

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**TAVUK KÖFTESİNİN PİŞİRİLMESİNDE UYGULANAN YENİLİKÇİ BİR  
YÖNTEM: OHMİK ISITMA**

**Serap SABANCI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN**  
**Dr. Öğr. Üyesi Ferit AK**  
**Dr. Öğr. Üyesi Basri OMAÇ**

**TUNCELİ – 2025**

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TAVUK KÖFTESİNİN PİŞİRİLMESİNDE UYGULANAN YENİLİKÇİ BİR  
YÖNTEM: OHMİK ISITMA**

**Serap SABANCI**  
**(220040003)**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN**  
**Dr. Öğr. Üyesi Ferit AK**  
**Dr. Öğr. Üyesi Basri OMAÇ**

**TUNCELİ – 2025**

T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TAVUK KÖFTESİNİN PİŞİRİLMESİNDE UYGULANAN YENİLİKÇİ BİR  
YÖNTEM: OHMİK ISITMA**

Serap SABANCI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 30/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

**İmza**

Dr. Öğr. Ayşe Burcu  
ATALAY  
(Kahramanmaraş İstiklal  
Üniversitesi)

**BAŞKAN**

**İmza**

Dr. Öğr. Üyesi Ferit AK  
(Munzur Üniversitesi)

**DANIŞMAN**

**İmza**

Dr. Öğr. Üyesi Emrah  
KARAKAVUK  
(Munzur Üniversitesi)

**ÜYE**

Bu tez, Enstitümüz Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN  
Enstitü Müdürü  
İmza ve Mühür

**NOT:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu” ndaki hükümlere tabidir.

30/05/2025

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza  
Serap SABANCI

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Ferit AK

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanması, yürütülmesi ve tamamlanması sürecinde, bilgi birikimi, akademik rehberliği ve değerli katkılarıyla her zaman yanımda olan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ferit AK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmamın gelişimine sağladığı katkılarından dolayı ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Basri OMAÇ'a, Tez savunma jüri üyelerim Dr. Öğr. Üyesi Emrah KARAKAVUK'a ve Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Burcu ATALAY'a, değerlendirmeleri ve önerilerinden dolayı teşekkür ederim.

Tez sürecinde her zaman yanımda olan, sevgileri, sabırları ve destekleriyle bana güç veren aileme; kıymetli annem Serpil DOĞAN'a, babam Kemal DOĞAN'a, hayat arkadaşım Serdal SABANCI'ya ve sevgili evlatlarım Havva Sena SABANCI, Serpil SABANCI ve Serra SABANCI'ya sonsuz teşekkür ederim. Varlıkları, bu sürecin en büyük ilham ve motivasyon kaynağı olmuştur.

Ayrıca çalışmam boyunca bilgi, zaman ve desteğini paylaşan tüm akademisyenlere, arkadaşlarıma ve emeği geçen herkese içtenlikle teşekkür ederim.

**Serap SABANCI  
TUNCELİ - 2025**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                      |      |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....                    | I    |
| TEŞEKKÜR.....                                                        | II   |
| İÇİNDEKİLER.....                                                     | III  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                               | IV   |
| TABLOLAR LİSTESİ .....                                               | V    |
| SEMBOLLER LİSTESİ .....                                              | VI   |
| KISALTMALAR LİSTESİ .....                                            | VII  |
| ÖZET .....                                                           | VIII |
| ABSTRACT .....                                                       | IX   |
| 1. GİRİŞ.....                                                        | 1    |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ .....                                             | 5    |
| 2.1. Tavuk ve Tavuk Eti .....                                        | 5    |
| 2.2. Ohmik Isıtma .....                                              | 7    |
| 2.3. Ohmik Isıtma İşlemi ile Yapılmış Et Uygulamaları .....          | 8    |
| 3. MATERYAL VE METOT .....                                           | 15   |
| 3.1. Hammaddenin hazırlanması .....                                  | 15   |
| 3.2. Ohmik Isıtma Sistemi ve Ohmik Pişirme İşlemi .....              | 15   |
| 3.3. Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi .....                         | 16   |
| 3.4. Elektriksel İletkenlik Değerinin Belirlenmesi .....             | 17   |
| 3.5. Tekstürel Özelliklerin Belirlenmesi.....                        | 17   |
| 3.6. CIELab Renk Ölçümü .....                                        | 18   |
| 3.7. <i>Salmonella</i> 'nın Ekimi ve Sayımı .....                    | 19   |
| 3.8. İstatistiksel Değerlendirme .....                               | 20   |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                        | 21   |
| 4.1. Tavuk Köftesi Örneklerinin Pişirilmesi.....                     | 21   |
| 4.2. Ohmik Pişirme İşlemi Sırasında Temassız Sıcaklık Ölçümü .....   | 24   |
| 4.3. Elektriksel İletkenlik Değerindeki Değişim .....                | 27   |
| 4.4. Tavuk Köftelerinin Tekstür Değerleri .....                      | 30   |
| 4.4.1. Tavuk köftelerinin sertlik değeri .....                       | 31   |
| 4.4.2. Tavuk köftelerinin dış yapışkanlık değeri .....               | 32   |
| 4.4.3. Tavuk köftelerinin esneklik değeri .....                      | 33   |
| 4.4.4. Tavuk köftelerinin iç yapışkanlık değeri .....                | 34   |
| 4.4.5. Tavuk köftelerinin sakızımsılık değeri .....                  | 35   |
| 4.4.6. Tavuk köftelerinin çiğnenebilirlik değeri .....               | 36   |
| 4.4.7. Tavuk köftelerinin elastiklik değeri.....                     | 37   |
| 4.5. Tavuk Köftelerinin Renk Değerleri .....                         | 38   |
| 4.6. Tavuk Köftelerindeki <i>Salmonella</i> 'nın İnaktivasyonu ..... | 41   |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                           | 47   |
| 6. KAYNAKLAR.....                                                    | 49   |
| ÖZGEÇMİŞ                                                             |      |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Dünya kanatlı eti üretiminde önde gelen ülkeler ve üretim miktarları .....                                                     | 6  |
| Şekil 3.1. Ohmik ısıtma işlemi .....                                                                                                      | 16 |
| Şekil 4.1. Tavuk köftesi örneğinin 3 farklı voltaj gradyanında ohmik ısıtma işlemi ile pişirilmesi .....                                  | 22 |
| Şekil 4.2. Köfte örneklerinin ohmik ısıtma ile pişirilmesi sırasında temassız sıcaklık dağılımı .....                                     | 23 |
| Şekil 4.3. Ohmik pişirme işlemi sırasında farklı voltaj gradyanlarına ait sıcaklık artışına karşı akım ve Eİ değerleri .....              | 29 |
| Şekil 4.4. Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait sertlik değerine etkisi .....                   | 32 |
| Şekil 4.5. Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait dış yapışkanlık değerine etkisi .....           | 33 |
| Şekil 4.6. Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait esneklik değerine etkisi .....                  | 34 |
| Şekil 4.7. Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait iç yapışkanlık değerine etkisi .....            | 35 |
| Şekil 4.8. Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait sakızimsılık değerine etkisi .....              | 36 |
| Şekil 4.9. Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait çiğnenebilirlik değerine etkisi .....           | 37 |
| Şekil 4.10. Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait elastikiyet değerine etkisi .....              | 38 |
| Şekil 4.11. Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesindeki <i>Salmonella</i> konsantrasyonuna etkisi ..... | 42 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 4.1.</b> Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait renk değerlerine etkisi ..... | 40 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## SİMGELER LİSTESİ

|                |                                              |   |
|----------------|----------------------------------------------|---|
| %              | : Yüzde                                      | : |
| <              | : Küçük                                      |   |
| >              | : Büyük                                      |   |
| °C             | : Santigrat Derece                           |   |
| A              | : Alan                                       |   |
| a*             | : Renk boyutsuzluğu (+kırmızılık – yeşillik) |   |
| b*             | : Renk boyutsuzluğu (+sarılık – mavilik)     |   |
| cfu/cob        | : Koloni oluşturan birim                     |   |
| cm             | : Santimetre                                 |   |
| g              | : Gram                                       |   |
| Hz             | : Hertz                                      |   |
| I              | : Akım                                       |   |
| kg             | : Kilogram                                   |   |
| kHz            | : Kiloherertz                                |   |
| kV             | : Kilovolt                                   |   |
| kW             | : Kilowatt                                   |   |
| L              | : mesafe                                     |   |
| L*             | : Renk boyutsuzluğu (+koyuluk /açıklık)      |   |
| log            | : Logaritmik                                 |   |
| m <sup>2</sup> | : Metrekare                                  |   |
| mL             | : Mililitre                                  |   |
| mm             | : Milimetre                                  |   |
| N              | : Nevton (kuvvet birimi)                     |   |
| p              | : Probability                                |   |
|                | İstatistiksel anlamlılık (olasılık) değeri   |   |
| S/m            | : Siemens/metre                              |   |
| V              | : Volt                                       |   |
| σ              | : Elektrik iletkenliği                       |   |

## KISALTMALAR LİSTESİ

|              |                                                                                        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ABD</b>   | : Amerika Birleşik Devletleri                                                          |
| <b>BPW</b>   | : Buffered peptone water<br>Tamponlu peptonlu su                                       |
| <b>C</b>     | : Pişirme değeri                                                                       |
| <b>CIE</b>   | : Commission Internationale de l'Eclairage<br>(Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)      |
| <b>DIASS</b> | : Digestible indispensable amino acid score<br>Sindirilebilir zorunlu Amino Asit Skoru |
| <b>DYA</b>   | : Doymuş yağ asidi                                                                     |
| <b>Eİ</b>    | : Elektriksel iletkenlik                                                               |
| <b>FAO</b>   | : Gıda ve Tarım Örgütü                                                                 |
| <b>Mol</b>   | : Molarite                                                                             |
| <b>OECD</b>  | : Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü                                                |
| <b>PU</b>    | : Pastörizasyon ünitesi                                                                |
| <b>PS</b>    | : Peptonlu su                                                                          |
| <b>rpm</b>   | : Revolutions per minute<br>Dakikadaki devir sayısı                                    |
| <b>SPSS</b>  | : Statistical Package for the Social Sciences                                          |
| <b>TH</b>    | : Çözündürme homojenliği                                                               |
| <b>TMAB</b>  | : Toplam mezofilik aerofilik bakteri                                                   |
| <b>TPA</b>   | : Tekstür profil analizi                                                               |
| <b>TSA</b>   | : Tryptic soy agar<br>Triptik soya agarı                                               |
| <b>TSB</b>   | : Trypticase soy broth<br>Triptikaz soya broth                                         |
| <b>TÜİK</b>  | : Türkiye İstatistik Kurumu                                                            |
| <b>XLD</b>   | : Xylose Lysine Deoxycholate<br>Ksiloz lisin deoksikolat                               |

## ÖZET

Bu çalışma, ohmik ısıtma teknolojisinin tavuk köftesinin pişirme sürecine etkilerini araştırmak amacıyla yürütülmüştür. Ohmik ısıtma, gıda ürünleri içerisinde elektrik akımının doğrudan geçirilmesi yoluyla hacimsel ve homojen ısı üretimi sağlayan modern bir ısıtma yöntemidir. Çalışmada, tavuk göğüs eti kullanılarak hazırlanan köfte numuneleri, üç farklı voltaj gradyanında (7, 11 ve 15 V/cm) pişirilmiş ve her işlemde ürünün merkez sıcaklığı 75 °C'ye ulaşana kadar ısıtma uygulanmıştır. Pişirme süresi, sıcaklık artış hızı, sıcaklık dağılımı (termal kamera ve T-tipi termokupl ile), elektriksel iletkenlik (EI) ve tekstürel değişimleri ile *Salmonella* inaktivasyonu gibi parametreler detaylı olarak değerlendirilmiştir. Tavuk köftelerinin 7 V/cm, 11 V/cm ve 15 V/cm voltaj gradyanlarına ait ohmik pişirme süresi sırasıyla  $390 \pm 5$  s,  $149 \pm 10$  s,  $86 \pm 2$  s olarak belirlenmiştir. Sıcaklık artış hızının en yüksek değeri 0.77 °C/s ile 14 V/cm voltaj gradyanında gözlenirken en düşük değeri 0.17 °C/s ile 7 V/cm ohmik pişirme işleminde tespit edilmiştir. Ohmik pişirme işlemi boyunca tavuk köftelerine ait EI değeri 7, 11 ve 15 V/cm voltaj gradyanları için sırasıyla 0.54-2.49 S/m, 0.85-2.81 S/m ve 0.81-2.91 S/m aralığında tespit edilmiştir. Tavuk köfte örneklerine 7, 11 ve 15 V/cm voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik ısıtma işlemiyle elde edilen sertlik değerleri sırasıyla  $12.91 \pm 0.84$ ,  $13.92 \pm 0.85$  ve  $17.26 \pm 0.59$  N olarak belirlenmiştir. Sertlik değerindeki artışla birlikte dış yapışkanlık değerinin düştüğü tespit edilmiştir. Ohmik pişirilmiş tavuk köftesine ait L\* parlaklık değerleri incelendiğinde kontrol, 7, 11 ve 15 voltaj gradyanlarında sırasıyla  $56.00 \pm 0.67$ ,  $72.70 \pm 3.75$ ,  $75.70 \pm 0.93$ ,  $80.17 \pm 0.72$  olduğu tespit edilmiştir. Ohmik pişirme işleminde farklı voltaj gradyanlarının özellikle Hue açısı ve kroma gibi önemli renk değerleri üzerine herhangi bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Ohmik işlem öncesinde ekim yapılan numunelerdeki *Salmonella* spp. başlangıç konsantrasyonu  $7.19 \pm 0.075$  log kob/g olduğu voltaj gradyanlarına bağlı olarak 7, 11 ve 15 V/cm voltaj gradyanlarında sırasıyla  $6.04 \pm 0.12$  log kob/g,  $5.45 \pm 0.22$  log kob/g ve  $5.20 \pm 0.33$  log kob/g olarak sayılmıştır. Sonuç olarak, mevcut tez verileri ohmik ısıtma yönteminin tavuk köftesinin pişirilmesinde uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Ohmik yöntemin özellikle yüksek voltaj gradyanlarında hızlı ve enerji verimli bir pişirme süreci sağladığı dikkati çekmiştir. Ayrıca gıda güvenliği açısından risk oluşturan *Salmonella* türlerinin ohmik pişirme işlemiyle inaktive edilebileceği de belirlenmiştir. Buradan yola çıkılarak, ohmik ısıtma yöntemiyle pişirme sürecinin optimizasyonu sağlanarak endüstriyel gıda üretimindeki kullanılabilirliğinin artırılabilir. Bu yönüyle mevcut tez çalışmasının, literatürde sınırlı sayıda bulunan tavuk köftesi özelindeki ohmik ısıtma uygulamalarına önemli katkı sunacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektriksel iletkenlik, ohmik ısıtma, *salmonella* inaktivasyonu, tavuk köftesi, voltaj gradyanı

## ABSTRACT

### An Innovative Method for Cooking Chicken Meatballs: Ohmic Heating

This study was conducted to investigate the effects of ohmic heating technology on the cooking process of chicken meatballs. Ohmic heating is a modern heating method that provides volumetric and homogeneous heat production by directly passing electric current through food products. In the study, meatballs prepared using chicken breast meat were cooked at three different voltage gradients (7, 11 and 15 V/cm) and heating was applied until the product's center temperature reached 75 °C in each process. Parameters such as cooking time, temperature increase rate, temperature distribution (with thermal camera and T-type thermocouple), electrical conductivity (EC) and textural changes, and *Salmonella* inactivation were evaluated in detail. The ohmic cooking time of chicken meatballs for 7 V/cm, 11 V/cm and 15 V/cm voltage gradients was determined as  $390 \pm 5$  s,  $149 \pm 10$  s,  $86 \pm 2$  s, respectively. The highest value of the temperature increase rate was observed at 0.77 °C/s at 14 V/cm voltage gradient, while the lowest value was determined at 0.17 °C/s at 7 V/cm ohmic cooking process. During the ohmic cooking process, the EC value of the chicken meatballs was determined to be in the range of 0.54-2.49 S/m, 0.85-2.81 S/m and 0.81-2.91 S/m for 7, 11 and 15 V/cm voltage gradients, respectively. The hardness values obtained by the ohmic heating process applied to the chicken meatball samples at 7, 11 and 15 V/cm voltage gradients were determined as  $12.91 \pm 0.84$ ,  $13.92 \pm 0.85$  and  $17.26 \pm 0.59$  N, respectively. It was determined that the external adhesiveness value decreased with the increase in the hardness value. When the L\* brightness values of the ohmic cooked chicken meatballs were examined, it was determined that they were  $56.00 \pm 0.67$ ,  $72.70 \pm 3.75$ ,  $75.70 \pm 0.93$ ,  $80.17 \pm 0.72$  in the control, 7, 11 and 15 voltage gradients, respectively. It was observed that different voltage gradients in the ohmic cooking process did not have any effect on important color values, especially Hue angle and chroma. The initial concentration of *Salmonella* spp. in the samples cultivated before the ohmic process was  $7.19 \pm 0.075$  log cfu/g, and depending on the voltage gradients, it was counted as  $6.04 \pm 0.12$  log cfu/g,  $5.45 \pm 0.22$  log cfu/g and  $5.20 \pm 0.33$  log cfu/g in the 7, 11 and 15 V/cm voltage gradients, respectively. As a result, the current thesis data demonstrate the applicability of the ohmic heating method in cooking chicken meatballs. It has been noted that the ohmic method provides a fast and energy-efficient cooking process, especially in high voltage gradients. It has also been determined that *Salmonella* species that pose a risk to food safety can be inactivated by the ohmic cooking process. Based on this, it can be stated that the usability in industrial food production can be increased by optimizing the cooking process with the ohmic heating method. In this respect, it is thought that the current thesis study will make a significant contribution to the limited number of ohmic heating applications in the literature, specific to chicken meatballs.

**Keywords:** Electrical conductivity, ohmic heating, *salmonella* inactivation, chicken meatballs, voltage gradient,

## 1. GİRİŞ

Eski çağlardan beri et, insan beslenmesinin temel taşı olmuştur ve birçok toplum için bu durum hala geçerlidir. Tüketilen et miktarı ve kaynağı ülkeler ve kültürler arasında farklılık gösterse de, çoğu Batı toplumunda ana öğün genellikle et içerir ve sebzeler bu öğünü tamamlayıcı niteliktedir (Tailand ve ark., 2012).

Kırmızı et sığır eti, kuzu eti, domuz eti, at eti, deve eti ve geyik eti gibi çiğ etleri ifade eder ve diğer memeli türlerinden elde edilen etleri de içerebilir. Miyogloblin (bir kas hücresi pigmenti) içeriği nedeniyle kırmızı et, çiğken genellikle kırmızı renktedir (Dikeman ve Devine, 2014)

İnsanların yeterli ve dengeli beslenmesi için et ve et ürünleri çok önemli gıdalardır. Bu ürünleri önemli kılan yüksek protein içeriklerinin yanı sıra makro ve mikro besin öğeleri sağlamalarıdır. Bu gıda grubu temel amino asitler, yağ asitleri, mineraller ve vitaminler açısından mükemmel bir protein kaynağıdır (Tailand ve ark., 2012; Haşık ve ark., 2020; Savaş ve ark., 2023; Savaş ve ark., 2024).

Et, insan iskelet kasıyla yapısal olarak benzerlik gösterdiğinden, kas yapımı ve korunması için gerekli olan protein sentezini destekleyecek en uygun amino asit bileşimini sağlar. İskelet kas kütlelerinin korunması, özellikle yaşlı bireylerde fiziksel işlevselliğin ve metabolik sağlığın sürdürülebilmesi açısından büyük önem taşır. Bu doğrultuda et, yaşa bağlı kas kaybı ve kırılabilirlik (sarkopeni) gibi durumların önlenmesinde yaşlı bireyler için önemli bir besin kaynağıdır (Sandoval-Insausti ve ark., 2016).

Genç ve fiziksel olarak aktif bireylerde ise, et protein alımının vücut kompozisyonu ve kas gücü üzerinde olumlu etkileri olduğu yakın zamanda tespit edilmiştir (Velenzuela ve ark., 2019). Protein kalitesi genellikle temel amino asit içeriğine göre değerlendirilse de, amino asitlerin biyoyararlanımı ve biyoyararlanabilirliği de proteinlerin besin değeri açısından belirleyici unsurlardır. Hodgkinson ve çalışma arkadaşları, çiğ etin Sindirilebilir Zorunlu Amino Asit Skoru (DIAAS) değerinin 97 olduğunu, haşlanmış ve tavada pişirilmiş etin ise sırasıyla 99 ve 98 gibi yüksek DIAAS değerlerine sahip olduğunu bulmuşlardır. Buna karşın fırında ve ızgarada pişirilmiş ette bu değerin sırasıyla 91 ve 80'e düştüğünü ifade etmişlerdir (Hodgkinson ve ark., 2018) Bir başka çalışmada yaşlı bireylerde iyi pişmiş etten (90 °C'de 30 dakika pişirme) elde edilen amino asitlerin biyoyararlanımının, az pişmiş etten (55 °C'de 5 dakika pişirme) daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur

(Buffiere ve ark., 2017). Bu da etin pişirilmesiyle amino asit biyoyararlanımını düzenleyebileceğini göstermektedir.

Türlere, hayvanın beslenmesine ve yaşına bağlı olarak küçük farklılıklar gösterse de, doymuş yağ asitleri (DYA) genellikle etteki yağın neredeyse yarısını oluşturur ve et, önerilen maksimum DYA alımının yaklaşık yarısına katkı sağlamaktadır (Wood ve ark., 2008; Wyness ve ark., 2011; Council, 2014). Yüksek miktarda kırmızı ve işlenmiş et alımı ile kardiyovasküler hastalıklar, kanser ve tüm nedenlere bağlı ölümlerin yanı sıra tip 2 diyabet riski arasında pozitif ilişkiler bulmuştur (Pan ve ark., 2011; Pan ve ark., 2012, Wang ve ark., 2016). Ölüm ve hastalık riskini azaltmanın bir yolu olarak, beslenme kılavuzları son 30 yıldır DYA alımının toplam diyet enerjisinin %10'undan daha azıyla sınırlandırılmasını savunmaktadır (FAO, 2010; Mozaffarian ve ark., 2018).

Dünya genelinde yaygın olarak tüketilen kanatlı eti, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından besin açısından zengin, kolay erişilebilir ve ekonomik bir gıda olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, birçok ülkede üretimi yaygın bir şekilde yapılmaktadır. Öte yandan hızlı hazırlama, taşıma kolaylığı, kültürel veya dini açıdan herhangi bir kısıtlama taşıyamaları ve sığır etine göre nispeten daha ucuz olması gibi çeşitli avantajları tavuk etini diğer et grupları göre önemli hale getirmektedir. Sağlık açısından ise kırmızı etten farklı olarak obezite, kardiyovasküler hastalıklar ve kanser gibi yaygın hastalıkların önlenmesi için uzmanların önerdiği tavuk eti, esansiyel amino asitler ve doymamış yağ asitleri bakımından zengindir ve daha az doymuş yağ ve kolesterol içerdiği bilinmektedir (Ravindran, 2013; Bromfield ve ark., 2021; Marquez ve ark., 2021; Savaş ve ark., 2021).

