





## Radyo Frekans Isıtma Yöntemi ve Gıda İşlemede Kullanımı

Gamze Yazar , Filiz İçier

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir

Geliş Tarihi (Received): 23.02.2013, Kabul Tarihi (Accepted): 25.05.2013

 Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): [gamzeyazar@gmail.com](mailto:gamzeyazar@gmail.com) (G. Yazar) 0 232 388 23 95  0 232 311 30 21

### ÖZET

Radyo dalgaları diğer elektromanyetik dalgalar gibi salınım halindeki elektrik ve manyetik alandan oluşmaktadır. Radyo dalgalarının elektrik alan bileşeninin etkisi ile salınım halindeki molekül ve iyonların hareketi sonucu meydana gelen moleküler sürtünme, gıda içerisinde hacimsel ısı oluşumuna neden olmaktadır. Radyo dalgaları kullanılarak gıdalar üzerinde gerçekleştirilen bu ısıtma işlemi *dielektrik ısıtma* olarak adlandırılmaktadır. Hızlı ve homojen ısı dağılımı sağlaması, yüksek penetrasyon derinliği ve düşük enerji tüketimi gibi özellikleri dolayısı ile radyo frekans (RF) ısıtma teknolojisi, gıda işleme uygulamaları açısından gelecek vadede bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. RF ısıtma teknolojisinin gıda endüstrisinde pişirme, çözündürme, dondurma, pastörizasyon, sterilizasyon, dezenfeksiyon, kurutma, vb. amaçlarla kullanımı son yıllarda yaygınlık kazanmaktadır. Bu çalışmada RF ısıtmanın tarihçesi ve ısıtma prensibi hakkında bilgi verilirken; gıda işlemede yaygın kullanım alanları ile RF ısıtmanın gıda işlemede kullanılmasının avantaj/ dezavantajları incelenmektedir. Ayrıca gıdaların dielektrik ısıtılmasında etkili olan geometri, şekil, ürün pozisyonu ve dielektrik özellikler gibi faktörlerin RF ısıtma sistemlerinin oluşturulmasında taşıdığı önem vurgulanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Radyo frekans, Isıtma, Dielektrik ısıtma, Gıda

### Radio Frequency Heating and Applications in Food Industry

#### ABSTRACT

Similar to the other electromagnetic waves, radio waves consist of oscillating electric and magnetic field as well. Due to the effect of the applied electric field constituent of radio waves, heat is volumetrically generated within the food material as a result of the molecular friction of oscillating molecules and ions. The heating process that applied on food materials via the use of radio frequency is called "*dielectric heating*". Radio frequency (RF) heating is regarded as a promising technology for food applications due to its associated rapid and uniform heat distribution, large penetration depth and lower energy consumption properties. In recent years, RF heating technology is widely used in food industry for the purposes such as cooking/ baking, thawing, freezing, pasteurization, sterilization, disinfestation and drying. In this study, the common use of RF heating in food processing and the advantages or disadvantages of its use are investigated, and information related to the history and the heating principles of RF technology are given in details.

**Key Words:** Radio frequency, Heating, Dielectric heating, Food

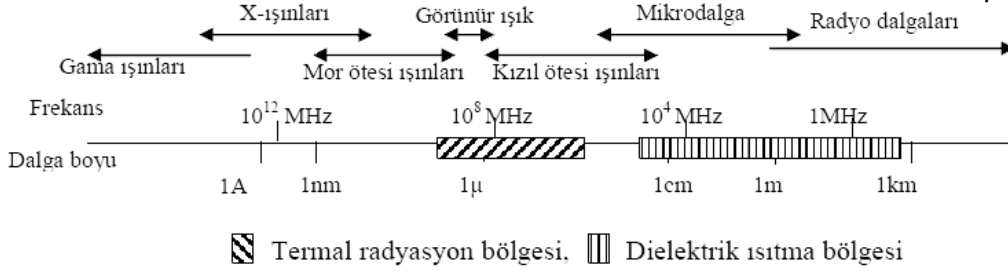
#### GİRİŞ

Elektromanyetik dalgalar salınım halinde birbirine ve yayılma yönüne dik elektrik ve manyetik alandan

oluşmaktadır. Elektromanyetik dalgalar ile aktarılan enerji mekanizmasına  *Radyasyon*  denmektedir [1].

Elektromanyetik radyasyon, dalga boyu 10-16 m'den kısa kozmik ışınlarla 10 km'den daha geniş elektriksel dalgaları da içerisine alan çok geniş bir aralığı kapsamaktadır (Şekil 1) [1]. Elektromanyetik radyasyon, iyonize ve iyonize olmayan olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İyonize radyasyonun kanserojen etkilerinin olduğu bilinirken, iyonize olmayan radyasyon günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. İyonize radyasyon; alfa, beta ve nötron partikülleri ile X ışını ve gama ışınından oluşmaktadır [2, 3]. Biyolojik olarak

önem taşıyan atomları iyonize etmek için yeterli enerjiye (< 10 eV) sahip olmamaları nedeniyle radyo dalgaları ve mikrodalgaların iyonize olmayan radyasyon grubuna dahil oldukları kabul edilmektedir. Mikrodalga (MD) veya radyo-frekans (RF) radyasyonunun, herhangi bir ortam ya da materyal tarafından absorbe edilmesi sonucunda meydana gelen en muhtemel etki ısıtmadır [4, 5]. Her iki dalga boyunun etkin olduğu alan ise elektromanyetik spektrumda dielektrik bölge olarak isimlendirilmektedir [6].



Şekil 1. Elektromanyetik spektrum [1]

Mikrodalgalar veya yüksek frekanslı radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirilen ısıtma işlemine *dielektrik ısıtma* denmektedir. Dielektrik ısıtma, elektromanyetik alternatif alan ile gıdalarda bulunan dipoller ve iyonik yükler arasında interaksiyon meydana getirerek ürün içerisinde volumetrik ısı oluşumu sağlamaktadır. RF ısıtmada kullanılan frekans değeri 10-300 MHz aralığında iken, MD ısıtma için frekans değeri 300-30000 MHz aralığında değişmektedir [1, 7]. Radyo dalgaları ve mikrodalgalar haberleşme, radar gibi uygulamalarda da kullanıldığı için Amerika Birleşik Devletleri Federal İletişim Komitesi (Federal Communications Commission, FCC), radyo dalgalarının endüstriyel, bilimsel ve medikal amaçlarla kullanımını 13.56, 27.12 ve 40.68 MHz ile sınırlandırmıştır [1, 4, 7, 8].

Mikrodalgaların dalga boyu genellikle gıda örneği boyutlarına yakın, hatta daha küçüktür. Bu nedenle radyo dalgaları, gıdanın derinliklerine kadar nüfuz ederek materyalin homojen bir şekilde ısınmasını sağlarken; mikrodalgalar yeterince nüfuz edemediği için bölgesel ısınmalara ve yanıklara neden olabilmektedir [1, 9]. Bu nedenle, ısının ürün içerisinde oluşmasını sağlayarak hacimsel ısınma sağlayan RF ısıtma, böylelikle pişirme süresinde kısalma ve daha homojen bir ısınma sağlama gibi yönleriyle geleneksel metotlara alternatif bir yöntem olarak gıda sanayinde uygulama alanı bulmaktadır [8, 10, 11]. Yapılan çalışmalar RF ısıtmanın; pastörizasyon [12-16, 69], kurutma [7, 17, 18], çözündürme [19, 20, 78], dondurma [21, 61], sterilizasyon [11, 22, 46], böcek kontrolü [23-27, 57, 64], enzim inaktivasyonu [68], pişirme [28, 29, 73] gibi uygulamalarla gıda sanayinde kullanım alanı bulunduğunu göstermektedir. Bu çalışmada RF ısıtmanın geçmişi ve ısıtma prensibi üzerinde durulurken, gıda sanayindeki kullanım alanları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

## RADYO-FREKANS ISITMA

### Radyo-Frekans Isıtmanın Tarihçesi

1832 yılında, Michael Faraday, elektromanyetik alanların varlığını ortaya koymuştur. 41 yıl sonra James Clerk Maxwell, radyo dalgaların varlığını ve davranışını matematiksel olarak modellemiştir. 1885 yılında ise Maxwell teorisine bağlı olarak deneysel çalışma gerçekleştiren Heinrich Hertz' in çalışması takip etmiştir [30].

Jacques Arsene d'Arsonval, hayvanlar üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada düşük voltaj alternatif akım, yüksek frekansın (500-1500 kHz) etkilerini incelemek amacıyla Hertz'in ilk yüksek frekans osilatörünü kullanmıştır. Jacques bu çalışması ile RF enerjisinin en önemli etkisinin ısı üretimi olduğunu keşfetmiştir ve bu bilgi, 1895 yılında Paris-Hotel Dieu Hastanesi'nde, Jacques önderliğinde yüksek frekans ısı terapi ünitesinin oluşturulmasına ışık tutmuştur [30].

Bu teknolojinin gıda üretimindeki potansiyel kullanımını ise ilk olarak 2. Dünya Savaşı sonrasında keşfedilmiştir. Sherman 1946 yılında gerçekleştirmiş olduğu çalışmada elektrik enerjisini tanımlamış, nasıl üretildiği hakkında bilgi vermiş ve gıda üretiminde muhtemel uygulamaları ile ilgili önerilerde bulunmuştur. Bu ilk adımlar RF enerjisinin gıda endüstrisinde şu şekilde uygulama alanı bulmasını sağlamıştır:

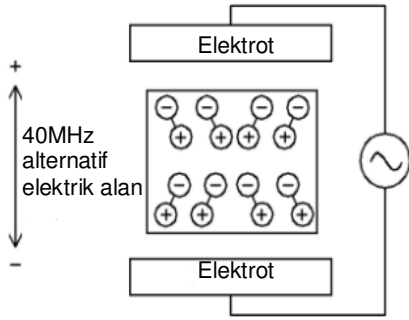
- İşlenmiş et ürünlerinin pişirilmesi
- Ekmeğin ısıtılması
- Sebzelelerin dehidrasyonu ve haşlanması

1960'larda RF uygulamaları, dondurulmuş ürünlerin çözündürülmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Demeczky

1974 yılında, şişelere dolumu yapılmış meyve sularının (şeftali, ayva ve portakal) muhafazasında kullanılan geleneksel ısıtma yöntemlerine kıyasla, taşıyıcı bant üzerinde ilerlerken RF uygulamasına tabi tutulan ürünlerin mikrobiyal yükünde azalma meydana geldiğini ve organoleptik özellikler açısından daha yüksek kalitede olduklarını belirtmiştir. 1980'lerin sonlarına doğru ise RF uygulaması kurabiye ve krakerlerin son pişirme (pişirme sonrası kurutma) işlem basamağında kullanım alanı bulmuştur. 1990'lı yıllarda ise enerji etkinliğini geliştirebilmek amacıyla pastörizasyon işleminde kullanılmıştır. Son olarak da RF aplikatörü üzerinde modifikasyon çalışmaları ile RF frekanslarında gıdaların dielektrik değerleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [4, 7, 30, 31].

