ELEKTROHİDRODİNAMİK-SICAK HAVA KOMBİNASYONU YÖNTEMİYLE BAZI TARIMSAL ÜRÜNLERİN KURUTMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Ahmet POLAT

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROHİDRODİNAMİK-SICAK HAVA KOMBİNASYONU YÖNTEMİYLE BAZI TARIMSAL ÜRÜNLERİN KURUTMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Ahmet POLAT
0000-0003-1673-7165

Prof. Dr. Nazmi İZLİ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTROHİDRODİNAMİK-SICAK HAVA KOMBİNASYONU YÖNTEMİYLE BAZI TARIMSAL ÜRÜNLERİN KURUTMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Ahmet POLAT
Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nazmi İZLİ

Tez çalışmasında, sarımsak ve armut örnekleri yüksek enerji verimliliği ve kaliteli ürün vadeden bir kurutma teknolojisi olan elektrohidrodinamik (EHD)-sıcak hava kombinasyonu yöntemi kullanılarak kurutulmuştur. Her iki örnek için dört farklı yüksek gerilim değeri (15, 20, 25 ve 30 kV) kullanılmıştır. Sarımsak örnekleri için farklı sıcaklık (50 ve 55 °C) ve gerilim değerlerinin, armut örneklerinde ise farklı hava hızı (1,5 m/s ve 2,5 m/s) ve gerilim değerlerinin örneklerin kuruma süresi, renk parametreleri, rehidrasyon özellikleri ve mikroyapısı üzerine etkisi incelenmiştir. Ek olarak, deneysel verilerin sarımsak ve armut örneklerinin kuruma davranışını tanımlayabilecek uygun modeli seçmek için on farklı matematiksel model kullanılmıştır. Ayrıca sarımsak örneklerinin kurutulması sırasında geliştirilen cihazın enerji verimlilik değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, her iki örnek için de diğer parametreler sabit tutulduğunda gerilim değerinin artması kuruma süresini azaltmıştır. Kurutulmuş sarımsak örneklerinin kuruma davranışlarını en iyi tanımlayan modellerin Difüzyon Yaklaşımı, Newton ve Verma ve ark. modelleri, armut örnekleri içinse Midilli ve ark. ve Logaritmik modelleri olduğu bulunmuştur. Artan kuruma sıcaklığı, sarımsak örneklerinin a^* ve b^* renk değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Armut örneklerinde en yüksek L^* renk değeri taze örnekte gözlenirken, bu değere en yakın değer 15 kV-1,5 m/s uygulamasında ölçülmüştür. Farklı sıcaklık ve gerilim ile kurutulan sarımsak örneklerinin rehidrasyon kapasitesine değerlerinde önemli bir farklılık belirlenmezken ($p<0,05$), yüksek gerilim değerlerinde (25 ve 30 kV) kurutulan armut örneklerinin rehidrasyon kapasite değerleri artan hava hızı ile artmıştır. Farklı sıcaklık, gerilim ve hava hızı değerlerinin örneklerin mikroyapılarına etkisi olduğu görülmüştür. Çalışmada kullanılan EHD sistemin sıcak havayla kurutma yöntemine entegre edilmesi ürünlerin kurutma verimini ve kalitesini arttırabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrohidrodinamik, kurutma, renk, rehidrasyon, mikroyapı, enerji
2023, xii + 115 sayfa.

ABSTRACT
Ph.D. Thesis

DETERMINATION OF DRYING PARAMETERS OF SOME AGRICULTURAL PRODUCTS BY ELECTROHYDRODYNAMIC-HOT AIR COMBINED METHOD

Ahmet POLAT
Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biosystem Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nazmi İZLİ

In the thesis study, garlic and pear samples were dried using the electrohydrodynamic (EHD)-hot air combination method, which is a drying technology promising high energy efficiency and quality products. Four different high voltage values (15, 20, 25, and 30 kV) were used for both samples. The effects of different temperatures (50 ve 55 °C) and voltage values for the garlic product, and the different air velocity (1.5 m/s and 2.5 m/s) and voltage values for the pear product on the drying time, color parameters, rehydration properties, and microstructure of the product were investigated. In addition, ten different mathematical models were used to select the appropriate model that could describe the drying behavior of the experimental data of garlic and pear samples. In addition, the energy efficiency values of the device developed during the drying of the garlic samples were calculated. According to the results obtained, the increase in the voltage value decreased the drying time for both samples when other parameters were kept constant. While Diffusion Approach Newton and Verma et al. models were found to best describe the drying behavior of dried garlic samples, and Midilli et al. and Logarithmic models were found for pear samples. Increasing drying temperature caused a decrease in the a^* and b^* values of garlic samples. While the highest L^* value was observed in fresh products in pear products, the closest value to this value was observed in 15 kV-1.5 m/s application. While there was no significant difference in the rehydration capacity values of the garlic products dried at different temperatures and voltages ($p<0.05$), the rehydration capacity values of the pear samples dried at high voltage values (25 and 30 kV) increased with increasing air velocity. It has been observed that different temperature, voltage, and air velocity values have an effect on the microstructure of the products. It has been concluded that integrating the EHD system used in the study into the hot air drying method can increase the drying efficiency and quality of the products.

Keywords: Electrohydrodynamic, drying, color, rehydration, microstructure, energy
2023, xii + 115 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında, bilgi ve tecrübeleriyle bana her zaman destek olan başta danışmanım Prof. Dr. Nazmi İZLİ'ye, tez jüri üyeleri Doç. Dr. Osman GÖKDOĞAN, Doç. Dr. Barış Bülent AŞIK, Doç. Dr. Hakan POLATCI ve Doç. Dr. Onur TAŞKIN'a teşekkürlerimi sunarım

Doktora eğitimim esnasında yurtiçindeki çalışmalarımda 117O793 numaralı 3001 projesi ve yurtdışı çalışmalarımda ise 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı-1059B142000576 ile destek veren TÜBİTAK kurumuna ve yurtdışı çalışmalarında bana büyük katkılar sunan Prof. Dr. G.S. Vijaya Raghavan ve Dr. Yvan Gariepy'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan annem Aklime POLAT'a, yardımlarını esirgemeyen ağabeyim Mehmet POLAT'a ve destek veren kız kardeşim Esin POLAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet POLAT
28/07/2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....vi
ABSTRACT....vii
TEŞEKKÜR....viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....x
ŞEKİLLER DİZİNİ....xi
ÇİZELGELER DİZİNİ....xii
1. GİRİŞ....1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....4
2.1. EHD kurutmanın temel mekanizması....4
2.2. Önceki çalışmalar....15
2.3. Tezde kullanılan ürünler....57
2.2.1. Sarımsak....57
2.2.2. Armut....59
3. MATERYAL ve YÖNTEM....60
3.1. Materyal....60
3.1. Yöntem....64
3.2.1. Kurutma deneyleri....65
3.2.2. Nem içeriğinin belirlenmesi....67
3.2.3. Nem oranının belirlenmesi....68
3.2.4. Kuruma eğrilerinin matematiksel modellenmesi....68
3.2.5. Renk parametrelerinin belirlenmesi ve hesaplanması....69
3.2.6. Rehidrasyon kapasitesinin belirlenmesi....71
3.2.7. Örneklerin mikroyapılarının incelenmesi....71
3.2.8. Enerji değerlerinin belirlenmesi ve hesaplanması....71
3.2.9. İstatistiksel hesaplamalar....72
4. BULGULAR ve TARTIŞMA....74
4.1. Sarımsak Örneklerinin Kurutulması....74
4.1.1. Sarımsak örneklerinin nem içeriklerinin değişimleri....74
4.1.2. Sarımsak örneklerinin kuruma eğrilerinin modellenmesi....76
4.1.3. Sarımsak örneklerinin renk analiz sonuçları....81
4.1.4. Sarımsak örneklerinin rehidrasyon kapasitesi analiz sonuçları....83
4.1.5. Sarımsak örneklerinin mikroyapı analiz sonuçları....83
4.1.6. Sarımsak örneklerinin kurutulmasında enerji performans parametreleri....86
4.2. Armut Örneklerinin Kurutulması....89
4.2.1. Armut örneklerinin nem içeriklerinin değişimleri....89
4.2.2. Armut örneklerinin kuruma eğrilerinin modellenmesi....91
4.2.3. Armut örneklerinin renk analiz sonuçları....95
4.1.4. Armut örneklerinin rehidrasyon kapasitesi analiz sonuçları....96
4.1.5. Armut örneklerinin mikroyapı analiz sonuçları....97
5. SONUÇ....101
KAYNAKLAR....103
ÖZGEÇMİŞ....114

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ρ	: Akışkanın yoğunluğu
pH	: Asitlik ve baziklik derecesini gösteren ölçü birimi
M_o	: Başlangıçtaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
R^2	: Belirtme katsayısı
dk	: Dakika
$MR_{exp,\ i}$	: Deneysel nem oranı
M_e	: Denge anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
ε	: Dielektrik geçirgenlik
E	: Elektrik alan yoğunluğu
g	: Gram
RMSE	: Hataların karelerinin karekök ortalaması
M_t	: Herhangi bir t anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
α°	: Hue açısı
υ	: İyonik rüzgar hızı
q	: İyonların yük yoğunluğu
a	: Katsayı (birimsiz)
b	: Katsayı (birimsiz)
n	: Katsayı (birimsiz)
χ^2	: Ki-kare
k	: Kinetik sabit (1/dak)
C	: Kroma değeri
t	: Kuruma zamanı (dakika)
mm	: Milimetre
MR	: Nem oranı (birimsiz)
m	: Numunenin ağırlığı (g)
L	: Parlaklık
*a**	: Rengin kırmızılığı (+) ya da yeşilliği (-)
*b**	: Rengin sarılığı (+) ya da maviliği (-)
°C	: Santigrat derece
T	: Sıcaklık (°C)
$M_{t\ +dt}$	: t+dt anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
$MR_{pre,\mathrm{i}}$	: Tahmin edilen nem oranı
V	: Gerilim

Kısaltmalar	Açıklama
AA	: Alternatif akım
DA	: Doğru akım
k.b.	: Kuru baz
kV	: Kilovolt

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Korona rüzgarı oluşumunun şematik gösterimi ……	5
Şekil 2.2.	EHD kinetik eğrilerinin şematik gösterimi ……	8
Şekil 2.3.	Kuruma hızını etkileyen faktörler ……	9
Şekil 3.1.	EHD-sıcak hava kurutma sistemi …….	61
Şekil 3.2.	EHD-sıcak hava kurutma sistemi kontrol arayüzü ……...	62
Şekil 3.3.	EHD tel sistemi …….……	63
Şekil 3.4.	Renk ölçer cihazı …….……..…	63
Şekil 3.5.	Güç ölçer cihazı …….……	64
Şekil 3.6.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) …….…….	64
Şekil 3.7.	EHD-sıcak hava kurutma sisteminin içyapısı …….……..	67
Şekil 3.8.	CIELAB renk uzayı diyagramı …….……	70
Şekil 4.1.	Farklı koşullar altında EHD-sıcak hava kombinasyonlarıyla kurutulan sarımsak örneklerinin nem içeriklerinin zamanla değişimi	76
Şekil 4.2.	Seçilen kurutma koşulları altında deneysel ve Difüzyon Yaklaşımı, Newton ve Verma vd. modellerinden elde edilen nem oranı değerlerinin karşılaştırılması……	81
Şekil 4.3.	Kurutulmuş sarımsak örneklerinin rehidrasyon kapasiteleri ……..	83
Şekil 4.4.	Sarımsak örneklerinin SEM görüntüleri (15 kV-55 °C (a), 20 kV-55 °C (b), 25 kV-55 °C (c) ve 30 kV-55 °C (d))……	85
Şekil 4.5.	Sarımsak örneklerinin SEM görüntüleri (15 kV-60 °C (a), 20 kV-60 °C (b), 25 kV-60 °C (c) ve 30 kV-60 °C (d))……	86
Şekil 4.6.	Sarımsak örneklerinin enerji değerleri ……..	89
Şekil 4.7.	Farklı koşullar altında EHD-sıcak hava kombinasyonlarıyla kurutulan armut örneklerinin nem içeriklerinin zamanla değişimi…	91
Şekil 4.8.	Seçilen kurutma koşulları altında deneysel ve Midilli ve ark. ve Logaritmik modellerinden elde edilen nem oranı değerlerinin karşılaştırılması…….	95
Şekil 4.9.	Kurutulmuş armut örneklerinin rehidrasyon kapasiteleri ……	97
Şekil 4.10.	Armut örneklerinin SEM görüntüleri (15 kV-1,5 m/s (a), 20 kV-1,5 m/s (b), 25 kV-1,5 m/s (c), ve 30 kV-1,5 m/s (d))……	99
Şekil 4.11.	Armut örneklerinin SEM görüntüleri (15 kV-2,5 m/s (a), 20 kV-2,5 m/s (b), 25 kV-2,5 m/s (c), ve 30 kV-2,5 m/s (d))……	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Gıda bozulmasını etkileyen faktörler …… 1
Çizelge 1.2. Gıda muhafaza yöntemleri …… 2
Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan bazı EHD tasarımları ……. 10
Çizelge 3.1. Ürünlerin kurutulmasında uygulanacak deneyler ……. 66
Çizelge 3.2. İnce tabaka kurutma modelleri ……..…….…..... 69
Çizelge 4.1. Farklı gerilim değerleri ve 55 °C hava sıcaklığı kullanılarak EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemi ile kurutulan sarımsak örnekleri için uygulanan modellerin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları…… 79
Çizelge 4.2. Farklı gerilim değerleri ve 60 °C hava sıcaklığı kullanılarak EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemi ile kurutulan sarımsak örnekleri için uygulanan modellerin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları…… 80
Çizelge 4.3. Taze ve kurutulmuş sarımsak dilimlerinin renk değerleri ……..… 82
Çizelge 4.4. Farklı gerilim değerleri ve 1.5 m/s hava hızı kullanılarak EHD yöntemiyle kurutulan armut örnekleri için kullanılan modellerin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları ……..…… 93
Çizelge 4.5. Farklı gerilim değerleri ve 2.5 m/s hava hızı kullanılarak EHD yöntemiyle kurutulan armut örnekleri için kullanılan modellerin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları ……..…… 94
Çizelge 4.6. Taze ve kurutulmuş armut dilimlerinin renk değerleri …….…… 96

1. GİRİŞ

İnsan nüfusu hızla artmakta ve artan nüfusun gıda talebini karşılamak oldukça endişe verici hal almaktadır. Nüfusun 2050 yılına kadar 9,1 milyar insana ulaşması ve onları beslemek için %70 daha fazla üretim gerektiği tahmin edilmektedir (Kumar ve Kalita, 2017). Fakat üretim artışının sağlanması sorunun tek çözümü olarak görülmemektedir. Ürünlerin hasatından sonra karşılaşılan kayıplar araştırmacıların bir diğer odak noktası olmuştur. FAO'nun verilerine göre 2020 yılında üretilen gıdaların %13,3'ü hasat sonrası işlemler, nakliye, depolama, toptan satış yerlerinde ve işleme sırasında kayba uğramaktadır (FAO, 2023). Ürünlerin bozulmalarının sebebi fiziksel, mikrobiyal veya kimyasal olabilmektedir. Çizelge 1.1'de ürünlerin bozulmasını etkileyen faktörler verilmiştir (Amit ve ark., 2017).

Çizelge 1.1. Gıda bozulmasını etkileyen faktörler

Gıda Bozulmasını Etkileyen Faktörler	
Fiziksel	• Nem içeriği • Sıcaklık • Camsı geçiş sıcaklığı • Kristal büyüme ve kristalleşme
Mikrobiyal	• Küfler, mayalar, bakteriler vb. mikroorganizmalar
Kimyasal	• Oksidasyon • Proteoliz • Kokuşma • Maillard reaksiyonu • Pektin hidrolizi • Hidrolitik acışma

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde hasat sonrasında kayıpların azaltılması işlemi, gıda mevcudiyetini artırmak, doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı azaltmak, gıda noksanlığını ortadan kaldırmak ve çiftçilerin geçim kaynaklarını iyileştirmek için sürdürülebilir bir çözüm olmaktadır (Kumar ve Kalita, 2017). Çizelge 1.1'de verilen gıda bozulmalarının azaltılması için bir dizi gıda muhafaza yöntemi geliştirilmiştir. Çizelge 1.2'de muhafaza yöntemlerinin sınıflandırması verilmiştir (Gould, 1989; Gould, 1995; Rahman, 2020).

Çizelge 1.2. Gıda muhafaza yöntemleri

Gıda Muhafaza Yöntemleri	
İnhibisyon	• Düşük sıcaklıkta depolama • Su aktivitesini azaltma • Oksijeni azaltma • Karbondioksidi arttırma • Asidifikasyon • Fermantasyon • Koruyucu ilavesi • Antioksidan ilavesi • pH kontrolü • Dondurma • Kurutma • Konsantrasyon işlemi • Yüzey kaplama • Yapısal modifikasyon • Kimyasal modifikasyon • Gaz uçurma
İnaktivasyon	• Sterilizasyon • Pastörizasyon • Işınlama • Elektrik uygulamaları • Basınç uygulamaları • Haşlama • Pişirme • Kızartma • Işık ses • Manyetik alan
Rekontaminasyondan Kaçınma	• Paketleme • Hijyenik işleme • Hijyenik depolama • Aseptik işleme • HACCP • ISO 9000 • Risk analizi ve yönetimi

Tez çalışmasında kullanılan kurutma gıda muhafaza yöntemlerinden inhibisyon başlığı altında verilmiştir. Kurutma en eski muhafaza yöntemlerinden biri olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, gıdaların kurutulmasında enerji verimliliği, ürün kalitesi ve kuruma süresi üç temel unsur olarak ön plana çıkmaktadır. Kurutma alanındaki çalışmalar, bu üç parametreyi optimize etmek için yapılmaktadır (Kumar ve Karim,

2019). Kurutma işleminin seçiminde bu parametreler göz önünde bulundurulmaktadır. Son zamanlarda derinlemesine araştırılan bir kurutma yöntemi olan elektrohidrodinamik (EHD) kurutmanın, düşük enerji tüketimi ve yüksek ürün kalitesi kıstaslarına uyduğu görülmektedir. Termal bir kurutma olmayan EHD kurutmanın ısıya duyarlı tarımsal ürünlerin kurutulmasında uygun olduğu belirtilmektedir (Defraeye ve Martynenko, 2018a). EHD kurutma yönteminin çoğu kurutma yönteminde olduğu gibi kurutmanın ilk aşamasında oldukça etkili olduğu ve kurutma işleminin ilerleyen aşamalarında etkinliğinin azaldığını belirlenmiştir. Bu bakımından EHD sisteminin ürün nemini uzaklaştırmasını hızlandırmak ve nemin yüzeye taşınmasını sağlamak için sisteme yardımcı bir kurutma yönteminin eklenmesine gerek duyulmuştur (Dinani ve ark., 2015a). Bu tez çalışmasında, sarımsak ve armut örnekleri EHD ve sıcak hava yöntemlerinin avantajlarından faydalanılarak geliştirilen EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemi ile kurutulmuştur. Tez kapsamında çalışılan sarımsak ve armut örneklerinin;