Küresel kanatlı eti üretiminin %90'ını tavuklar oluştururken, bunu hindi (%5) ve ördek (%4) takip etmektedir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü'nün (OECD) Tahminlerine göre 2030 yılına kadar, her ne kadar bitki bazlı diyetler ve et ikameleri teşvik edilse de, tüketicilerin et tüketiminde bir artış olması öngörülmektedir (FAO, 2022). Kanatlı eti tüketiminin hemen hemen tüm ülkelerde ve bölgelerde artış gösterdiğine dair açık bir eğilim vardır. Tüketiciler daha düşük fiyatlar, ürün tutarlılığı ve uyarlanabilirliği ile daha yüksek ham protein/daha düşük ham yağ içeriği nedeniyle kümes hayvanlarına ilgi duymaktadır. Kanatlı eti tüketiminin 2030 yılına kadar küresel olarak 152 Milyon tona ulaşarak toplam et tüketiminin %52'sini oluşturması öngörülmektedir (Goluch ve ark., 2023).

Et, tüketicilere ulaşmadan önce farklı ısı işlemlere tabi tutulur. Etin pişirilmesi orijinal rengini, dokusunu ve lezzetini değiştirdiği için bu tür işlemler arasında yer almaktadır. Et ürünlerinin kalite standartları, genellikle üreticiler ve tüketiciler tarafından belirlenen çeşitli fiziksel, termal, mekanik ve duyuşal özelliklerle ilişkilidir. Özellikle sıcaklık ve pişirme süresi, etin fiziksel ve yapısal özelliklerinde değişikliklere yol açan en önemli faktörlerdir ve bu da besin kaybına bağılı olarak besin değeriinde bir değişikliğe neden olur (García-Segovia ve ark., 2007; Vasanthi ve ark., 2007). Et ürünlerinin pişirilmesinde çok yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemler bilinmekle birlikte güncel olarak tüketicilerin ihtiyaç ve isteklerini karşılamayı, et kalitesini mümkün olduğunca uzun süre korumayı, işçilik maliyetlerini düşürmeyi ve enerji tüketiminden tasarruf etmeyi amaçlayan yeni (ohmik, mikrodalga ve vakumda (sous vide) pişirme) gıda işleme teknikleri göze çarpmaktadır (Han ve Ark., 2019).

Bu yöntemlerden biri olan ohmik ısıtma, elektrik akımının doğrudan gıda maddesi üzerinden geçirilmesiyle hacimsel ısıtma sağlayan yenilikçi bir ısıtma teknolojisidir (Palaniappan ve Sastry, 1991). Bu yöntem, özellikle hızlı ve homojen ısıtma sağlaması nedeniyle, son yıllarda gıda mühendisliği uygulamalarında büyük ilgi görmektedir (Icier, 2011). Isı enerjisinin doğrudan ürün içerisinde üretilmesi, geleneksel ısıtma yöntemlerine göre enerji verimliliğini artırmakta ve işlem süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır (Zell ve ark., 2009a; Icier ve ark., 2016). Ayrıca, ohmik ısıtma sırasında sıcaklık dağılımının homojen olması, ürün kalitesini artırmakta ve besin değerini korumaktadır (Sabanci, 2020).

Et ve et ürünlerinin pişirilmesinde homojen ısı dağılımının sağlanması gıda güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle patojen mikroorganizmaların inaktivasyonu için iç sıcaklığın belirli bir değere (genelde 75°C) ulaşması gerekmektedir (Bozkurt ve Icier, 2010c; Sengün ve ark., 2015). Geleneksel pişirme yöntemlerinde, dış yüzeyde aşırı pişme meydana gelirken, iç kısımlarda homojen ısı dağılımı sağlanamamakta ve bu durum gıda güvenliğini riske atmaktadır (Bozkurt ve Icier, 2010c). Ohmik ısıtma yöntemi ise bu sorunu aşmak amacıyla geliştirilen modern bir teknolojidir ve et ürünlerinde başarılı sonuçlar vermektedir (Zell ve ark., 2009a; Sabanci, 2020).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, ohmik ısıtmanın sadece hızlı pişirme sağlamadığı, aynı zamanda mikrobiyal inaktivasyon üzerinde de etkili olduğu belirtilmiştir (Sagong ve ark., 2011). Bu tekniğin özellikle *Salmonella* gibi patojenlerin inaktivasyonu üzerinde etkili olduğu rapor edilmiştir (Hashemi ve ark., 2019). Bununla birlikte, literatürde ohmik ısıtma yöntemiyle tavuk köftesi pişirilmesine yönelik araştırmaların

oldukça sınırlı olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, mevcut çalışma, tavuk köftesi numunelerinin farklı voltaj gradyanlarında ohmik ısıtma yöntemiyle pişirilmesini, *Salmonella* inaktivasyonunu ve elektriksel iletkenlik değişimlerini incelemeyi amaçlamaktadır.

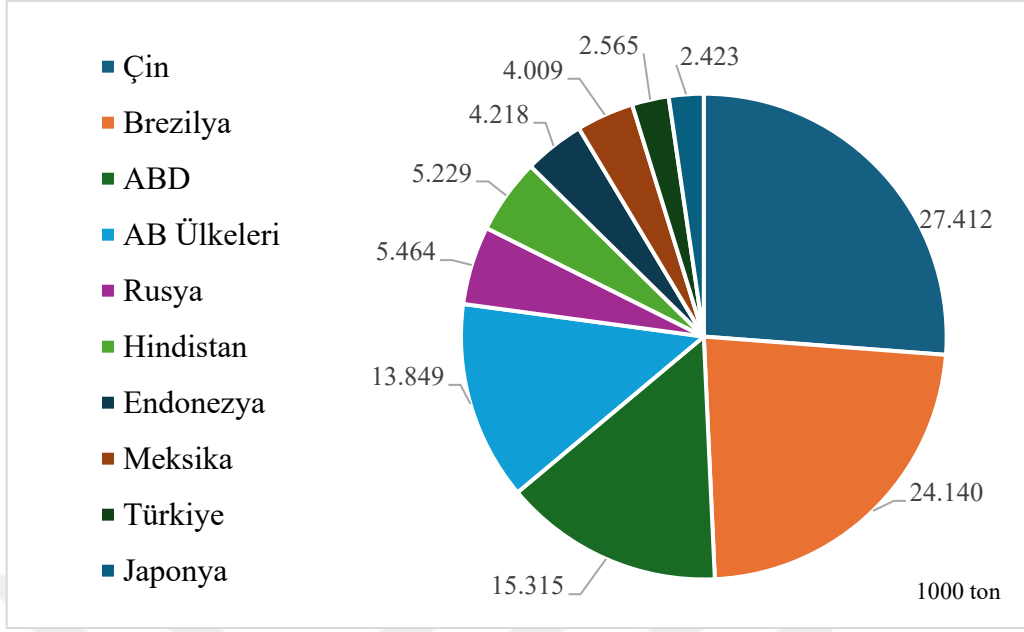
Mevcut tez çalışmasında kullanılan ohmik ısıtma sistemi; bilgisayar kontrollü bir mikroişlemci, T-tipi termokupl, titanyum elektrotlar ve polioksimetilen (Delrin) malzemeden üretilmiş bir test hücresinden oluşmaktadır. Deneysel çalışmada, tavuk köfte numuneleri, merkez sıcaklığı 75°C'ye ulaşınca kadar üç farklı voltaj gradyanı (7 V/cm, 11 V/cm ve 15 V/cm) altında pişirilmiştir. Farklı voltaj gradyanlarında gerçekleştirilen pişirme işlemi sonrasında; *Salmonella* inaktivasyonunun değerlendirilmesi, sıcaklık dağılımının temaslı (T-tipi termokupl) ve temassız (termal kamera) ölçümlerle analiz edilmesi, elektriksel iletkenlik değişimlerinin belirlenmesi ve ürünün fiziksel kalite özelliklerinden olan renk ve tekstür analizlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, 7 V/cm, 11 V/cm ve 15 V/cm voltaj gradyanları uygulanarak pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gıda güvenliği ve ürün kalitesi açısından ohmik ısıtma yönteminin etkinliğini belirlemek amacıyla detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Mevcut tez çalışmasında literatür özeti olarak tavuk, tavuk eti ve ohmik ısıtma işlemine dair detaylı bilgiler sunulmuştur. Ayrıca, literatür taramasında, yazarların bilgisi dahilinde ohmik ısıtma işlemi kullanılarak tavuk köftesi pişirilmesine yönelik herhangi bir yayına rastlanmamıştır. Bu nedenle, ohmik ısıtma işlemiyle ilgili et çalışmalarına odaklanılarak bu konu detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

### 2.1. Tavuk ve Tavuk Eti

Dünya kanatlı etinin % 90'ını oluşturan tavuk eti (Yildirim ve Ceylan, 2008) FAO verilerine göre, dünya genelinde en çok üretilen ve tüketilen et türlerinden biridir. Amerika Birleşik Devletleri, Brezilya ve Çin, küresel tavuk eti üretiminde başı çeken ülkelerdir. Türkiye ise son yıllarda yaptığı yatırımlarla tavuk eti üretimini önemli ölçüde artırmış ve dünya sıralamasında kendine yer bulmuştur. FAO'nun 2024 yılı verilerine göre, dünya genelinde kanatlı eti üretimi 142 milyon tona ulaşmış olup, bu miktar toplam et üretiminin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır (FAO, 2025). Kanatlı etinin en çok üretildiği ülke 27 milyon ton ile Çin olduğu ve Çini Brezilya ve ABD gibi ülkelerin takip ettiği Şekil 2.1 incelendiğinde görülmektedir. Türkiye'de ise 2024 yılında tavuk eti üretimi 227 bin 675 ton yükselerek bir önceki yıla göre %11.6'lık bir artış göstermiştir (TÜİK, 2024). Tavuk eti üretiminde modern tesislerin kullanımı ve hijyenik üretim koşulları, Türkiye'nin bu alandaki büyümesine büyük katkı sağlamıştır. Tavuk etinin endüstriyel üretimden kaynaklanan verimlilik artışı, hem iç pazar hem de ihracat potansiyelini güçlendirmiştir (Yildirim ve Ceylan, 2008; FAO, 2025).



**Şekil 2.1.** Dünya kanatlı eti üretiminde önde gelen ülkeler ve üretim miktarları (1000 ton) (FAO, 2025)

Liu ve ark., (2021)'de belirttiği şekliyle tavuk eti; göğüs, but, kanat ve sırt olmak üzere dört ana bölüme ayrılmaktadır. Her bir bölümün besin değeri, lezzeti ve pişirme yöntemi açısından farklı özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Göğüs eti, düşük yağ oranı ve yüksek protein içeriği ile bilinen beyaz et kategorisinde yer alır ve genellikle sağlıklı beslenme programlarında tercih edilmektedir. But eti, daha fazla yağ içeriği ve aromatik yapısıyla öne çıkarken kanat eti, genellikle soslar eşliğinde tüketilir ve lezzetiyle ön plana çıkmaktadır. Sırt kısmı ise genellikle çorba ve et suyu yapımında kullanılmaktadır.

Tavuk eti, ekonomik olarak uygun maliyetli, besleyici ve lezzetli bir protein kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Kırmızı ete göre daha düşük yağ ve kolesterol içermesi, sağlıklı beslenme programlarında tercih edilmesini sağlamaktadır (Jayasena ve ark., 2013; Liu ve ark., 2021). Tavuk etinin sindiriminin kolay ve pişirilmesinin pratik olması dünya genelinde yaygın şekilde tüketilmesini sağlamaktadır (Jayasena ve ark., 2013; Zaboli ve ark., 2019). Besin değeri açısından tavuk eti, yüksek miktarda proteinin yanı sıra B grubu vitaminler, fosfor, selenyum ve demir gibi mikro besin öğelerini de içermektedir. Tavuk etinin her 100 gramından sağlanan yaklaşık 27 gram protein özellikle kas gelişimi ve doku onarımı için oldukça önemlidir (Jayasena ve ark., 2013). Ayrıca, pişirme yöntemlerine göre etin lezzet profili değişiklik gösterebilmektedir. Özellikle maillard ve lipid oksidasyon reaksiyonları öncelikli olarak ızgara, kızartma ve fırınlama sırasında tavuk etinin

karakteristik lezzetini ortaya çıkaran temel kimyasal süreçlerdir (Jayasena ve ark., 2013). Ayrıca pişirme işlemi sırasında oluşan heterosiklik bileşikler, aromatik tat profiline katkı sağlamaktadır (Mottram, 1998; Jayasena ve ark., 2013).

Tavuk eti, mutfaklarda farklı şekillerde kullanılmaktadır. Geleneksel olarak kızartma, haşlama, fırınlama ve ızgara gibi pişirme yöntemleri tercih edilir. Endüstriyel olarak ise salam, sosis, nugget ve işlenmiş et ürünleri olarak geniş bir ürün yelpazesi sunmaktadır. Ayrıca hazır gıda sektöründe önemli bir yer tutan tavuk eti, besleyici değeri yüksek olduğu için hastane, okul ve askeri beslenme programlarında sıklıkla tercih edilir (Jayasena ve ark., 2013)

Tavuk eti, düşük yağ içeriği ve yüksek protein değeri sayesinde özellikle sağlıklı beslenme programlarında kırmızı ete alternatif olarak köfte yapımında sıkça kullanılan bir hammadde olarak göze çarpmaktadır. Tavuk köftesi hem ev yapımı olarak hazırlanabilir hem de endüstriyel üretimle donmuş gıda olarak piyasaya sunulabilir. Ayrıca, tavuk köftesi burger, sandviç ve ızgara köfte olarak çeşitli pişirme teknikleriyle tüketilmektedir. Özellikle fastfood tüketiminde sağlıklı bir seçenek olarak yaygınlaşmaktadır (Tseng ve ark., 2000; Boby ve ark., 2022).

## **2.2. Ohmik Isıtma**

Et pişirme ve muhafaza teknolojilerindeki son gelişmeler, küresel olarak kırmızı et üretiminin artmasında önemli bir rol oynamıştır. Bu artışın özellikle Çin, Hindistan, Brezilya ve Rusya gibi gelişmekte olan ülkelerde nüfus ve gelir artışına bağlı olarak devam etmesi beklenmektedir (Henchion ve ark., 2014). Toplam küresel et üretiminin 206 milyon tonu kırmızı et ve 131 milyon tonu beyaz et olmak üzere yılda yaklaşık 337 milyon ton iken, işlenmiş et üretimi 27 milyon tondur (FAO, 2020). Bu bağlamda üretilen toplam et miktarındaki artışa oranla işlenen et miktarının her geçen gün artması kaçınılmaz bir gerçektir. Bununla birlikte geleneksel pişirme işlemlerinde ürün içerisine ısının iletim ile oluşması yüzeyde ciddi pişme kusurları ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durumun ortadan kaldırılması amacıyla güncel elektriksel yöntemlerden ohmik ısıtma işlemi göze çarpmaktadır.

Ohmik ısıtma işlemi literatürde joule ısıtma ve elektriksel direnç ısıtma gibi farklı isimler ile ifade edilmektedir. Tanım olarak ohmik ısıtma işlemi, iki elektrot arasında bulunan ürün üzerinden alternatif akım geçirilerek ürün içerisinde meydana gelen ısı

jenerasyonu ile ısıtma prensibine dayanmaktadır. Ohmik ısıtma işlemi özellikle akımın geçtiği tüm noktalarda ısı jenerasyonu meydana getirmesi nedeniyle homojen ısıtma olarak ifade edilmektedir. Ayrıca uygulanan voltaj gradyanına bağlı olarak işlem oldukça hızlı meydana gelmektedir. Bu nedenle araştırmacılar özellikle literatürde homojen ve hızlı ısıtma olarak bu işlemi vurgulamaktadır. Ohmik ısıtmanın uygulanan ürüne bağlı olarak özellikleri değişkenlik göstermektedir. Sıvı ve yarı sıvı ürünlerde homojen ısıtma kolaylıkla sağlanırken katı ürünlerde ise elektrot teması son derece önemli bir konu olarak dikkat çekmektedir (İcier, 2011; Kaur ve Singh, 2016).

Ohmik ısıtma işleminde ürüne verilen enerjinin neredeyse tamamına yakını sistem tarafından kullanılmaktadır. Bu da sistemin yüksek verimlilikte işlev gösterdiğinin önemli göstergesidir. Sadece enerji anlamında değil sisteme verilen enerjisinin ekserjetik veriminin yüksek olduğu pek çok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur (Bozkurt ve İcier, 2010b; Jittanit ve ark., 2017).

Ohmik ısıtma işlemi literatürde pek çok ürünün ısıtılması veya pastörizasyonu amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra ohmik ısıtma işlemi evaporasyon, distilasyon, çözündürme, pişirme ve kurutma gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu da özellikle ohmik ısıtma işleminin araştırmacıların daha fazla dikkatini çektiğini göstermektedir (Lebovka ve ark., 2006; Bozkurt ve İcier, 2012; Gavahian ve ark., 2016; Yıldız Turp ve ark., 2016; İcier ve ark., 2017).

### **2.3. Ohmik Isıtma İşlemi ile Yapılmış Et Uygulamaları**

Ohmik ısıtma, son yıllarda giderek artan bir ilgiyle ön plana çıkan yenilikçi bir ısıtma tekniğidir. Hızlı, verimli ve homojen ısıtma sağlaması nedeniyle, gıda mühendisliği uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Şengün ve ark., (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, köfte örnekleri üzerinde ohmik ve infrared ısıtmanın birlikte kullanıldığı kombine bir pişirme yöntemi uygulanmış ve bu yöntemin mikrobiyolojik inaktivasyon üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Özellikle ohmik ısıtma işlemi pişirmede pişmeyen bölgelerin olmasının ve bu durumun yüzey kızartma işlemi ile minimize edilmesi hedeflemiştir. İlk aşamada sığır etinden elde edilen köftelere 15.26 V/cm gerilim gradyanı uygulanarak ohmik ön pişirme yapılmış ve köftenin merkez sıcaklığı 75 °C'ye ulaştırılmıştır. Bu işlem sırasında elektriksel iletkenlik değeri 20 °C'de 1.5 S/m olarak başlamakta ve sıcaklığın artmasıyla 75 °C'de 2.25 S/m'ye

kadar çıkmaktadır. Bu veriler, ohmik ısıtma sırasında sıcaklığın artmasına paralel olarak elektriksel iletkenliğin arttığını göstermektedir. Ohmik ısıtma sonrasında köfteler, farklı ısı akıları (3.7, 5.7 ve 8.5 kW/m<sup>2</sup>), uygulama mesafeleri (10.5, 13.5 ve 16.5 cm) ve süreler (4, 8, 12 dakika) kullanılarak infrared sistemde son pişirmeye alınmıştır. Bu kombine sistem, geleneksel ısıtma yöntemlerine göre hem daha kısa sürede hem de daha etkili bir şekilde mikrobiyal inaktivasyonu sağlamıştır. Örneğin, başlangıçta 5.06 log cfu/g olan toplam mezofilik aerobik bakteri (TMAB) yükü, infrared pişirme koşullarına bağlı olarak 1.96–4.50 log cfu/g arasında azaltılmıştır. En etkili mikrobiyal inaktivasyon, 8.5 kW/m<sup>2</sup> ısı akısı ve 10.5 cm mesafede elde edilmiştir. Ayrıca, küf, maya, *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens*, *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes* ve *E. coli* O157:H7 gibi patojenlerin hiçbirine kombine işlem sonrasında rastlanmamıştır. Çalışmada ayrıca ürünün ısıtma işlem süresine bağlı kalitesini değerlendirmek amacıyla pişirme değeri (C değeri) ve pastörizasyon ünitesi (PU) de hesaplanmıştır. En yüksek C ve PU değerleri, 8.5 kW/m<sup>2</sup> ısı akısı, 10.5 cm mesafe ve 12 dakikalık uygulamada gözlenmiştir. Bu da hem mikrobiyal güvenliği sağladığını hem de bazı kalite değişimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, ohmik ve infrared ısıtma yöntemlerinin birlikte kullanımı, köfte gibi et bazlı ürünlerde hızlı, etkili ve daha güvenli bir pişirme süreci sunmakta, aynı zamanda yüzeyde arzu edilen renk ve yapı oluşumuna katkıda bulunmaktadır.

Bozkurt ve Icier, (2010a) çalışmalarında dana eti ve iç yağı kullanarak yapılmış olan kıymanın (köfte) ohmik pişirme sırasında gösterdiği elektriksel iletkenlik değişimlerini incelemiştir. Çalışmada öncelikle, kasaplık büyükbaş hayvanlardan elde edilen yağsız dana eti ve iç yağı dokusu kullanılarak %2, %9 ve %15 oranlarında farklı başlangıç yağ içeriğine sahip kıyma karışımları hazırlanmıştır. Et ve yağ örnekleri, 3 mm delikli kıyma makinesinden geçirilmiş ve ardından homojen karışım sağlamak amacıyla dikkatlice karıştırılmıştır. Numuneler, çapı 0.025 m ve uzunluğu 0.05 m olan silindirik formlarda şekillendirilmiştir. Pişirme işlemi, laboratuvar ölçekli bir ohmik ısıtma sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Elektrotlar arası mesafe 0.05 m olarak ayarlanmıştır. Numuneler, bu hücreye tam temas edecek şekilde sabitlenmiş ve farklı gerilim gradyanlarında (20, 30 ve 40 V/cm) ohmik pişirme uygulanmıştır. Uygulama sırasında, sistem 50 Hz frekansında çalıştırılmış ve ürünlerin sıcaklığı 80 °C'ye ulaşana kadar ısıtılmıştır. Sıcaklık ölçümleri, numunenin geometrik merkezi, elektrotlara 0.01 cm uzaklıkta ve yüzeye 0.025 cm mesafede yerleştirilmiş teflon kaplı ısı eş ile gerçekleştirilmiştir. Sistemdeki tüm sıcaklık, akım ve gerilim verileri, özel yapım

mikroişlemci kart aracılığıyla 1 saniyelik aralıklarla bilgisayara aktarılmıştır. Sıcaklık ölçümleri farklı noktalardan alınarak sistemin homojen çalıştığı (maksimum sıcaklık farkı  $\sim 2$  °C) doğrulanmıştır. Uygulama sonunda her örnek için yağ, nem ve kül içeriği hem pişirme öncesi hem de sonrası belirlenmiştir. Başlangıç yağ içeriği arttıkça elektriksel iletkenliğin azaldığı belirlenmiştir. Örneğin, 60 °C’de 40 V/cm uygulamasında, %2 yağ içeren karışımın iletkenliği 1.14 S/m iken, %15 yağ içeren örnekte bu değer 0.76 S/m’ye düşmüş; yalnızca yağ dokusunun iletkenliği ise 0.1 S/m olarak ölçülmüştür. Elektriksel iletkenlik, sıcaklık artışıyla birlikte 60–70 °C’ye kadar doğrusal artış göstermiş, bu kritik pişirme sıcaklığının ardından ise protein denatürasyonu, bağl su miktarındaki artış ve yağ ayrışması gibi yapısal değişiklikler nedeniyle düşüş göstermiştir. Sonuç olarak, bu prosedür, farklı yağ içeriğine sahip kıyma karışımlarında hem elektriksel iletkenlik değişimini hem de pişirme sürecindeki bileşimsel kayıpları nicel olarak değerlendirmeyi sağlamış, ohmik pişirme sistemlerinin tasarımı ve modellenmesi için önemli veriler sunmuştur.

