

## Gıdaların Elektriksel Yöntemlerle İşlenmesinde Uygulanan Farklı Frekans ve Dalga Şekillerinin Proses Etkinliği Üzerine Etkisi

Deniz Döner<sup>1</sup> , Filiz İçier<sup>2</sup> <sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Bornova, İzmir<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir

Geliş Tarihi (Received): 02.05.2017, Kabul Tarihi (Accepted): 20.07.2017

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): denizdonerr@gmail.com (D. Döner)

☎ 0 232 311 30 21 📠 0 232 342 75 92

### ÖZ

Gıda işleme teknolojilerinde, daha kaliteli ürün eldesi amacıyla minimal işleme yöntemlerinin kullanımı yaygın hale gelmiştir. Minimal işleme yöntemleri arasında yer alan elektriksel yöntemler, gıdaların işlenmesinde farklı amaçlarla (kurutma, ekstraksiyon, pastörizasyon, sterilizasyon, pişirme, çözündürme vb.) uygulanmaktadır. Elektriksel işlemin etkinliği uygulanan frekans ve dalga tipinden etkilenmektedir. İşlem için seçilen parametreler, uygulamanın verimi ve ürün kalitesi üzerine etkili olmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda, yüksek frekans uygulamalarının gıda içerisinde ve elektrot yüzeylerinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonları minimize ettiği, farklı dalga tiplerinin ürün kalitesi üzerine etkisinin olmadığı, ancak kare dalga tipi uygulamasının elektriksel iletkenlik değerini düşürerek işlem süresini arttırdığı ifade edilmektedir. Bu derleme çalışmasında, gıdaların elektriksel yöntemlerle işlenmesinde farklı frekans ve dalga tipi uygulamalarının işlem süresi, işlem verimliliği, ürün kalitesi ve mikroorganizmaların inaktivasyonu üzerine etkileri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Frekans, Dalga tipi, Elektriksel işlemler, Kalite

### Effect of Different Frequencies and Waveforms Applied during Processing of Foods by Electrical Methods on Process Efficiency

#### ABSTRACT

In food processing technologies, minimally processing technologies have been commonly used for the purpose of enhancing the quality of foods. Electrical methods, minimal processing techniques such as drying, extraction, pasteurization, sterilization, cooking and thawing, have been used for different purposes in food industry. The efficiency of electrical process is influenced by the frequency and wave form applied. Selected process parameters influence the process yield and product quality to be obtained. Studies conducted on these subjects reported that high frequency applications minimized electrochemical reactions in foods and on electrode surfaces, and the effect of different wave forms on the product quality was insignificant, but the application of square waveform increased the process time by decreasing the electrical conductivity value. In this study, the effect of different frequencies and wave forms during processing by electrical methods on process time, process efficiency, product quality and inactivation of microorganisms was reviewed.

**Keywords:** Frequency, Wave form, Electrical methods, Quality

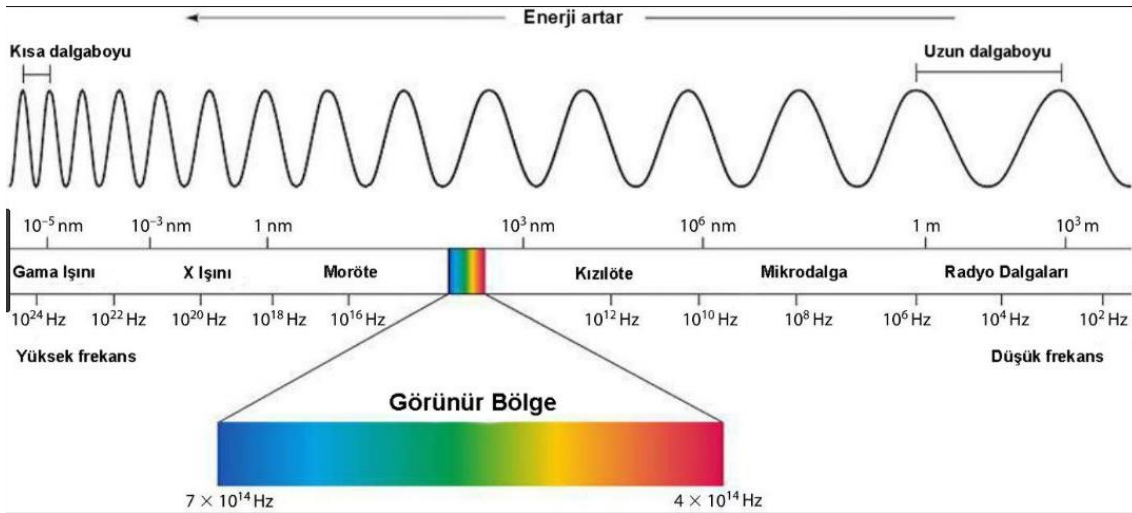
## GİRİŞ

Tüketicinin daha kaliteli gıda ürünlerini talep etmesinde meydana gelen artış, gıda üreticilerinin fonksiyonel gıda ürünlerinin geliştirmesi ve alternatif gıda işleme yöntemlerine yönelmesini beraberinde getirmiştir. Geleneksel gıda işleme yöntemlerinin ürün kalitesinde istenmeyen kayıplara neden olması ve genellikle yüksek enerji tüketimine sahip uzun süren işlemler olması nedeniyle alternatif olabilecek güncel gıda işleme teknikleri geliştirilmektedir. Isıl ve ısıl olmayan elektriksel işlemler (ohmik ısıtma, elektroplazmoliz, yüksek voltaj ark deşarjı, vurgulu elektrik alan, salınımlı manyetik alan, indüktif ısıtma, radyo frekans ısıtma, mikrodalga ısıtma, kızılötesi ısıtma, morötesi ışık, vurgulu ışık, vurgulu X-ışını, elektrodializ, elektrohidrodinamik, elektrokurutma, vb.) son yıllarda incelenen güncel gıda işleme teknikleri arasında önemli yer tutmaktadır [1]. Elektriksel ısıtma yöntemleri, gıdaların korunmasında ve işleminde gerekli ısının üretilmesi için yeni kaynaklara odaklanan ve termal mekanizmalara dayanan yöntemlerdir [2]. Ohmik ısıtma, radyo frekans, mikrodalga ve kızılötesi ısıtma yöntemleri güncel elektriksel ısıtma yöntemleridir. Isıl olmayan elektriksel yöntemlerde ise sıcaklık artışı hedeflenmemekte, işlemin ısıl olmayan elektriksel etkileri ön planda tutulmaktadır [3, 4]. Vurgulu elektriksel alan (VEA) ve morötesi ışık teknolojisi gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak bu yöntemlerde farklı frekans uygulamaları konusunda literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır [4-8]. Yüksek voltaj ark deşarjı, salınımlı manyetik alan, indüktif ısıtma, vurgulu X- ışını, elektrodializ, elektrohidrodinamik, elektrokurutma vb. yöntemlerinin gıdalara uygulanması konusunda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu teknolojiler, araştırma-geliştirme safhasında olup gıda endüstrisinde ticari uygulamaları henüz bulunmamaktadır.

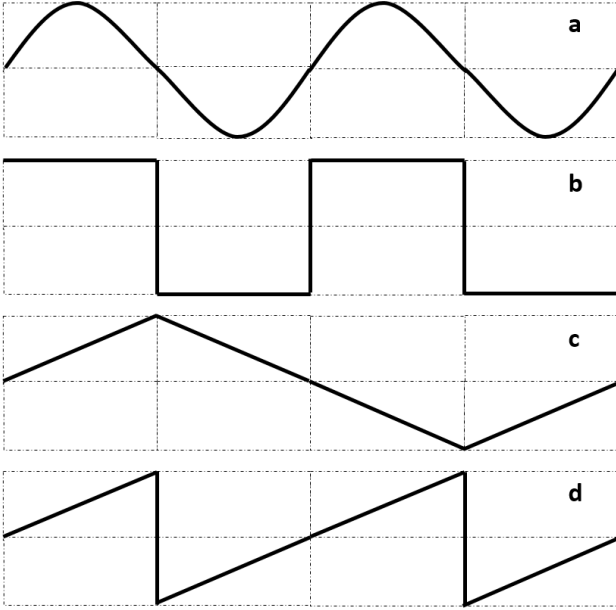
Güncel elektriksel işlemler, gıdaların ısıtılması, pastörizasyonu, sterilizasyonu, haşlanması, pişirilmesi, çözündürülmesi, verimin artırılması, kütle transferi etkinliğinin artırılması, değerli bileşen ekstraksiyonu vb. gibi farklı amaçlarla uygulanabilmektedir [3, 9]. Elektriksel işleme yöntemleri, elektromanyetik spektrumda farklı frekans aralıklarında uygulanan işlemlerdir (Şekil 1). Ohmik ısıtma, 4-100 Hz frekans aralığında uygulanması nedeniyle elektromanyetik spektrumda oldukça düşük frekans bölgesinde yer almaktadır. Mikrodalga ve radyo frekans (RF) ısıtma ise, dielektrik ısıtma frekans bölgesindeki ( $3 \times 10^6 - 3 \times 10^{10}$  Hz) elektromanyetik dalgaların gıdaya uygulanması şeklinde gerçekleşmektedir. Kızılötesi ısıtma ise  $3 \times 10^{12} - 3 \times 10^{14}$  Hz aralığında elektromanyetik dalga üreten ısıtıcılar ile gıda yüzeyi arasındaki termal ışıma etkisi prensibine dayanmaktadır. Morötesi ışık,  $3 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$  Hz (10-400 nm dalga boyu) aralığında elektromanyetik dalgalarından oluşmaktadır. Vurgulu ışık teknolojisinde ise, elektromanyetik spektrumda 110- 180 nm dalga boyu aralığında ışık üreten lambalar tarafından üretilen ışık demetleri, vurgulu olarak uygulanmakta, güneşten 2000 kat daha fazla bir spektrum elde edilmektedir. VEA işlemi ise, yaygın olarak 0.2-50 Hz aralığında uygulanmaktadır.

Gıdaların elektriksel işleme yöntemleri ile işlenmesinde uygulanan dalganın şekli farklı olabilmektedir (Şekil 2.).

