



ET TEKNOLOJİSİNDE VURGULU ELEKTRİK ALAN TEKNİĞİNİN KULLANILMASI

Emine Aşık-Canbaz^{1*}, Selçuk Çömlekçi², Atıf Can Seydim³

¹ Gıda İşleme Bölümü, Şarkikaraağaç Meslek Yüksekokulu, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta-Türkiye

² Elektronik ve Haberleşme Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta-Türkiye

³ Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta-Türkiye

Geliş / Received: 24.10.2019; Kabul / Accepted: 23.04.2020; Online baskı / Published online: 09.05.2020

Aşık-Canbaz, E., Çömlekçi, S., Seydim, A.C. (2020). Et teknolojisinde vurgulu elektrik alan tekniğinin kullanılması. *GIDA* (2020) 45(3) 485-495 doi: 10.15237/gida.GD19143

Aşık-Canbaz, E., Çömlekçi, S., Seydim, A.C. (2020). Application of pulsed electric field in meat technology. *GIDA* (2020) 45(3) 485-495 doi: 10.15237/gida.GD19143

ÖZ

Vurgulu elektrik alan (PEF; pulsed electric field) yöntemi, günümüzde algısı ve beklentisi değişen bireylerin sadece güvenilir değil aynı zamanda duyuşal ve besleyici yönden cazibesi yüksek doğal gıdalara olan talebini karşılamak üzere geliştirilmiş ısı olmayan yeni bir muhafaza yöntemidir. İlk çağlardan beri farklı tekniklerle muhafaza edilen taze et ve et ürünlerinin çekiciliğini artırmak ve doğala yakın özelliklerini korumak için bilinen yöntemlere alternatif olarak değerlendirilen PEF uygulaması, etin sertliği, su tutma kapasitesi, renk ve mikrobiyel yük gibi kalite kriterlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu derlemede et teknolojisinde prosesi iyileştirme, verimi artırma ve son ürün kalitesini iyileştirme potansiyeli olan PEF uygulamaları ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Vurgulu elektrik alan, ısı olmayan muhafaza, et teknolojisi

APPLICATION OF PULSED ELECTRIC FIELD IN MEAT TECHNOLOGY

ABSTRACT

Pulsed electric field (PEF) is a novel non-thermal technique that meets the increasing demand of consumers for both safe and nutritional foods. Meat and meat products have been preserved by traditional methods for a very long time, however in order to maintain the nature of these products, PEF is offered as an alternative method. PEF has already been suggested as effective as traditional methods on hardness, water binding capacity, color and microbial quality of meat and meat products. Thus, this review summarized the current applications of PEF in meat technology.

Keywords: Pulsed electric field, non-thermal preservation, meat technology

*Yazışmalardan sorumlu yazar/ Corresponding author

✉ eminecanbaz@gmail.com,

☎ (+90) 246 211 3269

☎ (+90) 246 237 1610

Emine Aşık-Canbaz; ORCID no: 0000-0003-1326-9159

Selçuk Çömlekçi; ORCID no: 0000-0003-1389-6435

Atıf Can Seydim; ORCID no: 0000-0003-3808-509x

GİRİŞ

Vurgulu elektrik alan (PEF; pulsed electric field) uygulaması, algısı ve beklentisi değişen bireylerin sadece güvenilir değil aynı zamanda duyuşal ve besleyici yönden cazibesi yüksek gıdalara olan talebini karşılamak üzere geliştirilmiş ısı olmayan yeni bir muhafaza yöntemidir (Dunn, 2001). Elektriksel yöntemler arasında gösterilen PEF (Barba vd., 2015), ohmik ısıtma (Gavahian vd., 2019) ve mikrodalga (Musto vd., 2014) gibi diğer elektriksel yöntemlerden sıcaklık artışını kontrol altında tutması ile ayrılmaktadır. Bu özelliği, gıdanın besleyici ve duyuşal özelliklerini koruyarak raf ömrünü uzatmak için kullanılmasına olanak tanımaktadır (Kumar vd., 2015).

Güvenli gıda üretimi, kalite kayıplarının azaltılması, dünya üzerinde eşit ve kolay gıda dağılımının sağlanması konusunda gelecek vadeden PEF uygulaması, yüksek voltajlı elektrik akımının iki elektrot arasında bulunan ortamdan çok küçük zaman (μ s veya ms) dilimlerinde periyodik olarak geçirilmesiyle uygulanmaktadır (Dunn, 2001; Mead, 2004). Çoğunlukla yüksek elektriksel iletkenliğe sahip akışkan gıdalar için uygun olduğu düşünülen PEF yöntemi şimdiki kadar birçok çalışmada örneğin; meyve suyu (Hitit, 2011; Evrendilek vd., 2016; Carbonell-Capella, 2017), bira (Milani vd., 2015), şarap (Saldana vd., 2017, Wyk vd., 2018), sıvı yumurta (Baba vd. 2018) gibi gıdalarda raf ömrünü uzatmak için tek başına veya diğer yöntemlerle kombine halde değerlendirilmiştir. Ancak, heterojen iletkenliğin rastlandığı bitkisel veya hayvansal kaynaklı katı gıdalarda PEF uygulanması ile ilgili çalışmalar ise sınırlı kalmıştır (Gudmundsson ve Hafsteinsson 2001; Wiktor vd., 2015; González-Casado vd., 2018).

Hayvansal kaynaklı gıdalar ilk çağlardan beri insanoğlunun beslenmesinde yerini almış ve kolay bozulan doğalarından dolayı farklı tekniklerle muhafaza edilmeye çalışılmıştır. Zamanla, bireylerde gelişen duyuşal seçicilik ve artan pazar rekabeti, geleneksel yöntemlerin yerine et ürünlerinin çekiciliğini artıracak ve doğala yakın özelliklerini koruyacak bir yöntem olan PEF'in önerildiği çalışmaları artırmıştır (Astrain-Redin vd., 2019; Park vd., 2019; Bhat vd.,

2020). Bu derlemede de PEF yönteminin et ve et ürünlerinde kullanım olanaklarından bahsedilmiştir.

