



Utilization of Pulsed Electric Field (PEF) Technique in Meat and Seafood Processing

Berkay Kopuk^{1,a}, Recep Güneş^{1,b}, Harun Uran^{1,c,*}

¹Food Engineering Department, Faculty of Engineering, Kırklareli University, 39100 Kırklareli, Turkey

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Review Article</i></p> <p>Received : 01/06/2020 Accepted : 07/08/2020</p> <p>Keywords: Pulsed electric field Meat products Seafood Preservation Processing</p>	<p>In the food industry, using of new preservation and processing technologies, which may be an alternative to traditional methods, is becoming increasingly important. These novel and particularly non-thermal techniques have very important advantages such as enhancing food safety, reducing quality losses, and increasing production efficiency. One of these new technologies, Pulsed electric field (PEF) technique, stands out as a novel method that has been emphasized in recent years. It is used for different purposes in both liquid and solid foods, also various studies are carried out for the optimization. On the other hand, recently, there are several studies using PEF technique in meats and seafoods for the preservation purposes, as well as other positive effects (improving the functional properties of the product, accelerating processes such as drying, curing and freezing). In this regard, detailed information about the purposes for which PEF technique can be used in meats and seafoods has been tried to be given in this comprehensive review study.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(10): 2202-2213, 2020

Vurgulu Elektrik Alan (PEF) Tekniğinin Et ve Su Ürünlerinin İşlenmesinde Kullanımı

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Derleme Makale</i></p> <p>Geliş : 01/06/2020 Kabul : 07/08/2020</p> <p>Anahtar Kelimeler: Vurgulu elektrik alan Et ürünleri Su ürünleri Muhafaza İşleme</p>	<p>Gıda endüstrisinde, geleneksel yöntemlere alternatif olabilecek yeni muhafaza ve işleme teknolojilerinin kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bu yeni ve özellikle ısılmayan tekniklerin gıdaların güvenliğini artırma, kalite kayıplarını azaltma, üretimde verim artışı sağlama gibi çok önemli avantajları bulunmaktadır. Bu yeni teknolojilerden biri olan Vurgulu Elektrik Alan (Pulsed Electric Field-PEF) tekniği, son yıllarda üzerinde önemle durulan bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Bu yöntem hem sıvı hem de katı gıdalarda değişik amaçlarla kullanılmakta olup optimizasyona yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Diğer yandan, PEF tekniğinin et ve su ürünlerinde de gerek muhafaza amacıyla, gerekse diğer meydana getirdiği olumlu özellikler (ürünün fonksiyonel özelliklerini geliştirme, kurutma, kütleme ve dondurma gibi işlemleri hızlandırması) nedeniyle kullanımına dair yakın zamanda çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu bakımdan bu derleme çalışmasında, PEF tekniğinin et ve su ürünlerinde hangi amaçlar için kullanılabilirliği üzerine detaylı bilgiler verilmeye çalışılmıştır.</p>

^a berkaykopuk1@gmail.com

^b <https://orcid.org/0000-0001-7321-9642>

^c harunuran@klu.edu.tr

^d <https://orcid.org/0000-0002-3161-6698>

^e recepunes@klu.edu.tr

^f <https://orcid.org/0000-0002-8007-8697>



Giriş

Isıl işlem uygulamalarından pastörizasyon ve sterilizasyon, gıdaların işlenmesi ve korunmasında kullanılan en yaygın iki yöntem olarak belirtilebilir. Bu işlemlerin esas amacı, gıdalarda bulunabilecek patojenik mikroorganizmaları ve sporları inaktive edip mikrobiyal açıdan güvenli bir ürünü tüketiciye sunabilmektir. Ancak bu faydalarına rağmen klasik ısıl işlemler son ürünün duyusal, tekstürel ve besin kalitesini olumsuz yönde etkileyen değişiklikler meydana getirebilmektedir. Son yıllarda tüketiciler, hem gıdaları işlemek için kullanılan teknolojiler hakkında hem de gıdanın güvenliği açısından satın aldıkları ve tükettikleri ürünler hakkında daha fazla bilgi sahibi olmaya başlamıştır. Buna paralel olarak, günümüz tüketicisi yüksek duyusal kalite ve besin içeriği ile birlikte yiyeceklerinde tazelik benzeri nitelikler arayıp daha doğal ürünleri tercih etmektedir. Bu kapsamda, mikrobiyal inaktivasyonu sağlayıp aynı zamanda gıdanın işlenmeden önceki besin içeriğini koruyabilen, çevre dostu ürün üretimini mümkün kılan minimal ürün işleme alternatiflerine olan ihtiyaç, birçok gıda bilimcisinin odak noktasını oluşturmaktadır (Bolado-Rodriguez ve ark., 2000; Zhang ve ark., 2011).

PEF, gıda üretiminde kalitenin artması ve gıda güvenliğinin sağlanması açısından iki elektrot arasına yerleştirilen gıdaya yüksek voltajlarda kısa süreli elektriksel darbelerin (0,1-80 kV/cm, 0,1-100 µs) uygulandığı bir yöntem olup, geleneksel ısıl işlemlerle kıyaslandığında gıdaların besin değerlerinde, fiziksel ve duyusal özelliklerinde minimal düzeyde etki gösteren, ısıl olmayan elektriksel tabanlı gıda işleme yöntemlerinden birisi olarak tanımlanmaktadır (Buckow ve ark., 2013; Barba ve ark., 2018; Zhao ve Yang, 2019). Yüksek voltajlarda kısa süreli elektrik darbelerinin uygulanması ısıl etkilerin düşük seviyelerde kalmasını sağlayıp aynı zamanda gıda ürünlerinde olumsuz bir etkiye neden olmadan gıda matrisi içerisinde biyolojik materyallerin hücre zarını parçalaması veya hücre zarı geçirgenliğini artırması PEF teknolojisini umut verici bir teknik haline getirmektedir (Gomez ve ark., 2019). PEF uygulamaları, gıdadaki hücre membranları üzerinde değişikliğe sebep olduğundan hücre dışına hücre sel sıvı salınımını tetikleyerek veya su tutma özelliklerini etkileyerek gıdaların mikroyapısını ve tekstürünü de modifiye edebilmektedir (Toepfl ve ark., 2014a). Bu bakımdan, keşfinden bugüne dek olan süreçte PEF teknolojisi farklı endüstriyel uygulamaların yanı sıra birçok gıdada çeşitli amaçlarla denenmiş ve elde edilen değerli bilgiler literatüre kazandırılmıştır (Dziadek ve ark., 2019; Oliveira ve ark., 2019). Ancak, laboratuvar veya pilot ölçekli tesislerde çeşitli gıdaların PEF ile işlenmesi detaylı bir şekilde incelenmiş olsa da, söz konusu uygulamanın et ve balık gibi gıdaların üretiminde kullanımına yönelik bilgiler sınırlı sayıdadır. Konuya ilişkin farklı araştırmacılar tarafından yapılan yeni çalışmalarda PEF uygulanmasının et ve et ürünlerinde yumuşaklık, protein sindirilebilirliği ve su tutma kapasitesi gibi fonksiyonel özellikleri geliştirdiği aynı zamanda kurutma, salamura/kürleme ve dondurma gibi işlemlerin daha hızlı gerçekleştiği bildirilmiştir (Khan ve ark., 2018a; Alahakoon ve ark., 2019; Bhat ve ark., 2019a, b, c, d; Chian ve ark., 2019; Bhat ve ark., 2020).

Tüm bunlara rağmen, PEF teknolojisinin endüstriyel uygulamalara entegrasyonunu engelleyen birtakım faktörler de bulunmaktadır. Bunlar arasında henüz endüstriyel çapta güvenilir yüksek yoğunluklu elektrik alan darbe jeneratörünün geliştirilememesi, yüksek yatırım maliyetleri, et ve su ürünleri işleme tesislerinin mevcut geleneksel yerleşim planlarında yapılması gereken kapsamlı değişikliklerin yer aldığı söylenebilir (Khan ve ark., 2018b). Bununla birlikte, gıda sektöründe sıcaklık, nem, pH, besin kompozisyonu, üretim koşullarına ait parametreler, işlem öncesi ve sonrası ürüne uygulanan diğer teknikler (soğutma, dondurma, olgunlaştırma, marinyasyon vb.) gibi çeşitli faktörlerin de ürünün güvenliği ve kalitesi üzerinde oldukça etkili olduğu bilinmektedir. Bu bakımdan PEF teknolojisinin endüstriyel boyuttaki transferi için daha detaylı çalışmalar gerektiği ortadadır. Bu derlemede de, PEF teknolojisinin genel işleyiş mekanizması ile birlikte et ve su ürünlerinde kullanımına yönelik yapılan çalışmalar ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular hakkında bilgiler verilmesi amaçlanmıştır.

Elektroporasyon Mekanizması

1960'lı yıllarda Doevenspeck tarafından elektrik alan uygulamalarının biyolojik hücreler üzerindeki parçalayıcı etkisi kanıtlandıktan sonra, Neumann ve Rosenheck (1972) ve Zimmermann ve ark. (1974) tarafından dielektrik parçalanma teorisi öne sürülmüştür. Buna göre, yüksek yoğunluklu elektrik alana maruz kalan hücre membranı, geçici olarak destabilize olabilir veya geri dönüşümsüz olarak parçalanabilir. Ancak, hücre membranında gözenek oluşumunun yani membran seviyelerinde görüntülenmesinin direkt olarak bir kanıtı yoktur. Mevcut bilgi fenomenolojiktir ve yüzeysel elektrik alan altında düzlemsel çift katmanlı membranlar aracılığı ile elektrik akımı ölçümlerine dayanmaktadır. Bu ölçümler, elektrik alan darbelerine maruz kalan hücre sel dokuların elektriksel iletkenliğinde önemli bir artışın olduğunu göstermektedir. Gözlemlenen bu olay, membranın elektroporasyonu olarak adlandırılmakta ve varsayımsal olarak membranın elektroporasyonu ile açıklanmaktadır (Bouzzara ve Vorobiev, 2003). Elektriksel parçalanma teorisi, hücre membranını dielektrik materyal ile dolu bir kapasitör olarak varsaymaktadır. Membranın her iki tarafında zıt kutuplara sahip yüklerin birikmesi, doğal olarak oluşan bir transmembran potansiyelinin birikmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, PEF uygulaması sırasında gıda iki elektrot arasına yerleştirilmekte ve uygulanan elektrik alanının kuvvet yönü boyunca hücrelerin içinde veya dışında iyonların hareketini tetikleyen yüzeysel bir elektrik alan uygulanmaktadır. Bu durum, hücre membranları üzerinde iyonların birikmesine sebep olarak, membranın her iki tarafındaki zıt yüklü iyonların arasındaki çekim kuvvetleri nedeniyle membran kalınlığının azalmasına neden olan hücre polarizasyonuna yol açmaktadır. Elektrik alan içerisinde bulunan a yarıçaplı küresel bir hücre için hücre membranının iç ve dış yüzeyleri arasındaki transmembran potansiyeli ($\Delta\phi_g$) aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir;