Gıda işlemede uygun elektriksel işlemin seçilmesinde, uygun işlem parametre seçiminin de önemi büyüktür. Elektriksel işlemlerde gıdanın özelliklerindeki değişim ve işlem etkinliği üzerinde frekans ve uygulanan dalga tipi etkilidir. Bu çalışmada, elektriksel gıda işleme yöntemlerinde farklı frekans ve dalga tipi uygulamalarının işlem etkinliği ve gıdaların bazı özelliklerindeki değişim üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar derlenmiştir.



Şekil 1. Elektromanyetik spektrum [10]



Şekil 2. Dalga şekilleri; a. Sinüs dalga şekli, b. Kare dalga şekli, c. Üçgen dalga şekli, d. testere dişi dalga şekli

### ISITMA KARAKTERİSTİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Elektriksel ısıtma yöntemleri arasında özellikle ohmik ısıtma işleminde farklı frekans uygulamalarının ısıtma karakteristiği üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar, sıvı ve katı gıda örneklerine uygulanması açısından farklılıklar göstermektedir.

Yumurta albümininin ohmik ısıtılması ile ilgili bir çalışmada [11], 50 Hz-10000 Hz frekans aralığında, 10 V/cm sabit voltaj gradyanında 20°C'den 90°C'ye ohmik ısıtma uygulanmıştır. Frekans arttıkça, örneğin daha hızlı ısındığını, en kısa ısıtma süresinin ise, 10 kHz frekans uygulamasında elde edildiğini belirtmişlerdir. Benzer bir çalışmada, [12] kırmızı biber ezmesinin 60 V gerilimde farklı frekanslarda (40-20,000 Hz) ohmik ısıtma ile pastörizasyonunda spesifik ısıtma hızının frekans arttıkça arttığı, 5 kHz'de en yüksek değere ulaştığı, ancak 5 kHz'in üzerinde ısıtma hızında düşüş meydana geldiği rapor edilmiştir.

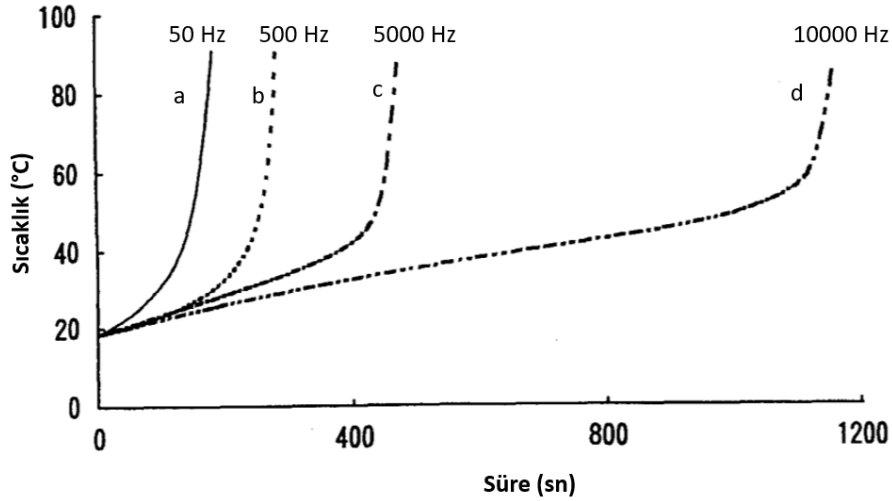
Bir başka çalışmada salsa sosunun pastörizasyonu, 12.5 V/cm voltaj gradyanında, 7 farklı frekansta (60, 100, 300, 500, 1000, 10000 ve 20000 Hz) gerçekleştirilmiştir [13]. 1 kHz üzerinde elektrotlarda korozyona rastlanmamıştır ve ısıtma hızının frekans arttıkça arttığı belirtilmiştir. Farklı frekans uygulamalarının, 500 Hz frekansa kadar ısıtma hızı üzerine etkili olduğunu ( $p < 0.05$ ) ancak, 1000 Hz'ten yüksek frekans uygulamalarında, ısıtma hızının frekans uygulamasından etkilenmediğini ifade etmişlerdir ( $p > 0.05$ ).

Katı bir örnek olarak yaban turpunun 40 V/cm sabit voltaj gradyanında farklı frekanslarda (50-10000 Hz) 80°C'ye dek ohmik ısıtılmasının incelendiği bir

çalışmada [14], gerekli işlem süresinin frekans arttıkça arttığı rapor edilmiştir. Yüksek frekanslarda (5 ve 10 kHz) ısıtma hızının başlangıçta daha doğrusal bir artış gösterdiği, ancak 50°C'den itibaren keskin bir şekilde arttığı vurgulanmıştır (Şekil 3). Bunun sebebi ise, 50°C ve üzerinde hücre zarının yapısında meydana gelen değişimden kaynaklandığı, elektriksel dirençlerinin 50°C'de azaldığı, bu azalmanın frekanstan bağımsız olarak sıcaktan kaynaklandığı şeklinde açıklanmaktadır. Ayrıca başlangıçtaki en net sıcaklık artışının en düşük frekans koşulunda (50 Hz) elde edilmesinin nedeni, bu frekansta geçirgenliğin azalması ve moleküler hareketin artmasına bağlı olarak direncin azalması şeklinde açıklanmıştır.

Donmuş parça etin ohmik çözündürülmesi sırasında ise 60-120 V gerilimde ve 60 Hz-60 kHz frekans aralığında frekansın çözündürme süresini etkilemediği rapor edilmiştir [15]. Ancak geleneksel çözündürme yöntemine kıyasla, ohmik çözündürmenin çözünme kaybını azalttığı ve su tutma kapasitesini arttırdığı vurgulanmıştır. Güncel bir çalışmada ise [16], tuna balığı örnekleri -30°C'den 20°C'ye 50 Hz-20 kHz aralığında farklı frekanslarda ohmik çözündürülmüş, frekans arttıkça örnek içinde meydana gelen direncin azaldığı ve ürünün çözünme hızının arttığı tespit edilmiştir. Örneklerin kas dokularının akıma paralel şekilde konumlandırıldığında ve membranlarının ayrıldığında, daha yüksek elektriksel iletkenlik değerlerinin ve daha düşük çözünme sürelerinin elde edildiği rapor edilmiştir.

Dielektrik ısıtma uygulamalarında ise frekansın etkisi penetrasyon kalınlığının değişimi sonucu oluşan etkiler olarak dikkati çekmektedir. Alfaifi ve ark. [17], kurutulmuş üzüm, mürdüm eriği, incir, şeftali ve hurma örneklerine mikrodalga ve radyo frekans uygulaması (10-1800 MHz frekans aralığında) sırasında frekansın penetrasyon kalınlığı üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, kurutulmuş ürünlerde, penetrasyon kalınlığının frekans arttıkça azaldığını, mikrodalga bölgede penetrasyon kalınlığının RF uygulamasına göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Kurutulmuş ürünlerin işlenmesinde, RF uygulamasının büyük ölçekte, kalın katmanlar şeklinde uygulanması önerilmiştir. RF ve mikrodalga ısıtma işlemleri karşılaştırıldığında, daha düşük frekans aralığında uygulanan RF işleminin sıcaklık dağılımındaki homojenliğinin mikrodalga ısıtma işlemine göre daha iyi olacağı belirtilmektedir. Bunun sebebi olarak, RF ısıtma işleminde elektromanyetik dalgaların yüzeyde yanma veya sıcak nokta oluşumuna sebep vermeyecek şekilde penetre olabileceği mesafenin (penetrasyon kalınlığı) daha fazla olmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir [18, 19]. RF çözündürme işleminde frekans etkilerinin incelendiği ilk çalışmalarda, 36-40 MHz frekans aralığında uygulanan çözündürme işleminde, çözünme kaybı ve ürün kalitesi geleneksel çözündürmeye göre korunmuş olsa da, homojen olmayan sıcaklık dağılımlarının meydana geldiği belirtilmektedir [20].



Şekil 3. Farklı frekanslarda ohmik ısıtma sonucunda merkez noktasının sıcaklık geçmişi: (a) 50 Hz; (b) 500 Hz, (c) 5000 Hz; (d) 10000 Hz [14].

Daha yüksek frekanslara sahip elektriksel işlem uygulamalarında penetrasyon derinliğinin etkisi çok daha net ortaya çıkmıştır. Yakın kızılötesi (NIR) ve uzak kızılötesi (FIR) ısıtma işlemlerinin tatlı patates örneklerine uygulanmasında penetrasyon derinliğinin değişiminin incelendiği çalışmada, FIR kızılötesi ışınımın 0.26-0.36 mm derinliğe kadar örnek içerisine penetre olabilirken, NIR kızılötesi ışınım dalgalarının 0.38-2.54 mm derinliğe kadar penetre olabildiğini göstermiştir. Çalışma sonuçları, FIR ışınım enerjisinin çoğunun ürün yüzeyinde ısıya dönüştüğünü belirtmekte ve benzer çalışmaları desteklemektedir [21, 22]

Kızılötesi çözündürme işleminin, daha düşük frekans aralığında çalışan mikrodalga çözündürme işlemine göre avantajları bulunmaktadır. Su ve buzun kızılötesi enerjiyi absorblama katsayılarının yaklaşık olarak aynı değerlerde olması, kızılötesi çözündürme işleminin mikrodalga çözündürmeye göre, daha homojen sıcaklık dağılımı sağladığı belirtilmiştir. Sakai ve Mao [22] ve Liu [23] tuna balığının çözündürülmesi üzerine yaptıkları çalışmalarda, kızılötesi çözündürme işleminin renk değerlerinin daha fazla koruduğu ve sızıntı kaybının geleneksel çözündürme işlemlerine göre daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Elektriksel işlem uygulamalarında farklı dalga tipi uygulamalarının ısınma karakteristikleri üzerine etkilerini inceleyen çalışmaların ise oldukça limitli olduğu belirlenmiştir. Salsa sosunun 3 farklı dalga tipinde (sinüs, kare, testere dişi) ohmik ısıtılmasını inceleyen çalışmada, 60 Hz sabit frekansta ohmik ısıtma işlemi uygulanmış, kare dalga şekli uygulamasının, testere dişi ve sinüs dalga şekli uygulamasına göre daha düşük ısınma hızına sebep olduğu rapor edilmiştir [13].