PEF YÖNTEMİNİN GIDA ENDÜSTRİSİNDE KULLANIM ALANLARI

İlk olarak 18. yüzyılda İngiltere'de bitkilerin gelişimini desteklemek amacıyla kullanılan elektrik akımı 19. yüzyılın sonunda gıdalara uygulanmaya başlanmıştır. Vurgulu elektrik alan (PEF) uygulamasını ise ilk olarak ortaya koyan, uygulayan ve hücre zarı üzerine etkisi ile ilgili çalışmalar yapan Alman mühendis Heinz Doevenspeck'tir. Doevenspeck, PEF teknolojisinin mevcut teknolojilere nazaran üstünlüklerini, elektrolizi baskılayıp sıcaklık artışını engelleyerek ham maddelerin doğal özelliklerini koruması ve düşük enerji tüketimi ile yüksek kârlılık sağlaması olarak sıralamıştır (Sitzmann vd., 2016).

PEF tekniğinin mikroorganizmalar üzerinde öldürücü etkisi olduğuna dair 1960'lı yıllarda gerçekleştirilmiş çalışmalarla "elektroporasyon" kavramı üzerinden yöntemin etkinliğini belirleyen teknolojik ve biyolojik faktörler de ortaya çıkarılmıştır (Sale ve Hamilton, 1967). Elektrik alan ile tetiklenen gerilim sonucu hücre zarında gözeneklerin oluşması şeklinde tanımlanan elektroporasyonun (Wouters vd., 2001) geri dönüşümlü özelliği Zimmerman vd. (1974) tarafından araştırılırken, mikrobiyel inaktivasyonu sağlayan ve gıdaların bozulmasını engelleyen kalıcı elektroporasyon ise farklı çalışma grupları tarafından araştırılmaya devam edilmiştir (Hülshager ve Niemann, 1980; Dunn vd., 1987; Sitzmann ve Münch, 1987; Gupta ve Murray, 1988; Zhang vd., 1995). PEF tekniğinin gıdaların besin değeri, enzim ve aroma gibi bileşenleri üzerine etkisi ise ilk olarak Grahl ve Märkl (1996) tarafından aktarılmıştır.

PEF yöntemi ile iki elektrot arasında bulunan ortama çok küçük zaman (μ s veya ms) dilimlerinde yüksek voltajlı elektrik akımının periyodik olarak uygulanması sonucunda transmembran potansiyelin kritik değeri (1V) aşılarak hücre zarında geri dönüşümlü veya

kalıcı elektroporasyon gerçekleşmektedir (Sale ve Hamilton, 1967). Geri dönüşümlü elektroporasyon uygulamadan sonra hücrenin yaşamaya devam etmesi iken, kalıcı elektroporasyonda mikroorganizmaların inaktivasyonu ve dolayısıyla gıdaların muhafazası sağlanmaktadır (Dunn, 2001). Geri dönüşümlü elektroporasyon için 0.5-1.5 kV/cm, bitki veya hayvan hücrelerinde kalıcı elektroporasyon için 1.0-3.0 kV/cm ve mikrobiyel inaktivasyon için 15-40 kV/cm düzeyinde elektrik alan uygulandığı belirtilmiştir (Raso vd., 2016).

PEF'in hücre zarı üzerine etkisi üç aşamalı olarak gerçekleşmektedir. İlk olarak hücre zarında bir mekanik stres oluşturularak transmembran potansiyelinde artış sağlanmakta, ardından hücre membranı yarı geçirgen özelliğini yitirmektedir. Son aşamada hücre içi ve dışı arasında ozmotik denge bozulmakta, bu da mikroorganizmanın inaktivasyonuna neden olmaktadır (Hamilton ve Sale, 1967). Membrandaki yapısal değişiklikler hücre sitoplazmasında H⁺ iyonu artışına neden olmakta, bunun sonucunda da kimyasal modifikasyonlar ve oksidasyon-redüksiyon reaksiyonları gerçekleşmektedir (Vega-Mercado vd., 2007).

Elektroporasyona alternatif olarak önerilen sitolojik parçalanma mekanizmasında, PEF uygulanmış hücre zarı parçalanmadan hücre içi organeller ve enzimlerin etkilenmesiyle mikroorganizmaların inaktive edilebildiği bildirilmiştir (Harrison vd., 1997; Zhao vd., 2011). Sonraki çalışmalarda ise PEF'in "ya hep ya hiç" etkisine karşıt olarak membran bütünlüğünü kaybetmiş olmasına rağmen metabolik aktivitesini devam ettiren "hasarlı" hücrelerin varlığı öne sürülmüş, PEF'e maruz kalan hücrelerin koruyucu veya iyileştirici mekanizmalara sahip olduğu bildirilmiştir (Garcia vd., 2003; Pakhomova vd., 2012).

Bugüne kadar PEF uygulamasının gıda teknolojisinde marınasyon, kürlenme (Toepfl vd., 2006a), tuzlama (McDonnell vd., 2014), dondurma ve çözündürme işlemlerini hızlandırmak (Mok vd., 2015; Wiktor vd., 2015),

kurutma hızını (Parniakov vd., 2016; Alam vd., 2018), proses verimini (Saldaña vd. 2017; Kantar vd. 2018) ve ekstraksiyon etkinliğini (Xue ve Farid, 2015) artırmak, mikrobiyel (Huang vd., 2014; Evrendilek, 2017; Jin vd., 2017) ve enzimatik inaktivasyonu sağlamak (Leong vd., 2014), tekstürel, duysal, kimyasal veya besleyici kaliteyi iyileştirmek (Guo vd., 2014; Soliva-Fortuny vd., 2017; Fauster vd., 2018) gibi özellikleri bildirilmiştir. Çoğunlukla akışkan gıdalarda etkinliği gösterilmiş olan PEF'in katı gıdalarda uygulanabilmesi için özel ekipmanlar geliştirilmiştir. Böylece PEF hem bitkisel hem de hayvansal katı gıdalarda arzulan kalite özelliklerini sağlamak için kullanılmaktadır.