$$\Delta\phi_g = F \times a \times E \times \cos\alpha \quad (1)$$

Bu denklemde, F ; hücrelerin formuna (uzunluk/yarıçap) göre belirlenen bir faktör, a ; yarıçap, E ; uygulanan elektrik alan gücü, $\cos\alpha$; elektrik alan ile hücrelerin kutupları arasındaki açıyı temsil etmektedir (Grahl ve Markl, 1996). Transmembran potansiyeli, bir hücrenin doğal potansiyelinden daha yüksek bir kritik veya eşik değerine ulaştığı takdirde, membranda elektroporasyon veya gözenek oluşumu meydana gelmekte ve böylece hücre membran geçirgenliği artmaktadır. Minimum yarıçapı ~ 1 nm olan primer membran gözenekleri oluşturmak için sıvı lipit katmanının transmembran voltajının en az 0,2 V, genellikle 0,5-1,0 V'a ulaşmasını sağlayacak elektriksel darbelerin kullanılması gerektiği varsayılmaktadır. Transmembran gözeneklerin oluşumunda eğer gözeneklerin miktarı ve boyutu yeterince büyükse, tersinmez membran parçalanması meydana gelmektedir. Ancak, uygulanan yüzeysel elektrik alan gücü, kritik değere eşit veya bu değer civarındaysa, membran geçirgenliğindeki artış tersinirdir (Martin-Belloso ve Soliva-Fortuny, 2010; Weaver, 2000; Bhat ve ark., 2018a). Bu bağlamda, parçalanma ve gözenek oluşum süreci 3 farklı aşamadan oluşmaktadır: (1) gözeneklerin açılması ve oluşumu, (2) gözeneklerin büyümesi, (3) eğer tersinir ise tekrardan kapanması, tersinmez ise parçalanmanın meydana gelmesi şeklindedir. Gözenek oluşumu mikrosaniyeler içerisinde meydana gelirken, oluşan gözeneklerin kapanması yaklaşık 4 saniye sürmektedir (Chang, 1992). Bu teoriden yola çıkıldığında, elektroporasyonun veya gözenek oluşumunun meydana gelebilmesi için elektrik alan yoğunluğu kritik değeri aşmalıdır (Barbosa-Canovas ve Sepulveda, 2005). Elektroporasyonu sağlamak için gerekli elektrik alan gücü, gidanın özellikleri (sıvı, viskoelastik veya katı, dielektrik özellikleri), işlem parametreleri (sıcaklık, darbe uzunluğu, yoğunluk, darbe sayısı), hücre özellikleri (tür, boyut, şekil), membran karakteristiği (iyonik güç, kalınlık ve yapı) gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Toepfl ve ark., 2014b). Elektroporasyon meydana geldikten sonra kütle transferinden sorumlu, yarı-geçirgen bir bariyer olarak görev alan hücre membranının yapısı önemli derecede değişmektedir. Bunun sonucunda, membran geçirgenliği artmakta ve ekstraksiyon, mikrobiyal inaktivasyon gibi çeşitli işlemler daha kolay gerçekleşmektedir (Korma ve ark., 2016).

PEF Uygulamalarının Et ve Et Ürünleri Üzerindeki Etkisi

PEF uygulamasının, süt, süt ürünleri, sıvı yumurta, meyve suyu, şarap, bira ve diğer alkollü içecekler gibi sıvı gıdaların endüstriyel pastörizasyonu ve sterilizasyonu üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiş olsa da, katı gıdalara, özellikle de et ve et ürünlerine ilişkin çalışmalar 2010'lu yılların başlarında yapılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda, PEF uygulamalarının mikroyapısal değişikliklere sebep olarak fonksiyonel özellikleri ve kaliteyi geliştirebilmesinden dolayı et ve et ürünlerinin işlenmesinde kullanımına ilişkin ilgi yakın zamanda önemli derecede artmıştır. Ancak, et ve et ürünlerinin yapısı ve bileşimindeki farklılıklardan dolayı PEF uygulamalarının bu gibi gıdalarda etkisi oldukça karmaşıktır. Etin yapısındaki bu farklılıklar, hayvanın türü, yaşı, cinsi, yetiştirilme şekli, etin pre- veya post-rigor

durumu, et olgunlaştırma yöntemi ve dondurma-çözündürme işlemleri gibi birçok faktöre bağlıdır (Farouk ve ark., 2014; Khan ve ark., 2015; Choe ve ark., 2016). PEF uygulamalarının et kalitesi ve işlevselliği üzerine olan etkisi, elektroporasyon nedeniyle meydana gelen fiziksel mikroyapısal değişiklikler ile PEF uygulaması sırasında ve sonrasında oluşan kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlar arasındaki kombine ve karmaşık etkileşimlerin bir sonucudur (Alahakoon ve ark., 2017). McDonnell ve ark. (2014)'na göre, hücre membranının permeabilizasyonuna sebep olabildiğinden dolayı PEF, tekstür, renk, su tutma kapasitesi gibi etin kalite parametrelerini modifiye edebilmekte ve kütleme ve salamura emilimi gibi kütle transferi işlemlerini geliştirebilmektedir. Diğer yandan, kurutma, dondurarak depolama ve tuzlama gibi et muhafazası için kullanılan geleneksel yöntemlerin ürünün mikroyapısı üzerinde olumsuzluklara sebep olduğu bilinmektedir (Gudmundsson ve Hafsteinnsson, 2001). Bu bakımdan, PEF teknolojisinin bu alanda önemli bir potansiyel ihtiva ettiği söylenebilir. Ancak, uygulama sırasında termo-elektrik etkiden dolayı elektriksel enerjinin bir kısmının ısıya dönüşerek ürünün fiziksel ve kalite özelliklerini etkilemesi gibi birtakım olumsuz faktörlerin de dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır (Gomez ve ark., 2019).

Etin Olgunlaştırılması ve Yumuşaklığı Üzerine Etkisi

Kesim sonrası hayvan kaslarında moleküler değişiklikler devam etmektedir ve bu süreç (I) esasen kollajen içeriğinin sertliğe sebep olduğu pre-rigor fazı, (II) sertliğin kas kasılmasından kaynaklı olduğu rigor fazı ve (III) kasların birtakım değişikliklere maruz kaldığı ve görülebilir bir yumuşamanın gerçekleştiği yumuşama fazı olmak üzere üç faza ayrılır. Yumuşama fazı büyük ölçüde olgunlaştırma süresi, sıcaklığı, kas tipi ve hayvan türü gibi faktörlere bağlıdır (Longo ve ark., 2015). Etin önemli kalite parametreleri olgunlaştırma sırasında meydana gelmekte ve en önemli özelliği olan yumuşaklığın olgunlaştırma süresi ile arttığı bilinmektedir. Et yumuşaklığı, bağ dokuların miktarı ve çözünürlüğü, rigorun gelişmesi sırasında sarkomer kısalması ve miyofibriller proteinlerin post-mortem proteolizi ile belirlenmektedir (Koochmarai ve Geesink, 2006). PEF teknolojisi, erken post-mortem sırasında karkası uyarıp yumuşaklığın geliştirilmesi için et endüstrisinde kullanılan elektriksel uyarım tekniğine benzediğinden dolayı bu konuda öne sürülen bazı mekanizmaların PEF için de geçerli olabileceği belirtilmektedir (Bekhit ve ark., 2014). Elektriksel uyarımın kesme kuvveti üzerindeki etkisini açıklamak için üç önemli mekanizma öne sürülmüştür; (I) rigorun daha hızlı başlaması, (II) şiddetli kas kasılmalarından kaynaklı sarkomerlerin fiziksel parçalanmasının bir sonucu olarak kas liflerinin zayıflaması ve (III) kalsiyum iyonlarının salınımına yol açarak kalsiyum tarafından aktive edilmiş çeşitli enzimler sonucunda proteolizin hızlanmasıdır (Hwang ve ark., 2003; Bekhit ve ark., 2014).

Ette yumuşaklığın oluşması miyofibriller proteinlerde şekillenen değişiklikler ile yakından ilgilidir. Bu değişikliklerin büyük bir kısmı da proteolitik enzimler (katepsinler, kalpainler, kaspazlar) tarafından şekillendirilmektedir. Kalpainlerin (kalpain 1 ve 2), post-mortem proteoliz ve yumuşamadan sorumlu temel

proteazlar olduğu bilinmekte olup aktiviteleri pH, sıcaklık ve hücre içi kalsiyum konsantrasyonu gibi çeşitli post-mortem faktörlere bağlıdır. Kalpain-2, aktivasyon için yüksek kalsiyum miktarına ihtiyaç duyduğundan dolayı olgunlaştırmanın erken aşamalarında normal olarak aktive olmamaktadır (Laville ve ark., 2009; Bhat ve ark., 2018b; Bhat ve ark., 2019c). PEF uygulamasının ($T_1 = 0,38$ kV/cm, 5 kV, 90 Hz, 20 μ s; $T_2 = 0,61$ kV/cm, 10 kV, 20 Hz, 20 μ s), elektroporasyon aracılığı ile kalsiyum iyonlarının sarkoplazmik retikulumdan erken salınımına sebep olarak kalpain-2'nin erken post-mortem aktivasyonuna sebep olduğu ve sığır kasında kalpain aktivitesini geliştirerek kesme kuvvetini azalttığı tespit edilmiştir (Bhat ve ark., 2019c). Aynı zamanda, lizozomlarda inaktif olarak bulunan katepsinler de miyofibril degradasyonunda aktif olabilmek için PEF tarafından oluşturulan koşullar altında lizozomlardan serbest kalarak etin elektrik alan uygulamaları sayesinde yumuşamasında diğer bir faktör olarak yerini almaktadır (Bekhit ve ark., 2014).

Konuya ilişkin Bekhit ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, farklı şiddetteki PEF uygulamalarının (0,29-0,56 kV/cm, 5-10 kV, 20-50-90 Hz, 20 μ s, 606-2726 adet darbe) taze (çiğ) sığır etlerinin (bonfile ve traç) yumuşaklığı üzerine etkisi incelenmiş ve sığır bonfile etlerinde PEF ile muamele edilen örneklerin kontrol grubuna kıyasla işlem yoğunluğundan bağımsız olarak kesme kuvvetinde %19,5 azalma olduğu, sığır traç örneklerinde de yumuşaklığın uygulama yoğunluğunun artmasıyla birlikte artış gösterdiği ve 20, 50, 90 Hz'lik uygulamalarda kesme kuvvetinde sırasıyla %4,1, %10,4 ve %19,1'lik bir azalma olduğu belirlenmiştir.

Suwandy ve ark. (2015a) tarafından yapılan başka bir çalışmada, tekrarlı (1 \times , 2 \times veya 3 \times) PEF uygulamalarının (0,58 kV/cm, 10 kV, 90 Hz, 20 μ s) çiğ sığır etlerinin (bonfile ve traç) yumuşaklığı üzerindeki etkisi incelenmiş olup sığır bonfile etlerinde PEF ile işlenen örneklerin kesme kuvvetinin önemli derecede azaldığı ve her ekstra uygulama ile kesme kuvvetinde fazladan 2,5 N azalma sağlandığı belirlenmiştir. Araştırmada, kesme kuvvetindeki azalmanın, PEF uygulamasından kaynaklı örneklerde hem sıcaklık artışından (1 \times , 2 \times ve 3 \times için sırasıyla 8,5°C, 12,6°C ve 16,2°C) dolayı kalpain aktivitesinin artarak erken aşamalarda proteolize yol açmasından hem de kasta aşırı kasılmalar meydana gelmesi sonucunda miyofibril ve sarkomer yapısının zarar görmesinden kaynaklandığı bildirilmiştir. Ancak, sığır bonfile örneklerinin aksine traç örneklerinin, PEF uygulamalarından ve bahsedilen mekanizmalardan etkilenmediği de belirtilmiştir (Suwandy ve ark., 2015a).

Chian ve ark. (2019) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, kontrol grubuna kıyasla PEF uygulanan (1-1,25 kV/cm, 50 Hz, 20 μ s, 500 ve 2000 adet darbe) çiğ sığır eti örneklerinde sarkomer uzunluğunun önemli ölçüde daha fazla olduğu bulunmuş olup artan uygulama yoğunluğu ile sarkomer uzunluğunun daha da arttığı bildirilmiştir. Bu durum, PEF uygulamasının kas liflerinin fiziksel parçalanmasına sebep olduğunu göstermektedir. Söz konusu çalışmada, sarkomerlerdeki uzamanın, Z-disk ve I-bant bağlantılarının zayıflamasından kaynaklandığı ve miyofibrillerdeki gerilme kuvvetinin azalması ile post-mortem olgunlaştırma süreci boyunca endojen proteolitik enzimlerin etkisinin artmasından dolayı kas yapısının

fiziksel olarak parçalanmasının etin yumuşaklığı ile pozitif bir korelasyona sahip olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, kas yapısının parçalanması ve hem lizozomlardan salınan katepsinlerin, hem de sarkoplazmik retikulumdan salınan ve kalsiyum ile aktive edilen kalpainlerin etkileşiminden dolayı PEF uygulaması ile et olgunlaştırma sürecinin hızlandırılabilceği ve dolayısı ile yumuşaklığın geliştirilebileceği bildirilmiştir (Chian ve ark., 2019).