### Radyo-Frekans Isıtma Prensibi

Yüksek frekanslı radyo dalgaları, yüksek voltajlı alternatif akımla beslenen iki elektrot arasında üretilebilmektedir. Radyo dalgaları üreten sistemlerde, elektromanyetik enerjiye dönüşen elektrik enerjisi gıdalar tarafından iç enerji olarak absorbe edilmekte ve ısıya dönüştürülmektedir (Şekil 2) [1, 7].



Şekil 2. Alternatif elektrik alanda ısı üretimi [7]

Isıtma sırasında, yüksek frekanslı alternatif elektrik akımı tarafından negatif ve pozitif olarak yüklenmiş iki metal kapasitör ile ısıtılacak olan ürün arasında dielektrik meydana gelmektedir [4, 31, 32]. RF ve MD sistemleri temelde aynı prensibe göre çalışmaktadır. Radyo dalgası jeneratörü, ısıtılacak olan gıdanın yerleştirildiği elektrotlar arasında alternatif elektrik alan yaratmaktadır. Elektrotlar arasındaki materyal dielektrik oluşturmaktadır. Kapasitör olarak görev alan elektrotlar ise, RF jeneratörün frekans değerine bağlı olarak saniyede birçok kez, pozitiften negatife doğru, alternatif akımla yüklenmektedir. Örneğin, sistem frekansı 27.12 MHz ise elektrotların polaritesi saniyede 27.12 milyon kez değişmektedir. Böylelikle gıda maddesinin yapısında bulunan su veya iyonik moleküller gibi polar moleküller, elektrotların polaritesine bağlı olarak, sürekli olarak dizilim göstermekte ve meydana gelen sürtünme dolayısıyla gıda içinde hacimsel olarak ısıtma gerçekleşmektedir. Meydana gelen bu moleküller düzeyindeki hareket, elektrik alandaki frekans değerinin (RF için 1-300 MHz) artmasıyla hız kazanmaktadır [5, 8, 9]. Frekanstaki artış belli bir noktaya ulaştığında gıda içerisindeki polar moleküller ve iyonlar değişen elektrik alana cevap vermede mikro saniye düzeyinde gecikmeye başlamaktadır. Gecikmenin ilk görüldüğü

frekansa *Debye Rezonans frekansı* ve gecikme süresine de *rahatlama zamanı* denmektedir. Debye rezonans frekansına kadar frekanstaki artış ile birlikte dielektrik kayıp faktörü, dolayısıyla gıda tarafından absorbe edilebilecek elektrik enerjisinin miktarı artmakta; debye rezonans frekansında maksimuma ulaşmaktadır [1, 31]. Radyo frekans ısıtıcıda gıda, aplikatör elektrotlar arasına yerleştirildiğinde radyo frekans elektriksel alana karşı oldukça kompleks elektriksel direnç oluşmaktadır (Şekil 3). Şekil 1'de, elektromanyetik spektrumda RF kısmının 1-300 MHz'lik bir frekans aralığı verdiği görülmekteyse de endüstriyel boyutta ısıtma uygulamalarında kullanılan frekans değeri 10-50MHz aralığında değişmektedir [30].

Şekil 3'te görülen paralel plaka RF sisteminde, ısıtılacak olan materyal paralel elektrotlar arasına, fakat temas etmeyecek şekilde yerleştirilmektedir. Paralel plaka elektrotlar ("through-field" aplikatörler), kalın materyallerin ısıtılmasında en yaygın kullanılan elektrot konfigürasyonudur. Bunun dışında; şerit elektrotlar (ince tabakaların <10mm- ısıtılması veya kurutulmasında kullanılır) ve çapraz elektrotlar (orta kalınlıktaki materyallerin ısıtılmasında kullanılır) gibi farklı konfigürasyonları da bulunmaktadır [30].

Radyo frekanslarındaki elektromanyetik dalganın etkisi, elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni ve gıdaların kimyasal bileşenlerinin etkileşimi sonucu ortaya çıkmaktadır [1]. RF ısıtma gıdaların dielektrik özelliklerine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Dielektrik özellikler ise frekans, yoğunluk, sıcaklık, gıdanın nem içeriği veya yapısı (donmuş, serbest ya da bağlı), bileşim (ör. tuz içeriği) ve depolama süresi gibi parametrelerden etkilenmektedir [29, 33-35]. Bununla birlikte gıdalar gibi dielektrik materyallerde RF ısıtma; dipol dönmesi ve çözünmeyen iyonların hareketi sonucu meydana gelen elektriksel direnç ısıtmanın kombinasyonu ile gerçekleşmektedir [4, 19, 36].

### Dielektrik Özellikler

Endüstriyel boyutta RF ısıtma uygulamalarında önem taşıyan frekans değerlerinde (10 MHz-30 MHz) meydana gelen su moleküllerinin dipol dönmesi ile su içeren iyonlar dolayısıyla meydana gelen iyonik ısı iletimi gıdalarda meydana gelen en önemli kayıp mekanizmalarıdır [38]. Dipol dönmesi ve materyaldeki iyonik hareket, dielektrik kayıp faktörü olarak tanımlanmaktadır ve  $\epsilon''$  ile gösterilmektedir [1]. Başka bir ifade ile yüksek nem içeren gıdalarda dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) dipol ve iyonik kayıplardan etkilenmektedir. Eşitlik 1'de yer alan alt indis  $d$  dipol dönmesini,  $\sigma$  ise iyon polarizasyonunu ifade etmek üzere kullanılmaktadır. İyon polarizasyonu dolayısıyla meydana gelen iyonik kayıpların RF frekans değerlerinde sıcaklığın artmasıyla birlikte arttığı belirtilmektedir [34, 35, 39].

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + \epsilon''_\sigma \quad (1)$$

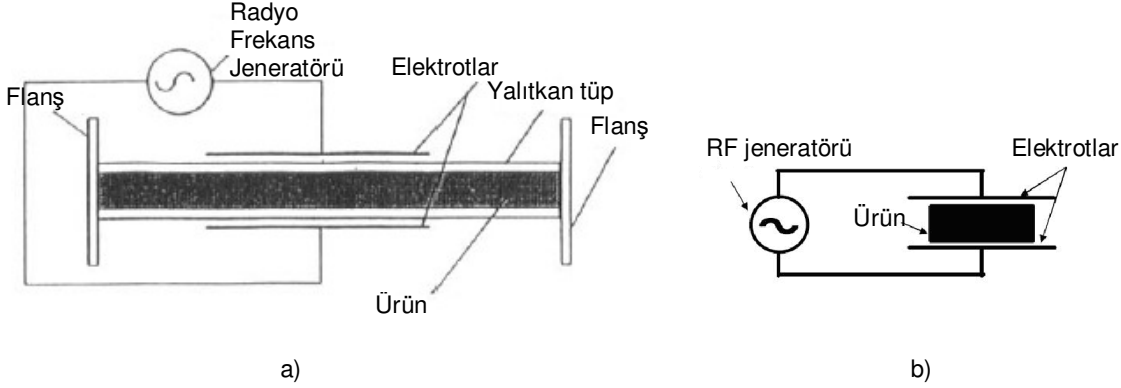
Birçok gıda maddesi ve tarım ürünü dielektrik karakter göstermektedir. Maruz kaldıkları elektrik alanda kapasitörler gibi enerjisi absorbe etme eğilimi

gösterebildikleri gibi; aynı zamanda rezistans gibi davranıp elektrik enerjisini dağıtma özelliği de gösterebilmektedirler. Dielektrik özellikler olarak tanımlanan bu kabiliyetler, *bağıl kompleks geçirgenlik* ( $\epsilon$ ) ile Eşitlik 2'de görüldüğü gibi ifade edilmektedir [7]. Geçirgenlik değeri, elektromanyetik dalgaların ara yüzeylerdeki yansıması ile gıda içerisinde dalga

enerjisinin dağılımını etkileyen dielektrik özellikleri tanımlamak için kullanılan genel bir terimdir [33, 35, 57].

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2)$$

$$j: \sqrt{-1}$$



Şekil 3. Radyo-frekans ısıtma şematik gösterimi [31, 37]

RF aralığında düşük frekans değerlerinde iyonik polarizasyonun ısıtma mekanizmasında daha dominant olduğu kabul edilmektedir. Dolayısı ile materyal içerisindeki çözölmüş iyonların, su dipollerinden daha büyük önem taşıdığı düşünülmektedir [30]. Dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), materyalin elektrik enerjisini depolama kabiliyetini yansıtırken; kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) gıdanın elektrik enerjisini ısıya dönüştürebilme kabiliyeti açısından belirleyicidir. Söz konusu iki parametre, RF ısıtmaya maruz kalan bir gıda maddesinde sıcaklık profili, penetrasyon derinliği ve güç absorpsiyonu gibi değerlerin belirlenmesinde önem taşıyan dielektrik özelliklere karşılık gelmektedir [33, 34, 35, 39].

Gıda maddeleri gibi dielektrik özellik gösteren materyallerde dielektrik ısıtmaya bağlı olarak meydana gelen sıcaklık artışı Eşitlik 3' te olduğu gibi hesaplanabilmektedir [5, 7, 33, 35, 57]:

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f E^2 \epsilon'' \quad (3)$$

$\rho$ : materyalin özgül ağırlığı ( $kg/m^3$ ),  $C_p$ : materyalin spesifik ısısı ( $J/kg \cdot 1^\circ C^{-1}$ ),  $\Delta t$ : süre (s),  $\Delta T$ : materyaldeki sıcaklık artışı ( $^\circ C$ ),  $E$ : elektrik alan şiddeti ( $V/m$ ) ve  $f$ : frekans (Hz) değerlerini ifade etmektedir. Eşitlik 3'te görüldüğü gibi; RF ısıtma uygulaması ile gıda maddesinde meydana gelen sıcaklık artışı dielektrik kayıp faktörü, elektrik alan şiddeti, frekans ve uygulama süresi ile orantılı olarak değişmektedir [33].

RF ısıtıcıda elektrotlar arasına yerleştirilmiş gıda için kapasitans değeri Eşitlik 4 ile belirtilmektedir;

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f C_0} \frac{\epsilon'' - j\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (4)$$

$Z_c$ : Materyal kapasitansı ( $\Omega$ ),  $f$ : frekans (Hz),  $\epsilon'$ : dielektrik katsayısı (absorplama düzeyi) (F/m),  $\epsilon''$ : dielektrik kayıp faktörü (F/m),  $C_0$ : boşluk kapasitansı ( $8,85 \times 10^{-12}$  F/m) ve  $j: \sqrt{-1}$  değerlerini ifade etmektedir.

Bir gıda maddesinde RF ısıtma sırasında hacim başına düşen ısı üretim hızı ( $\dot{U}$ ) ise Eşitlik 5 ile ifade edilmektedir [8]:

$$\dot{U} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\Delta V|^2 \quad (5)$$

$|\Delta V|^2$ : elektrik alan kuvveti,  $f$ : frekans (Hz),  $\epsilon_0$ : serbest uzay geçirgenliği ( $8.854 \times 10^{-12}$  Farad/m) ve  $\epsilon''$ : dielektrik kayıp sabiti (F/m) değerlerini ifade etmektedir.