PEF YÖNTEMİNİN ET TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI

PEF yönteminin et kalitesini ve fonksiyonel özelliklerini iyileştirme amacıyla uygulanması elektrik alan yoğunluğu, uygulama süresi, darbe frekansı ve spesifik enerji gibi teknolojik faktörlerin yanı sıra, kas tipi ve yağ doku miktarından etkilenen elektriksel iletkenlik, protein ve nem miktarı, protein içeriği, etin sıcaklığı gibi uygulama ortamına ait faktörlerden ve ön işlemlerden etkilenmektedir (Bhat vd., 2019a). PEF yönteminin kas hücreleri üzerine etkisini belirleyen en önemli kriter elektrik alan yoğunluğudur (Suwandy vd., 2015a; Bekhit vd., 2014). Genellikle hayvan hücrelerinde kritik potansiyelin aşılarak membran geçirgenliğinin değiştirilebilmesi için 0.5 kV/cm elektrik alan yoğunluğu yeterli olmaktadır (Toepfl vd., 2006a). Bunun yanı sıra elektrik alanın kas liflerine paralel veya dik uygulanması kas hücrelerinde de elektroporasyonun sağlanmasını etkilemektedir (Bekhit vd., 2014). Astráin-Redín vd. (2019), elektrik alan parametrelerinin ve kas lifi dağılımının sosis üretiminde kurutma etkinliği üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında 1 kV/cm elektrik alan yoğunluğu, 200 µs darbe genişliği ve 28 kJ/kg düzeyindeki toplam enerjinin et hücrelerinin elektroporasyonu ve su içeriğinde %60.4 azalmanın sağlanması için en uygun değerler olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, elektrota dik uzanan kas liflerinin paralel uzananlara nazaran ortalama kurutma değerinin daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Darbe

frekansındaki ve uygulama süresindeki artış ile sağlanan yüksek enerji girdisi ise, yeterli elektrik alan yoğunluğu eşliğinde kas hücrelerinde fonksiyonel kaliteyi geliştiren kalıcı gözeneklerin ve devamında mikro-yapısal değişikliklerin yolunu açmaktadır (Alahakoon vd., 2017).

PEF'in etkinliğini belirleyen en önemli etmenlerden biri etin elektriksel iletkenliğidir. Yüksek iletkenlikler, darbenin pik alan gücünün zayıflamasına neden olmakta ve bu da daha yüksek voltajların kullanılmasını sınırlamaktadır. Faridnia vd. (2014), 9.34 ± 2.10 mS/cm'den daha yüksek elektriksel iletkenliği olan sığır etleri için 0.6 kV/cm elektrik alan gücünün üzerine çıkmanın zor olduğunu belirtmiştir. Yağ içeriği, kas lifi dağılımı ve kas tipi gibi yapısal farklılıklar; farklı et türleri ve kasların iletkenliğini etkileyebilmektedir. Düşük iletkenliğe sahip yağ, yüksek iletkenliğe sahip kas dokusu ile çevrelendiğinde, elektrik akımının izlediği yol daha iletken kanalları tercih ettiğinden değişkenlik gösterebilmektedir. Bu alternatif yollar voltaj düşüşüne ve nihayetinde elektrik alan gücünde zayıflama ile sonuçlanabilmektedir. Marine veya işlenmiş et ürünlerinin formülasyonları ve son ürün formu da elektriksel iletkenlik açısından PEF

uygulanırken dikkate alınması gereken etmenler arasında yer almaktadır (Alahakoon vd., 2017).

Kaslar arasında ve aynı kasın değişik bölgelerinde görülen yapısal ve bileşimsel farklılıklar PEF uygulamasına verilen tepkide değişikliğe neden olmaktadır. Nem miktarı, protein miktarı ve kompozisyonu, çoklu doymamış yağ asitleri PEF uygulamasının etkinliğini değiştirebildiği gibi uygulama sonunda ette sertlik, sululuk, lipit oksidasyonu, yağ asidi profili ve uçucu bileşik profilini etkilemektedir. Bu nedenle çalışmalardan güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için birbirini izleyen PEF uygulamalarında örneklerin aynı bölgelerden alınması gerekmektedir (Alahakoon vd., 2017).

PEF uygulanmış etlerde temel olarak hücre zarında meydana gelen değişikliklerden dolayı mikro yapı düzenlenmektedir. Hücre zarı hayati öneme sahip bileşiklerin sentezinden ve metabolik aktivitelerin gerçekleşmesinden sorumlu olduğu için PEF ile elektroporasyonun gerçekleştirilmesi hücre içindeki biyokimyasal aktiviteleri ve böylece etin sertliği, su tutma kapasitesi ve renk gibi kalite kriterlerini etkilemektedir (O'Dowd vd., 2013; Bekhit vd., 2014; Faridnia vd., 2014). Et ve et ürünlerinin kalite özellikleri üzerine PEF yönteminin etkisi Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Et ve et ürünlerinin kalite özellikleri üzerine PEF yönteminin etkisi

Uygulama bölgesi	PEF parametresi	Bulgular	Referans
Domuz eti	Elektrik alan yoğunluğu: 1-3 kV/cm	Dokuda salamuranın homojen dağılması, Artan su bağlama kapasitesi ve azalan pişirme kaybı, Son üründe daha yumuşak yapı	Toepfl vd. (2006b)
Sığır eti <i>Semitendinosus</i>	Elektrik alan yoğunluğu: 1.1-2.8 kV/cm Enerji yoğunluğu: 12.7-226 kJ/kg Frekans: 5-200 Hz Darbe sayısı: 152-300	Ağırlık kaybında artış, PEF'ten etkilenen miyofibriller, PEF'ten etkilenmeyen enstrümental tekstür parametreleri	O'Dowd vd. (2013)
<i>Longissimus lumborum</i> <i>Semimembranosus</i>	Elektrik alan yoğunluğu: 0.27 – 0.56 kV/cm Frekans: 20, 50, 90 Hz	Frekansa paralel olarak artan yumuşaklık, PEF ile azalan pişirme kaybı	Bekhit vd. (2014)
Sığır eti <i>Longissimus thoracis</i>	Elektrik alan yoğunluğu: 0.2–0.6 kV/cm Frekans: 1–50 Hz Darbe genişliği: 20 μ s	Daha gözenekli yapı ve artan su kaybı	Faridnia vd. (2014)