### KÜTLE TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Kütle transferinin aktif olarak rol aldığı özellikle haşlama, ekstraksiyon ve kurutma işlemlerinde, ohmik uygulaması ısıtma kaynağı olarak yaygın olarak kullanılmış, farklı frekans ve dalga şekli etkilerinin ohmik işleme üzerine etkisinin olduğu belirlenmiştir. Yüksek frekans aralığında

gerçekleştirilen ohmik ısıtma çalışmalarında frekanstaki azalışın kütle transferini arttırdığı, ancak dalga şeklinin daha önemli olduğu vurgulanmaktadır.

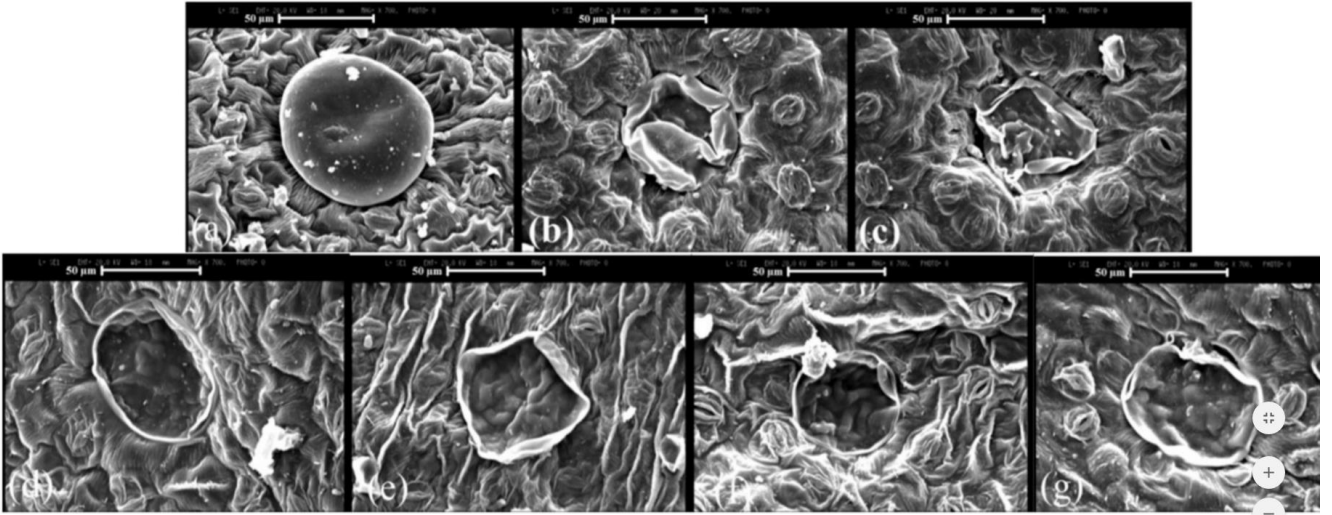
Kütle transferi üzerine frekans uygulamalarının etkilerini inceleyen çalışmalar incelendiğinde, Kim ve Pyun [24], soya tanelerinden soya sütü elde edebilmek için ısıtma işlemini farklı frekanslarda (500-10000 Hz) ohmik ısıtma ile gerçekleştirmişlerdir. Soya sütü eldesinde, optimum verimin 1000 Hz'te elde edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, elde edilen NMR analizi sonucunda, 1000 Hz frekans uygulamasının hücre içerisinde sıvının daha kolay hareket edebileceği boşluklar meydana getirdiği, bu sayede ürünün elektriksel iletkenliğinin arttığı belirtilmektedir. Benzer şekilde, pancar örneklerinden doğal boya maddesinin eldesinin incelendiği bir çalışmada [25] ise, 0-5,000 Hz frekans aralığında, 23.9 V/cm voltaj gradyanında, 45°C sıcaklığa kadar uygulanan ohmik ısıtma işlemi için, frekans azaldıkça ekstraksiyonun arttığını ifade etmişlerdir. Uygulanan frekans değeri arttıkça, hücre geçirgenliğini arttırmak için gerekli eşik değerinde yükselme olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hücre zarında bir zedelenme gözlemlenmediğini, meydana gelen ekstraksiyonun hücre zarındaki gözeneklerin genişlemesinden kaynaklandığını vurgulamışlardır. Benzer şekilde, pancar köklerine uygulanan ılımlı elektrik alan uygulamasının betain ekstraksiyonu üzerine etkilerinin incelendiği çalışmada, frekans (0-5000 Hz) azaldıkça ve elektrik alan gücü arttıkça difüzyonun arttığını belirlemişlerdir (20). Bu durum, maruz kalınan elektrik alan kuvveti ve işlem süresine bağlı olarak gıdanın kapasitör gibi davranması sonucu özellikle düşük frekanslarda, hücre zarında yükün birikmesi için daha fazla sürenin olması şeklinde açıklanmıştır. Daha düşük frekans aralığında ise, mantar örneklerinin ohmik haşlanmasında farklı frekans uygulamasının (1-10-100 Hz) ve katı kaybı ve üründe meydana gelen büzüşme değişimi üzerine etkisinin farklı olmadığı rapor edilmiştir [26].

Geniş frekans aralığında (50 Hz-1000 kHz) uygulanan ohmik ısıtma işlemlerinde dokuda meydana gelen

değişimler incelendiğinde de, frekans arttıkça dokusal değişimlerin azaldığı rapor edilmektedir [27]. Araştırmacılar şeftali örneklerinin 25°C'den 90°C'ye ohmik ısıtılması sonucunda dokuda meydana gelen değişimleri 60 V/cm voltaj gradyanında, bipolar kare dalga tipinde incelemiştir. Düşük elektrik alan ( $E < 100$  V/cm) uygulamasının, hücre zarında elektroporasyon meydana getirdiğini bulmuşlardır. Meydana gelen elektroporasyona bağlı olarak, ürünün elektriksel iletkenliğinde öngörülemez bir artış meydana geldiğini ve ürün dokusunda değişikliğe neden olduğunu belirtmişlerdir. 50 kHz düzeyinde frekans uygulamasının elektroporasyon oluşumunu bastırdığını, ancak bu frekansta dokunun elektriksel iletkenliğinin düşük olmasının istenilen sıcaklığa ulaşma süresini artırdığını ifade etmişlerdir. Şeftali örneklerinin korunmasında, yüksek frekans uygulamalarının elektroporasyonu azaltarak daha iyi korunmasına katkıda bulunduğunu ve yüksek sıcaklıklarda meydana gelen ısıl zararın dikkate

alınmadan ısınma hızının öngörülmesine katkıda bulunduğunu bulgular arasında vurgulamışlardır. Şeftali örneklerinin dokusal bozulmalarının minimum olduğu durumu 20 kHz'de elde etmişlerdir.

Güncel bir çalışmada [28] ısı ve kütle transferinin önemli rol oynadığı destilasyon işleminde 3 farklı frekansta (25, 50 ve 100Hz) ve iki farklı voltajda (220 ve 380V) ohmik ısıtma uygulanmıştır. Düşük frekansta (25 Hz), elektroporasyon sebebiyle kütle transferinin arttığı, işlem süresinin kısaldığı ifade edilmiş, elde edilen ürün verimi artmıştır. Şekil 4'teki işlem görmüş örneğe ait TEM görüntülerinde de, hücre yapısındaki açıklığın değiştiği görülmektedir. Hücre yapısında meydana gelen bu değişimlerin kütle transferini etkilemesi ve verimi artırması sebebiyle, ohmik ısıtma destekli destilasyonu etkileyen önemli parametrelerden birisi de frekans olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Nane yapraklarından alınan bezelerin taramalı elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri; (a) işlem görmemiş (b) 60 dakika geleneksel hidroddestilasyon sonrası, (c) 60 dakika tuzlu suyla hidroddestilasyon sonrası, (d) 30 dakika Ohmik destekli hidroddestilasyon sonrası (380 V, 50 Hz), (e) 30 dakika ohmik destekli hidroddestilasyon sonrası (220V, 25Hz), (f) 30 dakika ohmik destekli hidroddestilasyon sonrası (220V, 50Hz), (g) 30 dakika ohmik destekli hidroddestilasyon sonrası (220V, 100Hz) [28].

Ohmik ısıtma işlemi dokusal değişimlere neden olduğu için, bazı kütle transferi işlemleri öncesinde ön işlem olarak da uygulanabilmektedir. Lima ve Sastry [29] ohmik ısıtma işleminin pastırma ve meyve dilimlerinin kurutulmasında, geleneksel yöntemle alternatif olarak maliyet azalmak ve süreyi kısaltmak amacıyla ön işlem olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Düşük frekans (4 Hz) değerinin elektriksel iletkenliği artırdığı ve kurutma işlem süresini kısalttığı belirtilmiştir.

Elektriksel işlemlerden kızılötesi, özellikle yüzey kurutma işlemlerinde, kızartma, yüzey kavurma işlemlerinde kullanılan yöntemlerden biridir. Kızılötesi işlemin koşulları Sakai ve Hanzawa [30] tarafından aktarılan dalga boyu aralık tanımlamaları adapte edilerek belirtilmektedir. Buna göre yakın (0.5-2 µm), orta (2-4 µm) ve uzak (4 µm'nin üstünde) kızılötesi ısıtma isimlendirmesi yapılır. Suyun kızılötesi radyasyonu absorbe etme kabiliyetinin özellikle 2.7, 3.3, 6 ve >12.5 µm dalga boylarında yüksek olduğu belirtilmiştir. O-H

bağları, gelen kızılötesi ışınımı absorbe ederler ve moleküller gelen ışınım ile aynı frekansta dönmeye başlarlar. Kızılötesi enerjisinin dönme hareketi enerjisine dönüşümü suyun evaporasyonuna neden olur. Bu sebeple kurutma işleminde kullanılan kızılötesi ışığın dalga boyu kısaldıkça (frekans arttıkça), kuruma süresinin azaldığı ifade edilmiştir [31]. Gıda maddelerinin yapısında bulunan protein, nişasta gibi organik bileşenlerin, 2.5 µm dalga boyundan daha yüksek dalga boyu değerlerinde, kızılötesi enerjiyi daha iyi absorbe ettikleri ifade edilmiştir. Genel olarak gıdaların kurutulmasında tercih edilen kızılötesi sistem, FIR ışınım bölgesi olarak ifade edilmektedir. Bu aralıkta çalışan kızılötesi lambalar, 0-450°C sıcaklık aralığında çalışmaktadır.