Penetrasyon derinliği ise dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün fonksiyonu bir diğer dielektrik parametresidir [35]. Elektromanyetik dalgalar bir materyale nüfuz ettiğinde, dalgaların bir kısmı yansırken bir kısmı materyal içerisine penetre olmaktadır. Ancak penetrasyon gücü mesafe ile azalmaktadır [7]. Penetrasyon derinliği ( $d_p$ ) genellikle RF gücünün 1/e ( $e = 2.718$ ) veya aktarılan değerlerin % 36.8'ine düştüğü ürün içerisindeki derinlik (m) olarak ifade edilmektedir [7, 35]. Dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün bir fonksiyonu olarak penetrasyon derinliği Eşitlik 6 ile tanımlanmaktadır:

$$d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon''}}{2\pi \epsilon''} \quad (6)$$

$\lambda_0$ : serbest uzay dalga boyu (2.45 GHz için  $\lambda_0 = 12.2$  cm)

Genellikle gıda maddeleri 0.6-1.0 cm penetrasyon derinliğine karşılık gelen  $\epsilon'' < 25$  değerine sahiptirler.

Bununla birlikte penetrasyon derinliğinin gıdanın tuz içeriği ile frekans değerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği bilinmektedir. Eşitlik 6'da görüldüğü gibi, penetrasyon derinliği frekans ile ters orantılı olarak değişmektedir. Düşük frekans değerlerinde penetrasyon derinliği artarken; yüksek frekans değerlerinde yüzeysel ısınma görülmektedir. Dolayısı ile RF frekans değerlerinde (27 ve 40 MHz) mikrodalga frekans değerlerine (915-2450 MHz) kıyasla penetrasyon derinliğinin daha fazla olduğu sonucuna varılmaktadır. Yüksek penetrasyon derinliği ise elektrik alanda küçük varyasyona neden olarak homojen ısıtma sağlamaktadır. Çeşitli çalışmalar, gıdalarda penetrasyon derinliğinin sıcaklığın 20'den 120°C'ye yükselmesiyle birlikte % 50 oranında azaldığını göstermektedir. Ancak frekans değerindeki yükselmenin, sıcaklıktaki artışa oranla penetrasyon değeri üzerinde çok daha etkili olduğu kabul edilmektedir. Örneğin; 20°C'de, 1800 MHz frekans değerinde mikrodalga enerjisine maruz kalan mangolara kıyasla 27.12 MHz frekans değerinde enerjiye maruz kalan mangolarda penetrasyon derinliğinin 6 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir [5, 7, 35, 39].

### RADYOFREKANS ISITMANIN GIDA İŞLEMEDE KULLANIMI

Gıda işleme uygulamalarında RF ısıtma yöntemine, mikrodalgaya kıyasla daha az rastlanıyor olsa da, literatürde gıda ürünleri üzerinde gerçekleştirilmiş çeşitli RF uygulamaları bulunmaktadır. Tablo 1'de gıda endüstrisinde çeşitli işlemlerin gerçekleştirilmesi amacıyla RF enerjisinin kullanımına yönelik örnekler verilmektedir.

#### Et Ürünlerinin İşlenmesinde RF Uygulamaları

RF ısıtma, çözünmüş tuzların depolarizasyonu ile gerçekleşmesi ve kür bileşiminde yüksek oranda tuz bulunması gibi sebeplerden dolayı, kürlenmiş et ürünlerinin ısıtılmasında kullanılabilir uygun bir teknolojidir [10]. Tang ve ark. [40], geniş çaplı hindi göğüs etlerinin kimyasal, fiziksel ve duyuşsal özelliklerini RF ısıtma ve buharda ısıtma işlemlerini uygulamak suretiyle kıyaslamışlardır. RF uygulaması için 500 W, 40 dakika seçilirken, buharda ısıtma işlemi 150 dakika sürmüştür. Uygulamalar sonrasında ürünlerin B-vitami, tiamin, riboflavin içerikleri ile tekstürel özellikleri arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Bununla birlikte RF uygulanmış göğüs etlerinin Hunter a (kırmızılık) değerleri daha düşük bulunmuştur. Ayrıca 5°C'de soğuk depolama sırasında RF ısıtılmış göğüs etlerinde lipid oksidasyonunun belirgin bir şekilde daha yavaş gerçekleştiği tespit edilmiştir. Duyusal analizlerde ise panelistler ısıtma metodu ile ilgili herhangi bir fark algılamamışlardır. McKenna ve ark. [10], jambon örneklerinin RF ısıtma yöntemiyle buharda ısıtmaya kıyasla daha hızlı ısıtıldığını belirlemişlerdir. Aynı çalışmada, RF ile ısıtılmış ürünlerin daha yüksek pişme verimine sahip olduklarını, fakat daha düşük su tutma kapasitesine sahip oldukları tespit edilmiştir. Ancak RF ile ısıtılmış jambonların diğerlerine oranla daha sert olduklarını vurgulamışlardır. Tang ve ark. [41], *biceps femoris* kasından elde edilen biftekleri RF (500 W, 27.17

MHz) ve buharlı fırında (80°C) pişirmişlerdir. RF uygulaması pişirme süresini enjeksiyonsuz etlerde % 23 oranında, kürlenmiş etlerde ise %31 oranında kısaltmıştır. Buharlı pişirmeye kıyasla pişme veriminin arttığı ve sertlik değerinin azalmış olduğu belirlenmiştir. 50 panelist ile gerçekleştirilen duyuşsal analiz sonuçlarında ise, panelistlerin bifteklerin tekstürel özelliklerinde herhangi bir fark algılamadıkları belirlenmiştir. Kirmaci ve Singh [29] tavuk göğüs etlerinin su banyosunda pişirilmesi ve RF uygulamalı fırında pişirilmesini ısıtma hızı, sıcaklık dağılımı ve pişme kalitesi açısından kıyaslamışlardır. Paketlenmiş taze ve marine edilmiş göğüs eti örnekleri (1.36 kg/lık paketler) merkez sıcaklıkları 74°C'ye ulaşana kadar pişirilmiş ve pişirme işlemi su banyosunda 41.3 dakika sürerken, RF uygulamalı fırında 23.8 dakika sürmüştür. Pişirme süresi RF uygulaması ile % 42.4 oranında kısaltılmış olsa da su banyosunda pişirilmiş örneklerde daha homojen bir sıcaklık dağılımı gözlenmiştir. Pişirilen örneklerin her ikisinde de pişme verimi, nem içeriği, pH ve kesme mukavemeti gibi değerler benzer bulunmuştur. Fakat RF uygulamalı fırında pişirilen örneklerin daha düşük a (kırmızılık) değerine ve daha yüksek hue açısı değerine sahip oldukları belirlenmiştir. Brunton ve ark. [42], beyaz puding olarak bilinen domuz etinden üretilmiş et ürününün pişirilmesi amacıyla RF uygulamalı (450 W) bir pişirme tekniğinden yararlanılmışlardır. Pişirme uygulamaları sonucunda örneklerin son sıcaklıklarının 73°C'ye ulaşması RF uygulamasında 7 dakika 40 saniye sürerken, benzer sıcaklık değerinin elde edilmesi su banyosu ve buharlı fırında pişirme işlemlerinde sırasıyla 29 ve 33 dakika sürmüştür. Pişirme yöntemlerinin örneklerin tekstürel ve duyuşsal özelliklerinde kayda değer bir değişime neden olmadığı da belirlenmiştir. Laycock ve ark. [43] kıyılmış, parçalanmış ve bütün et örneklerinin pişirilmesinde (merkez sıcaklığı 72°C olana dek) RF uygulamasından (1.5 kW, 27.12 MHz) yararlanılmış ve pişme süresinde ve sızma kaybında azalma gözlemlerken; örneklerin kabul edilebilir renk, su tutma kapasitesi ve tekstürel özelliklere sahip olduğunu belirlemişlerdir. Benzer şekilde sığır kıyması örnekleri [44], emülsifiye et ürünlerinin [14] ısıtılmasında RF uygulaması kullanılmış ve konvansiyonel metotlara kıyasla pişme süresinde kısalma olduğu ve daha homojen bir ısıtma sağlandığı tespit edilmiştir. Schlüsselberg ve ark. [75] köfte örneklerinin pişirilmesinde RF uygulamasının kullanılması ile pişirme süresinde kısalma sağlanmasının yanı sıra geleneksel metoda kıyasla *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium*, *Listeria monocytogenes* gibi patojenler ile *Bacillus cereus* ve *Bacillus thuringiensis* gibi patojen bakterilerin sporlarının miktarında daha fazla düşüş (log CFU/g) olduğunu bildirmektedir.

Zhang ve ark. [45] ise emülsifiye et ürünlerinin pastörizasyonu için bir düzenek geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, buharla pişirmeye kıyasla sözü edilen et ürünlerinin pastörizasyon sürelerinde %79 oranında kısalma belirlendiğini bildirmişlerdir. Farag ve ark. [19] sığır etlerinin endüstride arzu edilen -2 ve -5°C sıcaklık değerlerinde temperlenmesi işleminde RF uygulamasının kullanımını değerlendirmişlerdir. RF ısıtmanın (27.12 MHz frekans değerinde), geleneksel

metotlara kıyasla temperleme süresinde 30 kat düşüş meydana getirdiği belirlenmiştir. Ayrıca geleneksel olarak hava akımı ile temperleme işleminde olduğu gibi RF ısıtma ile siğir etlerinin temperlenmesinde de benzer şekilde homojen son sıcaklık noktası dağılım profili kaydedilmiştir.

Anese ve ark. [21], kenar uzunluğu 4.5 cm olan küp şeklindeki ve PE ambalajlanmış domuz etlerinin dondurulması amacıyla RF destekli dondurma işlemi ile kontrol amacıyla hava akımı ile dondurma (2 m/s, -40°C) işlemi uygulamışlardır. RF destekli kriyojenik dondurma (150 saniye boyunca RF vurgu uygulaması ve -18°C'de 15 dakika depolama) işlemi sırasında örnekler sıvı nitrojen spreylene maruz bırakılmış ve 2 kV gibi düşük voltaj değerlerinde vurgulu RF uygulamasının domuz eti örneklerinin dondurulması açısından uygun olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak kontrol örneklerine kıyasla vurgulu RF kriyojenik dondurma işlemi ile dondurulan örneklerde buz kristallerinin daha homojen boyut ve dağılım gösterdikleri belirlenmiş ve bu sonucun RF dolayısıyla örneklerdeki su moleküllerinin dönme hareketinden ileri geldiği düşünülmektedir. Ayrıca dondurulan et örnekleri çözündürüldükten sonra sızma kaybı değerleri ölçümlenmiştir. Kriyojenik RF destekli uygulamada et örneklerinde 25 saatlik bir dinlendirme ile 10°C'de sıcaklıklarının sabitlenmesi sürecinde %1.5 sızma kaybı tespit edilirken; hava akımı ve kriyojenik dondurma proseslerine maruz kalan örneklerde yaklaşık %4 sızma kaybı gözlenmiştir.