Domuz eti <i>Longissimus thoracis et lumborum</i> (LTL)	Elektrik alan yoğunluğu: 1.2, 2.3 kV/cm Enerji yoğunluğu: 22.6-181.1 kJ/kg Frekans: 100, 200 Hz Darbe sayısı: 150, 300	Düşük PEF'te daha fazla ağırlık ve pişirme kaybı	McDonnell vd. (2014)
Sığır eti <i>Semitendinosus</i>	Elektrik alan yoğunluğu: 1.4 kV/cm Darbe genişliği: 20 µs Frekans: 50 Hz Toplam spesifik enerji: 250 kJ/kg	Dondurma ön işleminin ardından uygulanan PEF ile artan yumuşaklık	Faridnia vd. (2015)
Sığır eti <i>Longissimus lumborum</i> (LL) <i>Semimembranosus</i> (SM)	Elektrik gerilimi: 5, 10 kV Frekans: 20, 50, 90 Hz	LL ve SM kaslarında kesme kuvvetinde %19'a kadar azalma Proteolizde, troponin-T ve desmin degradasyonunda artış	Suwandy vd. (2015a)
Sığır eti <i>Longissimus lumborum</i> (LL) (Farklı pH'ya sahip; 5.5-5.8, 5.8-6.1, >6.1)	Elektrik alan yoğunluğu: 0.58 – 0.73 kV/cm Frekans: 90 Hz Darbe genişliği: 20 µs	Düşük pH'da artan proteoliz	Suwandy vd. (2015b)
Sığır eti <i>Longissimus lumborum</i> (LL) <i>Semimembranosus</i> (SM)	Elektrik alan yoğunluğu: 0.50 – 0.58 kV/cm Frekans: 90 Hz Darbe genişliği: 20 µs	LL'de artan troponin-T ve desmin degradasyonu	Suwandy vd. (2015c)
Sığır eti <i>Longissimus thoracis et lumborum</i> (LTL)	Elektrik alan yoğunluğu: 1.4 kV/cm Darbe genişliği: 20 µs Frekans: 10 Hz Darbe sayısı: 300, 600	PEF uygulanmış örneklerin sertliğinde azalma ve panelistlerin %60'ı tarafından yumuşak olarak nitelendirilmesi	Arroyo vd. (2015b)
Sığır eti <i>Longissimus lumborum</i> (LL) <i>Semimembranosus</i> (SM)	Elektrik alan yoğunluğu: 0.44 – 0.48 kV/cm Frekans: 90 Hz Darbe genişliği: 20 µs	3 kez tekrarlanan PEF uygulaması ile LL kasında artan sertlik ve MS kasında düşük kesme kuvveti, Artan uygulama sayısı ile azalan troponin-T proteolizi	Bekhit vd. (2016)
Pişmiş sığır eti <i>Semimembranosus</i>	Elektrik alan yoğunluğu: 0.60 kV/cm Enerji yoğunluğu: 73.28 kJ/kg	Proteinlerin sindirilebilirliğinde artış	Bhat vd. (2019b)
Sığır eti <i>Biceps femoris</i> (BF) <i>Semitendinosus</i> (ST)	Elektrik alan yoğunluğu: 0.8-1.1 kV/cm Frekans: 50 Hz Darbe genişliği: 20 µs Enerji yoğunluğu: 130 kJ/kg	PEF uygulanan örneklerde daha yumuşak yapı ve gelişmiş renk PEF uygulanmış dondurulmuş örneklerde artan yağ oksidasyonu	Kantono vd. (2019)
Sığır eti <i>Semimembranosus</i> (SM)	Elektrik alan yoğunluğu: 0.52 kV/cm Frekans: 20 Hz Darbe genişliği: 20 µs	PEF uygulamasından etkilenen tuz dağılımı ve tuz difüzyonu sonucunda düşük tuz konsantrasyonu kullanım potansiyeli PEF uygulanan örneklerde daha yumuşak yapı	Bhat vd. (2020)

Etin temel duyuşal kalite kriterleri içerisinde tüketici beğenisini ve dolayısıyla etin fiyatını en çok etkileyen etin sertliğidir. Birçok fizyolojik ve biyolojik faktörlere bağılı olarak etin sertliği karkas içerisinde farklılık göstermektedir. Daha yumuşak et elde edebilmek için kesim sonrasında farklı uygulamalar düşünölmektedir. Değerli olan yumuşak et parçalarını elde edebilmek için et endüstrisi fiziksel, kimyasal ve enzimatik metotlar uygulamakta ve etin tekstürel kalitesini iyileştirebilmek için PEF gibi yeni teknolojik işlemler üzerinde durmaktadır (Alahakoon vd., 2017).

PEF tekniğı, kesimden hemen sonra karkastan elektrik akımı geçirilerek uygulanan elektriksel stimölasyon tekniğinden farklı olarak et parçaları üzerinde elektrik alan oluşturarak uygulanmaktadır. PEF ile etin yumuşatılması bir dizi farklı mekanizmaya bağılı olarak meydana gelmektedir. Postmortem dönemde ette meydana gelen katabolik reaksiyonların aktivitesi elektrik alan uygulaması ile hızlandırılmaktadır. PEF ile miyofibrillerin Z hattı boyunca kırılması ve parçalanması sonucu artan proteolitik enzim aktivitesi ile etin yumuşaması sağlanmaktadır (Alahakoon vd. 2017). Ayrıca, kas fibrillerinin elektroporasyonu ile kalpain ve katepsin gibi hücre içi enzimlerin ve bu enzimlerin aktivasyonunu sağlayan kalsiyum gibi iyonların daha hızlı salınması kas hücrelerindeki proteoliz ve glikoliz gibi biyokimyasal proseslerin daha erken oluşmasına öncülük etmektedir (Lee vd., 2010).

PEF ile et ve et ürünlerinin tekstürel özelliklerinin iyileştirilmesi, yöntemine ait farklı faktörlerin etkisi altında incelenmiştir. PEF uygulanmasında önemli bir kriter olan frekansın artmasıyla sığır filetolanın kesme kuvvetinde %19.5'e varan bir azalma sağlandığı, dolayısıyla yumuşaklığın arttığı tespit edilmiştir (Bekhit vd., 2014). Frekansın yanı sıra elektrik alan yoğunluğu PEF ile etteki değişimleri yüksek derecede etkilemektedir. İlimli elektrik alan yoğunlukları (100-1000 kV/m) elektroporasyon oluşturmasına rağmen et kalitesini iyileştirme konusunda yetersiz kalabilmektedir (Gudmundsson ve Haffsteinsson, 2001; Alahakoon vd., 2017). Nitekim, O'Dowd

vd. (2013) uyguladıkları elektrik alan yoğunluğunun (110-280 kV/m) sığır eti örneklerinde gevrekleşmeyi sağlayacak parçalanma için yetersiz olduğunu vurgulamıştır.

