleri a) Ekserji verimliliği b) Enerji verimliliği c) Enerji Kaybı d)Ekserji kaybı e) Ölü ekserji f) IP

a) Ekserji verimliliği

Ekserji_verimliliği

Voltaj_gradyani		N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3	1
Tukey HSD(a)	15,00	20	44,0956		
	20,00	20		51,7941	
	25,00	20			58,1005
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	15,00	20	44,0956		
	20,00	20		51,7941	
	25,00	20			58,1005
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

b) Enerji verimliliği

Enerji_verimliliği

Voltaj_gradyani		N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3	1
Tukey HSD(a)	15,00	20	51,0978		
	20,00	20		59,2587	
	25,00	20			65,6806
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	15,00	20	51,0978		
	20,00	20		59,2587	
	25,00	20			65,6806
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

c) Enerji kaybı

enerji_kaybi

Voltaj_gradyani		N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3	1
Tukey HSD(a)	25,00	20	4158,8670		
	20,00	20		5573,5040	
	15,00	20			7543,4325
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	25,00	20	4158,8670		
	20,00	20		5573,5040	
	15,00	20			7543,4325
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

d) Ekserji kaybı

Ekserji_kaybi

Voltaj_gradyani		N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3	1
Tukey HSD(a)	25,00	20	272,4538		
	20,00	20		365,1288	
	15,00	20			494,1820
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	25,00	20	272,4538		
	20,00	20		365,1288	
	15,00	20			494,1820
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

e) Ölü ekserji

Ekserji_ölü

Voltaj_gradyani		N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3	1
Tukey HSD(a)	25,00	20	4066,6730		
	20,00	20		5383,7500	
	15,00	20			7228,7660
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	25,00	20	4066,6730		
	20,00	20		5383,7500	
	15,00	20			7228,7660
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

f) IP

IP

Voltaj_gradyani		N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3	1
Tukey HSD(a)	25,00	20	1969,9925		
	20,00	20		2947,7215	
	15,00	20			4528,5595
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	25,00	20	1969,9925		
	20,00	20		2947,7215	
	15,00	20			4528,5595
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 20,000.

Ek 11. Matematiksel model öngörülerinin deneysel sonuçlarla olan istatistiksel uyumu

	Merkez				Yüzey			
	X ²	RMSE	r	% Fark	X ²	RMSE	r	% Fark
15 V/cm-1	2.94	1.70	1.00	-0.19	44.61	6.57	0.99	11.12
15 V/cm-2	0.00	0.05	1.00	4.73	0.06	0.25	0.99	17.58
15 V/cm-3	0.29	0.54	1.00	7.46	27.90	5.25	1.00	18.20
15 V/cm-4	8.88	0.35	1.00	-2.96	72.33	1.46	1.00	13.53
15 V/cm-5	18.12	4.21	1.00	-1.74	20.78	4.48	0.99	7.36
15 V/cm-6	3.88	1.95	1.00	2.77	44.62	6.61	1.00	10.72
15 V/cm-7	5.25	2.27	1.00	0.88	20.95	4.50	0.99	6.75
15 V/cm-8	5.59	2.34	1.00	0.62	38.23	6.08	1.00	9.13
15 V/cm-9	24.78	4.93	1.00	8.79	21.31	4.55	1.00	5.24
15 V/cm-10	3.58	1.87	1.00	0.17	50.53	6.99	1.00	10.85
15 V/cm-11	7.60	2.73	1.00	5.87	132.23	11.33	0.99	11.37
15 V/cm-12	39.87	6.25	1.00	11.73	333.72	18.08	0.98	14.17
15 V/cm-13	23.37	4.79	1.00	10.06	141.91	11.73	0.99	20.65
15 V/cm-14	23.84	4.83	1.00	9.88	168.12	12.77	0.99	24.57
15 V/cm-15	60.31	7.69	1,00	14,33	218,02	14,54	0,99	23,68
15 V/cm-16	26,85	5,13	0,99	10,62	78,48	8,72	0,99	15,29
15 V/cm-17	16,74	4,05	1,00	7,68	126,87	11,15	0,99	19,84
15 V/cm-18	46,71	6,77	0,99	13,39	153,61	12,21	0,98	20,48
15 V/cm-19	6,91	2,60	1,00	6,07	106,76	10,18	0,99	17,88
15 V/cm-20	9,95	3,12	0,99	6,05	128,97	11,18	0,99	21,65
20 V/cm-1	59,48	7,57	0,99	15,45	221,11	14,59	0,98	23,48
20 V/cm-2	18,33	4,20	0,99	8,78	123,78	10,92	1,00	16,36
20 V/cm-3	24,13	4,82	0,99	10,00	235,93	15,07	0,99	26,20
20 V/cm-4	8,38	2,84	1,00	5,90	145,57	11,83	0,99	21,42
20 V/cm-5	9,84	3,08	0,99	5,21	95,53	9,59	0,99	15,38
20 V/cm-6	9,09	2,96	1,00	5,17	76,46	8,57	0,99	14,70
20 V/cm-7	22,77	4,68	0,99	9,36	199,11	13,84	0,98	22,23
20 V/cm-8	16,76	4,01	0,99	6,36	172,94	12,87	0,95	21,43