Renk Üzerine Etkisi

Renk ve renk stabilitesi, etin önemli bir kalite parametresidir. Etin depolanması sırasında, kas yüzeyinde açıkça görülebilir renk değişimleri meydana gelmekte ve tüketicinin tercihini etkilemektedir. Tüketiciler tarafından kırmızı-pembe renk tazelik ile ilişkilendirilirken, kahverengi renk tazeliği azalmış ve/veya bozulmuş ürün olarak algılanmaktadır. Kas yüzeyinin rengi esasen, miyogloblin miktarı ve redoks durumu ile belirlenmektedir. Genel olarak, miyogloblin, deoksimiyogloblin (DeoMb), oksimiyogloblin (OxyMb) ve metmyogloblin (MetMb) olmak üzere üç redoks formda bulunmaktadır. Kas yüzeyinde oksijenin etkisi ve penetrasyonu, pembemsi-kırmızı miyogloblinin hızlı bir şekilde parlak kırmızı oksimiyoglobline oksijenasyonuna ve yavaş bir şekilde kahverengi metmyoglobline ootooksidasyonuna sebep olmaktadır. Oksijen penetrasyonunun derinliği ile miyogloblin, oksimiyogloblin ve metmyogloblinin nispi miktarı, kas renginin parlaklık ve doygunluk derecesini etkilemektedir (Feldhusen ve ark., 1995; Wu ve ark., 2016).

Konuya ilişkin Arroyo ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada, yüksek hidrostatik basınç gibi diğer teknolojilere kıyasla farklı yoğunluklardaki PEF uygulamasının (1,4 kV/cm, 10 Hz, 20 μ s, 300-600 adet darbe) sığır etinin L*, a* ve b* değerleri üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye sebep olmadığı belirtilmiştir. Khan ve ark. (2017) tarafından yapılan başka bir çalışmada, yüksek yoğunluklu (10 kV, 200 Hz, 20 μ s) PEF uygulanan sığır etlerinin 24 saat bekletildikten sonra kontrol ve düşük yoğunluklu (2,5 kV, 200 Hz, 20 μ s) PEF uygulanan örneklerle kıyasla parlaklık (L*) değerinin çok daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu durum, yüksek yoğunluklu PEF işleminde uygulama sırasında daha fazla ısı üretiminden (40,5°C) kaynaklı düşük su tutma kapasitesinin et yüzeyinde daha fazla nemlenmeye yol açıp daha fazla ışığın yüzeyden yansiyarak daha açık bir renge sebep olması ile açıklanmıştır. Yüksek yoğunluklu PEF grubuna kıyasla kontrol ve düşük yoğunluklu PEF gruplarında daha yüksek a* değeri tespit edilmiştir. 1. günün sonunda yüksek yoğunluklu PEF grubunda çok hızlı bir renk kaybı olduğu gözlenmiş ve bunun söz konusu işlemde oluşan nispeten yüksek ısının örneklerin antioksidan kapasitesini olumsuz yönde etkileyip, miyogloblinin metmyoglobline daha yüksek oranda oksidasyonuna yol açmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Aynı zamanda, yüksek yoğunluklu PEF ile işlenen örnekler, uygulama sonrası 1. günde diğer örneklerle kıyasla daha yüksek b* değeri sergilemiştir. Genel olarak, et örneklerinin zamana bağlı b* değeri azalmış ve 14. gün sonunda yüksek yoğunluklu PEF ile muamele edilen örneklerin maksimum b* değerlerine ulaşmada a* değerlerinde olduğu gibi bir gecikme tespit edilmiştir. Araştırma neticesinde, düşük yoğunluklu PEF ile işlenen örneklerin kontrol ve diğer gruba kıyasla daha

iyi renk stabilitesine sahip olduğu bildirilmiştir. Khan ve ark. (2018a) tarafından tavuk göğüs etinde yapılan farklı bir çalışmada ürünün L* ve b* değerlerinin uygulamadan etkilenmediği, ancak, düşük yoğunluklu (2,5 kV, 200 Hz, 20 µs) PEF ile işlenen numunelerin kırmızılık (a*) değerinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Su Tutma Özellikleri Üzerine Etkisi

Su, kas türüne, kesim yaşına ve hayvan tipine bağlı olarak kas içerisinde %70-80 arasında değişen oranlarda bulunan en yaygın bileşendir. Ette aşırı su kaybı, birkaç sebepten dolayı kalite kayıplarına sebep olur; (I) et etrafında sızan su hoş olmayan bir görüntü oluşturur, (II) pişme sırasında hem etin boyutunda hem de (III) yumuşaklık veya sululuk gibi duyuşsal özelliklerinde kayba sebep olarak etin albenisini düşürür (Toldra, 2003). Et miyofibrillerinin, etin su tutma kapasitesinden sorumlu olduğu bilinmektedir. Genel olarak kas proteinlerinin, özellikle miyosinin denatürasyonu, etin su tutma kapasitesinde azalmaya sebep olmaktadır (Suwandy ve ark., 2015b). Su tutma kapasitesi az ise ette pişme kaybı ve sızıntı firesi (su salması) de fazla olup ürün üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Hücreler ve elektrik alan arasındaki etkileşimden kaynaklı membran yapısının parçalanması da, bileşenlerin hücre içerisinden ortama serbestçe değişimine izin verecek gözeneklerin oluşmasına neden olduğundan, permeabilizasyonun bir sonucu olarak mikroyapı ve tekstürdeki değişiklikler kasın su tutma kapasitesini etkileyebilir (Faridnia ve ark., 2014).

Yapılan çalışmalara bakıldığında, O'Dowd ve ark. (2013) PEF uygulamalarının (1,1-2,8 kV/cm, 5-200 Hz, 20 µs, 152-300 adet darbe) sığır etinin su salma, nem ve su aktivitesi değerlerinde kaliteyi olumsuz etkileyecek bir değişiklik yaratmadığını, ancak işlem yoğunluğu arttıkça (elektrik alan gücü, toplam enerji girişi ve darbe sayısı) kütle kaybında artış gözlemlendiğini bildirmiştir. Bekhit ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada ise PEF uygulamalarına (0,29-0,56 kV/cm, 5-10 kV, 20-50-90 Hz, 20 µs, 606-2726 adet darbe) ait artan voltaj ve frekans değerleri ile taze sığır etinde sızıntı firesinin arttığı tespit edilmiştir. Faridnia ve ark. (2014) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, PEF uygulamasının (0,2-0,6 kV/cm, 1-50 Hz, 20 µs) sığır etinde nem içeriğini %0,7-3,6 oranında azalttığı, daha gözenekli bir yapı oluştuğundan dolayı daha fazla su kaybının meydana geldiği ancak pişme kaybının etkilenmediği ifade edilmiştir. Suwandy ve ark. (2015b), PEF uygulamasında voltaj ve frekans değerlerinin artırılmasının pre-rigor sığır etinde sızıntı firesini etkilemediğini, ancak pişme kaybında %1,2'lik artışa sebep olduğunu bildirmiştir. Khan ve ark. (2017) tarafından yapılan başka bir çalışmada, yüksek yoğunluklu (10 kV, 200 Hz, 20 µs) PEF uygulamasına kıyasla düşük yoğunluklu (2,5 kV, 200 Hz, 20 µs) PEF'in sığır etinde sızıntı firesini etkilemediği ve pişme kaybını hafif de olsa azalttığı bildirilmiştir. Bhat ve ark. (2019a) tarafından yapılan çalışmada ise, olgunlaştırma periyodu boyunca hem kontrol örneklerinin hem de PEF uygulanmış örneklerin sızıntı firesindeki artışın aynı olduğu gözlemlenmiş olup PEF uygulamalarının (0,36-0,60 kV/cm, 5-10 kV, 20-90 Hz, 20 µs) olgunlaştırma periyodu boyunca (7. ve 14. günlerde) sığır etinin pişme kaybı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı bildirilmiştir.

Protein Sindirilebilirliği Üzerine Etkisi

Proteinlerin sindirilebilirlik oranı, diyetle bulunan proteinlerin biyoyararlılığını etkileyen ana faktördür. Et proteininin sindirim kinetiği, fiziksel, kimyasal ve enzimatik koşullara bağlı çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Kondjoyan ve ark., 2015; Primozic ve ark., 2017). PEF uygulamasının, hücre membranlarını parçalayıp elektrostatik veya hidrofobik etkileşimlerle birlikte disülfid veya hidrojen bağlarına etki ederek proteinlerin kuarterner, tersiyer ve sekonder yapılarını etkileyebileceği ve böylece proteinlerin sindirilebilirlik niteliğini geliştirebildiği belirtilmiştir (Giteru ve ark., 2018). Diğer bir ifadeyle, söz konusu tekniğin bireysel polipeptid zincirlerinin elektrostatik etkileşimlerini ve lokal elektrostatik alanlarını bozarak, proteinlerin sekonder ve tersiyer yapılarının destabilizasyonunu sağlayabildiği ve protein yapısındaki homojen olmayan bu yük dağılımının yanı sıra işlem sırasında oluşan ısının da (protein denatürasyon seviyesine yakın bir derecede) ısıya duyarlı proteinlerin denatürasyonu ve agregasyonunda kilit bir rol oynayabileceği ifade edilmiştir (Bhat ve ark., 2019b, d). Bu bağlamda, Bhat ve ark. (2019b) tarafından yapılan çalışmada, PEF uygulamasının (10 kV, 20 Hz, 20 µs) pişmiş sığır etinde *in vitro* protein sindirilebilirliğini (%94) kontrol grubuna (%92) göre arttırdığı ve PEF uygulanmış örneklerde sindirim sırasında daha fazla ve hızlı enzimatik hidroliz meydana geldiği belirlenmiştir. Bhat ve ark. (2019e) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, mineral madde içeriğinde olumsuz bir etki olmaksızın geyik etinde PEF ön işlem uygulamalarının (T₁ = 2,5 kV, 50 Hz, 20 µs; T₂ = 10 kV, 90 Hz, 20 µs) *in vitro* protein sindirilebilirliğini (T₁ = %92,81, T₂ = %93,35) kontrol grubuna (%91,69) göre arttırdığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda PEF tekniğinin, etin çözünür protein ve serbest amino asit içeriğinde de belirgin bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Chian ve ark. (2019) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, *in vitro* protein sindirilebilirliği farklı sürelerde (0, 60, 180 dak) salınan serbest amino asitlerin ninhidrin reaksiyonu ile ölçülmüş ve PEF uygulamasının (1-1,25 kV/cm, 50 Hz, 20 µs, 500 ve 2000 adet darbe) çiğ sığır eti örneklerinin ince bağırsaktaki protein sindirilebilirliğini (180. dak, %11,9-12,2) kontrol grubuna kıyasla (180. dak, %9-10,4) arttırdığı tespit edilmiştir.