Zell ve ark., (2009a) tarafından gerçekleştirilen çalışmada hem işlenmemiş etler hem de katkı maddeleri içeren et karışımları ohmik ısıtma açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada sığır eti (*Semitenndinosus kasi*), domuz eti (sırt), kuzu eti (but), tavuk eti (göğüs) ve hindi eti (göğüs) örnekleri olmak üzere beş farklı et türü kullanılmıştır. Et örnekleri 5°C ile 85°C arasında ohmik olarak ısıtılmış ve bu sıcaklık aralığında elektriksel iletkenlik değerleri ( $\sigma$ ) ölçülmüştür. Elde edilen bulgular, sıcaklık arttıkça iletkenliğin doğrusal bir şekilde yükseldiğini göstermiştir. En yüksek iletkenlik değeri, sığır etinde kas liflerinin elektrik akımı yönüyle paralel yerleştirildiği durumlarda elde edilmiştir. Etin lif yönü, elektriksel iletkenlik üzerinde belirgin bir etki yaratmış; paralel yerleşimde iletkenlik daha yüksek ölçülmüş, bu da ohmik ısıtma süresinin kısalmasıyla sonuçlanmıştır. Çalışmada yağ içeriğinin iletkenlik üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Tavuk ve hindi etlerinin yağ içeriği oldukça düşükken, kuzu etinin en yüksek yağ oranına sahip olduğu vurgulanmıştır. Sonuçlar, yağ oranı düşük olan etlerin elektriksel iletkenliklerinin daha yüksek olduğunu ve bu nedenle daha hızlı ısındıklarını ortaya koymuştur. Ek olarak, sığır etine farklı oranlarda domuz sırt yağı (%5, %10, %20) eklenerek oluşturulan karışımlarda, yağ oranı arttıkça iletkenliğin anlamlı şekilde azaldığı belirlenmiştir. 65°C’de ölçülen iletkenlik değerleri, %20 yağ eklenmiş sığır eti için 1.107 S/m iken, yağsız sığır eti için 1.603 S/m olarak bulunmuştur. Bu durum, hem endojen (doğal) hem de dışarıdan eklenen yağların elektriksel iletkenlik üzerinde negatif etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca et

karişımlarına sodyum klorür, fosfat ve nitrit gibi iyonik katkı maddeleri eklendiğinde, iletkenliğin belirgin biçimde arttığı görölmüştür. Örneğin %2.5 sodyum klorür eklenen örneklerde iletkenlik değeri 85°C’de 7.497 S/m’ye kadar çıkmıştır. Bu katkı maddeleri, etin iyon içeriğini artırarak ohmik ısıtma verimliliğini yükseltmiştir. Etin bileşimi (yağ, tuz, katkılar) ve fiziksel özellikleri (lif yönü, homojenlik) ohmik ısıtma sürecinde kritik rol oynamaktadır. Bu bilgiler, ohmik ısıtma yöntemiyle pişirilecek et ürünlerinin formölasyonu ve proses tasarımı ağıısından büyük önem taşımaktadır.

Sarang ve ark., (2008) tarafından yapılan bir çalışmada farklı meyvelerle birlikte tavuk, domuz ve sığır etlerine ait farklı kısımlarının ohmik ısıtma sırasındaki elektriksel iletkenlik ( $\sigma$ ) değeri araştırılmıştır. Çalışma 25°C ile 140°C arasında gerçekleştirilmiş ve sıcaklık arttıkça elektriksel iletkenliğin doğrusal şekilde yükseldiği saptanmıştır. Tavuk etinden göğüs, baget, bonfile, but; domuz etinden sırt (loin), omuz ve bonfile; sığır etinden ise döş (chuck), antrikot (flank), nuar (bottom round) ve kontrnuar (top round) gibi kısımlar değeriendirilmiştir. Tüm kas örneklerinin, kas liflerine dik yönde kesilmesiyle en düşük elektriksel iletkenliği elde edilmeye çalışılmıştır. Bu durum sterilizasyon ağıısından en zor koşulları meydana getirmektedir. Et örnekleri silindirik formlarda hazırlanmış ve özel olarak tasarlanmış ısıya dayanıklı ohmik hücrelerde test edilmiştir. Bu sistem, platin kaplı titanyum elektrotlar ve merkezinde sıcaklık ölçümü için yerleştirilen termokupldan (ısıl eş) oluşmaktadır. Sistemde 60 Hz frekansında alternatif akım kullanılmış, 15–20 V gerilim uygulanarak 19–25 V/cm’lik elektrik alan şiddeti oluşturulmuştur. Bu sabit gerilim altında, numuneler kontrollü şekilde 140 °C’ye kadar ısıtılmış ve sıcaklık, akım ve gerilim değeri sürekli olarak kaydedilmiştir. Sonuçlar, kas dokusunun yağ dokusuna göre çok daha yüksek elektriksel iletkenlik sergilediğini ortaya koymuştur. Örneğin, 25 °C’de tavuk göğüs eti 0.665 S/m iletkenliğe sahipken, yağ dokusunda bu değerin yalnızca 0.035 S/m olduğu rapor edilmiştir. Aynı şekilde 140 °C’de bu fark daha da belirginleşmiş; göğüs eti 2.212 S/m’ye ulaşırken, yağ dokusu sadece 0.184 S/m olarak belirlenmiştir. Domuz bonfilesi 140 °C’de 1.961 S/m ile en yüksek değeri gösterirken, sığır etinde 140 °C’de tüm kesimlerin benzer değerieler (yaklaşık 1.6–1.7 S/m) ulaştığı görölmüştür. Yağ ve nem analizleri sonucunda, etlerin içerdėi toplam yağ oranı ile iletkenlik arasında güçlü bir korelasyon gözlenmemiştir. Bunun yerine, kas içindeki yağın dağılım şeklinin ve yapısal faktörlerinin elektriksel iletkenliği daha çok etkilediği ifade edilmiştir. Çalışma genel olarak, etin türü, kesim yeri, yağ dokusu oranı ve dağılımı gibi parametrelerinin ohmik

ısıtma sırasında elektriksel iletkenlik üzerinde önemli rol oynadığını ve bu nedenle gıda prosesleri açısından dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Tulsiyan ve ark., (2008)'nın çalışmasında çok bileşenli gıda sistemlerinde ohmik ısıtma sırasında meydana gelen elektriksel iletkenlik değişimleri değerlendirilmiştir. ABD ordusu için geliştirilen tavuklu erişte (chow mein) yemeği model sistem olarak seçilmiş ve bu yemeği oluşturan temel bileşenlerinin tavuk eti, kereviz, mantar, su kestanesi, fasulye filizi ve Asya mutfağına ait özel chow mein tarzı bir sos ile 25 °C ile 140 °C arasındaki sıcaklıklarda elektriksel iletkenlikleri ölçülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre en yüksek iletkenlik değeri sosta görülmüş olup, bu değer 27 °C'de 2.1 S/m iken, 140 °C'de 10.8 S/m'ye ulaşmıştır. Diğer bileşenlerde ise iletkenlik daha düşük bulunmuş; kereviz ve tavuk eti 140 °C'de sırasıyla 3.4 S/m ve 3.3 S/m ile en yüksek değerlere sahip olmuş, su kestanesi (2.8 S/m), mantar (1.4 S/m) ve fasulye filizi (1.5 S/m) ise daha düşük değerler göstermiştir. Ohmik ısıtma sırasında gözlenen bu iletkenlik farkları, ürünün homojen şekilde ısınmasını zorlaştırabildiğinden formülasyonun tüm bileşenlerinin benzer iletkenlik değerlerine yaklaştırılması önerilmiştir. Araştırmacılar bu sorunun çözümü için düşük iletkenliğe sahip katı bileşenlerin tuz infüzyonu gibi ön işlemlerle elektriksel iletkenliklerinin artırılabilceğini belirtmişlerdir. Örneğin, kereviz örneklerinin 140 °C'deki iletkenlikleri 2.25–3.41 S/m arasında değişmiştir. Bu durumun biyolojik materyallerdeki doğal varyasyonlardan ve gözeneklerde hapsolmuş hava miktarından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Tavuk etinde de yağ içeriğinin elektriksel iletkenliği etkilediği, daha yüksek yağ içeriğine sahip örneklerde iletkenliğin düştüğü bildirilmiştir. Bu çalışma, çok bileşenli düşük asitli gıdaların ohmik ısıtma ile sterilizasyonunda en önemli faktörün bileşenler arası iletkenlik farkı olduğunu vurgulamakta; ürün güvenliği ve proses optimizasyonu için bireysel bileşenlerin elektriksel özelliklerinin detaylı analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bozkurt ve İçier, (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı boyutlardaki dana etlerinin ohmik yöntemle çözdürülmesi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, taze dana etinden elde edilen kaslar kullanılmış ve boyut 1 ( $2.5 \times 2.5 \times 5$  cm), boyut 2 ( $2.5 \times 5 \times 5$  cm) ve boyut 3 ( $5 \times 5 \times 5$  cm) olmak üzere 3 farklı boyutta kesilerek şekillendirilmiştir. Et parçaları polietilen filmle sarılarak, -30°C'de hava üflemleri bir dondurucuda merkez sıcaklıkları -18°C'ye düşene kadar dondurulmuş ve ardından 12 saat -18°C'de saklanmıştır. Çözdürme işlemi için özel olarak tasarlanmış laboratuvar tipi bir ohmik çözdürme sistemi kullanılmıştır. Bu sistem; izole edici ve ayarlanabilir bir transformatör,

mikroişlemci kontrol kartı, bilgisayar bağlantısı ve teflondan üretilmiş,  $5 \times 5 \times 10$  cm boyutlarında bir çözündürme hücresinden oluşmaktadır. Ohmik çözündürme işlemi 50 Hz frekansta ve farklı gerilim gradyanlarında (10, 20 ve 30 V/cm) uygulanmıştır. Tüm örneklerde merkez sıcaklık  $-18^{\circ}\text{C}$ 'den  $+10^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşana kadar çözündürme işlemi sürdürülmüştür. Bu koşullarda, boyut 1 için çözündürme süresi ortalama 580 saniye, boyut 2 için 606 saniye, boyut 3 için ise 650 saniye olarak belirlenmiştir. Gerilim gradyanı arttıkça çözündürme süresi anlamlı derecede azalmış, ancak damla kaybı (drip loss) ve renk parametrelerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Çalışmada, iyi bir elektrot teması elde edilerek akımın homojen dağılımı mümkün kılınıp çözdürmenin içten dışa ve homojen şekilde gerçekleşmesi sağlanmıştır. Çözündürme homojenliği (TH) değeri 0.9'un altına düşmediğinden ohmik çözdürmenin oldukça dengeli bir ısıtım işlem sağladığı ortaya konulmuştur. Enerji verimliliği değerlendirmesi için enerji kullanım oranı hesaplanmış ve ohmik çözündürme için bu değer %17.7–21.0 aralığında bulunmuştur. Buna karşın, geleneksel çözdürmede bu oran yalnızca %2.99–4.41 düzeyindedir. Bu fark, ohmik çözdürmede ısıtımın doğrudan ürünün içinde oluşması sayesinde enerji kaybının en aza indirilmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, her bir örnek için nem, protein, yağ ve kül analizleri de yapılmış; örneklerin ortalama %74 su, %21.45 protein, %3.56 yağ ve %0.99 kül içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmada etin boyutu büyüdükçe çözündürme süresinin arttığı, ancak ohmik yöntemin bu süreci geleneksel yöntemle göre daha kısa sürede ve daha homojen şekilde gerçekleştirdiği gösterilmiştir (Bozkurt ve İçier, 2012).

Sabancı, (2020) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Türk sucuğu ohmik ısıtım yöntemiyle 6-20 V/cm aralığında farklı voltaj gradyanlarında pişirilmiştir. Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ölçümleri ve pişirme süresi mikroişlemci yardımıyla kaydedilmiştir. Sıcaklık dağılımı ise termal kamera ile analiz edilmiştir. Çalışmada ohmik ısıtım yöntemiyle sucuk numunelerinin başarılı bir şekilde pişirilebildiği rapor edilmiştir. Voltaj gradyanı arttıkça pişirme süresinin belirgin şekilde kısaldığı tespit edilmiştir; örneğin, 6 V/cm'de pişirme süresi 584 saniye iken, 20 V/cm'de bu süre 40 saniyeye kadar düşmüştür. Elektriksel iletkenlik değeri, sıcaklık arttıkça yükselmiş ve 0.51- 3.38 S/m aralığında değişim göstermiştir. Ayrıca, termal kamera görüntüleriyle yapılan analizler, düşük voltaj gradyanlarında sıcaklık dağılımının tam olarak homojen sağlanamadığını, ancak yüksek voltaj gradyanlarında sıcaklık homojenliğinin arttığını göstermiştir. Sonuçlar, ohmik ısıtımın et ve et ürünleri pişirmede verimli, hızlı ve enerji tasarruflu bir yöntem olduğunu desteklemektedir.

Ancak ohmik ısıtmanın et ve et ürünlerinde kullanımında daha çok kalite parametreleri ve ısısal özellikleri üzerine odaklanılmıştır. Bu yüzden et ürünlerinde uygulanan ohmik ısıtma ile pişirme işlemlerinin, mikrobiyal inaktivasyon düzeylerine etkisini değerlendiren bilimsel çalışmaların sayısı oldukça sınırlı kalmıştır (Sain ve ark., 2024). Halbuki bu tür ürünlerde gıda güvenliği de büyük önem arz etmektedir. Çünkü küresel ölçekte, dünya nüfusundaki artış ve gelişmekte olan ülkelerde sosyoekonomik düzeyin yükselmesiyle birlikte, et ve diğer hayvansal ürünlere yönelik talebin önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir. 2050 yılı itibarıyla dünya nüfusunun yaklaşık 9.5 milyara ulaşması ve buna paralel olarak hayvansal protein talebinin iki katına çıkması beklenmektedir (Ong ve ark., 2021). Ayrıca et, gıda kaynaklı salgınlarla en sık ilişkilendirilen gıda ürünlerinden biri olması nedeniyle, kontamine et ve et ürünlerinin tüketimine bağlı hastalık yükü günümüzde de önemini korumaktadır (Singh ve ark., 2020).

### **3. MATERİYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Hammaddenin Hazırlanması**

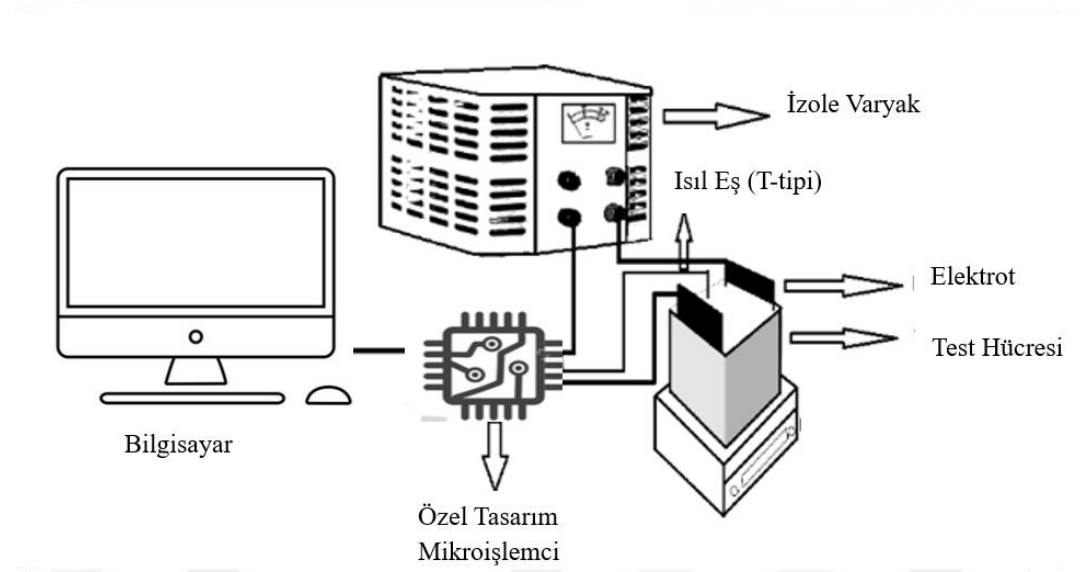
Çalışmada kullanılan tavuk kıyması örnekleri, yerel bir marketten temin edildi. Homojen yağ dağılımının sağlanması ve düşük yağ içeriğine sahip olması amacıyla tavuk göğüs eti tercih edildi. Tavuk göğüs etinde bulunan sinirler ve dış yüzeydeki yağ tabakası dikkatlice uzaklaştırıldı ve ardından kıyma makinesi ile kıyma haline getirildi. Elde edilen kıyma numuneleri, Gıda Mühendisliği Laboratuvarı'na getirildi ve köfte örnekleri hazırlanana kadar +4°C'de depolandı.

Köfte numunelerinin hazırlanması için belirli bir formülasyon kullanıldı. Formülasyon kapsamında 500 g tavuk kıyması için 5 g tuz, 1.5 g soğan tozu ve 1.5 g sarımsak tozu eklendi. Ayrıca, ürünün yumuşaklığını artırmak ve homojen elektriksel iletkenliğini sağlamak amacıyla 15 mL su ilave edildi. Homojen bir karışım elde etmek için tüm bileşenler yaklaşık 2 dakika süreyle karıştırıldı. Hazırlanan köfte örnekleri, pişirme işlemine kadar +4°C'de muhafaza edildi.

#### **3.2. Ohmik Isıtma Sistemi ve Ohmik Pişirme İşlemi**

Ohmik ısıtma sistemi; bilgisayar, özel yapım mikroişlemci, T-tipi termokupl, bağlantı elemanları, polioksimetilen (delrin) malzemedan üretilmiş test hücresi ve titanyum elektrotlardan oluşmaktadır. Sisteme ait şematik görünüm Şekil 3.1'de sunuldu. Tavuk köfte numunelerinin merkezine, homojen bir pişmenin sağlanması amacıyla tabana kadar ulaşacak şekilde bir T-tipi termokupl yerleştirilerek burası sistemde pişirme için "soğuk nokta" olarak kabul edildi. T-tipi termokupl aracılığıyla sıcaklık geçmişi, saniyede bir olacak şekilde eş zamanlı olarak kaydedildi. Ayrıca, özel olarak tasarlanmış mikroişlemci sayesinde akım ve voltaj değerleri sürekli olarak kayıt altına alındı.

Ohmik ısıtma işlemi ile köfte örneklerinin pişirilme işlemi düşük voltaj gradyanı 7 V/cm, orta voltaj gradyanı 11 V/cm ve yüksek voltaj gradyanı 15 V/cm olacak şekilde üç farklı voltaj gradyanı ile gerçekleştirildi. Buzdolabından çıkarılan örneklerin yoğurma işlemi tekrarlandı ve elde edilen köfte hamuru, polioksimetilen (delrin) malzemedan üretilmiş test kalıbına yerleştirildi.



**Şekil 3.1.** Ohmik ısıtma sistemi

Köfte numuneleri, 6 cm uzunluk, 2.5 cm genişlik ve yaklaşık 2.5 cm yükseklikte olacak şekilde şekillendirildi ve her biri yaklaşık 50 g ağırlığında hazırlandı. T-tipi termokupl, örneğin en alt kısmına yalıtkan bir muhafaza içerisine yerleştirildi. Başlangıç sıcaklığı 7°C olan tavuk köfte numunelerine üç farklı voltaj gradyanı uygulanarak pişirme işlemi gerçekleştirildi. Soğuk nokta olarak belirlenen noktanın sıcaklığı 75°C'ye ulaştığında pişirme işlemi sonlandırıldı. Pişirme sürecinde sıcaklık geçmişi, özel olarak tasarlanmış mikroişlemci aracılığıyla saniyede bir kez ölçülerek kayıt altına alındı. Çalışmada geleneksel pişirme işleminin tercih edilmemesinin temel nedeni, kullanılan numunelerin boyutlarının kartezyen yapıda olması ve yükseklik ile genişlik ölçülerinin büyük olması nedeniyle, ön denemeler sonucunda yüzeyde yanmaya yakın ısı oluşumu riskinin tespit edilmesidir. Bu durum, ürün yüzeyinde istenmeyen kalite kayıplarına yol açabileceğinden, geleneksel pişirme yöntemi tercih edilmemiştir.

### 3.3. Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi

Ohmik ısıtma işlemi kullanılarak tavuk köftesi örneklerinin pişirilmesi sırasında sıcaklık değişimi, temaslı ve temassız olmak üzere iki farklı yöntemle ölçüldü. Temaslı sıcaklık ölçümü, T-tipi termokupl kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sıcaklık geçmişi, özel olarak tasarlanmış bir mikroişlemci aracılığıyla saniyede bir olacak şekilde kayıt altına

alındı. Temassız sıcaklık ölçümü için termal kamera (Testo 880-3, Almanya) kullanıldı. Bu amaçla, pişirme işlemi sırasında köfte örnekleri neşter yardımıyla ikiye bölünerek yaklaşık 40 cm mesafeden termal kamera ile görüntüleri alındı. Elde edilen termal görüntüler, termal kamera yazılımı (IRSoft 4.4, Testo, İngiltere) kullanılarak analiz edildi. Biyolojik materyallerde emisivite değerinin 0.93 ile 0.99 arasında değiştiği çeşitli çalışmalarda rapor edildi. Bu nedenle, tavuk köftesi örneklerinin pişirilmesi sırasında emisivite değeri 0.97 olarak belirlendi.

### 3.4. Elektriksel İletkenlik Değerinin Belirlenmesi

Ohmik ısıtma işleminde önemli parametrelerden biri elektriksel iletkenlik değeridir. Özellikle katı numunelerde sıcaklık homojenliğinin sağlanabilmesi için elektrik akımının homojen dağılımı kritik bir faktördür. Elektriksel iletkenlik değeri, akım, voltaj ve sistem özelliklerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu çalışmada, elektriksel iletkenlik değeri Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$EI = \frac{I}{V} \times \frac{L}{A} \quad (3.1)$$

Burada I akım, V voltaj değeri, L iki elektrot arasındaki mesafe (m), A ise elektrot temas alanı (m<sup>2</sup>) ifade etmektedir (İcier, 2003).