Tüm bu çalışmaların yanı sıra Wang ve ark. [46], paketlenmiş etli lazanya örneklerinin pişirilmesinde RF uygulamasını kullanarak (6 kW, 27 MHz) ürün kalitesinde değişime neden olmadan heterojen ürünlerin de ısıtılma işlemlerinde RF uygulamasından yararlanılabileceğini vurgulamışlardır.

### Hububat Ürünlerinin İşlenmesinde RF Uygulamaları

RF ısıtma ve "Post baking" olarak bilinen, kurabiye, kraker, makarna, atıştırmalık ürünler vb. çeşitli fırın ürünlerinde pişirme sonrası kurutma amacıyla uygulanan prosesler yaklaşık 40 yılı aşkın bir süredir unlu mamuller sanayinde kullanılmaktadır [4, 17, 37]. RF ısıtmanın ilk uygulamaları ekmeğin pişirilmesi üzerine gerçekleştirilmiş ve hemen sonrasında fırıncılık endüstrisinde post-bake/ kurutma gibi uygulamalar ile yaygınlık kazanmıştır [9]. Cathcart ve ark. [4] 1947 yılında gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında ambalajlanmış, dilimlenmiş beyaz ekmeğin RF uygulaması (3 kW, 14-17 MHz) ile 20- 59 s süre ile ısıtmışlardır (sıcaklıkları 52 ve 66°C'ye ulaşana kadar). Sonuç olarak sıcaklıkları 60°C'ye ulaşana kadar ısıtılan ekmeğin örneklerinde küf oluşumu olmadığını tespit edilmiştir. Bartholomeos ve ark. [47] 1948 yılında RF ısıtma ile 66°C'ye kadar ısıtılan inoküle edilmiş esmer Boston ekmeğinin raf ömürlerinin 12 gün uzadığını belirlemiştir. *Penicillium* ve *Aspergillus* sporlarında 4-log azalma kaydetmişlerdir.

Liu ve ark. [47, 80], ambalajlanmış ekmeğe küf gelişimini önlemeye yönelik geleneksel sıcak hava uygulaması yanı sıra RF uygulamasını da kullanmışlardır. 6 kW, 27.12 MHz RF uygulaması gerçekleştirilmiştir. *Penicillium citrinum* sporlarının gelişimini önlemeye yönelik minimum süre-sıcaklık koşulları (maksimum ekmeğin kalitesi ile) tercih edilmiştir. RF ile muamele edilmiş ekmeğin örneklerinde öncelikle ani bir nem artışı, daha sonra düşüş meydana gelmiştir. RF uygulaması ile daha homojen bir sıcaklık elde edilmesi nedeniyle *P. citrinum* sporlarının inaktive olması için daha düşük ürün sıcaklık değeri ile daha kısa süreli uygulama imkânı doğmuştur. Ekmeğin minimum 58°C'ye kadar ısıtılması ile *P. Citrinum* sporlarının 4-faz inaktivasyonu gerçekleştirilebilmiştir. Ayrıca konvansiyonel metoda kıyasla sıcak hava-RF uygulamasına tabi tutulan ekmeğin örneklerinin oda sıcaklığında (23°C) depolama süresinde 28±2 gün uzama gözlenmiştir. Elektrotlar arasındaki mesafenin ayarlanması ve ürünün altta yer alan elektrot yerine iki elektrot arasında, ortada bir bölgeye yerleştirilmesi ile ürünün köşelerinde meydana gelebilecek ısınmanın önenebileceği belirtilmektedir.

Fırıncılık endüstrisinde RF ısıtma, küf gelişimini önlemenin yanı sıra, özellikle fırın ürünlerinde pişirme sonrası mevcut fazla nemin azaltılmasını sağladığı ve pişirme süresinde %30 azalma sağladığı için son pişirme şeklinde uygulanmaktadır [28, 48]. Pişirme süresindeki azalma üretim kapasitesinde artış sağlarken, fırın tarafından kullanılan spesifik enerji miktarında da azalma sağlamaktadır (Btu/lb). Ancak, elektrik enerjisi formunda da olsa, RF tünel tipi fırınlar tarafından da enerji tüketilmektedir. RF kurutma için spesifik enerji tüketimi kabaca üründeki 1 kg nem miktarı için 1 kWh olarak belirlenmiştir. Söz konusu veri ile fırınların enerji tüketimi hesaplanmış ve 250 BTU/lb ile 1750 BTU/lb arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Spesifik enerji tüketim değeri düşük olan fırınlar için RF kurutmanın üretim kapasitesinde verim sağlaması beklenirken, enerji tasarrufu açısından verim beklenmemiştir.

RF kurutma hesaplamalarında kurabiye ve kraker sektörü hedef sektör olarak belirlenmiştir. Amerika Üreticiler Yıllık Araştırma verilerine göre RF kurutucu kullanımı ile 2020 yılı itibarıyla söz konusu sektörde % 0.1 oranında büyüme beklenmektedir [17].

Konvansiyonel tip fırınlarda, ürün yüzeyinden merkez kısmına ısı aktarımı iletim ile gerçekleşmektedir. Bu durumda ilk etapta ürün yüzeyinin kuruması dolayısıyla merkez kısmının nemli kalması durumu söz konusu olabilmektedir. RF son pişirme işlemi bu sorunun ortadan kaldırılması amacıyla uygulanmaktadır [37]. Anese ve ark. [28] bisküvi ve keklerin nem değerlerinin sırasıyla %3.0 ve 3.5 olana dek sıcak hava ve RF ısıtma kombinasyonlu bir pişirme işlemi uygulamışlardır. Ürünlerin nem değeri %10 iken sıcak hava uygulamasının sonlandırılıp ürünlere RF ısıtma uygulanması ile en iyi sonuçların elde edildiği belirtilmektedir. Sonuçlar aynı zamanda RF ısıtmanın ürün iç kesitinde de etkin kahverengileşme etkisi göstermesi nedeniyle, kek gibi kalınlığı olan

ürünlerdense bisküvi gibi ince ürünler için daha uygun bir teknoloji olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Piyasena ve ark. [4], kurabiye ve kraker gibi ürünlerin kurutulması amacıyla uygulanan son pişirme işleminin ürüne homojen nem profili kazandırdığını, pişirme hattında prosesin hız kazandığını, üründe arzu edilen içyapı ve renk özelliklerinin oluşmasını sağladığını belirtmektedir. Lung ve ark. [17], Los Angeles bölgesinde yer alan Sunshine Bisküvi firmasının üretim hattına RF kurutma ünitesini dahil etmesiyle birlikte üretim miktarında %30 oranında artış; yıllık enerji tüketiminde 600 varil yağa eşdeğer bir azalma ve bakım-sabit giderlerde 715.000 \$ azalma kaydedildiğini belirtmektedir.

Fiore ve ark. [74], kakaolu kek örneklerinin pişirilmesinde uygulanan RF destekli pişirme işleminin (8 dakika), geleneksel metoda kıyasla (25 dakika), daha kısa sürede gerçekleştirilebildiğini belirtmektedir.

Tüm bunlardan farklı olarak Laniel ve ark. [49] RF uygulamasının "RF Tanımlama" teknolojisi şeklinde kullanılmak suretiyle soğuk zincirdeki gıda maddelerinin sıcaklıklarının takip edilebileceğini ileri sürmektedir. Bu amaçla sıcaklığı 25°C olan, deniz taşımacılığında kullanılan çelik bir kutuya RF Tanımlama antenleri yerleştirilmiş ve dondurulmuş ekmeklerin sıcaklık değerlerinin 915 MHz ile 433 MHz frekans değerlerinde okunup okunamayacakları incelenmiştir. Ürünlerin üzerinde bulunan RF Tanımlama etiketleri sıcaklıkların okunup kaydedilmesini sağlarken, antenler vasıtasıyla çelik kutu dışında bulunan okuyuculardan sıcaklık profili takip edilmiştir. 915 MHz frekansta okuma etkinliği % 47-79 düzeyinde sınırlı kalırken, 433 MHz frekans değerinde % 100 okuma gerçekleştirilebilmiştir. Dolayısı ile dondurulmuş ekmeklerin soğuk zincir ile taşınmaları sırasında sıcaklıklarının takip edilebilmesinde ve ürünlerde kalite kaybının oluşmasını önleyebilmek amacıyla RF teknolojisinden faydalanılabileceğini söylemek mümkündür.

RF sterilizasyon uygulaması ile makarna gibi çeşitli ürünlerin, konvansiyonel metotlara kıyasla daha yüksek kalitede üretilmelerinin mümkün olduğu belirtilmektedir [36].

### Akrilamid Oluşumu ve RF Uygulaması

Akrilamid ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-\text{NH}_2$ ; 2-propenamid) Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı tarafından 1994 yılında insanlar için potansiyel kanserojen madde olarak sınıflandırılmıştır [50]. 2002 Nisan ayında İsveçli bilim adamları akrilamidin insanlar için potansiyel bir kanserojen olduğunu, karbondhidratça zengin gıdaların yüksek sıcaklık ve düşük nem koşullarında pişirilmesi sırasında (ör. kızartma, fırında pişirme, kavurma vb.) oluştuğunu göstermişlerdir [48, 51-54].

Gıdalarda akrilamid, 120°C'nin üzerindeki sıcaklık düzeylerinde Maillard reaksiyonunun bir parçası olarak glukoz, früktoz, maltoz gibi indirgen şekerlerin karbonil grupları ile aminoasitlerin, özellikle asparagin, amino gruplarının reaksiyonu sonucu oluşmaktadır (Şekil 8) [50, 53]. Hububat ürünleri yüksek karbondhidrat içerikleri,

arzu edilen duyuşsal ve tekstürel özellikleri nedeniyle uygulanan pişirme sıcaklıklarının 120°C'nin üzerinde olması ve üründe düşük nem düzeylerine gelene dek ısı işleme devam edilmesi akrilamid oluşumunu kaçınılmaz kılmaktadır [50, 52]. Çeşitli çalışmalar konvansiyonel pişirme yöntemlerine ilave olarak RF ısıtma uygulamalarının prosese dahil edilmesiyle fırın ürünlerinde akrilamid oluşumunun azaltılabileceğini savunmaktadır. Anese ve ark. [28], nem değerleri sırasıyla %3.5 ve 3.0'e düşürülmesi gereken kek ve bisküvi örnekleri için nem değerleri yaklaşık % 10 düzeyindeyken konvansiyonel fırında pişirme işlemine son verilip RF ısıtma işlemi ile ürünlerin arzu edilen son nem değerlerine getirilmesinin akrilamid oluşumunda azalma yarattığını belirtmektedir. Palazoğlu ve ark. [48], kurabiye örneklerinde RF son kurutma işleminin akrilamid miktarı üzerine etkisini incelemiştir. Kontrol örnekleri 205°C'de 11 dakika pişirilirken, RF ile son kurutmaya (27.12 MHz) tabi tutulan örnekler 8. ve 9. dakikalardan sonra RF tünel tipi fırına alınmıştır. Geleneksel metotla pişirilen kurabiyelerde akrilamid düzeyi 107.3 ng/g, 9 dakika sonrasında RF son kurutmaya tabi tutulan kurabiyelerde 74.6 ng/g, 8. dakikadan sonra RF uygulamasına tabi tutulan kurabiyelerde ise 51.1 ng/g olarak belirlenmiştir. RF uygulama süresi arttıkça akrilamid düzeyinde düşüş meydana gelmiştir; ancak konvansiyonel metotla pişirilen örnekler arzu edilen gevrek yapıdayken, 8 dakika sonrasında RF kurutulan örneklerde hafif bir pişmemiş aroma algılandığı da belirtilmektedir.