Mineral İçeriği ve Salınımı Üzerine Etkisi

Et matrisi içerisinde bağlı formda bulunan mineraller, mide ortamında asidik pH'da peristaltik hareketler ve mide enzimlerinin etkileşimi ile salınarak pasif ve aktif taşıma ile ince bağırsakta emilirler (Alminger ve ark., 2014; Corte-Real ve Bohn, 2018). Et, demir, fosfor ve çinko gibi mineraller açısından önemli bir kaynak olduğundan dolayı bu minerallerin miktarında azalmaya sebep olabilecek bir işlemin etin ticari değerini olumsuz yönde etkileyeceği belirtilebilir. PEF uygulamasının, hücre membranlarında gözenekler oluşturması ve hücrel geçirgenliği artırması bakımından işleme ve depolama sırasında etin mineral içeriği üzerinde etkisi olabileceği ifade edilmiştir (Bhat ve ark., 2019b). Ancak, yapılan çalışmalarda PEF uygulamasının et ve et ürünlerinin mineral içeriğine etkisi ile ilgili bilgiler henüz oldukça kısıtlı niteliktedir. Khan ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada, sızıntı firesinin daha fazla olmasından dolayı yüksek yoğunluktaki (10 kV, 200 Hz ve 20 µs) PEF uygulamasına tabi tutulan çiğ sığır

eti örneklerinde fosfor, potasyum ve demir içeriğinin düşük yoğunluklu (2,5 kV, 200 Hz ve 20 µs) işlem ve kontrol grubundaki örneklere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. PEF uygulamasının tavuk göğüs etinin mineral içeriğine etkisinin incelendiği farklı bir çalışmada, düşük (2,5 kV, 200 Hz, 20 µs) veya yüksek yoğunluklu (10 kV, 200 Hz, 20 µs) uygulamaların ürünün mineral profili üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye sebep olmadığı bildirilmiştir (Khan ve ark., 2018a). Khan ve ark. (2018b)'nin bir diğer çalışmasında ise, düşük ve yüksek yoğunluklu PEF uygulamalarının (sırasıyla 2,5 ve 10 kV, 200 Hz, 20 µs) sığır bonfile ve tavuk göğsünde bulunan toplam 40 adet makro- ve mikro-mineral üzerindeki etkisi incelenmiş olup, hem yüksek hem de düşük yoğunluklu uygulamaların çiğ sığır eti örneklerinde kalsiyum, sodyum ve magnezyum içeriğini azaltırken, yüksek yoğunluklu işlemin örneklerdeki krom içeriğini arttırdığı (işlem yoğunluğuna bağlı olarak elektrotlardan örneklere mineral madde migrasyonu) tespit edilmiştir. Çiğ tavuk göğsü örneklerinde ise işlem yoğunluğuna bakılmaksızın PEF uygulamalarının tavuk göğsü örneklerindeki makro-mineraller (sodyum, magnezyum, kalsiyum gibi) üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye neden olmadığı ancak yine migrasyona bağlı olarak özellikle yüksek yoğunluklu işlemin numunelerin nikel içeriğini arttırmasının yanı sıra her iki uygulamanın örneklerdeki bakır içeriğini de arttırdığı bildirilmiştir. Bhat ve ark. (2018c) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, PEF uygulamasının (5-10 kV, 20-90 Hz, 20 µs) sığır etinin demir, potasyum, fosfor, kalsiyum, sodyum, magnezyum, krom ve nikel gibi mineralleri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Tuzlama ve Kürlenme Gibi İşlemlerde Kütle Transferi ve Difüzyon Üzerine Etkisi

Basit bir ifadeyle, geleneksel tuzlama işlemi hammaddeyi katı tuzla kaplamak veya ovalamak suretiyle uygulanmaktadır. Et ve et ürünlerinde tuzlamanın genel amacı, gıda muhafazası ile birlikte üründe tat, koku ve aroma gelişimini sağlamaktır. Ancak, hücre membranları, kas dokusundaki tuzun serbest difüzyonuna direnç gösterdiğinden dolayı etlerin kürlenme ve salamuralama sürecinde önemli bir rol oynamaktadır (Albarracin ve ark., 2011; Bhat ve ark., 2018a). Yüksek basınç ve ultrases gibi diğer ısıl olmayan teknolojiler, sodyumun et matriksinden difüzyonu ve salınımı, protein ve tuz iyonları arasındaki etkileşim ve duyuşsal algılar gibi çeşitli faktörleri etkileyerek, kürlenmede kütle transferini geliştirebilmektedir (Inguglia ve ark., 2017). PEF uygulamasının kütle transferi üzerindeki etkisi, alan gücü, frekans ve darbe sayısı gibi parametrelere bağlı olup en önemli parametre elektrik alan gücüdür. Bununla birlikte, yüksek enerji girişi, et yüzeyinde kabuk oluşumuna sebep olarak kütle transferini kısıtlayabilmektedir. Dolayısıyla, kas hücre membranında yüksek derecede elektroporasyon elde etmek ve kürlenme ajanlarının emilimini hızlandırmak için uygulama süresi ve darbe sayısı optimize edilerek, hücre membranı permeabilizasyonunu sağlayan etkili bir elektrik alan uygulaması ile birlikte salamura emiliminin maksimize edilebileceği belirtilmektedir (McDonnell ve ark., 2014).

Toepfl ve Heinz (2007), PEF uygulamasından sonra salamura çözeltisine daldırılan domuz etinde, tuz ve nitrat

difüzyonunun geliştiğini bildirmiştir. Ayrıca, düşük yoğunluklu PEF uygulamasından sonra etten kütle transferinin (nemin uzaklaştırılması) daha hızlı gerçekleştiği tespit edilmiş ve yüksek enerji girişinin üründe kütle transferini kısıtlayan kabuğumsu bir yapı oluşumuna neden olduğundan 3 kV/cm ve 5 kJ/kg yoğunluğundaki PEF uygulamasının, 4 kV/cm ve 20 kJ/kg yoğunluğa sahip uygulamaya kıyasla daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. McDonnell ve ark. (2014) tarafından yapılan başka bir çalışmada da, domuz etinin daha hızlı ve etkili bir şekilde tuzlanması için bir ön işlem olarak PEF uygulamasının (22,6-181 kJ/kg, 1,2-2,3 kV/cm, 100-200 Hz, 150-300 adet darbe) etkinliği incelenmiş ve düşük frekanslarda fazla sayıda darbe uygulanması ile daha fazla elektroporasyon meydana geldiği ve böylece tuz difüzyonunda %10,4-13 artış olduğu bildirilmiştir. Bir diğer çalışmada farklı bir bakış açısıyla Bhat ve ark. (2020) tarafından kurutulmuş sığır etlerinde sodyum içeriğinin azaltılması için alternatif bir yöntem olarak PEF uygulamasının (0,52 kV/cm, 10 kV, 20 Hz, 20 µs) etkinliği araştırılmıştır. Araştırmada tuz içeriği %2 olan kontrol örneği ile sadece tuz içeriği azaltılmış ($T_1 = \%1,2$ tuz) ve hem tuz içeriği azaltılmış hem de PEF ile muamele edilmiş örneklerin ($T_2 = \%1,2$ tuz + PEF) çeşitli kalite parametreleri incelenmiştir. Çalışma neticesinde, PEF tekniğinin tuz difüzyonunu ve ürün matriksi içerisinde dağılımını etkileyerek çığneme sırasında sodyum salınımını ve algısını geliştirdiği belirtilerek, panelistlerin çoğunun tuz içeriği azaltılmış örneklerden PEF ile ön işleme tabi tutulmuş olanları (T_2) tercih ettiği tespit edilmiştir. Araştırma sonucunda, PEF katkılı ön işlemin kurutulmuş et ürününün duyuşsal kalitesi, lipid oksidasyonu ve mikrobiyal stabilitesi üzerinde herhangi bir olumsuzluğa sebep olmaksızın tuz (NaCl) miktarını önemli derecede (%40) azaltabileceği vurgulanmıştır (Bhat ve ark., 2020).

Antimikrobiyal Etkisi

Isıl olmayan gıda muhafaza teknikleri için en geçerli alternatiflerden biri olarak kabul edilen PEF, süt, meyve suları ve sıvı yumurta gibi çoğunlukla sıvı ve yarı-katı gıdaların ısıl olmayan pastörizasyonu ve sterilizasyonu amacıyla oldukça detaylı bir şekilde incelenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Toepfl ve ark., 2014b). Ancak, sıvı gıdaların aksine PEF teknolojisinin, düşük elektriksel iletkenliğinden ve yüksek protein/yağ içeriğinden dolayı et ve et ürünlerinde mikrobiyal güvenliğin sağlanması amacıyla kısıtlı bir uygulanabilirliğe sahip olduğu belirtilmiştir (Bolton ve ark., 2002). Buna ek olarak, farklı elektriksel dirence sahip heterojen ürünler olduklarından dolayı uygulamada ürünün bir kısmı işlem görmeden kalırken, bazı kısımlarının ise aşırı işlem yoğunluğuna maruz kaldığı ifade edilmiştir (Faridnia ve ark., 2015). Konuyla alakalı olarak Stachelska ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada farklı darbe frekanslarında PEF uygulamalarından (0,3 kV/cm, 28, 280 ve 2800 MHz) sonra +4°C'de 3 gün ve -20°C'de 1 ay depolanan sığır kıymalarındaki *Y. enterocolitica* ATCC 35669 inhibisyonu incelenmiştir. Araştırmada, 28 ve 280 MHz'lik PEF uygulamalarının kıyma örneklerindeki *Y. enterocolitica* inhibisyonunda yetersiz olduğu bulunurken, 2800 MHz'lik PEF uygulamasının +4°C'de 3 gün ve -20°C'de 1 ay depolanan sığır kıymalarındaki başlangıç *Yersinia*

enterocolitica popülasyonunu 6,7 log kob/g değerinden 6,4 log kob/g değerine düşürdüğü gözlenmiştir. Farklı bir çalışmada, Haughton ve ark. (2012) tarafından PEF uygulamasının (3,75 ve 15 kV/cm, 5 Hz, 10 µs) çığ tavuk etine kontamine edilen indikatör mikroorganizmalar ve gıda kaynaklı patojenler üzerindeki inhibisyon etkinliği incelenmiştir. Söz konusu araştırmada incelenen koşullar altında PEF uygulamasının, çığ tavuk etindeki *Enterobacteriaceae*, *C. jejuni*, *E. coli* ve *S. enteritidis* popülasyonları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ve dolayısıyla tavuk etinin mikrobiyal güvenliğinin sağlanmasında etkin bir teknoloji olmadığı bildirilmiştir. Faridnia ve ark. (2015), -20°C'de 1 hafta dondurulmuş ve sonrasında çözündürülmüş kontrol grubu sığır etlerinin +4°C'de 7 günlük depolama sonrası aerobik mikrobiyal popülasyonuna (3,10 log kob/g) kıyasla aynı şekilde dondurulmuş/çözündürülmüş ancak ardından PEF ile işlenmiş (1,4 kV/cm, 250 kJ/kg spesifik enerji girişi, 50 Hz ve 20 µs) örneklerin aynı süre ve sıcaklıkta muhafazası esnasında (+4°C'de 7. gün) logaritmik faz boyunca daha yüksek aerobik mikrobiyal popülasyona (5,02 log kob/g) sahip olduğunu bildirmiştir. Araştırmacılar, yaklaşık 2 log birimlik bu önemli artışı, dondurulmuş/çözündürülmüş ve ardından PEF ile işlenmiş örneklerin 7 günlük soğukta depolanmasından sonra gözlemlenen daha yüksek sızıntı firesi (%4,84 olan kontrol grubuna kıyasla %6,67) ile ilişkilendirmiştir. Daha güncel olarak Clemente ve ark. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, öncelikle çeşitli uçucu yağların ve organik asitlerin *Campylobacter jejuni* suşları üzerindeki antimikrobiyal etkisi incelenmiş, ardından PEF işleminin (20 kV/cm, 1 Hz, 20 µs, 50 adet darbe) süspanse haldeki *C. jejuni* suşları (Mueller Hinton Broth, 5-6 log kob/mL) üzerine inhibisyon etkisi araştırılmıştır. Yapılan bu incelemelerde kekik yağı en etkili antimikrobiyal ajan olarak tespit edilirken, PEF işlemine en dirençli suş ise *C. jejuni* 1146DF olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise çığ tavuk örnekleri, tespit edilen en dirençli suş ile hazırlanan süspansiyona batırılmıştır. Bu işlemin ardından *C. jejuni* 1146DF suşu ile kontamine edilen çığ tavuk etlerine (4,41 log kob/g), PEF uygulaması (0,25, 0,5, 0,75, 1 kV/cm, 1 Hz, 20 µs, 50 adet darbe) hem tek başına hem de en etkili konsantrasyondaki (15,625 ppm) kekik uçucu yağı ile birlikte uygulanarak söz konusu işlemlerin *C. jejuni* 1146DF suşu üzerine inhibisyon etkisi incelenmiştir. Tek başına PEF uygulaması, çığ tavuk etindeki *C. jejuni* 1146DF inhibisyonu için etkili olmazken, örneklerin 1 kV/cm gücünde 50 elektriksel darbeleri PEF ile işlenmesini takiben içerisinde 15,625 ppm kekik uçucu yağı bulunan çözeltiye 20 dakika boyunca daldırılması, *C. jejuni* 1146DF suşunda önemli derecede inhibisyon (1,5 log kob/g azalma) sağlamıştır. Araştırmacılar, elde edilen inhibisyon seviyesinin, sıcak suya daldırma (75-85°C, 10-30 s, 1,7 log kob/g azalma) veya buhar uygulama (90-100°C, 10-12 s, 1,3 log kob/g azalma) gibi tavuklarda dekontaminasyonu için genel olarak kullanılan yöntemlere eşdeğer olduğunu bildirmiş ve kekik uçucu yağı ile kombine PEF uygulamasının 1 kg tavuk başına 2,12 kJ gibi düşük bir enerji girişi ile herhangi bir ısıtma veya soğutmaya ihtiyaç duyulmaksızın, tavuk etinde görülen ısıl işlemlere ilişkin muhtemel negatif etkileri (deri büzüşmesi, renk değişimi, dış epidermal deri dokusunda görünür zararlanmalar) ortadan kaldırarak düşük sıcaklıklarda tavuğun

