



ŞEKER EKSTRAKSİYONUNDA VURGULU ELEKTRİK ALAN UYGULAMA POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elif Esra İşgüzar^{*1}, Mustafa Fincan²

¹Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Geliş / *Received*: 06.12.2022; Kabul / *Accepted*: 29.03.2023; Online baskı / *Published online*: 24.04.2023

İşgüzar, E. E., Fincan, M. (2023). Şeker ekstraksiyonunda vurgulu elektrik alan uygulama potansiyelinin değerlendirilmesi. GIDA (2023) 48 (3) 545-561 doi: 10.15237/ gida.GD22125

İşgüzar, E. E., Fincan, M. (2023). *Potential use of pulsed electric fields in sugar extraction. GIDA (2023) 48 (3) 545-561 doi: 10.15237/ gida.GD22125*

ÖZ

Şeker ekstraksiyonunda yaygın olarak kullanılan ısı işlem, yüksek enerji tüketimine ve ısıya bağlı bazı istenmeyen reaksiyonların oluşumuna yol açmaktadır. Özellikle, kullanılan enerji miktarı ve ısıya bağlı safsızlıkları şerbetten uzaklaştırmak için ek bir saflaştırma işleminin gerekliliği, nihai ürünün fiyatına olumsuz katkıda bulunmaktadır. Vurgulu elektrik alanları (PEF), bu olumsuz sonuçları azaltmanın bir aracı olarak ekstraksiyonda kullanılmak üzere önerilen termal olmayan ve düşük enerjili bir doku parçalanma yöntemidir; Bu alandaki çalışmalar günümüze kadar artarak devam etmektedir. Bu derlemede, PEF tekniğinin altında yatan temel ilkelerin yanı sıra şeker ekstraksiyonundaki potansiyel uygulama yöntemleri ve bunların ekstraksiyon üzerindeki etkileri hakkında genel bir bakış sunmak için önceki araştırmaların bulguları özetlenmektedir.

Anahtar kelimeler: Vurgulu elektrik alan, şeker pancarı, sıvı-katı ekstraksiyon, elektroporasyon

POTENTIAL USE OF PULSED ELECTRIC FIELDS IN SUGAR EXTRACTION

ABSTRACT

Widespread use of heat treatment in sugar extraction results in high energy consumption and some undesirable reactions due to the heat. In particular, the amount of energy used and the necessity of an additional treatment process to remove heat-related impurities from the sorbet contribute negatively to the price of the final product. Pulsed electric fields (PEF) are a non-thermal and low-energy tissue breakdown method that has been proposed for use in extraction as a means of reducing these negative outcomes; studies into this area have been expanding to the present day. This review summarizes the findings of prior research to present an overview of the fundamental principles underlying the PEF technique, as well as its potential application methods in sugar extraction and their effects on extraction.

Keywords: Pulsed electric field, sugar beet, solid-liquid extraction, electroporation

* Yazışmalardan sorumlu yazar / *Corresponding author*

✉: elifesra24@gmail.com

☎: (+90) 506 413 96 67

☎: (+90) 352 437 57 84

Elif Esra İşgüzar; ORCID no: 0000-0002- 3335-2083

Mustafa Fincan; ORCID no: 0000-0002-9394-6449

GİRİŞ

Bitkisel dokulardan şeker gibi hücre içi bileşikleri ekstrakte etmede ürün maliyetine etki eden önemli faktörlerden biri doku bozundurma veya hücre parçalama yöntemidir. Isıl işlem ile dokunun bozundurulup, ekstraksiyonun sağlanması geleneksel şeker üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dastango vd. 2020). Bununla birlikte ısıl işlem özellikleri itibarıyla yüksek enerji sarfiyatı gerektirmesinden ve ayrıca saflaştırma aşamasında çeşitli zorluklara yol açmasından (ısıl işlem nedeniyle şerbet renginde koyulaşma ve pektin gibi bileşenlerin şerbete geçişiyle şerbet saflılığının artması) ürün maliyeti içinde önemli bir yekûn oluşturmaktadır (Putnik vd., 2019; Timmermans vd., 2022). Isıl işlemle ortaya çıkan bu dezavantajları azaltmaya yönelik şeker endüstrisi daha ekonomik, daha verimli, daha az kimyasal kullanımı gerektiren bir doku bozundurma prosesi arayışı içerisinde. Son yıllarda ortaya çıkan PEF tekniğinin enerji maliyeti düşük ve ısısal olmayan bir doku bozundurma yöntemi olduğu birçok çalışmada gösterilmiş ve şeker ekstraksiyonundaki bu olumsuzlukları azaltmaya yönelik potansiyel taşıdığı öne sürülmüştür (Xi vd., 2021; Vorobiev ve Lebovka, 2022).

Taze meyve ve sebzelerden, şeker gibi değerli intrasellüler bileşenlerin dış ortama aktarılması (ekstraksiyon) istenildiğinde, aktarım bir takım yapısal unsurlar tarafından engelleme ile karşılaşmaktadır. Doku kalınlığı, hücre duvarı gibi bazı unsurlar aktarıma belli düzeyde engel olurken, esas direnç sağlam hücre zarından kaynaklanmaktadır (Khan vd., 2018). Diğer bir deyişle, aktarımın başlaması için, fizyolojik şartlarda geçirgen olmayan dış hücre zarının öncelikle bozundurulması gerekmektedir. Bir genelleme yapılırsa, zarda tahribat düzeyi ne kadar fazla olursa, bu hücre dışına çıkışı kolaylaştırıp, verime olumlu yansımaktadır. Bu sebepten, taze meyve sebzelerden ekstraksiyonu hedefleyen kurutma ve katı sıvı ekstraksiyonu gibi birçok prosesden önce bir hücre parçalama/doku bozundurma ön işleminin gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Fincan, 2015; Chaves vd., 2020; Baoguo vd., 2022). Isıl işlem, dondurup çözündürme ve öğütme gibi geleneksel ön işlem

yöntemleri eskiden beri kullanılmakta iken son yıllarda yüksek basınç (Duan vd., 2022; Li vd., 2020; Limsangouan vd., 2020), mikrodalga (Mirzadeh vd., 2020; Shashikant ve Mayur, 2021, Oroian vd.,2020), ultrases (Marić vd., 2018; Xu vd., 2021; Kumar vd., 2021) ve vurgulu elektrik alanı (Barros vd., 2022; Visockis vd., 2021; Jiang vd., 2022) gibi yeni yöntemlerin etkileri de yoğun olarak araştırılmaktadır. Bu ön işlemlerin her biri hücre zarını tahrip etkisi yanında, istenmeyen bazı yan etkiler de doğurabilmektedir. Bu etkilerin düzeyi, genellikle ön işlem yönteminin çeşidi ve şiddeti ile ilintili olmakla beraber, uygulandığı süreç ve doku çeşidine de bağlı olarak değişmekte, avantajlar veya dezavantajlar ortaya çıkmaktadır (Chemat, 2017; Xin vd., 2020; Deng vd., 2022). Örneğin; 80-100 °C'de 1-10 dakika süren ısıl işlem, hücre zarlarının etkin bir bozunumunu ve enzimlerin inaktivasyonunu sağlarken, eğer ekstrakte edilmek istenen madde ısı ile bozunuyorsa, ekstraksiyon veriminde azalmaya yol açmaktadır (Şengül ve Topdaş, 2019; Zia vd.2020; Garcia ve Raghavan, 2021).

ŞEKERİN EKSTRAKSİYONUNDA ISIL İŞLEMİN DEZAVANTAJLARI

Şeker ekstraksiyonunda hücre bozundurma işlemi kullanılan üretim teknolojisine göre değişiklik gösterebilmektedir. Geçmiş çalışmalara bakıldığında iki farklı yöntem öne çıkmaktadır. Bunlardan biri yaygın olarak kullanılan geleneksel şeker üretim teknolojisinde ısıl işlem ile bozundurma, diğeri daha seyrek kullanılan mekanik presleme yolu ile hücre zarlarının bozundurulmasıdır. Sonraki yöntemde presden elde edilen doku sıvısı rafine edilirken, birinci yöntem ısıl işlem eşliğinde bir sıvı-katı ekstraksiyon yöntemidir. Bu yöntemde, pul haline getirilmiş dokular önce 85-90 °C'de yaklaşık 10 dakika ısıl işleme maruz bırakılarak bozundurulmakta, sonra 70-75 °C'deki ters akımlı su içerisinde yaklaşık 60-90 dakika daha ısıl işleme uğratıldıklarında, şeker ve şeker dışı safsızlıklar su içerisine difüze olmakta ve rafine edilecek şerbet elde edilmektedir. Şeker dışı bu safsızlıkların (pektin, amino asitler, mineraller vb.) daha sonraki bir rafinasyon basamağında kireç kullanılarak ayrıştırılıp, uzaklaştırılmaktadır (Muir, 2022). Dolayısıyla sıvı-katı ekstraksiyon basamağında