Taze et ve et ürünlerinde tekstürel özelliklerin geliştirilmesi için PEF, bazı ön işlemlerin yardımcı olarak uygulanmaktadır. Dondurma-çözündürme gibi ön işlemler ile hasar gören hücrede enzimler açığa çıkmakta ve bu işlemlerin PEF ile kombine halde kullanılması proteolizi hızlandırarak etin daha kolay gevrekleşmesini sağlamaktadır (Alahakoon vd., 2017). Ancak, diğer taraftan mekanik hasara uğramış olan et, olgunlaştırma esnasında lipit oksidasyonuna daha hassas hale gelmektedir (Faridnia, 2015). Dondurma işlemi ile artan protein degradasyonu ise etin uçucu bileşen profilini değiştirmekte, bu da etin duyuşal kalitesini olumsuz etkilemektedir. Ma vd. (2016), 1-1.4 kV/m elektrik alan yoğunluklarında, 90 Hz frekansta ve 20 µs genişlikte uyguladıkları darbelerden önce dondurma işlemine tabi tutulmuş kuzu etlerinde lipit ve protein oksidasyonuna paralel olarak yoğun miktarda aldehit oluştuğunu bildirmişlerdir.

PEF uygulaması, etin pişirme verimi, rengi ve tekstürel özellikleri üzerine belirleyici olan su tutma kapasitesini de etkilemektedir. Elektrik alan altında tutulan taze et ve et ürünlerinde protein degradasyonuna bağılı olarak su tutma kapasitesinde ve mikro yapıda farklılıklar meydana gelmektedir. PEF'in hücre boyutlarında küçölmeye neden olduğu, Gudmunsson ve Hafsteinsson (2001) tarafından 136 kV/m PEF uygulanmış tavuk ve somon örneklerinde gösterilmiştir. Daha düşük bağı dokuya sahip olan somonlarda hücreler arasında boşluğa neden olduğu belirlenen PEF yönteminin benzer şekilde sığır eti örneklerinin *Semitendinosus* (ST) (O'Dowd vd., 2013) ve *longissimus thoracis* (LT) (Faridnia vd. 2014) kaslarında da mikro yapıda meydana gelen elektroporasyona bağılı boşluklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Elektrik alan yoğunluğu arttıkça su tutma kapasitesi azalan etin gözenekli yapısı Faridnia vd. (2014) tarafından taramalı elektron mikroskopu (SEM) mikrogramı ile tespit edilmiştir.

PEF, et ve et ürünlerinin renginin geliştirilmesi amacıyla değerlendirilmektedir. PEF'in düşük sıcaklıkta tutulan etlerin rengi üzerine etkili olmadığı Faridnia vd. (2014) tarafından bildirilmiştir. Bir başka çalışmada ise taze veya donmuş hindi etlerine PEF (1.4 kV/cm, 10 Hz, 20 µs, 300 and 600 darbe) uygulanmış, çiğ veya pişirilmiş etlerin rengi üzerine etkili olmadığı sonucuna ulaşılmıştır (Arroyo vd., 2015a).

PEF etlerde aynı zamanda ekstraksiyona yardımcı bir işlem olarak da uygulanmaktadır. Bu amaçla "ELCRACK®" adı verilen bir teknik geliştirilmiş, (Sitzmann ve Münch, 1987), Gudmundsson ve Haffsteinsson (2005) da bu teknikle bazı enzimler ve balık yağı gibi değerli yan ürünlerin elde edilebileceğini vurgulamıştır. He vd. (2014) yüksek yoğunluklu vurgulu elektrik alan kullanarak balık kemiklerinden kondroitin sülfat ekstrakte etmişler, PEF uygulamasının ekstraksiyon hızını ve verimini artırdığını tespit etmişlerdir.

PEF ile hücre geçirgenliğinin artması marinasyon, tuzlama veya kürlenme için kullanılan baharat, tuz, antimikrobiyel ajanlar gibi maddelerin taze etlere nüfuz etmesini sağlamaktadır (Toepfl vd., 2006b). McDonnell vd. (2014), 120 ve 230 kV/cm yoğunluğa sahip elektriksel darbelerle maruz bıraktıkları domuz eti örneklerinin, PEF uygulanmayan örneklerle nazaran daha yüksek miktarda tuz içerdiklerini belirtmişlerdir.

PEF uygulaması, hücre içi sıvının kullanılabilirliğini ve starter kültür difüzyonunu artırarak et ve et ürünlerinin fermantasyon etkinliğine katkı sağlamaktadır. Toepfl vd. (2006a) yaptıkları bir çalışmada sosis fermantasyonunda PEF (200 kV/m ve 10 kJ/kg enerji girdisi) uygulanmasının ardından, laktik asit oluşumu ile pH değerinin düşmesi için gerekli sürenin azaldığını tespit etmişlerdir.

Mikroorganizmaların hücre zarı üzerinde geri dönüşümsüz yıkıcı etkileri olduğu bilinen PEF uygulaması ile mikrobiyel inaktivasyon sağlanabilmekte, ısı artışının olmaması nedeniyle gıdaların besin ve kalite değerleri korunabilmektedir (Sitzmann vd., 2016). Çeşitli

gıdalarda ve çözeltilerde mikrobiyel yükte azalma sağladığı bilinen PEF yönteminin et ve et ürünlerinde heterojen yapıdan, değişken elektriksel iletkenlikten ve koruyucu unsurlardan dolayı inaktivasyon yeteneği zayıflamaktadır (Gudmundsson ve Hafsteinsson, 2005). Haughton vd. (2012), 50 °C'ta 10, 15, 20, 25 ve 30 saniye sürelerle MRD (Maximum Recovery Diluent) çözeltilisine (65 kV/cm, 500 Hz, 5 ms) ve tavuk örneklerine (15 kV/cm veya 3.75 kV/cm, 5 Hz, 10 ms) PEF uyguladıkları çalışmalarında taze tavuk göğüs etlerine inoküle edilmiş *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli* ve *Salmonella enteritidis* bakterilerinin sayıları üzerine etkili olmadığı sonucuna varmışlardır. Stachelska vd. (2012), PEF uygulamasının sığır etine inoküle edilmiş *Yersinia enterocolitica* ATCC 35669 bakterisi üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında aynı elektrik alanı (300 V/m) farklı frekans değerleri (28, 280 ve 2800 MHz) ile uygulamışlar ve 4°C'ta 3 gün ve -20°C'ta 30 gün depolamanın sonunda -20°C'ta frekans arttıkça sayının azaldığını, 4°C'ta ise sadece 2800 MHz'de bakteri sayılarının 6.7 log kob/g'dan 6.4 log kob/g düzeyine düştüğünü bildirmişlerdir. Aşık Canbaz (2018) tavuk göğüs etlerine soğuk depolama boyunca PEF uyguladığı çalışmada, toplam mezofilik aerobik bakteri için önerilmiş olan sınır değerinin (7 log kob/g) PEF uygulanmamış kontrol örneğine göre 250 kV/m PEF uygulanmış örnekte 2 gün, 467 ve 700 kV/m PEF uygulanmış örneklerde ise 4 gün sonra aşıldığını tespit etmiştir.