dekontaminasyonu için umut verici bir alternatif olduğunu öne sürmüşlerdir (Clemente ve ark., 2020).

Yapılan çalışma sonuçlarına göre, PEF teknolojisinin tek başına et ve et ürünlerinde mikrobiyal güvenliği sağlamak için kullanılabilir alternatif ve geçerli bir yöntem olmadığı açıkça görülmektedir. Et ve benzeri gıdalarda gıda güvenliği ve mikrobiyal inaktivasyon açısından daha iyi sonuçlar elde edebilmek için PEF teknolojisinin, yüksek hidrostatik basınç, ultraviyole ışık, yüksek yoğunluklu vurgulu ışık, ultrason ve antimikrobiyal ajan ilavesi gibi diğer uygulamalar ile kombine halde kullanımının araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

Lipit Oksidasyonu Üzerine Etkisi

Lipit oksidasyonu, etin kalitesini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Etin PEF ile işlenmesi, kas hücrelerinin membranlarını parçalayarak, doymamış yağ asitleri ve hücre membranı fosfolipitleri ile etteki pro-oksidanların etkileşimini kolaylaştırdığı belirtilmiştir (Faridnia ve ark., 2015). Bu durumda, doymamış yağ asitleri moleküler oksijen ile reaksiyona girerek, hidrokarbonlar, aldehitler, ketonlar, alkoller, esterler ve asitler gibi çok sayıda sekonder ürünlere parçalanmış ve ürünlerde hem besinsel hem de duyu kaliteyi olumsuz etkileyen serbest radikalleri ve hidroperoksitleri oluşturabilmektedir (Dominguez ve ark., 2019). Ürün kalitesini olumsuz yönde etkileyen lipit oksidasyonunun derecesi ise, etin bileşimine özellikle de yağ asidi ve antioksidan içeriğine, sıcaklığa ve diğer işlem parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Danowska-Oziewicz, 2009). Bu parametrelerin haricinde işlem öncesi/sonrası soğutma ve dondurma gibi uygulamalar ile depolama koşulları da PEF ile işlenmiş etin lipit oksidasyonunu artırma potansiyeline sahiptir (Faridnia ve ark., 2015; Ma ve ark., 2016).

Faridnia ve ark. (2015), PEF uygulamasından (1,4 kV/cm, 250 kJ/kg spesifik enerji girişi, 50 Hz ve 20 µs) önce bir ön işlem olarak dondurmanın (-20°C'de 1 hafta), sığır kaslarının kalite özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve kontrol grubuna (TBARS değeri ~0,70 mg MDA/kg et) kıyasla dondurulmuş/çözündürülmüş örnekler PEF uygulandığı takdirde, lipit oksidasyonunun önemli derecede (TBARS değeri 0,96 mg MDA/kg et) arttığını bildirmiştir. Araştırmacılar, dondurulmuş/çözündürülmüş ete PEF uygulanması sonucunda yağ asitlerinin, kas hücrelerinden salınan demir gibi pro-oksidanlara maruz kalmasından dolayı lipit oksidasyonuna daha duyarlı hale geldiğini belirtmiştir. Ancak, kasın yağ asidi profilindeki değişikliklerine rağmen çoklu doymamış yağ asitleri/doymuş yağ asitleri ile omega 6/omega 3 oranlarının tavsiye edilen seviyelerde (sırasıyla 0,32 ve 2,09) kaldığı tespit edilmiştir (Faridnia ve ark., 2015).

Ma ve ark. (2016) tarafından yapılan farklı bir çalışmada, PEF uygulamasından önce (1-1,4 kV/cm, 88-109 kJ/kg spesifik enerji girişi, 90 Hz, 20 µs ve 964 darbe) soğutma (+4°C'de 48 saat) ve dondurma (-20°C'de 3 ay) işlemlerinin koyun eti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmada, kesimden sonra soğutulmuş ve ardından PEF uygulanarak 7 gün boyunca soğukta (+4°C) depolanan koyun kaburga ve sırt örneklerinin TBARS değerleri 0,215 mg MDA/kg'dan sırasıyla 0,407 ve 0,304 mg MDA/kg'a yükselmiştir. Bu sonuçlar, kesim sonrası soğutulmuş ve ardından PEF ile işlenmiş etlerin 7 gün boyunca soğukta depolama esnasında kontrol grubuna (PEF uygulanmamış) göre oksidasyona

daha duyarlı olduğunu gösterse de, elde edilen sonuçların ette istenmeyen tat ve koku gelişimine neden olabilecek değerlerin (0,6-2 mg MDA/kg) altında olduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte, soğutulmuş örneklerle kıyasla dondurulmuş örnekler, depolama periyodu boyunca (+4°C'de 7 gün) daha yüksek MDA konsantrasyonları göstermiştir. Araştırmada, dondurulmuş/çözündürülmüş ve PEF ile işlenmiş numuneler arasında en yüksek lipid oksidasyonu birikiminin 7 gün soğukta depolanan kaburga örneklerinde (1,047 mg MDA/kg) meydana geldiği tespit edilmiş ve bu durum ransit tat ile ilişkilendirilmiştir. Araştırmacılar, kol ve kaburga etlerinde tespit edilen bu yüksek miktardaki TBARS değerlerinin, örneklerin yüksek miktarda çoklu doymamış yağ asidi (sırasıyla 30,16 mg/100 g ve 37,28 mg/100 g) içermesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir (Ma ve ark., 2016). Khan ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise düşük yoğunluklu PEF uygulamasının (2,5 kV, 200 Hz ve 20 µs) çiğ sığır etinde lipid oksidasyonuna etki etmediği, ancak, yüksek yoğunluklu uygulama (10 kV, 200 Hz ve 20 µs) sırasında üretilen yüksek ısıdan (40,5°C) dolayı etin antioksidan kapasitesinin azalarak depolama boyunca lipid oksidasyonunun daha yüksek seviyelerde (1,02±0,12 mg MDA/kg) seyrettiği ve üründe kaliteyi olumsuz yönde etkilediği bildirilmiştir. Bhat ve ark. (2020) ise yaptıkları araştırmada kurutulmuş sığır etlerinde TBARS değerlerinin sadece depolama süresinden etkilendiğini, PEF uygulamasının (0,52 kV/cm, 10 kV, 20 Hz, 20 µs) ürünlerde herhangi bir değişikliğe yol açmadığını bildirmiştir. Farklı hayvan etlerinin kalite özellikleri üzerine PEF yönteminin etkisini inceleyen ilave çalışmalar Çizelge 1'de özetlenmiştir.

PEF Uygulamasının Su Ürünleri Endüstrisinde Kullanılabilirliği

PEF teknolojilerinin protein esaslı gıdalarda, özellikle de et ve su ürünlerinin işlenmesinde kullanılabilirliğine ilişkin çalışmalar çok sınırlı olmakla birlikte, son yıllarda bu endüstrilerde uygulanabilme potansiyeline olan ilgi önemli derecede artmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi, ısı olmayan bir işlem olarak PEF işlenmemiş ürünün özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden mineral madde ve aroma bileşenleri gibi çeşitli besin öğelerini koruyarak geleneksel yöntemlere kıyasla daha kaliteli bir ara/son ürün üretimini sağlamaktadır. Ancak, PEF teknolojilerinin su ürünleri endüstrisinde kullanılabilirliğini kısıtlayan birtakım faktörler bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi diğer yeni gıda üretim teknolojilerinin çoğunda olduğu gibi yüksek yatırım maliyetidir. Buna ek olarak, balıkta doğal olarak oluşan enzimlerin inhibisyonunda yetersiz kalması, söz konusu teknolojinin kullanımını engelleyen diğer bir faktör olarak belirtilmiştir (Gomez ve ark., 2019). Zhao ve ark. (2019) tarafından belirtildiği üzere et ve su ürünleri, mikroyapılarında ve tekstürlerinde değişimler meydana geldiğinden 10 kV/cm'den daha yoğun bir PEF uygulamasından olumsuz yönde etkilenmektedir.