oluşan safsızlıklar, bir sonraki rafinasyon basamağını etkilemekte, safsızlıklar arttıkça ayrıştırılmaları için gereken kimyasal ihtiyacı da artmakta, bu da ürün maliyetine yansımaktadır (El-Belghiti vd., 2005; Vu vd., 2020). Ekstraksiyon soğuk yöntemle yapılsa bile, şerbette safsızlıkların olacağı aşıkârdır, bununla birlikte bu geleneksel sıcak yöntemde ısının tetikleyerek oluşturduğu safsızlıklar öne çıkmaktadır. Isıl işlem özellikle hücre duvarı bileşenlerinde zincirlerin kırılması ve bazı polisakkarit ünitelerinin ayrışmasına (hidrolitik degradasyon) yol açmaktadır (Bhattacharjee vd., 2019; Loginova vd., 2011). Orta lamel ve hücre duvarında bulunan pektin kolaylıkla şerbet içerisine geçmeye başlamaktadır. Maillard reaksiyonları meydana gelerek melanoidin gibi renk maddeleri oluşmakta ve şerbete geçen bu renk maddelerini ayrıştırmak için saflaştırma aşamasında ilave yüksek miktarda kireç kullanımı gerekmektedir (3-3.2 kg kireç/100 kg şeker pancarı) (Wang vd., 2020; Loginova vd., 2011). Ayrıca ısıl işlem sakkorozu parçalayan termofilik mikroorganizmanın gelişimini destekleyerek verimde düşmelere yol açmaktadır (Lopez vd., 2009). Bundan başka, ısıl işlem bazlı ekstraksiyonun diğer bir dezavantajı yüksek enerji sarfiyatına sahip olmasıdır, buda doğrudan ürün maliyetine artış olarak yansımaktadır. Isıyla hem doku bozundurma hem de ekstraksiyon basamakları dahil edildiğinde, enerji sarfiyatı yaklaşık 175 kJ/kg işlem görmüş pancar olarak hesaplanmıştır (Schultheiss vd., 2002; Nakthong ve Eshtiaghi, 2020). Isıl işlemler, sıcak ekstraksiyonun ortaya çıkardığı bu dezavantajların üstesinden gelebilmek için, soğuk ekstraksiyon alternatifini geçmişte farklı kimyasallar kullanarak çeşitli çalışmalara konu olmuştur. Bu çalışmalarda soğuk ekstraksiyon ortamında hücre bozunumunu gerçekleştirmek için, asitlik veya alkalilik seviyesi artırılmış ve/veya sıvı amonyak, elektrik alan uygulaması denenmiştir. İlâveten, şeker pancarı dilimlerinden katı-sıvı ekstraksiyon (presleme) 50-100 bar (Bliesener vd., 1991a) veya alkali ortam şartları altında da test edilmiştir Ponant vd., 1988). Yetersiz doku bozunma oranı, şerbete geçen kireç tuzunun yüksekliği ve melas da kötüleşme gibi çeşitli sebeplerden, bu farklı yöntemler başarılı olmamıştır (Loginova vd., 2011). Şeker ekstraksiyonunu iyileştirmek için

yapılan diğer bir çalışmada; ultrasonik destekli ekstraksiyon ile ekstraksiyon süre ve sıcaklığında düşüş ve daha yüksek saflıkta ve verimde ham şerbet elde edilmiştir (Xiong Fu vd., 2013).

Yeni doku bozundurma yöntemlerinden, vurgulu elektrik alan (PEF) tekniğinin, ısıl işlemin oluşturduğu bu olumsuz etkileri şeker ekstraksiyonunda da azaltabileceğine dair çalışmalar son yıllarda birçok çalışmaya konu olmuştur. Etkinin daha çok PEF in hücreleri ısısal olmayan bir şekilde, düşük enerji sarfiyatı ile etkin bir şekilde parçalama özelliğinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Çalışmaların bir kısmında, PEF işlemi görmüş dokudan şekerin eldesi sıvı-katı ekstraksiyon sisteminde incelenirken (Jemai ve Vorobiev, 2003; El-Belghiti vd., 2005; Loginova vd., 2011) diğer bir kısmında mekanik presle elde edilen pancar suyunda şeker yüzdesi konu edinilmiştir (Eshtiaghi ve Knorr 2002; Mhemdi vd., 2016). Birçok çalışmada, PEF in ekstraksiyon verimini artırdığı, enerji sarfiyatını azalttığı ve saflaştırma aşamasında kimyasal kullanım gerekliliğini düşürdüğü vurgulanmıştır (Jemai ve Vorobiev 2006; Mhemdi vd., 2016).

VURGULU ELEKTRİK ALAN (PEF) TEKNİĞİ

Gıda işlemede PEF tekniği terimi aslında geçmişte gen aktarımında kullanılan yöntemlerden biri olan ve elektroporasyon olarak bilinen tekniğin daha geniş anlamda kullanımını ifade etmektedir. Basit anlamda PEF elektrotlar arasına alınan hücre sistemlerine kesikli/vurgulu DC voltaj uygulamasıdır (Tylewicz, 2020). Etki mekanizması halen tam olarak açıklanamasa bile, uygulamanın hücre zarında kalıcı veya geçici bozunuma yol açtığı gösterilmiş, bozunumun elektriksel ve ortam özelliklerinden etkilendiği belirlenmiştir (Ricci vd., 2018; Genovese vd.,2021).

PEF Uygulamasında Hücre Bozunumu

En yaygın kabul edilen dielektrik parçalanma teorisine göre; PEF uygulaması sürdükçe, dielektrik hücre zarının iç ve dış yüzeylerinde zıt yükler polarize olarak, transmembran potansiyeli (TMP) artışına yol açmaktadır. TMP 1V'u aştığında, zıt yüklerin zarı sıkıştırması gözenek oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Gözenek oluşumu

ilk aşamada geçici olurken, PEF işleminin sürdürülmesi halinde hücre zarı kalıcı mekanik hasara uğrayarak, kalıcı gözenek oluşumu meydana gelmektedir (Zimmerman, 1974; Zhang vd., 2021). Özellikle dokuların kalıcı elektroporasyonu söz konusu olduğunda, hücre zarı deformasyon derecesi veya gözenek büyüklük seviyesi kritik olmaktadır, çünkü deformasyon arttıkça intrasellüler maddelerin çıkışı kolaylaşmaktadır (Mman vd., 2021). Deformasyon derecesi başta PEF in elektriksel parametrelerinden, (elektrik alan şiddeti, vurgu sayısı, vurgu genişliği ve vurgu frekansı) etkilenirken (Giteru vd., 2018; Roobab vd., 2022), sıcaklık ve elektriksel iletkenlik gibi ortam parametrelerinden de etkilenmektedir (Gabric vd., 2018; Ruzgys vd., 2019). Örneğin, milisaniye ölçekli vurgu genişliklerinin, mikro saniyeli olanlardan hücre zarında daha büyük gözenek oluşturduğu gözlenmiş, benzer bir sonuç vurgu sayısı artırıldığında bulunmuştur (Ghosh vd., 2019; Semenoglou vd., 2020). Bundan başka, PEF uygulamada önemli bir oranda ısı oluşturmaması için ortam elektriksel iletkenliği de önem taşımaktadır. Yüksek iletkenliğe sahip ortama PEF uygulamasında, ohmik ısı artışı yükselirken, düşük hücre parçalama oranı ve elektroliz gibi elektrolitik etkiler ortaya çıkmaktadır (Zimmerman, 1986; Astráin-Redín vd., 2022). Ortam sıcaklığı 55 °C dereceye kadar arttığında, hücre bozunumu için gereken PEF şiddeti azalmaktadır. Sıcaklığın hücrenin lipid kısmını yumuşatarak, bozunmaya karşı direncinin azalttığı şeklinde açıklanmaktadır. 55 °C üzerinde ki sıcaklıklarda hücre zarlarına kalıcı bozunum arttığından PEF in etkisinde azalmaktadır (Stanley, 1991; Vorobiev ve Lebovka, 2019). Hücre bozunumu için gereken PEF şiddeti, genellikle hücre çapı küçüldükçe artmaktadır. 50-300 µm çapındaki bitkisel hücreler için, 0.5-2 kV/cm alan şiddeti yeterli iken 1-10 µm çaplı mikroorganizmaların inaktivasyonu için gereken elektrik alan şiddeti 10-60 kV/cm değerlerine çıkmaktadır (Niu vd., 2020; Soltanzadeh vd., 2020). PEF şiddetinin bu aralıklarda değişmesi, ortam ve elektriksel şartlara bağlı olarak da değişmekte olup, örneğin benzer ortam şartlarında tam parçalama birçok farklı elektriksel

değişken kombinasyonunda sağlanabilmektedir (Khursheed vd., 2021; Dastangoo vd., 2020).

Hücre parçalamayı amaçlayan birçok gıda prosesinde, örneğin pastörizasyonda (Kantala vd., 2022; Šalaševićius vd., 2021; Wu ve Chang, 2022) bitkisel/hayvansal dokulardan ekstraksiyonda (Visockis vd., 202; Bocker ve Silva, 2022; Einarsdóttir vd., 2022), kurutmada (Rahaman vd., 2019; Yamakage vd., 2021; Shorstkii vd., 2020) ve enzim inaktivasyonunda (Fujivara vd., 2021; Samaranayake vd., 2022; Manzoor vd., 2020), PEF tekniğinin ürün ve proses verimi iyileştirici potansiyeli üzerinde durulmaktadır. Bu yararların birçoğu PEF in hücre zarında önemli bir ısı artışı olmadan ve düşük enerji sarfiyatı ile gözenek oluşturma özelliğine bağlanmaktadır. Genellikle enerji sarfiyatının en düşük seyrettiği seviye göz önüne alınarak tam parçalamayı sağlayacak elektriksel değişkenlerin optimizasyonu çalışmalarda göz önüne alınmaktadır (Martinez vd., 2020; Mahn vd., 2022).