### 3.5. Tekstürel Özelliklerin Belirlenmesi

Ohmik ısıtma ile pişirilen tavuk köfteleri, analiz öncesinde 1×1×1 cm boyutlarında küpler şeklinde kesildi. Hazırlanan bu örneklerin tekstürel özellikleri, TA-XT Plus tekstür analiz cihazı (Stable Micro Systems, Surrey, İngiltere) ile ölçüldü. Her numune, cihaz platformuna yatay olarak yerleştirildi ve analiz sürecinde P/36N model silindirik çelik prob kullanılarak baskı uygulandı. Analiz sırasında test öncesi hız 3.00 mm/s, test hızı 1.00 mm/s ve test sonrası hız 3.00 mm/s olarak ayarlandı. Ön denemeler sonucunda, %50 sıkıştırma oranının örnekler için en uygun değer olduğu belirlendi. Cihazdan elde edilen veriler, TEE 32 yazılımı (Stable Micro Systems, İngiltere) üzerinden analiz edildi. Sertlik, dış yapışkanlık, esneklik, iç yapışkanlık, sakızimsılık, çiğnenebilirlik ve elastikiyet gibi temel doku parametreleri bu yazılım yardımıyla hesaplandı. Her örnek beş kez test edilerek ortalama değerler kullanıldı (Kek ve ark., 2013).

### 3.6. CIELab Renk Ölçümü

Ohmik ısıtma işlemi uygulanmış tavuk köftelerine ait renk değerleri renk cihazı ile (Konica Minolta CR-400, Japonya) belirlendi.  $L^*$  parlaklık aydınlık,  $a^*$  kırmızılık, yeşillik ve  $b^*$  sarılık, mavilik renklerini temsil etmektedir. Bu değerlerden yola çıkılarak Eşitlik 3.2’de hue açısı (Zell ve ark., 2009b), Eşitlik 3.3’de kroma değeri (Zell ve ark., 2009b), Eşitlik 3.4’te sarılık indeksi ile Eşitlik 3.5’te beyazlık indeksi (Francis ve Clydesdale, 1975; Bolin ve Huxsoll 1991), Eşitlik 3.6-3.7’de kahverengileşme indeksi ile Eşitlik 3.8’de ise toplam renk değişimi değerleri (Chua ve ark., 2024) hesaplandı.

$$\text{Hue açısı} = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{Kroma değeri} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3.3)$$

$$\text{Sarılık indeksi} = 142,86 * \left( \frac{b^*}{L^*} \right) \quad (3.4)$$

$$\text{Beyazlık indeksi} = 100 - ((100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2)^{1/2} \quad (3.5)$$

$$\text{Kahverengileşme indeksi} = 100 * \frac{(X - 0,31)}{0,17} \quad (3.6)$$

$$X = \frac{((a^* + (1,75xL^*)))}{(5,645xL^*) + a^* - (3,012xb^*)} \quad (3.7)$$

$$\text{Toplam renk değişimi} = \sqrt{(L^* - L_0^*) + (a^* - a_0^*) + (b^* - b_0^*)} \quad (3.8)$$

$L_0^*$ : örneğin başlangıç parlaklık değeri,  $L^*$ : işlem sonrası parlaklık değeri,  $a_0^*$ : örneğin başlangıç kırmızılık yeşillik değeri,  $a^*$ : işlem sonrası kırmızılık, yeşillik değeri,  $b_0^*$ : örneğin başlangıç sarılık mavilik değeri,  $b^*$ : işlem sonrası sarılık mavilik değerini temsil etmektedir.

### 3.7. *Salmonella*'nın Ekimi ve Sayımı

*Salmonella* suşlarının hazırlanması için *Salmonella enterica* subsp. *enterica* türüne ait Newport (MET S1-670), Infantis (MET S1-674), Kentucky (MET S1-675), Enteritidis (MET S1-411) ve Typhimurium (MET S1-625) olmak üzere beş farklı serovar kullanıldı. İlgili suşlar, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü Mikrobiyoloji Laboratuvarı'ndan temin edildi. Deney öncesinde, dondurulmuş kültürler ayrı ayrı Tryptic Soy Agar (TSA; Condalab, Madrid, İspanya) besiyerine ekilip, 37 °C'de 24 saat inkübe edildi. Koloni gelişiminin tamamlanmasının ardından, her bir suş 9 mL Trypticase Soy Broth (TSB; Condalab, Madrid, İspanya) içeren tüplere inoküle edildi ve 37 °C'de 18–24 saat süresince sıvı kültüre alındı. İnkübasyonun ardından, kültürler 5 °C'de, 3500 × g'de 10 dakika süreyle santrifüjlendi ve oluşan hücre peletleri, %0.1 pepton suyu (PW; Condalab, Madrid, İspanya) ile iki kez yıkandı. Her bir suşun peleti, 9 mL PW içerisinde süspanse edildi. Son aşamada, her suştan 5.0 mL alınarak birleştirildi ve bu karışım ana inokulum (*Salmonella* kokteyli) olarak kullanıldı.

Tavuk köfte örneklerinin *Salmonella* ile inokülasyon işlemi Murphy ve ark., (2001) tarafından tanımlanan yöntemde bazı değişiklikler yapılarak gerçekleştirildi. Köfte hamurunun yoğrulma aşamasında, her bir örneğe 5 mL ana inokulum ilave edildi. İnokülasyon sırasında kullanılan inokulum hacmi, toplam formülasyondaki su miktarını azaltacak şekilde optimize edildi.

*Salmonella* sayımı için inoküle edilmiş (pişmiş veya pişmemiş) her bir numune, steril stomacher torbalarına yerleştirildikten sonra Stomacher cihazı (BagMixer, Interscience) kullanılarak 120 rpm hızında, 3 dakika süreyle homojenize edildi. Doğal olarak kontamine olan *Salmonella* varlığını değerlendirmek amacıyla, pişmemiş ve *Salmonella* ile inoküle edilmemiş kontrol numuneleri de analiz edildi. Homojenizasyon işlemi takiben, her bir numunenin 25 gramı, 225 mL Tamponlu pepton suyu (BPW; Condalab, Madrid, İspanya) ile seyreltildi. Elde edilen bu ilk seyreltme, stomacher cihazında 1 dakika süreyle homojenize edildikten sonra, %0.1 peptonlu su (PS) ile 1:10 oranında seri olarak seyreltildi. Bu aşamada, orijinal numune seyreltmesinden 1.0 mL ve her bir seri seyreltmeden 0.1 mL alınarak çift plaka yöntemiyle Xylose Lysine Deoxycholate (XLD) agarı (Neugen, Heywood, İngiltere) üzerine ekim yapıldı. Plakalar, 37 °C'de 24 ila 48 saat süresince inkübe edildi. İnkübasyon periyodu sonunda, gelişen koloniler sayıldı ve sonuçlar log<sub>10</sub> kob/g cinsinden raporlandı.

### 3.8. İstatistiksel Değerlendirme

Sonuçların istatistiksel değerlendirilmesinde SPSS 23 (IBM, 2015, ABD) programı kullanıldı. Güven düzeyi %95 olarak belirlendi. Tavuk köftesi örneklerinin pişirilmesinde kullanılan üç farklı voltaj gradyanının (7, 11 ve 15 V/cm) kalite özellikleri üzerindeki ve pişirme süresi üzerine etkileri istatistiksel olarak karşılaştırıldı. Ohmik işlem grupları arasında farkların önem düzeyi Duncan çoklu karşılaştırma testi ile gerçekleştirildi.



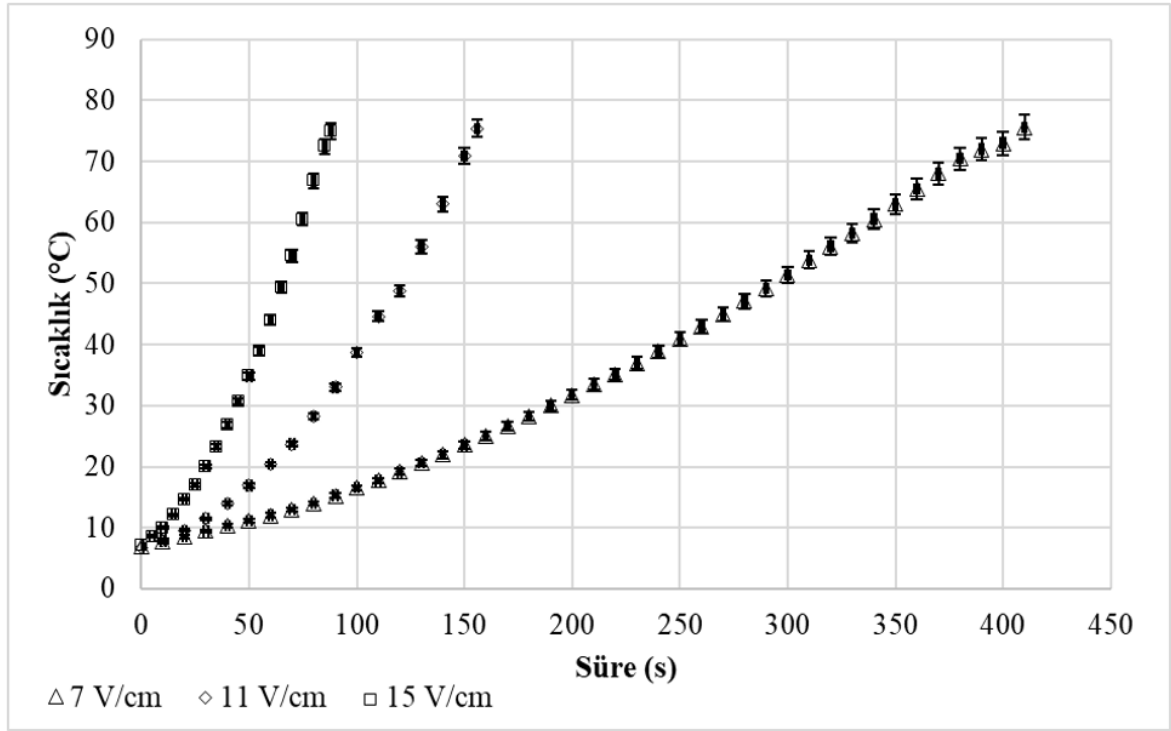
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tavuk köftesi örnekleri ohmik ısıtma işlemi kullanılarak üç farklı voltaj gradyanında pişirilmiştir. Pişirme işlemi sırasında temaslı sıcaklık ölçümleri alınmış ve elektriksel iletkenlik değerleri incelenmiştir. Pişirme işlemi sonrasında ise sıcaklık homojenliği ve bazı kalite özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmanın detayları alt bölümlerde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

##### 4.1. Tavuk Köftesi Örneklerinin Pişirilmesi

Ohmik ısıtma yöntemi kullanılarak tavuk köftesi örnekleri belirli koşullar altında pişirme işlemine tabi tutulmuştur. Köfte örnekleri, başlangıç sıcaklığı 7°C'den 75°C'ye kadar ısıtılarak pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ohmik pişirme işlemi için, üç farklı voltaj gradyanı (7, 10 ve 15 V/cm) kullanılmıştır. 7 V/cm, 11 V/cm ve 15 V/cm voltaj gradyanlarına ait ohmik pişirme işlemi sırasıyla  $390 \pm 5$  s,  $149 \pm 10$  s,  $86 \pm 2$  s olarak belirlenmiştir. Özellikle ohmik ısıtma işleminde uygulana voltaj gradyanı ısıtma işlemi için önemli bir parametredir. Çünkü ohmik ısıtma işleminde uygulanan voltajın karesi ile doğru orantılı olarak ısı enerjisi verilmektedir (Baysal ve ark., 2011). Yapılan pişirme işlemi sonucunda voltaj gradyanındaki artışa bağlı olarak pişirme süresinin kısaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, voltaj gradyanındaki artışın ısıtma (Darvishi ve ark., 2021), pişirme (Goksu, ve ark., 2022), çözündürme (Bozkurt ve İcier, 2012) ve ekstraksiyon (Cabas ve İcier, 2021) gibi işlemlerin süresini önemli ölçüde kısalttığı rapor edilmiştir.

Çalışmamızda, ohmik ısıtma işlemi kullanılarak tavuk köftesinin pişirilmesi sırasında sıcaklık artış hızının voltaj gradyanına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Voltaj gradyanındaki artışın işlem süresini kısalttığı ve birim zamanda ürünün içerisindeki sıcaklık değişimini daha yüksek değere getirdiği tespit edilmiştir. Buna göre 7 V/cm voltaj gradyanında pişirme süresi  $390 \pm 5$  saniye olarak ölçülürken, buna bağlı olarak ısınma hızı veya birim zamanda sıcaklık değerindeki artış  $0.17$  °C/s olarak belirlenmiştir. En yüksek voltaj gradyanında ise ısınma süresi  $86 \pm 2$  s olarak belirlenmişken sıcaklık artış hızı yani birim zamanda sıcaklık değerindeki artış  $0.77$  °C/s olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1). Sıcaklık artış hızı üzerinde, artan voltaj gradyanının istatistiksel olarak ( $p < 0.05$ ) anlamlı bir etkisi olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.1.** Tavuk köftesi örneğinin 3 farklı voltaj gradyanında ohmik ısıtma işlemi ile pişirilmesi

Yapılan bir çalışmada, 6-20 V/cm aralığında sekiz farklı voltaj gradyanı kullanılarak ohmik ısıtma işleminin uygulandığı sucuk numuneleri, 4°C'den 80°C'ye kadar ısıtılarak pişirilme işlemine tabi tutulmuştur (Sabanci, 2020). Voltaj gradyanı arttıkça toplam ohmik pişirme süresinin azaldığı belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, 6 V/cm voltaj gradyanında pişirme süresi 584 saniye olarak kaydedilirken, bu sürenin 12 V/cm'de 126 saniyeye, 20 V/cm'de ise 40 saniyeye düştüğü tespit edilmiştir ( $p<0.05$ ). Dolayısıyla artan voltaj gradyanının işlem süresini kısalttığı tespit edilmiştir (Sabanci, 2020).

Başka bir çalışmada dana kıymasından hazırlanan köfte örneklerinin pişirilmesinde, farklı yağ içeriklerine (%2, %9 ve %15) sahip numuneler, farklı voltaj gradyanları (20, 30 ve 40 V/cm) uygulanarak ohmik ısıtma ve geleneksel pişirme yöntemi ile karşılaştırılmıştır (Bozkurt ve Icier, 2010b). Çalışma sonucunda, ohmik ısıtma yöntemiyle gerçekleştirilen pişirme süresinin 44 ile 80 saniye arasında değiştiği tespit edilmiştir. Geleneksel yöntemle pişirme süresinin ise 360 ile 373 saniye arasında değiştiği rapor edilmiştir. Ayrıca ohmik ısıtma ile pişirme işleminin geleneksel pişirme işlemine göre daha kısa sürdüğü ve voltaj gradyanındaki artışla birlikte bu sürenin önemli ölçüde kısaldığı ifade edilmiştir. Bununla

beraber ohmik pişirme işleminde uygulanan voltaj gradyanının ve yağ içeriğinin etkili olduğunu vurgulanmıştır (Bozkurt ve İcier, 2010b).

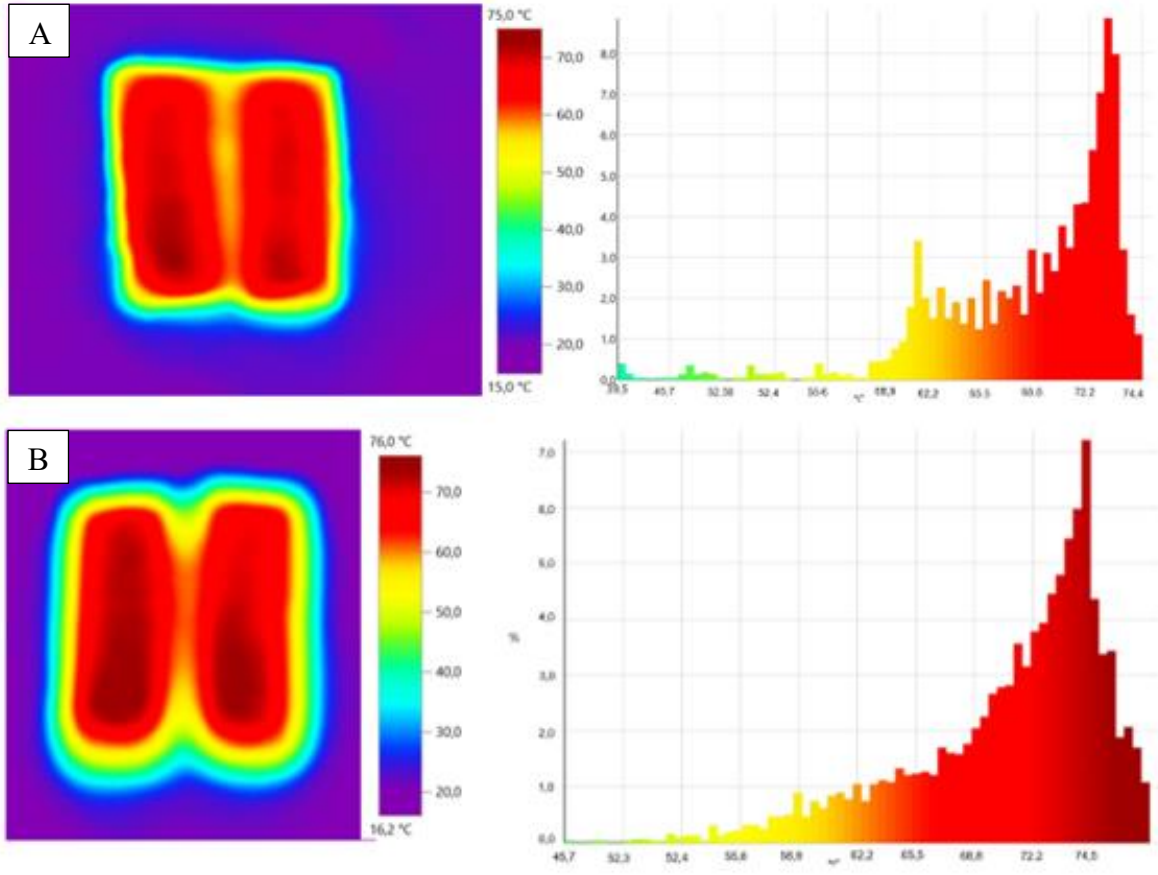
Zell ve ark., (2009a)'nın çalışmasında ohmik ısıtma yöntemi kullanılarak beş farklı et türüne (dana, domuz, kuzu, tavuk ve hindi) ait örneklerin 5°C'den 85°C'ye kadar pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney sisteminde paslanmaz çelik elektrotlar kullanılmış olup, test hücresi 90 mm uzunluğunda ve 36.5 mm iç çapında olacak şekilde Ertacetal malzemeden üretilmiştir. Pişirme işlemi, 20 V/cm voltaj gradyanı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Pişirme işlemi sonucunda farklı et türleri için farklı süreler elde edilmiştir. Yapılan ölçümler doğrultusunda, kuzu etinin pişme süresi 120 saniye olarak belirlenirken, tavuk etinin pişme süresi yaklaşık 100 saniye olarak tespit edilmiştir. Söz konusu farkın temel nedeninin, tavuk etinin daha düşük yağ içermesiyle ilişkilendirilebileceği ifade edilmiştir. Düşük yağ içeriği sayesinde, elektrik akımının ürün içerisinde homojen dağılımının sağlanması ve dolayısıyla homojen bir pişirme işleminin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir (Zell ve ark., 2009a).

Et numuneleri üzerinde gerçekleştirilen bir başka çalışmada, kıyma örnekleri ohmik çözdürme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem için dana kıyması kullanılmış ve çözdürme işlemi, elektrot ile numune arasında etkin temasın sağlanabilmesi amacıyla özel olarak tasarlanmış bir çözdürme hücresinde gerçekleştirilmiştir. Çözdürme hücresi, 7 × 7 cm boyutlarında bir çift iğneli titanyum elektrot ve iki adet hidrostatik sıkıştırma parçasından oluşmaktadır. Hidrostatik sıkıştırma parçaları, esnek plastik malzemeden üretilmiş olup, elektrotlar bu parçalara elektriksel yalıtım kaplamaları kullanılarak monte edilmiştir. Ohmik çözdürme işlemi, numunenin merkez sıcaklığı -1°C'ye ulaşana kadar 10, 13 ve 16 V/cm voltaj gradyanlarında gerçekleştirilmiştir. Farklı voltaj gradyanlarının çözdürme süresi üzerindeki bireysel etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Voltaj gradyanındaki artışa bağlı olarak çözdürme süresinin azalması, belirli bir zaman aralığında numune içerisindeki ısı üretim hızının artmasıyla açıklanmıştır (Cevik ve İcier, 2018, 2021).

Sonuç olarak, tavuk köftesinin ohmik ısıtma işlemiyle pişirilmesi üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olmasıyla birlikte kırmızı et kullanılarak gerçekleştirilen köfte ve hamburger üretim çalışmaları dikkati çekmektedir (Bozkurt ve İcier, 2012; Cabas ve İcier, 2021).

#### 4.2. Ohmik Pişirme İşlemi Sırasında Temassız Sıcaklık Ölçümü

Ohmik ısıtma, elektrik akımının ürün içerisinde homojen bir şekilde geçmesiyle ısı üretimi sağlayan ve bu sayede gıdaların etkin bir şekilde pişirilmesine imkân tanıyan yenilikçi bir ısıtma teknolojisi olarak bilinmektedir. Tavuk köftesinin ohmik ısıtma yöntemiyle pişirilmesi sırasında temassız sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu ölçümlere ait histogram Şekil 4.2'de sunulmuştur. Isı üretiminin, voltaj gradyanının karesiyle orantılı olması nedeniyle, özellikle katı gıdalarda yüksek voltaj gradyanlarında homojen ısıtmanın sağlanması zorlaşmakta ve akımın ürün içerisinde dengeli dağılımının sağlanması gerekmektedir. Şekil 4.2 incelendiğinde, en dış bölgede mor renkle gösterilen kısmın zemin olarak kullanıldığı ve ortam sıcaklığının 14°C olduğu belirlenmiştir. Pişirme işlemi, köfte numunesinin en soğuk noktasının 75°C'ye ulaşmasıyla tamamlanmıştır. Ancak, sıcaklık dağılımının incelenmesi sonucunda, numunenin dış yüzeyinde katmanlar halinde sıcaklık farklılıklarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun temel nedeninin pişirme işlemi sonrası geçen süreye ve kesim sırasında meydana gelen sıcaklık kaybına bağlı olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.2 (B)'de görüldüğü gibi 15 V/cm voltaj gradyanı için pişirme işleminin köfte numunesine ait merkez bölgelerinde sıcaklığın 75°C'nin üzerine çıktığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, tavuk köftesinde sıcaklık dağılımının katmanlar halinde homojenlik olsa da ürün içerisinde heterojen ısı dağılımının oluştuğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.2.** Köfte örneklerinin ohmik ısıtma ile pişirilmesi sırasında temassız sıcaklık dağılımı (A: 7 V/cm; B:15 V/cm)

Tavuk köftesi örneğine ait 7 V/cm voltaj gradyanında pişirilen sıcaklık dağılımı Şekil 4.2 (A)'da verilmiştir. 75°C'ye ulaşan tavuk köftesinin ısıtma işlemi sonlandırıldığında sıcaklık artışının daha az olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca, 15 V/cm voltaj gradyanında olduğu gibi, örneğin dış katmanlarından merkeze doğru katmanların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, ohmik ısıtma yöntemiyle pişirme işleminde homojen pişirmenin sağlandığını göstermektedir. Her ne kadar dış yüzeyde katmanlar gözlemlense de, ortam sıcaklığının 15°C olması ve numunenin kesim işlemi sırasında dış ortamla temas etmesinin sıcaklık homojenliğini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Düşük voltaj gradyanlarında ise ohmik ısıtma işleminde akım ve sıcaklık dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Özellikle ohmik ısıtma işlemine ait düşük voltaj gradyanının homojen pişirme sağladığı tespit edilmiştir. Yüksek voltaj gradyanındaki heterojenliğin başlıca nedenleri arasında elektrik akımının ürün içerisinde homojen olarak dağılmaması, gıda matrisinin elektriksel iletkenlik özelliklerindeki farklılıklar ve ısı transferi sırasında meydana gelen termal direnç farklılıkları yer almaktadır.