Konuyla alakalı yapılan ilk çalışmalara bakıldığında Gudmundsson ve Hafsteinsson (2001), PEF uygulamasının tavuk, balık ve havyarın mikroyapısı üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacılar, tavuğa kıyasla somon örneklerinin düşük yoğunluklu PEF uygulamasına (1,36 kV/cm, 40 adet darbe) daha duyarlı olduğunu ve işlem sonucunda her iki örneğin tekstürünün ve mikroyapısının

olumsuz yönde etkilendiğini gözlemlemiştir. Bununla birlikte, havyarların yapısında gözle görülebilir bir değişiklik olmaksızın 18,6 kV/cm alan gücünde PEF uygulamasına dayanabildiğini ve bu bakımdan PEF uygulamasının havyar işlemede etkili bir ön işlem olabileceğini bildirmişlerdir. Klonowski ve ark. (2006) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, balıkların su tutma kapasitesini ve kabuklu deniz ürünlerinin yumuşaklığını arttırmak için PEF kullanılmıştır. Bu amaçla örneklerle öncelikle 1,2-2,0 kV/cm alan gücünde 20-270 adet darbe uygulanmış ve ardından salamura enjeksiyonu yapılmıştır. PEF uygulaması sonucunda balık örneklerinde daha gözenekli bir yapı elde edilirken, deniz salyangozu gibi kabuklu su ürünlerinin yumuşaklığında ise kayda değer bir farklılık gözlenmemiştir. Araştırmacılar, PEF uygulanan balık örneklerinde pişme sırasında su kaybının azaldığını bildirmiş ve dolayısıyla PEF uygulamasının balıkların su tutma kapasitesini geliştirmek için ilgi çekici bir teknoloji olduğunu vurgulamıştır. Söz konusu araştırmada PEF uygulanan balık örneklerinde daha gözenekli bir yapı olduğundan, balıkların kurutulmasında da bir ön işlem olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir. Li ve ark. (2016) tarafından yapılan başka bir çalışmada, farklı elektrik alan gücü, uygulama süresi ve materyal/çözgen oranları kullanılarak, ıstiridye iç organlarından PEF destekli enzimatik ekstraksiyon yöntemi ile protein ekstrakte edilmiştir. 20 kV/cm alan gücü ve 600 µs'lik bir PEF uygulaması sonucunda daha yüksek verim ve emülsifikasyon özelliklerine sahip, tamamen hidrolize olmuş bir protein elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, geleneksel enzimatik ekstraksiyon yöntemine kıyasla PEF destekli enzimatik ekstraksiyonun protein çözünürlüğünü önemli derecede artırıp (%91,54), viskozite ile köpürmeyi azalttığından dolayı söz konusu endüstri için oldukça etkili bir yöntem olabileceği bildirilmiştir. Zhou ve ark. (2016) tarafından ise, midyeden protein ekstraksiyonu için yüksek yoğunluklu PEF uygulamasının etkinliği incelenmiştir. Araştırmacılar, optimum koşullardaki PEF uygulamasının (20 kV/cm gücünde 8 adet darbe ve 2 saat enzimoliz süresi) geleneksel yöntemlere kıyasla ekstraksiyon verimini önemli derecede arttırdığını (%77,08) bildirmiş ve PEF uygulaması ile daha hızlı ve daha az maliyetle protein ekstrakte edilebileceğini belirtmiştir. He ve ark. (2016) tarafından yapılan farklı bir çalışmada da, yarı-biyonik ekstraksiyon yöntemi ile kombine edilmiş yüksek yoğunluklu PEF teknolojisinin (22,79 kV/cm'de 2 µs'lik 9 darbe) balık kılçığından kalsiyum, kondrotin sülfat ve kollajen ekstraksiyonu üzerine etkisi incelenmiştir. Araştırmacılar, diğer yöntemlere kıyasla PEF destekli ekstraksiyon sonucunda balık kılçığından kalsiyum (19,8 mg/mL), kondroitin sülfat (39,269 mg/mL) ve kollajen (3,875 mg/mL) ekstraksiyon veriminin önemli derecede arttığını bildirmiştir.

Sonuç

Günümüzde, çeşitli gıdalarda uygulama alanı bulan ısı olmayan tekniklerden biri olan PEF'in et ve et ürünleri ile su ürünlerinde ekstraksiyon, kurutma, çözündürme, tekstürel özelliklerin iyileştirilmesi, rengin geliştirilmesi ve marinasyon, tuzlama, kürlenme, fermantasyon gibi işlemlerde yardımcı bir proses olarak kullanılabilirliği yoğun bir şekilde çalışılmaktadır.

Çizelge 1. Farklı hayvan etlerinde yapılan PEF çalışmaları

Table 1. PEF studies on different animal meats

Kas Durumu ve Uygulama Koşulları	Sonuçlar	R
	Sığır Eti <i>Musculus Semitendinosus</i>	
Post-Rigor, Alan gücü; 1,1-2,8 kV/cm, enerji girişi; 12,7-225, kJ/kg, frekans; 5-200 Hz, darbe sayısı; 152-300 adet, darbe uzunluğu; 20 µs	Uygulama sonucunda 5-22°C aralığında bir sıcaklık artışı olduğu; ağırlık kaybının sıcaklık ile doğru orantılı olarak arttığı; PEF uygulamasının, su salmayı, nemi, su aktivitesini ve kesme kuvvetini etkilemediği gözlemlenmiş ve PEF uygulanan örneklerde kas lifi demetlerinin daha küçük çapa sahip olduğu bulunmuştur.	1
	Sığır Bonfile <i>Musculus Longissimus lumborum</i>	
Post-Rigor, Kesikli mod, et lif yönü elektrotlara paralel veya çapraz, alan gücü; 0,58-0,73 kV/cm, enerji girişi; 16,2-19,3 kJ/kg, voltaj; 10 kV, frekans; 90 Hz, darbe uzunluğu 20 µs.	PEF uygulamasının sızıntı firesi ve su tutma kapasitesine etki etmediği; elektrotlara paralel et yönünün pH 5,8'in üzerindeki örneklerde pişme kaybını azalttığı; kesme kuvvetinin, renk ve lipit stabilitesinin PEF uygulamasından etkilenmediği; PEF uygulaması ile özellikle düşük pH'lı (5,5-5,8) örneklerde proteolizinin arttığı bulunmuştur.	2
	Sığır Eti <i>Longissimus thoracis et lumborum</i>	
Post-Rigor, Kesikli mod, alan gücü; 1,4 kV/cm, enerji girişi; 25-50 kJ/kg, frekans; 10 Hz, darbe uzunluğu; 20 µs, darbe sayısı; 300-600 adet ve darbe şekli; kare dalga.	PEF uygulamasının, sert etin bağ dokularını zayıflattığı, denatürasyon sıcaklığını azalttığı, kollajen çözünürlüğünü arttırdığı ve dolayısı ile pişme süresini kısaltmak ile yumuşaklığın arttığı ve tekstürün geliştiği gözlenmiştir.	3
	Sığır Döşü <i>Biceps femoris</i>	
Post-Rigor, Kesikli mod, et lif yönü elektrotlara paralel, alan gücü; 1,7-2,0 kV/cm, enerji girişi; 185 kJ/kg, frekans; 50 Hz, darbe uzunluğu; 20 µs, ve darbe şekli; kare bipolar.	PEF uygulamasının pişme kaybını ve renk stabilitesini olumsuz yönde etkilemediği; ~16°C'lik bir sıcaklık artışına yol açtığı; kesme kuvvetini ve dolayısı ile sertliği önemli derecede azalttığı; sızıntı firesini arttırdığı; Z hattı parçalanmalarına ve degrade miyofibril yapısına sebep olduğu gözlemlenmiş ve et mikroyapısı ve tekstürü üzerinde değişikliklere sebep olarak, yumuşaklığı arttırabileceği ve olgunlaştırma süresini kısaltabileceği bulunmuştur.	4
	Sığır Döşü Derin Pektoralis Kası	
Post-Rigor, Kesikli mod, et lif yönü elektrotlara paralel, alan gücü; 1,0-1,5 kV/cm, enerji girişi; 40-100 kJ/kg, voltaj; 15-35 kV, frekans; 50 Hz, darbe uzunluğu; 20 µs, darbe sayısı; 424-10000 adet ve darbe şekli; kare bipolar.	PEF uygulamasının, sert etin bağ dokularını zayıflattığı, denatürasyon sıcaklığını azalttığı, kollajen çözünürlüğünü arttırdığı ve dolayısı ile pişme süresini kısaltmak ve yumuşaklığı geliştirmek için uygun bir teknoloji olduğu bulunmuştur.	5
	Geyik Bonfile <i>Musculus longissimus et lumborum</i>	
Post-Rigor, Enerji girişi; 1,93-70,2 kJ/kg, voltaj; 2,5-7,5 kV, frekans; 50 Hz, ve darbe uzunluğu; 20 µs.	Kontrol grubuna kıyasla kuru olgunlaştırılmış, yüksek yoğunluklu PEF uygulanmış örneğin daha yumuşak olduğu gözlemlenmiş ve toplam ağırlık kaybında (pişme kaybı, çözünme kaybı, su salma), konjuge linoleik asit içeriğinde ve kesme kuvvetinde herhangi olumsuz bir etki olmaksızın, geyik etinin kuru olarak olgunlaştırılmasının hızlandırılabilceği bulunmuştur.	6
	Sığır Döşü Derin Pektoralis Kası	
Pre-Rigor, Kesikli mod, alan gücü; 1,5 kV/cm, enerji girişi; 90-100 kJ/kg, frekans; 50 Hz, darbe uzunluğu; 20 µs ve darbe şekli; kare bipolar.	PEF uygulamasından sonra sous vide işleme tabi tutulan örneklerde kollajen çözünürlüğünde ve et yumuşaklığında artışa, pişme kaybında azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiş ve PEF uygulamasının, sous vide işleme tabi tutulan etteki biyolojik değişmelerin etkisini azaltabileceği ve heterojen et parçalarını yumuşatabileceği bulunmuştur.	7
	Sığır Döşü Derin Pektoralis Kası	
Post-Rigor, Kesikli mod, alan gücü; 0,7-1,5 kV/cm, enerji girişi; 90-100 kJ/kg, frekans; 50 Hz darbe uzunluğu; 20 µs ve darbe şekli; kare bipolar.	0,7 kV/cm gücünde PEF uygulaması ve ardından 60°C'de 24 saatlik sous vide işleme tabi tutulan örneklerin kesme kuvveti ve sertliği önemli derecede azaldığı ve diğer tekstürel özelliklerinin büyük ölçüde geliştiği; kollajen çözünürlüğünün arttığı gözlemlenmiş ve lipit oksidasyonu, renk stabilitesi, pişme kaybı veya protein sindirilebilirliği üzerinde olumsuz etkiye sebep olmadan vakum pişirme süresini kısaltabileceği bulunmuştur.	8
	Sığır Döşü <i>Biceps femoris</i>	
Post-Rigor, Kesikli mod, et lif yönü elektrotlara paralel, voltaj; 5-10 kV, frekans; 20-90 Hz, darbe uzunluğu; 20 µs ve darbe şekli; kare bipolar.	Mineral madde içeriğinde olumsuz bir etki olmaksızın, etin PEF ile ön işlenmesi sonucunda (özellikle 10 kV ve 90 Hz'lik uygulama) protein sindirilebilirliği, çözünür protein ve serbest amino asit içeriğinin önemli derecede arttığı ve protein profilinin geliştiği gözlenmiştir.	9
	Sığır Döşü <i>Biceps femoris</i>	
Post-Rigor, Kesikli mod, et lif yönü elektrotlara paralel, alan gücü; 0,38-0,61 kV/cm, enerji girişi; 21,17-74,24 kJ/kg, voltaj; 5-10 kV, frekans; 20-90 Hz, darbe sayısı; 2723-2725 adet, darbe uzunluğu; 20 µs ve darbe şekli; kare bipolar.	PEF uygulanan örneklerde erken post-mortem sırasında kalpain 2 aktivasyonunun meydana geldiği; kalpain aktivitesinin ve desmin ve troponin-T proteolizinin arttığı; yoğunluğa göre 8,18-11,08°C sıcaklık artışı olduğu; uygulamanın sızıntı firesini ve pişme kaybını etkilemediği; kesme kuvvetinde ve miyofibriller fragmentasyon indeksinde hafif bir azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiş ve olgunlaştırmanın ilk haftasında hızlı bir yumuşama görüldüğünden, toplam olgunlaştırma süresinin kısaltılabileceği bulunmuştur.	9
	Kırmızı Geyik Bonfile <i>Longissimus dorsi</i>	
Post-Rigor, Kesikli mod, et lif yönü elektrotlara paralel, alan gücü; 0,2-0,5 kV/cm, enerji girişi; 1,93-70,2 kJ/kg, voltaj; 2,5-10 kV, frekans; 20-90 Hz, darbe uzunluğu; 20 µs ve darbe şekli; kare bipolar.	Özellikle 10 kV ve 20 Hz'lik PEF uygulaması sonucunda mineral salınımında olumsuz bir etki olmaksızın, geyik etinin kalpain aktivitesi, troponin-T proteolizi, amino asit içeriği ve sindirilebilir protein oranının arttığı, kesme kuvveti ve 10 miyofibriller fragmentasyon indeksinin azaldığı gözlenmiştir.	10
	Sığır Döşü Derin Pektoralis Kası	
Post-Rigor, Kesikli mod, alan gücü; 0,7-1,5 kV/cm, enerji girişi; 90-100 kJ/kg, voltaj; 15-37 kV, frekans; 50 Hz, darbe sayısı; 1030-6400 adet, darbe uzunluğu; 20 µs ve darbe şekli; kare bipolar.	Uygulama yoğunluğuna bağlı olarak 2,4-4,3°C aralığında bir sıcaklık artışı olduğu; uygulamanın sızıntı firesini ve pişme kaybını etkilemezken, su kaybını hafifte olsa arttırdığı; özellikle 0,7 kV/cm'lik uygulamanın sertlik ve çignenebilirliği önemli 11 derecede azalttığı; artan alan gücü ile kollajen çözünürlüğünün arttığı gözlenmiştir.	11