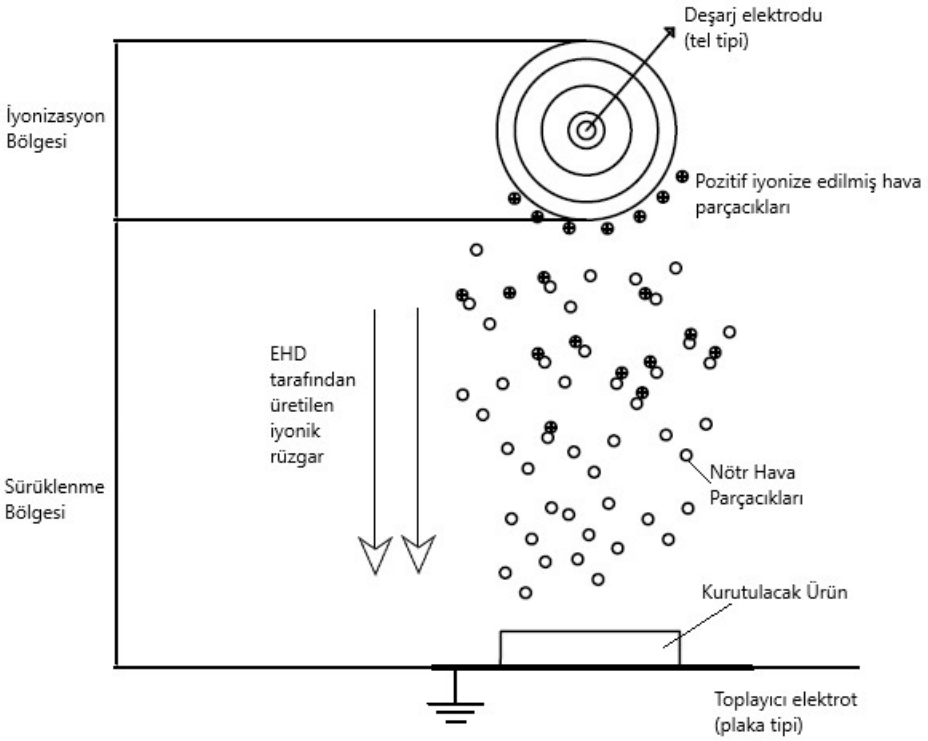
- Kuruma süreleri
- Modelleme çalışmaları
- Renk parametrelerindeki değişim
- Rehidrasyon kapasitesi değerleri
- Enerji analizleri (sarımsak)
- Mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde; EHD yönteminin temel mekanizması, önceki çalışmalar ve tezde kullanılan sarımsak ve armut örneklerine ait genel bilgiler alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

2.1. EHD kurutmanın temel mekanizması

EHD, elektrik kuvveti etkisiyle ilgili akışkanlar mekaniğinin bir dalıdır. EHD kurutmanın prensibi, hava akışının iyonik rüzgarı indükleyen yüksek gerilimli korona deşarjı tarafından üretilmesidir. Küçük eğrilik yarıçaplı (tel veya iğne) olan bir emitör elektrot ile çok daha küçük bir eğriliği olan topraklanmış bir kollektör elektrotu arasında yüksek bir gerilim farkı oluşturulmaktadır. Yeterince yüksek gerilim seviyelerine (kilovolt) ulaşıldığında emitör elektrotunun etrafındaki hava lokal olarak iyonize olmaktadır. Oluşturan iyonlar, elektrostatik (Coulomb) kuvvet etkisi ile kollektör elektrota doğru sürüklenmektedirler. Bu süreçte iyonlar, iki elektrot arasında bulunan elektriksel olarak nötr hava molekülleri ile çarpışarak momentumlarını bu parçacıklara iletmektedirler. Ortaya çıkan momentum değişimi ile kollektör elektrota doğru net bir hava hareketi oluşturulmaktadır. Elde edilen akış korona (iyon) rüzgarı olarak adlandırılmaktadır (Defraeye ve Martynenko, 2018a).



Şekil 2.1. Korona rüzgarı oluşumunun şematik gösterimi

Yüksek gerilim altında üretilen korona rüzgarı nem içeriğine sahip biyolojik materyale çarpar ve doymuş sınır tabakasını bozarak buharlaşmanın artmasını sağlamaktadır. Buharlaşma, su moleküllerinin kendilerini elektrik alanı yönünde yönlendirdikçe gerçekleşmektedir. Bu işlem sırasında, kurutulan ürünün sıcaklığının düşmesine neden olan entropi azalması (düzensizliğin azalması) meydana gelmektedir. Elektrik alanın bir dielektrik biyolojik materyalle bu şekilde ekzotermik etkileşimi, ısıya duyarlı malzemeleri kurutmak için termal olmayan bir işlem olarak EHD yöntemini tanımlamaktadır (Bajgai ve ark., 2006).

Güçlü bir elektrik alanının etkisi altındaki yüklerin, farklı dielektrik özelliklere sahip olan gaz, sıvı ve gıdanın kuru maddesi ile etkileşimi EHD'nin ayrıntılı matematiksel açıklamasını karmaşık hale getirmektedir (Singh ve ark., 2012). Tüm yükler arasında var

olan elektrostatik Coulomb kuvvetlerini takip etmek zor olduğundan bu karmaşıklığın önüne geçmek için, akışkan akışı üzerinde gerçekleştirilen birim hacim başına elektrik kuvveti denklemi kullanılmıştır (Ayuttaya ve ark., 2013).

$$F_e = qE - \frac{1}{2}E^2\nabla\varepsilon + \frac{1}{2}\nabla\left[E^2\left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right]_T\rho\right] \quad (2.1)$$

Burada E elektrik alan yoğunluğudur, q iyonların yük yoğunluğu, ε dielektrik geçirgenlik ve ρ akışkanın yoğunluğunu temsil etmektedir. Denklemin sağ tarafındaki üç terim sırasıyla elektroforetik, dielektroforetik ve elektrostriktif kuvvetlerini ifade etmektedir. Elektroforetik kuvvet (Coulomb kuvveti), elektrotlardan enjekte edilen sıvı veya iyonlar içindeki yüksüz ağdan kaynaklanmaktadır. Bireysel fazlar içindeki etkileşimler tipik olarak bu bileşenle ilişkilendirilirmektedir. Dielektroforetik kuvvet, homojen olmayan elektrik alanı, sıcaklık gradyanları ve faz farklarından dolayı dielektrik sıvının geçirgenliğindeki homojensizliğin veya uzamsal değişimin bir sonucudur. Elektrostriktif kuvvet ise homojen olmayan elektrik alan gücünden sıcaklık ve yoğunluk ile dielektrik sabitindeki değişimden kaynaklanmaktadır. Dielektrik özelliklerin sabit ve homojen olduğunu ve manyetik alan etkisi ihmal edildiği varsayılarak denklemin sağ tarafındaki ikinci ve üçüncü terimler ihmal edilmektedir. Coulomb kuvvetinin, iyonların hızlanmasından ve elektrik rüzgarının oluşmasından sorumlu olan ana kuvvet olduğu sonucu çıkarılmaktadır (Ayuttaya ve ark., 2013). EHD kurutmanın prensibi de kurutulacak malzemeye çarpan ve içinde türbülanslı, girdap benzeri hareketler üreten ve sıvı ve uçucu bileşenlerin kütle aktarım hızlarını arttıran bu elektrik rüzgarının şiddetine bağlanmaktadır. Bu nedenle, EHD kurutma, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinden kaynaklanır ve doğası gereği temelde konvektif olan bir yöntemdir.

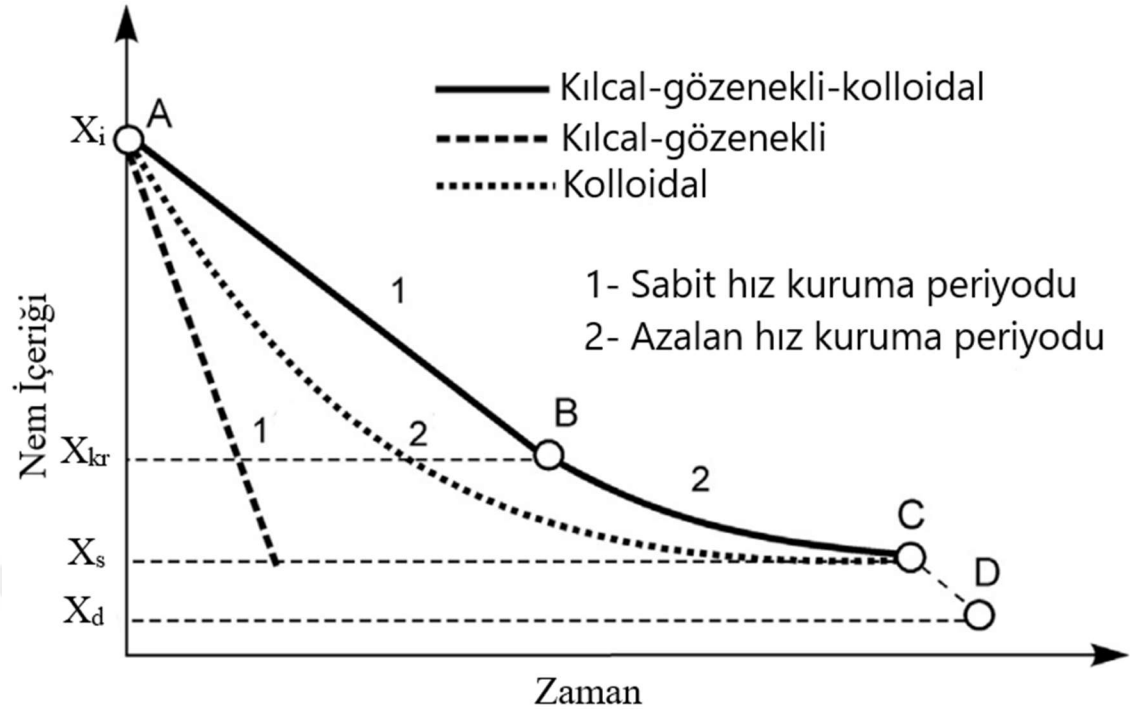
Elektrik rüzgar (korona veya iyon rüzgarı) hızı ve elektrik alan arasındaki ilişki Eşitlik (2.2)'de verilmiştir (Hashinaga ve ark., 1999):

$$v = \left(\frac{\varepsilon}{\rho}\right)^{1/2} E \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2) dikkate alındığında, elektrik alanının artmasının iyonik rüzgarın hızını arttırdığı sonucu ortaya çıkmaktadır. İyonik rüzgar hızının ulaşabileceği en yüksek sınır, kırılma geriliminin meydana geldiği yaklaşık 6×10^6 V/m değeridir. Eşitlik (2.2), enerjinin korunumu ve Gauss yasası birleştirilerek ve tek boyutta integral alınarak elde edilmektedir. Ayrıca hesaplamayı basitleştirmek için, iyonik rüzgar akışının laminer olduğu ve ortamın viskozitesinden kaynaklanan türbülansın ihmal edilebilir olduğu varsayılmaktadır. Bu denklem endüstriyel işlemlerde en sık karşılaşılan ataletsel akış için geçerlidir. Viskoz bir ortamdaki iyonların akışını düşünürsek, iyonik rüzgar hızının hesaplanması için akışkan ortamın direnci ve viskozitesi dikkate alınmalıdır. Bu durumda, iyonik hız ile akışkan viskozitesi ters orantılı hale gelmektedir (Singh ve ark., 2012).

EHD akışıyla ilgili teorik çalışmaların çoğunda Eşitlik (2.2)'de olduğu gibi yalnızca Coulomb kuvvetini dikkate alınırken, diğer iki kuvvetin (dielektroforetik ve elektrostriktif) kütle transferi üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir. Ancak, Kudra ve Martynenko (2020) deşarj aralığındaki malzemenin dielektrik özellikleri, elektrikle indüklenen kütle transferini etkileyebilecek olan elektrik alanını önemli ölçüde bozduğunu belirterek ihmal etmenin hatalı olduğunu bildirmektedirler. Ayrıca, ısı, kütle, momentum ve yük transfer işlemlerinin birleştirilmesinin, EHD kurutmanın teorik gelişimini son derece zorlaştırdığını belirtmişlerdir. Bu kapsamda dielektroforetik ve elektrostriktif kuvvetlerin dikkate alınarak yeni modellerin geliştirilmesi gerektiğini bildirmişlerdir.

EHD'nin kinetiği, üretilen iyonik rüzgarın doğası gereği sabit ve azalan oranlı kurutma periyotlarını takiben geleneksel konvektif kurutmaya benzemektedir. Bu durum ürünün yoğunluk, nem içeriği, kılcallık, iletkenlik, gözeneklilik, difüzyon ve dielektrik gibi özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 2.2'de kurutulan ürünlerin farklı kimyasal hallerinin kuruma kinetiklerindeki farklılıkları gösterilmiştir (Anukiruthika ve ark., 2021).

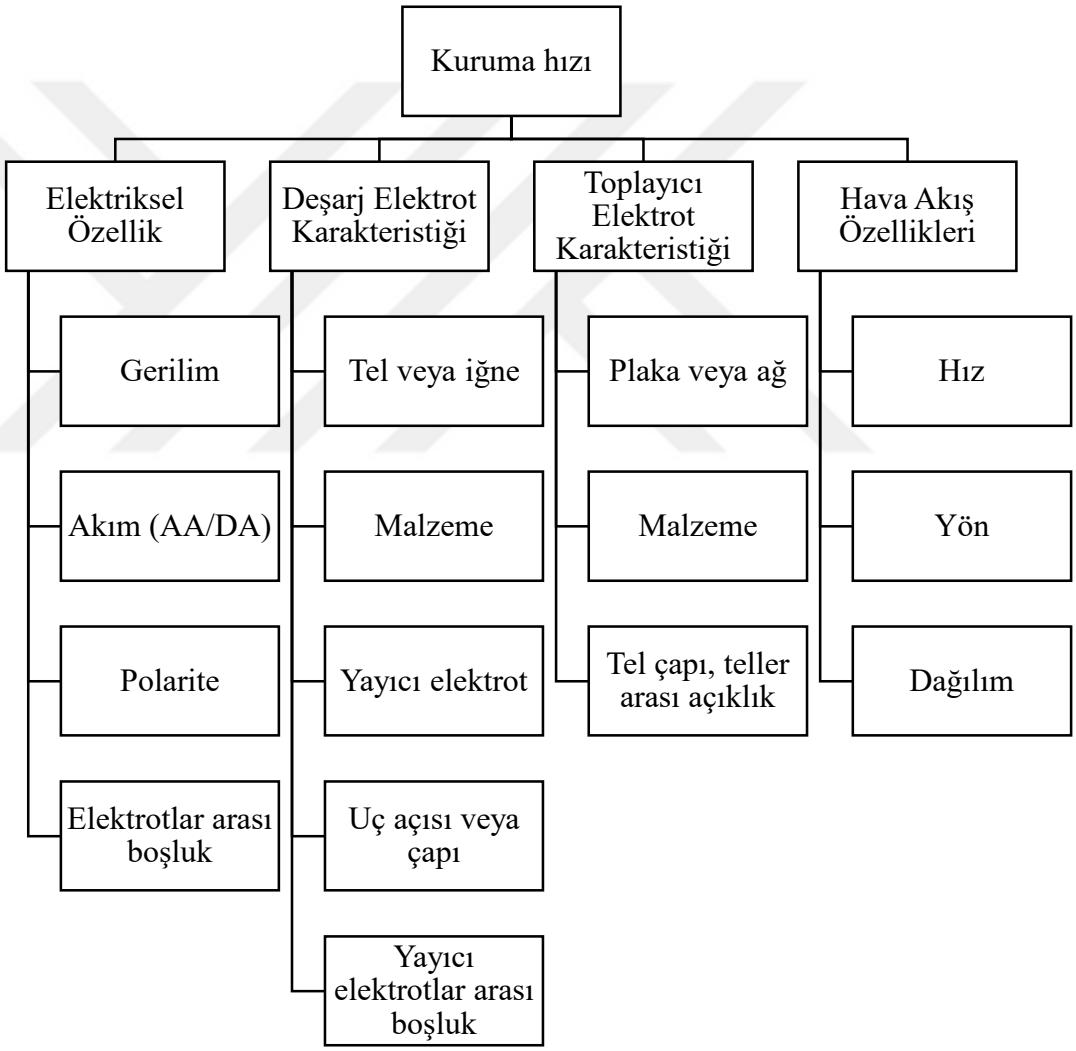


Şekil 2.2. EHD kinetik eğrilerinin şematik gösterimi (Anukiruthika ve ark., 2021)

Şekil 2.2'de düz çizgi ile gösterilen kurutma kinetiği, yüksek nemli gıdalar gibi kılcal-gözenekli-kolloidal malzemelerin kuruma davranışını temsil etmektedir. Toplam kuruma süresine kıyasla çok kısa olan ilk ön ısıtma periyodu ihmal edildiğinde, A-B noktaları arasında ürünün nem içeriği doğrusal (sabit hızda kuruma periyodu) olarak azalmaktadır. Nem içeriği kritik B noktasına (X_{kr}) ulaştığında C noktasındaki nihai nem içeriğine (X_s) kadar eğri üstel hale gelmektedir. Bu bölge azalan hız kuruma periyodu bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Kurutma devam ettirildiği takdirde, nem içeriği sonunda bağıl neme bağlı olan ve sorpsiyon izoterminden belirlenebilen denge değerine (X_d, D noktası) ulaşmaktadır. Şekil 2.2'de noktalı çizgi ile gösterilen eğri, ilk nem içeriği kritik nem içeriğinin altında olan kolza tohumu, kivi ve mantar dilimleri gibi ürünlerin kurutma kinetiğini göstermektedir. Burada kuruma eğrileri üstel davranışla Fick'in difüzyon yasasını izlemektedirler. Son olarak kesikli çizgi ile gösterilen eğride kurutma yalnızca sabit hız kuruma periyodunda gerçekleşmektedir. EHD kurutmada gözlemlenen doğrusal kurutma kinetiği, tamamen ıslatılan malzemelerde (cam boncuk yatağı, kısmen doymuş cam boncuk yatağı, doymuş kılcal-gözenekli bir malzeme gibi) görülmektedir. Burada kurutma oranın difüzyonla sınırlı olmadığı, sıcaklık, hız ve nem gibi kurutma

parametreleri tarafından kontrol edildiği belirtilmektedir (Martynenko ve Kudra, 2016; Anukiruthika ve ark., 2021).

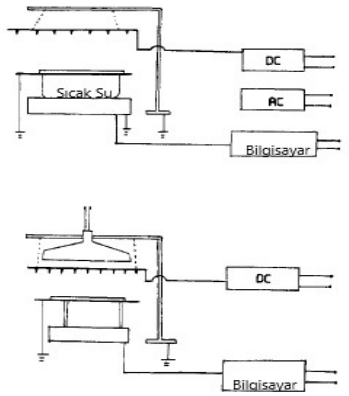
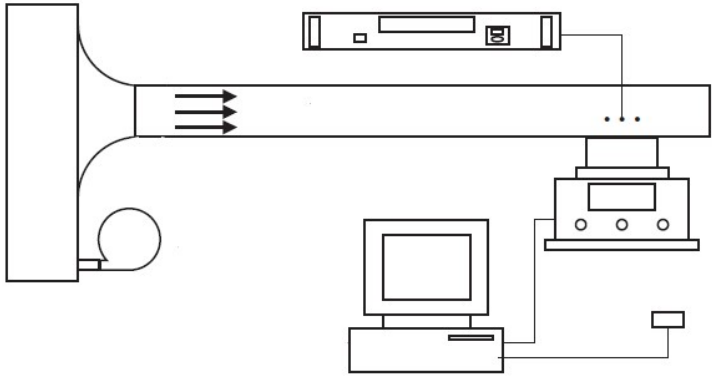
Şekil 2.2'de görüldüğü gibi EHD'nin tarımsal ürünlerin kuruma hızındaki etkinliği zaman içindeki azalma göstermektedir. Bu sorunun önüne geçebilmek ve sistemi daha verimli hale getirmek için araştırmacılar kuruma hızını etkileyen faktörleri belirlemişlerdir (Martynenko ve ark., 2021). Şekil 2.3'te EHD kurutma sisteminin kuruma hızı etkileyen faktörleri gösterilmiştir.