Fırın ürünlerinde termal etkinin azaltılabilmesi ve akrilamid oluşumunun inhibe edilmesi dielektrik ısıtma ve konvansiyonel ısıtmanın kombinasyonu ile başarılabilmektedir. Bilindiği üzere, pişirme sırasında fırın ürünlerinin nem değerleri raf ömrünün geliştirilebilmesi amacıyla %3-5 düzeyine kadar düşmektedir. Diğer taraftan da, ürün nem kaybettikçe düşük ısı iletkenlik nedeniyle ısı transfer hızı azalmakta ve ürün merkezinin pişebilmesi için daha uzun süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuçta, ürün yüzeyinde kahverengileşme meydana gelebilmesi ve yüksek düzeyde akrilamid oluşumu yüksek sıcaklık uygulaması ile gerçekleştirilebilmektedir. Konvansiyonel tip fırında pişirme ile RF son kurutma işlemlerinin kombine edilmesiyle konvansiyonel metotla pişirilen fırın ürünlerine oranla %50 oranında daha düşük akrilamid konsantrasyonu gözlenmiştir. Dolayısıyla, RF son ısıtmanın konvansiyonel metotlarla birlikte, fırın ürünlerinde akrilamid miktarını azaltabilmek amacıyla, endüstriyel boyutta uygulama alanı bulması mümkündür [55].

### Süt Ürünlerinin İşlenmesinde RF Uygulamaları

Süt ve süt ürünleri, fazla ısınma nedeniyle temas halinde buldukları ısı değiştiriciye zarar verme eğilimi göstermektedirler. Sütün ısınmasında, sahip olduğu proteinler ve iyonlar rol oynarken, bileşiminde bulunan yağ ve şekerlerin kayda değer bir etkilerinin bulunmadığı tespit edilmiştir. O nedenle, farklı yağ oranlarına sahip süt örneklerinin aynı etkinlik düzeyinde dielektrik ısıtma ile ısıtılabilmelerinin mümkün olduğu söylenebilmektedir. Yüksek hacimde sütün ısıtılması söz konusu olduğunda,

mikrodalganın penetrasyon derinliği problem yaratabileceğinden RF ısıtma önem kazanmıştır [13]. Sürekli akış koşulları altında, hızlı ısıtma ve yüksek penetrasyon kabiliyetleri dolayısı ile RF ısıtmanın sıvı gıdaların ısıtılmasında alternatif bir metot olarak kullanımına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir [30].

Awuah ve ark. [13], laminar akış koşullarında sütteki *Listeria* ve *E-coli* hücrelerinin inaktivasyonu için en uygun koşulları belirleyebilmek amacıyla 2 kW, 27.12 MHz RF aplikatörü kullanmıştır. Toplamda 55.5 s gibi kısa bir süre içerisinde *Listeria* hücrelerinde 5 log, *E-coli* hücrelerinde ise 7 log azalma meydana geldiğini belirlemişlerdir (1200W güç değerinde ve aplikatör tüp çıkış sıcaklığı 65°C). Gerçekleştirilen bu çalışma RF ısıtmanın, uygulanan güç düzeyi ve akış koşulları göz önünde bulundurulmak suretiyle, sütün pastörize edilmesinde etkin bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

Uemura ve ark. [58], soya sütünü pastörize edebilmek amacıyla RF-flash ısıtma gerçekleştiren bir aparat geliştirmişlerdir. Elektrot yüzeyi 50 µm teflon ile kaplanmıştır ve 28 MHz RF uygulaması kullanılmıştır. Bu uygulama ile 115°C'de 0.4 s içinde *Bacillus subtilis* sporlarının 4 log oranında azaldığını belirlemişlerdir. Yüksek elektrik alan AC (HEF-AC) sürekli uygulamasında soya sütünde bulunan proteinlerin elektrot yüzeyini bozması problemiyle karşılaşmıştır. Ancak uygulamada olduğu gibi elektrot yüzeyinin teflon film ile kaplanması bu bozulmayı önlemiştir. Çalışma kapsamında RF ile pastörize edilmiş ve konvansiyonel metotla pastörize edilmiş soya sütü örnekleri ile tofu üretilmiş; RF uygulamasına maruz kalan soya sütü ile üretilen tofuda daha yüksek jel kuvveti oluştuğu gözlenmiştir.

Wang ve ark. [12], peynir altı suyu protein karışımı ve jeli ile bir peynir-makarna ürünü üzerinde gerçekleştirmiş oldukları dielektrik özelliklerle ilgili çalışmaları sonucunda RF ısıtmanın paketlenmiş ürünlerde uygulanabilirliğinin olduğunu belirtmişlerdir. Örnekler üzerindeki penetrasyon derinliklerinin RF frekans değerlerinde (27 ve 40 MHz) mikrodalgaya değerlerine (915 ve 2450 MHz) oranla 4 kat daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Bu durum, RF enerjinin mikrodalgaya kıyasla dielektrik materyale daha derin nüfuz ederek, ambalaj içerisinde daha homojen bir ısınma sağlayabileceğini açıklamaktadır. Wang ve ark. [22], aynı örnekler üzerinde RF (27 MHz) ve konvansiyonel metotlar ile sterilizasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Konvansiyonel sterilizasyon ile 90 dakika bir işlem sonrasında elde edilen letalite değeri, 30 dakika RF uygulaması ile elde edilebilmiştir ( $F_0 = 10$  dakika). 6 pound ağırlığında ordu-ölçekli polimerik tepsilerde ambalajlanmış ürünlerde RF prosesinin konvansiyonel metoda kıyasla daha az enerji kullanımı ile daha kısa sürede kalitede artış sağladığı belirtilmiştir.

## Meyve-Sebze Ürünlerinin İşlenmesinde RF Uygulamaları

RF uygulaması meyve sebzelerin ve nutların dezenfeksiyonunda kullanılabilecek alternatif bir yöntem olarak kabul edilmektedir [30].

Wang ve ark. [59] RF aplikatörü ile (12 kW, 27 MHz) cevizleri 55°C'ye kadar ısıtmak suretiyle en dirençli pestlerden biri olan *Amyelobis transitella*'nın % 100 ölümünün gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Hızlı ve hacimsel ısıtma sağlaması dolayısı ile RF ısıtma, konvansiyonel metotlarla (sıcak hava, sıcak su, vb.) kombine edildiği taktirde taze meyvelerin dezenfestasyonunda karşılaşılan problemlerin ortadan kaldırılabileceği düşünülmektedir. Ancak 1996 yılında Nelson tarafından gerçekleştirilen çalışma, taze meyvelerin dezenfestasyonunda RF uygulamasının homojen olmayan bir ısıtma göstermesi nedeniyle uygulanmasında problem yaratabileceğini göstermiştir [60, 61]. RF uygulamalarında homojen olmayan ısıtma nedeni olarak elektromanyetik alan dağılımının homojen olmayışı, ürün nem içeriğindeki çeşitlilik ve termal özellikler gösterilmektedir [27]. Ürünün nem düzeyi, RF uygulaması sırasında homojen ısınma sağlayan iyonların nemli ortamda çözünbilmesi ve polarizasyonun gerçekleşmesi açısından önem taşımaktadır [30]. RF uygulaması sırasında, taze meyvede meydana gelen geniş sıcaklık değişim aralığı, uygulamanın etkinliğini azaltmakta ve üründe önemli düzeyde termal zarara neden olabilmektedir [60]. Taze meyvelerin RF uygulamalı dezenfestasyonunda meydana gelebilen homojen olmayan ısınma problemini önleyebilmek adına Birla ve ark. [63], bir seri su jetleri sayesinde meyvelerin (elma ve portakal) sürekli olarak hareket halinde olmasını sağlayan, laboratuvar düzeyinde bir meyve taşıyıcı düzenek tasarlamıştır. Bu düzenek sayesinde RF uygulaması sırasında homojen bir ısınmanın gerçekleşebildiği gözlenmiştir. Gerçekleştirilen uygulamada tespit edilen homojen ısınma, meyvenin 3 boyutlu hareket kazanması ile RF enerjisini farklı kısımlarından, eşit oranlarda absorplama imkânı bulmasından ileri gelmektedir. Wang ve ark. [64], ihraç edilecek elma örneklerinde elma kurdu (*Cydia pomonella* L.) zararını önlemek adına konvansiyonel sıcak su uygulaması ile RF uygulamasını kombine etmiştir. Ön ısıtma amacıyla elma örnekleri 45°C'de 30 dakika bekletilmiştir. Hidrolik taşıyıcıda, çift paralel plaka elektrot arasında geçen elma örnekleri pilot düzeyde RF uygulamasına tabi tutulmuştur (12 kW, 27.12 MHz). RF uygulaması sonrası örnekler 48°C sıcaklığında sıcak su banyosunda 5, 10, 15 ve 20 dakika süresince bekletilip buzlu suda 30 dakika bekletilerek soğutulmuşlardır. 48°C'de 15 dakika bekletme ile gerçekleştirilen kombine uygulamanın elma örneklerinin kalite karakteristikleri ve elma kurdu mortalite değeri açısından optimum olduğu belirlenmiştir. Sosa-Morales ve ark. [65], hasat edilmiş mango örneklerinde, daha derin penetrasyon derecesi nedeniyle RF enerjisinin mikrodalgaya enerjisine kıyasla dezenfestasyon için daha uygun bir yöntem olduğunu belirtmektedir. Birla ve ark. [60], portakal örneklerini meyve sineğinden koruma amacıyla RF uygulaması gerçekleştirmiş ve ürünlerin uygulama sonrası kalite karakteristiklerini incelemiştir.