20 V/cm-9	15,25	3,83	0,99	7,07	68,52	8,11	0,99	14,58
20 V/cm-10	27,84	5,18	0,99	11,14	127,69	11,09	0,99	19,18
20 V/cm-11	25,59	4,96	0,99	10,52	238,06	15,14	0,99	24,06
20 V/cm-12	14,70	3,76	0,99	7,44	182,48	13,12	0,97	22,11
20 V/cm-13	48,04	6,80	1,00	12,97	59,98	7,60	1,00	10,55
20 V/cm-14	24,26	4,83	1,00	9,75	170,68	12,70	0,99	19,15
20 V/cm-15	18,87	4,25	0,99	0,86	15,18	3,81	0,97	3,42
20 V/cm-16	43,88	6,50	0,99	13,50	43,88	6,50	0,99	24,93
20 V/cm-17	27,70	5,17	0,99	11,00	99,94	9,72	0,98	16,66
20 V/cm-18	22,72	4,68	0,99	10,03	224,99	14,72	0,98	25,63
20 V/cm-19	26,24	5,03	0,99	10,29	116,56	10,59	0,98	16,94
20 V/cm-20	47,28	6,75	0,99	13,49	144,99	11,82	0,98	17,68
25 V/cm-1	19,41	4,25	0,98	-0,62	46,62	6,58	0,98	10,80
25 V/cm-2	55,86	7,24	0,97	14,05	126,62	10,91	0,96	19,49
25 V/cm-3	51,73	6,97	0,98	14,62	162,10	12,34	0,95	19,55
25 V/cm-4	37,26	5,90	0,97	10,52	119,55	10,56	0,98	22,09
25 V/cm-5	31,53	5,44	0,99	11,06	193,35	13,46	0,98	20,26
25 V/cm-6	35,00	5,73	0,98	11,30	151,26	11,71	0,96	18,01
25 V/cm-7	43,61	6,39	0,98	12,73	107,58	10,04	0,97	18,54
25 V/cm-8	27,30	5,06	0,99	10,11	141,46	11,34	0,97	17,12
25 V/cm-9	31,17	5,41	0,99	11,64	153,73	12,02	0,97	17,83
25 V/cm-10	54,16	7,13	0,98	15,21	150,59	11,89	0,98	16,85
25 V/cm-11	795,46	27,18	0,99	11,76	613,59	23,41	0,99	20,12
25 V/cm-12	257,24	15,46	0,99	12,36	440,52	19,83	0,99	26,05
25 V/cm-13	19,08	4,21	0,99	7,19	126,57	10,63	0,98	19,91
25 V/cm-14	51,35	6,95	0,99	14,17	277,66	15,89	0,98	26,58
25 V/cm-15	33,14	5,58	0,99	12,02	207,65	13,74	0,98	26,71
25 V/cm-16	59,46	7,47	0,98	15,41	109,80	10,16	0,98	17,25
25 V/cm-17	30,07	5,31	0,98	10,11	111,96	10,25	0,98	19,04
25 V/cm-18	16,06	3,88	0,99	7,79	101,33	9,76	0,98	14,36
25 V/cm-19	35,47	5,77	0,98	11,00	190,17	13,35	0,97	22,95
25 V/cm-20	50,49	6,89	0,98	14,15	126,64	10,91	0,97	17,59