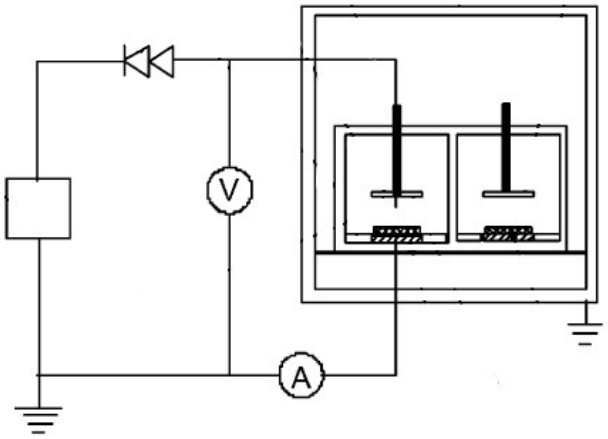
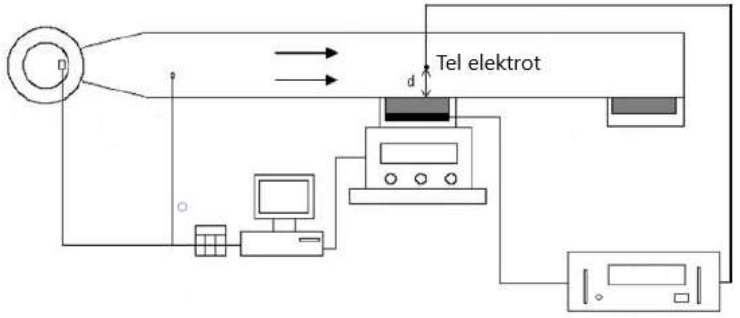
Şekil 2.3. Kuruma hızını etkileyen faktörler

Kuruma hızına etki edecek faktörlere dikkate alınarak oluşturulan literatürdeki EHD mekanizmaları Çizelge 2.1'de verilmiştir (Martynenko ve ark., 2021).

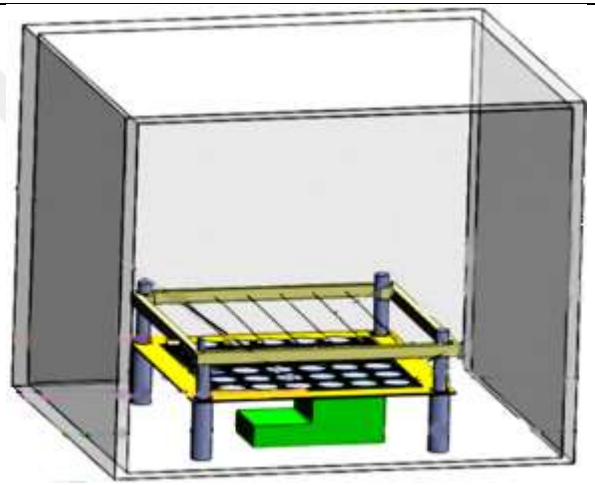
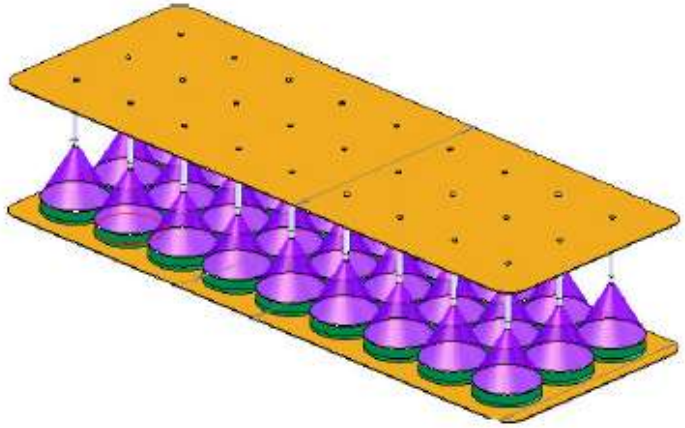
Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan bazı EHD tasarımları

Referans	EHD tasarım	Görsel
Kirschvink-Kobayashi ve Kirschvink (1986)	• Deşarj elektrodu: Birden çok iğne • Toplayıcı elektrot: Metal plaka • Elekrotlar arası boşluk: 5 cm. • Gerilim: 5–15 kV • Elektrik Alan: 1–3 kV/cm • Akım: AA, DA	
Balcer ve Lai (2004)	• Deşarj elektrodu: 3 bakır tel (3,2 cm boşluk, r = 0,25 mm) • Toplayıcı elektrot: Bakır levha (A = 0,0225 m^2) • Elekrotlar arası boşluk: 2,54 cm • Gerilim: 10–25 kV • Elektrik Alan: 3,9–10 kV/cm • Akım: DA^+, DA^-	

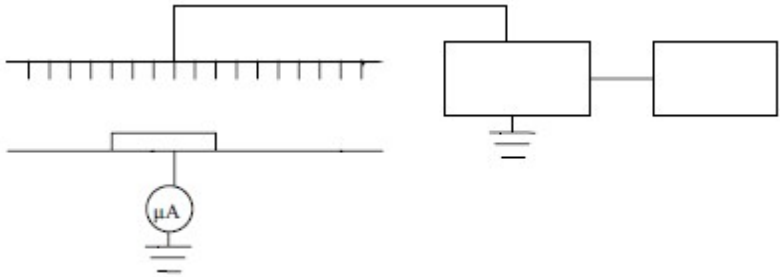
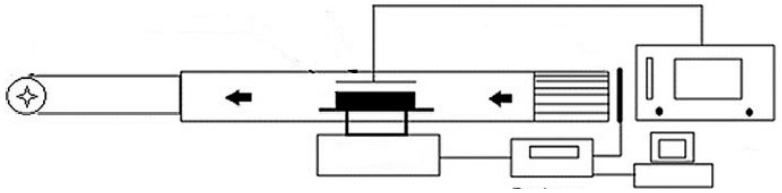
Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan bazı EHD tasarımları (devam)

Li ve ark. (2005)	• Deşarj elektrodu: Tek ve 3 iğneli • Toplayıcı elektrot: Metal plaka (Alan = 0.004 m^2) • Elekrotlar arası boşluk: 35, 50 ve 65 mm • Gerilim: 20 kV • Elektrik Alan: 5.71, 4 ve 3,08 kV/cm • Akım: DA^-	
Ould Ahmedou ve ark. (2009)	• Deşarj elektrodu: Tek tel • Toplayıcı elektrot: metal plaka • Elekrotlar arası boşluk: 2 ve 3,5 cm • Gerilim: 20 kV • Elektrik Alan: 5,7–10 kV/cm • Akım: DA^+	

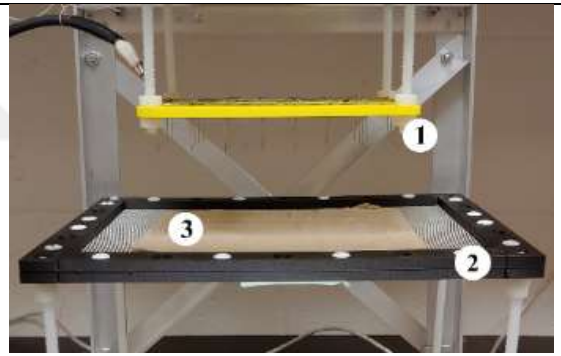
Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan bazı EHD tasarımları (devam)

Dinani ve ark. (2014)	• Deşarj elektrodu: 6 tel (5 cm aralık, r = 0,127 mm) • Toplayıcı elektrot: paslanmaz çelik levha (A = 0,0758 m^2) • Elekrotlar arası boşluk: 5, 6 ve 7 cm • Gerilim: 17, 19 ve 21 kV • Elektrik Alan: 2,4–4,2 kV/cm • Akım: DA^+	
Dalvand ve ark. (2014a)	• Deşarj elektrodu: 17 iğne (r = 0,05 mm) • Toplayıcı elektrot: Metal plaka (A = 0,07 m^2). • Elekrotlar arası boşluk: 2,8–2,9 cm. • Gerilim: 15 kV • Elektrik Alan: 5,1, 5,2, 5,3 kV/cm • Akım: DA^+	

Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan bazı EHD tasarımları (devam)

Yang ve Ding (2016)	• Deşarj elektrodu: 135 iğne (A = 40 cm × 34, R=1 mm) • Toplayıcı elektrot: Paslanmaz çelik levha (A =84 cm × 44 cm) • Elekrotlar arası boşluk: 2,8–2,9 cm. • Gerilim: a) 0, 20, 24, 28, 32 kV; b) 28 kV. • Elektrik Alan: a) 0, 2, 2,4, 2,8, 3,2 kV/cm; b) 2,8 kV/cm • Akım: AA, DA	
Singh ve ark. (2017)	• Deşarj elektrodu: Bakır tel (r = 0,25 mm) • Toplayıcı elektrot: Alüminyum levha • Elekrotlar arası boşluk: 1,5, 2, 2,5 cm • Gerilim: 0, 12,5, 15 kV • Elektrik Alan4–10 kV/cm • Akım: DA^{+}	

Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan bazı EHD tasarımları (devam)

Bashkir ve Martynenko (2021)	• Deşarj elektrodu: 42 paslanmaz çelik çivi veya iğne veya pim (2 cm aralıklı) • Toplayıcı elektrot: Paslanmaz çelik ağ (A = 0,02 m^2). • Elekrotlar arası boşluk: 2, 3, 4 cm • Gerilim: 6–26 kV • Elektrik Alan: 3,5, 4,5, 5,5, 6,5 kV/cm • Akım: DA^+	

Yapılan çalışmalarda EHD sisteminin verimliliği, kuruma davranışları ve ürünün kalite parametreleri üzerine etkisi incelenmiştir. Araştırmacılar ileriye dönük çalışmalarda sistemin eski ve yeni kurutma teknolojilerine entegrasyonu, enerji tüketiminin azaltılması ve yardımcı elemanların verimliliğin arttırılması konularını odak noktası olarak belirlemişlerdir.

2.2. Önceki çalışmalar

Chen ve ark. (1994) yaptıkları çalışmalarında EHD kurutma yöntemi ile 2, 4 ve 8 mm kalınlığında patates dilimlerini kurutmuşlardır. EHD yönteminin laboratuar koşullarındaki havayla kurutulmuş kontrol numunelerinin karşılaştırdıklarında ortalama buharlaşma hızını 2 ve 4 mm örnekler için 2,5 kat ve 8 mm örnekler için ise 2.1 kat arttığını belirlemişlerdir. EHD kurutma kinetiğinin kurutma işlemi boyunca Fickian difüzyon modeline uymadığını, hava ile kurutulan ürünlerde ise kurutma kinetiği zamanla üstel bir ilişki gösterdiğini tespit etmişlerdir. Dilim kalınlığı arttıkça deneysel nem içeriği ile Smimov ve Lysenko kurutma modelinden hesaplananlar arasındaki uyumun arttığını belirtmişlerdir. Kurutma sırasında patates dilimlerinse meydana gelen büzülmenin artması ile gözlemlenen nem içeriğinden hesaplanan yüzde sapmalarının artığını bulmuşlardır. EHD kurutmanın temel mekanizmasının ısı işlemi olmayan konvektif yöntem olduğunun sonucuna varmışlardır. Ayrıca deneylerinde EHD tarafından üretilen elektrik rüzgarının (1,63 m/s), patates dilimlerinin kuruması için ana itici güç olduğunu belirlemişlerdir.

Hashinaga ve ark. (1999) çalışmalarında elma dilimlerinin kurutulmasında gözlemlenebilir ürün bozulmasına ve kapsamlı renk değişikliklerine neden olmayan nispeten yeni bir kurutma yöntemi olan EHD kurutma yöntemini açıklamışlardır. Alternatif akım (AA) yüksek gerilimli çoklu nokta ve plaka elektrotların kullanıldığı sistemde başlangıçtaki kuruma hızlarının, ortam havası kuruma kontrolü üzerinden yaklaşık 4,5 katına çıkardığını belirtmişlerdir. Nokta elektrotun boyutu, elektrik alan kuvveti, elektrotlar arası boşluk ve elektrotlar arasındaki ayrılma, EHD kurutmasında bu değişkenlerin optimize edilmesiyle maksimize edilebilecek belirleyici faktörlerden olduğunu tespit etmişlerdir. EHD kurutmanın arkasındaki ana itici gücün, türbülans

üreten ve böylece dilimlerin kuruma hızını arttıran bir elektrik rüzgarı oluşumundan kaynaklandığını göstermişlerdir. EHD kurutma yönteminin temelde termik olmadığını ve bu nedenle ısıya duyarlı malzemelerin üretiminde yer alan endüstrilere bir avantaj sağlayabileceğini belirtmişlerdir.

Balcer ve Lai (2004) çalışmalarında çok telli elektrotlardan korona boşalımı ile kuruma hızının arttırılmasını deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Pozitif ve negatif kutuplara sahip korona boşalımlarını kullanmışlardır. Korona eşik geriliminden maksimum 25 kV gerilime 1 kV artışla ulaştığı iki farklı uygulama (havanın kullanıldığı çapraz akışlı ve hava akışının olmadığı tek yönlü akış) gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, kuruma artışını değerlendirmek için, aynı ortam koşulları altında, ancak elektrik alanı uygulanmadan, her bir uygulama için eşzamanlı olarak eşlik eden bir deney yapmışlardır. Suyun ağırlık kaybını, ortam sıcaklığını ve nemini ölçülmüşlerdir. Her deneyin en az 5 saat sürdüğünü gözlemlemişlerdir. Kuruma hızının elektrik alanının gücüne ve hava hızına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Hava akışı olmadığında, kuruma hızındaki artışın uygulanan gerilimle doğrusal olarak arttığını belirtmişlerdir. Örnek üzerinde bir çapraz akışın eklenmesi, elektrik alanının kurutma üzerindeki etkisinin önemsiz olmasına neden olabileceğini bildirmişlerdir. Enerji kullanımı açısından, mevcut sonuçlarla birlikte tek bir elektrodun birden fazla elektrottan daha etkili olabileceğini göstermişlerdir. Ancak pratik uygulamalar için kuruma hızı açısından, çok sayıda elektrot tercih edilen seçenek olmaya devam ettiğini bildirmişlerdir.

Cao ve ark. (2004) çalışmalarında yüksek voltaj elektrostatik alan (HVEF) uygulanan buğdayın kuruma özellikleri incelemişlerdir. Çeşitli kuruma sıcaklıkları ve elektrik alan kuvvetlerinde, yüksek voltaj elektrostatik alan içindeki buğdayın kuruma hızının kontrol örneklerine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. HVEF'in çoklu noktadan plakaya korona boşalım elektrotunun, benzer şekilde sıcak hava ile kurutulmuş kontrol numunelerinin değerlerine kıyasla 10, 7,5 ve 5 kV/cm elektrik alan kuvveti için ortalama kuruma hızını sırasıyla 2,1, 2 ve 1,7 oranında arttırdığını belirlemişlerdir. Düşük kuruma sıcaklığında HVEF ile kuruma artışının, yüksek sıcaklıkla kurumadan daha belirgin olduğunu tespit etmişlerdir. Gerilim arttıkça ve elektrotlar arası mesafe azaldıkça kuruma hızının arttığını belirlemişlerdir. Enerji

tüketiminin birkaç mikroamperlik akım nedeniyle çok düşük olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, yüksek voltaj elektrostatik alan uygulanan buğday örneklerinin kuruma özelliklerini tanımlayan bir regresyon modeli geliştirmişlerdir.

Li ve ark. (2005) çalışmalarında okara kekinin kurutulmasını EHD-fırın (105 °C) kombinasyon ve fırın (105 °C) kurutma yöntemlerini kullanarak araştırmışlardır. Okara kek örneklerini (ağırlık olarak 77 g ve % 81.57±% 0.14 yaş baz ilk nem) iç çapı 93 mm ve derinliği 18 mm olan petri kaplarına koymuşlardır. Örneklerden birine iğne ve plaka elektrotları ile oluşturulan yüksek bir elektrik alanı uygulandığını ve diğerine ise kontrol örneği olarak kullanıklarını belirtmişlerdir. Nokta elektrotlarındaki elektrot sayısını 1 ve 3, elektrotlar arası mesafeyi 35, 50 ve 65 mm olarak ayarlamışlar, ayrıca kuruma esnasında gerilim seviyesini 20±0,1 kV'ta sabit tutmuşlardır. Yüksek elektrik alan altında ürünlerin kurumasındaki nokta elektrotlarındaki iğnelerin sayısının ve elektrot boşluğunun değişmesiyle, başlangıçtaki kuruma hızının kontrol örneklerinden aynı anda 1,7-3,2 kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda hem elektrik alanlı hem de elektriksiz işlem uygulanan okara kek örneklerinin kuruma kinetiğinin, Fickian difüzyon modeline göre Page modelinin daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, azalan hız periyodunu iki kısma ayrılabileceğini bildirmişlerdir. Nem içeriği oranı e^{-e} (= 0,066) olduğunda, azalan hız periyodunun birinci aşamadan ikinci aşamaya değiştiğini tespit etmişlerdir. Yüksek elektrik alan uygulaması altında kuruma süresi, % 10 yaş baz son nem içeriğinde ölçülen kontrol örneklerine kıyasla % 15-40 azaldığı gözlemlemişlerdir.

Li ve ark. (2006) yaptıkları çalışmalarında EHD yöntemle kurutulan okara kekinin kuruma işlemindeki değişimlerini ve görünümünü incelemişlerdir. Deneyleri yapmadan önce kullanacakları fırını 105 °C'ye kadar ısıtmışlardır. Kuruma sırasında yüksek gerilimi negatif DC 20±0,1 kV'ta sabit tutmuşlardır. Nokta elektrotlarındaki iğnelerin sayısını 1 ve 3, elektrotlar arası boşluğu 35, 50 ve 65 mm olarak ayarlamışlardır. Sonuçları incelediklerinde, yüksek elektrik alan altındaki örneklerin kuruma sürelerinin % 10 (yaş baz) son nem içeriğindeki kontrol örneğine kıyasla % 15-40 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Farklı yüksek elektrik alan koşullarında aynı kuruma süresindeki kuruma hızı ile karşılaştırıldığında, başlangıç kuruma hızı kontrol örneklerinden (105 °C) 1,7-3,2 kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Elektrik alanın okara kekinin görünümü

üzerinde etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, kuruduktan sonra okara keki bütün şeklini koruduğunu ve yüksek elektrik alan uygulanan yüzeyde herhangi bir çatlak oluşmadığını, ancak kontrol örneklerinin yüzeyinde bazı çatlaklar oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, yüksek elektrik alan uygulanan örneklerin renginin kontrol örneklerinden belirgin şekilde daha kahverengi olduğunu belirtmişlerdir.