RF uygulaması ile proses süresinde sağlanan kısalma (sıcak su uygulamasına kıyasla), üründe daha fazla aroma bileşeninin tutulmasını sağlamıştır. Ürün sıcaklığını 19°C'den 48°C'ye yükseltecek olan tuzlu suda RF uygulaması ve sonrasında 48°C sıcaklıktaki sıcak suda 15 dak bekletme şeklinde uygulanan işlemin portakal örneklerini meyve sineğine karşı korumada kullanılabileceği belirtilmiştir. Birla ve ark. [62], çeşitli meyvelerin dezenfeksiyonu amacıyla RF uygulamasını gerçekleştirmiştir. Bu amaçla portakal, elma, greyfurt, şeftali ve avokado su dolu bir tank içerisinde sürekli döndürülecek şekilde RF ısıtma işlemine maruz bırakılmışlardır (12 kW, 27.12 MHz). Meyvelerin dielektrik özellikleri açık uçlu koaksiyal metod ile belirlenmiştir. Çalışmada Maxwell'in elektromanyetik yasası ile Fourier ısı transfer denklikleri çözülerek modelleme yapılmıştır. Böylelikle ürün için spesifik RF enerji değerlerinin belirlenmesine yönelik veriler elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuçta, elma ve şeftali gibi çekirdekten ısınan meyveler için RF destekli sıcak su uygulamasının etkin, hızlı ve homojen bir ısınma sağlayan işlem olacağı belirtilmektedir. Casals ve ark. [66], şeftali ve nektarin örneklerinde hasat sonrası oluşabilen kahverengi çürüme etmeni *Monilinia* spp. inaktivasyonu amacıyla RF uygulamasının (27.12 MHz, elektrot ve meyve arasında 17 mm mesafe, 18 dak) doğal olarak enfekte olmuş şeftali örneklerinde % 100 inhibisyon sağladığını belirtirken; nektarin örneklerinde kahverengi çürümenin meydana gelmediğini tespit etmişlerdir. Monzon ve ark. [67], RF uygulamasının tatlı vişne örneklerinde (*Prunus avium* L.) zarara neden olan kurt larvalarının (*Cydia pomonella* [L.]) inhibisyonu ve ürün kalite özelliklerine etkisini incelemiştir. Vişne örneklerinin RF ile 53 ve 54° C sıcaklık düzeyine kadar ısıtılmaları ile larvada %100 inhibisyon sağlanırken; ürünlerin hava taşımacılığı koşulları (5°C, 24 saat) yerine, deniz taşımacılığı koşulları (0°C, 2 hafta) altında depolandığı takdirde kalite açısından zarar gördükleri belirlenmiştir.

Meyve-sebze ürünlerinde zararlıların inhibisyonu amacıyla kullanılan RF uygulamasının meyve sularının pastörizasyonu ile oksidatif enzimlerin inaktive edilmesi amaçlarıyla kullanılabildiği de literatürde yer almaktadır. Gıdalarda doğal olarak bulunan lipoksigenaz, fenoloksidaz, pektin liaz ve askorbik asit oksidaz gibi enzimlerin aktiviteleri sonucu gıdalarda arzu edilmeyen renk, tekstür, aroma veya besin değeri kayıpları meydana gelebilmektedir. Konvansiyonel olarak enzimlerin inaktive edilmesi amacıyla haşlama yöntemi kullanılmaktadır; ancak bu yöntem de ürünlerin kalite karakteristiklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Manzocco ve ark. [68], elma ürünlerinde polifenoloksidaz ve lipoksigenaz enzimlerinin inaktive edilmeleri amacıyla RF uygulamasını gerçekleştirmiş ve RF etkisiyle meydana gelen termal etkiye bağlı olarak enzimlerin inaktive olduklarını tespit etmiştir.

15 kHz ve 41 kHz arasında değişen üç değerlerinde RF uygulamasının (maksimum 65°C sıcaklık değerine kadar ısınma sağlayacak şekilde) elma ve portakal suyu örneklerinde mikrobiyal inaktivasyon sağlarken; portakal suyunda askorbik asit miktarında kayıp meydana getirmedeği ve enzimatik kahverengileşmenin

görülmeyeceği belirtilmektedir [30]. Zhu ve ark. [16] ise elma, armut, portakal, üzüm ve ananas suyu örneklerinin RF pastörizasyon uygulaması açısından önem taşıyan dielektrik özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir (20-4500 MHz, 15-95°C). Kayıp faktörünün ( $\epsilon''$ ) 1000-3000 MHz aralığında minimum değerlere düştüğünü belirlemiş; frekans değerinin artmasıyla birlikte tüm meyve suyu örneklerinde penetrasyon derinliği değerinin azaldığını tespit etmiştir. Düşük frekans değerlerinde sıcaklık yükseldikçe yine penetrasyon derinliği değerinde düşüş gözlenmiştir. Bu çalışma ile meyve sularının dielektrik pastörizasyonu için önemli veriler ileri sürülmüştür.

### Gıda Sanayinde Diğer RF Uygulamaları

RF ısıtmanın nutlarda çeşitli mikroorganizmaların gelişimini önlemek adına pastörizasyon veya fumigasyon gibi amaçlarla kullanıldığı bilinmektedir. Bademlerin RF destekli fumigasyonu [25] ve kabuklu bademlerde RF pastörizasyon [69, 70] uygulamalarına yönelik çalışmalara rastlanırken; cevizlerin fumigasyonunda RF uygulamasının kullanımına yönelik [23, 71, 72] çalışmalar da bulunmaktadır. Çalışmalar RF uygulaması ile nutların kalite açısından (peroksit değeri, yağ asidi ve tane rengi) olumsuz etkilenmediklerini; ancak fumigasyonda karıştırma işleminin uygulanması ile homojen ısı dağılımının gerçekleşeceğini vurgulamaktadır. Zhu ve ark. [18], kestane ununun dielektrik özelliklerini belirlemek üzere gerçekleştirdikleri çalışmalarında nem ve sıcaklığın geçirgenlik değeri üzerinde büyük etkisi olduğunu; penetrasyon derinliğinin ise artan frekans, nem ve sıcaklık düzeyi ile azaldığını belirlemişlerdir. 100 MHz'in altındaki radyo frekans değerlerinde elde edilen yüksek penetrasyon derinliği değerinin kestane ununun büyük ölçekli dielektrik kurutma prosesine imkân sağlayacağını vurgulamışlardır. Jiao ve ark. [26], kuru börtülce ve maş fasulyesi unları ile baklagillerin genelinde zarar etmeni olan bir tür kurdun (*Callosobruchus maculatus*) 10-1800 MHz frekans aralığında ve 20-60°C sıcaklık değerlerinde dielektrik özelliklerini incelemiştir. Endüstriyel boyutta en çok kullanılan frekans değerlerinde, 27 MHz (RF) ve 915 MHz (MD), elde edilen dielektrik kayıp faktörü değerleri baklagil kurdunun baklagillere oranla daha hızlı ısınması gerektiğini göstermiştir. Penetrasyon derinliği değerlerinin RF ısıtmada daha fazla olması nedeniyle bu durumun RF uygulaması ile mümkün olabileceği, dolayısı ile endüstriyel boyutta baklagillerin böceklerle karşı korunmasında sürekli bir RF uygulamasından yararlanılabileceği vurgulanmıştır. Jiao ve ark. [27] gerçekleştirdikleri çalışmalarında sıcak hava ve RF (27.12MHz, 6kW) uygulamasını kapsayan sürekli bir sistem ile mercimek örneklerinde (*Lens culinaris*), kimyasal metotlara alternatif olacak şekilde, fumigasyon uygulanabileceğini ispatlamışlardır. Wang ve ark. [24] da benzer şekilde düşük nem içeriğine sahip ürünlerin kimyasal metotlar yerine RF ısıtma yöntemiyle fumigasyonlarının mümkün olduğunu belirtirken; mercimek ve buğday gibi küçük taneli ürünlerde, RF uygulaması sırasında homojen ısı dağılımını sağlamak adına uygulanan karıştırma işlemine gerek kalmadan prosesin uygulanabileceğini vurgulamaktadırlar.

Zhong ve ark. [73] CMC solüsyonuna daldırılmış (% 1, w/w) bütün havuç, havuç küpleri ve patates küplerinin sürekli akış RF ünitesi kullanmak suretiyle ısıtılmalarına yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Partiküllerdeki sıcaklık dağılımını gözlemek amacıyla infrared kamera kullanılan çalışma sonucunda ürünlerde görülen homojen sıcaklık dağılımı nedeniyle RF ısıtmanın sıvı ve partiküler yapıdaki gıdaların aseptik işlenmesinde gelecek vadede bir uygulama olduğu belirtilmiştir.

Kim ve ark. [11], 27.12 MHz RF ısıtma uygulayarak karabiber örneğinde 50 s sonrasında *Salmonella typhimurium* ve *Escherichia coli O157:H7* patojenlerinde 2.80-4.29 log CFU/g azalma belirlerken; kırmızıbiber örneğinde 40 s RF uygulaması sonrası 3.38-5 log CFU/g azalma (renk açısından kalitede olumsuz bir değişim gözlenmeksizin) tespit etmişlerdir. Dolayısı ile RF ısıtmanın, baharatlarda bulunan gıda kaynaklı

patojenlerin kontrol altına alınabilmesi amacıyla uygulanabilecek bir proses olduğunu belirtmektedirler.

Guo ve ark. [15], saf balın pastörizasyonunda uygulanabilecek RF ısıtma prosesinin geliştirilebilmesi amacıyla sarı keçiyoynuzu ve hünnap balı örneklerinin dielektrik özelliklerini incelemişlerdir (10-4500 MHz, 20-80°C). Sonuçlar, 40 MHz frekans değerinin üzerinde sıcaklık değerinin artmasıyla birlikte saf bal örneklerinin dielektrik sabitlerinin de arttığını göstermiştir.

Ahmed ve ark. [9] ise RF ısıtılmış yumurta beyazı dispersiyonlarının jel oluşturma kabiliyeti ile reolojik karakteristiklerini incelemiştir. Bazik ortamda jel oluşumu gözlenmezken, asidik ortamda RF ısıtılmış protein dispersiyonlarının kuvvetli jel oluşumu gösterdikleri belirlenmiştir.