Ohmik ısıtma işleminde sıcaklık dağılımının homojenliği ile ilgili yapılmış termal görüntü işleme çalışmalarının sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Özellikle ohmik pişirme işlemi ile yapılmış sınırlı çalışmalar detaylandırılmış ve yazarların bilgisi dahilinde tavuk köftesinin termal sıcaklık homojenliğini inceleyen bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Yöresel bir ürün olan sucuk üzerinde yapılan bir çalışmada, Ohmik ısıtma yöntemi ile 6-20 V/cm aralığında sekiz farklı voltaj gradyanı uygulanarak örnekler pişirilmiştir. Pişirme işleminde kullanılan test hücresi, dikdörtgen kesitli ve  $6 \times 7 \times 11$  cm boyutlarında olup, polioksimetilen malzemeden üretilmiştir. Sucuk numuneleri, 4°C'den 80°C'ye kadar ısıtılarak pişirilmiştir. Numunelerin sıcaklığı 80°C'ye ulaştığında pişirme işlemi tamamlanmıştır. Pişirme işlemi sonrasında, yüksek voltaj gradyanı uygulanan numunelerde cihaz kapatıldıktan sonra sıcaklık artışının bir süre daha devam ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca, sıcaklık homojenliğinin düşük voltaj gradyanlarında daha iyi sağlandığı belirlenmiştir. Mevcut çalışmada olduğu gibi, ohmik ısıtma yöntemiyle düşük voltajlarda gerçekleştirilen pişirme işleminin, farklı ısı mekanizmalarını da kullanarak daha iyi sıcaklık homojenliği sağladığı rapor edilmiştir (Sabancı, 2020).

Döner ve ark., (2020) tarafından ohmik çözdürme işleminde sıcaklık homojenliğinin incelendiği farklı bir çalışmada, farklı titanyum elektrot şekilleri, farklı numune tipleri, farklı yağ içeriği (%2-10-18) ve farklı voltaj gradyanları (10-13-16 V/cm) kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, farklı voltaj gradyanlarının sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Voltaj gradyanındaki artışın, sıcaklık dağılımı üzerinde olumsuz bir etki yarattığı ve sıcaklık homojenliğini azalttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, düşük voltaj gradyanlarının, farklı sıcaklık mekanizmalarının etkinliği sayesinde ürünün sıcaklık homojenliğine olumlu katkıda bulunduğu vurgulanmıştır (Döner ve ark., (2020).

Farklı teknikler kullanılarak katı ürünleri ısıtma işleminde sıcaklık homojenliği incelendiği bir başka çalışmada patates örnekleri farklı yöntemler (ohmik ısıtma, mikrodalga ve geleneksel yöntem) kullanılarak çözdürülmüş ve ohmik ısıtma yöntemi ile gerçekleştirilen çözdürme işleminde sıcaklık dağılımının homojenliğinin sağlandığı rapor edilmiştir (İcier ve ark., 2016).

Çalışma bulgularına göre, voltaj gradyanının artmasıyla ürünün sıcaklık homojenliğinin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, ohmik ısıtma işlemi boyunca elektrik akımının direnç açısından daha kolay yolları tercih etmesi, yüksek voltaj gradyanlarına bağlı olarak meydana gelen ısı üretim oranları ve ürün içerisindeki

elektriksel iletkenlik farklılıkları, özellikle yüzey bölgelerindeki sıcaklık dağılımında heterojenliğe neden olmaktadır. Bu nedenle, ürün kalitesinin korunması ve homojen ısı dağılımının sağlanması için proses koşullarının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiği düşünülmüştür.

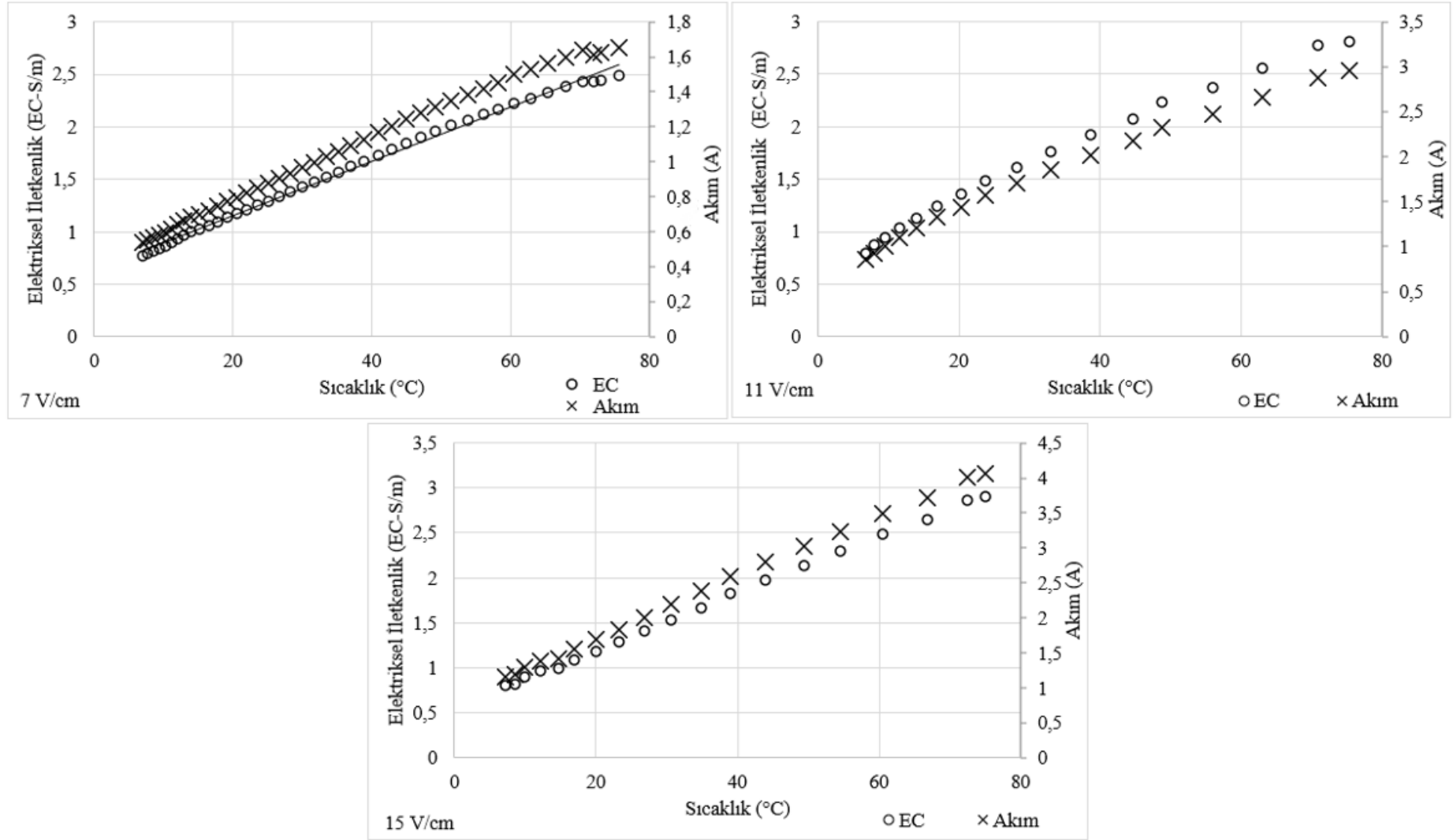
#### 4.3. Elektriksel İletkenlik Değerindeki Değişim

Ohmik ısıtma işleminde en önemli parametrelerden biri elektriksel iletkenlik (Eİ) değeridir. Bu parametre, ohmik ısıtma işleminde sisteme aktarılan enerji miktarını doğrudan etkilemektedir. Her bir ürünün farklı Eİ değerine sahip olmasının temel nedeni, bu değerın akım, sıcaklık, sistem özellikleri ve ürünün fizikokimyasal niteliklerinden etkilenmesidir (Eşitlik 3.1). Sistem özellikleri genellikle sabit kalırken, işlem sırasında akım değeri önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Akım değeri sıcaklık, ürünün fizikokimyasal yapısı ve iyonik hareketlilikten etkilenmektedir. Özellikle iyonik hareketlilik, akım üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. Ancak bu etkileşim, belirli bir kritik değere kadar geçerlidir. Literatürde aynı ürün kullanılsa bile voltaj gradyanı, elektrot özellikleri ve ürünün fizikokimyasal özellikleri gibi değişkenlere bağlı olarak Eİ değerinin değiştiği belirtilmiştir. Bu durum, her bir ürün için optimum Eİ değerinin belirlenmesini ve buna göre sistemin ayarlanmasını zorunlu kılar. Sonuç olarak Eİ ohmik ısıtma sürecinde sistemin performansını doğrudan etkileyen kritik bir değişkendir ve bu değişken ürünün özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Isıtma işlemi sırasında elektriksel iletkenlik değeri, elektrik akımındaki değişimle ilişkilidir ve bu durum Eşitlik 3.1'de açıklanmıştır (Shirsat ve ark., 2004a; Tulsıyan ve ark., 2008; Assiry ve ark., 2010).

Ohmik ısıtma yöntemi kullanılarak tavuk köftesinin 7°C'den 75°C'ye kadar pişirilmesi sırasında ölçülen eş zamanlı akım ve voltaj değerleri, özel yapım bir mikro işlemci ile kayıt altına alınmış ve Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanan Eİ değerleri Şekil 4.3'te sunulmuştur. Yapılan ölçümler sonucunda, 7°C'den 75°C'ye kadar süren pişirme işlemi sırasında farklı voltaj gradyanları için elde edilen Eİ değerleri 7 V/cm voltaj gradyanı için 0.54-2.49 S/m, 11 V/cm için 0.85-2.81 S/m ve 15 V/cm için 0.81-2.91 S/m olarak tespit edilmiştir. Pişirme işlemi sırasında voltaj gradyanı arttıkça Eİ değerinin artma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, tüm voltaj gradyanları incelendiğinde, sıcaklık arttıkça Eİ değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, literatürde daha önce yapılan çalışmalarla da uyumlu olup, sıcaklıktaki artışa bağlı olarak moleküler hareketliliğin

artmasının Eİ değerinin de yükselmesine neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır (İçier ve Ilicalı, 2004).





**Şekil 4.3.** Ohmik pişirme işlemi sırasında farklı voltaj gradyanlarına ait sıcaklık artışına karşı akım ve Eİ değerleri

Araştırmacıların bilgisi dahilinde, tavuk köftesi ile ilgili ohmik ısıtma çalışmalarına literatürde rastlanmadığından dana köftesi ve et örnekleri üzerinde yapılan çalışmalar temel alınarak Eİ değerleri tartışılmıştır. Çalışma bulguları, sıcaklık artışıyla birlikte tüm voltaj gradyanlarında Eİ değerinin arttığını göstermektedir. Sengun ve ark., (2017) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, köfte örnekleri sabit 15.26 V/cm voltaj gradyanı uygulanarak 20°C'den 75°C'ye kadar pişirilmiş ve pişirme sürecinde Eİ değerlerindeki değişim incelenmiştir. Çalışma bulgularına göre, 20°C'de Eİ değeri 1.5 S/m olarak ölçülürken, 75°C'de bu değerin 2.25 S/m'ye yükseldiği belirlenmiştir. Sabanci, (2020) tarafından yapılan bir başka çalışmada, yöresel ürünlerden olan sucuk örnekleri farklı voltaj gradyanlarında pişirilmiş ve 4°C'den 80°C'ye kadar gerçekleştirilen ısıtma işlemi sırasında Eİ değerlerinin 0.51 ile 3.38 S/m arasında değiştiği rapor edilmiştir. Ayrıca, tüm voltaj gradyanlarında sıcaklık artışıyla birlikte elektriksel iletkenlik değerinin arttığı vurgulanmıştır. Benzer şekilde, Bozkurt ve Icier, (2010a) dana kıyma örneklerini farklı voltaj gradyanları (20, 30 ve 40 V/cm) kullanarak ohmik ısıtma yöntemiyle pişirmiş ve bu süreçte Eİ değerlerinde meydana gelen değişimi araştırmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, pişirme işlemi sırasında elektriksel iletkenlik değerinin 0.15 ile 1.4 S/m arasında değiştiği belirlenmiştir. Zell ve ark., (2009a) ise parça et örneklerine (sığır eti, domuz eti, kuzu eti, tavuk eti ve hindi eti) sabit voltaj gradyanı (20 V/cm) kullanarak ohmik ısıtma işlemi uygulamış ve Eİ değerlerini incelemiştir. Çalışmada, tavuk etinin düşük yağ içeriği nedeniyle diğer et türlerine kıyasla daha yüksek Eİ değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Tavuk etinde Eİ değerlerinin yaklaşık 0.59 ile 1.8 S/m arasında değiştiği belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, tüm et örneklerinde sıcaklık artışıyla birlikte Eİ değerinde artış meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, sıcaklık artışının gıdaların Eİ özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

#### **4.4. Tavuk Köftelerinin Tekstür Değerleri**

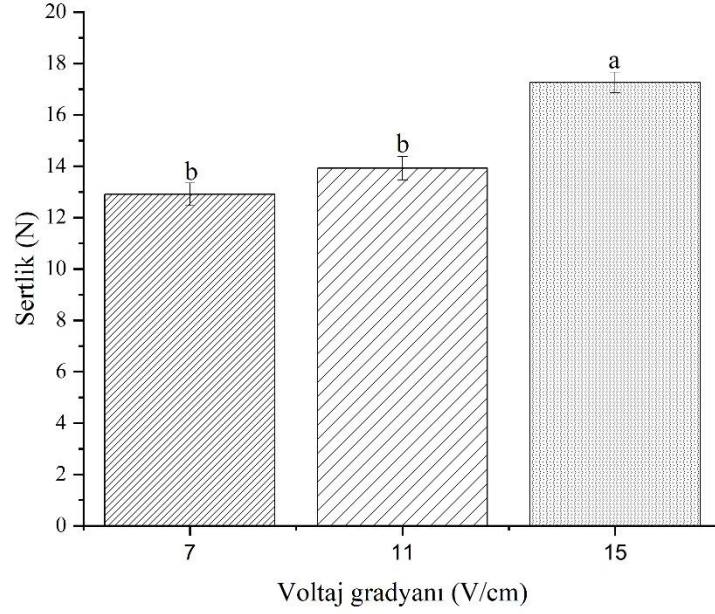
Tavuk köftelerinin ohmik ısıtma işlemi uygulanarak pişirilmesi sonrası sertlik, dış yapışkanlık, esneklik, iç yapışkanlık, sakızimsılık, çiğnenebilirlik ve elastiklik gibi tekstür profil değerleri incelenmiştir. Literatür incelendiğinde özellikle kırmızı parça et ve köfteleri ile bazı kanatlıların parça göğüs ve but eti çalışmalarına rastlansa da pek çok çalışmada tekstür parametreleri incelenmediği görülmüştür. Ayrıca yazarların bilgisi dahilinde tavuk köftesinin ohmik pişirme işlemine tabi tutularak incelendiği bir çalışmaya

rastlanılmamıştır. Bu bakımdan tekstür değerleri tartışılırken farklı parça et ve köftelerine ait çalışmalardan yararlanılmıştır.

#### 4.4.1.Tavuk köftelerinin sertlik değeri

Ohmik ısıtma yöntemi, tavuk köftesinin pişirilmesinde özellikle doku özellikleri bakımından dikkat çeken bir teknolojidir. Gıdalarda istenilen kaliteyi sağlamada, tüketicilerin beklentileri doğrultusunda tekstürel özellikler kritik bir rol oynamaktadır. Bu özelliklerden biri olan sertlik, ürünün ağızda sıkıştırılması sırasında gösterdiği fiziksel direnç ile tanımlanır (Altuğ, 1993). Yapılan çalışmada, tavuk köfte örneklerine 7, 11 ve 15 V/cm voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik ısıtma işlemi sonucunda elde edilen sertlik değerleri sırasıyla  $12.91 \pm 0.84$ ,  $13.92 \pm 0.85$  ve  $17.26 \pm 0.59$  N olarak belirlenmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, uygulanan voltaj gradyanı arttıkça tavuk köfte örneklerinin sertlik değerlerinde belirgin bir artış eğilimi ortaya çıkmıştır. Ancak 15 V/cm voltaj gradyanına ait sertlik değerinin diğer gruplardan ( $p < 0.05$ ) farklılaştığı dikkati çekmektedir. Özcan Uzun (2018) yaptığı çalışmada ultrases, kızılötesi ve ohmik yöntemlerinin dana etinin pişirilmesinde tekstürel değerleri nasıl etkilediğini incelemiştir. Özellikle ohmik işlemde voltaj gradyanı artışının, sığır eti örneklerinde daha hızlı ısıtma oranlarına neden olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca hızlı ısıtma oranının bağ dokusunda kolajen denatürasyonu meydana getirerek su üzerinde daha fazla basınç oluşturduğunu ve bu durumun ette büzüşmeyi ortaya çıkararak suyunu daha fazla bırakıp daha sert hale gelmesine neden olduğu ifade edilmiştir (Özcan Uzun, 2018). Çalışma sonuçlarının aksine Dal ve ark., (2025) dana köfte örneklerine ön işlem olarak 15V, 20V ve 25V gibi farklı voltaj gradyanlarında uyguladıkları ohmik işlem ile daha yavaş şartlarda gerçekleşen örneklerin sertlik değerinin hızlı pişirilen örneklerle göre daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar bu durumu düşük voltaj gradyanları altında uzun pişirme süresinin, köftelerdeki proteinin sıkı jel yapısının ve protein matrisinin oluşumunu artırmasıyla açıklamıştır (Dal ve ark., 2025). Huda ve ark., (2009) ticari tavuk köftelerinin sertlik değerini  $3.73 \pm 0.23$  ile  $5.73 \pm 0.84$  kg aralığında hesaplamıştır. Ismiarti ve ark., (2024) tavuk köftelerine ait sertlik değerini  $1732.26 \pm 1.00$  g olarak tespit etmişlerdir. İçier ve ark., (2014) ohmik ısıtma yöntemiyle yarı pişirilmiş et köfte örneklerinin sertlik değerlerinde farklılıklar meydana geldiğini yaptıkları çalışma ile bildirmiştir. Mevcut çalışmada ise, voltaj gradyanının artışıyla birlikte sertlik değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, daha önceki araştırmalarda da belirtildiği

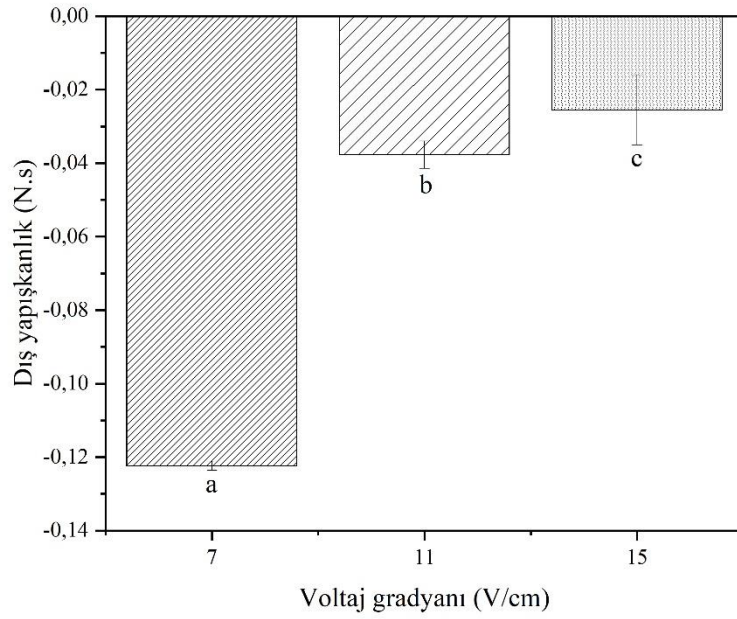
üzere, ısının miyofibriler proteinleri koagüle ederek (sertleştirerek) etin dokusunu etkilemesine bağlanmıştır (Jones ve ark., 1977; Silva ve ark., 1993; Obuz ve ark., 2004).



**Şekil 4.4.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait sertlik değerine etkisi

#### 4.4.2. Tavuk köftelerinin dış yapışkanlık değeri

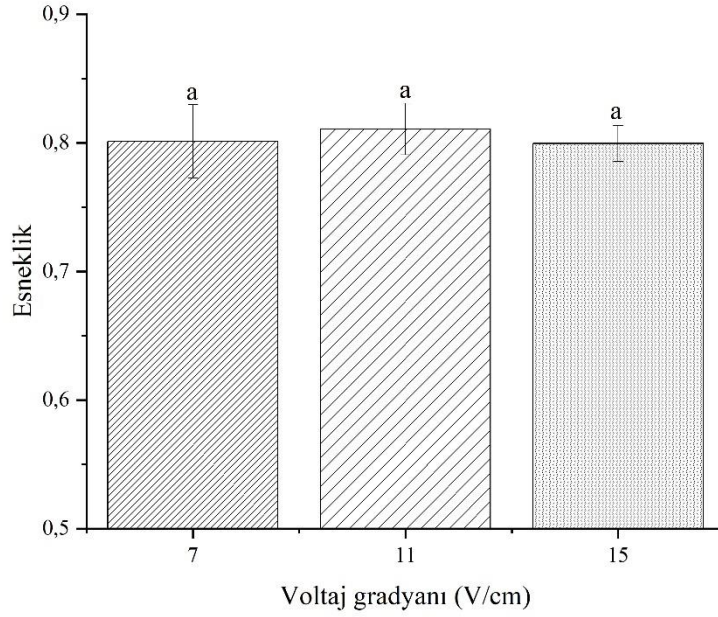
Dış yapışkanlık, bir gıda maddesinin yüzeyi ile temas ettiği yüzey arasındaki çekim kuvvetini yenmek için gerekli olan iş miktarı olarak tanımlanmaktadır (Mehenktaş ve Metin, 2007). Tavuk köftesinin ohmik ısıtma yöntemiyle pişirilmesi sürecinde, en yüksek dış yapışkanlık değerinin  $-0.12 \pm 0.001$  N·s ile 7 V/cm voltaj gradyanında olduğu tespit edilmiştir. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik ısıtma işleminin dış yapışkanlık üzerindeki farklılıklarının anlamlı ( $p < 0.05$ ) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.5).