SONUÇ

Gelecek nesillere sağlıklı bireyler aktarabilmenin ve kaliteli yaşlanmanın endişesini duyan tüketiciler güvenliği sağlanmış doğala yakın gıdalar talep etmektedirler. Bu talepleri karşılayabilmek için geliştirilen ısı olmayan yöntemlerden vurgulu elektrik alan çeşitli gıdalarda uygulama alanı bulmuş, zamanla et ve et ürünlerinde ekstraksiyon, kurutma, çözündürme, tekstürel özelliklerin iyileştirilmesi, rengin geliştirilmesi, marinasyon, tuzlama, kürlenme, fermantasyon gibi işlemlere yardımcı bir proses olarak düşünülmüş ve son yıllarda mikrobiyel inaktivasyon için uygunluğu tartışılmıştır. Ancak bir dizi teknolojik ve biyolojik faktörlerden etkilenen PEF işleminin farklı et

ürünlerinde fiziksel, kimyasal ve mikrobiyel etkilerinin araştırıldığı ve duyu analizler ile desteklendiği çalışmalara hali hazırda ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle elektroporasyon ile artan hücre geçirgenliğinin, prosesinde kurutma ve fermantasyon gerçekleştirilen et ürünlerinin işleme hızı ve son ürün kalitesine etkisinin araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Alahakoon, A.U., Faridnia, F., Bremer, P.J., Silcock, P., Oey, I. (2017). Pulsed electric fields effects on meat tissue quality and functionality. In *Handbook of Electroporation*, Miklavcic, D. (ed.) Springer, USA, pp. 2998.
- Alam, M.D.R., Lyng, J.G., Frontuto, D., Marra, F., Cinquanta, L. (2018). Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot. *J. Food sci.* 83(8): 2159-2166.
- Arroyo, C., Eslami, S., Brunton, N.P., Arimi, J.M., Noci, F., Lyng, J.G. (2015a). An assessment of the impact of pulsed electric fields processing factors on oxidation, color, texture, and sensory attributes of turkey breast meat. *Poult. Sci.* 94(5): 1088-1095.
- Arroyo, C., Lascorz, D., O'Dowd, L., Noci, F., Arimi, J., Lyng, J.G. (2015b). Effect of pulsed electric field treatments at various stages during conditioning on quality attributes of beef longissimus thoracis et lumborum muscle. *Meat Sci.* 99: 52-59.
- Astrain-Redin, L., Raso, J., Cebrian, G., Alvarez, I. (2019). Potential of Pulsed Electric Fields for the preparation of Spanish drycured sausages. *Sci. Rep.* 9: 16042.
- Aşık Canbaz, E. (2018). Ambalajlı tavuk etinin soğukta muhafazasında yüksek voltajlı vurgulu elektrik alanın etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, Isparta, Türkiye, 89 s.
- Baba, K., Kajiwara, T., Watanabe, S., Katsuki, S., Sasahara, R., Inoue, K. (2018). Low-temperature pasteurization of liquid whole egg using intense pulsed electric fields. *Electron. and Commun. in Jpn.* 101(2): 668-673.
- Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., Vorobiev, E. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Res. Int.* 77: 773-798.
- Bekhit, A.E.A., Ven, R., Suwandy, V., Fahri, F., Hopkins, D.L. (2014). Effect of pulsed electric field treatment on cold-boned muscles of different potential tenderness. *Food Bioprocess Technol.* 7: 3136-3146.
- Bekhit, A.E.A., Suwandy, V., Carne, A., Ven, R., Hopkins, D.L. (2016). Effect of repeated pulsed electric field treatment on the quality of hot-boned beef loins and topsides. *Meat Sci.* 111: 139-146.
- Bhat, A.F., Bekhit, A.E.D., Birch, J., Kanokruangrong, S., Carne, A., Farouk, M.F. (2019a). Current and future prospects for the use of pulsed electric field in the meat industry. *Crit. Rev. in Food Sci. and Nutr.* 59(10): 1660-1674.
- Bhat, Z.F., Mortona, J.D., Mason, S.L., Jayawardena, S.R., Bekhit, A.E.D. (2019b). Pulsed electric field: A new way to improve digestibility of cooked beef. *Meat Sci.* 155: 79-84.
- Bhat, Z.F., Morton, J.D., Mason, S.L., Bekhit, A.E.D. (2020). The application of pulsed electric field as a sodium reducing strategy for meat products. *Food Chem.* 306: 125622.
- Carbonell-Capella, J.M., Buniowska, M., Cortes, C., Zulueta, A., Frigola, A., Esteve, M.J. (2017). Influence of pulsed electric field processing on the quality of fruit juice beverages sweetened with Stevia rebaudiana. *Food Bioprod. Process.* 101: 214-222.
- Dunn, J.E., Lacosta, R., Pearlman, J.S. (1987). Methods and apparatus for extending the shelf life of fluid products. United States Patent, 4, 695, 472.
- Dunn, J. (2001). Pulsed Electric Field Processing: An Overview. In *Pulsed Electric Field In Food Processing Fundamental Aspects and Applications*.