Tablo 1. Gıda işlemede RF uygulamaları

Proses	Ürün	Frekans/ Güç	Süre	Referans	
Pastörizasyon	Soya sütü	28 MHz	115°C, 0.4 s	Uemura ve ark. [58]	
	Süt	27.12 MHz	65°C, 55.5 s	Awuah ve ark. [13]	
	Domuz eti (beyaz puding)	450 W	73°C, 7 min 40 s	Brunton ve ark. [42]	
	Emülsifiye et (beyaz puding)	450 W	73°C, 7.7 min	Lyng ve ark. [14]	
	Kabuklu badem	27 MHz-6 kW	75°C, 2-4 min	Gao ve ark. [69, 70]	
Sterilizasyon	Domuz eti	27.12 MHz-600 W	10 min	Orsat ve ark. [79]	
	Emülsifiye et	0.6 kW	80°C, 30 min (500 W)	Zhang ve ark. [45]	
	Makarna ve peynir	27 MHz	121°C, 30 min	Wang ve ark. [22]	
	Baharat	27.12 MHz	40, 50 s	Kim ve ark. [11]	
	Alaska pembe somon	27-1800 MHz	20-120°C	Wang ve ark. [39]	
Isıtma/Pişirme	Etili lazanya	27 MHz-6 kW	35 min	Wang ve ark. [46]	
	Patates püresi	27.12 MHz	121.1°C, 0.61 min	Luechapattanaporn ve ark. [77]	
	Tavuk göğüs eti	27.12 MHz	74°C, 23.8 min	Kirmaci ve Singh [29]	
	Siğir kıyması	27.12 MHz	72°C, 4.25 min	Guo ve ark. [44]	
	Siğir eti (kıyma, parça, bütün)	27.12 MHz	5.83 min, 13.5 min, 13.25 min	Laycock ve ark. [43]	
Kurutma	Yumurta akı dispersiyonu	27.12 MHz	60-180 s	Ahmed ve ark. [9]	
	Partikül gıdalar				
	• havuç (küp şeklinde)	40.68 MHz-30 kW	88-112 s	Zhong ve ark. [73]	
	• patates (küp şeklinde)	40.68 MHz-30 kW	89-159 s	Zhong ve ark. [73]	
	Kestane unu	10-4500 MHz	20-60°C	Zhu ve ark. [18]	
Dondurma	Kek ve bisküvi	27.12 MHz-3.5 kW	-	Anese ve ark. [28]	
	Kurabiye	27.12 MHz	45 s	Palazoğlu ve ark. [48], Kocadağlı ve ark. [56]	
	Domuz eti	27.12 MHz-3.5 kW	150 s	Anese ve ark. [21, 61]	
	Çözündürme	Siğir eti	27.12 MHz-0.6 kW	300-400 s	Farag ve ark. [20]
		Siğir eti	27.12 MHz-0.6 kW	11 min	Farag ve ark. [19]
Siğir eti		27.12 MHz-0.6 kW	11 min (500 W)	Farag ve ark. [78]	
Elma, portakal		12 kW	7.5 min	Birla ve ark. [63]	
Mercimek		27.12 MHz-6 kW	10 min	Jiao ve ark. [27]	
Dezenfeksiyon	Şeftali, nektarin	27.12 MHz	18 min	Casals ve ark. [66]	
	Ceviz	27 MHz-6 kW/12 kW	55°C, 5 min	Wang ve ark. [23]	
	Vişne	27 MHz-12 kW	52°C, 2 min	Monzon ve ark. [67]	
	Badem	27 MHz-0.75 kW	6.4 min-8.8 min	Gao ve ark. [25]	
	Portakal	12 kW	48°C, 15 min	Birla ve ark. [60]	
	Ceviz	27 MHz-25 kW	5 min	Wang ve ark. [72]	
	Elma	27.12 MHz-12 kW	48°C, 15 min	Wang ve ark. [64]	

## GENEL DEĞERLENDİRME

Gıda işlemede RF ısıtma uygulamalarının aşağıdaki amaçlarla kullanım alanı bulunduğu gözlemlenmiştir:

- Kurutma
- Pastörizasyon/ Sterilizasyon
- Pişirme
- Dezenfeksiyon
- Dondurma
- Çözündürme (Su ve buzun dielektrik özelliklerinin tamamen farklı olması nedeniyle, buzun suya

dönüştüğü noktalarda sıcaklık hızla yükselecektir. O nedenle RF uygulamalarında ürün sıcaklığı 0°C'nin biraz altına kadar düşürülmeli, daha sonra ürünün kendiliğinden çözünmeye bırakılması tercih edilmelidir).

RF ısıtma, et ürünlerinin işlenmesinde daha çok ısıtma/pişirme [29, 43, 44, 75], dondurma [21, 61] ve çözündürme [19, 20] proseslerinde uygulama alanı bulurken; hububat ürünlerinde pişirme ve daha çok bisküvi- kurabiye gibi ince ürünlerde pişirme sonrası uygulanan son kurutma prosesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hububat ürünlerinde pişirme ve son

kurutma amaçlı uygulanan RF ısıtma ile akrilamid düzeyinde düşüş olduğunu belirten çalışmalar bulunmaktadır [28, 48, 54, 55]. Süt ürünlerinde pastörizasyon prosesinde kullanılan [13, 58] RF ısıtma, meyve-sebze ürünlerinde taze ürünlerin hasat sonrası zararlılara karşı korunması amacıyla gerçekleştirilen fumigasyon/ dezenfeksiyon [23, 60, 63, 64, 66, 67] uygulamaları, oksidatif enzimlerin inaktivasyonu [68] ile meyve sularının pastörizasyonu [16, 30] gibi uygulamalarla literatürde yer almaktadır. Bunların dışında yüksek penetrasyon derinliği özelliği ile etkin bir şekilde ambalajlanmış ürünlerde de pastörizasyon/sterilizasyon amaçlı kullanımının mümkün olduğu belirtilmektedir [22, 36, 46, 76, 77, 79]. Tüm bu alanlarda kullanımının mümkün olduğu ve çeşitli avantajlar kazandırdığının bilinmesine rağmen, RF ısıtmanın endüstriyel boyutta uygulamalarına çok sık rastlanmaması şu şekilde açıklanmaktadır: i) tüm ürün gruplarında RF ısıtma sonrası ürün kalitesi ile ilgili derinlemesine bilgi bulunmaması; ii) büyük ölçekli sistemlerin dizayn edilip kurulmasındansa daha çok küçük çaplı uygulamalara rastlanması; iii) kurulum maliyetlerinin yüksek olması; vi) tüm gıda maddelerinin dielektrik özelliklerine dair verilerin literatürde yer almayışı. Enerji tüketimi açısından kazanç sağladığı bilinen ve hızlı penetrasyon kabiliyeti ile ısıtma süresinde kayda değer oranda azalma ve böylelikle belirli bir sürede üretilen ürün miktarında artış sağlayan bir metot olarak RF ısıtmanın endüstriyel boyutta uygulanabilirliği için modelleme ve gıdaların dielektrik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi önerilmektedir [8, 30].

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Uslu, M.K., Certel, M., 2006. Dielektrik ısıtma ve gıda işlemede kullanımı. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi* (3): 61-69.
- [2] Güden, M., Ulutin, C., Pak, Y., 2001. Noniyonizan elektromanyetik alanların biyolojik etkileri. *Tıp Bilimleri Dergisi* 21(5): 441-444.
- [3] Yaren, H., Karayılanoğlu, T., 2005. Radyasyon ve insan sağlığı üzerine etkileri. *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni* 4(4): 199-208.
- [4] Piyasena, P., Dussault, C., Koutchma, T., Ramaswamy H.S., Awuah, G.B., 2003. Radio frequency heating of foods: principles, Applications and related properties- A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 43(6): 587-606.
- [5] Marra, F., Lyng, J., Romano, V., McKenna, B., 2007. Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model. *Journal of Food Engineering* 79: 998-1006.
- [6] İçier, F., Gıda Mühendisliğinde Elektriksel Yöntemlerin Yeri, <http://www.filizicier.com/elektriksel.aspx>, (Erişim tarihi: 05.2012).
- [7] Wang, Y., Li, Y., Wang, S., Zhang, L., Gao, M., Tang, J., 2011. Review of dielectric drying of foods and agricultural products. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 4(1): 1-19.
- [8] Pereira, R.N., Vicente, A.A., 2010. Environmental impact of novel thermal and non-thermal Technologies in food processing. *Food Processing International* 43: 1936-1943.
- [9] Ahmed, J., Ramaswamy, H.S., Alli, I., 2007. Protein denaturation, rheology, and gelation characteristics of radio-frequency heated egg white dispersions. *International Journal of Food Properties* 10: 145-161.
- [10] McKenna, B.M., Lyng, J., Brunton, N., Shirsat, N., 2006. Advances in radio frequency and ohmic heating of meats. *Journal of Food Engineering* 77: 215-229.
- [11] Kim, S-Y., Sagong, H-G., Choi, S.H., Ryu, S., Kang, D-H., 2012. Radio-frequency heating to inactivate *Salmonella typhimurium* and *Escherichia coli* O157:H7 on black and red pepper spice. *International Journal of Food Microbiology* 153: 171-175.
- [12] Wang, Y., Wig, T.D., Tang, J., Hallberg, L.M., 2003. Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization. *Journal of Food Engineering* 57: 257-268.
- [13] Awuah, G.B., Ramaswamy H.S., Economides, A., Mallikarjunan, K., 2005. Inactivation of *Escherichia coli* K-12 and *Listeria innocua* in milk using radio frequency (RF) heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 6: 396-402.
- [14] Lyng, J.G., Cronin D.A., Brunton, N.P., Li, W., Gu, X., 2007. An examination of factors affecting radio frequency heating of an encased meat emulsion. *Meat Science* 75: 470-479.
- [15] Guo, W., Liu, Y., Zhu, X., Wang, S., 2011. Temperature-dependent dielectric properties of honey associated with dielectric heating. *Journal of Food Engineering* 102: 209-216.
- [16] Zhu, X., Guo, W., Wu, X., 2012. Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating. *Journal of Food Engineering* 109: 258-266.
- [17] Lung, R.B., Masanet, E., McKane, A., 2006. The role of emerging Technologies in improving energy efficiency: examples from the food processing industry. *Proceedings of the Twenty-Eighth Industrial Energy Technology Conference*, May 9-12, 2006, New Orleans, LA.
- [18] Zhu, X., Guo, W., Wu, X., Wang, S., 2012. Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio-frequency and microwave energy. *Journal of Food Engineering* 113: 143-150.
- [19] Farag, K.W., Lyng, J.G., Morgan, D.J., Cronin, D.A., 2008. A comparison of conventional and radio frequency tempering of beef meats: effects on product temperature distribution. *Meat Science* 80: 488-495.
- [20] Farag, K.W., Marra, F., Lyng, J.G., Morgan, D.J., Cronin, D.A., 2010. Temperature changes and power consumption during radio frequency tempering of beef lean/ fat formulations. *Food and Bioprocess Technology* 3: 732-740.
- [21] Anese, M., Manzocco, L., Panozzo, A., Beraldo, P., Foschia, M., Nicoli, M.C., 2012. Effect of radiofrequency assisted freezing on meat microstructure and quality. *Food Research International* 46: 50-54.