R: referans; 1: O'Dowd ve ark., 2013, 2: Suwandy ve ark., 2015c, 3: Arroyo ve ark., 2015, 4: Faridnia ve ark., 2016, 5: Alahakoon ve ark., 2017, 6: Mungure ve ark., 2017, 7: Alahakoon ve ark., 2018a, 8: Alahakoon ve ark., 2018b, 9: Bhat ve ark., 2018c, 10: Bhat ve ark., 2019f, 11: Alahakoon ve ark., 2019

Söz konusu araştırmalarda elde edilen verilere göre, PEF uygulamasının et ve et ürünlerinde fonksiyonel özellikleri geliştirip, ürün işleme hızı ve son ürün kalitesi üzerinde oldukça olumlu sonuçlar yarattığı ve sektör açısından büyük bir potansiyel teşkil ettiği ifade edilmektedir. Ancak, yapılan çalışmalarda özellikle PEF parametrelerindeki farklılığa bağlı olarak oldukça çeşitli araştırma sonuçları mevcuttur. Bu bakımdan bir dizi teknolojik ve biyolojik faktörden etkilenen PEF işleminin, farklı et ürünlerinde fiziksel, kimyasal ve mikrobiyal etkilerinin araştırıldığı ve bunların duyu analizler ile desteklendiği optimizasyon çalışmalarına hali hazırda ihtiyaç duyulduğu belirtilebilir.

Kaynaklar

- Alahakoon AU, Oey I, Silcock P, Bremer P. 2017. Understanding the Effect of Pulsed Electric Fields on Thermostability of Connective Tissue Isolated from Beef Pectoralis Muscle Using A Model System. *Food Research International*, 100: 261-267. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.08.025.
- Alahakoon AU, Oey I, Bremer P, Silcock P. 2018a. Optimisation of Sous Vide Processing Parameters for Pulsed Electric Fields Treated Beef Briskets. *Food and Bioprocess Technology*, 11: 2055-2066. DOI: 10.1007/s11947-018-2155-9.
- Alahakoon AU, Oey I, Bremer P, Silcock P. 2018b. Process Optimisation of Pulsed Electric Fields Pre-Treatment to Reduce the Sous Vide Processing Time of Beef Briskets. *International Journal of Food Science & Technology*, 54: 823-834. DOI: 10.1111/ijfs.14002.
- Alahakoon AU, Oey I, Bremer P, Silcock P. 2019. Quality and Safety Considerations of Incorporating Post-PEF Ageing into the Pulsed Electric Fields and Sous Vide Processing Chain. *Food and Bioprocess Technology*, 12: 852-864. DOI: 10.1007/s11947-019-02254-6.
- Albarracín W, Sanchez IC, Garu R, Barat JM. 2011. Salt in Food Processing: Usage and Reduction: A Review. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(7): 1329-1336. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2010.02492.x.
- Alminger M, Aura AM, Bohn T, Dufour C, El SN, Gomes A, Santos CN. 2014. *In vitro* Models for Studying Secondary Plant Metabolite Digestion and Bioaccessibility. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13: 413-436. DOI: 10.1111/1541-4337.12081.
- Arroyo C, Lascorz D, O'Dowd L, Noci F, Arimi J, Lyng JG. 2015. Effect of Pulsed Electric Field Treatments at Various Stages During Conditioning on Quality Attributes of Beef *Longissimus thoracis et lumborum* muscle. *Meat Science*, 99: 52-59. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.08.004.
- Barba FJ, Ahrne L, Xanthakis E, Landerslev MG, Orlien V. 2018. Innovative Technologies for Food Preservation. In: Barba FJ, Sant'Ana AS, Orlien V, Koubaa M (editors). *Innovative Technologies for Food Preservation–Inactivation of Spoilage and Pathogenic Microorganisms*. Academic Press, the UK, pp. 25-51. ISBN: 978-0-12-811031-7.
- Barbosa-Canovas GV, Sepulveda DR. 2005. Present Status and the Future of PEF Technology. In: Barbosa-Canovas GV, Tapia MS, Cano TP (editors). *Novel Food Processing Technologies*. CRC Press, the USA, pp. 1-45. ISBN: 978-0-203-99727-7.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEDA. 2018a. Current and Future Prospects for the Use of Pulsed Electric Field in the Meat Industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(10): 1660-1674. DOI: 10.1080/10408398.2018.1425825.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEDA. 2018b. Role of Calpain System in Meat Tenderness: A Review. *Food Science and Human Wellness*, 7: 196-204. DOI: 10.1016/j.fshw.2018.08.002.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEDA. 2018c. Pulsed Electric Field: Role in Protein Digestion of Beef *Biceps femoris*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 50: 132-138. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.09.006.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEDA. 2019a. Does Pulsed Electric Field Have A Potential to Improve the Quality of Beef from Older Animals and How? *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 56: 1-8. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.102194.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Jayawardena SR, Bekhit AEDA. 2019b. Pulsed Electric Field: A New Way to Improve Digestibility of Cooked Beef. *Meat Science*, 155: 79-84. DOI: 10.1016/j.meatsci.2019.05.005.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEDA. 2019c. Pulsed Electric Field Operates Enzymatically by Causing Early Activation of Calpains in Beef During Ageing. *Meat Science*, 153: 144-151. DOI: 10.1016/j.meatsci.2019.03.018.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEDA. 2019d. Pulsed Electric Field Improved Protein Digestion of Beef During In-Vitro Gastrointestinal Simulation. *LWT – Food Science and Technology*, 102: 45-51. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.12.013.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEDA, Mungure TE. 2019e. Pulsed Electric Field: Effect of In-Vitro Simulated Gastrointestinal Protein Digestion of Deer *Longissimus dorsi*. *Food Research International*, 120: 793-799. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.11.040.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Mungure TE, M, Jayawardena SR, Bekhit AEDA. 2019f. Effect of Pulsed Electric Field on Calpain Activity and Proteolysis of Venison. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52: 131-135. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.11.006.
- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEDA. 2020. The Application of Pulsed Electric Field As a Sodium Reducing Strategy for Meat Products. *Food Chemistry*, 306: 125622. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125622.
- Bekhit AEDA, Ven R, Suwandy V, Fahri F, Hopkins DL. 2014. Effect of Pulsed Electric Field Treatment on Cold-Boned Muscles of Different Potential Tenderness. *Food and Bioprocess Technology*, 7(11): 3136-3146. DOI: 10.1007/s11947-014-1324-8.
- Bolado-Rodriguez S, Gongora-Nieto MM, Pothakamury U, Barbosa-Canovas GV, Swanson BG. 2000. A Review of Nonthermal Technologies. In: Lozano JE, Añón C, Parada-Arias E, Barbosa-Canovas GV (editors). *Trends in Food Engineering*. CRC Press, New York, pp. 227-256. ISBN: 978-1-56676-991-4.
- Bolton DJ, Catarame T, Byrne C, Sheridan JJ, McDowell DA, Blair IS. 2002. The Ineffectiveness of Organic Acids, Freezing and Pulsed Electric Fields to Control *Escherichia coli* O157:H7 in Beef Burgers. *Letters in Applied Microbiology*, 34: 139-143. DOI: 10.1046/j.1472-765x.2002.01063.x.
- Bouzzara H, Vorobiev E. 2003. Solid-Liquid Expression of Cellular Materials Enhanced by Pulsed Electric Field. *Chemical Engineering and Processing*, 42: 249-257. DOI: 10.1016/s0255-2701(02)00010-7.
- Buckow R, Sieh NG, Toepfl, S. 2013. Pulsed Electric Field Processing of Orange Juice: A Review on Microbial, Enzymatic, Nutritional, and Sensory Quality and Stability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12: 455-467. DOI: 10.1111/1541-4337.12026.
- Chang DC. 1992. Structure and dynamics of electric field-induced membrane pores as revealed by rapid-freezing electron microscopy. In: Chang DC, Chassy BM, Saunders JA, Sowers AE (editors). *Guide to Electroporation and Electrofusion*, Academic Press, Inc., California, pp. 9-28. ISBN: 978-0-121-68041-1.
- Chian FM, Kaur L, Oey I, Astruc T, Hodgkinson S, Boland M. 2019. Effect of Pulsed Electric Fields (PEF) on the Ultrastructure and *in vitro* Protein Digestibility of Bovine *Longissimus thoracis*. *LWT–Food Science and Technology*, 103: 253-259. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.01.005.