Vurgulu elektrik alan (VEA) üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde ise çalışılan frekans aralığı, gıda örneğindeki çeşitlilik ve uygulama amacına bağlı olarak frekansın kütle aktarımı üzerine farklı etkileri rapor

edilmektedir. Lebovka ve ark. [32] 2000 yılında yaptıkları çalışmada 10-1000 Hz aralığında frekans uygulamasının elma dokusunda herhangi bir doku zararına neden olmadığını belirtmişler, 2001 yılında yaptıkları çalışmada ise [33], 0.02-100 Hz aralığında frekans uygulamasının dokuda hasar meydana getirdiğini sonuç olarak ifade etmişlerdir. Ancak, frekansın dokuda meydana getirdiği bu hasarın nedenini açıklayamamışlardır. 0.01-5,000 Hz frekans aralığında, 333 V/cm elektrik alan ve 10 vurgu parametrelerinde soğan zarına uygulanan VEA işleminde ise 1 Hz altında daha yüksek hücre geçirgenliği meydana geldiğini, ancak dokuda meydana gelen zararın frekansın düzeyinden bağımsız olduğu ortaya koyulmuştur [34]. Hücre zarında geçirgenliğin artmasının hücrenin elektriksel ve fiziksel özellikleri üzerine etkili olduğu, frekansın sitoplazmik sıvı akışının sürekliliğini etkilediğini rapor etmişlerdir. Düşük frekans uygulamalarında, sitoplazmik akışın sürekliliğinin sağlanmasıyla geçirgenliğin arttığını ve hücreler arası boşlukta akımın geçebileceği daha fazla yol oluşturduğunu vurgulamışlardır. Hipoteze göre, bir sonraki vurgu uygulandığında, akım daha iletken olan bu yollardan geçmekte ve işlemin süresi uzadıkça hücrenin geçirgenliği artmaktadır. Akımın artmasına bağlı olarak, hücre yapısında fiziksel zarar da artmaktadır. Düşük frekanslar uygulanarak yüksek geçirgenliğe sahip hücreler elde edilmesi mümkün olabilmektedir, bu sayede işlem için gerekli vurgu sayısı azaltılarak işlemin enerji tüketimi azaltılabilir [34].

Farklı dalga tipi uygulamalarının, kütle transferi üzerine etkisini inceleyen çalışmalarda, Tekgul ve ark. [35], elektroplazmoliz işleminin farklı dalga tipi (kare/ sinüs), akım tipi (AC/DC) ve işlem süresi (60/ 90 saniye) uygulamalarının domates suyu verimi ve ürün kalitesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. 100 V gerilimde uygulanan elektroplazmoliz işlemi sonucunda, en yüksek domates suyu veriminin AC akımda, kare dalga tipinde, 90 saniye işlem süresinde elde edildiği belirlenmiştir. Benzer şekilde likopen içeriğinin, AC akımda, kare dalga tipinde, 90 saniye işlem süresinde daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, daha yüksek domates suyu verimi için elektroplazmoliz işleminin AC akımda, kare dalga şeklinde uygulanması gerektiğini önermişlerdir. Benzer şekilde, Lima ve Sastry [29] ohmik ısıtma işleminin pastırma ve meyve dilimlerinin kurutulmasında ohmik ısıtma önışleminde 4 Hz testere dişi uygulanarak ön işlem görmüş pastırma örneklerinin 60 Hz sinüs dalga şekli uygulanarak önışlem görmüş örneklerle kıyasla daha hızlı kuruduğu belirtilmiştir. Pancar örneklerinden doğal boya maddesinin eldesinin incelendiği bir çalışmada [25] ise, aynı frekansta (60 Hz) farklı dalga şekli uygulamalarının (sinüs, kare, testere dişi) katı kaybı ve üründe meydana gelen büzüşme değişimi üzerine etkisinin farklı olmadığı rapor edilmiştir [26]. Soya tanelerinden soya sütü elde edebilmek için uygulanan ohmik ısıtma işleminde ise, sinüs dalga tipinin ekstraksiyon işlemi için diğer dalga tiplerinden daha etkili olduğu, dalga şeklinin ısı ve kütle transferi üzerine etkili olduğunu vurgulanmıştır [24].

## GIDANIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Gıda maddelerinin elektriksel özelliklerindeki değişimin bilinmesi özellikle enerji absorpsiyonunun incelenmesi ve ısıya dönüşümün tespit edilmesi açısından oldukça önemlidir. Elektriksel özellikler uygulanan işlem parametrelerinden etkilenmekte, özellikle farklı frekans uygulamalarında farklı değerlere sahip olabilmektedir.

Dielektrik ısıtma yöntemleri olarak bilinen radyo frekans ve mikrodalga ısıtma işlemleri, yüksek frekanslarda gerçekleşmektedir. Radyo frekans işlemi sanayide 13.56, 27.12 ve 40.68 MHz frekansta, mikrodalga işlemi ise 433, 915 ve 2450 MHz frekanslarında (yaygın olarak 915 ve 2450 MHz) gerçekleştirilen işlemlerdir [19, 36]. Dielektrik ısıtma yöntemlerinin prensibi, gıdaya uygulanan alternatif akım altında negatif yüklerin pozitif, pozitif yüklerin ise negatif kutba doğru hareket etmesine dayanmaktadır. Buna ek olarak yüksek frekans uygulamalarında, polaritenin sürekli değişmesine bağlı olarak, uygulanan alan dengede kalmaz, polaritenin sürekli tersine değişimi, iyonların hareketine sebep olur ve gıda içerisinde sürtünme ve ısı oluşumuna neden olur. Özellikle gıdanın yapısında bulunan su molekülü gibi dipolar moleküller de değişen elektrik alanla birlikte yön değişimine maruz kalırlar. Radyo frekans işleminde iyonik moleküller mikrodalga işleminde ise hem iyonik hem de dipolar moleküllerin yer değişimi sonucunda ısınma meydana gelir. Her iki ısıtma yöntemi için de en yüksek enerjinin aktarılabilceği frekans debye rezonansı olarak tanımlanmıştır, bu koşulda gıdanın dielektrik kayıp faktörü en yüksek değerdedir [37]. Dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik sabiti, dielektrik özellikler olarak bilinmektedir. Dielektrik sabiti, materyalin elektrik alan içerisinde enerjiyi depolayabilme kabiliyeti, kayıp faktörü ise, materyalin enerjiyi absorblayabilme kabiliyeti ile ilgilidir. Dielektrik kayıp faktörü, alternatif akıma maruz kalan bir materyalin enerji yayılma karakteristiklerinin bir indeksidir ve elektromanyetik enerjinin termal enerjiye dönüşebilme yeteneğini ifade etmektedir [37, 38]. Gıdaların dielektrik özellikleri ve etkileyen faktörler konusunda detaylı bilgiye İçier ve Baysal [39, 40]'dan ulaşılabılır.

Farklı frekans uygulamalarının gıdanın elektriksel özellikleri üzerine etkisini inceleyen çalışmaların oldukça yaygın olduğu belirlenmiştir. Domuz jambonunun yağ ve kas dokularının pastörizasyonunda 35-60 MHz aralığında uygulanan dielektrik ısıtma incelendiğinde, 60 MHz'te güç tüketiminin 35 MHz işlemde tüketilen güçten daha düşük olduğu rapor edilmiştir [41].

Patates püresine uygulanan radyo frekans ve mikrodalga işlemleri sırasında, dielektrik sabitinin frekans arttıkça azaldığı belirtilmektedir [42]. Dielektrik sabiti 27 MHz'de sıcaklık arttıkça artış göstermekte, 40 MHz'de daha istikrarlı bir davranış gösterebilmekte, ancak daha yüksek frekanslarda (433, 915, 1800 MHz) sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Dielektrik kayıp faktörü ise sıcaklık arttıkça artmaktadır. Patatese tuz eklenmesi sonucunda, özellikle radyo frekans bölgesinde dielektrik kayıp faktörü daha da artmaktadır. Benzer şekilde, patates örneklerinin ohmik ısıtma ve geleneksel ısıtma

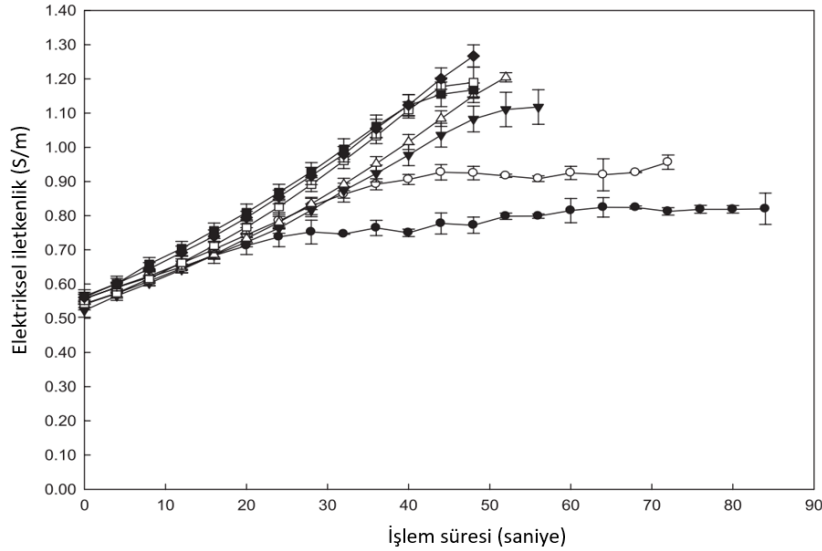
işlemleri sırasında, dielektrik özelliklerinin 100 Hz-20 kHz frekans aralığındaki değişimi incelendiğinde, düşük frekanslarda görünür dielektrik sabitin daha yüksek olduğu, benzer şekilde yüksek frekanslarda düşük bir dielektrik sabiti olduğu belirtilmektedir [43]. Aynı çalışmada, elektriksel ısıtma işleminin patates örneklerin hücre zarının geçirgenliğini arttırdığı vurgulanmıştır.