Lebovka ve ark. (2007) yaptıkları çalışmalarında darbeli elektrik alanının (PEF) işleminin patates dokusunun konvektif kurutulması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Patates dilimleri 30-70 °C kuruma sıcaklıkları aralığında kurutmuşlardır. Kuruma öncesi ön işlemin ve kuruma sırasındaki PEF işleminin etkilerini incelemişlerdir. Herhangi bir işleme tabi tutulmamış, PEF ile muamele edilmiş ve dondurularak çözülmüş patates dokuları için efektif difüzyon katsayısının (D_{eff}) sıcaklık bağımlılıklarını karşılaştırmışlardır. Efektif difüzyon katsayısının (D_{eff}), ön işlemlere duyarlı olduğunu ve dondurularak çözülmüş ön işleme tabi tutulmuş numuneler için her zaman en yüksek değerleri aldığını gözlemleseler de bu işlemin daha maliyetli olduğunu belirtmişlerdir. Verilerden, numunelerin yüksek sıcaklıklarda (T = 70 °C) ısıl ön işleminin kuruma hızı üzerinde pratikte hiçbir yararlı etkisinin olmadığını, daha düşük sıcaklıklarda (T = 50 °C) aynı termal ön işlemin efektif difüzyon katsayısını arttırdığını ve PEF ön işleme tabi tutulmuş numuneler için karşılaştırılabilir bir etki verdiğini belirlemişlerdir. Patates dokusu için PEF işleminin, kuruma sıcaklığının yaklaşık 20 °C düşürülmesine izin verdiğini ve bu nedenle, bu yöntemin özellikle ısıya duyarlı ürünlerin düşük sıcaklıklarda kurutulması ve konvektif kuruma hızının arttırılması için umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Bai ve ark. (2008) çalışmalarında deniz yosununun kuruma niteliklerini iyileştirmek için yüksek gerilim elektrik alanlı yeni bir kuruma teknolojisi kullanmışlardır. Deniz yosunun çok noktalı bir elektrot ve topraklanmış bir dikdörtgen paslanmaz çelik levha kullanılarak doğru akım (DA) yüksek gerilimli elektrik alanı (HVEF) altında 15 °C'de kurutmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre yüksek gerilimli elektrik alanının, aynı sıcaklıkta, iki elektrot arasındaki gerilim ne kadar yüksek olursa, kuruma hızının o kadar hızlı olacağını tespit etmişlerdir. 45 kV gerilim ile çok noktalı bir plaka elektrot sistemine sahip HVEF, 1 saatlik uygulamada toplam nemin %42'sini buharlaştırabileceğini bulmuşlardır. 1 saat

boyunca 60 °C'de sıcaklıkta ve 15 °C'de ortam havasındaki deneylerde, yosundan sırasıyla toplam nemin %65,3'ünü ve %6,2'sini kurutabildiğini belirlemişlerdir. İlk dakikadan 30. dakikaya kadar ortalama HVEF kuruma, fırında kuruma ve ortam havası ile kurumanın hızı sırasıyla 34,50 mg/dk, 46,48 mg/dk ve 5,39 mg/dk olarak tespit etmişlerdir. HVEF ile kurutulmuş yosun için kalite faktörleri, fırında kurumaya göre daha iyi rehidrasyon, daha iyi renk, daha düşük bozulma ve daha yumuşaklık sergilediğini gözlemlemişlerdir.

Ahmedou ve ark. (2009) çalışmalarında bir korona deşarjı ile bir elektrik rüzgarının üretilmesine dayanan EHD kurtuma yönteminin potansiyelini açıklamışlardır. Bu yöntemin ana yönlerini tartışmışlar ve gıda işlemleri için yararlarına özel vurgu yapmışlardır. Makalenin ana kısmında, kuruma işleminde EHD geliştirmesini değerlendirmek için yürütülen deneysel araştırmalardan bahsetmişlerdir. Elektrostatik alana ve çapraz hava akışına maruz bırakılan bir gıda ürünü üzerindeki ağırlık kayıplarını ölçmek için bir deney düzeneği tasarlamışlardır. Ağırlık kayıpları açısından, bir korona deşarjı tarafından üretilen iyonik rüzgar (20 kV'da tel), 4,2 m/s'de zorlanmış konveksiyona eşdeğer olduğunu bulmuşlardır. Bununla birlikte, bu iyonik rüzgar, büyük hıza sahip konveksiyon akış ile birleştirildiğinde, EHD verimliliğinin önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir. En iyi sonuçları, gıda yüzeyi ile korona elektrotu arasındaki mesafenin en az olduğu uygulamada elde etmişlerdir. Birleştirilmiş EHD yöntemi karmaşık etkileşimlere yol açmış ve türbülanslı rejimde akış alanını araştırmak için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Hesaplamalarda akış yapısının değişimine dikkat çekmişlerdir. Kullandıkları modelin EHD süreçlerinin tasarlanmasına yardımcı olması için, akışın durağan olmayan özelliklerini dikkate alacak şekilde geliştirilmesi gerektiğini bildirişlerdir. Ayrıca, akış alanını doğrulamak ve daha yüksek sıcaklıkta EHD işleminin verimliliğini araştırmak için başka deneyler yapılmasını önermişlerdir.

Bai ve Sun (2009) çalışmalarında EHD kurutmanın enerji tüketimini azaltmak, kuruma yöntemini ve kuruma verimliliğini artırmak amacıyla, deneylerinde kuruma hızı ve enerji tüketimi parametrelerini araştırmışlardır. Petri kabındaki tofu örneğini tel ve plakadan oluşan EHD sistemine koymuşlardır. Gerilim, elektrot aralığı ve iki komşu tel arasındaki mesafeyi değiştirerek kuruma hızı ve enerji tüketimi ile ilgili faktörleri incelenmişlerdir.

Tel elektrotlar ile plaka yüzeyi arasındaki mesafe sabit olduğunda, enerji tüketiminin sağlanan gerilimle doğrusal olmayan bir şekilde artarken, kuruma hızının doğrusal olarak arttığını tespit etmişlerdir. Uygulanan gerilim değişmediğinde tofu örneğinin kuruma hızı ve enerji tüketiminin iki komşu tel arasındaki mesafe ile değiştiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, iki komşu tel arasındaki mesafe değişmediğinde, tofu örneğinin kuruma hızı ve enerji tüketiminin elektrotlar arası mesafe ile değiştiğini gözlemlemişlerdir. Elektrot arası ve iki komşu tel arasındaki mesafe 9 cm olduğunda, kuruma hızının en yüksek seviyeye ulaştığını ve 45 kV gerilimin kuruma için en uygun değer olduğunu bildirmişlerdir.

Huang ve Lai (2010) yaptıkları çalışmalarında korona rüzgarıyla artan su buharlaşmasını araştırmak için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Sadece pozitif korona deşarjı dikkate almışlardır. Ayrıca çapraz akışın EHD ile geliştirilmiş su buharlaşması üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları incelediklerinde, suyun buharlaşmasının korona rüzgarı tarafından büyük ölçüde artırılabileceğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, yüksek hızlı bir çapraz akış, korona rüzgarının etkisini azaltabileceğini de belirtmişlerdir. Literatürde bildirilen deneysel verilerle elde ettikleri sonuçların uyum olduklarını tespit etmişlerdir.

Chaktranond ve Rattanadecho (2010) çalışmalarında EHD kurumaya tabi tutulan cam boncuk örneklerinde paketlenmiş gözenekli bir yatakta elektrik geriliminin, parçacık boyutlarının ve tabaka düzeninin ısı ve kütle aktarımı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Paketlenmiş yatağı, tek ve çift kat cam boncuk, su ve havadan oluşturmuşlardır. Cam boncukların boyutlarını 0,125 ve 0,38 mm (çap) olarak ölçmüşler ve 0–15 kV aralığında elektrik alanlarını uygulamışlardır. Sıcak hava akışının ortalama hızı ve sıcaklığını ise sırasıyla 0,33 m/s ve 60 °C sıcaklıkta kontrol etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre konvektif ısı transfer katsayısının ve kuruma hızının korona rüzgarı ile önemli ölçüde arttığını elde etmişlerdir. Tek katmanlı durumda, gözenekliliğin etkileri nedeniyle, küçük boncuklar içeren paketlenmiş yatağın, büyük boncuklara göre daha yüksek kapiler basınca sahip olduğunu, bunun da daha yüksek su uzaklaştırma oranı ve daha yüksek ısı transferi oranı ile sonuçlandığını tespit etmişlerdir. Kılcal basınç farkının etkisini göz önüne aldıklarında, çift katmanlı durumda sıcaklık dağılımı ve nemin uzaklaştırma hızı, tek katmanlı durumda gözlenenden farklı olduğunu belirlemişlerdir.

Ayrıca, çift katmanlı durumda, ince-kaba paketlenmiş yatak, kaba-ince paketlenmiş yatağın sağladığı kuruma hızından daha yüksek kuruma hızı sağladığını bildirmişlerdir.

Basiry ve Esehaghbeygi (2010) çalışmalarında EHD ve sıcak hava (25 °C) yöntemiyle kuruttukları kolza tohumu örneklerinin kuruma kinetiklerini ve çimlenme parametrelerinin değişimini incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel verilere göre 8, 9 ve 10 kV'luk EHD uygulamalarında kuruma hızlarının, sıcak hava ile kurutulan örneklerin kuruma hızlarına göre sırasıyla 1,78, 2,11 ve 2,47 oranında arttığını belirtmişlerdir. Artan gerilim değerlerinin kuruma hızını önemli ölçüde arttırdığı sonucuna varmışlardır. EHD ile kuruma yönteminde enerji tüketiminin çok düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, EHD kurutmanın kolza tohumu örneklerinin sap ve kök boylarında fiziksel bir zarar oluşturmadığını, aynı şekilde çimlenme oranı ve çimlenme hızına da önemli bir etkisinin bulunmadığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte EHD kurutma yönteminin çimlenmenin gelişmesine ve hızlanmasına neden olduğunu ve kök gelişimini arttırdığını belirtmişlerdir.

Bai ve ark. (2010) yaptıkları çalışmalarında çeşitli fiziksel faktörlerin tel elektrodu kullanılan EHD kurutma sisteminin kuruma hızı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Petri kabında bulunan tofu örneklerini tel elektrot ve bir plaka düzeneğine sahip yüksek gerilimli elektrostatik alana yerleştirmişlerdir. Gerilim, elektrotlar arası ve iki komşu tel arasındaki mesafeyi değiştirerek, kuruma hızıyla ilgili faktörleri nicel olarak incelemişlerdir. Tel elektrot tarafından oluşturulan yüksek gerilimli elektrostatik alanın, tofu örneğinin kuruma hızını önemli ölçüde artırabildiğini ve 45 kV ile tofu örneklerinin kuruma hızının aynı sıcaklıktaki kontrol örneklerinin neredeyse 8 katı olduğunu tespit etmişlerdir.

Kamkari ve Alemrajabi (2010) çalışmalarında bir elektrik alan (korona rüzgarı) uygulanarak zorlanmış akış buharlaşma hızının arttırılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında korona rüzgar hızı, elektrot aralığı ve hava akış hızının buharlaşma geliştirme seviyesi üzerindeki etkilerine odaklanmışlardır. Elektrik alanlı ve elektrik alansız olmak üzere iki deney grubu gerçekleştirmişlerdir. İlk deneyden elde ettikleri verileri, elektrik alan varlığında buharlaşma artışının değerlendirilmesi için

referans olarak kullanmışlardır. Uyguladıkları gerilimleri 1 kV artışlarla aşırı kıvılcım gerilimine kadar değiştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre korona rüzgarının su buharlaşma hızı üzerinde büyük bir iyileştirme etkisine sahip olduğunu ve artan gerilimle arttığını ve uygulanan sabit gerilim değerlerine elektrot aralığının artmasıyla azaldığını belirlemişlerdir. Ancak buharlaşma hızının, hava akış hızının artmasıyla etkinliğinin kademeli olarak azaldığını tespit etmişlerdir. 0,125 ve 1,75 m/s hava hızları için maksimum artış oranları sırasıyla 7,3 ve 3,6 olarak bulmuşlardır. EHD buharlaşma artışının ve termal performans katsayısının tahmini için iki deneysel korelasyon elde etmişlerdir. EHD yönteminin korona başlangıç gerilim değerine yakın gerilimlerde uygulanmasının, çok az miktarda elektrik gücü ile önemli bir miktarda ısı ve kütle transferinde artışa neden olabildiğini, ancak uygulanan gerilimin artmasıyla performansının düştüğünü belirtmişlerdir. Bununla birlikte, buharlaşma artışının uygulanan gerilimle arttığı tespitiyle karıştırılmaması gerektiğini burada asıl vurgulanmak istenenin elektrik enerjisi kullanımının daha düşük uygulanan gerilim değerlerinde daha etkili olduğunu bildirmişlerdir.

Bai ve Sun (2011a) yaptıkları çalışmalarında su ürünleri için yenilikçi bir kurutma yöntemi olan EHD yöntemini kullanmışlardır. Bir deniz ürünü olan karides örneklerini 15 °C'de ortam havası, EHD yöntemi ve 60 °C'de fırın kullanılarak kurutmuşlardır. Kurutulmuş karideslerin büzülme oranı, su absorpsiyon, rehidrasyon oranı, kütle kayıpları ve renk, doku ve düzenlilik gibi duyusal niteliklerini incelemişlerdir. EHD yönteminin 8 saat uygulanması sonucu karidesler örneklerinin toplam neminin %71,1'inin buharlaştırabildiğini belirlemişlerdir. 60 °C'de fırın kurutma ve 8 saat boyunca 15 °C'de ortam havası ile kurutma neticesinde karidesler örneklerinin toplam neminin sırasıyla %91,8 ve %16,4'ünü uzaklaştırdığını belirlemişlerdir. İlk saatten altıncı saate kadar ortalama EHD, fırın ve ortam havası ile kuruma hızları sırasıyla 62,95, 81,76 ve 16,24 mg/dakika olduğunu belirtmişlerdir. EHD ile kurutulmuş karides örneklerinin fırında kurutulmuş örneklere göre daha az büzülme, daha düşük bozulma, daha yumuşak gövde, daha iyi rehidrasyon ve renk değerlerine sahip olduklarını tespit etmişlerdir.

Bai ve ark. (2011b) çalışmalarında İspanyol uskumru örneklerinin kuruma davranışlarını ve kuruma sürelerini % 30, 40, 50, 60, 70'lik bağıl nemlerde 5 °C'lik artışlarla 10 °C'den

maksimum 30 °C'ye ve 5 kV'den 5 kV'lik artışlarla maksimum gerilim olan 50 kV kadar çıkabilen EHD kurutucuda sabit ürün kalınlığında incelemişlerdir. Kurutma sırasında örnek ağırlıklarını ve nem içeriklerini ölçmüşlerdir. Her deneysel veri için kuruma eğrileri elde etmişlerdir. Nem içerikleri verileri, SPSS programı ile uygun bir modeli tahmin etmek için doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Modelleri, belirtme katsayısına, korelasyon katsayısına ve standart hataya göre karşılaştırmışlardır. Lineer ve kuadratik modelin, İspanyol uskumru örneklerinin kuruma davranışlarını sırasıyla bağıl nem ve ortam sıcaklığı ile yeterli bir şekilde tanımlarken, eksponansiyel modelin İspanyol uskumru örneklerinin kuruma davranışlarını kuruma gerilimi ve kuruma süresiyle tanımlamak için en uygun model olduğunu tespit etmişlerdir.

Bai ve ark. (2011c) çalışmalarında EHD kurutucuda balık dilimlerinin tek katmanlı kuruma davranışını araştırmış ve ayrıca kuruma davranışlarının matematiksel modellemelerini yapmışlardır. Balık dilimlerinin kurutma deneyleri bir EHD kurutucuda 10, 15, 20, 25 ve 30 ° C'de, % 30, 40, 50, 60 ve 70 bağıl nemlerde, 5 kV'lik artışlarla 5 kV'dan maksimum 50 kV'a kadar gerilim değerlerinde gerçekleştirerek, sabit numune kalınlığı (8 mm) ve 2 mm'lik artışlarla 2 mm'den maksimum 16 mm'ye kadar örnek kalınlıkları için balık dilimlerinin nem içeriklerini incelenmişlerdir. Elde ettikleri deneysel verileri, SPSS programı kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizi ile tahminlenen korelasyon katsayısı (R), belirtme katsayısı (R^2) ve standart hata (S) parametrelerine göre uygun bir modeli tahmin etmek için yedi farklı matematiksel model kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Kuadratik modelin, balıkların kuruma hızını sırasıyla kuruma gerilimi, ortam sıcaklığı ve kuruma süresi ile yeterli bir şekilde tanımladığını bulmuşlardır. Bununla birlikte, üstel modelin, sırasıyla nispi nem, nem içeriği ve balık dilimlerinin kalınlığı ile balıkların kuruma hızını tanımlamak için en uygun model olduğunu belirtmişlerdir.

Esehaghbeygi ve Basiry (2011) domates dilimlerini EHD, kurutma fırını (55 °C) ve çevresel hava koşulları olmak üzere üç farklı yöntemle kurutmuşlardır. Çalışmalarından elde ettikleri deneysel sonuçlara göre, kurutma yönteminin nem içeriği, yüzey sıcaklığı ve gözle görülür renk özelliklerinde önemli derecede bir etkisi olduğunu ($p<0,01$), fakat

büzülme oranında önemli derecede bir etkisi olmadığını belirlemişlerdir ($p>0,01$). Artan gerilim değerlerinin kuruma hızının artmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Kurutma koşullarının 3, 4 ve 5 kV/cm olduğu uygulamalarda, ürünlerin kuruma hızlarının kontrol örneklerine kıyasla sırasıyla 1,3, 1,43 ve 2 kat arttığını belirtmişlerdir. EHD ile kurutma sırasında uygulanan elektrik alan gerilim değerinin artması ile ürünün yüzey sıcaklığının azaldığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte EHD ile kurutulan ürünlerin sıcaklığının etkisinin fırında kurutma yönteminden önemli ölçüde daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sonuca dayanarak ısıya duyarlı malzemelerin kurutulmasında EHD yönteminin kullanılmasının yüksek potansiyelinin olduğunu belirtmişlerdir. EHD yöntemi ile kurutulan örneklerin renginin diğer kurutma yöntemleri sonucunda ortaya çıkan örneklerin renklerine kıyasla kurutmadan önceki rengine daha yakın bulunduğunu ifade etmişlerdir. Enerji tüketimlerini incelediklerinde EHD ile kurutma yönteminde gerilimin çok yüksek olmasına rağmen fırında kurutma yönteminden 200 kat daha az enerji tükettiğini tespit etmişlerdir. Böylelikle EHD yönteminin enerji verimliliğinden dolayı kurutma maliyetinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Alemrajabi ve ark. (2012) EHD^{+} ve EHD^{-} yöntemleriyle havuç dilimlerinin kurutulması çalışmalarında, enerji tüketimi, renk ve büzülme parametrelerini incelemişlerdir. Ayrıca bu özellikleri, 55 °C'de fırında kurutma ve çevresel hava ile kurutma (25 °C) yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. Araştırmalarının sonucunda EHD^{+}, EHD^{-}, 55 °C'de fırında kurutma ve 25 °C'de ortam havası kurutma yöntemlerinin 5 saat sonunda taze havuç dilimlerinden sırasıyla % 79,5, 77,7, 77 ve 22,5 toplam nem uzaklaştığını belirlemişlerdir. $EHD^{\pm}$ yöntemlerinin havuç dilimlerinin fırın ve ortam havası kurutma yöntemlerine kıyasla kuruma hızını arttığını gözlemlemişlerdir. $EHD^{\pm}$ yöntemiyle kurutulan örneklerin büzülme değerlerinin, fırında kurutulan örneklerden daha az, çevresel hava ile kurutulan örneklerden ise daha fazla olduklarını tespit etmişlerdir. Fırın kurutma yöntemi kullanılarak elde edilen enerji tüketim değerlerinin, $EHD^{\pm}$ kurutma yöntemi kullanılarak elde edilen enerji tüketimi değerlerinden fazla olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, pozitif korona kurutmasının negatif korona kurutmasından daha az enerji tüketimine neden olduğunu bulmuşlardır. Fırın kurutma işlemlerinin etkisiyle tüm renk parametrelerinin değiştiğini, $EHD^{\pm}$ ile kurutulmuş örneklerin renklerinin ise taze ürünün rengi ile hemen

hemen aynı kaldığını belirlemişlerdir. Havuç dilimlerinin EHD$^{\pm}$ ile kurutma sırasındaki sıcaklığının, fırın ve ortam havasıyla kurutma ile kurutulan havuç dilimlerinden önemli ölçüde daha düşük olduğunu bulmuşlardır. EHD$^{\pm}$ kurutmanın, ısı girişi gerektirmediği için ısıya duyarlı malzemelerin kurutulmasında en uygun yöntemlerden biri olduğu sonucuna varmışlardır.