**Şekil 4.5.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait dış yapışkanlık değerine etkisi

#### 4.4.3. Tavuk köftelerinin esneklik değeri

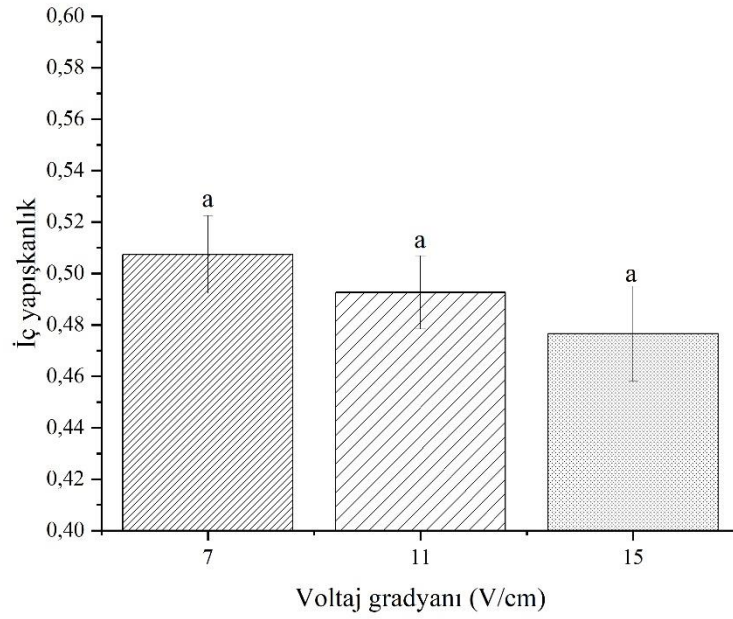
Esneklik, bir gıdaya uygulanan deformasyon kuvveti ortadan kalktıktan sonra ürünün eski formuna geri dönebilme kabiliyeti olarak tanımlanır (Truong ve ark., 2002) Ohmik ısıtma yöntemiyle pişirilen tavuk köftelerinin, 7, 11 ve 15 V/cm voltaj gradyanlarına karşılık gelen esneklik değerleri sırasıyla  $0.80 \pm 0.03$ ,  $0.81 \pm 0.04$  ve  $0.80 \pm 0.01$  olarak ölçülmüştür. Şekil 4.6 incelendiğinde, voltaj gradyanındaki değişimin esneklik üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin bulunmadığı ( $p > 0.05$ ) görülmektedir. Shirsat ve ark., (2004b) tarafından gerçekleştirilen bir et emülsiyonuna 3, 5 ve 7 V/cm voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin, örneklerde hedeflenen son nokta sıcaklığında ölçülen esneklik değerinde önemli farklılık oluşturmadığı görülmüştür.



**Şekil 4.6.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait esneklik değerine etkisi

#### 4.4.4. Tavuk köftelerinin iç yapışkanlık değeri

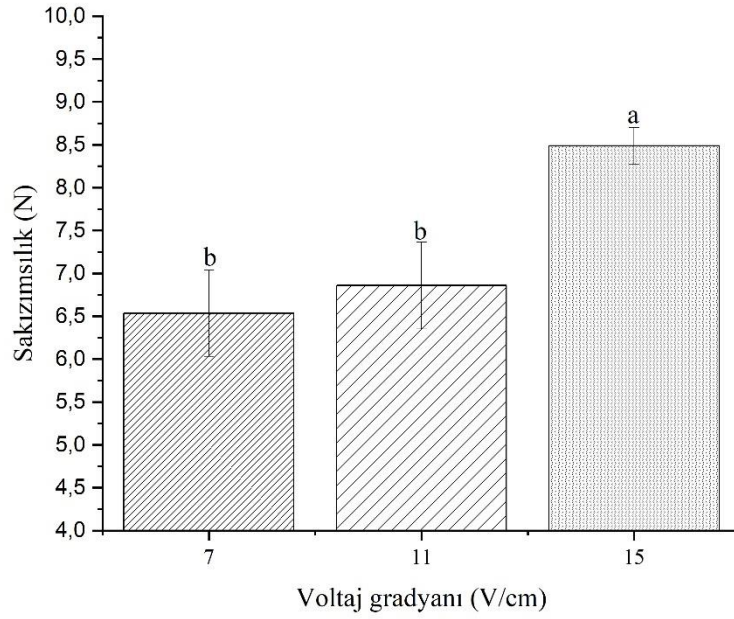
İç yapışkanlık, gıdanın kendi içyapısındaki bileşenlerin birbirine tutunma kapasitesidir ve başka bir yüzeye değil, kendi dokusu içindeki bütünlük söz konusudur. Mekanik olarak gıda materyalinin kırılmadan önceki sıkıştırılma derecesini iç yapışkanlık temsil etmektedir (Altuğ, 1993). Ohmik ısıtma ile pişirilen tavuk köftelerine ait iç yapışkanlık değerinin 7 V/cm voltaj gradyanında  $0.51 \pm 0.05$  iken 15 V/cm voltaj gradyanında  $0.48 \pm 0.02$  olduğu Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bu değer voltaj gradyanındaki artışla birlikte düştüğü görülmesine rağmen bu düşüşün istatistiksel olarak ( $p > 0.05$ ) bir anlam ifade etmediği tespit edilmiştir. Shirsat ve ark., (2004b) tarafından gerçekleştirilen bir et emülsiyonuna 3, 5 ve 7 V/cm voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin örneklerde hedeflenen son nokta sıcaklığında ölçülen iç yapışkanlık değerinde önemli farklılık oluşturmaması yönüyle mevcut çalışma ile örtüştüğü belirlenmiştir. Ayrıca Huda ve ark., (2009) ticari tavuk köftelerinin iç yapışkanlık değerini  $0.51 \pm 0.01$  ile  $0.69 \pm 0.00$  aralığında tespit etmiştir.



**Şekil 4.7.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait iç yapışkanlık değerine etkisi

#### 4.4.5. Tavuk köftelerinin sakızimsılık değeri

Sakızimsılık, yarı katı yapıdaki gıdaların yutulabilir forma gelmesi için ihtiyaç duyulan çiğneme enerjisini ifade eder. Bu özellik, gıdanın ağızda parçalanmaya karşı gösterdiği dirençle ilişkilidir. Tekstürel özelliklerin değerlendirildiği TPA testinde, sertlik ve iç yapışkanlık değerlerinin çarpımıyla hesaplanan ikincil bir parametre olarak tanımlanır (Altuğ, 1993; Bourne, 2002). Tavuk köftelerine ait sakızimsılık değerleri incelendiğinde, 7 V/cm voltaj gradyanında  $6.53 \pm 0.50$  N, 15 V/cm gradyanında ise  $8.49 \pm 0.21$  N ile en yüksek değerin elde edildiği görülmüştür. Voltaj gradyanındaki artışın, genel olarak sakızimsılık üzerinde artırıcı bir etki yarattığı belirlenmiştir. Ancak, Şekil 4.8 incelendiğinde, 7 ve 11 V/cm gradyanları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın bulunmadığı anlaşılmaktadır. Yağsız domuz etinden üretilen et emülsiyon hamurunun 3, 5 ve 7 V/cm voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin örneklerde hedeflenen son nokta sıcaklığında ölçülen sakızimsılık değerleri sırasıyla 12.97 N, 12.16 ve 11.30 N olmasına rağmen istatistiksel olarak önemli farklılığın oluşmadığı tespit edilmiştir (Shirsat ve ark., 2004b).

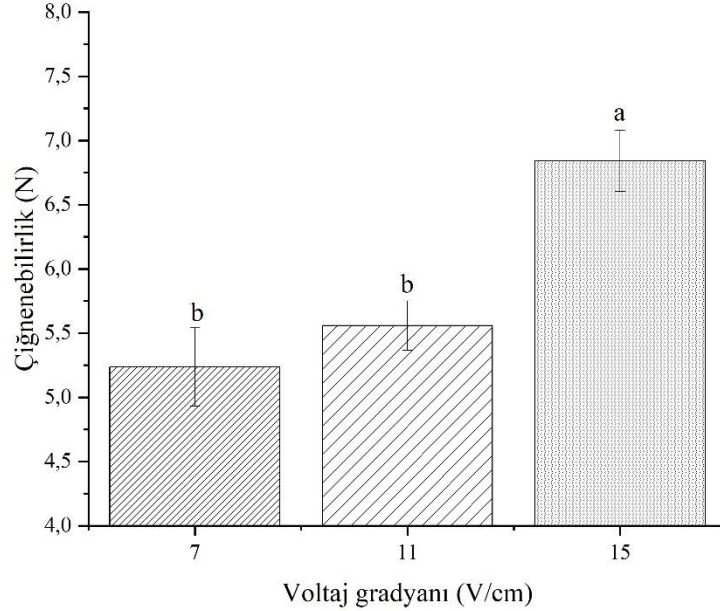


**Şekil 4.8.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait sakızimsılık değerine etkisi

#### 4.4.6. Tavuk köftelerinin çiğnenebilirlik değeri

Katı gıda ürünleri için önemli bir parametre olan çiğnenebilirlik, et ve hamur gibi gıdalar için büyük öneme sahiptir. Mekanik olarak sakızimsılık\*esneklik veya sertlik\*iç yapışkanlık\*esneklik değerlerinin çarpımlarından hesaplanan bir diğer ikincil parametredir. Çiğnenebilirlik katı bir gıdayı yutmaya hazır hale getirmek için gerekli çiğneme enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Çiğneme direnci değerlerindeki artış, işlem süresince etin daha sert hale geldiğini göstermektedir (Bourne, 2002; Szczesniak, 2002). Ohmik ısıtma ile pişirilen tavuk köftelerinde çiğnenebilirlik değeri 7 V/cm için  $5.24 \pm 0.51$  N, 11 V/cm için  $5.56 \pm 0.39$  N ve 15 V/cm için  $6.84 \pm 0.24$  N olarak ölçülmüştür. Sakızimsılık ve sertlik parametrelerinde olduğu gibi, çiğnenebilirlik parametresinde de voltaj gradyanının artışıyla birlikte yükselme eğilimi göstermekle birlikte 7 ve 11 V/cm voltaj gradyanları arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark ( $p>0.05$ ) tespit edilmemiştir (Şekil 4.9). Yağsız domuz etinden üretilen et emülsiyon hamuruna 3, 5 ve 7 V/cm voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin örneklerde hedeflenen son nokta sıcaklığında ölçülen çiğnenebilirlik değerleri sırasıyla 115.73 N, 102.02 ve 102.25 N.mm olarak tespit

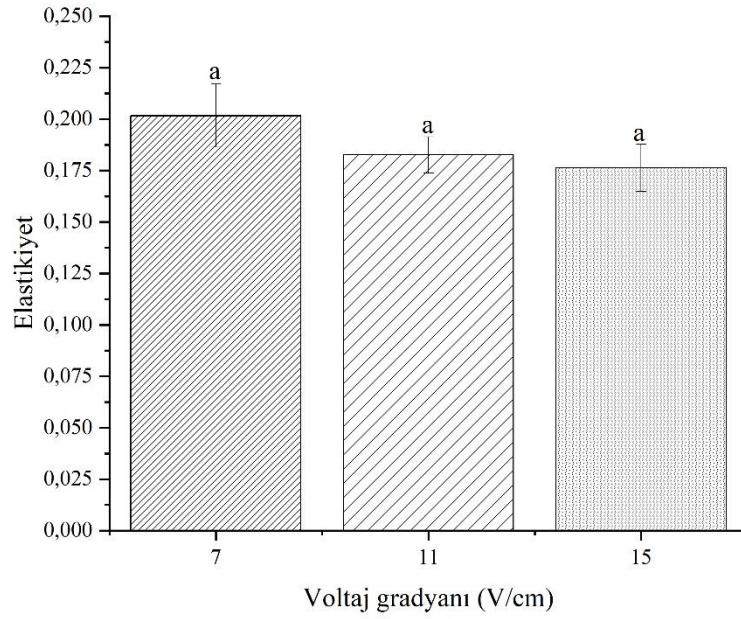
edilmesine rağmen istatistiksel olarak önemli farklılığın ( $p>0.01$ ) oluşmadığı bildirilmiştir (Shirsat ve ark., 2004b).



**Şekil 4.9.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işlemin tavuk köftesine ait çiğnenebilirlik değerine etkisi

#### 4.4.7. Tavuk köftelerinin elastiklik değeri

Tekstür profil analizinde öne çıkan parametrelerden biri olan elastiklik değeri, ilk sıkıştırma sırasında gıdanın maruz kaldığı deformasyonu ne kadar hızlı ve ne ölçüde geri kazandığını ifade etmektedir (Bourne, 2002). Ohmik ısıtma yöntemiyle pişirilen köfte örneklerine ait gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamakla birlikte; 7, 11 ve 15 V/cm voltaj gradyanlarında elde edilen elastiklik değerleri sırasıyla  $0.20 \pm 0.02$ ,  $0.18 \pm 0.01$  ve  $0.18 \pm 0.01$  olarak belirlenmiştir. Özcan Uzun ve Bozkurt (2024) çalışmalarında dana bonfile etine 30, 50 ve 70 V/cm voltaj gradyanında uygulanan ohmik pişirme işleminin elastiklik parametresi üzerinde herhangi bir farklılık oluşturmadığını belirlemiştir.



**Şekil 4.10.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait elastikiyet değerine etkisi

#### 4.5. Tavuk Köftelerinin Renk Değerleri

Renk, tüketicilerin genellikle tüketmeden önce dikkate aldığı bir diğer köfte ürünü özelliğidir. Hsu ve Chung (1998) ve Hsu ve Yu (1999), tüketicilerin parlak renkli bir köfteyi tercih ettiğini ileri sürmüşlerdir. Tavuk köftesine farklı voltaj gradyanındaki pişirilmesinde uygulanan ohmik ısıtma işleminin renk değerleri üzerindeki etkisi Tablo 4.1’de verilmiştir. Tavuk örneğinin  $L^*$  parlaklık değerleri incelendiğinde kontrol, 7, 11 ve 15 voltaj gradyanlarında sırasıyla  $56.00 \pm 0.67$ ,  $72.70 \pm 3.75$ ,  $75.70 \pm 0.93$ ,  $80.17 \pm 0.72$  olduğu tespit edilmiştir. En yüksek değer 15 voltaj gradyanında görüldüğü ve tavuk köftelerinin voltaj gradyanındaki artışa bağlı olarak  $L^*$  parlaklık değerinin yükseldiği belirlenmiştir. Tavuk etine uygulanan ohmik ısıtma işlemine ait Duncan çoklu karşılaştırma testine göre gruplar arasındaki farklılıkların ( $p < 0.05$ ) önemli olduğu tespit edilmiştir. Zell ve ark., (2009b) çalışmalarında sığır etinin ohmik ısıtma ile pişirilmesi işleminde  $L^*$  parlaklık değerinin geleneksel pişirme yöntemine göre daha yüksek olduğu sonucu mevcut çalışmayla benzerlik göstermiştir.

Engchuan ve ark., (2014) çalışmalarında yağsız domuz etinden üretilen et köftelerinin ohmik pişirme işlemi sonucunda  $4.9 \text{ }^\circ\text{C/dakika}$  ısıtma hızıyla  $24.5 \text{ }^\circ\text{C/dakika}$

ısıtma hızının L\* parlaklık değeri açısından önemli bir farklılık oluşturmadığını belirtmiştir.

Ohmik işlemin a\* kırmızılık değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde (Tablo 4.1) en yüksek değer kontrol grubunda  $5.69 \pm 0.31$  iken en düşük değerin  $2.39 \pm 0.12$  ile 7V'a ait örneklerde olduğu görülmüştür. İstatistiksel olarak kontrol grubuyla ohmik ısıtma işlemiyle pişirilen gruplar arasında herhangi bir farklılık ( $p > 0.05$ ) tespit edilmemiştir. Bununla birlikte ohmik işlemin kırmızılık değerini düşürdüğü belirlenmiştir. Tavuk örneklerinin b\* (sarılık) değeri incelendiğinde, tüm gruplar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farkın bulunmadığı belirlenmiştir ( $p > 0.05$ ). Engchuan ve ark., (2014) çalışmalarında yağsız domuz etinden üretilen et köftelerinin ohmik pişirme işlemi sonucunda  $4.9\text{ }^{\circ}\text{C/dakika}$  ve  $24.5\text{ }^{\circ}\text{C/dakika}$  ısıtma hızlarındaki a\* kırmızılık değerinin sırasıyla 0.28 ve 0.29, b\* sarılık değerinin ise 15.19 ve 15.74 olduğu belirlenmiştir. Isıtma hızı dikkate alındığında, ohmik yöntemle pişirilen et köftelerine ait hem a\* ve hem de b\* renk parametre değerlerinin istatistiksel olarak önemli bir farklılık oluşturmadığı sonucuna varılmıştır (Engchuan ve ark., 2014).

Tablo 4.1'de verilen ve renk uzayında renk tonunu ifade eden hue açısı, kontrol, 7, 11 ve 15 V/cm voltaj gradyanlarında sırasıyla  $70.41 \pm 1.0$ ,  $81.40 \pm 0.46$ ,  $78.75 \pm 1.38$  ve  $80.97 \pm 0.40$  olarak belirlenmiştir. Bu değerler incelendiğinde, ohmik işlemin kontrol grubuna kıyasla tavuk köftesinin rengini daha sarı tonlara doğru kaydırıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda ohmik pişirme işlemine ait renk değerlerindeki bu farklılıklar, ısıtma hızlarına bağlı olarak farklı pişirme sürelerinde işleme tabi tutulan et numunelerinin protein jelinin ürün yüzeyine yansımadaki değişikliklerden kaynaklanabileceği ifade edilmiştir (Pongviratchai ve Park, 2007; Zell, ve ark., 2010).

Rengin doygunluğunu ifade eden kroma parametresinin 7, 11, ve 15 V/cm voltaj gradyanlarına ait değerleri sırasıyla  $15.36 \pm 0.16$ ,  $16.75 \pm 0.92$ ,  $17.47 \pm 0.18$  olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.1). Ohmik pişirme işlemine ait farklı voltaj gradyanlarının kroma değeri üzerinde ( $p > 0.05$ ) önemli bir farklılık oluşturmadığı belirlenmiştir. Yağsız domuz etinden üretilen et emülsiyon hamuruna 3, 5 ve 7 V/cm voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin örneklerde hedeflenen son nokta sıcaklığında ölçülen kroma değerleri sırasıyla 14.26, 14.24 ve 14.19 olarak tespit edilmesine rağmen istatistiksel olarak önemli farklılığın ( $p > 0.01$ ) oluşmadığı bildirilmiştir (Shirsat ve ark., 2004b).

Sarılık indeksinin verildiği Tablo 4.1’de en yüksek değerin kontrol grubu köftelerde görüldüğü ve ohmik ısıtma işlemi ile sarılık değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Kontrol ve farklı voltaj gradyanlardaki kroma değerleri sırasıyla  $16.01 \pm 1.09$ ,  $15.36 \pm 0.16$ ,  $16.75 \pm 0.92$  ve  $17.47 \pm 0.18$  olarak belirlenmiştir. Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işleminin tavuk köftesine ait sarılık değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir ( $p > 0.05$ ) değişiklik oluşturmadığı tespit edilmiştir.

Kontrol ve farklı voltaj gradyanlarında ohmik ısıtma ile pişirilen örneklerin beyazlık indeksleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu belirlenmiştir ( $p < 0.05$ ). Kontrol ve 15 V/cm voltaj gradyanındaki köfte örneklerinin beyazlık indeks değerlerinin sırasıyla  $53.35 \pm 0.50$  ve  $73.79 \pm 0.46$  olduğu tespit edilmiştir. Voltaj gradyanı arttıkça tavuk köftesine ait beyazlık indeks değerinin de arttığı belirlenmiştir. Bu artış, özellikle yüksek voltaj gradyanlarında elde edilen yüksek  $L^*$  (açıklık/parlaklık) değeriyle (Tablo 4.1) ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

**Tablo 4.1.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesine ait renk değerlerine etkisi

| Renk parametreleri      | Gruplar            |                    |                    |                       |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
|                         | Kontrol            | 7V                 | 11V                | 15V                   |
| $L^*$                   | $56.00 \pm 0.67^d$ | $72.70 \pm 3.75^c$ | $75.70 \pm 0.93^b$ | $80.17 \pm 0.72^a$    |
| $a^*$                   | $5.69 \pm 0.31^a$  | $2.39 \pm 0.12^b$  | $3.27 \pm 0.30^b$  | $2.74 \pm 0.20^b$     |
| $b^*$                   | $16.13 \pm 1.09^a$ | $15.66 \pm 0.16^a$ | $16.49 \pm 1.06^a$ | $17.25 \pm 0.48^a$    |
| Hue açısı               | $70.41 \pm 1.01^c$ | $81.40 \pm 0.46^a$ | $78.75 \pm 1.38^b$ | $80.97 \pm 0.40^{ab}$ |
| Kroma değeri            | $16.01 \pm 1.09^a$ | $15.36 \pm 0.16^a$ | $16.75 \pm 0.92^a$ | $17.47 \pm 0.18^a$    |
| Sarılık indeksi         | $40.70 \pm 2.48^a$ | $30.76 \pm 0.65^b$ | $31.12 \pm 1.37^b$ | $30.35 \pm 0.11^b$    |
| Beyazlık indeksi        | $53.35 \pm 0.50^d$ | $68.40 \pm 1.60^c$ | $70.60 \pm 0.59^b$ | $73.79 \pm 0.46^a$    |
| Kahverengileşme indeksi | $40.45 \pm 0.90^a$ | $26.16 \pm 2.44^b$ | $26.40 \pm 0.03^b$ | $25.73 \pm 0.27^b$    |
| Toplam renk değişimi    | -                  | $19.48 \pm 0.27^c$ | $20.44 \pm 0.73^b$ | $24.79 \pm 0.02^a$    |

Aynı satırda a, b ve c gibi farklı harflendirmeler gruplar arasındaki farkın önemli olduğunu ifade etmektedir. Kontrol: işlem görmemiş taze örnekler.