Düşük frekans değerlerinde uygulanan ohmik ısıtma ve VEA gibi işlemlerde, elektriksel iletkenlik değeri de oldukça önemlidir. Elektriksel iletkenlik gıdadan geçirilen elektriksel enerjinin ısı enerjisine dönüşümünün tespit edilebileceği önemli bir özelliktir [44]. Elektriksel iletkenlik değerindeki değişimler dielektrik özelliklerde olduğu gibi, uygulanan frekans değerinden etkilenebilmektedir. Geniş frekans aralığında (30 Hz-1 MHz) surimi hamurunun işlenmesi konusunda yapılan bir çalışmada [45], elektriksel iletkenlik ve dielektrik kayıp değerlerinin sıcaklık ve tuz konsantrasyonunun artışına bağlı olarak arttığını ve 500 Hz'ten düşük frekanslarda dielektrik özelliklerin frekanstan bağımsız olduğu belirtilmiştir. Uygulanan frekans arttıkça, karşılaşılan direncin azaldığını ifade etmişlerdir.

Lima ve ark. [46] turp dokusunun elektriksel iletkenliğinin düşük frekansta (4 Hz) daha yüksek olduğunu, elektriksel iletkenlikteki frekansa bağlı bu durumun hücre zarındaki elektriksel özellikler üzerine etkisi olduğu ifade edilmiştir. Hücre zarındaki geçirgenliğin artması veya moleküllerin hareketlenmesinde uygulanan elektrik alanının dokunun elektriksel iletkenliğini

artırmasından kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Düşük frekans uygulamalarında, polarite değişim döngüsünün daha uzun gerçekleşmesi nedeniyle membran potansiyelinin elektropermabilizasyon etkisi göstermesine yetecek düzeyde düşmesine sebep olacak süre sağlanabilmekte ve elektropermabilizasyon sırasında, yüksek elektrik alana maruz kaldığında gözeneklerin hücre zarının yerel kutuplaşması tarafından biçimlendirilmesi mümkün olmaktadır. Bu durum elektriksel iletkenliği artırabilmektedir [26]. Benzer şekilde, ohmik ısıtma uygulanmış patates örneklerinin, geleneksel ısıtma uygulanmış örneklerle göre daha yüksek elektriksel iletkenlik değerine sahip olduğu belirtilmektedir [43].

0.5°C'den 40°C'ye ohmik ısıtılan şeftali örneklerinde, sıcaklık arttıkça elektriksel iletkenlik değerlerindeki artışın frekansa (50 Hz-1 MHz) bağlı olarak farklılık gösterebileceği belirtilmiştir [27]. Aynı sıcaklıkta, elektriksel iletkenlik değeri, frekans arttıkça artış göstermiştir. Ancak, dokusu zarar görmüş şeftali örneklerinde 100000 Hz frekans değerinden sonra, frekans artışına bağlı olarak elektriksel iletkenlik değerlerinin azaldığını ifade edilmiştir. Benzer şekilde, salsa sosunun ohmik ısıtılmasının incelendiği bir diğer çalışmada, 50-60 Hz aralığında frekans arttıkça elektriksel iletkenliğin arttığı, özellikle 60-100 Hz aralığında elektriksel iletkenlik değerinin daha düşük olduğu, 1000-20000 Hz aralığında elektriksel iletkenlik değerlerinin daha yüksek olduğu ancak frekansın etkisinin önemsiz olduğu belirtilmektedir (Şekil 5) [13].



Şekil 5. Salsa sosunun farklı frekanslarda ohmik ısıtması sonucunda elektriksel iletkenlik değişimi 60 Hz (●), 100 Hz (○), 300 Hz (▼), 500 Hz (Δ), 1 kHz (■), 10 kHz (□), ve 20 kHz (◆), [13].

Seyhun ve ark. [47], donmuş patates püresinin çözündürülmesi amacıyla yüksek frekansta (10-30 kHz) ohmik ısıtma uyguladıkları çalışmalarında, geleneksel çözündürme ile yaklaşık 50 dakikada gerçekleştirilen işlemin ohmik çözündürme ile 3.5-7 dakika arasında gerçekleştiğini vurgulayarak, frekans arttıkça çözünme süresinin kıaldığını rapor etmişlerdir. Frekansın belirli bir değerin üzerinde arttığında, yüzey-kabuk (skin)

davranışına neden olduğunu, akımın bir kondüktör etrafından geçiş davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu davranışın sonucunda, genellikle, 30 kHz civarında maddenin elektriksel iletkenlik değerinin düştüğünü belirlemişlerdir.

Lima ve ark. [29] yaptıkları çalışmada turp örneklerinin ohmik ısıtılmasında, kare dalga tipinin uygulandığı

işlemlerde elektriksel iletkenlik değerleri sinüs ve testere dişi dalga tipine göre daha düşük değerlerde elde edilmiş, sinüs ve testere dişi dalga tipine ait elektriksel iletkenlik değerlerinin benzer değerlerde olduğu belirlenmiştir. Elde edilen düşük elektriksel iletkenlik değerlerinin işlem süresinde uzamaya neden olduğu ve kütle transferini azalttığı ifade edilmiştir. Sensoy ve Sastry [26] ise, mantar örneklerinin ohmik haşlanması işleminde farklı dalga tiplerinin elektriksel iletkenlik üzerine etkisi olmadığı belirtmişlerdir.

## MİKROORGANİZMALAR ÜZERİNE ETKİSİ

Elektriksel işlem sırasında uygulanan frekans uygulamalarının mikroorganizma inaktivasyonu üzerine etkileri bulunmaktadır. 60 Hz- 20 kHz aralığında, ohmik ısıtma sırasında 90°C'ye ısıtılmış salsa sosu örnekleri için uygulanan frekans arttıkça *Escherichia coli* O157:H7 ve *Salmonella typhimurium* inaktivasyonunun daha yüksek sağlanabildiği ve mikroorganizmaların inaktivasyonu için gerekli sürenin kıaldığı rapor edilmiştir. Çalışılan gıda patojenlerinin inaktivasyonunda, uygulanan frekans, işlem süresi ve elektriksel iletkenliğin, dalga tipinden daha etkilidir [13].

Vurgulu elektrik alan işlemi (VEA), daha yüksek frekanslarda uygulanan ancak ısı olmayan elektriksel işlemlerdir. Uygulanan elektrik alanın hücre zarının elektrik yük dengesini değiştirerek mikrobiyal inaktivasyonu etkilediği belirtilmektedir [48]. Dalga şekli ve frekansın vurgulu elektrik alan uygulamalarında özellikle bakteri sporlarının inaktivasyonunda önemli olduğu, düşük frekanslı, giderek azalan dalga şekline sahip vurguların, anlık boşalım sağlayan dalga şekilleri veya kHz düzeyindeki frekans uygulamaları kadar başarılı olmadığı ifade edilmektedir [49, 50]. Ohmik ısıtma uygulamalarına benzer şekilde VEA uygulamalarında da, frekans arttıkça inaktivasyon için gerekli işlem süresi kısalmaktadır [51, 52, 53]. Diğer yandan Jin ve ark. [48], çalışmalarında, 500-2000 Hz frekans aralığının *Bacillus subtilis* sporlarının inaktivasyonunu üzerine etkisi olmadığı ifade edilmiştir.

Daha dar aralıktaki frekans değişimlerinin etkisinin incelendiği çalışmalarda [51-53] frekansın azalmasının bazı mikroorganizmalarının inaktivasyonunu arttırdığı vurgulanmaktadır. Pilot çaplı bir sürekli akış VAE sisteminde portakal suyu pastörizasyonu amacıyla 20-30 kV/cm elektrik alanı uygulanan işlemde, frekansın (21, 30, 41 kHz) *Escherichia coli* inaktivasyon süresi üzerine etkisinin olmadığı belirtilmektedir. Ancak işlem süresi ve uygulama sıcaklığı arttıkça, daha düşük frekans uygulamasının inaktivasyon seviyesini arttırdığı rapor edilmiştir [51]. Aynı sistemde elma şirasına, 5-65 kHz frekans aralığında VAE işlemi (0.15-15 kV/cm elektriksel alan, 45-55°C sıcaklık aralığı) uygulandığında ise, 65 kHz'ten daha düşük frekanslarda *Lactobacillus plantarum* inaktivasyon etkinliğinin arttığı vurgulanmıştır [53].

Radyo frekans ısıtmanın mikroorganizma inaktivasyonu üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalarda da frekanstaki artışın inaktivasyon etkinliğini etkilediğine yönelik bulgular rapor edilmektedir. Bu konuda yapılan

ilk çalışmalarda, Fabian ve Graham [54], 19°C sıcaklıkta 7.5 MHz, 10 MHz ve 15 MHz'te *Escherichia coli* inaktivasyonu üzerine radyo frekansın etkisi olduğunu, en fazla inaktivasyon etkisinin 10 MHz'te gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Fleming [55], 11-350 MHz, aralığında tüm frekanslarda inaktivasyon olduğunu belirlemiş en yüksek inaktivasyon oranına 60 MHz'te ulaşıldığını belirtmiştir. Brown ve Maurison [56] ise, 50 Hz, 190 kHz ve 25 MHz'te çalışmışlar, sıcaklık değerinin 50°C'yi aştığında tüm frekanslar için bakterilerin inaktive olduğunu belirlemişlerdir.