Kırmızı pancardan PEF yolu ile betanin ekstraksiyonunu konu edinen diğer bir çalışmada, 1 kV/cm de 10 µs'lik karesel monopolar vurgulardan 270 adet kullanıldığında, doku bütüne yakın parçalanmış, toplam enerji sarfiyatı 7 kJ/kg olarak hesaplanmıştır (Fincan vd., 2004). Benzer şekilde 2 kV/cm'de 3 adet vurgu kullanıldığında 2.53 kJ/kg enerji sarfiyatıyla oda sıcaklığında 60 dakikada mevcut betaninlerin %70'inin ekstrakte edilebileceği gösterilmiştir (Visockis vd., 2021). Başka bir çalışmada, silindirik pancar dokusuna 4.38 kV/cm'de 20 vurgu sayısı ve toplam enerji sarfiyatı 4.10 kJ/kg olan PEF uygulamasıyla betanin ve vulgaksantin ekstraksiyonunda kontrole kıyasla verimlerde sırasıyla %329 ve %244 oranında bir artışın gözlemlendiği bildirilmiştir (Nowacka vd., 2019).

Doku Bozunum Oranının Belirlenmesi

Enerji sarfiyatının yanında, PEF veya diğer herhangi bir ön işlem uygulamasının dokuyu hangi oranda bozduğu veya dokudaki n adet hücrenin yüzde kaçının bozunduğu/ geçirgenleştirildiğinin belirlenmesi ekstraksiyon veriminin optimizasyonu açısından önem

taşımaktadır. İdeal şartlarda, ön işlemin bütün hücreleri bozundurması, böylece hücre içi muhtevanın hücre zarından kaynaklı engeline uğramadan dış ortama çıkabilecek hale gelmesi genellikle istenen bir durumdur. Bu sebepten, herhangi bir şiddetteki ön işlemin dokuyu hangi oranda bozduğunu belirlemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiş, bunlar sık sık doku parçalama endeksi (Z) olarak adlandırılmışlardır (Zhang vd., 2023). Doku parçalama endeksinin belirlenmesinde birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Konsantrasyon değerini baz alan yöntemde, dokuları bütüne yakın olarak parçaladığı bilinen bir yöntemden sonra ekstraksiyonda elde edilen bir metabolit konsantrasyon değerinin ön işlemde elde edilene oranı şeklinde olmaktadır. Bununla birlikte, PEF çalışmalarında elektriksel iletkenlik değişimini baz alan yöntemleri kullanmak daha yaygındır. Bunların bir kısmında, konsantrasyon yönetimine benzer şekilde, dokuları bütüne yakın olarak parçaladığı bilinen bir yöntemden sonra gelişen elektriksel iletkenlik değerinin ön işlemde elde edilene oranı şeklinde belirlenmektedir. Bu yöntem genelde hücre içi elektriksel iletkenliğin hücreler arasındakinden çok daha yüksek olması ve dolayısıyla doku parçalandığında doku iletkenliğinde önemli bir artış göstereceği ilkesine dayanmaktadır. İlâveten bu yöntemin geçerli olabilmesi ölçüm frekansın hücre zarlarında önemli bir geçirgenlik oluşturmayan α -frekans domeyninde veya tercihen 1-5 kHz olması gerekmektedir. Örneğin, Vorobiev ve Lebovka tarafından kullanılan endeks değeri denklem 1'deki gibi tanımlanmıştır (Fincan, 2015; Vorobiev ve Lebovka, 2020).

$$Z = \sigma - \sigma_i / \sigma_d - \sigma_i \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada σ , düşük frekansta (1-5 kHz) ölçülen elektriksel iletkenlik değeridir ve i ve d alt simgeleri sırasıyla sağlam ve tamamen parçalanmış (dondurup-çözündürme, mekaniki öğütme veya ısı işlem) dokunun iletkenliklerini belirtir. Bu tanım, sağlam doku için $Z \approx 0$ ve tamamen parçalanmış doku için $Z \approx 1$ değerlerini verir.

Parçalanma endeksinin elektriksel iletkenlik tahmininde kullanılan diğer bir yöntem, hücre zarlarının düşük ve yüksek ölçüm frekansına karşı

gösterdikleri davranış farkına dayanmaktadır. Buna göre sağlam dokunun iletkenliği düşük α frekans domeyninde (1-5 kHz) ölçüldüğünde, hücre zarları dielektrik özelliklerini korumakta olduğundan ölçüm interesellüller bölgedeki iyonların bir ölçüsü olmaktadır. Diğer bir deyişle, hücre zarları yalıtkan özelliklerini koruduklarından, intrasellüler bölgedeki iyonlar ölçümde büyük oranda algılanamaktadır. Fakat ölçüm, yerince yüksek β frekans domeyninde (3-50 MHz) yapıldığında, hücre zarları dielektrik özelliklerini yitirdiklerinden (Maxwell-Wagner etkisi), ölçüm intersellüler ve intrasellüler iyonların bir ölçüsü olmaktadır. Diğer bir ifade ile sağlam dokunun iletkenliği bu domeynde yapıldığında, hücre zarları (herhangi bir yolla) bütüne yakın parçalanmış dokunun iletkenliğine yaklaşmaktadır. Buna ilişkin doku parçalanma endeksi, Knorr ve Angersbach (1998), tarafından denklem 2'deki tanımlanıp kullanılmıştır.

$$Z_p = \frac{\left(\frac{\sigma_h^i}{\sigma_h^t}\right)\sigma_l^t - \sigma_l^i}{\sigma_h^t - \sigma_l^i} \quad (\text{Denklem 2})$$

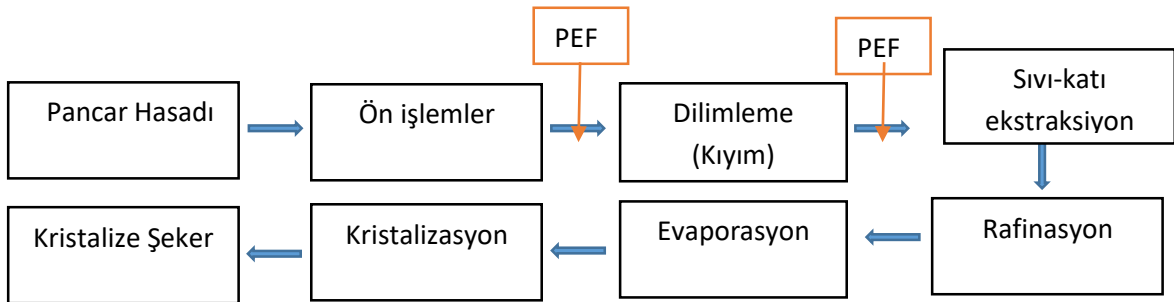
σ_l^t ve σ_l^i sırasıyla α frekans domeyninde (1-5 kHz) işlem görmüş ve işlem görmemiş (sağlam) dokunun σ_h^t ve σ_h^i ise sırasıyla β frekans domeyninde (3-50 MHz) işlem görmüş ve işlem görmemiş dokunun elektriksel iletkenliğidir. Buna göre sağlam doku için $Z_p \approx 0$, tam parçalanmış doku için $Z_p \approx 1$ olmaktadır.

PEF İN ŞEKER EKSTRAKSİYONUNDA POTANSİYELİ

PEF uygulamasının şeker ekstraksiyonundaki etkileri pek çok bilim insanı tarafından uzun yıllardır araştırılmaktadır. Anatoli Zagorul'ko uzun yıllar yaptığı çalışmalarla (1949-1957) PEF tekniğinin şeker pancarı hücrelerini parçalamada kullanılabileceğini göstermiş ve doktora tezinde yaptığı çalışması ile ilk kez soğuk ve seçici elektroplazmoliz kavramını geliştirmiştir. 1980'ler ve 1990'ların ortalarında AC ve DC elektrik alanlarının ($E = 30-100$ V/cm) şeker pancarı dilimlerinin elektroplazmolizi üzerindeki etkileri araştırılmış ve elektrik destekli işlemler ile yüksek saflıkta şerbet elde edilebileceği gösterilmiş ve ayrıca şeker pancarı dokusunun parçalanma derecesinin elektrik alan kuvveti ve işlem

süresinden etkilendiği bildirilmiştir (Sitzmann, Vorobiev ve Lebovka, 2017). PEF ile şekerce zengin bitkisel dokuların bozundurulması ve şekerin ekstrakte edilebilirliği hakkında çalışmalar 2000'li yıllardan itibaren artarak devam etmiştir. Yapılan çalışmalara bir bütün olarak bakıldığında, PEF in etkisi farklı şekilde ve alanda incelenmiştir. Bir grup çalışma alanında, PEF in elektriksel ve ortam parametreleri değiştirildiğinde, bunun dokunun parçalanma derecesi ve ekstraksiyon verimi üzerine etkilerinin çalışıldığı görülmektedir. Ekstraksiyon verimi incelenirken, tam doku bozunumu veya hücre zarının deformasyon derecesi (gözenek büyüklüğü gibi) ekstraksiyon öncesi belirlenmesi gerekmektedir, bununla beraber, bu unsur belirlenmeden yapılan çalışmalara da rastlanmaktadır (Eshtiaghi ve Knorr, 2002; Lebovka vd., 2007). Ekstraksiyon verimi dışında veya yanında, PEF ve ortam değişkenlerinin sıvı-katı ekstraksiyonda safsızlıklar üzerine etkileri daha az oranda çalışıldığı görülmektedir. Her iki alanda, PEF değişkenlerinin etkisi elektriksel iletkenlik ve sıcaklık gibi ortam parametreleri ile de etkileşmektedir. Buna göre çalışmalar, dokunun bulunduğu ortam ve özelliklerine de göre de farklılıklar göstermektedir. Bir grup çalışmada, tüm pancar dokusu çeşme suyu veya distile su içerisinde iken PEF uygulanıp, akabinde kıyılıp, pul haline getirilmiş dokudan ekstraksiyon ve safsızlıklar incelenmiştir (Schultheiss vd., 2002). Diğer uygulama şeklinde ise, pancar dokuları pul haline getirildikten sonra, su içerisinde uygulama