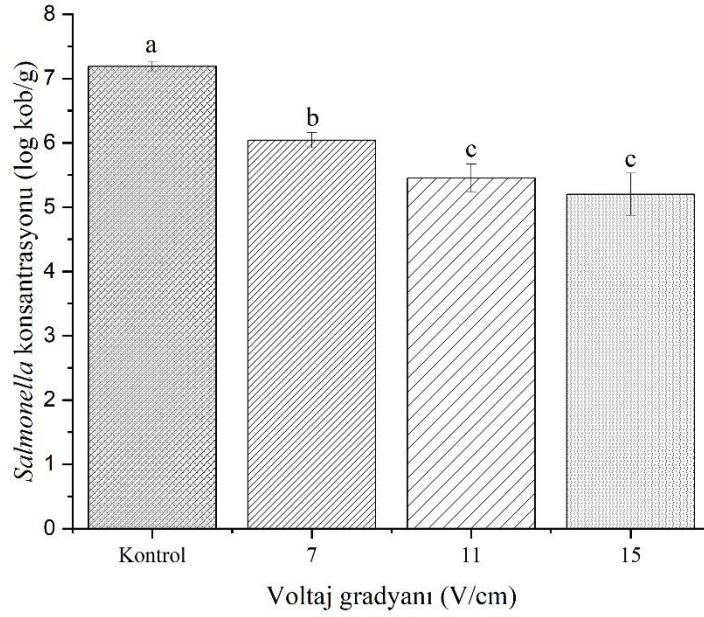
Tablo 4.1’de verilen tavuk köftelerinin ohmik pişirme işlemiyle kahverengileşme indeksi değerlerinde meydana gelen değişimler incelendiğinde, en yüksek değerin  $40.45 \pm 0.90$  ile kontrol grubunda gözlemlendiği tespit edilmiştir. Farklı voltaj

gradyanlarının uygulandığı gruplar arasında ise kahverengileşme indeksi açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark ( $p>0.05$ ) olmadığı belirlenmiştir.

Farklı voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik pişirme işlemi sonrası tavuk köftelerinde meydana gelen toplam renk değişimi incelendiğinde (Tablo 4.1) en yüksek renk değişim değerlerinin  $24.79 \pm 0.02$  ile 15 V/cm voltaj gradyanında elde edildiği görülmüştür. Tablo 4.1 incelendiğinde voltaj gradyanındaki artışın toplam renk değişimi değerleri açısından ( $p<0.05$ ) önemli olduğu belirlenmiştir.

#### 4.6. Tavuk Köftelerindeki *Salmonella*'nın İnaktivasyonu

Ohmik ısıtma ile muamele edilen tavuk köftelerinde *Salmonella* inaktivasyonuna ilişkin sonuçlar Şekil 4.11'de gösterilmektedir. XLD agar üzerine ekilen pişmemiş kontrol numunelerinde tipik *Salmonella* kolonilerine rastlanmamıştır. Isıl işlem öncesinde ekim yapılan numunelerdeki *Salmonella* spp. başlangıç konsantrasyonu  $7.19 \pm 0.075$  log kob/g olarak belirlenmiştir. Merkez sıcaklığı 75 °C'ye ulaşıncaya kadar ohmik ısıtma yöntemiyle köfteler pişirilmiştir. Bu işlem sonucunda *Salmonella*'nın canlı kalma düzeyi, uygulanan voltaj gradyanlarına bağlı olarak sırasıyla 7 V/cm'de  $6.04 \pm 0.12$  log kob/g, 11 V/cm'de  $5.45 \pm 0.22$  log kob/g ve 15 V/cm'de  $5.20 \pm 0.33$  log kob/g olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.11.** Farklı voltaj gradyanında uygulanan ohmik ısıtma işleminin tavuk köftesindeki *Salmonella* konsantrasyonuna etkisi

Elde edilen bulgulara göre, 7 V/cm voltaj gradyanı ile gerçekleştirilen ısıtmanın dekontaminasyon etkinliği, diğer voltaj gradyanlarına göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük bulunmuştur ( $p < 0.05$ ). Beklenildiği gibi, voltaj gradyanı arttıkça *Salmonella*'nın canlı kalma oranı azalmıştır. Genel olarak, elektrik alan şiddetinin artması, ısıtma hızının da artmasına neden olmaktadır. Birçok araştırmacı, yüksek ve düşük elektrik alanlarının mikroorganizma inaktivasyonu üzerindeki etkilerini karşılaştırmış ve elde edilen bulgular, yüksek elektrik alanlarında mikroorganizmaların inaktivasyon oranlarının arttığını ortaya koymuştur (Uemura ve Isobe, 2002; Park ve ark., 2017; Kim ve ark., 2018; Hashemi ve ark., 2019; Hashemi ve Roohi, 2019). *Escherichia coli*'nin inaktivasyonuna yönelik yapılan bir çalışmada, %0.1 tuz içeren sulu bir çözeltide (20 kHz, 0–14 kV/cm) uygulanan elektrik alan şiddeti artırıldığında ve sıcaklık sabit tutulduğunda *E. coli* inaktivasyonu artmıştır (Uemura ve Isobe, 2002). Benzer şekilde, domates ve portakal sularında gerçekleştirilen çalışmalarda *E. coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium ve *Listeria monocytogenes* gibi patojen mikroorganizmaların inaktivasyonunda, daha yüksek elektrik alan şiddetleri (60 Hz, 25–40 V/cm) aynı işlem süresi içinde ohmik ısıtma yönteminin etkinliğini artırmıştır (Lee ve ark. 2012). Ayrıca, sodyum klorür çözeltisinde *Bacillus subtilis* sporlarına yönelik olarak 20 kHz frekansta uygulanan 20 V/cm elektrik

alan şiddetinin, 5 ve 10 V/cm değerlerine kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek bir inaktivasyon sağladığı bildirilmiştir (Murashita ve ark., 2017). Sagong ve ark. (2011)'e göre uygulanan elektrik alanının iki katına çıkarılması (10 V/cm'den 20 V/cm'ye) durumunda, 5D indirgeme işlem süresinin yaklaşık %75 oranında azaldığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, diğer bir çalışmada, incelenen bakterilerin hiçbirinin 60 V/cm'lik bir elektrik alanına 30 saniyeden uzun süre dayanamayacağını gösterirken 30 V/cm'lik bir elektrik alanı uygulandığında ise, 60 saniyelik işlem süresine rağmen, yüksek sayıda canlı hücrenin varlığı gözlemlenmiştir (Park ve ark., 2017). Bu davranış, Shao ve ark. (2019) tarafından da doğrulanmıştır. Ayrıca, söz konusu çalışmalarda, daha yüksek voltajların uygulandığı durumlarda, yaralı hücrelerin iyileşme hızının daha yavaş olduğu bildirilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmaların tümü, artan elektrik alan şiddetinin, mikroorganizmaların daha etkili bir şekilde inaktive edilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Joule yasasına göre, bir sistemde üretilen ısı miktarı, sistemden geçen elektrik akımının karesi, direnci ve süre ile doğru orantılıdır. Bu bağlamda, ohmik ısıtma uygulamalarında elektrik akımının büyüklüğü, mikroorganizmaların inaktivasyonu üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Elektrik akımı, yalnızca gıdanın hızlı ve homojen şekilde ısınmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda mikrobiyal inaktivasyona katkıda bulunan doğrudan elektrotermal etkiler de oluşturabildiği için bu etkiyi araştırmak amacıyla araştırmacılar 20 °C sıcaklıkta fosfat tampon çözeltisi (0.1 mol/L, pH 7.1) içerisinde *Saccharomyces cerevisiae* üzerinde düşük amperajlı doğru akımın inaktivasyon potansiyelini incelemişlerdir (Guillou ve El Murr, 2002). Çalışma sonucunda, desimal azalma sürelerinin (D-değerleri) uygulanan akım şiddetiyle ters orantılı olduğu belirlenmiştir. Spesifik olarak, elektrik akımı 0.1 A'den 1 A'ye çıkarıldığında D-değeri 1.547 dakikadan 140 dakikaya düşmüş ve böylece artan akım şiddetinin inaktivasyon etkinliğini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 4.3 incelendiğinde voltaj gradyanı artışının akım değeri artmasına yol açtığı ve sonuç olarak mikrobiyal inaktivasyonu da artırdığı görülmektedir. Bu sonuçlar, belirli bir mikroorganizmanın hedeflenen popülasyon düzeyine indirgenmesi için gereken işlem süresinin, uygulanan akım şiddeti temel alınarak tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Buna karşın, mevcut literatürde ohmik ısıtma işlemlerinde mikrobiyal inaktivasyon etkileri genellikle doğrudan akım şiddeti üzerinden değil, dolaylı bir parametre olan elektrik alan şiddeti üzerinden incelenmiştir. Bu nedenle, elektrik akımının doğrudan etkilerinin daha ayrıntılı

şekilde değerlendirilmesi, ohmik ısıtma teknolojisinin mikrobiyal güvenlik açısından optimize edilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada, voltaj gradyanındaki artış ile birlikte hedef merkez sıcaklığa ulaşma süresi kısalmış olmakla birlikte, tavuk köftelerinde *Salmonella* inaktivasyonunun arttığı gözlemlenmiştir. Literatürdeki birçok çalışma, ohmik ısıtma sürecinde hücre ölümünün başlıca termal olmayan mekanizmasının elektroporasyon olduğunu ve bu mekanizmanın hücre zarında gözenek oluşumuna ve zar geçirgenliğinde değişikliklere yol açtığını belirtmektedir (Park ve Kang, 2013; Cho ve ark., 2020; Kaur ve ark., 2024). Bu bağlamda, mikroorganizmaların termal ölüm sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda da etkili bir şekilde inaktive edilebildiği vurgulanmaktadır. Elektroporasyon, elektrik alan şiddetinin belirli bir eşik değerin üzerine çıkması durumunda meydana gelir. Bu eşik aşıldığında, hücre zarının iletkenliğinin önemli ölçüde arttırmasının sonucu olarak hücre içi materyalin dış ortama sızması söz konusu olmaktadır (Yoon, 2002; Park ve Kang, 2013; Astráin-Redín ve ark., 2024). Bu durum, hücre içi iyonların ve diğer moleküllerin yoğun biçimde dışarıya çıkmasına neden olarak hücre ölümünü tetikler (Yoon, 2002; Sun ve ark., 2011). Hücre duvarı ve sitoplazmik zarında meydana gelen ciddi yapısal hasarlar sonucunda, hücrelerin lizis sürecine girdiği ifade edilmektedir. Sonuç olarak, ohmik ısıtma sırasında uygulanan elektrik alanın (11 V/cm ve üzeri) uygun düzeyde olması, termal etkilerin ötesinde mikrobiyal inaktivasyonu artıran önemli bir faktör olarak değerlendirilebilir.

Literatürde yapılan bazı önceki çalışmalarda da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Sagong ve ark., 2011; Kim ve ark., 2018; Hashemi ve Roohi, 2019;). Ancak, gıda matrisinin formülasyonundaki farklılıklar nedeniyle bu çalışmanın sonuçlarıyla literatürdeki bulgular arasında doğrudan bir karşılaştırma yapmak güçtür. Çünkü gıdaların elektriksel iletkenliği, uygulanan ısı işlem süresi ve sıcaklığın artmasıyla birlikte yükselmekte; bu durum, ısıtma hızının artmasına ve dolayısıyla mikrobiyal inaktivasyon üzerinde doğrudan etkili olabilecek sonuçlara yol açmaktadır (Tian ve ark., 2018; Balthazar ve ark., 2024). Ancak, iletkenlikte gözlenen bu değişimler, gıdanın türüne özgü farklılıklar göstermektedir. Sarang ve ark., (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, taze meyve örnekleri (kırmızı elma, golden elma, armut, şeftali, çilek ve ananas), 25–140 °C sıcaklık aralığında incelenmiş ve bu meyvelerin, et ürünlerine (tavuk, domuz ve sığır eti) kıyasla daha düşük elektriksel iletkenliğe sahip olduğu rapor edilmiştir. Aynı çalışmada, şeftali ve çileğin, elma, armut ve ananasa kıyasla daha yüksek iletkenliğe sahip olduğu da belirtilmiştir. Üç boyutlu grafik analizleri, rendelenmiş lahana örneklerinin Daikon turp

küplerine göre daha düşük ısıtma hızlarına sahip olduğunu göstermektedir (Duguay ve ark., 2016). Diğer bazı araştırmalarda, kayısı püresinin, uygulanan tüm elektrik alan şiddetlerinde (20–70 V/cm), şeftali püresine kıyasla daha yüksek ısıtma hızlarına ulaştığı bildirilmiştir. Bu farklılık, kayısı püresinin daha düşük posa içeriği ve daha düşük pH değerine sahip olmasıyla ilişkilendirilmiştir (Icier ve Ilicali, 2005). Portakal örneklerinin elektriksel iletkenliği, sabit sıcaklıklarda (30–80 °C) ve aynı °Brix konsantrasyonlarında (12, 17, 22, 27 ve 32 °Brix) ananas örneklerine göre anlamlı düzeyde daha yüksek bulunmuştur. Bu durumun, portakal örneklerindeki daha yüksek iyon konsantrasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir (Tumpanuvatr ve ark., 2011). Ayrıca, yüksek sıcaklık ve konsantrasyon koşullarında, püre örneklerinin iletkenliğinin meyve suyu örneklerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu, pürelerdeki katı madde oranının ve parçacık boyutunun elektriksel iletkenlik üzerindeki olumsuz etkilerine bağlanmaktadır. Şeker konsantrasyonunun da iletkenlik üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir. Örneğin, elma suyunda artan şeker konsantrasyonu (18, 24, 36, 48 ve 72 °Brix), tüm uygulanan elektrik alan şiddetlerinde (30, 40, 50 ve 60 V/cm) iletkenlikte azalmaya neden olmuş; en düşük ısıtma hızının ise 72 °Brix'te gerçekleştiği rapor edilmiştir (Park ve ark., 2017). Bu bulgular, farklı bileşimlere sahip gıdaların elektriksel iletkenlik bakımından farklılıklar gösterdiğini ve dolayısıyla ohmik ısıtma uygulamalarında, mikrobiyal inaktivasyonun etkinliği için gıdanın özgül özelliklerine göre işlem parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yağ içeriğinin mikroorganizmaların inaktivasyonu üzerindeki etkisi konvansiyonel ısıtmada sınırlı olup, bu süreçte ısı transferi iletim ve taşınım yoluyla gerçekleştiğinden, yağın varlığı belirgin bir rol oynamamaktadır (Tian ve ark., 2020). Ancak, ohmik ısıtma uygulamalarında durum farklıdır. Yağ, iyi bir yalıtkan olması nedeniyle gıdanın elektriksel iletkenliğini azaltmakta ve bu durum, mikroorganizmalar üzerinde koruyucu bir etki oluşturmaktadır (Cho ve Kang, 2024). Süt ve et ürünlerinde yağ içeriğinin artması, iyonik hareketliliği düşürerek elektriksel iletkenliğin azalmasına yol açmaktadır. Bu durum, süt içerisinde bulunan *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium ve *Listeria monocytogenes* gibi patojenlerin inaktivasyonuna ilişkin yapılan bir çalışmada da doğrulanmıştır (Kim ve Kang, 2015). Söz konusu çalışmada, yağ oranının %0'dan %10'a yükselmesiyle birlikte bu mikroorganizmaların inaktivasyon oranlarında azalma gözlemlenmiş; buna karşılık, geleneksel ısıtma yöntemleri uygulandığında benzer bir etki rapor edilmemiştir. Yağ içeriğinin inhibe edici etkisi, mikroorganizma türüne bağlı olarak

değişkenlik göstermektedir. Nitekim yapılan bir başka çalışmada, *E. coli O157:H7*, *S. Typhimurium* ve *L. monocytogenes*, farklı yağ içeriğine sahip ortamlarda (%1.5 – %5.5) önemli ölçüde daha fazla inhibe edilmiştir (Kim ve ark., 2017). Kıyma örnekleri üzerinde yapılan elektriksel iletkenlik analizlerinde ise, en düşük yağ içeriğine sahip numuneler (%2, %9 ve %15 yağ) en yüksek elektriksel iletkenlik değerlerini göstermiştir (Bozkurt ve İcier, 2010). Bu bulgular, özellikle yüksek yağ içeriğine sahip süt ve et ürünlerinin ohmik ısıtma ile işlenmesinde, işlem parametrelerinin yağ miktarına göre dikkatli biçimde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle et ve et ürünlerinin mikrobiyolojik güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır (Kim ve ark., 2017).



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, tavuk köftesinin pişirme sürecinde ohmik ısıtma yönteminin uygulanabilirliği, işlem parametreleri ve kalite özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Ohmik ısıtma, elektrik akımının doğrudan gıda üzerinden geçirilmesiyle ürünün iç yapısında ısı üretimini sağlayan hacimsel ve modern bir ısıtma teknolojisi olarak değerlendirilmiştir. Çalışma, hem işlem verimliliği hem de gıda güvenliği ve kalite parametreleri açısından önemli bilimsel çıktılar sunmuştur.

Yapılan deneylerde tavuk köftesi örnekleri üç farklı voltaj gradyanında (7, 11 ve 15 V/cm) pişirilmiştir. Uygulanan voltaj gradyanı arttıkça pişirme süresinde anlamlı bir azalma gözlemlenmiştir. Örneğin, 7 V/cm'de pişirme süresi 390 saniye iken, bu süre 15 V/cm'de 86 saniyeye kadar düşmüştür. Bu bulgu, ohmik ısıtma yönteminin hızlı ve enerji verimli bir pişirme süreci sağladığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, yüksek voltaj gradyanlarında sıcaklık artış hızının fazla olması, ısının homojen dağılımını olumsuz etkileyebilmektedir ve bu durum, temassız sıcaklık ölçüm sonuçlarıyla da desteklenmektedir. Özellikle 15 V/cm uygulamasında, ürünün merkez ve dış yüzeylerinde sıcaklık farklarının oluştuğu ve bu farkların işlem sonrası termal görüntülemeyle tespit edildiği rapor edilmiştir.

Elektriksel iletkenlik verileri, işlem sıcaklığı arttıkça iletkenliğin düzenli olarak yükseldiğini ve bu artışın iyonik hareketlilikle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu durum, işlem sırasında sistemin enerji verimliliğini olumlu yönde etkileyen bir parametre olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada önemli kalite göstergeleri olan tekstürel analizler, renk değerleri ve mikrobiyal güvenlik ölçütleri detaylı biçimde ele alınmıştır. Tekstür analizleri neticesinde sertlik, dış yapışkanlık, sakızimsılık ve çiğnenebilirlik gibi parametrelerde voltaj gradyanına bağlı anlamlı değişiklikler meydana geldiği belirlenmiştir. 15 V/cm voltaj gradyanı, tekstürel parametre değerleri açısından diğer voltaj gradyanlarından farklılaştığı tespit edilmiştir.

Renk ölçümlerinde, pişirme voltaj gradyanı arttıkça  $L^*$  (parlaklık) değerinin arttırdığı belirlenmiştir.  $a^*$  (kırmızılık) değerinin ise pişirmenin etkisiyle işlem görmemiş örnekler göre değerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Gıda güvenliği açısından en kritik bulgulardan biri, *Salmonella* türlerine yönelik yapılan mikrobiyolojik analizlerde elde edilmiştir. Tüm voltaj gradyanlarında, merkez

sıcaklığı 75 °C'ye ulaşan köfte örneklerinde *Salmonella* inaktivasyonunun başarılı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, ohmik ısıtmanın gıda güvenliğini sağlamada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Özellikle 11 ve 15 V/cm uygulamaları, hem kısa sürede pişirme hem de mikrobiyal güvenliğin eş zamanlı sağlanması açısından başarılı bulunmuştur.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, ohmik ısıtmanın tavuk köftesi gibi düşük yağ içerikli et ürünlerinin pişirilmesinde uygulanabilirliğini güçlü verilerle ortaya koymuştur. Buradan yola çıkılarak, ohmik ısıtma yöntemiyle pişirme sürecinin optimizasyonu sağlanarak endüstriyel gıda üretimindeki uygulanabilirliğinin artırılacağı ifade edilebilir. Farklı et türleri, baharat kombinasyonları ve katkı maddeleri ile yapılacak ileri araştırmalar, yöntemin genel geçer kullanım alanlarını genişletebilir. Ayrıca, homojen ısı dağılımını artırmak için elektrot tasarımı ve sistem parametreleri yeniden değerlendirilmelidir. Tüketici odaklı duyu analizlerin eklenmesiyle ürün kabulü daha kapsamlı incelenebilir. Son olarak, enerji verimliliği ve gıda güvenliği avantajları nedeniyle bu yöntem kamu yemekhanelerinde de uygulanabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Altuğ, T., 1993.** Duyusal Test Teknikleri. *Ege Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi Ders Kitapları*, Yayın No:28, 1.Baskı, 55s., İzmir.
- Assiry, A. M., Gaily, M. H., Alsamee, M., Arifudin, A., 2010.** Electrical conductivity of seawater during ohmic heating. *Desalination*, 260(1–3):9–17.
- Astráin-Redín, L., Ospina, S., Cebrián, G., Álvarez-Lanzarote, I., 2024.** Ohmic heating technology for food applications, from ohmic systems to moderate electric fields and pulsed electric fields. *Food Engineering Reviews*, 16(2):225-251.
- Balthazar, C.F., Pimentel, T.C., Silva, R., Prudencio, E.S., Cruz, A.G., Mársico, E.T., 2024.** Recent findings on the ohmic heating application in meat products. *Current Opinion in Food Science*, 58, 101180.
- Baysal T., İcier, F., Baysal, A.H., 2011.** Güncel elektriksel ısıtma yöntemleri, SİDAS Yayınları, İzmir, 348s.
- Boby, F., Hossain, M. A., Hossain, M. M., Rahman, M. M., Azad, M. A. K., Hashem, M. A., 2021.** Effect of long coriander leaf (*Eryngium foetidum*) extract as a natural antioxidant on chicken meatballs during at freezing temperature. *SAARC Journal of Agriculture*, 19(2):271-283.
- Bolin, H.R., Huxsoll, C.C., 1991.** Effect of preparation procedures and storage parameters on quality retention of salad-cut lettuce. *Journal of Food Science*, 56(1):60-62.
- Bourne, M., 2002.** Food texture and viscosity: concept and measurement. Elsevier.
- Bozkurt, H., İcier, F., 2010a.** Electrical conductivity changes of minced beef-fat blends during ohmic cooking. *Journal of Food Engineering*, 96(1):86–92.
- Bozkurt, H., İcier, F., 2010b.** Exergetic performance analysis of ohmic cooking process. *Journal of Food Engineering*, 100(4):688–695.
- Bozkurt, H., İcier, F., 2010c.** Ohmic cooking of ground beef: Effects on quality. *Journal of Food Engineering*, 96(4):481–490.
- Bozkurt, H., İcier, F., 2012.** Ohmic thawing of frozen beef cuts. *Journal of Food Process Engineering*, 35(1):16–36.
- Bromfield, J.I., Hoffman, L.C., Horyanto, D., Soumeh, E.A., 2021.** Enhancing growth performance, organ development, meat quality, and bone mineralisation of broiler chickens through multi-enzyme super-dosing in reduced energy diets. *Animal*, 11, 2791.
- Buffière, C., Gaudichon, C., Hafnaoui, N., Migné, C., Scislowsky, V., Khodorova, N., Mosoni, L., Blot, A., Boirie, Y., Dardevet, D., ve ark. 2017.** In the elderly, meat

protein assimilation from rare meat is lower than that from meat that is well done. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 106:1257–1266.