Blanco ve Dawson [57] 2450 MHz mikrodalga ısıtmanın sporlanmış hücrelerin aktivasyonuna ve çimlenmesine neden olduğu, daha sonra uygulanan ısı şoklarının da hassas hücreleri öldürdüğünü ileri sürmüştür. Fakat benzer etki 915 MHz mikrodalga ısıtmada gözlenmemiştir. Sonuç olarak araştırmacılar bu farklılığın ticari fırında (915 MHz, 4 dakika) ısıtmanın ev tipi fırındakine (2450 MHz, 1-1.25 dakika) göre daha yavaş olmasına da bağlı olabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Ansari ve ark. [58] çok düşük frekanslı manyetik alan uygulamasının *Aspergillus niger* Z-25'ten elde edilen glukoz oksidaz enzimi eldesi üzerine etkisini incelemişlerdir. Enzim eldesi, 1-5 Hz frekans aralığında uygulanan işlemle incelenmiştir. Çalışma sonucunda 2.8 Hz'te glukoz oksidaz enzimi eldesinin maksimum olduğu bu koşulda hücre direncinin en az olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, ekstrakte edilen protein yapısının uygulanan manyetik alanın frekansıyla doğrudan etkili olduğunu belirtmişlerdir.

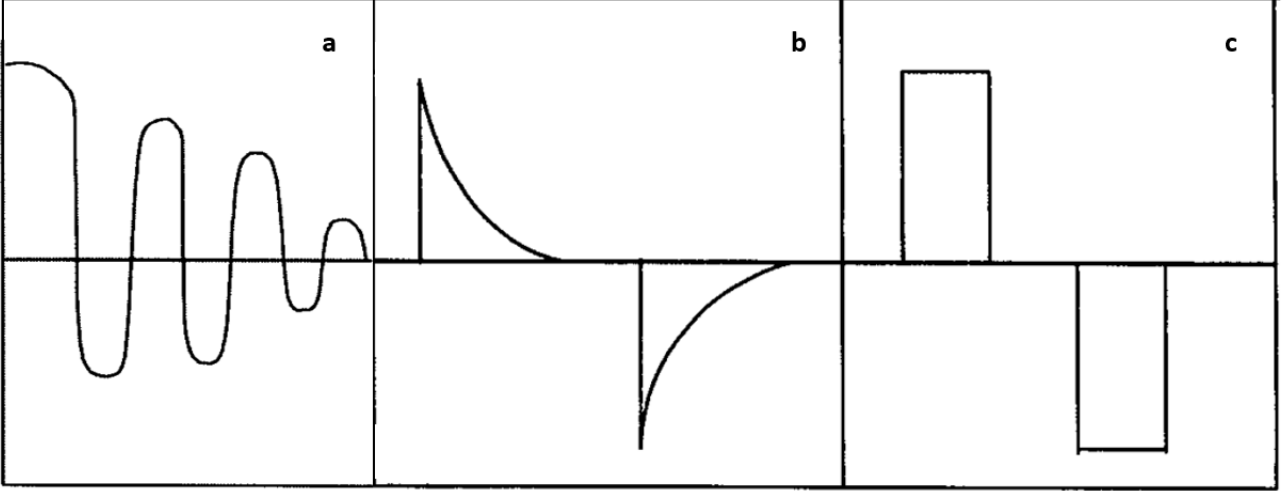
Vurgulu ışık teknolojisi, mikroorganizmaları fototermal ve fotokimyasal etkilerin kombinasyonu ile inaktive etmektedir. Işığın UV bileşeni, fotokimyasal etkiye sahiptir ancak, enerjinin çoğu görünür spektrumda bulunmaktadır, inaktivasyon etkisinin çoğu, fototermal enerjiden kaynaklanmaktadır. Fototermal enerji, gıdanın yüzeyine aktarılan büyük miktarda enerjiden oluşmaktadır ve ince bir yüzey katmanında sıcaklığı yükselterek vejetatif hücreleri yok etmektedir. Dunn ve ark., [59] *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus pumilus* ve *Aspergillus niger* inaktivasyonunu, vurgulu ışık teknolojisiyle gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, 0.75 J/cm<sup>2</sup>'lik iki vurgulu ışık uygulaması ile 10<sup>7</sup> k.o.b/g (k.o.b: koloni oluşturan birim) *Staphylococcus aureus* yok edilmiştir. Diğer patojen bakteriler (*Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus pumilus*) ve *Aspergillus niger* ise 0.5-1 J/cm<sup>2</sup>'lik tek vurgulu ışık uygulamasıyla 10<sup>5</sup> k.o.b./g yok edilmiştir ve 7-9 log arası desimal azalma ise vurgu başına 1 J/cm<sup>2</sup>'lik bir kaç flaş uygulamasıyla elde edilmiştir. Su, vurgulu ışık ile muamele edildiğinde ise klorizasyon ve geleneksel UV uygulamalarından etkilenmeyen *Klebsiella* ve *Cryptosporidium* oositlerinin 1 J/cm<sup>2</sup>'lik tek vurgu veya 0.5 J/cm<sup>2</sup>'lik iki vurgu uygulamasından etkilenerek 6-7 log/mL düzeyinde azaldığı ifade edilmiştir.

Farklı dalga şekli uygulamalarının özellikle VEA işleminde mikroorganizma inaktivasyonu üzerine etkilerinin incelendiği belirlenmiştir. VEA işleminde bipolar dalga tiplerinin monopolar dalga tiplerinden daha



etkili olduğu belirtilmektedir [49]. Özellikle bipolar dalga şeklinin uygulandığı VEA işlemi sonucunda yüklü moleküller hareket haline geçerek yer değişimine sebep olmaktadır. Benzer şekilde elektriksel alanın etkisi ile yüklü moleküllerin yönü de değişmekte, yüklü moleküllerin hareketinde meydana gelen bu değişimlerin hücre duvarında strese neden olarak hücre duvarının elektriksel dengesinin bozulmasına neden olduğu belirtilmektedir. Qin ve ark. [49] farklı dalga şekillerinin elma suyunda *Saccharomyces cerevisiae* inaktivasyonu üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında, kare dalga

tipinin azalan dalga tipinden %60 daha fazla inhibe ettiğini belirlemişlerdir (Şekil 6). Bipolar dalgaların minimum enerji tüketimine sahip olduğu ve elektrot yüzeyinde minimum zarar meydana getirdiği ifade edilmiştir. Ho ve ark. [60] ise, *Pseudomonas fluorescens* inaktivasyonunu 10 kV/cm elektrik alan, 2 µs vurgu süresi, 0.5 Hz frekansta incelemişler, pozitif üstel dalgaların ardından düşük şiddetteki negatif dalgaların takip etmesiyle meydana gelen ani yük boşalmasının mikrobiyal inaktivasyondan sorumlu olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 6. VEA işleminde kullanılan farklı vurgu dalga şekillerinin taslak görünüşleri; a. Salınımlı azalan vurgu dalgası, b. üstel azalan bipolar dalga şekli, c. Kare bipolar dalga şekli [50].

Ohmik ısıtma işleminde ise, sinüs, kare ve testere dışı dalga tiplerinin uygulanarak 90°C'ye ısıtılmış salsa sosu örnekleri için *Escherichia coli* O157:H7 ve *Salmonella typhimurium* inaktivasyonunda, uygulanan frekans, işlem süresi ve elektriksel iletkenliğin, dalga tipinden daha etkili olduğu ifade edilmiştir [13].

### ÜRÜN KALİTESİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Ohmik ısıtma işleminin farklı frekanslarda uygulanmasının incelendiği çalışmalarda, özellikle sıcaklıkla ve oksijenle kolay bozulan askorbik asit içeriğindeki değişimlerin belirlenmesi dikkati çekmektedir. Mercali ve ark. [61], yaptıkları çalışmada, 10-10<sup>5</sup> Hz frekans aralığında Barbados kirazı pulpunun ohmik ısıtılmasının ürün kalitesi üzerine etkisini incelemişlerdir. Düşük frekansta (10 Hz) askorbik asitte meydana gelen bozulma ile renk değerlerinde meydana gelen değişimin daha yüksek olduğu bulunmuştur. Meydana gelen bu değişimin sebebinin oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar olduğu ifade edilmiştir. 100 Hz'in üzerinde bu reaksiyonların minimize edildiği belirtilmiştir. Yüksek frekans uygulamasının ise askorbik asitin bozulma kinetiği ve renk pigmentleri üzerine etkisinin olmadığı ifade edilmiştir. Ohmik ve geleneksel ısıtma yöntemleri karşılaştırıldığında ise sonuçların benzer olduğu rapor edilmiştir. Benzer şekilde, Lee ve ark. [13], salsa sosunun pastörizasyonunu amacıyla 12.5 V/cm voltaj gradyanında, 7 farklı frekansta (60, 100, 300, 500, 1000, 10000 ve 20000 Hz) uygulanan ohmik ısıtma işleminin bazı kalite özelliklerindeki değişim üzerine etkilerini incelemişlerdir. Düşük frekans

(60 Hz-100 Hz) uygulanmış örneklerin askorbik asit içeriğinin daha düşük olduğunu ( $p < 0.05$ ), bu örneklerden ise 60 Hz frekansta işlem görmüş salsa sosundaki askorbik asit içeriğinin 100 Hz frekansta işlem görene kıyasla %19 daha fazla olduğunu rapor etmişlerdir. Düşük frekans uygulanmış bu örneklerde meydana gelen askorbik asit kaybının, elektrotlarda meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların sonucu olduğunu ifade etmişlerdir. 300 Hz'ten yüksek frekans uygulanmış ve ohmik işlem uygulanmamış salsa sosu örneklerinde askorbik asit içeriğinde fark bulunmadığı rapor edilmiştir. Ohmik ısıtma üzerine gerçekleştirilmiş bu çalışmalar değerlendirildiğinde, gıda kalitesi üzerine meydana gelen değişimde, frekansın neden olduğu elektrokimyasal reaksiyonların etkili olduğu belirlenmiş, daha az kalite kaybına neden olması nedeniyle yüksek frekans uygulaması önerilmiş, diğer yandan dalga şeklinin belirlenen aralıkta kalite üzerine etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