Esehaghbeygi (2012) çalışmasında yüksek gerilimli elektrostatik alan (10 kV), yığın kurutma (45 °C) ve doğal hava kurutmanın (26 °C) Khazar çeşidi olan kahverengi pirinç tanesinin (*Oryza Sativa* L.) darbe dayanımı üzerindeki etkilerini 10 tekerrür ile üç kinetik çarpma yüklemesi seviyesi (10, 23 ve 37 mJ) altında incelemiştir. Sonuçların, kinetik çarpma yüklemesinin yapay olarak kurutulmuş pirinç tanelerinin kırılma duyarlılık indeksi üzerindeki etkilerinin anlamlı olduğunu göstermiştir ($p<0,01$). Artan kinetik çarpma yüklemesi ile ortalama kırılma duyarlılık indeksinin arttığını bildirmiştir. Düşük kurutma sıcaklıklarında kuruma süresi arttıkça sağlam kahverengi pirinç tanelerinin güçlendiğini tespit etmiştir. Yüksek gerilimli elektrostatik alan ve yığın kurutmanın, kırılma duyarlılığı oranını önemli ölçüde arttırdığını, ancak yüksek gerilimli elektrostatik alan ile kurutmanın düşük bir yüzey kurutma sıcaklığı ile doğal olarak enerji verimliliğine sahip olduğunu belirtmiştir.

Bai ve ark. (2012a) yaptıkları çalışmalarında arıtma çamurunu 3 farklı yöntemle (22±1 °C'de EHD kurutma sistemi, 60 °C sıcak hava ve 22±1 °C ortam havası) kurutmuşlardır. Enerji tüketimlerini ve EHD ile sıcak havanın kuruma hızlarını ölçmüşlerdir. Kullanılan EHD kurutma sisteminin arıtma çamurunun kuruma hızını önemli ölçüde iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Lineer modelin en iyi sonuçları verdiğini ve arıtma çamurunun kuruma gerilim değeri ile kuruma hızını tanımlamak için iyi bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Eksponansiyel denklemin ise örneklerin kuruma davranışlarının kuruma süresine göre değişimini ifade ettiğini bulmuşlardır. Sıcak hava kurutma ile karşılaştırıldığında, EHD kurutma enerji açısından daha verimli olduğunu ve EHD'nin, sıcak hava ile kurutma için gereken elektrik enerjisinin % 30,02'si ile kurutma işlemini gerçekleştirilebileceğini tespit etmişlerdir.

Bai ve ark. (2012b) çalışmalarında denizhıyarı örneklerinin kurutulması için EHD kurutma, vakumlu dondurarak kurutma (FD) ve bu iki yöntemin birleştrildiği (EHD-FD) yöntemlerini kullanmışlardır. EHD-FD yönteminde kurutulmuş ürünlerin enerji tüketimi, büzülme ve rehidrasyon oranı, protein içeriği ve renk gibi duyusal özelliklerini incelemişlerdir. Kombinasyon kurutma yöntemi ile kurutulan ürünlerin EHD yönteminden daha uzun sürdüğü fakat FD yönteminden daha kısa sürdüğünü gözlemlemişlerdir. EHD yönteminde kurutulan ürünlerin enerji tüketiminin en düşük seviyede olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, kombinasyon kurutma ile işlenen ürün daha iyi büzülme, daha yüksek rehidrasyon oranı ve daha yüksek protein içeriği ve daha iyi duyusal nitelikler sergilediğini belirtmişlerdir.

Bai ve ark. (2012c) yaptıkları çalışmalarında EHD kurutma yöntemini deniztarağı eti için geliştirilmiş bir kurutma yöntemi olarak kullanmışlardır. Deniztarağı etini 15 ° C'de bir EHD kurutma sisteminde, 60 °C'de bir fırında ve 15 °C'de ortam havasında kurutmuşlardır. EHD ve fırında kurutmanın enerji tüketimi, büzülme oranı, su absorbasyon, katı kayıp ve kurutulmuş deniztarağı etinin renk ve ezilme önleyici dayanıklılığı gibi özelliklerini ölçmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre deniztarağı etinin kuruma hızının EHD kurutma sistemi kullanılarak önemli ölçüde arttığını göstermişlerdir. 45 kV'luk bir gerilim altında, EHD'nin kuruma hızı 1. saatteki hava kurumasınınkinden (15 °C) 7 kat daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Fırın kurutma ile karşılaştırdıklarında EHD kurutma enerji tasarrufu açısından daha etkili olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, EHD ile kurutmanın fırın kurutması için gereken elektrik enerjisinin sadece % 28,67'sine karşılık geldiğini tespit etmişlerdir. EHD ile kurutulmuş deniztarağı etinin daha iyi duyusal özelliklere ve daha yüksek ezilme önleyici dayanıklılığa sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Hu ve ark. (2013) çalışmalarında karideslerin kurutma kalitesini artırmak için EHD, vakumlu dondurarak kurutma (FD) ve EHD-vakumlu dondurarak kurutma kombinasyon yöntemlerini incelemişlerdir. Kurutulmuş ürünlerin farklı kurutma yöntemleri altında kuruma hızı, büzülme, rehidrasyon oranı, renk ve düzenlilik içeren duyusal özelliklerini belirlemişlerdir. Vakumlu dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulan ürünlerin en iyi kaliteye ancak en düşük kuruma hızına sahip olduğunu bildirmişlerdir. EHD ile kurutulan

karideslerin ise kalite özellikleri açısından diğer yöntemlere kıyasla daha düşük ve daha kısa sürede kuruduğunu gözlemlemişlerdir. Vakumlu dondurarak kurutma ve EHD kurutma ile karşılaştırıldığında, kombinasyon yöntemi ile kurutulan örneklerin daha kısa kuruma süresine sahip olduğu, daha düşük büzülme, daha yüksek rehidrasyon oranı ve daha iyi duyusal nitelikler sergilediğini tespit etmişlerdir.

Bai ve ark. (2013a) yaptıkları çalışmalarında denizhıyarını kurutmak için 18 °C'de EHD kurutma, 18 °C'de ortam havası ile kurutma ve 80 °C sıcaklıkta fırın kurutma yöntemlerini kullanmışlardır. Büzülme oranı, su alma, rehidrasyon oranı, protein ve asit mukopolisakkarit içeriği, doku ve duyusal özellikler gibi kurutulmuş ürünlerin kalite parametrelerini araştırmışlardır. Ayrıca kullanmış oldukları üç kurutma yöntemindeki enerji tüketim değerlerini incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre fırında kurutma yönteminin en kısa sürdüğünü ancak bu yöntemin yüksek enerji tüketimi gerekliliği ve kalitesiz ürünlerin ortaya çıkışı gibi dezavantajlarının olduğunu bildirmişlerdir. EHD kurutma yöntemi ile en iyi kalitede ürünün elde edildiğini ve fırın kurutma yöntemi için gereken elektrik enerjisinin % 21,31'ini tükettiğini, ancak kurutma işleminin tamamlanmasının daha uzun sürdüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca, ortam havası ile kurutma yönteminin ürün üzerinde kesin olmayan bir kalite sağladığını ve elektrik enerjisi tüketmediğini, ancak tamamlanmasının çok uzun zaman gerektiğini gözlemlemişlerdir. Ürün kalitesi ve enerji tasarrufu gereksinimlerini göz önünde bulundurduklarında, EHD yönteminin en iyi kurutma yöntemi olduğunun sonucuna varmışlardır.

Ding ve ark. (2014) çalışmalarında sığır etinin gerilim değerine, malzemenin kalınlığı ve kesit alanı gibi geometrik özelliklerine göre ince tabaka EHD kurumasını tanımlamak için en uygun matematiksel modeli seçmeyi amaçlamışlardır. Kurutma çalışmalarında 0, 6, 14, 21 ve 32 kV'de gerilim (alternatif akım (AA)) değerlerini kullanmışlardır. Kurutma işlemlerini, sıcaklığın 21 ± 2 °C ve kurutma bağıl neminin % 30 ± 5 ve rüzgar hızının 0 m/s olduğunu bir ortamda gerçekleştirmişlerdir. Farklı kalınlık ve kesit alanlı pişmiş sığır eti örnekleri AA için 24 kV'de yüksek gerilimli bir elektrik alanına yerleştirmişlerdir. Daha sonra altı farklı matematiksel kurutma modeli, hataların karelerinin karekök ortalaması, indirgenmiş ortalama sapmanın karesi ve modelleme verimliliğine dayalı

kuruma eğrilerini simüle etmek için karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre pişmiş sığır eti kuruma hızının EHD sisteminde kontrol örneklerine kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğunu elde etmişlerdir. Pişirilmiş sığır etinin hem kalınlığının hem de kesit alanının ilk yarım saatteki kuruma hızı üzerinde daha fazla etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca Demir ve ark. modelinin, farklı gerilimler altındaki pişmiş sığır eti dilimlerinin kurutma özelliklerini tanımlamak için diğer matematiksel modellere göre daha uygun olduğunu belirlemişlerdir.

Dinani ve ark. (2014) çalışmalarında ince tabaka mantar dilimlerinin sıcak hava-EHD yöntem ile kuruma davranışını laboratuvar ölçekli kurutucuda 17, 19 ve 21 kV gerilim değerlerinde ve 5, 6 ve 7 cm'lik elektrotlar arası mesafelerde incelemişlerdir. En iyi kurutma modeli seçmek için EHD-sıcak hava kombinasyon kurutma yöntemi ile kurutulan mantar dilimlerinin kuruma eğrilerine 10 farklı matematiksel model ile önerilen yeni ampirik modeli uygulamışlardır. Modellerin katsayıları doğrusal olmayan regresyon analizi ile belirlenmiş ve modeller deneysel ve tahmin edilen nem oranları arasındaki belirtme katsayısı (R^2), karelerinin toplam hatası (*SSE*) ve hataların karelerinin karekök ortalamasına (*RMSE*) göre karşılaştırmışlardır. Sonuçları incelediklerinde, sadece üç parametre içeren önerilen model deneysel verilerle en iyi uyumu sağladığını tespit etmişlerdir. Bunu takip eden modelin ise dört parametre içeren Midilli ve Küçük model olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, önerilen model EHD-sıcak hava kurutma sistemi mantar dilimlerinin nem içeriği değişiklikleri için rahat kullanım ve mükemmel tahminler sunabildiğini bildirmişlerdir.

Dalvand ve ark. (2014a) çalışmalarında tarımsal ürünlerin kurutulması için enerji verimliliği, düşük maliyetli ekipman, düşük kurutma sıcaklıkları ve üstün malzeme kalitesi gibi çeşitli avantajlara sahip EHD yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemi değerlendirmek için güneş (fotovoltaik) enerjisine dayalı bir EHD kurutucu tasarlamış ve üretmişlerdir. Ayrıca, kivi meyvesinin EHD yöntemiyle kurutulması için optimum koşul, Yanıt Yüzey Metodolojisinin Box-Behnken tasarımı uygulayarak incelemişlerdir. Çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak, 15 kV uygulanan gerilim, 5,2 kV/cm elektrik alan gücü, zorlamalı hava akımı olmadan ve son olarak 17 deşarj elektrotunun (iğneler) bir kombinasyonuna kullanarak maksimum 0,865 arzu edilebilirlik değeri elde

etmişlerdir. Uygulanan gerilimin 6 kV'dan 15 kV'a yükseltilmesi ile enerji verimliliği ve enerji tüketiminin artmasına rağmen nem oranının azaldığını tespit etmişlerdir. Öte yandan 5,2 kV/cm alan şiddetini nem oranı açısından en uygun nokta olduğunu belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre uygulanan gerilim ve deşarj iğnelerinin sayısının, aralıklarının üst limitinin ötesine geçerse daha yüksek bir arzu edilebilirlik değerine ulaşmanın mümkün olacağını belirlemişlerdir. Ayrıca, deşarj iğnelerinin sayısının artması, sistemin ölçeğinin büyümesini sağlayacağını bu nedenle sistemin sanayileşmesi için umut verici olabileceğini belirtmişlerdir.

Dalvand ve ark. (2014b) çalışmalarında yeni ve gelişmekte bir kurutma teknolojisi olan EHD kurutma işleminin gerekli enerjisini sağlamak için güneş enerjisini kullanmışlardır. Ayrıca, uygulanan gerilim, alan kuvveti, deşarj elektrotu (iğne) sayısı ve hava hızı gibi bağımsız değişkenlerin nem oranı, enerji verimliliği üzerindeki birleşik etkilerini araştırmak ve EHD kurutma işlemine karşılık gelen enerji tüketimi ile ilgili bir tahmin modeli oluşturmak için Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (YYM) kullanılmışlardır. Bağımsız değişkenlerin sistem yanıtları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için üç seviyeli ve dört faktörlü Box-Behnken tasarımını kullanmışlardır. Tüm yanıt yüzeyini haritalayabilen bir model oluşturmak için aşamalı bir yaklaşım izlemişlerdir. Parametreler arasındaki iç ilişkilerin YYM tarafından iyi tanımlandığını belirlemişlerdir. Her uygulama için indirgenmiş kuadratik modelin deneysel verilere en uygun olduğunu belirlemişlerdir. Uygulanan gerilim ve alan kuvvetinin artmasıyla (5,2 kV/cm'e kadar) nem oranı değerinde azalma gözlemişlerdir. Hava hızının rolünün ihmal edilebileceğini ancak alan kuvvetinin verimlilik üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Elektrik alan kuvvetinin 5,2 kV/cm'e kadar artışı ve uygulanan gerilim değerinin azalması ile sistemin enerji tüketiminin değerini azalttığını belirlemişlerdir.

Taghian Dinani ve ark. (2014) çalışmalarında mantar dilimlerini kurutmak için geliştirdikleri EHD ile birleştirilmiş sıcak hava yöntemini kullanmışlardır. Üç farklı gerilim seviyesinin (17, 19 ve 21 kV) ve elektrotlar arası mesafenin (5, 6 ve 7 cm) EHD, sıcak hava ve EHD kurutma sistemi ile birleştirilmiş sıcak hava kurutma yöntemlerinin kurutma kinetiği, zaman, efektif difüzyon katsayısı ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İstatistiki değerlendirmeler, araştırılan parametrelerin tümü için EHD ile

kontrol (sıcak hava kurutma işlemi) yöntemleri arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Ayrıca gerilim ve elektrot boşluk faktörlerinin araştırılan tüm parametreler üzerinde önemli etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre EHD ve sıcak hava kombinasyonunun kuruma süresini önemli ölçüde azaltabildiğini ve bunun sonucunda daha yüksek efektif difüzyon katsayısı ve kuruma hızı ve daha az enerji tüketimi ile sonuçlandığını doğrulamışlardır.

Singh ve ark. (2015) yaptıkları çalışmalarında, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) kullanarak buğdayın EHD kurutma özelliklerini ve buğday proteininin konformasyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kurutma işlemleri için elektrotlar arası boşluğu 1,5 cm olarak ayarlandığı, hava hızlarının 1, 1,5 ve 2 m/s olduğu ve gerilim değerlerinin 10, 12,5 ve 15 kV uygulandığı tek telli bir elektrot EHD sistemi kullanmışlardır. Buğday örneğinin kuruma hızının uygulanan gerilim ve hava hızından önemli ölçüde etkilendiğini gözlemişlerdir. Kuruma hızının hava hızı ve uygulanan gerilimdeki artışla arttığını belirlemişlerdir. Eksponansiyel denklemin buğdayın EHD kurutma kinetiği ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda buğday protein konformasyonunun EHD kurumasından önemli ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. FT-IR spektrumlarından buğday proteininin Amid I bölgesinin analizi, elektrik alanına maruz kalmanın hidrojen bağlanma paternini etkilediğini ve bunun sonucunda düşük ve yüksek frekans bantları arasında kaymalara neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Gauss bant şekillerini kullanılarak yapılan pik eşlemesinin de bu sonuçları desteklediğini belirtmişlerdir.

Kudra ve Martynenko (2015) yapmış oldukları çalışmalarında elektrot konfigürasyonu ve çalışma parametrelerinin geleneksel kurutma ile karşılaştırmışlar ve EHD yönteminin kurutma kinetiği, enerji tüketimi ve enerji verimliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. EHD yönteminin şifalı bitkiler, probiyotikler, nutrasötikler ve diğer ısıya duyarlı biyomateryaller gibi yüksek değerli malzemelerin düşük sıcaklıkta kurutulmasının hızlandırılması için umut verici bir araç olduğunu kanıtlamışlardır. EHD kurutma kinetiğinin geleneksel kurutmaya benzer, yani kullanılan ürüne bağlı olarak hem sabit hem de azalan hızı periyotlarının olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak, EHD yönteminde kuruma hızı daha yüksektir ve dolayısıyla kuruma süresi ürün çeşidine, nem

içeriğine ve çalışma koşullarına bağlı olarak % 15 ila 40 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Konvektif kurutma ile kombinasyon yönteminde, EHD'nin kurutma işlemini hızlandırıcı etkisi hava sıcaklığı ve çapraz akışlı hava hızı ile azaldığını belirlemişlerdir. EHD kurutmasındaki enerji tüketiminin konvektif kurutmadan belirgin şekilde daha düşük olduğunu, ancak uygulanan EHD jeneratörünün gerilim ve akımından hesaplanan kadar küçük olmadığını belirtmişlerdir. Elektrik rüzgarının doğrudan hidrodinamik etkisine ve muhtemelen türbülanslı girdap olayına ve ayrıca entropinin düşürülmesi gibi termal olmayan diğer etkilere bağlı olarak suyun uzaklaştırılması mekanizması ile ilgili çeşitli hipotezler nedeniyle, bu teknolojinin optimizasyon ve endüstriyel uygulamalar için dikkatli mühendislik tasarımına yönelik daha fazla çalışma gerektiğini bildirmişlerdir.

Ding ve ark. (2015) çalışmalarında havuç dilimlerini farklı gerilim değerlerinin kuruma hızı üzerindeki etkisini incelemek için bir EHD sisteminde kurutmuşlardır. Kalite ölçütleri olarak karoten içeriği ve rehidrasyon oranı değerlerini baz almışlar ve konvansiyonel fırın kurutma yöntemi ile kıyaslamışlardır. Kurutulmuş örneklerin kuruma eğrilerindeki değişimi en iyi şekilde açıklayan denklemi seçmek için birincil ölçüt olarak hataların karelerinin karekök ortalaması, azaltılmış ortalama sapma karesi ve modelleme verimliliğini kullanarak, kuruma eğrilerinin matematiksel modellenmesini ve simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Teorik olarak, havuç dilimlerinin 10 kV ila 30 kV arasındaki gerilim uygulamalarında kuruma hızı eğrisini tanımlamak için en uygun modelin Page modeli olduğunu belirlemişlerdir. Deneysel olarak, EHD sisteminde havuçların kuruma hızının, kontrol örnekleri ile karşılaştırdıklarında önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve karoten içeriği ve rehidrasyon oranı olarak belirlenen kalite parametrelerinin fırında kurutma yöntemi ile karşılaştırdıklarında daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir.