- Barbosa-Canovas, G.V., Zhang, Q.H. Technomic Publishing, U.S.A., pp. 268.
- Evrendilek, G.A., Celik, P., Agcam, E., Akyildiz, A. (2016). Assessing impacts of pulsed electric fields on quality attributes and furfural and hydroxymethylfurfural formations in apple juice. *J. Food Process Eng.* Doi: 10.1111/jfpe.12524
- Evrendilek, G.A. (2017). Impacts of pulsed electric field and heat treatment on quality and sensory properties and microbial inactivation of pomegranate juice. *Food Sci. Technol. Int.* 23(8): 668-680.
- Faridnia, F., Bekhit, A.E.A., Niven, B., Oey, I. (2014). Impact of pulsed electric fields and post-mortem vacuum ageing on beef longissimus thoracis muscles. *Int. J. Food Sci. Technol.* 49: 2339-2347.
- Faridnia, F., Ma, Q.L., Bremer, P.J., Burritt, D.J., Hamid, N., Oey, I. (2015). Effect of freezing as pre-treatment prior to pulsed electric field processing on quality traits of beef muscles. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 29: 31-40.
- Fauster, T., Schlossnikl, D., Rath, F., Ostermeier, R., Teufel, F., Topefl, S., Jaeger, H. (2018). Impact of pulsed electric field (PEF) pretreatment on process performance of industrial french fries production. *J. Food Eng.* 235: 16-22.
- Garcia, D., Gomez, N., Condon, S., Pagan, R. (2003). Pulsed electric fields cause sublethal injury in *Escherichia coli*. *Lett. in Appl. Microbiol.* 36: 140-144.
- Gavahian, M., Tiwari, B.K., Chu, Y.H., Ting, Y., Farahnaky, A. (2019). Food texture as affected by ohmic heating: Mechanism involved, recent findings, benefits, and limitations. *Trends Food Sci. Technol.* 86: 328-339.
- González-Casado, S., Martín-Belloso, O., Elez-Martínez, P., Soliva-Fortuny, P. (2018). Enhancing the carotenoid content of tomato fruit with pulsed electric field treatments: effects on respiratory activity and quality attributes. *Postharvest Biol. Tec.* 137: 113-118.
- Grahl, T., Markl, H. (1996). Killing of microorganisms by pulsed electric fields. *Applied Microbiology and Biotechnology* 45: 148-157.
- Gudmundsson, M., Hafsteinsson, H. (2001). Effect of electric field pulses on microstructure of muscle foods and roes. *Trends Food Sci. Technol.* 12: 122-128.
- Gudmundsson, M., Hafsteinsson, H. (2005). Effect of high intensity electric field pulses on solid foods. In *Emerging Technologies For Food Processing*, Sun, D.W. Elsevier, USA, pp. 757.
- Guo, M., Jin, T.Z., Geveke, D.J., Fan, X., Sites, J.E., Wang, L. (2014). Evaluation of microbial stability, bioactive compounds, physicochemical properties, and consumer acceptance of pomegranate juice processed in a commercial scale pulsed electric field system. *Food Bioproc. Technol.* 7: 2112-2120.
- Gupta, R.P., Murray, W. (1988). Pulsed High Electric Field Sterilization. IEEE Pulsed Power Conference Record 58-64.
- Hamilton, W.A., Sale, A.J.H. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms: II. mechanism of action of the lethal effect. *BB4 General Subjects* 148(3): 789-800.
- Harrison, S.L., Barbosa-Canovas, G.V., Swanson, B.G. (1997). *Saccharomyces cerevisiae* structural changes induced by pulsed electric field treatment. *LWT-Food Sci. Technol.* 30: 236-240.
- He, G., Yin, Y., Yan, X. Ve Yu, Q. (2014). Optimisation extraction of chondroitin sulfate from fish bone by high intensity pulsed electric fields. *Food Chem.* 164: 205-210.
- Haughton, P. N., Lyng, J. G., Morgan, D. J., Cronin, D. A., Noci, F., Fanning, S., Whyte, P. (2012). An evaluation of the potential of high-intensity ultrasound for improving the microbial safety of poultry. *Food Bioproc. Technol.* 5: 992-998.
- Hitit, B. (2011). Atımlı elektrik alanı prosesinin meyve sularının kalite kriterleri üzerine etkisi. Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bolu, Türkiye, 99s.
- Huang, K., Yu, L., Wang, W. Gai, L. Ve Wang, J. (2014). Comparing the pulsed electric field resistance of the microorganisms in grape juice: application of the weibull model. *Food Control* 35: 241-251.

- Hülshager, H., Niemann, E.G. (1980). Lethal effects of high-voltage pulses on *E. coli* k12. *Radiat. Environ. Bioph.* 18: 281-288.
- Jin, T.Z., Yu, Y., Gurtler, J.B. (2017). Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries. *LWT-Food Sci. Technol.* 77: 517-524.
- Kantar, S.E., Boussetta, N., Lebovka, N., Foucart, F., Rajha, H.N., Maroun, R.G., Louka, N., Vorobiev, E. (2018). Pulsed electric field treatment of citrus fruits: improvement of juice and polyphenols extraction. *Innov. Food Sci. Emerg.* 46: 153-161.
- Kantono, K., Hamid, N., Oey, I., Wang, S., Xu, Y., Ma, Q., Faridnia, M. (2019). Physicochemical and sensory properties of beef muscles after Pulsed Electric Field processing. *Food Res. Int.* 121: 1-11.
- Kumar, Y., Kumar Patel, K., Kumar, V. (2015). Pulsed electric field processing in food technology. *Int. J. Eng. Stud. Techn. Appr.* 1(2): 6-16.
- Lee, S.H., Joo, S.T., Ryu, Y.C. (2010). Skeletal muscle fiber type and myofibrillar proteins in relation to meat quality. *Meat Sci.* 86: 166-170.
- Leong, S.Y., Richter, L.K., Knorr, D., Oey, I. (2014). Feasibility of using pulsed electric field processing to inactivate enzymes and reduce the cutting force of carrot (*Daucus carota* var. nantes). *Innov. Food Sci. Emerg.* 26: 159-167.
- Ma, Q., Hamid, N., Oey, I., Kantono, K., Faridnia, F., Yoo, M., Farouk, M. (2016). Effect of chilled and freezing pre-treatments prior to pulsed electric field processing on volatile profile and sensory attributes of cooked lamb meats. *Innov. Food Sci. Emerg.* 37: 359-374.
- McDonnell, C.K., Allen, P., Chardonnerau, F.S., Arimi, J.M., Lyng, J.G. (2014). The use of pulsed electric fields for accelerating the salting of pork. *LWT - Food Sci. Technol.* 59: 1054-1060.
- Mead, G.C. (2004). Meat quality and consumer requirements. In Poultry meat processing and quality, Mead, G.C. CRC Press, USA, pp. 377.
- Milani, E.A., Alkhafaji, S., Silva, F.V.M. (2015). Pulsed electric field continuous pasteurization of different types of beers. *Food Control* 50: 223-229.
- Mok, J.H., Choi, W., Park, S.H., Lee, Sh., Jun, S. (2015). Emerging pulsed electric field (PEF) and static magnetic field (SMF) combination technology for food freezing. *Int. J. Refrig.* 50: 137-145.
- Musto, M., Faraone, D., Cellini, F., Musto, E. (2014). Changes of DNA quality and meat physicochemical properties in bovine supraspinatus muscle during microwave heating. *J. Sci. Food Agr.* 94: 85-791.
- O'Dowd, L.P., Arimi, J.M., Noci, F., Cronin, D.A., Lyng, J.G. (2013). An assessment of the effect of pulsed electrical fields on tenderness and selected quality attributes of post rigour beef muscle. *Meat Sci.* 93: 303-309.
- Pakhomova, O.N., Khorokhorina, V.A., Bowman, A.M., Rodaite, R.R., Saulis, G., Xiao, S., Pakhomov, A.G. (2012). Oxidative effects of nanosecond pulsed electric field exposure in cells and cell-free media. *Arch. Biochem. Biophys.* 527: 55-64.
- Park, S.Y., Kim, H.Y., Choe, J. (2019). Application of an electric field refrigeration system on pork loin during dry aging. *Food Sci. Animal Resour.* 39(4): 668-676.
- Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N., Vorobiev, E. (2016). Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innov. Food Sci. Emerg.* 35: 52-57.
- Raso, J., Frey, W., Ferrari, G., Pataro, G., Teissie, J., Miklavčič, D. (2016). Recommendations guidelines on the key information to be reported in studies of application of PEF technology in food and biotechnological processes. *Innov. Food Sci. Emerg.* 37: 312-321.
- Saldaña, G., Cebrián, G., Abenoza, M., Sánchez-Gimeno, C., Álvarez, I., Raso, J. (2017). Assessing the efficacy of PEF treatments for improving polyphenol extraction during red wine vinifications. *Innov. Food Sci. Emerg.* 39: 179-187.
- Sale, A.J.H., Hamilton, W.A. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms: I. killing of