RF ve mikrodalga işlemleri, hacimsel ısıtma yöntemleri olarak bilinmekte, gıdaların pişirilmesi, ısıtılması, çözündürülmesi, haşlanması, kurutulması gibi işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [62,19]. Daha yüksek frekans aralığında uygulanan bu işlemler, özellikle ürün kalitesinin korunması amacıyla uygulanmaktadır. Moyer ve Stotz [18], 147 MHz'te bezelyelerin RF yöntemi ile haşlama işleminde katalaz enziminin geleneksel yöntemle göre daha düşük sıcaklıklarda inaktive olduğunu ve bezelyelerin askorbik asit değerinin su veya buharda haşlama yöntemine göre daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Dielektrik bölgede

gerçekleştirilen ilk çözündürme çalışmaları 1947 yıllarında gerçekleştirilmiştir. Farklı meyvelerin, sebzelerin ve balıkların çözündürülmesi amacıyla 14-17 MHz frekans aralığında uygulanan RF çözündürme işleminin kalite kayıplarını azalttığı, renk ve aroma değerlerini daha iyi koruduğu belirlenmiştir [63]. Benzer şekilde, 36-40 MHz aralığında çözündürülen balık örneklerinde, çözünme kaybı ve renk değerlerinin geleneksel yöntemlere göre daha iyi korunduğu belirtilmiştir [20]. Mikrodalga ve radyo frekans işlemlerinin Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından belirlenmiş standart frekanslarda yapılması nedeniyle, bu işlemlerde frekansın etkisini ortaya koyan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Mikrodalga işlemlerinde düşük frekanslarda daha yüksek penetrasyon kalınlığı olmaktadır. Bu nedenle düşük frekans uygulamaları daha homojen ısıtma etkisi yaratarak sıcaklık dağılımının daha iyi kontrol edilmesini sağlamakta, ürün kalitesinin korunmasında daha etkili rol oynamaktadır. Penetrasyon kalınlığı dalga boyuna bağlıdır. RF ısıtma işleminde elektromanyetik güç mikrodalgaya kıyasla örneklerin daha fazla derin bölgelerine penetre olabilir, yüzeyde aşırı ısınmış bölgeler ile ürün içinde soğuk kalmış bölgelerin oluşma ihtimali daha azdır. Aynı zamanda radyo frekans ısıtmada mikrodalga ısıtmaya oranla daha tekdüze elektriksel alan oluşmaktadır. Bu nedenle RF ısıtma daha homojen ısıtma sağlayabilmektedir. RF uygulaması 13.56-40.68 MHz frekans aralığında gerçekleşmektedir ve penetrasyon kalınlığı, dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörüne bağlıdır. Bu sebeple, RF düşük frekans uygulamalarında ürüne daha iyi penetre olmakta, daha homojen sıcaklık dağılımı meydana getirmektedir [32]. Güncel olarak mikrodalga ve RF tavuk pişirme, patates cipsi üretimi, kızartma, ekmek ve kek pişirme gibi amaçlarla da kullanılmaktadır, ancak, farklı frekans uygulamalarının bu işlemlerin ve ürün kalitesi üzerine etkilerinin araştırılmasına yönelik çalışmalar yazarların bilgisi dahilinde bulunmamaktadır [19, 62-65].

NIR ısıtma işlemi kullanılarak FIR ışınımına göre gıdada daha fazla ısı depolanması mümkün olmaktadır [26, 61]. Diğer yandan, FIR işlemi ile gıdalarda renk gelişimi daha iyi gerçekleşebilmektedir [67]. Shilton ve ark. [68] hamburger köftesi örneklerinin pişirilmesinde orta (MIR) ve FIR ışınımının etkisini incelemişlerdir. MIR ışınım uygulamasında, köftelerin merkez sıcaklığında ve yüzey sıcaklığında değişim meydana geldiğini ve işlem süresinin kısaldığını, ancak FIR uygulamada merkez sıcaklığındaki değişimi sadece yağ içeriğindeki değişimin etkilediğini belirlemişlerdir. Kızılötesi uygulamalarda frekans aralığının seçilmesinde, gıdanın iç ve yüzey kısmındaki sıcaklık artışı ve kalite özelliklerindeki değişim kriterleri dikkate alınması önem taşımaktadır.

Ürün kalitesi üzerinde farklı dalga şekillerinin etkisinin incelendiği yayınların oldukça sınırlı olduğu belirlenmiştir. Lee ve ark. [13] salsa sosunun ohmik ısıtılmasının ürün kalitesi üzerine etkisini incelemişler, ürünün likopen içeriği, renk ve pH değerine frekansın ve dalga şeklinin etkisinin olmadığı ifade etmişlerdir.

## SONUÇ

Elektriksel işlemler, gıdaların işlenmesinde yaygın ve güncel olarak kullanılan geleneksel gıda işleme yöntemlerine alternatif yöntemlerdir. Bu yöntemlerin uygulanmasında, seçilecek gıda, gıdanın dielektrik özellikleri ve uygulanan işlem parametreleri gıda işleminin sağlıklı gerçekleştirilmesi için önemli noktalar. Elektriksel işlem parametrelerinden olan frekans ve dalga şekli, hem gıda ürününde hem de elektriksel işlemin etkinliği üzerinde etkili parametrelerdir. Çalışmalar sonucunda elde edilen bilgilere göre, uygulanan işlem frekansı ve dalga tipi, özellikle hücresel yapıya sahip gıda maddelerin işlenmesinde hücre zarının sahip olduğu elektrokimyasal dengeyi değiştirebilmektedir. Hücre zarının yapısında meydana gelen bu değişim sayesinde ısı ve kütle transferi özellikle düşük frekanslarda daha hızlı gerçekleşebilmekte, ayrıca bazı mikroorganizmaların inaktivasyonu daha etkili gerçekleşebilmektedir. Yüksek frekans uygulamalarının gıda içerisinde ve elektrot yüzeylerinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonları minimize ettiği ve farklı dalga tiplerinin kalite üzerine etkisinin olmadığı ancak, kare dalga tipinin elektriksel iletkenlik değerini düşürerek işlem süresi ve ürün kalitesi üzerinde etkilediği ifade edilmektedir. Buna ek olarak, yüksek frekans uygulamaları, gıdaların yapısında bulunan su molekülleri üzerine etkisi olması sebebiyle kurutma vb. işlemler üzerinde etkili bir işlem. Ancak, elektriksel işlemlerde gıdanın kalite özellikleri üzerine frekans-dalga tipi etkisinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmaların ve sistem enerji verimliliği üzerine etkisinin incelendiği çalışmaların sınırlı sayıda olduğu dikkat çekmektedir. Elektriksel işlemlerin uygulama parametrelerinin daha iyi anlaşılabilmesi, verimliliği daha yüksek sistemler geliştirilmesi için, daha iyi kalitede gıda ürünü elde edilmesi amacıyla farklı frekans ve dalga tipi uygulamalarını inceleyen çalışmaların artırılması gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu derleme çalışması, Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 16 MÜH 135 nolu proje ve TÜBİTAK 115O207 nolu proje kapsamında maddi olarak desteklenen "Farklı Dalga Tipi ve Frekans Uygulamalarının Ohmik Çözündürme İşleminin Performans Özellikleri Üzerine Etkisinin Deneysel ve Kuramsal Olarak İncelenmesi" başlıklı Yüksek Lisans Tezi kapsamında hazırlanmıştır. Ege Üniversitesi BAP Şube Müdürlüğü ve TÜBİTAK TOVAG'a maddi desteğinden dolayı teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- [1] Ohlsson, T., Bengtsson, N. (2002). Minimal Processing Technologies in the Food Industry. Woodhead Publishing, London, United Kingdom.
- [2] Sun, D.W. (2012). Thermal Food Processing: New Technologies and Quality Issues. CRC Press, Florida, USA.
- [3] Sun, D.W. (2014). Emerging Technologies for Food Processing, Elsevier, United Kingdom.