Bardy ve ark. (2015) yaptıkları çalışmalarında, metilselüloz jelin daha önceki bir çalışma tarafından belirlenen üç farklı tel-elektrot konfigürasyonu kullanılarak zorlanmış konvektif ve EHD kurutma yöntemiyle kurutulmasını incelemişlerdir. Hava akışı hızı, zorlanmış konvektif kurutma için 1-3 m/s, EHD kurutma (uygulanan 16 kV gerilim) için 0,3 m/s, sıcaklık ve bağıl nem de sırasıyla 30 °C ve % 17 olarak ayarlamışlardır. Kuruma hızlarının yanı sıra toplam ve zamana bağlı (geçici) ekserjetik verimliliğini özgül bir

model aracılığıyla analiz etmişlerdir. EHD kurutmanın, 1-2 m/s hava akış hızları ile zorlanmış konvektif kurutmayla yaklaşık olarak aynı kurutma oranını ve ekserjiyi verdiği bulmuşlardır. Hem genel hem de geçici ekserjetik verimliliklerinin EHD kurutması için zorlanmış konvektif kurutmasına kıyasla önemli ölçüde yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumu EHD kurutmasındaki daha düşük hız ilişkisine bağdaştırmışlardır. Çalışmada analiz edilen üç tel-elektrot konfigürasyonu kullanılarak EHD kurutmanın, zorlanmış konvektif kurutma ile aynı kuruma hızını sağlayabileceği, ancak önemli ölçüde daha düşük hava akış hızları ve dolayısıyla daha yüksek ekserjetik verimler sağladığı sonucuna varmışlardır.

Dinani ve Havet (2015a) çalışmalarında mantar dilimlerini kurutmak için enerji tüketimini azaltan, ekonomik bir kurutma sistemi olarak tasarladıkları konvektif-EHD kurutma yöntemini kullanmışlardır. Mantar dilimlerinin kurutulmasında iki farklı hava hız seviyesinin (0,4 ve 2,2 m/s) ve dört farklı gerilim seviyesinin (0, 20, 25 ve 30 kV) kurutma kinetiği, kuruma hızı, nihai nem içeriği ve EHD, konvektif, konvektif-EHD sistemlerinin özgül enerji tüketimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçları incelediklerinde 0,4 m/s hava hızında elektrik alan uygulanan örneklerin kuruma hızındaki artışın uygulanan gerilim ile arttığını tespit etmişlerdir. 30 kV gerilim ve 0,4 m/s hava hızı kurutma uygulamasının ürünlerin kuruma hızını önemli ölçüde artırabileceğini ve aynı zamanda konvektif-EHD sisteminin özgül enerji tüketimini azaltabileceğini belirlemişlerdir. Bununla birlikte, 2,2 m/s'lik yüksek hava hızının korona rüzgar etkisini azalttığını gözlemlemişlerdir. Azalan gerilimin yanı sıra artan hava hızının EHD sisteminin özgül enerji tüketimini azalttığını, ancak gerilim ile hava hızının azalmasıyla konvektif ve konvektif-EHD yöntemlerinin özgül enerji tüketiminin azaldığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, 30 kV-0,4 m/s kurutma uygulamasının, istatistiksel olarak 0 kV-2,2 m/s, 20 kV-2,2 m/s, 25 kV-2,2 m/s ve 30 kV-2,2 m/s uygulamaları ile benzer ortalama kuruma hızı ve son nem içeriğine sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Ancak bunlara kıyasla önemli ölçüde daha az özgül enerji tüketim değerini bulmuşlardır. Bu nedenle, 30 kV-0,4 m/s uygulaması gibi yüksek elektrik alan ve hava hızı ile uygun kombinasyonunun, konvektif kurutma yöntemi kullanılarak endüstrilerin enerji tüketimini azaltmak için umut verici bir çözüm olabileceğinin sonucuna varmışlardır.

Dinani ve Havet (2015b) mantar dilimlerini yenilikçi bir kurutma uygulaması olan EHD yöntemi ile kurutmuşlardır. Bu çalışmada farklı gerilim değerleri (0, 20, 25 ve 30 kV) ve farklı hava hızları (0,4 ve 2,2 m/s) kullanarak sıcak hava-EHD kombinasyon yönteminin mantarların kurutma kinetikleri, son nem içerikleri, gözeneklilik, büzülme, rehidrasyon oranı, kayma mukavemeti, renk değişimlerini ve mikroyapı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kurutma işlemini 5 saatlik bir süre boyunca 45 °C sabit sıcaklıkta altında 8 farklı koşulda (30 kV–0,4 m/s, 25 kV–0,4 m/s, 20 kV–0,4 m/s, 0 kV–0,4 m/s, 30 kV–2,2 m/s, 25 kV–2,2 m/s, 20 kV–2,2 m/s ve 0 kV–2,2 m/s) gerçekleştirmişlerdir. İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda, kurutma işlemlerinin gözeneklilik ($p \leq 0,01$), nem içeriği, büzülme, rehidrasyon oranı ve kayma mukavemeti ($p \leq 0,001$) üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ancak kurutulmuş mantar dilimlerinin renginde önemli bir fark gözlenmediğini belirlemişlerdir. Daha yüksek bir gerilimde veya hava akış hızında kurutulan mantar dilimlerinin avantajları arasında daha yüksek bir kuruma hızı, gözeneklilik, rehidrasyon oranı ve daha düşük bir nem içeriği bulunduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, daha yüksek gerilim veya hava hızının, daha fazla büzülme ve kayma mukavemetine yol açan buruşuk ve bozulmuş bir yapının gelişmesine neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Hava hızının 0,4 m/s olduğu uygulamada, suyun buharlaşma hızının uygulanan gerilim değerinin artışla artığını; ancak 2,2 m/s'lik hava hızının kullanılması, korona rüzgarının yüksek hava hızı ile bastırılması nedeniyle buharlaşma üzerindeki elektrik alan etkisini azalttığını tespit etmişlerdir.

Dinani ve ark. (2015a) çalışmalarında EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemini kullanarak mantar (*Agaricus bisporus*) dilimlerini kurutmuşlardır. Üç gerilim seviyesi (17, 19 ve 21 kV) ve elektrot boşluğu (5, 6 ve 7 cm) ile kurutulmuş mantar dilimlerinin katı ve kütle yoğunluğu, gözeneklilik, kayma mukavemeti, su tutma kapasitesi ve toplam renk farkı (ΔE) üzerindeki etkilerini incelemişler ve fırında kurutulmuş mantar dilimleri ile karşılaştırmışlardır. EHD-sıcak hava kombinasyon kurutma yönteminin fırın kurutma yöntemine kıyasla kütle yoğunluğu ve kayma mukavemeti ($p \leq 0,01$) azalmasının yanı sıra gözeneklilik ($p \leq 0,001$) ve su tutma kapasitesini artışı ($p \leq 0,01$) üzerinde önemli bir etkilerinin olduğunu, ancak katı yoğunluk ve ΔE parametreleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirlemişlerdir ($p \geq 0,05$). Ayrıca sonuçlar, gerilim değerinin

arttırılmasının veya elektrot aralığının azaltılmasının, kütle yoğunluğu ve kayma mukavemeti azalması veya gözeneklilik ve su tutma kapasitesinin artışı gibi bazı avantajlar sağladığını tespit etmişlerdir. EHD yöntemi ile kurutulmuş mantar dilimlerinde fırında kurutulmuş örneklere kıyasla daha az görünür yoğunluk ve kayma mukavemeti belirlerken, daha fazla gözeneklilik ve su alma kapasitesi değerlerine sahip olduklarını belirlemişlerdir.

Dinani ve ark. (2015b) mantar (*Agaricus bisporus*) dilimlerinin EHD-sıcak hava yöntemi ile üç elektrot mesafesinde (5, 6 ve 7 cm) ve gerilim seviyesinde (17, 19 ve 21 kV) kurutulmasını incelemişlerdir. Farklı EHD-sıcak hava kurutma uygulamalarının mantar dilimlerinin sıcaklığı, kuruma süresi, entalpinin (ΔH) dahil olduğu nihai renk ve protein denatürasyon özellikleri, başlangıç sıcaklığı (T_o), tepe geçiş sıcaklığı (T_p), sonuç sıcaklığı (T_c) ve endotermik tepelerin sıcaklık aralığı (T_c-T_o) üzerine etkilerini sistematik olarak değerlendirmişlerdir. Ayrıca, kurutulmuş mantar dilimlerinin Diferansiyel taramalı analiz (DTA) soğutma termogramlarındaki nem durumu değişikliklerini araştırmışlardır. Diferansiyel taramalı analiz ile elde edilen sonuçların, EHD ile kurutulmuş mantar dilimlerinin DTA izlerindeki ΔH değerlerinin, elektrot arası mesafelerde azalma ve gerilim değerinde artış ile azaldığını belirlemişlerdir. Özellikle, 21 kV'luk gerilimin en düşük ΔH ve T_c - T_o değerlerine ve en yüksek T_p ve T_o değerlerine neden olduğunu bildirmişlerdir. Gerilim değerinin bu tepkiler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Benzer şekilde, DTA sonuçlarının yüksek elektrik alan yoğunluğunun, düşük elektrik alan yoğunluğuna kıyasla protein denatürasyonuna bağlı ΔH, T_c-T_o ve T_p tepkileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Bardy ve ark. (2016) yaptıkları çalışmalarında EHD kurutmanın etkinliğini (üç farklı tel elektrot konfigürasyonu kullanılarak), metilselüloz jelin kuruma hızı değerlerine göre zorlanmış konvektif kurutma yöntemi ile karşılaştırmıştırlardır. Çalışmalarında bir gıda ürününü simüle etmek için metilselüloz jelin kullanılabileceğini ve önceden belirlenmiş bir nem içeriğine göre kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca metilselüloz jelin gerçek bir gıda ürünü (mango meyvesi) ile hem EHD hem de zorlanmış konvektif kurutma yöntemlerini kurutma kinetiği açısından karşılaştırmışlardır. Kurutma kinetikleri, %50'lik bir nem içeriğine ulaşmak için ekserjetik verimliliğin, sağlanan ve

kullanılan ekserjinin, kuruma hızının ve toplam kuruma süresinin birim alan başına ölçümü cinsinden belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre hem EHD hem de konvektif kurutma yöntemi için metilselüloz jel ve mango meyvesinin benzer kurutma kinetikleri sergilediğini tespit etmişlerdir.

Martynenko ve Zheng (2016) EHD yönteminin elma dilimlerinin kurutulmasında kullanılmasının enerji ve kalite özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Deneylerinde, çubuk elektrotlar ile elma dilimleri arasındaki mesafeyi 25 mm olarak ayarlamışlardır. Farklı hava hızı ve farklı gerilim değerlerini kullanarak, EHD-sıcak hava, EHD ve sıcak hava yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Deneylerde yüksek gerilim kullanmanın toplam kuruma süresini düşük gerilime göre 1,5 ila 4 kat arası azalttığını belirlemişlerdir. Ürünlerin kuruma süresi açısından sıcak hava destekli EHD yönteminin kullanılmasının EHD ve sıcak hava yöntemleri kullanılmasına göre daha uygun olduğunu tespit etmişlerdir. Artan gerilim değerleri ile birlikte EHD yönteminin kuruma hızı üzerine pozitif etkisini 1 m/s hava hızında gözlemlemişlerdir. Yüksek hava hızında EHD yönteminin etkisinin azaldığını bildirmişlerdir. Kuruma hızının EHD ile artışı 15 kV'da 1 m/s'de 3,9 iken 3 m/s'de 1,73'e ve 5 m/s'de 1,46'ya düştüğünü belirtmişlerdir. Enerji tüketimi bakımından EHD yönteminin sıcak hava yöntemine göre daha az enerji tükettiğini belirlemişlerdir. EHD yöntemi ile enerji verimliliğinin, kurutma sisteminden neredeyse bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sebebinin enerji tüketiminin büyük kısmının güç kaynağı ünitesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca uygulanan gerilim değerlerinin artmasıyla enerji verimliliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında kalite parametresi olarak değerlendirdikleri renk özellikleri bakımından 10 kV'a kadar gerilim kullanmanın önemli bir etkisinin olmadığını, fakat bu değerden sonra kurutulan ürünlerin renklerinde bozulmaların arttığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, yüksek hava hızı (çoğunlukla düşük EHD gerilim değeri-sıcak hava) ile kurutma sonucu elde ettikleri ürünler, düşük hava hızı ve yüksek gerilim (çoğunlukla yüksek EHD gerilim değeri) ile elde ettikleri ürünlere göre daha düşük renk değişimi gözlemlemişlerdir.

Pirnazari ve ark. (2016) çalışmalarında muz dilimlerini EHD yöntemiyle kurutarak elde ettikleri değerleri hem sayısal hem de deneysel olarak modellemişlerdir. Kurutma

işlemini, EHD yönteminde 6, 8 ve 10 kV/cm değerleri kullanarak 3 mm kalınlığında muz dilimleri ile gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve tahmin edilen nem oranlarında hesapladıkları maksimum belirtme katsayısı (R^2) ve minimum hataların karelerinin karekök ortalaması (*RMSE*) değerlerine göre, Difüzyon modelini en iyi model olarak belirlemişlerdir. Efektif difüzyon katsayısı değerlerini 3,12 x 10^{-10} ila 4,23 x 10^{-10} m^2/s aralığında hesaplamışlardır. Bununla birlikte, EHD uygulayarak dış dirençteki düşük değişime dayalı ikinci Fick denkleminin sayısal çözümü kullanılarak teorik bir model geliştirmişlerdir. Yüksek gerilimli bir elektrik alanı uyguladıklarında, muz dilimlerinin nem hareketine karşı dış direncinin azaldığını ve üründen nem transferinin difüzyonla gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Nem oranı-zaman değerlerini incelediklerinde, muz dilimlerinin EHD yöntemi ile kurutulmasında sabit bir kuruma hız periyodu gözlemlememişlerdir. Tam kurumanın, azalan hız periyodunda meydana geldiğini ve böylelikle EHD yönteminde içsel nem transferinin baskın olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak varsayımları olmayan deneysel modellerin daha doğru olduğunu, ancak anlamlı parametrelere sahip olmadığını belirtmişlerdir.

Sriariyakul ve ark. (2016) çalışmalarında, aloe vera püresini uzak kızılötesi radyasyon (FIR) ve yüksek gerilimli elektrik alanı (HVEF) uygulanarak/uygulanmadan sıcak hava yöntemleriyle kurutmuşlardır. Pürenin kurutulmasında çeşitli hava hızları (0,2, 0,6 ve 1 m/s), kuruma havası ve kontrollü yüzey sıcaklıkları (50, 60 ve 70 °C) ve ayrıca yüksek gerilimli elektrik alan kuvvetleri (0, 1,88 ve 3,75 kV/cm) kullanmışlardır. Farklı kurutma işlemlerinden geçen ürünlerin kurutma kinetiği, özgül enerji tüketimi (ÖET) ve kalitesini (renk, aloin, toplam polisakkarit ve asemannan içerikleri ile mikrobiyal sayımlar açısından) karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Elektrik alan kuvvetinin, kurutulan ürünün kurutma kinetiği, ÖET ve kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Öte yandan, HVEF yönteminin sadece daha düşük bir hava hızında (0,2 m/s) kurutma kinetiği üzerinde baskın bir etki gösterdiğini belirlemişlerdir. HVEF uygulamasının, 0,2 m/s'lik bir hava hızında kurutma işleminin ÖET'ini önemli ölçüde azaltabileceğini belirtmişlerdir. Çeşitli sıcaklıklarda ve elektrik alan kuvvetlerinde kurutulan tüm numuneler arasında bakteri, maya ve küf içeriği değerlerinin önemli ölçüde farklı olmadığını bulmuşlardır. FIR ve HVEF ile birlikte sıcak hava kullanılarak aloe vera püresinin kurutulması için optimum koşulun, 0,2 m/s hava hızı, 70 °C sıcaklık ve 3,75

kV/cm yüksek gerilimli elektrik alan kuvvetinin kullanıldığı deney olduğunu tespit etmişlerdir.

Yang ve Ding (2016) çalışmalarında geleneksel kurutma yöntemleri ile aktif bileşen kaybına uğrayan Çin kurt üzümü meyvelerinin yeni bir kurutma yöntemi olan EHD yöntemi ile kurutulmasını araştırmışlardır. Çin kurt üzümlerini, 0, 20, 24, 28 ve 32 kV'de beş kademeli alternatif akımda çoklu iğne-plaka elektrot ve 28 kV'da bir doğru akım seviyesinde çoklu iğne-plaka elektrot ile kurutmuşlardır. Çin kurt üzümünün kuruma hızı, nem oranı, büzülme oranı, rehidrasyon oranı ve C vitamini içeriğini incelemişlerdir. 10 farklı matematiksel kurutma modeli kullanmışlar ve hataların karelerinin karekök ortalaması, ortalama sapmanın azaltılmış karesine ve korelasyon katsayısı parametrelerini kullanmışlardır. Her kurutma işlemini 25±2 °C'de ve kurutma bağıl nemi % 30±5 olduğu koşullarda gerçekleştirmişlerdir. Tüm örnekleri son nem içeriğine (17±1)/100 g ulaşana kadar kurutmuşlardır. Sonuçları incelediklerinde, Çin kurt üzümünün kuruma hızının EHD yönteminde, kontrol örneğine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve 20,5 saatlik süre içerisinde kontrol örneğine göre kuruma hızının 24, 28 ve 32 kV gerilim seviyelerinde sırasıyla 1,88, 2, 2,37 ve 2,66 kat arttığını belirlemişlerdir. Alternatif voltaj elektrik alanı altında çok sayıda iğneden plakaya elektrot ile kuruma hızının, doğru akım elektrik alanı altında çok sayıda iğneden plakaya elektrot ve gerilim artışı ile kütle aktarımını arttırma faktörü ile olan sistemden daha hızlı olduğunu tespit etmişlerdir. EHD kurutma işlemlerinin, Çin kurt üzümünün rehidrasyon oranı ve C vitamini içeriği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu, ancak büzülme oranında önemli bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. EHD kurutmanın özgül enerji tüketiminin (kJ/kg su) alternatif akımdan önemli ölçüde etkilendiğini ve gerilim artışı ile arttığını belirtmişlerdir. Parabolik modelin, Çin kurt üzümü meyvelerinin kuruma hızı eğrisini tanımlamak için en uygun model olduğunu belirlemişlerdir.

Singh ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada kumun EHD kuruma özelliklerini incelemişlerdir. Hava hızı, elektrotlar arası mesafe ve uygulanan gerilim dahil olmak üzere işlem parametrelerinin (bağımsız değişkenler) kurutma kinetiğine ve uzaklaştırılan su yüzdesi (%), Sherwood sayısı, EHD sayısı (iyon rüzgarı (m/s) / hava hızı (m/s)) ve tüketilen özgül enerji (kJ/kg) dahil olmak üzere bağımlı değişkenlere etkisi, merkezi bir

kompozit tasarım ve yanıt yüzey metodolojisini kullanılarak araştırmışlardır. Hava hızının 2 m/s, elektrotlar arası mesafenin 1,5 cm ve uygulanan gerilim değerinin 15 kV olduğu uygulamada maksimum kuruma elde etmişlerdir. Hava hızı ve elektrik alan yoğunluğunun (uygulanan gerilimin elektrotlar arası boşluğa oranı) uzaklaştırılan suyun yüzdesi (%) ve Sherwood sayısı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu bulmuşlardır. EHD kurutma işlemi sırasında tüm işlem parametrelerinin EHD sayısı ve tüketilen özgül enerji üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Özgül enerji tüketiminin, uygulanan gerilimdeki bir artışla arttığını, ancak verilen herhangi bir gerilimdeki hava hızındaki bir artışla azaldığını göstermişlerdir. Bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlayan regresyon modelleri de geliştirmişlerdir.