yapılmıştır. Bu sonrakinde, yüzeyde kesilerek bozulan hücrelerden su içerisine iyon salınımı sonucu ortam elektriksel iletkenliği artmakta buna göre de PEF in etkileri değişiklik göstermektedir. Bunun en önemli etkisi PEF uygulaması esnasında ortaya çıkan sıcaklık artışında olmaktadır, çünkü elektrik alan etkisi altında sürüklenen iyon miktarı arttıkça sürtünmede artmaktadır (Bazhal vd., 2003). Bu tip çalışmalarda, PEF in yanında ortaya çıkan sıcaklık artışı da bozunum düzeyi, ekstraksiyon verimi ve safsızlıklar üzerine etkiye bulunmaktadır. PEF ile ısısal olamayan bir sıvı-katı ekstraksiyon amaçlanıp, sağladığı enerji tasarrufu hakkında bir genelleme yapılırsa, ortam ve PEF değişkenlerine bağlı olarak, 10-20 kJ/kg civarında enerji sarf edilmektedir. Bu ısıl işlemdekine (175 kJ/kg) kıyas edildiğinde %80-90 aralığında tasarrufa tekabül etmektedir (Schultheiss vd., 2002). Bundan başka, PEF ön işlemi ile şeker ekstraksiyonunu konu edinen çalışmalara bakıldığında, ön işlemin uygulama aşamasında da farklılıklar görülmektedir. Presleme ile ekstraksiyonda, genellikle doku boyutları küçültülüp, su eklendikten sonra presleme gerçekleştirilmektedir (Eshtiaghi ve Knorr, 2002). Sıvı-katı ekstraksiyonda ise PEF ön işlemi ya bütün (dilimlenmemiş) pancara uygulanıp, sonra dilimlenmekte veya dilimlenmiş dokular su içerisine alınıp ön işlem uygulandıktan sonra ekstraksiyona gönderilmektedir (Schultheiss vd., 2002; Rezaee vd., 2019; Nakthong ve Eshtiaghi, 2020).



Şekil 1. Geleneksel yöntemle şeker üretiminde proses akış diyagramı ve çalışmalarda PEF in uygulandığı farklı yerler

Şeker ekstraksiyonunda vurgulu elektrik alan

Çizelge 1. Farklı çalışmalarda şeker ekstraksiyonunda PEF uygulamasının yapıldığı çalışmaların özeti

Uygulama	PEF işlem koşulları	Etkileri	Referanslar
Şeker pancarı dilimlerine (2 cm × 1.2 cm) veya rendelerine PEF uygulama ve presleme	2.4 kV/cm elektrik alan kuvveti, vurgu sayısı 20, frekans 1 Hz	2 veya 5 MPa'da, şekerin bütüne yakın ekstraksiyonu, posada ısıtma işlemi (~%15) göre daha yüksek kuru madde (~%30) kalıntısı	(Eshtiaghi ve Knorr, 2002)
Bütün şeker pancarına (dilimlenmemiş) PEF uygulama sonrası presleme (32 bar, 15 dakika) veya soğuk sıvı-katı ekstraksiyon	12 kV/cm elektrik alan şiddeti, 1 µs mono polar vurgu, 10 Hz frekans	PEF ve ısıtma işlemi ile hücre bozundurmada enerji sarfıyatı 2-10 kJ/kg ve 174 kJ/kg (~%94 enerji tasarrufu), Preslemede benzer verim, (~%3)	(Schultheiss vd., 2002)
Şeker pancarı dilimlerine (1.2 mm × 2.2 mm, 3-4 cm) PEF uygulama ve soğuk katı sıvı ekstraksiyon	160-780 V/cm elektrik alan şiddeti, 100 µs vurgu genişliği, 10 ms vurgu aralığı, vurgu sayısı 1000	PEF işleminin ardından çözünen madde miktarının elektriksel iletkenlikle orantılı artışı	(Jemai ve Vorobiev, 2003)
Şeker pancarı dilimlerine (30 mm × 8.5 mm) PEF uygulama soğuk katı-sıvı ekstraksiyon optimizasyonu	940 V/cm elektrik alan şiddeti, vurgu sayısı 250, spesifik enerji girişi 6-7 kJ/kg	Optimal PEF parametreleri 940 V/cm elektrik alan şiddeti, 250 vurgu spesifik enerji girişi 6-7 kJ/kg	(El Belghiti ve Vorobiev, 2004)
Şeker pancarı dilimlerine (6 mm × 1.5 mm) farklı koşullarda PEF uygulama ve farklı sıcaklıklarında ekstraksiyon	300-800 V/cm elektrik alan şiddeti, kare mono polar vurgular, vurgu sayısı 50-1000 aralığında, vurgu süresi 100 µs, frekans 1000 Hz	PEF işlemi ile ısıtma işleminden daha az renkli ve daha yüksek saflıkta şerbet eldesi (PEF %94, termal işlem %89) PEF ön işlemiyle oda sıcaklığında 70 dakika elde edilen verimin 50 °C'de 40 dakika da elde edilmesiyle ekstraksiyon süresinde ~ %45 düşüş	(El-Belghiti vd., 2005)
Şeker pancarı dilimlerine (1.5 mm × 10 mm × 10 mm) PEF uygulama ve 20-70 °C sıcaklık aralığında ekstraksiyon	100- 400 V/cm elektrik alan şiddeti aralığında, toplam işlem süresi 0.1 s., vurgu sayısı 4, vurgu süresi 9.9 ms, vurgu aralığı 10 ms, bipolar kare vurgu	40 °C ekstraksiyonda PEF ile şerbet brix değerinde ~ 2 kat artış, 80 °C'de ise benzer brix değeri, 20 °C PEF li örnek ile 70 °C işlem görmemiş örnek arasında şerbet saflığında yaklaşık ~ 5 birimlik fark (%96- %91)	(Lebovka vd., 2007)
Şeker pancarı dilimlerine (1 cm × 2.5 cm) PEF uygulama	Kare eksponansiyel vurgular, 1-7 kV/cm elektrik alan şiddeti, 5-40 vurgu sayısı spesifik enerji girişi 0.006-0.19 kJ/kg, 1-10 Hz frekans aralığı, vurgu genişliği 2-5 µs, sıcaklık 20°-70 °C	Sükroz verimi, frekanstan, vurgu genişliğinden ve vurgu şekline bağımsız, elektrik alan kuvvetinden ve ekstraksiyon ortamının sıcaklığına bağımlı, PEF uygulamasıyla (7 kV/cm-20 vurgu) 20° ve 40 °C'de ekstraksiyonlarda sırasıyla 7 ve 1.6 kat verim artışı	(López vd., 2009)