- [4] Baysal, T., İçier, F. (2012). Gıda Mühendisliğinde Isıl Olmayan Güncel Teknikler, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- [5] Bilek, S.E. (2010). Pulsed electric field (PEF) technology. *Akademik Gıda*, 8(3), 33-37.
- [6] Ağçam, E., Akyıldız, A., Evrendilek, G.A. (2014). Vurgulu elektrik alan teknolojisi (PEF): Sistem ve uygulama odacıkları. *Akademik Gıda*, 12(2), 85-91.
- [7] Anlı, E.A., Gürsel Kiral, A. (2013). Vurgulu elektrik alan uygulamasının süt teknolojisinde kullanımı. *Akademik Gıda*, 11(1), 64-68.
- [8] Bozkır, H., Baysal, T., Ergün, A.R. (2014). Gıda endüstrisinde uygulanan yeni çözündürme teknikleri. *Akademik Gıda*, 12(3), 38-44.
- [9] Çokgezme, Ö.F., İçier, F. (2016). Dondurulmuş gıdaların çözündürülmesinde alternatif bir yöntem: Ohmik çözündürme. *Akademik Gıda*, 14(2), 166-171.
- [10] Anonim, (2017). <https://universe-review.ca/R01-08-spectrum.htm>, Son Erişim Tarihi: 29.04.2017.
- [11] Imai, T., Uemura, K., Yoshizaki, S., Noguchi, A. (1996). Changes in heating rate of egg albumin solution during ohmic heating. *Nippon Shokuhin Kagaku Kaishi*, 43(12), 1249-1255.
- [12] Cho, W.I., Yi, J.Y., Chung, M.S. (2016). Pasteurization of fermented red pepper paste by ohmic heating. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34(1), 180-186.
- [13] Lee, S.Y., Ryu, S., Kang, D.H. (2013). Effect of frequency and waveform on inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella enterica* Serovar typhimurium in salsa by ohmic heating. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(1), 10-17.
- [14] Imai, T., Uemura, K., Ishida, N., Yoshizaki, S., Noguchi, A. (1995). Ohmic heating of Japanese white radish *Rhaphanus sativus* L. *International Journal of Food Science & Technology*, 30(4), 461-472.
- [15] Yun, C.G., Lee, D.H., Park, J.Y. (1998). Ohmic thawing of a frozen meat chunk. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 30(4), 842-847.
- [16] Liu, L., Llave, Y., Jin, Y., Zheng, D.Y., Fukuoka, M., Sakai, N. (2016). Electrical conductivity and ohmic thawing of frozen tuna at high frequencies. *Journal of Food Engineering*, 197(1), 68-77.
- [17] Alfaihi, B., Wang, S., Tang, J., Rasco, B., Sablani, S., Jiao, Y. (2013). Radio frequency disinfestation treatments for dried fruits: Dielectric properties. *LWT – Food Science and Technology*, 50(2), 746–754.
- [18] Moyer, J.C., Stotz, E. (1947). The blanching of vegetables by electronics. *Food Technology*, 1(2), 252-257.
- [19] Marra, F., Zhang, L., Lyng, J.G. (2009). Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances. *Journal of Food Engineering*, 91(4), 497-508.
- [20] Jason, A.C., Sanders, H.R. (1962). Dielectric thawing of fish 2. Experiments with frozen white fish. *Food Technology*, 16(6), 107.
- [21] Hashimoto, A., Igarashi, H., Shimizu, M. (1993). Irradiation power effect on pasteurization below lethal temperature of bacteria. *Journal of Chemical Engineering in Japan*, 26(3), 31–33.
- [22] Sakai, N., Mao, W. (2005). Infrared Heating. Thermal Food Processing, Edited by Sun, D-W., CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 493p.
- [23] Liu, C.M., Sakai, N., Hanzawa, T. (1999). Three dimensional analysis of heat transfer during food thawing by far-infrared Radiation. *Food Science and Technology Research*, 5(3), 294-299.
- [24] Kim, J., Pyun, Y. (1995). Extraction of soy milk using ohmic heating. *9th Congress of Food Science Technology*, July 31–August 4, 1995, Budapest, Hungary, Book of Proceedings, 102-120p.
- [25] Kulshrestha, S., Sastry, S. (2003). Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(2), 189-194.
- [26] Sensoy, I., Sastry, S.K. (2004). Ohmic blanching of mushrooms. *Journal of Food Process Engineering*, 27(1), 1-15.
- [27] Shynkaryk, M.V., Ji, T., Alvarez, V.B., Sastry, S.K. (2010). Ohmic heating of peaches in the wide range of frequencies (50 Hz to 1 MHz). *Journal of Food Science*, 75(7), 493-500.
- [28] Gavahian, M., Farhoosh, R., Javidnia, K., Shahidi, F., Farahnaky, A. (2015). Effect of applied voltage and frequency on extraction parameters and extracted essential oils from *Mentha piperita* by ohmic assisted hydrodistillation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29, 161-169.
- [29] Lima, M., Sastry, S.K. (1999). The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. *Journal of Food Engineering*, 41(2), 115-119.
- [30] Sakai, N., Hanzawa, T. (1994). Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Science and Technology*, 5(11), 357–362p.
- [31] Nindo, C., Mwithiga, G. (2010). Infrared Drying. Infrared Heating for Food and Agricultural Processing, Edited by Zhongli Pan and Griffiths Gregory Atungulu, CRC Press, Florida, USA, 89-99.
- [32] Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E. (2000). Simulation and experimental investigation of food material breakage using pulsed electric field treatment. *Journal of Food Engineering*, 44(4), 213–23.
- [33] Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E. (2001). Pulsed electric field breakage of cellular tissues: visualization of percolative properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2(4), 113–25.
- [34] Asavasanti, S., Ristenpart, W., Stroeve, P., Barrett, D.M. (2011). Permeabilization of plant tissues by monopolar pulsed electric fields: effect of frequency. *Journal of Food Science*, 76(1), E98-E111.
- [35] Tekgül, Y., Özcan, K.Ç., Baysal, T., Ergün, A.R., Bozkır, H. (2015). Investigating the effects of current and wave form of electrical pre-treatments on the yield and quality of tomato juice. *International Journal of Food Engineering*, 11(4), 527-532.

- [36] Regier, M., Knoerzer, K., Schubert, H. (2016). *The Microwave Processing of Foods*. Woodhead Publishing, United Kingdom.
- [37] Baysal, T., İçier, F., Baysal, A.H. (2011). *Güncel Elektriksel Isıtma Yöntemleri* (1.Baskı). Sidas Yayıncılık, İzmir.
- [38] Yolacaner, E.T., Sumnu, G., Sahin, S. (2017). *Microwave Assisted Baking*. The microwave processing of foods, Second Edition, Edited by Regier, M., Knoerzer, K., Schubert, H., Woodhead Publishing, United Kingdom, 117.
- [39] İçier, F., Baysal, T. (2004). Dielectrical properties of food materials—1: Factors affecting and industrial uses. *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*, 44(6), 465-471.
- [40] İçier, F., Baysal, T. (2004). Dielectrical properties of food materials—2: Measurement techniques. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(6), 473-478.
- [41] Bengtsson, N.E., Green, W., Valle, F.D. (1970). Radio-frequency pasteurization of cured hams. *Journal of Food Science*, 35(5), 682-687.
- [42] Guan, D., Cheng, M., Wang, Y., Tang, J. (2004). Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes. *Journal of Food Science*, 69(1), FEP30-FEP37.
- [43] Kulshrestha, S.A., Sastry, S.K. (2006). Low-frequency dielectric changes in cellular food material from ohmic heating: effect of end point temperature. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 7(4), 257-262.
- [44] 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.
- [45] Wu, H., Kolbe, E., Flugstad, B., Park, J.W., Yongsawatdigul, J. (1998). electrical properties of fish mince during multi-frequency ohmic heating. *Journal of Food Science*, 63(6), 1028-1032.
- [46] Lima, M., Heskitt, B.F., Sastry, S.K. (1999). The effect of frequency and wave form on the electrical conductivity-temperature profiles of turnip tissue 1. *Journal of Food Process Engineering*, 22(1), 41-54.
- [47] Seyhun, N., Ramaswamy, H.S., Zhu, S., Sumnu, G., Sahin, S. (2013). Ohmic tempering of frozen potato puree. *Food and Bioprocess Technology*, 6(11), 3200-3205.
- [48] Jin, Z.T., Su, Y., Tuhela, L., Zhang, Q.H., Sastry, S.K., Yousef, A.E. (2001). Inactivation Of *Bacillus Subtilis* Spores Using High Voltage Pulsed Electric Field. *Pulsed Electric Fields in Food Processing: Fundamental Aspects and Applications*, Edited by Gustavo V. Barbosa-Canovas Q. Howard Zhang, Gipsy Tabilo-Munizaga, CRC Press, Pennsylvania, USA, 167p.
- [49] Qin, B.L., Zhang, Q., Barbosa-Canovas, G.V., Swanson, B.G., Pedrow, P.D. (1994). Inactivation of microorganisms by pulsed electric fields of different voltage waveforms. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(6), 1047-1057.
- [50] Canovas, G.V., Pothakamury, U.R., Gongora-Nieto, M.M., Swanson, B.G. (1999). Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields. Academic Press, California, USA.
- [51] Geveke, D.J., Brunkhorst, C., Fan, X. (2007). Radio frequency electric fields processing of orange juices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8(1), 549-554.
- [52] Geveke, D.J., Brunkhorst, C. (2008). Radio frequency electric fields inactivation of *Escherichia coli* in apple cider. *Journal of Food Engineering*, 85(1), 215-221.
- [53] Geveke, D.J., Gurtler, J., Zhang, H.Q. (2009). Inactivation of *Lactobacillus plantarum* in apple cider, using radio frequency electric fields. *Journal of Food Protection*, 72(3), 656-661.
- [54] Fabian, F.W., Graham, H.T. (1933). Influence of high frequency displacement currents on bacteria. *Journal of Infectious Diseases*, 53(1), 76-88.
- [55] Fleming, H., (1944). Effect of high frequency fields on microorganisms. *Electric Engineering*, 63(1), 18-21.
- [56] Brown, G.H., Morrison, W.C. (1954). An exploration of the effects of strong radio-frequency fields on microorganisms in aqueous solutions. *Food Technology*, 8(1), 361-366.
- [57] Blanco J.F., Dawson L.E. (1974). Survival of *Clostridium perfringens* on chicken cooked with microwave energy. *Poultry Science*, 53(5), 1823-1830.
- [58] Ansari, A.M., Majidzadeh-A.K., Darvishi, B., Sanati, H., Farahmand, L., Norouzian, D. (2017). Extremely low frequency magnetic field enhances glucose oxidase expression in *Pichia pastoris* GS115. *Enzyme and Microbial Technology*, 98, 67-75.
- [59] Dunn, J., Ott, T., Clark, W. (1995). Pulsed-light treatment of food and packaging. *Food Technology*, 49(9), 95-98.
- [60] Ho, S.Y., Mittal, G.S., Cross, J.D., Griffiths, M.W. (1995). Inactivation of *Pseudomonas fluorescens* by high voltage electric pulses. *Journal of food Science*, 60(6), 1337-1340.
- [61] Mercali, G.D., Schwartz, S., Marczak, L.D.F., Tessaro, I.C., Sastry, S. (2014). Ascorbic acid degradation and color changes in acerola pulp during ohmic heating: Effect of electric field frequency. *Journal of Food Engineering*, 123, 1-7.
- [62] Sumnu, G., Sahin, S. (2005). Recent developments in microwave heating. *Emerging Technologies for Food Processing*, Edited by Da-Wen Sun, Food Science and Technology, International Series, Elsevier Academic Press, UK, 419p.
- [63] Cathcart, W.H., Parker, J.J., Beattie, H.G. (1947). The treatment of packaged bread with high frequency heat. *Food technology*, 1(2), 174-177.
- [64] Sumnu, G. (2001). A review on microwave baking of foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(2), 117-127.
- [65] Sumnu, G., Sahin, S., Sevimli, M. (2005). Microwave, infrared and infrared-microwave combination baking of cakes. *Journal of Food Engineering*, 71(2), 150-155.
- [66] Pan, Z., Atungulu, G.G. (2010). *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. CRC Press, Florida, USA.

- [67] Sumnu, S.G., Ozkoc, S.O. (2010). Infrared baking and roasting. In *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*, Edited by Zhongli Pan and Griffiths Gregory Atungulu. CRC Press, Florida, USA, 203-223p.
- [68] Shilton, N., Mallikarjunan, P. Sheridan, P. (2002). Modeling of heat transfer and evaporative mass losses during the cooking of beef patties using far-infrared Radiation. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 217–222.
-