- bacteria and yeasts. *BBA General Subjects* 148(3): 781-788.
- Sitzmann, W., Münch, E.W. (1987). Verarbeitung tierischer rohstoffe. *Eur. J. Lipid Sci. Tech.* 89(9): 368-374.
- Sitzmann, W., Vorobiev, E., Lebovka, N. (2016). Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: Historical backgrounds. *Innov. Food Sci. Emerg.* 37: 302-311.
- Soliva-Fortuny, R., Vendrell-Pacheco, M., Martín-Belloso, O., Elez-Martínez, P. (2017). Effect of pulsed electric fields on the antioxidant potential of apples stored at different temperatures. *LWT-Food Sci. Technol.* 77: 517-524.
- Stachelska, M.A., Stankiewicz-Szymczak, W., Jakubczak, A., Swislocka, R., Lewandowski, W. (2012). Influence of pulsed electric field on the survival of yersinia enterocolitica in minced beef meat: assessment of microbiological activity of selected cell lines of bacteria under influence of physical-chemical factors. *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna* 2: 13-17.
- Suwandy, V., Carne, A., Ven, R., Bekhit, A.E.D.A., Hopkins, D.L. (2015a). Effect of pulsed electric field on the proteolysis of cold boned beef *M. longissimus lumborum* and *M. semimembranosus*. *Meat Sci.* 100: 222-226.
- Suwandy, V., Carne, A., Ven, R., Bekhit, A.E., Hopkins, D.L. (2015b). Effect of pulsed electric field treatment on the eating and keeping qualities of cold-boned beef loins: impact of initial pH and fibre orientation. *Food Bioprocess Technol* 8: 1355-1365.
- Suwandy, V., Carne, A., Ven, R., Bekhit, A.E.D.A., Hopkins, D.L. (2015c). Effect of repeated pulsed electric field treatment on the quality of cold-boned beef loins and topsides. *Food Bioprocess Technol* 8: 1218-1228.
- Toepfl, S., Heinz, V., Knorr, D. (2006a). Applications of Pulsed Electric Fields Technology for The Food Industry. In *Pulsed Electric Fields Technology For The Food Industry Fundamentals and Applications*, Raso, J., Heinz, V. Springer, USA, pp. 245.
- Toepfl, S., Heinz, V., Knorr, D. (2006b). Pulsed electric fields (PEF) processing of meat. IUFOST. Doi: 10.1051/IUFOST:20060591.
- Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M.M., Barbosa-Canovas, G.V., Swanson, B.G. (2007). Pulsed electric fields in food preservation. In *Handbook of Food Preservation*, Rahman, M.S. CRC Press, USA, pp. 1068.
- Wiktor, A., Schulz, M., Voigt, E., Witrowa-Rajchert, D., Knorr, D. (2015). The effect of pulsed electric field treatment on immersion freezing, thawing and selected properties of apple tissue. *J. Food Eng.* 146: 8-16.
- Wouters, P.C., Alvarez, I., Raso, J. (2001). Critical factors determining inactivation kinetics by pulsed electric field food processing. *Trends Food Sci. Technol.* 12: 112-121.
- Wyk, S., Farid, M.M., Silva, F.V.M. (2018). SO₂, high pressure processing and pulsed electric field treatments of red wine: Effect on sensory, *Brettanomyces* inactivation and other quality parameters during one year storage. *Innov. Food Sci. Emerg.* 48: 204-211.
- Xue, D., Farid, M.M. (2015). Pulsed electric field extraction of valuable compounds from white button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Innov. Food Sci. Emerg.* 29: 178-186.
- Zhang, Q., Barbosa-Canovas, G.V., Swanson, B.G. (1995). Engineering Aspects of Pulsed Electric Field Pasteurization. *J. Food Eng.* 25: 261-281.
- Zhao, W., Yang, R., Zhang, H.Q., Zhang, W., Hua, X., Tang, Y. (2011). Quantitative and real time detection of pulsed electric field induced damage on *Escherichia coli* cells and sublethally injured microbial cells using flow cytometry in combination with fluorescent techniques. *Food Control* 22: 566-573.
- Zimmerman, U., Pilwat, G., Riemann, F. (1974). Dielectric breakdown of cell membranes. *Biophys. J.* 14: 881-899.