Çizelge 1. devam

Uygulama	PEF işlem koşulları	Etkileri	Referanslar
Şeker pancarı dilimlerine PEF uygulama sonrası değişen (30°-70 °C) sıcaklıklarda ekstraksiyon ve 6 bar da presleme	100-600 V/cm elektrik alan şiddeti, toplam uygulama süresi 50 ms. Vurgu sayısı 500, vurgu süresi 100 µs, vurgular arası süre 5 ms, Sıcaklık 30°-70 °C	30 °C'de ekstraksiyonda PEF li örneklerden yaklaşık 2 kat daha fazla sükröz eldesi, PEF uygulamasının ~ 10 kat daha düşük enerji tüketimi, ısıl işleme göre ~ 2 kat daha kuru posa eldesi	(Loginova vd., 2011)
Şeker pancarı dilimlerine (4-9 cm × 3 mm) PEF uygulaması ve 30° ve 50 °C'de katı sıvı ekstraksiyon	600 V/cm elektrik alan şiddeti, vurgu sayısı 500, vurgu süresi 100 µs, frekans 200 Hz	Klasik ekstraksiyon ile benzer brix değeri, PEF ile yaklaşık 14 kat düşük pektin içeriğine sahip şerbet eldesi, sıcaklığın 70 °C çıkmasıyla bulanıklıkta ~ %10 ve şerbet renklenmesinde ~ %27 artış	(Loginova vd., 2011)
Şeker pancarı dilimlerine PEF uygulama ve ekstraksiyon, farklı konsantrasyonlarda kireç kullanarak saflaştırma	600 V/cm elektrik alan şiddeti, toplam işlem süresi 50 ms	70 °C sıcak ekstraksiyonda (15 kg/m ³) PEF li örneklere (8 kg/m ³) kıyasla ham şerbetin saflaştırılması için ~ 2 kat fazla CaO ihtiyacı	(Loginova vd., 2012)
Şeker pancarı dilimlerine (1 cm × 3 cm) PEF uygulama ve soğuk katı-sıvı ekstraksiyon	0.5-6 kV/cm elektrik alan şiddeti 0.5, 0.8, 32 µF; vurgu sayısı 1-100; frekans 1Hz.	PEF ve ısıl işlem (80 °C 10 dk) ile hücre bozundurmada enerji sarfiyatı 8 kJ/kg ve 156 kJ/ kg (~ 20 kat tasarruf)	(Maskooki ve Eshtiaghi, 2012)
1 kg şeker pancarı dilimlerine PEF uygulama sonrası 5 bar da presleme ve 30°-70 °C'de sıvı-katı ekstraksiyon	600 V/cm elektrik alan şiddeti, toplam işlem süresi 5 ms, vurgu süresi 100 µs, vurgu genişliği 10 ms, Spesifik enerji girişi 2.76 ± 0.16 W h/kg	Sıvı-katı ekstraksiyon sonunda PEF li örneklerin şerbetinde ısıl işleminkinden daha fazla şeker oranı (~%1,1) posada kalan sakkaroz miktarında ~ %33 düşüş (%1.2 -%0.8)	(Mhemdi vd., 2016)
Şeker pancarı dilimlerine (1 cm × 3.5 cm) farklı koşullarda PEF uygulaması	0.5, 0.75 ve 1.5 kV/cm elektrik alan şiddeti, üstel azalan mono polar vurgular (10-20-30), vurgu süresi 10 µs	Membran hasarının artan elektrik alan şiddeti ve darbe sayısına bağlılığı ve PEF sonrası dokuda yumuşama	(Rezaee vd., 2019)
Şeker pancarı dilimlerine (5-6 mm × 50-80 cm) PEF uygulama ve 35-50 °C'de sıvı-katı ekstraksiyon sonrası presleme ve posa kurutma	0.9 kV/cm elektrik alan şiddeti, 10 Hz, vurgu süresi 0.5 ms, spesifik enerji girişi 10 kJ/kg	50 °C'de ekstraksiyon sonrası PEF li örneklere kıyasla pres suyu brix değerinde ~ 4 kat düşüş, 30 ve 70 dk sıvı-katı ekstraksiyon sonunda PEF li örneklerde ısıl işlemden daha yüksek verim (~ 6 birim artış)	(Nakthong ve Eshtiaghi, 2020)

Eshtiaghi ve Knorr (2002) şeker pancarlarının PEF ile bozunumunu elektriksel iletkenlik bazlı bir parçalanma edeksi (Z_p) ile değerlendirip, sonrasında PEF in preslemedeki etkilerini farklı örnek iriliklerinde , kuru madde, sakkoroz ve ekstraksiyon verimi açısından incelemiştir. 2.4 kV/cm ve 3.5 μ F 20 vurgu sayısında $Z_p \approx 0.5$ iken 100 vurguda 0.65 yükseldiği ancak, 200 vurgudan sonra önemli bir artış olmadığını bildirmiştir. 2.4 kV/cm da 20 vurguluk uygulama ve 2 veya 5 MPa presleme sonrası, şekerin %100 yakın oranda ekstrakte olduğunu, ve posanın ısıtma işlemi sonrası preslemeden yaklaşık %50 oranında daha fazla kuru madde içerdiğini rapor etmiş ve PEF ön işleminin ısıtma işlemine göre enerji tasarruflu bir uygulama olduğunu belirtmiştir.

Schultheiss vd. (2002) endüstriyel ölçekli PEF uygulaması tasarlayarak, tüm (dilimlenmemiş) şeker pancarına 12 kV/cm elektrik alan kuvvetinde 1 μ s lik monopolar vurguları 10 Hz frekans da uygulamış, sonrasında dokuları küçük parçalar halinde kesip presde (32 bar, 15 dakika) pancar suyu/şerbet verimini veya soğuk sıvı-katı ekstraksiyonunda (şerbette ve küspede) sakkoroz oranını incelemiştir PEF ön işlemi ve ısıtma ön işlemleri (72 °C) benzer oranda (preste) pancar suyu verimi verirken PEF (2-10 kJ/kg) işleminin enerji sarfiyatı (174 kJ/kg), ısıtma işlemine göre önemli derecede düşük bulunmuştur. Sıvı-katı ekstraksiyonda şerbette sakkoroz verimi PEF işlemlili örneklerde ısıtma işlemli örneklerden ortalamada ~%3 daha fazla olduğu rapor edilmiştir.

Vorobiev (2003) Pancar dilimlerini 50 dakika su içerisinde tuttukten sonra, PEF uyguladığında, çözünen madde miktarının ve elektriksel iletkenlikle beraber anlık olarak arttığını göstermiş, elektriksel iletkenliğin ekstraksiyon derecesini göstermede kullanılabileceğine işaret etmiştir.

El Belghiti ve Vorobiev (2004) silindirik şeker pancarı dilimlerine farklı elektrik alan şiddetlerinde ve vurgu sayılarında PEF işlemi uygulamış ve sıvı-katı ekstraksiyon optimizasyonu yapılmıştır. 940 V/cm elektrik alan şiddetinde vurgu sayısının 250 üzerine çıkmasının verimde

herhangi bir artışa neden olmadığı, karıştırma işleminin ekstraksiyon için önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. PEF ile şeker pancarından şeker ekstraksiyonu için hedeflenen minimum enerji tüketimiyle maksimum verim için şartların; 940 V/cm elektrik alan şiddeti, 250 vurgu, 250 rpm karıştırma hızı ve spesifik enerji girişinin kg şeker pancarı başına 6-7 kJ olduğu rapor edilmiştir.

El-Belghiti vd. (2005) farklı PEF koşulları ve ekstraksiyon sıcaklıkları altında şeker pancarı dokusundan şeker ekstraksiyonunun kinetiğini incelemiş ve PEF işleminden sonra ham şerbet saflığı termal işlemle karşılaştırılmıştır. 670 V/cm elektrik alan kuvveti ve 250 vurgu sayısında ekstraksiyon veriminin maksimum olduğunu rapor, oda sıcaklığında 70 dakika elde edilen verimin 50 °C'de 40 dakika da elde edildiği görülmüş ve orta dereceli sıcaklıklarla PEF işleminin kombine edilmesinin yararlı olacağı sonucuna varılmıştır. Ayrıca PEF işleminin ısıtma işleminden daha az renkli ve daha yüksek saflıkta şerbet verdiğini rapor etmiştir (PEF %94, termal işlem %89).

Lebovka vd. (2007) farklı PEF koşullarının ve ekstraksiyon sıcaklıklarının etkisinin karşılaştırıldığı çalışmada 100 V/cm elektrik alan kuvvet; şeker pancarı hücrelerinin verimli bir şekilde parçalanması sağlanmış ve 40 °C ekstraksiyonda işlem görmemiş örneklerden yaklaşık 2 kat daha fazla brix değerine sahip şerbet elde edildiği ve 80 °C'de ekstraksiyonda örneklerin brix değerleri arasında bir fark gözlemlenemediği rapor edilmiştir. Ayrıca 20 °C'de PEF uygulaması ile 70 °C'de işlem görmemiş örneklerin şerbet saflığında yaklaşık 5 birimlik fark (~%96 - ~%91) olduğu bildirilmiştir.

Lopez vd. (2009) farklı PEF koşulları ve ekstraksiyon sıcaklıkları altında şeker pancarı dokusundan şeker ekstraksiyonunun kinetiğini incelemiş ve PEF parametrelerinin şeker ekstraksiyon kinetiğine etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; sıvı-katı ekstraksiyonun verimi, frekanstan, vurgu genişliğinden ve vurgu şeklinden bağımsız iken uygulanan elektrik alan kuvvetine ve ekstraksiyon ortamının sıcaklığına

bağımlı olduğu bildirilmiştir. 7 kV/cm'de (3.9 kJ/kg) 20 atımın uygulanması, PEF işlemi uygulanmamış örneklere kıyasla sırasıyla 20° ve 40 °C'de yaklaşık 7 ve 1.6 kat verimi arttırdığı rapor edilmiştir.

Loginova vd. (2011) endüstriyel ölçekli tesis tasarlayarak PEF uygulamasının ve sıcaklığın şeker ekstraksiyonu, şerbet ve posa kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, 30-70 °C aralığındaki sıcaklıklarda ekstraksiyon ve posaya 6 bar'da 30 dakika presleme yapılmıştır. Sonuçta, 30 °C'deki ekstraksiyonda PEF uygulamasıyla elde edilen sükröz içeriğinin yaklaşık 2 kat daha fazla olduğu (%13 - %6), PEF li örneklerden presleme sonrası yaklaşık 2 kat daha kuru posa eldesi ve ekstraksiyon süresinin 70 °C'den 30 °C'ye düşürülmesiyle yaklaşık 46.7 kW.h/t enerji tasarrufu sağlanabileceği fakat PEF işleminin (5.4 kW.h/t) yaklaşık 10 kat düşük enerjiye ihtiyaç duyduğu rapor edilmiştir.