- Cabas, B.M., Icier, F., 2021.** Ohmic heating–assisted extraction of natural color matters from red beetroot. *Food and Bioprocess Technology*, 14(11):2062–2077.
- Cevik, M., Icier, F., 2018.** Effects of voltage gradient and fat content on changes of electrical conductivity of frozen minced beef meat during ohmic thawing. *Journal of Food Process Engineering*. 41(4), e12675
- Cevik, M., Icier, F., 2021.** Comparison of quality attributes of minced beef samples thawed by ohmic and conventional methods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2), e15122.
- Cho, E.R., Kim, S.S., Kanga, D.H., 2020.** Inactivation kinetics and membrane potential of pathogens in soybean curd subjected to pulsed ohmic heating depending on applied voltage and duty ratio. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(14).
- Cho, E.R., Kang, D.H., 2024.** Development and investigation of ultrasound-assisted pulsed ohmic heating for inactivation of foodborne pathogens in milk with different fat content. *Food Research International*, 179, 113978.
- Chua, L.S., Thong, H.Y., Soo, J., 2024.** Effect of pH on the extraction and stability of anthocyanins from jaboticaba berries. *Food Chemistry Advances*, 5, 100835.
- Council, N. Nordic Nutrition Recommendations 2012. 2014. Integrating Nutrition and Physical Activity;** Nordic Co-Operation: Copenhagen, Denmark,
- Dal, H.Ö.G., Gursoy, O., Yilmaz, Y., 2025.** Ohmic heating under vacuum integrated with vacuum cooling: pre-cooking and cooling beef meatballs. *Food and Bioprocess Technology*, 1-18.
- Darvishi, H., Behrooz-Khazaei, N., Koushesh Saba, M., Alimohammadi, Z., Nourbakhsh, H., 2021.** The influence of Ohmic-vacuum heating on phenol, ascorbic acid and engineering factors of kiwifruit juice concentration process. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(9):4789–4798.
- Dikeman, M., Devine, C., 2014.** Encyclopedia of Meat Sciences, 2nd ed.; Academic Press: Oxford, UK, Volume I.
- Döner, D., Çokgezme, Ö. F., Çevik, M., Engin, M., İçier, F., 2020.** Thermal image processing technique for determination of temperature distributions of minced beef thawed by ohmic and conventional methods. *Food and Bioprocess Technology*, 13(11):1878–1892.
- Duguay, A.J., Ramaswamy, H.S., Zareifard, R., Zhu, S., Grabowski, S., Marcotte, M., 2016.** Ohmic heating behaviour of cabbage and daikon radish. *Food and Bioprocess Technology*, 9(3):430-440.

- Engchuan, W., Jittanit, W., Garnjanagoonchorn, W.,** 2014. The ohmic heating of meat ball: Modeling and quality determination. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 23:121-130.
- FAO,** 2010. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fats and fatty acids in human nutrition: Report of an expert consultation. In FAO Food and Nutrition Paper; FAO: Rome, Italy, 2010.
- FAO,** 2020. Food and Agricultural Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. 15 Mart 2023.
- FAO.** 2022 Meat. In OECD-FAO Agricultural Outlook 2022–2031, OECD Publishing: Paris, France, 2022; pp. 163–177.
- FAO.** 2024. *FAOSTAT*. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- FAO,** 2025. Meat Market Review: Overview of Global Market Developments in 2024. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4e35e57c-cf98-4b2f9adc-388781b51fae/content>. 15 Mayıs 2025.
- Francis, F.J., Clydesdale, F.M.,** 1975. Food colorimetry: theory and applications. Westport, CT: AVI Publishing.
- García-Segovia, P., Andrés-Bello, A., Martínez-Monzó, J.,** 2007. Effect of cooking method on mechanical properties, color and structure of beef muscle (*M. pectoralis*) *Journal of Food Engineering*, 80:813–821.
- Gavahian, M., Farahnaky, A., Sastry, S.,** 2016. Ohmic-assisted hydrodistillation: A novel method for ethanol distillation. *Food and Bioproducts Processing*, 98:44–49.
- Goluch, Z., Słupczyńska, M., Okruszek, A., Haraf, G., Wereńska, M., Wołoszyn, J.** 2023. The energy and nutritional value of meat of broiler chickens fed with various addition of wheat germ expeller. *Animals*, 13(3), 499.
- Goksu, A., Omac, B., Sabancı, S.,** 2022. Ohmic heating: A futuristic method for cooking bulgur. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), e17025.
- Guillou, S., El Murr, N.,** 2002. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in solution by low-amperage electric treatment. *Journal of Applied Microbiology*, 92(5):860-865.
- Han, M.A., Zeraatkar, D., Guyatt, G.H., Vernooij, R.W., El Dib, R., Zhang, Y., Algarni, A., Leung, G., Storman, D., Valli, C.,** 2019. Reduction of red and processed meat intake and cancer mortality and incidence: A systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Annals of Internal Medicine*, 171:711–720.
- Haščík, P., Pavelková, A., Tkáčová, J., Cubon, J., Kacániová, M., Habánová, M., Mlyneková, E.,** 2020. The amino acid profile of broiler chicken meat after dietary administration of bee products and probiotics. *Biologia*, 75:1899–1908.

- Hashemi, S.M.B., Gholamhosseinpour, A., Niakousari, M., 2019.** Application of microwave and ohmic heating for pasteurization of cantaloupe juice: microbial inactivation and chemical properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(9):4276-4286.
- Hashemi, S. M. B., Roohi, R., 2019.** Ohmic heating of blended citrus juice: Numerical modeling of process and bacterial inactivation kinetics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52:313-324.
- Henchion, M., McCarthy, M., Resconi, V.C. Troy, D., 2014.** Meat consumption: Trends and quality matters. *Meat Science*, 98:561–568.
- Hodgkinson, S.M., Montoya, C.A., Scholten, P.T., Rutherford, S.M., Moughan, P.J., 2018.** Cooking conditions affect the true ileal digestible amino acid content and digestible indispensable amino acid score (DIAAS) of bovine meat as determined in pigs. *The Journal of Nutrition*, 148:1564–1569.
- Hsu, S.Y., Chung, H.Y., 1998.** Effect of processing factors on qualities of emulsified meatball. *Journal of Food Engineering*, 36:337–347.
- Hsu, S.Y., Yu, S.H., 1999.** Effects of phosphate, water, fat and salt on low-fat emulsified meatball. *Journal of Food Engineering*, 39:123–130.
- Huda, N., Shen, Y.H., Huey, Y.L., 2009.** Proximate composition, colour, texture profile of Malaysian chicken balls. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(10):1555-1558.
- İçier, F., 2003.** Gıdaların ohmik ısıtma yöntemiyle ısıtılmasının deneysel ve kuramsal olarak incelenmesi. *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi. İzmir, 245s.
- Icier, F., 2011.** Ohmic heating of fluid foods. *Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods*, 305–367.
- İcier, F., Ilicali, C., 2004.** Electrical conductivity of apple and sourcherry juice concentrates during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, 27(3):159–180.
- Icier, F., Ilicali, C., 2005.** The effects of concentration on electrical conductivity of orange juice concentrates during ohmic heating. *European Food Research and Technology*, 220(3-4):406-414.
- Icier, F., Sengun, I.Y., Turp, G.Y., Arserim, E.H., 2014.** Effects of process variables on some quality properties of meatballs semi-cooked in a continuous type ohmic cooking system. *Meat Science*, 96(3):1345-1354.
- Icier, F., Cokgezme, O.F., Sabanci, S., 2016.** Alternative thawing methods for the blanched/non-blanched potato cubes: Microwave, ohmic, and carbon fiber plate assisted cabin thawing. *Journal of Food Process Engineering*. 40(2), e12403.

- Icier, F., Yildiz, H., Sabanci, S., Cevik, M., Cokgezme, O. F., 2017.** Ohmic heating assisted vacuum evaporation of pomegranate juice: Electrical conductivity changes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39:241–246.
- Ismiarti, I., Rokhman, A., Solkhan, M., Sugiyono, S., Putra, T.D., 2024.** Enhancing the quality of chicken meatball with egg albumen as binding agent: Study on chemical, texture profile, and sensory properties. *Jurnal Triton*, 15(2):538-546.
- Jayasena, D.D., Ahn, D.U., Nam, K.C., Jo, C., 2013.** Flavour chemistry of chicken meat: A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 26(5):732.
- Jittanit, W., Khuenpet, K., Kaewsri, P., Dumrongpongpaiboon, N., Hayamin, P., Jantarangsri, K., 2017.** Ohmic heating for cooking rice: Electrical conductivity measurements, textural quality determination and energy analysis. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 42:16–24.
- Jones, S.B., Carroll, R.J., Cavanaugh, J.R., 1977.** Structural changes in heated bovine muscle: A scanning electron microscope study. *Journal of Food Science*, 42:125–131.
- Karabulut, I., Topcu, A., Duran, A., Turan, S., Ozturk, B., 2007.** Effect of hot air drying and sun drying on color values and b-carotene content of apricot (*Prunus armeniaca* L.). *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 40:753–758.
- Kaur, N., Singh, A.K., 2016.** Ohmic heating: Concept and applications—a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(14):2338–2351.
- Kaur, M., Kumar, S., Samota, M. K., Lalremmawii., 2024.** Ohmic heating technology systems, factors governing efficiency and its application to inactivation of pathogenic microbial, enzyme inactivation, and extraction of juice, oil, and bioactive compounds in the food sector. *Food and Bioprocess Technology*, 17(2):299-324.
- Kek, S.P., Chin, N.L., Yusof, Y.A., 2013.** Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatment in convective drying of guava slices. *Food and Bioprocess Technology*, 91:495-506.
- Kim, S.S., Kang, D.H., 2015.** Effect of milk fat content on the performance of ohmic heating for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium and *Listeria monocytogenes*. *Journal of Applied Microbiology*, 119(2):475-486.
- Kim, S.S., Jo, Y., Kang, D.H., 2017.** Combined inhibitory effect of milk fat and lactose for inactivation of foodborne pathogens by ohmic heating. *LWT-Food Science and Technology*, 86:159-165.
- Kim, S.S., Park, S.H., Kang, D.H., 2018.** Application of continuous-type pulsed ohmic heating system for inactivation of foodborne pathogens in buffered peptone water and tomato juice. *LWT-Food Science and Technology*, 93:316-322.

- Lebovka, N.I., Shynkaryk, M.V., Vorobiev, E., 2006.** Drying of potato tissue pretreated by ohmic heating. *Drying Technology*, 24(5):601–608.
- Lee, S.Y., Sagong, H.G., Ryu, S., Kang, D.H., 2012.** Effect of continuous ohmic heating to inactivate *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium and *Listeria monocytogenes* in orange juice and tomato juice. *Journal of Applied Microbiology*, 112(4):723-731.
- Liu, S.Y., Macelline, S.P., Chrystal, P.V., Selle, P.H., 2021.** Progress towards reduced-crude protein diets for broiler chickens and sustainable chicken-meat production. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 12(1):1–13.
- Mehenktaş, C., Metin, M., 2007.** Yağı Azaltılmış Beyaz Peynir Üretiminde Egzopolisakkarit Üreten Starter Kültür Kullanımının Peynir Özelliklerine Etkileri; 2. Dokusal ve Duyusal Özelliklere Etkileri, *Hasad Gıda*, Ocak-Şubat, s.16-25.
- Marquez, J., Marrugo Padilla, A., Mendez Cuadro, D., Rodriguez Cavallo, E., 2021.** Residues of tetracyclines and beta-lactams antibiotics induce carbonylation of chickenbreast. *F1000Research*, 10, 575.
- Mottram, D.S., 1998.** Flavour formation in meat and meat products: a review. *Food Chemistry*, 62(4):415–424.
- Mozaffarian, D., Rosenberg, I., Uauy, R., 2008.** History of modern nutrition science Implications for current research, dietary guidelines, and food policy. *BMJ Journal* 361, k2392.
- Murashita, S., Kawamura, S., Koseki, S., 2017.** Effects of Ohmic heating, including electric field intensity and frequency, on thermal inactivation of *Bacillus subtilis* spores. *Journal of Food Protection*, 80(1):164-168.
- Murphy, R.Y., Johnson, E.R., Marks, B.P., Johnson, M.G., Marcy, J.A., 2001.** Thermal inactivation of *Salmonella* Senftenberg and *Listeria innocua* in ground chicken breast patties processed in an air convection oven. *Poultry Science*, 80(4):515–521.
- Obuz, E., Dikeman, M.E., Grobbel, J.P., Stephens, J.W., Loughin, T.M., 2004.** Beef longissimus lumborum, biceps femoris, and deep pectoralis Warner–Bratzler shear force is affected differently by endpoint temperature, cooking method and USDA quality grade. *Meat Science*, 68:243–248.
- Ong, K.J., Johnston, J., Datar, I., Sewalt, V., Holmes, D., Shatkin, J.A., 2021.** Food safety considerations and research priorities for the cultured meat and seafood industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6):5421-5448.
- Özcan Uzun, A., 2018.** Effects of hybrid (ultrasound, ohmic and infrared) treatments on the quality characteristics of meat. *Master Thesis*, University of Gaziantep, Gaziantep, Türkiye, 123p.

- Özcan, A.U., Bozkurt, H., 2024.** Effect of different thicknesses on colour and textural characteristics of beef cooked with ohmic and conventional method. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 9(2):184-189.
- Palaniappan, S., Sastry, S.K., 1991.** Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, 14(3):221–236.
- Pan, A., Sun, Q., Bernstein, A.M., Schulze, M.B., Manson, E.J., Willett, W.C., Hu, F.B., 2011.** Red meat consumption and risk of type 2 diabetes: 3 cohorts of US adults and an updated meta-analysis. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 94:1088–1096.
- Pan, A., Sun, Q., Bernstein, A.M., Schulze, M.B., Manson, J.E., Stampfer, M.J., Willett, W.C., Hu, F.B., 2012.** Red meat consumption and mortality: Results from 2 prospective cohort studies. *Archives of internal medicine*, 172:555–563.
- Park, I.K., Kang, D.H., 2013.** Effect of electroporation by ohmic heating for inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in buffered peptone water and apple juice. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(23):7122-7129.
- Park, I.K., Ha, J.W., Kang, D.H. 2017.** Investigation of optimum ohmic heating conditions for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in apple juice. *BMC Microbiology*, 17(1), 1-8.
- Pongviratchai, P., Park, J.W., 2007.** Physical properties of fish proteins cooked with starches or protein additives under ohmic heating. *Journal of Food Quality*, 30:783–796.
- Ravindran, V., 2013.** Poultry feed availability and nutrition in developing countries. *Poultry Development Review*, 2:60–63.
- Sabanci, S., 2020.** Investigation of electrical conductivity value and cooking homogeneity during ohmic cooking of turkish sausage. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2):219–226.
- Sagong, H.G., Park, S.H., Choi, Y.J., Ryu, S., Kang, D.H., 2011.** Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in orange and tomato juice using ohmic heating. *Journal of Food Protection*, 74(6):899-904.
- Sain, M., Minz, P.S., John, H., Singh, A., 2024.** Effect of ohmic heating on food products: an in-depth review approach associated with quality attributes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1):2025937.
- Sandoval-Insausti, H., Pérez-Tasigchana, R.F., López-García, E., García-Esquinas, E., Rodríguez-Artalejo, F., Guallar-Castillón, P., 2016.** Macronutrients intake and

incident frailty in older adults: A prospective cohort study. *The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences*, 71:1329–1334.

- Sarang, S., Sastry, S.K., Knipe, L., 2008.** Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 87(3):351-356.
- Savas, A., Oz, E., Oz, F., 2021.** Is oven bag really advantageous in terms of heterocyclic aromatic amines and bisphenol-A? Chicken meat perspective. *Food Chemistry*, 355, 129646
- Savas, A., Ekiz, E., Elbir, Z., Savas, B.D., Proestos, C., Elobeid, T., Khan, M.R., Oz, F., 2023.** Advantageous effects of sumac usage in meatball preparation on various quality criteria and formation of heterocyclic aromatic amines. *Separations* 10, 29.
- Savas, A., Oz, E., Elbir, Z., Oz, F., 2024.** Effect of dry aging on quality parameters, protein profile and protein oxidation level of beef. *International Journal of Food Science and Technology*, 59:7598–7609.
- Sengun, I.Y., Icier, F., Kor, G., 2017.** Effects of combined ohmic–infrared cooking treatment on microbiological inactivation of meatballs. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), e12309.
- Shao, L., Tian, X., Yu, Q., Xu, L., Li, X., Dai, R., 2019.** Inactivation and recovery kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 treated with ohmic heating in broth. *Food Science and Technology*, 110:1-7.
- Shirsat, N., Lyng, J.G., Brunton, N.P., 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., Scannell, A., 2004b.** Texture, colour and sensory evaluation of a conventionally and ohmically cooked meat emulsion batter. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(14):1861-1870.
- Silva, T.J.P., Orcutt, M.V., Forrest, J.C., Bracker, C.E., Judge, M.D., 1993.** Effect of heating rate on shortening, ultrastructure and fracture behavior of prerigor beef muscle. *Meat Science*, 33:1–24.
- Singh, M., Rama, E.N., Kataria, J., Leone, C., Thippareddi, H., Singh, M., Thippareddi, H., 2020.** Emerging meat processing technologies for microbiological safety of meat and meat products. *Meat and Muscle Biology*, 4(2):14-15.
- Sun, H., Masuda, F., Kawamura, S., Himoto, J.I., Asano, K., Kimura, T., 2011.** Effect of electric current of ohmic heating on nonthermal injury to *Streptococcus thermophilus* in milk. *Journal of Food Process Engineering*, 34(3):878-892.
- Szczesniak, A.S., 2002.** Texture is a sensory property. Food quality and preference, 13(4):215-225.

- Tian, X., Yu, Q., Wu, W., Dai, R., 2018.** Inactivation of microorganisms in foods by ohmic heating: A review. *Journal of Food Protection*, 81(7):1093-1107.
- Tian, X., Shao, L., Yu, Q., Silva-Vera, W., Li, X., Dai, R., 2020.** Comparative analysis of quality uniformity of ohmic and water bath heating treated pork batter with different fat content. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(4):e14377.
- Tieland, M., Borgonjen-Van den Berg, K.J., van Loon, L.J., de Groot, L.C., 2012.** Dietary protein intake in community-dwelling, frail, and institutionalized elderly people: Scope for improvement *European Journal of Nutrition*, 51:173–179.
- Truong, V.D., Daubert C.R., Drake M.A., Bexter, S.R., 2002.** Vane Rheometry for Textural Characterization of Cheddar Cheese, *Journal of Food Science*, 47:631-636.
- Tseng, T.F., Liu, D.C., Chen, M.T., 2000.** Evaluation of transglutaminase on the quality of low-salt chicken meat-balls. *Meat Science*, 55(4):427–431
- Tulsiyan, P., Sarang, S., Sastry, S.K., 2008.** Electrical conductivity of multicomponent systems during ohmic heating. *International Journal of Food Properties*, 11(1):233–241.
- Tumpanuvatr, T., Jittanit, W., 2011.** Mathematical models for electrical conductivities of fresh juices, concentrated juices and purees undergoing ohmic heating. *Thai Journal of Agricultural Science*, 44(5):312-318.
- Turp, G.Y., Icier, F., Kor, G., 2016.** Influence of infrared final cooking on color, texture and cooking characteristics of ohmically pre-cooked meatball. *Meat Science*, 114:46-53.
- TÜİK. 2024.** *TÜİK Kurumsal*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Kumes-Hayvanciligi-Uretim-Ekim-2023-49416&dil=1>
- Uemura, K., Isobe, S., 2002.** Developing a new apparatus for inactivating *Escherichia coli* in saline water with high electric field AC. *Journal of Food Engineering*, 53(3):203-207.
- Valenzuela, P.L., Mata, F., Morales, J.S., Castillo-García, A., Lucia, A., 2019.** Does beef protein supplementation improve body composition and exercise performance? A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Nutrients*, 11:1429.
- Vasanthi, C., Venkataramanujam, V., Dushyanthan, K., 2007.** Effect of cooking temperature and time on the physico-chemical, histological and sensory properties of female carabeef (buffalo) meat. *Meat Science*, 76:274–280.
- Wang, X., Lin, X., Ouyang, Y.Y., Liu, J., Zhao, G., Pan, A., Hu, F.B., 2016.** Red and processed meat consumption and mortality: Dose–response meta-analysis of prospective cohort studies. *Public Health Nutrition*, 19:893–905.

- Wood, J.D., Enser, M., Fisher, A.V., Nute, G.R., Sheard, P.R., Richardson, R.I., Hughes, S.I., Whittington, F.M., 2008.** Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review. *Meat Science*, 78:343–358.
- Wyness, L., Weichselbaum, E., O'Connor, A., Williams, E.B., Benelam, B., Riley, H., Stanner, S., 2011.** Red meat in the diet: An update. *Nutrition Bulletin*, 36:34–77.
- Yildirim, I., Ceylan, M., 2008.** Urban and rural households' fresh chicken meat consumption behaviors in Turkey. *Nutrition and Food Science*, 38(2):154–163.
- Yildiz Turp, G., Icier, F., Kor, G., 2016.** Influence of infrared final cooking on color, texture and cooking characteristics of ohmically pre-cooked meatball. *Meat Science*, 114:46–53.
- Yoon, S.W., Lee, C.Y.J., Kim, K.M., Lee, C.H., 2002.** Leakage of cellular materials from *Saccharomyces cerevisiae* by ohmic heating. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 12(2):183-188.
- Zaboli, G., Huang, X., Feng, X., Ahn, D.U., 2019.** How can heat stress affect chicken meat quality? – a review. *Poultry Science*, 98(3):1551–1556.
- Zell, M., Lyng, J.G., Cronin, D.A., Morgan, D.J., 2009a.** Ohmic heating of meats: Electrical conductivities of whole meats and processed meat ingredients. *Meat Science*, 83(3): 563–570.
- Zell, M., Lyng, J.G., Cronin, D.A., Morgan, D.J., 2009b.** Ohmic cooking of whole beef muscle—Optimisation of meat preparation. *Meat Science*, 81(4):693-698.
- Zell, M., Lyng, J.G., Cronin, D.A., Morgan, D.J., 2010.** Ohmic cooking of whole turkey meat — Effect of rapid ohmic heating on selected product parameters. *Food Chemistry*, 120:724–729.