- Choe JH, Stuart A, Kim YHB. 2016. Effect of Different Aging Temperatures Prior to Freezing on Meat Quality Attributes of Frozen/Thawed Lamb Loins. *Meat Science*, 116: 158-164. DOI: 10.1016/j.meatsci.2016.02.014.
- Clemente I, Condon-Abanto S, Pedros-Garrido S, Whyte P, Lyng JG. 2020. Efficacy of Pulsed Electric Fields and Antimicrobial Compounds Used Alone and in Combination for the Inactivation of *Campylobacter jejuni* in Liquids and Raw Chicken. *Food Control*, 107: 106-491. DOI: 10.1016/j.foodcont.2019.01.017.
- Corte-Real J, Bohn T. 2018. Interaction of Divalent Minerals with Liposoluble Nutrients and Phytochemicals During Digestion and Influences on Their Bioavailability—A Review. *Food Chemistry*, 252: 285-293. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.113.
- Danowska-Oziewicz M. 2009. The Influence of Cooking Methods on the Quality of Pork Patties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 33: 473-485. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2008.00269.x.
- Doevenspeck H. 1961. Influencing Cells and Cell Walls by Electrostatic Impulses. *Fleischwirtschaft*, 13(12): 968-987.
- Dominguez R, Pateiro M, Gagaoua M, Francisco JB, Zhang W, Lorenzo JM. 2019. A Comprehensive Review on Lipid Oxidation in Meat and Meat Products. *Antioxidants*, 8(10): 429. DOI: 10.3390/antiox8100429.
- Dziadek K, Kopeć A, Drózdź T, Kielbasa P, Ostafin M, Bulski K, Oziębłowski M. 2019. Effect of pulsed electric field treatment on shelf life and nutritional value of apple juice. *Journal of Food Science and Technology*, 56: 1184–1191. DOI: 10.1007/s13197-019-03581-4.
- Faridnia F, Bekhit AEDA, Niven B, Oey I. 2014. Impact of Pulsed Electric Fields and Post-Mortem Vacuum Ageing on Beef *Longissimus thoracis* Muscles. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(11): 2339-2347. DOI: 10.1111/ijfs.12532.
- Faridnia F, Ma QL, Bremer PJ, Burritt DJ, Hamid N, Oey I. 2015. Effect of Freezing as Pre-Treatment Prior to Pulsed Electric Fields Processing on Quality Traits of Beef Muscles. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 29: 31-40. DOI: 10.1016/j.ifset.2014.09.007.
- Faridnia F, Bremer P, Burritt DJ, Oey I. 2016. Effect of Pulsed Electric Fields on Selected Quality Attributes of Beef Outside Flat (*Biceps femoris*). *IFMBE Proceedings*, 51-54. DOI: 10.1007/978-981-287-817-5.
- Farouk MM, Al-Mazeedi HM, Sabow AB, Bekhit AEDA, Adeyemi KD, Sazili AQ, Ghani A. 2014. Halal and Kosher Slaughter Methods and Meat Quality: A Review. *Meat Science*, 98(3): 505-519. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.05.021.
- Feldhusen F, Warnatz A, Erdmann R, Wenzel S. 1995. Influence of Storage Time on Parameters of Colour Stability of Beef. *Meat Science*, 40(2): 235-243. DOI: 10.1016/0309-1740(94)00048-C.
- Giteru SG, Oey I, Ali MA. 2018. Feasibility of Using Pulsed Electric Fields to Modify Biomacromolecules: A Review. *Trends in Food Science & Technology*, 72: 913-113. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.12.009.
- Gomez B, Munekata PES, Gavahian M, Barba FJ, Marti-Quijal FJ, Bolumar T, Campagnol PCB, Tomasevic I, Lorenzo JM. 2019. Application of Pulsed Electric Fields in Meat and Fish Processing Industries: An Overview. *Food Research International*, 123: 95-105. DOI: 10.1016/j.foodres.2019.04.047.
- Grahl T, Markl H. 1996. Killing of Microorganisms by Pulsed Electric Fields. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 45: 148-157. DOI: 10.1007/s002530050663.
- Gudmundsson M, Hafsteinnsson H. 2001. Effect of Electric Field Pulses on Microstructure of Muscle Foods and Roes. *Trends in Food Science & Technology*, 12: 122-128. DOI: 10.1016/s0924-2244(01)00068-1.
- Haughton PN, Lyng JG, Cronin DA, Morgan DJ, Fanning S, Whyte. 2012. Efficacy of Pulsed Electric Fields for the Inactivation of Indicator Microorganisms and Foodborne Pathogens in Liquids and Raw Chicken. *Food Control*, 25: 131-135. DOI: 10.1016/j.foodcont.2011.10.030.
- He G, Yin Y, Yan X, Wang Y. 2016. Semi-Bionic Extraction of Effective Ingredient from Fishbone by High Intensity Pulsed Electric Fields. *Journal of Food Process Engineering*, 40(2): 1-9. DOI: 10.1111/jfpe.12392.
- Hwang IH, Devine CE, Hopkins DL. 2003. The Biochemical and Physical Effects of Electrical Stimulation on Beef and Sheep Meat Tenderness. *Meat Science*, 65(2): 677-691. DOI: 10.1016/S0309-1740(02)00271-1.
- Inguglia ES, Zhang Z, Tiwari BK, Kerry JP, Burgess CM. 2017. Salt Reduction Strategies in Processed Meat Products – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 59: 70-78. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.10.016.
- Khan MI, Jo C, Tariq MR. 2015. Meat Flavor Precursors and Factors Influencing Flavor Precursors—A Systematic Review. *Meat Science*, 110: 278-284. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.08.002.
- Khan AA, Randhawa MA, Carne A, Mohamed-Ahmed IA, Barr D, Reid M, Bekhit AEDA. 2017. Effect of Low and High Pulsed Electric Field on the Quality and Nutritional Minerals in Cold Boned Beef *M. Longissimus et lumborum*. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41: 135-143. DOI: 10.1016/j.ifset.2017.03.002.
- Khan AA, Randhawa MA, Carne A, Mohamed-Ahmed IA, Barr D, Reid M, Bekhit AEDA. 2018a. Quality and Nutritional Minerals in Chicken Breast Muscle Treated with Low and High Pulsed Electric Fields. *Food and Bioprocess Technology*, 11: 122-131. DOI: 10.1007/s11947-017-1997-x.
- Khan AA, Randhawa MA, Carne A, Mohamed-Ahmed IA, Al-Juhaimi FY, Barr D, Reid M, Bekhit AEDA. 2018b. Effect of Low and High Pulsed Electric Field Processing on Macro and Micro Minerals in Beef and Chicken. *Innovative Food Science and Emerging Technology*, 45: 273-279. DOI: 10.1016/j.ifset.2017.11.012.
- Klonowski I, Heinz V, Toepfl S, Gunnarsson G, Porkelsson G. 2006. Application of Pulsed Electric Field Technology for the Food Industry. R&D Report Summary, pp. 1-10, Icelandic Fisheries Laboratories.
- Kondjoyan A, Daudin JD, Sante-Lhoutellier V. 2015. Modelling of Pepsin Digestibility of Myofibrillar Proteins and of Variations due to Heating. *Food Chemistry*, 172: 265-271. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.08.110.
- Koohmaraie M, Geesink GH. 2006. Contribution of Postmortem Muscle Biochemistry to the Delivery of Consistent Meat Quality with Particular Focus on the Calpain System. *Meat Science*, 74(1): 34-43. DOI: 10.1016/j.meatsci.2006.04.025.
- Korma SA, Alahmad K, Ali AH, Shoaib M, Abed SM, Yves H, Atindana JN, Qin J. 2016. Application of Pulsed Electric Field Technology in Apple Juice Processing. *Austin Journal of Nutrition and Food Sciences*, 4(2): 1080.
- Laville E, Sayd T, Morzel M, Blinet S, Chambon C, Lepetit J, Renand G, Hocquette JF. 2009. Proteome Changes During Meat Aging in Tough and Tender Beef Suggest the Importance of Apoptosis and Protein Solubility for Beef Aging and Tenderization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(22): 10755-10764. DOI: 10.1021/jf901949r.
- Li M, Lin J, Chen J, Fang T. 2016. Pulsed Electric Field-Assisted Enzymatic Extraction of Protein from Abalone (*Haliotis discus hannai*) Viscera. *Journal of Food Process Engineering*, 39(6): 702-710. DOI: 10.1111/jfpe.12262.

- Longo V, Lana A, Bottero MT, Zolla L. 2015. Apoptosis in Muscle-To-Meat Aging Process: The Omic Witness. *Journal of Proteomics*, 125: 29-40. DOI: 10.1016/j.jprot.2015.04.023.
- 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. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37: 359-374. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.04.009.
- Martin-Belloso O, Soliva-Fortuny R. 2010. Pulsed Electric Fields Processing Basics. In: Zhang HQ, Barbosa-Cánovas GV, Balasubramaniam VM, Dunne CP, Farkas DF, Yuan JTC (editors). *Nonthermal Processing Technologies for Food*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, the UK, pp. 157-176. ISBN: 978-0-813-81668-5.
- McDonnell CK, Allen P, Chardonnerau FS, Arimi JM, Lyng JG. 2014. The Use of Pulsed Electric Fields for Accelerating the Salting of Pork. *LWT—Food Science and Technology*, 59(2): 1054-1060. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.05.053.
- Mungure TE, Bekhit AEDA, Birch J, Kanokruangrong S, Carne A, Farouk MM. 2017. Impact of Aging Method and PEF Treatment on Meat Quality and Stability of Conjugated Linoleic Acid in Venison. 63rd International Congress of Meat Science and Technology, 13-18 August 2017, Cork, Ireland, pp. 620-621.
- Neumann E, Rosenheck K. 1972. Permeability Changes Induced by Electric Impulses in Vesicular Membranes. *The Journal of Membrane Biology*, 10: 279-290. DOI: 10.1007/bf01867861.
- O'Dowd LP, Arimi JM, Noci F, Cronin DA, Lyng JG. 2013. An Assessment of the Effect of Pulsed Electrical Fields on Tenderness and Selected Quality Attributes of Post-Rigour Beef Muscle. *Meat Science*, 93: 303-309. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.09.010.
- Oliveira G, Tylewicz U, Rosa MD, Andlid T, Alminger M. 2019. Effects of Pulsed Electric Field-Assisted Osmotic Dehydration and Edible Coating on the Recovery of Anthocyanins from *in vitro* Digested Berries. *Foods*, 8(10): 1-11. DOI: 10.3390/foods8100505.
- Primožic M, Duchek A, Nickerson M, Ghosh S. 2017. Formation, Stability and *in vitro* Digestibility of Nanoemulsions Stabilized by High-Pressure Homogenized Lentil Proteins Isolate. *Food Hydrocolloids*, 77: 126-141. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.09.028.
- Stachelska MA, Szymczak WS, Jakubczak A, Swislocka R, Lewandowski W. 2012. Influence of Pulsed Electric Field on the Survival of *Yersinia enterocolitica* in Minced Beef Meat. *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna*, 17: 13-17.
- Suwandy V, Carne A, Ven R, Bekhit AEDA, Hopkins DL 2015a. Effect of Repeated Pulsed Electric Field Treatment on the Quality of Cold-Boned Beef Loins and Topsides. *Food and Bioprocess Technology*, 8(6): 1218-1228. DOI: 10.1007/s11947-015-1485-0.
- Suwandy V, Carne A, Ven R, Bekhit AEDA, Hopkins DL. 2015b. Effect of Pulsed Electric Field Treatment on Hot-Boned Muscles of Different Potential Tenderness. *Meat Science*, 105: 25-31. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.02.009.
- Suwandy V, Carne A, Ven R, Bekhit AEDA, Hopkins DL. 2015c. 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 and Bioprocess Technology*, 8(6): 1355-1365. DOI: 10.1007/s11947-015-1498-8.
- Toepfl S, Heinz V. 2007. Application of Pulsed Electric Fields to Improve Mass Transfer in Dry Cured Meat Products. *Fleischwirtschaft International: Journal for Meat Production and Meat Processing*, 22: 62-64.
- Toepfl S, Siemer C, Heinz V. 2014a. Effect of High Intensity Electric Field Pulses on Solid Foods. In: Sun DW (chief editor). *Emerging Technologies for Food Processing*. Academic Press, the UK, pp. 147-154. ISBN: 978-0-12-411479-1.
- Toepfl S, Siemer C, Saldana-Navarro G, Heinz V. 2014b. Overview of Pulsed Electric Fields Processing for Food. In: Sun DW (chief editor). *Emerging Technologies for Food Processing*. Academic Press, the UK, pp. 93-114. ISBN: 978-0-12-411479-1.
- Toldra F. 2003. Muscle Foods: Water, Structure and Functionality. *Food Science and Technology International*, 9(3): 173-177. DOI: 10.1177/1082013203035048.
- Weaver JC. 2000. Electroporation of Cells and Tissues. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1): 24-33. DOI: 10.1007/s002530050663.
- Wu W, Yu QQ, Fu Y, Tian XJ, Jia F, Li XM, Dai RT. 2016. Towards Muscle-Specific Meat Color Stability of Chinese Luxi Yellow Cattle: A Proteomic Insight into Post-Mortem Storage. *Journal of Proteomics*, 147: 108-118. DOI: 10.1016/j.jprot.2015.10.027.
- Zhang HQ, Barbosa-Cánovas GV, Balasubramaniam VM, Dunne CP, Farkas DF, Yuan JTC. 2011. *Nonthermal Processing Technologies for Food*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, the UK, 626 p. ISBN: 978-0-813-81668-5.
- Zhao W, Yang R. 2019. Pulsed Electric Field Processing of Protein-Based Foods. In: Jia J, Liu D, Ma H (editors). *Advances in Food Processing Technology*. Zhejiang University Press, Hangzhou, China, pp. 137-147. ISBN: 978-981-13-6450-1.
- Zhao YM, de Alba M, Sun DW, Tiwari B. 2019. Principles and Recent Applications of Novel Non-Thermal Processing Technologies for the Fish Industry—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(5): 728-742. DOI: 10.1080/10408398.2018.1495613.
- Zhou Y, He Q, Zhou D. 2016. Optimization Extraction of Protein from Mussel by High-Intensity Pulsed Electric Fields. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3): 1-8. DOI: 10.1111/jfpp.12962.
- Zimmermann U, Pilwat G, Riemann F. 1974. Dielectric Breakdown of Cell Membranes. *Biophysical Journal*, 14(11): 881-899. DOI: 10.1016/s0006-3495(74)85956-4.