Loginova vd. (2011) PEF destekli "soğuk" (30 °C), hafif termal (50 °C) sıvı-katı ekstraksiyonundan elde edilen şerbetlerin; çözünür katı konsantrasyonu, saflık, renklenme ve filtre edilebilirlik gibi parametreleri termal sıvı-katı ekstraksiyon (70 °C) ile karşılaştırılmıştır 500 g şeker pancarı dilimlerine, 600 V/cm elektrik alan şiddeti, vurgu sayısı 500, vurgu süresi 100 µs, frekans 200 Hz, PEF işlemi uygulanmış, 30 °C ve 50 °C'de ekstraksiyon gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar klasik sıvı-katı ekstraksiyon ile karşılaştırıldığında; %brix değerinde benzer sonuçlar, PEF uygulamasıyla elde edilen şerbetlerin daha saf ve pektin içeriğinin yaklaşık 14 kat daha düşük olduğu bildirilmiştir. Ayrıca ekstraksiyon sıcaklığının 30 °C'den 70 °C'ye yükselmesiyle şerbet bulanıklığının yaklaşık %10 ve şerbet renklenmesinin yaklaşık %27 arttığı rapor edilmiştir.

Loginova vd. (2012) önceki çalışma şartlarına göre (Loginova vd., 2011) PEF işlemi uygulanmış ve 30 °C'de sıvı-katı ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiş sonrasında kireç-karbondioksit işlemi uygulanmış ve sonuçları 70 °C sıvı-katı ekstraksiyon ile karşılaştırılmıştır. 30 °C'de ekstrakte edilen ham şerbetin saflaştırılmasının, ilk karbonatlamada

daha hızlı süzülmesi ve elde edilen son şerbetin daha az renkli olduğu görülmüş ayrıca verimli ham şerbet saflaştırması için gerekli olan CaO miktarının 70 °C geleneksel ekstraksiyon da (15 kg/m³) 30 °C'de PEF destekli ekstraksiyona (8 kg/m³) kıyasla yaklaşık 2 kat fazla olduğu bildirilmiştir.

Maskooki ve Eshtiaghi (2012) şeker pancarı şeker ekstraksiyonunda optimum PEF koşullarını belirlemek için yaptıkları çalışmada; şeker pancarı dilimlerine 0,5–6 kV/cm elektrik alan kuvvetinde, vurgu sayısı 1–100 aralığında olacak şekilde PEF işlemi uygulanmıştır. Şeker pancarındaki doku hasarının en çok toplam enerji girdisi ve elektrik alan kuvvetinden etkilendiği ve maksimum bozunum için 60 vurgu sayısından sonrasının belirgin bir etki göstermediği rapor edilmiştir. PEF ön işlemi uygulanmış şeker pancarından (1 veya 2 kV/cm) oda sıcaklığında katıların transferi, 75 °C'de işlem görmemiş örneklerden daha yüksek olduğu ve 10 dakika boyunca 80 °C'ye kadar yüksek sıcaklıkta ısıl işlem şeker pancarı hücrelerini tamamen parçalamasına rağmen, enerji tüketiminin PEF işleminden yaklaşık 20 kat daha fazla olduğu bildirilmiştir.

Mhemdi vd. tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada, PEF destekli yeni bir proses tasarlanmış ve difüzyon parametreleri, ham şerbetin kalitatif özellikleri ve posa üzerindeki etkileri termal sıvı-katı ekstraksiyon işleminin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Rendelenmiş şeker pancarları; ortam sıcaklığında mono polar, 600 V/cm elektrik alan şiddeti, uygulama süresi 5ms, vurgu süresi 100µs, vurgu genişliği 10ms olacak şekilde PEF ile ön işleme tabi tutulmuş, sonra preslenmiş (4 dakika), kalan sakarozu ekstrakte etmek için preslenmiş dilimler sürekli bir pilot difüzöre (10 kg/sa) iletilmiştir. Yeni proses ile elde edilen ham şerbetin daha berrak (%92.8 - %91.8), daha konsantre (16.2 °Bx -14.6 °Bx) ve posada kalan sakaroz miktarının daha düşük (%1.2- %0.8) ve sistemin geleneksel yöntemle kıyasla daha az enerji tükettiği rapor edilmiştir.

Rezaee vd. (2019) PEF uygulamasının şeker pancarı dokusunun viskoelastik özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada; şeker pancarı

dilimlerine 0.5, 0.75 ve 1.5 kV/cm elektrik alan şiddeti, üstel azalan mono polar vurgular (10-20-30), vurgu süresi 10 µs PEF işlemi uygulanmış ve dokuda PEF kaynaklı etkilerin artan alan gücü ve darbe sayısından etkilendiği, hücre parçalanma indeksinin (Z_p) artmasıyla elastik modülde ve gevşeme sürelerinde azalma olduğu ve bu sonuçlarında şeker pancarı dokusunda sadece hücre membranının değil hücre duvarının da PEF uygulamasından etkilendiği bildirilmiştir. Nakthong ve Eshtiaghi (2020) sürekli pilot ölçekli şeker ekstraksiyonu üzerine PEF etkisinin araştırıldığı çalışmada; şeker pancarı dilimlerine, 0.9 kV/cm elektrik alan şiddeti, 10 Hz frekansta, vurgu süresi 0.5 ms, spesifik enerji girişi 10 kJ/kg şartlarında PEF işlemi uygulanmış ve sonrasında 35 ° ve 50 °C'deki sonuçlar 70 °C'de sıvı-katı ekstraksiyon ile karşılaştırılmıştır. PEF ile ön işleme tabi tutulmuş örneklerin şeker ekstraksiyon verimi işlem görmemiş örneklerden yaklaşık 6 birim daha fazla olduğu ve düşük enerji sarfiyatı (yaklaşık 10 kJ/kg) rapor edilmiştir.

SONUÇLAR

Yapılan çalışmaların sonuçları, PEF uygulamasının şeker endüstrisinde kullanımının önemli avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir. Bu avantajlar arasında, özellikle PEF in doku bozundurmada, ısıl işleme göre %80-90 oranında enerji tasarrufu sağlaması ve safsızlıkları azaltarak daha az kimyasal kullanımına elvermesi öne çıkmaktadır. Bu açıdan, geleneksel şeker üretim proses zincirinde, PEF in etkide bulunabileceği prosesler ekstraksiyon ve rafinasyon prosesleri olmaktadır. Bununla birlikte, şu ana değin yapılan çalışmaların çoğu laboratuvar ölçeklidir ve yöntemin endüstride kullanılabilmesi için, daha fazla pilot ve endüstriyel ölçekli, yatırım maliyet analizini de içeren çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZAR KATKILARI

Makalenin derlenmesinde, yazılmasında ve yayınlanmasında tüm yazarlar katkı sağlamışlardır.

KAYNAKLAR

- Astráin-Redín, L., Moya, J., Alejandre, M., Beitia, E., Raso, J., Calvo, B., Cebrian, G., Álvarez, I. (2022). Improving the microbial inactivation uniformity of pulsed electric field ohmic heating treatments of solid products. *LWT - Food Science and Technology*, 154, 112709. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112709>
- Bagade, S. B., Patil, M. (2021). Recent advances in microwave assisted extraction of bioactive compounds from complex herbal samples: *Critical Reviews In Analytical Chemistry*, 51(2), 138-149. [10.1080/10408347.2019.1686966](https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1686966)
- Barros, M., Redondo, L., Rego, D., Serra, C., Miloudi, K. (2022). Extraction of Essential Oils from Plants by Hydrodistillation with Pulsed Electric Fields (PEF) Pre-Treatment. *Applied Sciences*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/app12168107>
- Bazhal, M., Lebovka, N., Vorobiev, E. (2003). Optimisation of Pulsed Electric Field Strength for Electroporation of Vegetable Tissues. *Biosystems Engineering*, 86(3), 339-345. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00139-9](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00139-9)
- Bhattacharjee, C., Saxena, V. K., Dutta, S. (2019). Novel thermal and non-thermal processing of watermelon juice. *Trends in Food Science & Technology*, 93(2019), 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.015>
- Bliesener, K.M., Mieke, D., Buchholz, K. (1991a). Process development in the dewatering of cossettes. *Zuckerindustrie*, 116 (11), 978-986.
- Bocker R., Eric Keven Silva E.K. (2022). Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices, *Food Chemistry: X*, 15, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100398>
- Chaves, J. O., De Souza, M. C., Da Silva, L. C., Lachos-Perez, D., Torres-Mayanga, P. C., Machado, Carneiro T. F., Espinosa, M.V., Peredo A.V.G., Barbero G.F., Rostagno, M. A. (2020). Extraction of flavonoids from natural sources using modern techniques. *Frontiers in Chemistry*, 8, 507887. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.507887>

- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.S., AbertVian, M., (2017). Ultrasound Assisted Extraction of Food and Natural Products. Mechanisms, Techniques, Combinations, Protocols and Applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Dastango, S., Hamed Mosavian, M. T., Yeganehzad, S. (2020). Optimization of pulsed electric field conditions for sugar extraction from carrots. *Food Science & Nutrition*, 8(4), 2025-2034. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1490>
- Deng, L. Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X. H., Wang, J., Zheng, Z. A., Gao, Z.J., Xiao, H. W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes. *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, 59(9), 1408-1432. doi: 10.1080/10408398.2017.1409192
- Duan, H., Yan, X., Azarakhsh, N., Huang, X., Wang, C. (2022). Effects of high-pressure pretreatment on acid extraction of pectin from pomelo peel. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 5239-5249. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15840>
- Einarsdóttir, R., Þórarinsdóttir, K.A., Aðalbjörnsson, B.V., Guðmundsson M., Marteinsdóttir, G., Kristbergsson K. (2022). Extraction of bioactive compounds from *Alaria esculenta* with pulsed electric field. *Journal of Applied Phycology*, 34, 597-608. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02624-8>
- El Belghiti, K., Vorobiev, E. (2004). Mass transfer of sugar from beets enhanced by pulsed electric field. *Food and Bioproducts Processing*, 82(3C), 226-230. <https://doi.org/10.1205/fbio.82.3.226.44187>
- El-Belghiti, K., Rabhi, Z., Vorobiev, E. (2005). Kinetic model of sugar diffusion from sugar beet tissue treated by pulsed electric field. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(2), 213-218. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1944>
- Eshtiaghi, M. N., Knorr, D. (2002). High electric field pulse pretreatment: Potential for sugar beet processing. *Journal of Food Engineering*, 52(3), 265-272. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00114-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00114-5)
- Fincan, M. (2015). Extractability of phenolics from spearmint treated with pulsed electric field. *Journal of Food Engineering*, 162(2015), 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.04.004>
- Fincan, M., DeVito, F., Dejmek, P. (2004). Pulsed electric field treatment for solid-liquid extraction of red beetroot pigment. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 381-388. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2003.11.006>
- Fu, X., Zhao, Z., Yu, S., Chen, W., Wang, J. (2013). The ultrasonic-assisted extraction of sugar from sugar beet cossettes. *International Sugar Journal*, 115(1378), 692-696.
- Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzahedi, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P., Bursać Kovačević, D. (2018). Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), <https://doi.org/10.1111/jfpe.12638>
- Genovese, J., Kranjc, M., Serša, I., Petracci, M., Rocculi, P., Miklavčič, D., & Mahnič-Kalamiza, S. (2021). PEF-treated plant and animal tissues: Insights by approaching with different electroporation assessment methods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102872. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102872>
- Ghosh, D., Saluja, N., Singh, T. G. (2019). A critical analysis of electroporation in medical technology. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 10(1), 23-28. [http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.10\(1\).23-28](http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.10(1).23-28)
- Giteru, S. G., Oey, I., Ali, M. A. (2018). Feasibility of using pulsed electric fields to modify biomacromolecules: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 72, 91-113. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.009>
- Guionet, A., Fujiwara, T., Sato, H., Takahashi, K., Takaki, K., Matsui, M., Tanino, T., Ohshima T. (2021). Pulsed electric fields act on tryptophan to inactivate α -amylase, *Journal of Electrostatics*, 112,

103597. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103597>
- Jemai, A. B., Vorobiev, E. (2003). Enhanced leaching from sugar beet cassettes by pulsed electric field. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 405–412. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00499-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00499-5)
- Jiang, Y., Xing, M., Kang, Q., Sun, J., Zeng, X. A., Gao, W., Li H., Gao, Y., Li, A. (2022). Pulse electric field assisted process for extraction of Jiuzao glutelin extract and its physicochemical properties and biological activities investigation. *Food Chemistry*, 383, 132304. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132304>
- Kantala, C., Supasin, S., Intra, P., Rattanadecho, P. (2022) Evaluation of Pulsed Electric Field and Conventional Thermal Processing for Microbial Inactivation in Thai Orange Juice. *Foods*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/foods11081102>
- Khan, M. I. H., Nagy, S. A., Karim, M. A. (2018). Transport of cellular water during drying: An understanding of cell rupturing mechanism in apple tissue. *Food Research International*, 105, 772–781. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.010>
- Knorr, D., Angersbach, A. (1998). Impact of high-intensity electrical field pulses on plant membrane permeabilization. *Trends Food Science and Technology*, 9, 185–191. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00040-5)
- Kumar, K., Srivastav, S., Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>
- Lebovka, N. I., Shynkaryk, M. V., El-Belghiti, K., Benjelloun, H., & Vorobiev, E. (2007). Plasmolysis of sugarbeet: Pulsed electric fields and thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 639–644. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.020>
- Li, Y., Zhang, Z., Paciulli, M. and Abbaspourrad, A. (2020), Extraction of phycocyanin—A natural blue colorant from dried spirulina biomass: Influence of processing parameters and extraction techniques. *Journal of Food Science*, 85, 727-735. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14842>
- Limsangouan, N., Charunuch, C., Sastry, S. K., Srichamnong, W., Jittanit, W. (2020). High pressure processing of tamarind (*Tamarindus indica*) seed for xyloglucan extraction. *LWT - Food Science and Technology*, 134, 110112. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110112>
- Loginova, K. V., Vorobiev, E., Bals, O., Lebovka, N. I. (2011). Pilot study of countercurrent cold and mild heat extraction of sugar from sugar beets, assisted by pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 102(4), 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.09.010>
- Loginova, K., Loginov, M., Vorobiev, E., Lebovka, N. I. (2011). Quality and filtration characteristics of sugar beet juice obtained by “cold” extraction assisted by pulsed electric field. *Journal of Food Engineering*, 106(2), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.017>
- Loginova, K., Loginov, M., Vorobiev, E., Lebovka, N. I. (2012). Better lime purification of sugar beet juice obtained by low temperature aqueous extraction assisted by pulsed electric field. *LWT - Food Science and Technology*, 46(1), 371–374. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.10.005>
- López, N., Puértolas, E., Condón, S., Raso, J., Ignacio, Á. (2009). Enhancement of the solid-liquid extraction of sucrose from sugar beet (*Beta vulgaris*) by pulsed electric fields. *LWT - Food Science and Technology*, 42(10), 1674–1680. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.015>
- Mahn, A., Comett, R., Segura-Ponce, L. A., Díaz-Álvarez, R. E. (2022). Effect of pulsed electric field-assisted extraction on recovery of sulforaphane from broccoli florets. *Journal of Food Process Engineering*, 45(7). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13837>
- Manzoor, M. F., Zeng, X. A., Ahmad, N., Ahmed, Z., Rehman, A., Aadil, R. M., Roobab, U., Siddique, R., Rahaman, A. (2020). Effect of

- pulsed electric field and thermal treatments on the bioactive compounds, enzymes, microbial, and physical stability of almond milk during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(7). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14541>
- Marić, M., Grassino, A. N., Zhu, Z., Barba, F. J., Brnčić, M., Brnčić, S. R. (2018). An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound, microwaves, and enzyme-assisted extraction. *Trends in Food Science & Technology*, 76, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.022>
- Martínez, JM, Delso, C, Álvarez, I, Raso, J. (2020). Pulsed Electric Field-assisted extraction of valuable compounds from microorganisms. *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 19, 530–552. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12512>
- Maskooki, A., Eshtiaghi, M. N. (2012). Impact of pulsed electric field on cell disintegration and mass transfer in sugar beet. *Food and Bioprocess Technology*, 90(3), 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.12.007>
- Mhemdi, H., Bals, O., Vorobiev, E. (2016). Combined pressing-diffusion technology for sugar beets pretreated by pulsed electric field. *Journal of Food Engineering*, 168, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.07.034>
- Mirzadeh, M., Arianejad, M. R., Khedmat, L. (2020). Antioxidant, antiradical, and antimicrobial activities of polysaccharides obtained by microwave-assisted extraction method: A review. *Carbohydrate Polymers*, 229, 115421. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115421>
- Mman R., Kanwal, R., Shafique, B., Arshad, R.N., Irfan, S., Kieliszek, M., Kowalczewski, P.L., Irfan, M., Khalid, M.Z., Roobab, U., Aadil, R.M. (2021). A Critical Review on Pulsed Electric Field: A Novel Technology for the Extraction of Phytoconstituents. *Molecules*, 26(16). <https://doi.org/10.3390/molecules26164893>
- Muir, B.M., Srivastava, S., Mall, A.K (2022). *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing In*. Misra, V. (chief ed.), Springer, Singapore. pp. 837–862, ISBN: 978-981-19-2730-0
- Nakthong, N., Eshtiaghi, M. N. (2020). Pulsed electric field treatment of sugar beet. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 505(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012055>
- Niu, D., Zeng, X. A., Ren, E. F., Xu, F. Y., Li, J., Wang, M. S., Wang, R. (2020). Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China. *Food Research International*, 137, 109715. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109715>
- Nowacka, M., Tappi, S., Wiktor, A., Rybak, K., Miszczykowska, A., Czyzewski, J., Drozdal, K., Witrowa-Rajchert, D., Tylewicz, U. (2019). The Impact of Pulsed Electric Field on the Extraction of Bioactive Compounds from Beetroot. *Foods*. 8(7),244. <https://doi.org/10.3390/foods8070244>
- Oroian, M., Dranca, F. Ursachi, F. (2020). Comparative evaluation of maceration, microwave and ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds from propolis. *Journal of Food Science Technology*, 57, 70–78. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04031-x>
- Ponant, J., Foissac, S., Esnault, A. (1988). The alkaline extraction of sugar beet. *Zuckerindustrie*, 113(8), 665-676.
- Putnik, P., Kresoja, Ž., Bosiljkov, T., Jambrak, A. R., Barba, F. J., Lorenzo, J. M., Roohinejad S., Granato, D., Žuntar, I., Kovačević, D. B. (2019). Comparing the effects of thermal and non-thermal technologies on pomegranate juice quality: *Food Chemistry*, 279, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.131>
- Rahaman, A., Siddeeg, A., Manzoor, M.F. (2019) Impact of pulsed electric field treatment on drying kinetics, mass transfer, colour parameters and microstructure of plum. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 2670–2678. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03755-0>
- Rezaee, K., Noghabi, M. S., Behzad, K., Maskooki, A. (2019). Effect of moderate pulsed electric field treatment on viscoelastic properties of sugar beet. *Food Science and Technology Research*, 25(2), 157–166. <https://doi.org/10.3136/fstr.25.157>