Martynenko ve ark. (2017) çalışmalarında EHD kurutma yönteminde kütle transferini etkileyen önemli faktörleri tanımlamak için faktöriyel bir deneysel desen kullanmışlardır. Deneylerinde gerilim, elektrotlar arasındaki mesafe (boşluk), boşalım elektrodunun konfigürasyonu, hava çapraz akışı ve malzeme yüzeyinin özelliklerinin kütle transferi üzerindeki önemli etkilerini ortaya çıkarmışlardır. Boşalım elektrotunun tüm gerilimleri, boşlukları ve konfigürasyonları için kütle ve yük transferi arasında güçlü bir bağlantı bulmuşlardır. 1 m/s'deki hava çapraz akışının kütle transferi üzerindeki etkisinin, tüm deney koşullarında toplam kütle transferini 5,0-5,1 g/s artıran iyonik rüzgarın etkisine katkıda bulunduğunu bildirmişlerdir. Bu sonuçlarla, EHD'nin etkisinin doğada konvektif olduğunu ve iyonik rüzgar nedeniyle kütle transferini arttırdığını belirtmişlerdir. Malzeme yüzey özelliklerinin etkisinin hava sınır tabakasının farklı hidrodinamik koşullarına bağlamışlardır.

Elmizadeh ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada EHD kurutma yöntemini kullanarak ayva dilimlerini 70 °C sıcaklıkta sabit tutulan kapalı ortamda farklı gerilim seviyelerinde (5, 7 ve 9 kV) ve sıcak hava kurutma yöntemi ile farklı sıcaklıklarda (50, 60 ve 70 °C) kurutmuşlardır. İki kurutma yönteminin ayva dilimlerinin kurutma kinetiği, enerji tüketimi, antioksidan aktivitesi ve fenolik bileşikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ayva dilimlerinin sıcak hava yöntemiyle kurutulmasında sabit oran periyodu gözlemlerken, ayva dilimlerinin EHD yöntemiyle kurutulmasında sabit oran periyodu gözlemlememişlerdir. EHD işlemindeki toplam kuruma süresinin sıcak hava

kurutmasındaki sürenin 2,05 katı olduğunu tespit etmişlerdir. İstatistiksel sonuçları değerlendirdiklerinde, kurutulmuş ayva dilimlerinin sıcak hava işlemiyle toplam fenolik bileşiklerinin ve antioksidan kapasitesinin, EHD yöntemle kurutulmuş ayva dilimlerinden sırasıyla 1,37 ve 1,15 kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Sıcak hava ile kurutma yoluyla harcanan ortalama enerji, EHD yöntemle harcanan ortalama enerjiden 48,66 kat daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.

Yang ve ark. (2017) çalışmalarında EHD kurutma yöntemini kullanarak Çin kurt üzümü örneklerinin kurutma kinetiklerini ve enerji tüketim değerlerinin kuruma sürecine etkilerini incelemişlerdir. EHD sisteminde iki farklı elektrik alan şiddeti seviyesinde ve beş farklı elektrotlar arası mesafede kurutulmuş olan Çin kurt üzümü örnelerinin kuruma hızı, besin içeriği ve enerji tüketim değerlerini araştırmışlar ve fırın kurutma ve kontrol ile karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre aynı elektrik alan şiddeti altında kuruma hızının farklı gerilim değerlerinde ve elektrotlar arası mesafede önemli bir fark oluşturmadığını tespit etmişlerdir. Deneysel olarak, EHD yöntemiyle kurutulan örneklerin polisakkarit içeriklerinin fırın yöntemiyle kurutulan örneklerle karşılaştırıldığında artan değerler tespit etmişlerdir. EHD kurutma sistemi ile kurutulmuş Çin kurt üzümü örneklerinin polisakkarit ve toplam flavonoid içeriği, kontrol örneklerine kıyasla önemli bir fark göstermediğini belirtmişlerdir. Elektrotlar arası mesafenin ve gerilim seviyesinin azalmasıyla özgül enerji tüketiminin azaldığını bulmuşlardır. Kuruma hızının arttırılabileceği ve EHD sistemindeki düşük elektrotlar arası mesafede ve gerilim değerlerinde enerji tüketiminin büyük ölçüde azaldığını bildirmişlerdir. EHD yöntemiyle kurutulan örneklerde hücre hasarının daha az olduğunu gözlemlemişlerdir.

Defraeye ve Martynenko (2018b) çalışmalarında bu alanda bir ilk olarak EHD tarafından üretilen hava akışını (iyon rüzgarı) doğrudan gıdalardan konvektif ısı transferine ve nemin uzaklaştırılmasına bağlayan bir süreklilik modeli geliştirmişlerdir. Çarpma akışına sahip tel-plaka konfigürasyonu için, farklı geometrik ve operasyonel parametrelerin (tel yarıçapı, kolektör elektrotuna olan mesafe, verici gerilimi) EHD ile çalışan hava akışını ve bunun sonucunda oluşan kurutma kinetiği üzerindeki etkisini ölçmüşlerdir. Elma kuruma süresinin, elektrotlar arasındaki mesafe arttıkça veya verici elektrot yarıçapı arttıkça doğrusal olarak arttığı, ancak elektrotlar arasındaki gerilim değerlerinin

artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Tel-tel örgü, tel-plaka, tel-tel ve tel-paralel plakalar gibi hava akışının meyvenin etrafından geçtiği verici-toplayıcı konfigürasyonları için kurutma kinetiklerinde önemli farklılıklar belirlemişlerdir. Bu tür konfigürasyonların, büyük miktarlardaki ürünleri eşit şekilde kurutmak için ölçeklendirmeye yönelik daha iyi perspektifler sağladığını bildirmişlerdir. Test edilen tüm konfigürasyonlardan, tel-tel örgü konfigürasyonun en yüksek kuruma hızını sağladığını gözlemlemişlerdir. Elmanın bir tel örgü üzerine yerleştirmenin, meyvenin daha düzgün bir şekilde kurutulabilmesi nedeniyle de avantajlı olduğunu göstermişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşımın, EHD işlem parametreleri ve geometrik konfigürasyonların kuruma hızı üzerindeki etkisinin çok hızlı bir şekilde ölçülebilmesi gibi belirgin bir avantaja sahip olduğunu belirtmişlerdir. Dolayısıyla bu modelleme yaklaşımının, EHD kurutma teknolojisinin endüstriyel uygulamaya yönelik daha fazla optimizasyonu için değerli bir araç olduğunu tespit etmişlerdir.

Abuzairi ve Ramadhanty (2018) çalışmalarında pirinç işleme zincirinde kurutmanın hasattan sonra yapılması gereken önemli bir adım olduğunu belirtmişler ve çalışmalarında küçük ölçekli EHD kurutucu geliştirmişler ve kurutma işlemini analiz etmişlerdir. EHD kurutucuyu, yüksek gerilimli Altenatif gerilim (AA) ve çok iğneli-plaka elektrot yapısında tasarlamışlardır. EHD kurutucunun uygulanan gerilim büyüklüğü, elektrotlar arası mesafe ve uygulama süresi olarak üç parametreden oluştuğunu bildirmişlerdir. Deney tasarımını istenen istatistiksel özellikler elde etmek için Box-Behnken Design'a dayalı olarak yapmışlar ve yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak analiz etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre Lineer etkileşim modelinin gerilim ilişkisini, elektrotun örneğe uzaklığını ve kuruma süresinin pirincin nem oranını tanımlamak için en uygun model olduğunu tespit etmişlerdir. Yanıt yüzey metodolojisinin analizi sonucunda, pirincin nem oranının değişmesinde en önemli parametrelerin uygulanan gerilim ve kuruma süresi olduğunu belirlemişlerdir.

Khuriati ve Fachriyah (2018) yaptıkları çalışmalarında EHD akışını veya korona boşalımlarının iyon rüzgarını pim-çok halkalı konsantre elektrotlar kullanarak üretmişlerdir. Pim uç çapını 0,018 mm olan paslanmaz çelikten yapmışlardır. Çoklu halkalardan yapılmış elektrotlar birbirine bağlanmış bir metal malzemeden yapmış ve her

bir halka 24, 16 ve 8 mm'lik çapta ve aynı genişlik ve kalınlık sırasıyla 4 mm ve 1 mm olarak tasarlamışlardır. EHD yönteminde 5 kV'luk bir DC yüksek gerilim kullanmışlardır. Pimi, korona deşarjının aktif bir elektrotu ve çok halkalı konsantrik elektrotları ise toplayıcı ve pasif elektrotlar olarak belirlemişlerdir. İyon rüzgarı veya EHD akışı, elektrotlar arasındaki gerilim ve mesafedeki değişikliklerle üretildiğini belirtmişlerdir. Kurutulacak örnekler olarak 26 mm çapında 2 mm kalınlığında halka şeklindeki zencefil dilimlerini kullanmışlardır. Kurutma işlemini 4 mm'lik sabit elektrotlar arasındaki mesafede ve değişen gerilim değerlerinde (1,2, 1,4 ve 1,6 kV) gerçeklerştirmişlerdir. Örneklerin kuruma sürelerini 30, 60, 90, 120 ve 150 dakika olarak belirlemişlerdir. Sabit bir gerilim değerlerinde kurutma işleminde, zencefil dilimlerinin kalınlıklarının artması ile kuruma süresini arttığını tespit etmişlerdir.

Yu ve ark. (2018) çalışmalarında farklı kurutma koşulları altında patates dilimlerinin nem içeriği, görünümü, mikroyapı morfolojisi, rehidrasyon oranı, çözünür indirgen şeker içeriği, rehidrasyon işleminin ürün kaybı ve enerji tüketimi dahil olmak üzere EHD kurutma yönteminin özelliklerini ve kalitesini incelemişlerdir. Ayrıca, farklı kurutma koşullarındaki etkilerini karşılaştırılarak patates dilimlerinin EHD yöntemi ile kurutmasının optimal parametrelerini seçmişlerdir. EHD kurutmanın kuruma hızı, gerilim değerleri ve iğne boşluğundan etkilendiğini belirtmişlerdir. İstatistiki değerlendirmelere göre, kurutma gerilimi ve iğneler arası boşluğun rehidrasyon oranı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu, ancak çözünür indirgen şekerin içeriğinde önemli bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca rehidrasyon işleminde EHD ile kurutulan patates dilimlerinde ürün kaybı olduğunu belirlemişlerdir. Kurutulmuş patates örneklerinin renkleri arasında farklı koşullar altında belirgin bir fark tespit etmişler, ancak yüksek gerilim ve 4 cm'lik iğneler arası boşluğa sahip kurutma koşulunda, elektron mikroskobu gözlemi ile daha fazla membran boşluklarına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Analiz ve karşılaştırmaların sonucunda, optimum kurutma parametresi olarak 20 kV gerilime ve 4 cm iğneler arası boşluğa sahip uygulama olduğunu belirlemişlerdir.

Elmizadeh ve ark. (2018) çalışmalarında 2 mm kalınlığında ayva dilimlerini 5, 7 ve 9 kV'luk üç gerilim seviyesi kullanılarak 70 °C'lik sabit bir sıcaklıkta ve 1 m/s hava hızı ile

50, 60 ve 70 ° C hava sıcaklıklarında kurutmuşlardır. İki kurutma yönteminin kurutulmuş ayva dilimleri üzerindeki etkilerini belirlemek için nem içeriği, büzülme, rehidrasyon kapasitesi, kayma mukavemeti ve renk parametrelerindeki değişimleri incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, EHD kurutma ve sıcak hava kurutma yöntemlerinin arasında önemli farklılıklar olduğunu bulmuşlardır. Büzülme ve renk parametreleri arasında önemli farklılıkların olduğunu, ancak kurutulmuş ayva dilimlerinin kayma mukavemetleri ve su alma kapasiteleri arasında önemli bir fark gözlememişlerdir. Sıcak hava yöntemiyle kurutulmuş ayva dilimleri, EHD yöntemi ile kurutulan örneklere kıyasla yüksek büzülme ve daha iyi renk parametrelerine sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Ek olarak, artan gerilimin, kurutulmuş ayva dilimlerinin su alma kapasitelerinin artmasına ve kayma mukavemetlerinin azalmasına neden olduğunu bildirmişlerdir.

Ni ve ark. (2019) yaptıkları çalışmalarında birden çok iğneli-plaka elektrot sistemindeki EHD kurutma karakteristiklerini ve mekanizmalarını sistematik ve kapsamlı bir şekilde incelemek için, Çin kurt üzümlerinin kurutma deneylerini, iyonik rüzgarın bloke edilmesi ve birden çok iğneli-plaka elektrot sisteminde iğne aralığının değiştirilmesi ile gerçekleştirmişlerdir. Çin kurt üzümü meyvelerinin kurutma özelliklerini, kalite parametreleri ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre iyonik rüzgarın kurutma işlemi sırasında çok önemli bir rol oynadığını tespit etmişlerdir. Farklı iğne aralığı uygulamalarının kuruma hızlarının, kontrol örneklerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve iğneler arası mesafeler arttıkça kuruma hızının azaldığını belirtmişlerdir. İğne aralığının iyonik rüzgar hızı, rehidrasyon hızı ve polisakkarit içeriği üzerinde büyük etkisi olduğunu bildirmişlerdir. Efektif difüzyon katsayısı katsayısı ve elektrik iletkenliği dağılım indeksinin, iğne aralığındaki artışla azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca iyonik rüzgarın, Çin kurt üzümü meyvelerinin efektif difüzyon katsayısı ve elektrik iletkenliği dağılım indeksi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. EHD sisteminde kurutulmuş Çin kurt üzümü örneklerinin mikroyapılarının önemli ölçüde değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Defraeye ve Martynenko (2019) yaptıkları çalışmalarında EHD yöntemini bir emitör ve bir toplayıcı elektrot arasındaki iyonik rüzgar üretimine dayanan termal olmayan bir kurutma teknolojisi olarak tanımlamışlardır. Bu simülasyon tabanlı çalışmada EHD

kurutma sisteminin endüstriyel kullanım potansiyellerini değerlendirmek amacıyla çeşitli emitör-toplayıcı konfigürasyonlarının etkisini değerlendirmişlerdir. Çarpan akış oluşturan geleneksel tel-plaka konfigürasyonunun, birden fazla gıda ürününün kurutulması için EHD' nin hızlı ve tekdüze bir şekilde en uygun çözüm olmadığı sonucuna varmışlardır. Tek bir tel (emitör) ile havanın su buharı ile aşamalı olarak yüklenmesi nedeniyle daha aşağı yerleştirilen ürünlerin daha yavaş kuruduğunu belirlemişlerdir. Çok sayıdaki emitörler ile tek bir tel ile karşılaştırıldığında, gıda ürünlerinin kuruma süresinde üç kat artış görüldüğünü tespit etmişlerdir. Bu artışın sebebinin havanın sirkülasyonundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Kurutma bölgesindeki su buharı birikmesini önlemek için telden tel örgü şeklinde bir yapıyı önermişlerdir. Tel örgü toplayıcının komşu hava akışlarının girişimini en aza indirdiğini ve nemli havanın kurutma bölgesinde yeniden dolaşımını önlediğini bildirmişlerdir. Tel örgülü konfigürasyonun sadece bitişik ürünler arasında değil, aynı zamanda bir ürünün içinde tüm yüzeylerinden kurutulabildiği için daha homojen bir kurutma sağladığını belirtmişlerdir. Tel örgülü konfigürasyon için verici yoğunluğunda bir artışın, hava hızında genel bir artışa yol açtığını, ancak ürün kuruma hızında artmasına neden olmadığını gözlemlemişlerdir. Bunun nedenin, yüksek hızlı EHD hava akışının her zaman emitör ve toplayıcının yakınında çok bölgesel olarak üretilmesine bağlamışlardır. Böylece konvektif kurutma işlemi emitör yoğunluğundan fazla etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Rahaman ve ark. (2019) çalışmalarında bir ön işlem yöntemi olarak darbeli elektrik alanının (PEF) taze eriklerin konvektif kurutma kinetiği, hücre parçalanması, renkleri ve mikroyapısal değişiklikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, eriğin kurutma kinetiğini tespit etmek için 1-3 kV/cm PEF yoğunlukları, 30 atım sayısı ve 70 °C kurutma sıcaklığı uygulamışlardır. PEF işlemi için özgül enerji tüketim değerlerinin 10-90 kJ/kg aralığında olduğunu belirlemişlerdir. 1'den 3 kV/cm'ye artan elektrik alan yoğunluğu ile hücre parçalanma indeksinin 0,147'den 0,572'ye yükseldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, yüksek hücre parçalanmasının kuruma hızında artışa ve kuruma süresini kısaltmaya yol açtığını bulmuşlardır. PEF yoğunluğunun 0,27 x 10^{-9} m^2/s'den 16,47 x 10^{-9} m^2/s'ye artmasıyla efektif difüzyon katsayısı oranlarının da arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca yüksek bir difüzyon katsayısının, eriğin ıslak ve kuru bazında daha

yüksek nem difüzyonuna sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. PEF ön işlemi, ardından konvektif kurutma, ön işlem uygulanmamış erik örnekleri ile karşılaştırıldığında daha fazla parlaklık ve kroma ile sonuçlandığını belirlemişlerdir. Ayrıca, taramalı elektron mikroskobuyla yapılan mikroskobik analiz, 3 kV/cm'deki PEF işleminin erik örneklerinin dokularında büzülmeye neden olduğunu ve bunun erikte suyun daha yüksek difüzyon hızından kaynaklı olabileceğini ortaya çıkardığını bildirmişlerdir.

Zamani ve ark. (2019) elektrik alan korona boşaltımı uygulanarak gözenekli bir gövdenin kurutma işlemini simüle etmek için fenomenolojik bir hesaplamalı akışkan dinamiği modeli geliştirmişlerdir. Birleştirilmiş doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler setini aynı anda çözmüş ve literatürdeki deneysel bulgularla karşılaştırmışlardır. Deneylere kıyasla korona rüzgar hızının nispi hatasının % 1'den az olduğunu belirtmişlerdir. EHD kuvvetinin ve korona rüzgarının ana gradyanlarının boşalım elektrotuna yakın olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, giriş havasının olmadığı durumda, korona rüzgar hızı ve alan dağılımı, kurutma işlemi sırasında kütle transferini arttırmak için ana faktör olarak girdapların varlığını göstermişlerdir. Sabit bir hava hızında, gerilim değerlerideki artışın korona hızının artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Ek olarak, hava hızını bir dereceye kadar artırmanın korona hızını önce arttırdığını, daha sonra düşmeye başladığını gözlemlemişlerdir. Birincil hava akışının sürükleme etkisi ve iyonize molekülleri dışarıya taşıma nedeniyle, 1 m/s hava hızında kuruma hızları, 1,5 m/s hava hızı için olanlardan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Hava giriş akışının uygulanması, korona boşalımında meydana gelen değişiklik nedeniyle yüzeye gelen optimal elektrot hızını da değiştirdiğini tespit etmişlerdir. Bu nedenle, nem değişikliklerinin uygulanan gerilim şiddetinin, yüzeyle elektrot arası mesafelerinin, sıcaklık ve hava giriş hızından etkilendiğinin sonucuna varmışlardır.

Nadery ve Taghian Dinani (2020) yaptıkları çalışmada 1:1 ve 1:2 seviyelerinde CMC (karboksimetil selüloz) çözelti oranı (S:CSR) parametresinin ve 0, 16, 18 ve 20 kV seviyelerinde dört EHD gerilim parametresinin muz dilimleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sonuçları incelediklerinde EHD gerilim değerinlerindeki 0'dan 20 kV'ya kadar olan bir artışın, kurutulmuş muz dilimlerinin su alma kapasitesini (% 117,86) ve toplam fenolik içeriğini (% 20,83) önemli ölçüde arttırdığını ve enerji tüketimi (% 30,03),

kuruma süresi (% 27,9), büzülme (% 74,52), kesme gerilimi (% 76,48) ve toplam renk farkı (ΔE) (% 78,74) parametrelerini önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, CMC çözelti oranında 1:1'den 1:2'ye bir artışın, kurutulmuş muz dilimlerinin büzülmesini (% 20,62), kesme gerilimi (% 21,93) ve toplam renk farkı (% 33,02) önemli ölçüde azalttığı ve su alma kapasitesini (% 24,40) ve toplam fenolik içeriğini (% 16,88) önemli ölçüde arttırdığını belirlemişlerdir. Kurutulmuş muz dilimlerinin TEM görüntüleriyle örneklerin yüzeyinde tek tip kaplamaların oluştuğunu ve EHD gerilimi 0 ila 20 kV ve CMC çözelti oranı 1:1 ila 1:2 arasında değiştiği örneklerde gözenekliliklerin ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir.