- [22] Wang, Y., Wig, T.D., Tang, J., Hallberg, L.M., 2003. Sterilization of foodstuffs using radio frequency heating. *JFS: Food Engineering and Physical Properties* 68(2): 539-544.
- [23] Wang, S., Tang, J., Sun, T., Mitcham, E.J., Koral, T., Birla, S.L., 2006. Considerations in design of commercial radio frequency treatments for postharvest pest control in in-shell walnuts. *Journal of Food Engineering* 77: 304-312.
- [24] Wang, S., Yue, J., Chen, B., Tang, J., 2008. Treatment design of radio frequency heating based on insect control and product quality. *Postharvest Biology and Technology* 49: 417-423.
- [25] Gao, M., Tang, J., Wang, Y., Powers, J., Wang, S., 2010. Almond quality as influenced by radio frequency heat treatments for disinfestation. *Postharvest Biology and Technology* 58: 225-231.
- [26] Jiao, S., Johnson, J.A., Tang, J., Tiwari, G., Wang, S., 2011. Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments. *Biosystems Engineering* 108: 280-291.
- [27] Jiao, S., Johnson J.A., Tang, J., Wang, S., 2012. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in lentils. *Journal of Stored Products Research* 48: 143-148.
- [28] Anese, M., Sovrano, S., Bortolomeazzi, R., 2008. Effect of radiofrequency heating on acrylamide formation in bakery products. *European Food Research and Technology* 226: 1197-1203.
- [29] Kirmaci, B., Singh, R.K., 2012. Quality of chicken breast meat cooked in a pilot-scale radio frequency oven. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 14: 77-84.
- [30] Marra, F., Zhang, L., Lyng, J.G., 2009. Radio-frequency treatment of foods: review of recent advances. *Journal of Food Engineering* 91: 497-508.
- [31] Zhao, Y., Flugstad, B., Kolbe, E., Park, J.W., Wells, J.H., 2000. Using capacitive (Radio Frequency) dielectric heating in food processing and preservation- a review. *Journal of Food Process Engineering* 23: 25-55.
- [32] İçier, F., Yıldız, H., 2005. Elektriksel yöntemlerin gıdaların kalite özellikleri üzerine etkileri. *Gıda Dergisi* 30(4): 255-260.
- [33] Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Mitcham, E., Hansen, J.D., Hallman, G., Drake, S.R., Wang, Y., 2003. Dielectric properties of fruits and insect pests as related to radio frequency and microwave treatments. *Biosystems Engineering* 85(2): 201-212.
- [34] İçier, F., Baysal, T., 2004. Dielectrical properties of food materials- 1: factors affecting and industrial uses. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 44: 465-471.
- [35] Sosa-Morales, M.E., Valerio-Junco, L., López-Malo, A., García, H.S., 2010. Dielectric properties of foods: reported data in the 21st century and their potential applications. *LTW- Food Science and Technology* 43: 1169-1179.
- [36] Ramaswamy, H., Tang, J., 2008. Microwave and radio frequency heating. *Food Science and Technology International* 14(5): 423-427.
- [37] Koral, T., 2004. Radio frequency heating and post-baking, *Biscuit World* 4(7) November, <http://www.strayfield.co.uk/biscuit.htm>, (Erişim tarihi: 06.2011).
- [38] Liu, Y., Tang, J., Mao, Z., 2009. Analysis of bread loss factor using modified Debye equations. *Journal of Food Engineering* 93: 453-459.
- [39] Wang, Y., Tang, J., Rasco, B., Kong, F., Wang, S., 2008. Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition. *Journal of Food Engineering* 87: 236-246.
- [40] Tang, X., Cronin, D.A., Brunton, N.P., 2005. The effect of radio frequency heating on chemical, physical and sensory aspects of quality in turkey breast rolls. *Food Chemistry* 93(1): 1-7.
- [41] Tang, X., Lyng, J.G., Cronin, D.A., Durand, C., 2006. Radio frequency heating of beef rolls from *biceps femoris* muscle. *Meat Science* 72: 467-474.
- [42] Brunton, N.P., Lyng, J.G., Li, W., Cronin, D.A., Morgan, D., McKenna, B., 2005. Effect of radio frequency (RF) heating on texture, colour and sensory properties of a comminuted pork meat product. *Food Research International* 38: 337-344.
- [43] Laycock, L., Piyasena, P., Mittal, G.S., 2003. Radio frequency cooking of ground comminuted and muscle meat products. *Meat Science* 65: 959-965.
- [44] Guo, Q., Piyasena, P., Mittal, G.S., Si, W., Gong, J., 2006. Efficacy of radio frequency cooking in the reduction of *Escherichia coli* and shelf stability of ground beef. *Food Microbiology* 23: 112-118.
- [45] Zhang, L., Lyng, J.G., Brunton, N.P., 2004. Effect of radio frequency cooking on the texture, colour and sensory properties of a large diameter comminuted meat product. *Meat Science* 68: 257-268.
- [46] Wang, J., Luechapattaporn, K., Wang, Y., Tang, J., 2012. Radio-frequency heating of heterogenous food- meat lasagna. *Journal of Food Engineering* 108: 183-193.
- [47] Liu, Y., Tang, J., Mao, Z., Mah, J-H., Jiao, S., Wang, S., 2011. Quality and mold control of enriched white bread by combined radio frequency and hot air treatment. *Journal of Food Engineering* 104: 492-498.
- [48] Palazoğlu, T.K., Coşkun, Y., Kocadağlı, T., Gökmen, V., 2012. Effect of radio frequency postdrying of partially baked cookies on acrylamide content, texture, and color of the final product. *Journal of Food Science* 77(5): 113-117.
- [49] Laniel, M., Emond, J-P., Altunbas, A.E., 2011. Effects of antenna position on readability of RFID tags in a refrigerated sea container of frozen bread at 433 and 915 MHz. *Transportation Research Part C* 19: 1071-1077.
- [50] Keramat, J., LeBail, A., Prost, C., Jafari, M., 2011. Acrylamide in baking products: a review article. *Food and Bioprocess Technology* 4: 530-543.
- [51] Gökmen, V., Şenyuva, H.Z., 2007. Acrylamide formation is prevented by divalent cations during the Maillard reaction. *Food Chemistry* 103: 196-203.
- [52] Açar, Ö.Ç., Gökmen, V., 2009. Investigation of acrylamide formation on bakery products using a crust-like model. *Molecular Nutrition & Food Research* 53: 1521-1525.

- [53] Borda, D., Alexe, P., 2011. Acrylamide levels in food. *Romanian Journal of Food Science* 1(1): 3-15.
- [54] Anese, M., Quarta, B., Foschia, M., Bortolomeazzi, R., 2009. Effect of low-temperature long-time pre-treatment of wheat on acrylamide concentration in short dough biscuits. *Molecular Nutrition & Food Research* 53: 1526-1531.
- [55] Anese, M., Suman, M., Nicoli, M.C., 2009. Technological strategies to reduce acrylamide levels in heated foods. *Food Engineering Reviews* 1: 169-179.
- [56] Kocadağlı, T., Palazoğlu, T.K., Gökmen, V., 2012. Mitigation of acrylamide formation in cookies by using Maillard reaction products as recipe modifier in a combined partial conventional baking and radio frequency post-baking process. *European Food Research and Technology* 235(4): 711-717.
- [57] Alfaifi, B., Wang, S., Tang, J., Rasco, B., Sablani, S., Jiao, Y., 2013. Radio frequency disinfections treatments for dried fruit: dielectric properties. *LWT-Food Science and Technology* 50: 745-754.
- [58] Uemura, K., Takahashi, C., Kobayashi, I., 2010. Inactivation of *Bacillus subtilis* spores in soybean milk by radio-frequency flash heating. *Journal of Food Engineering* 100: 622-626.
- [59] Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Mitcham, E., Hansen, J.D., Cavalieri, R.P., Bower, J., Biasi, B., 2002. Process protocols based on radio frequency energy to control field and storage pests in in-shell walnuts. *Postharvest Biology and Technology* 26: 265-273.
- [60] Birla, S.L., Wang, S., Tang, J., Fellman, J.K., Mattinson, D.S., Lurie, S., 2005. Quality of oranges as influenced by potential radio frequency heat treatments against Mediterranean fruit flies. *Postharvest Biology and Technology* 38: 66-79.
- [61] Anese, M., Manzocco, L., Panozzo, A., Beraldo, P., Foschio, M., Nicoli, M.C., 2012. Effect of radiofrequency assisted freezing on meat microstructure and quality. *Food Research International* 46: 50-54.
- [62] Birla, S.L., Wang, S., Tang, J., Tiwari, G., 2008. Characterization of radio frequency heating of fresh fruits influenced by dielectric properties. *Journal of Food Engineering* 89: 390-398.
- [63] Birla, S.L., Wang, S., Tang, J., Hallman, G., 2004. Improving heating uniformity of fresh fruit in radio frequency treatments for pest control. *Postharvest Biology and Technology* 33: 205-217.
- [64] Wang, S., Birla, S.L., Tang, J., Hansen, J.D., 2006. Postharvest treatment to control codling moth in fresh apples using water assisted radio frequency heating. *Postharvest Biology and Technology* 40: 89-96.
- [65] Sosa-Morales, M.E., Tiwari, G., Wang, S., Tang, J., Garcia, H.S., Lopez-Malo, A., 2009. Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfecting mangoes, part I: relation between dielectric properties and ripening. *Biosystems Engineering* 103: 297-303.
- [66] Casals, C., Viñas, I., Landl, A., Picouet, P., Torres, R., Usall, J., 2010. Application of radio frequency heating to control brown rot on peaches and nectarines. *Postharvest Biology and Technology* 58: 218-224.
- [67] Monzon, M.E., Biasi, B., Simpson, T.L., Johnson, J., Feng, X., Slaughter, D.C., Mitcham, E.J., 2006. Effect of radio frequency heating as a potential quarantine treatment on the quality of 'Bing' sweet cherry fruit and mortality of codling moth larvae. *Postharvest Biology and Technology* 40: 197-203.
- [68] Manzocco, L., Anese, M., Nicoli, M.C., 2008. Radiofrequency inactivation of oxidative food enzymes in model systems and apple derivatives. *Food Research International* 41: 1044-1049.
- [69] Gao, M., Tang, J., Villa-Rojas, R., Wang, Y., Wang, S., 2011. Pasteurization process development for controlling *Salmonella* in in-shell almonds using radio frequency energy. *Journal of Food Engineering* 104: 299-306.
- [70] Gao, M., Tang, J., Johnson, J.A., Wang, S., 2012. Dielectric properties of ground almond shells in the development of radio frequency and microwave pasteurization. *Journal of Food Engineering* 112: 282-287.
- [71] Wang, S., Yue, J., Tang, J., Chen, B., 2005. Mathematical modeling of heating uniformity for in-shell walnuts subjected to radio frequency treatments with intermittent stirrings. *Postharvest Biology and Technology* 35: 97-107.
- [72] Wang, S., Monzon, M., Johnson, J.A., Mitcham, E.J., Tang, J., 2007. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts I: heating uniformity and energy efficiency. *Postharvest Biology and Technology* 45: 240-246.
- [73] Zhong, Q., Sandeep, K.P., Swartzel, K.R., 2004. Continuous flow radio frequency heating of particulate foods. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 5: 475-483.
- [74] Fiore, A., Di Monaco, R., Cavella, S., Visconti, A., Karneili, O., Bernhardt, S., Fogliano, V., 2013. Chemical profile and sensory properties of foods cooked by a new radiofrequency oven. *Food Chemistry* (basım aşamasında).
- [75] Schlisselberg, D.B., Kler, E., Kalily, E., Kisluk, G., Karniel, O., Yaron, S., 2013. Inactivation of foodborne pathogens in ground beef by cooking with highly controlled radio frequency energy. *International Journal of Food Microbiology* 160: 219-226.
- [76] 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): 30-37.
- [77] Luechapattaporn, K., Wang, Y., Wang, J., Al-Holy, M., Kang, D.H., Tang, J., Hallberg, L.M., 2004. Microbial safety in radio-frequency processing of packaged foods. *Journal of Food Science* 69(7): 201-206.
- [78] Farag, K.W., Duggan, E., Morgan, D.J., Cronin, D.A., Lyng, J.G., 2009. A comparison of conventional and radio frequency defrosting of lean beef meats: effects of water binding characteristics. *Meat Science* 83: 278-284.
- [79] Orsat, V., Bai, L., Raghavan, G.S.V., 2004. Radio-frequency heating of ham to enhance shelf-life in

vacuum packaging. *Journal of Food Process Engineering* 27: 267-283.

[80] Liu, Y., Wang, S., Mao, Z., Tang, J., Tiwari, G., 2013. Heating patterns of white bread loaf in

combined radio frequency and hot air treatment. *Journal of Food Engineering* 116: 472-477.

---