- Ricci, A., Parpinello, G.P., Versari, A. (2018) Recent Advances and Applications of Pulsed Electric Fields (PEF) to Improve Polyphenol Extraction and Color Release during Red Winemaking. *Beverages*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/beverages4010018>
- Rodriguez Garcia, S. L., Raghavan, V. (2022). Green extraction techniques from fruit and vegetable waste to obtain bioactive compounds, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(23), 6446-6466. doi:10.1080/10408398.2021.1901651
- Roobab, U., Abida, A., Chacha, J.S., Athar, A., Madni, G.M., Ranjha MMAN., Rusu A.V., Zeng, X-A., Aadil, R.M., Trif, M. (2022). Applications of Innovative Non-Thermal Pulsed Electric Field Technology in Developing Safer and Healthier Fruit Juices. *Molecules*, 27(13). <https://doi.org/10.3390/molecules27134031>
- Ruzgys, P., Jakutavičiūtė, M., Šatkauskienė, I., Čepurnienė, K., Šatkauskas, S. (2019). Effect of electroporation medium conductivity on exogenous molecule transfer to cells in vitro. *Scientific Reports*, 9(1), 1-9. doi:10.1038/s41598-018-38287-8
- Šalaševičius, A., Uždavinytė, D., Visockis, M., Ruzgys, P., Šatkauskas, S. (2021). Effect of Pulsed Electric Field (PEF) on Bacterial Viability and Whey Protein in the Processing of Raw Milk. *Applied Sciences*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/app112311281>
- Samaranayake, C. P., Mok, J. H., Heskitt, B. F., Sastry, S. K. (2022). Nonthermal inactivation of polyphenol oxidase in apple juice influenced by moderate electric fields: Effects of periodic on-off and constant exposure electrical treatments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102955. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102955>
- Schultheiss, C., Bluhm, H., Mayer, H. G., Kern, M., Michelberger, T., Witte, G. (2002). Processing of sugar beets with pulsed-electric fields. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 30(4I), 1547-1551. <https://doi.org/10.1109/TPS.2002.804212>
- Semenoglou, I., Dimopoulos, G., Tsironi, T., Taoukis, P. (2020). Mathematical modelling of the effect of solution concentration and the combined application of pulsed electric fields on mass transfer during osmotic dehydration of sea bass fillets. *Food and Bioproducts Processing*, 121, 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.02.007>
- Shiekh, K. A., Olatunde, O. O., Zhang, B., Huda, N., Benjakul, S. (2021). Pulsed electric field assisted process for extraction of bioactive compounds from custard apple (*Annona squamosa*) leaves. *Food Chemistry*, 359, 129976. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129976>
- Shorstkii, I., Comiotto Alles, M., Parniakov, O., Smetana, S., Aganovic, K., Sosnin, M., Toepfl S., Heinz, V. (2022). Optimization of pulsed electric field assisted drying process of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Drying Technology*, 40(3), 595-603. doi:10.1080/07373937.2020.1819825
- Sitzmann, W., Vorobiev, E., Lebovka, N. (2017). Handbook of Electroporation In: *Pulsed Electric Fields for Food Industry*, Miklavčič, D. (chief ed.), Springer International Publishing Cham, Switzerland, pp. 2335-2354.
- Soltanzadeh, M., Peighambardoust, S. H., Gullon, P., Hesari, J., Gullón, B., Alirezalu, K., Lorenzo, J. (2020). Quality aspects and safety of pulsed electric field (PEF) processing on dairy products: *Food Reviews International*, 38(2022), 96-117. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1849273>
- Stanley, D. (1991). Biological membrane deterioration and associated quality losses in food tissues. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 30(5), 487-593. <https://doi.org/10.1080/10408399109527554>
- Şengül, M., Topdaş, E. F. (2019). Katı-Sıvı Ekstraksiyonunda Kullanılan Modern Teknikler ve Bu Teknikler Arasında Ultrason Yardımlı Ekstraksiyonun Yeri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 50(2), 201-216. doi: 10.17097/ataunizfd.466649
- Timmermans, R. A., Roland, W. S., van Kekem, K., Matser, A. M., van Boekel, M. A. (2022). Effect of Pasteurization by Moderate Intensity Pulsed Electric Fields (PEF) Treatment Compared to Thermal Treatment on Quality

- Attributes of Fresh Orange Juice. *Foods*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/foods11213360>
- Tylewicz U., (2020). Pulsed Electric Fields to Obtain Healthier and Sustainable Food for Tomorrow. In: *How does pulsed electric field work ?* Barba, F. J., Parniakov, O., Wiktor, A. (Eds.), Academic Press, the UK, pp. 3-21.
- Visockis, M., Bobinaitė, R., Ruzgys, P., Barakauskas, J., Markevičius, V., Viškelis, P., Šatkauskas, S. (2021). Assessment of plant tissue disintegration degree and its related implications in the pulsed electric field (PEF)–assisted aqueous extraction of betalains from the fresh red beetroot. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 73, 102761. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102761>
- Vorobiev E., Lebovka N., (2019). Green Food Processing Techniques In: *Pulsed electric field in green processing and preservation of food products*, Chemat F., Vorobiev E. (Eds.), Academic Press, the UK, pp. 403-430.
- Vorobiev, E., Lebovka, N. (2020). *Processing of Foods and Biomass Feedstocks by Pulsed Electric Energy*. 1st Edition, Springer Cham, Switzerland, 418 p.
- Vorobiev, E., Lebovka, N.I. (2022). Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry. In: *Cell Membrane Permeabilization by Pulsed Electric Fields for Efficient Extraction of Intercellular Components from Foods*, Raso, J., Heinz, V., Alvarez, I., Toepfl, S. (Eds.), Volume 2, Springer International Publishing, Switzerland pp. 209-269.
- Vu, T., LeBlanc, J., Chou, C. C. (2020). Clarification of sugarcane juice by ultrafiltration membrane: Toward the direct production of refined cane sugar. *Journal of Food Engineering*, 264, 109682. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.029>
- Wang, L., Deng, W., Wang, P., Huang, W., Wu, J., Zheng, T., Chen, J. (2020). Degradations of aroma characteristics and changes of aroma related compounds, PPO activity, and antioxidant capacity in sugarcane juice during thermal process. *Journal Of Food Science*, 85(4), 1140-1150. doi: 10.1111/1750-3841.15108
- Wu, W. J., ve Chang, J. (2022). Inactivation of vegetative cells, germinated spores, and dormant spores of *Bacillus atrophaeus* by pulsed electric field with fixed energy input. *Journal of Food Process Engineering*, 45(2). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13959>
- Xi, J., Li, Z., Fan, Y. (2021) Recent advances in continuous extraction of bioactive ingredients from food-processing wastes by pulsed electric fields. *Food Science and Nutrition*, 61, 1738–1750. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765308>
- Xu, B., Chen, J., Tiliwa, E. S., Yan, W., Azam, S. R., Yuan, J., Wei, B., Zhou, C., Ma, H. (2021). Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound pretreatment on the vacuum freeze-drying process and quality attributes of the strawberry slices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105714, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105714>
- Xu, B., Tiliwa, E. S., Yan, W., Azam, S. R., Wei, B., Zhou, C., Bhandari, B. (2021). Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review. *Food Research International*, 44(4), 862-867. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110744>
- Xu, X., Zhang, L., Feng, Y., Yagoub, A. E. A., Sun, Y., Ma, H., Zhou, C. (2020). Vacuum pulsation drying of okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench): Better retention of the quality characteristics by flat sweep frequency and pulsed ultrasound pretreatment. *Food Chemistry*, 326, 127026. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127026>
- Yamakage, K., Yamada, T., Takahashi, K., Takaki, K., Komuro, M., Sasaki, K., Aoki, H., Kamagata, J., Koide, S., Orikasa, T. (2021). Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 68, 102615. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102615>
- Zhang, C., Lyu, X., Arshad, R. N., Aadil, R. M., Tong, Y., Zhao, W., Yang, R. (2022). Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: *Food Chemistry*, 134367.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134367>

Zhang, C., Ye, J., Lyu, X., Zhao, W., Mao, J., Yang, R. (2022). Effects of pulse electric field pretreatment on the frying quality and pore characteristics of potato chips. *Food Chemistry*, 369, 130516. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130516>

Zia, S., Khan, M. R., Shabbir, M. A., Aslam Maan, A., Khan, M. K. I., Nadeem, M., Khalil, A. A., Din, A., Aadil, R. M. (2022). An inclusive overview of advanced thermal and nonthermal extraction techniques for bioactive compounds in food and food-related matrices. *Food Reviews International*, 38(6), 1166-1196. 10.1080/87559129.2020.1772283

Zimmermann, U. (1986). Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology In: *Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion*, Falsig Pedersen, H.S. (chief ed.), Volume 105. Springer, Heidelberg, Berlin, pp. 175-256.

Zimmermann, U., Pilwat, G., Riemann, F., (1974). Dielectric breakdown in cell membranes. *Biophysical Journal*, 14(11), 881-899. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(74\)85956-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(74)85956-4)