Martynenko ve ark. (2020) çalışmalarında EHD yönteminin kuruma hızı üzerindeki elektriksel ve konvektif etkilerini ayrı ayrı değerlendirmek için topraklanmış metal örgü toplayıcılı bir deney sistemi tasarlamışlardır. EHD kurutmanın benzer bir hava hızı aralığında tamamen konvektif kurutmaya kıyasla önemli ölçüde daha yüksek kuruma hızı (2–2,7 kat) sağladığını bulmuşlardır. Elektrostatik alanın dışında kurutma EHD ile oluşturulan hava akışının konvektif etkisinin, mekanik olarak oluşturulan hava akışınınkine eşdeğer olmadığını göstermişlerdir. Elektriksel faktörlerin (elektrostatik alan ve iyon akışı) kuruma hızı üzerindeki doğrudan etkisinin yaklaşık % 30 olduğunu, ana etkinin ise EHD kaynaklı konvektif hava akışından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın, endüstriyel olarak kullanılmasında kritik öneme sahip olan EHD kurutma teknolojisinin konvektif ve elektriksel mekanizmalarını ayırmak için ilk girişim olduğunu bildirmişlerdir.

Qu ve ark. (2020) yapmış oldukları çalışmalarında elektronik bileşenlerin çalışması sırasında meydana gelen yüksek sıcaklığın çiplerin PN bağlantılarının arızalanmasına neden olabileceğini ve hatta tüm bileşenlere zarar verebileceğini belirtmişlerdir. İyonik rüzgarın gürültüsüz, kompakt yapısı ve esnek tasarımı nedeniyle ısı dağılımı için umut verici bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, elektronik bir bileşeni soğutmak için paralel bağlı çok iğneli elektrotlara sahip iğne halka tipi iyonik rüzgar cihazları geliştirilmişlerdir. İğne sayısı, iğne elektrot malzemesi (tungsten ve paslanmaz çelik), elektrotlar arası mesafenin cihaz çıkış hızı ve soğutma performansı üzerindeki etkileri, bir ısıtma filmi ile monte edilmiş silindirik bir soğutucu için deneysel olarak

incelemişlerdir. Elektrik alanı, hava akışı ve ısı transferinin birleştirilmiş etkilerinin dikkate alındığı tam bir üç boyutlu çoklu-fiziksel sayısal yöntem de oluşturmuşlardır. Elektrik alanlarının karşılıklı girişimi (iki iyon rüzgarının karşılıklı etkisi, bazı alanlarda enerjinin azalmasına ve diğerlerinde enerjinin artmasına neden olur), iğne elektrotları arasında tanımlamışlardır. İyonik rüzgar hızını elektrik alan kuvveti ve halka ekseni ile iğne ucunu ve halkanın üst kenarını birleştiren çizgi arasındaki açı ile belirlemişlerdir. Rüzgar hızının elektrotlar arası mesafenin sürekli artmasıyla önce azaldığını ve ardından arttığını bildirmişlerdir. Elektrot malzemesinin serbest akış durumunun iyonik rüzgar hızı üzerinde belirgin bir etkisi olmasına rağmen, ısıtma filmi yüzey sıcaklığı iğne malzemesine duyarlı olmadığını, fakat elektrotlar arası mesafeye ve iğne sayısına duyarlı olduğunu belirtmişlerdir. Dört iğneli düzenin çıkış rüzgar hızının halkanın içinde geri akış olmasına rağmen üç iğneli düzeninkinden daha büyük olduğunu bulmuşlardır. Isıtma filmi yüzey sıcaklığı, 70 °C'lik güvenlik sıcaklığından daha düşük olan bu iki farklı tasarlanmış elektrot düzeni için 55 °C'nin altında kaldığını belirtmişlerdir. Çalışmalarının çok elektrotlu iyonik rüzgar soğutma sistemleri geliştirmek için bir kılavuz görevi görebileceğini ifade etmişlerdir.

Martynenko ve ark. (2020) yaptıkları çalışmalarında gıda ve diğer malzemeleri kurutmanın yeni yöntemlerinden biri olan EHD kurutmanın üründen nemin uzaklaştıran itici güçlerini araştırmışlardır. Bu nedenle, EHD'nin kuruma hızı üzerindeki elektriksel ve konvektif etkilerini ayrı ayrı değerlendirmek için topraklanmış metal ağ toplayıcılı bir deney düzeneği tasarlamışlardır. EHD kurutmanın karşılaştırılabilir bir hava hızı aralığında tamamen konvektif kurutmaya kıyasla önemli ölçüde daha yüksek kuruma hızı (2-2,7 kat) sağladığını belirlemişlerdir. Elektrik etmenlerinin (elektrostatik alan ve iyon akışı) kuruma hızı üzerindeki doğrudan etkisi yaklaşık %30 iken, ana etkinin EHD kaynaklı konvektif hava akışından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Elektrostatik alanın dışında kurutma, EHD ile indüklenen hava akışının konvektif etkisinin, mekanik olarak indüklenen hava akışının aynısına eşdeğer olmadığını tespit etmişlerdir.

Ni ve ark. (2020a) yaptıkları çalışmada EHD kurutma işlemi altında kurt üzümü örneklerinin kuruma hızını iyileştirmek için daha iyi bir yöntem bulmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, EHD kurutma işlemi altında farklı ön işlem yöntemleri kullanılarak kurt

üzümü örneklerinin kuruma özelliklerini ve mikroyapısını incelenmişlerdir. Ön işlemden sonraki kuruma hızının ön işleme tabi tutulmamış kurt üzümünden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve farklı ön işlem yöntemlerinin bir EHD kurutma sisteminde kurt üzümü örneklerinin kurutma özellikleri üzerinde farklı etkileri olduğunu tespit etmişlerdir. Farklı ön işlem yöntemlerinin efektif difüzyon katsayısı üzerindeki etkileri azalan sırayla şu şekilde elde etmişlerdir: KOH > NaOH > Na_2CO3 > ultrasonik > sakaroz ester. Ön işlemin, EHD yöntemiyle kurutulan kurt üzümü örneklerinin rehidrasyon oranı, özgül enerji tüketimi ve mikro yapıları üzerinde büyük etkisi olduğunu belirlemişlerdir. EHD kurutma işlemi sırasında, NaOH ve KOH gibi en güçlü alkali çözelti ön işleminin, kurt üzümü örnekleri için daha iyi kurutma etkisine sahip olduğunu bulmuşlardır. Bu nedenle, en güçlü alkali çözelti ön işlemi, EHD ile kurutulan kurt üzümü örneklerinin endüstriyel uygulama amaçları için en uygun ön işlemler olarak kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Ni ve ark. (2020b) yaptıkları çalışmada Çin kurt üzümü örneklerinin farklı EHD kurutma ve fırında kurutma kombinasyonlarının kurutma özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında Çin kurt üzümü örneklerini 9 [Kontrol (25 ± 2 °C), Fırın, EHD kurutma, 3 s (EHD kurutma) + 60 °C, 6 s (EHD kurutma) + 60 °C, 9 s (EHD kurutma) + 60 °C, 12 s (EHD kurutma), 15 s (EHD kurutma), 18 s (EHD kurutma) + 60 °C] farklı yöntemle kurutmuşlardır. Çin kurt üzümü örneklerinin farklı kurutma işlemleri altında kurutma parametrelerini, aktif bileşenlerini ve mikro yapılarını belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre EHD kurutma ve fırında kurutma yöntemlerinin iki aşamalı kurutma işlemi altında, erken aşamalarda EHD kurutma yönteminin Çin kurt üzümü kurutulması üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ve daha sonraki aşamada fırında kurutma yönteminin daha büyük bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Kısmen fırında kurutma ile birlikte EHD yöntemiyle kurutulan Çin kurt üzümü örneklerinin kuruma hızlarını fırında kurutulan öerneklerden ve kontrol örneklerinden önemli ölçüde daha yüksek bulmuşlardır. EHD-fırın kurutma kombinasyon yönteminin, kuruma hızı, rehidrasyon hızı ve polisakarit içeriği üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ve büzülme ve flavonoid içeriği üzerinde çok az etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. EHD kurutma veya fırında kurutma ile karşılaştırıldığında, EHD-fırın kurutma kombinasyon yönteminin, Çin kurt üzümü örneklerinin efektif difüzyon katsayısını önemli ölçüde

arttırdığını göstermişlerdir. EHD kurutmanın kısmen fırında kurutma ile birleştirilmesinin, taramalı elektron mikroskobu ve kızılötesi spektroskopiye göre Çin kurt üzümü örneklerinin mikroyapılarında önemli bir değişikliğe neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, fırın kurutma teknolojisi ile kısmen birleştirilen EHD yönteminin, örneklerin kurutma kalitesini iyileştirdiği ve kullanılan enerji tüketim değerlerini azalttığını tespit etmişlerdir.

Ni ve ark. (2020c) yaptıkları çalışmada EHD kurutma sırasında farklı iğne aralıklarının kurt üzümü örneklerinin yapıları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kurutma işlemi sırasında kurt üzümünün kuruma özelliklerini ve ürün kalite parametrelerini belirlemişlerdir. Ayrıca kurutulmuş ürünlerin kızılötesi spektrum özelliklerini detaylı olarak analiz etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre kurt üzümünün farklı iğne aralığı koşulları altında ortalama kuruma hızının kontrol grubuna göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve iğne aralığının artmasıyla ortalama kuruma hızının azaldığını tespit etmişlerdir. İğne aralığının değişmesinin, kurt üzümünün polisakkarit ve flavonoid içeriği üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Fourier transform kızılötesi spektroskopisinin, her uygulama grubunda kurt üzümünün meyvesinin kızılötesi spektrumlarının genel olarak benzer olduğunun sonucuna ulaşmışlardır. Farklı uygulama gruplarının birinci dereceden kızılötesi spektrumlarının esas olarak 1740/cm ve 2800/cm-2950/cm aralığında farklı olduğunu tespit etmişlerdir. Kurt üzümünün ikinci türev kızılötesi spektrumunun absorpsiyon tepe noktalarının şekli ve yoğunluğunun farklı iğne aralığı uygulamalarında farklı olduğunu belirlemişlerdir. İğne aralığı 2 ve 4 cm olduğunda, oldukça değişken bir tepe oranı ve düşük bir ortak tepe oranı oluşturduğu, bunun da en iyi kurutma etkisinin 2 ve 4 cm'de olduğunu kanıtladığını bulmuşlardır.

Ni ve ark. (2020d) çalışmalarında ultrasonik ön işlemin EHD kurutma işlemi kurt üzümü örnekleri üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmak için, EHD kurutma ile birleştirilmiş ultrasonik ön işlem ile kurutma deneylerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre kurt üzümü örneklerinin ultrasonik ön işlemden sonra kuruma hızlarının kontrole göre önemli ölçüde daha yüksek olduklarını bulmuşlardır. Bunlar arasında en iyi etkinin ultrasonik güç 200 W, işlem süresi 20 dakika ve işlem sıcaklığı 35 °C olduğu uygulamada elde etmişlerdir. Ultrasonik ön işlemin kuruma hızı, efektif difüzyon

katsayısı ve rehidrasyon hızı üzerinde büyük bir etkisinin olduğunu ve büzülme hızı üzerinde etkisinin çok az olduğunu bildirmişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu ve kızılötesi spektrum sayesinde, ultrasonik ön işlem ile kurt üzümü örneklerinin mikroyapılarının önemli ölçüde değiştiğini ve yapısal değişikliği kuruma hızının iyileştirilmesinde ve etkin bileşenlerin korunmasında büyük oranda olumlu bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Iranshahi ve ark. (2020) çalışmalarında EHD kuruma sürecindeki enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmak için bir EHD meyve kurutucusunun ağ toplayıcı tasarımını optimize etmişlerdir. Bu tasarımda, iyon üretimi, iyonik akış oluşumu ve meyvenin konvektif kurutma aşamalarındaki enerji dönüşüm kayıplarını belirlemek için ekserji analizi kullanmışlardır. Ağın geometrik parametrelerinin (tel çapı ve açık alan) kurutma kinetiğini önemli ölçüde etkilemediğini ancak, ağın açık alanı azaldıkça enerji tüketimini arttığını belirlemişlerdir. Bu nedenle, kuruma süresini ve enerji tüketimini en aza indirmek için ağ açık alanı mümkün olduğunca geniş seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, benzer bir kuruma süresi sağlayan ancak standart bir ağ ile karşılaştırıldığında yedi kat daha düşük enerji tüketimi sağlayan optimize edilmiş bir ağ yapılandırması tasarlamışlardır. Bir ağın toplayıcı olarak kullanılmasının, elektrostatik parametrelerin ve iyon akışının manipülasyonu için fırsat sağladığını belirtmişlerdir. Uygun elektrostatik ve aerodinamik koşullarda, kollektör tellerinin optimal konfigürasyonuna ulaşmanın mümkün olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışmalarıyla endüstriyel prototiplere ve pilot tesislere giden yolu açan EHD kurutucu tasarımını çok daha enerji verimli hale getirdiklerini göstermişlerdir.

Onwude ve ark (2021) çalışmalarında tel-ağ yapılandırmasına sahip büyütülmüş bir EHD kurutucuyu modellemişlerdir. Büyütülmüş bir EHD kurutma işlemi için meyve yükleme yoğunluğunun, emitörde uygulanan gerilim değerinin ve elektrot mesafesinin kuruma süresi ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir. Bir EHD kurutucuya %70 kapasite diğerine ise %8 kapasitede meyve yerleştirilmiştir. Yüksek kapasitedeki kurutma işlemi ile düşük kapasitedeki kurutmaya kıyasla tek bir kurutma işleminde %16'ya kadar daha yavaş ancak %28 daha az enerji kullanarak kurutmuşlardır. Aynı miktarda kurutulmuş örneklerin elde etmek için, %70 kapasite doluluktaki EHD kurutucuda

kurutma uygulamasının %8 kapasitedeki doluluktaki EHD kurutma uygulamasına göre 11 kat daha az enerji harcadığını ve 7 kat daha hızlı kuruma sağladığını bulmuşlardır. Büyütülmüş bir EHD kurutucuyu %50 kapasitede yüklemenin, kurutucuyu yoğun bir şekilde %70 kapasiteye yüklemekten daha fazla enerji tükettiğini (%100) ve daha yavaş kuruttuğunu (%30) tespit etmişlerdir. Yoğun gıda yüklü geleneksel bir sıcak hava kurutma yöntemi ile karşılaştırdıklarında, %70'e kadar kapasiteye sahip bir EHD kurutucunun yüklenmesi yaklaşık 2 kata kadar daha hızlı ve yaklaşık 200 kat daha az enerji ile kuruyacağını bildirmişlerdir. Birden fazla meyveyi yoğun yüklü bir EHD kurutucuda daha düşük gerilim değerlerinde kurutmanın, meyve yükleme yoğunluğuna bağlı olarak meyvelerin yaklaşık %30 daha yavaş kurumasına rağmen, çok yüksek gerilim değerlerinde kurutmaya göre 11 kat daha verimli olduğunu belirlemişlerdir. Bir EHD kurutucuda elektrot mesafesi artırılarak birden fazla meyve dilimini kurutmanın enerji tüketimini, meyve yükleme yoğunluğuna bağlı olarak meyvelerin yaklaşık %25 daha yavaş kurumasına rağmen, büyük ölçüde (~%77) azaltılabileceğini bildirmişlerdir. Bu çalışma ile endüstrinin büyük miktarlarda ürünü mümkün olan en kısa sürede ve enerji verimliliği yüksek bir şekilde kurutması için EHD kurutma sistemlerini geliştirmeye yönelik önemli bir adım sunmuşlardır.

Martynenko ve Misra (2021) çalışmalarında çok uçlu dielektrik plakalı bir EHD sistemi kullanarak, güçlü bir elektrik alanında AA korona deşarjının su buharlaşması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dielektrik bariyer ile kullanılabilen güçlü bir elektrik alanının uygulanmasının EHD kurutmanın kuruma hızını ve verimini artırmadığını belirtmişlerdir. EHD kurutmada agar örneğinin sıcaklık dağılımını termal olarak görüntüleyerek elektrikle hareket eden buharlaşmaya bağlı olarak ıslak malzemenin önemli sıcaklık düşüşünü ortaya çıkarmışlardır. Malzeme yüzeyinin sıcaklığının yaş termometre sıcaklığının altına düşebileceğini gözlemlemişlerdir. İyonizasyon eşiğinin altındaki hafif bir AA elektrik alanı, hem dielektrik bariyerde hem de ıslak malzemede gözlenen küçük bir soğutma etkisi ürettiğini tespit etmişlerdir. 10 ila 20 kV uygulanan gerilim arasında, elektrik alanının soğutma etkisi, iyonik rüzgarın soğutma etkileri ve malzeme yüzeyinden su buharlaşması ile kuvvetlendiğini ve bu soğutma sonucunda yaş malzemenin yüzey sıcaklığı yaş termometre sıcaklığının altına düştüğünü belirlemişlerdir. 10 mA/m^2'nin üzerinde akım yoğunluğuna sahip AA korona deşarjının dielektrik bariyerde ısı ürettiğini

gözlemlemişlerdir. EHD yöntemi ile kurutmada ürün sıcaklığı, elektrik alan kuvveti, deşarj akımı ve kurutma hızı arasındaki ilişkinin teorik bir modeli geliştirmiş ve deneysel olarak doğrulamışlardır.

Martynenko ve Kudra (2021) çalışmalarında, 1x1 ve 2x2 çok pimli deşarj elektrotları kullanarak EHD kurutma için DA ile AA (60 Hz frekans) gücünün verimliliğini karşılaştırmışlardır. Enerji göstergelerini ıslak kağıt mendilin kuruma hızına karşılık gelen elektrik gücü tüketimi ölçümlerinden belirlemişlerdir. EHD kurutma verimliliği, uygulanan gerilim değerlerine, akımın tipine (AA veya DA) ve çoklu emitörlü deşarj elektrotunun konfigürasyonuna (1x1 veya 2x2 cm) bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Yapmış olduğu deneylerin sonuçlarına göre DA kurutmanın kuruma hızı, daha yüksek enerji verimliliği ve daha düşük özgül enerji tüketimi gibi temel faydalarını ortaya çıkarmışlardır. 0,2 g/(m^2/s) karşılaştırılabilir kurutma akışı için, DA kurutmanın özgül enerji tüketim değerlerini 350 J/g (2x2) ila 750 J/g (1x1), AA için ise 2000 J/g (2x2) ila 5000 J/g (1x1) aralığında bulmuşlardır. 2x2 deşarj elektrodunun özgül enerji tüketimini 1x1'den daha küçük bulmuşlardır. Bu sonuçla emitör aralığının işlem verimliliğine etkisine dikkat çekmişlerdir. Her iki elektrotun özgül enerji tüketim değerlerinin kuruma hızıyla birlikte arttığını tespit etmişlerdir.

Martynenko ve ark. (2021) yaptıkları çalışmalarında, toplayıcı elektrot geometrisinin EHD kurutmanın kuruma hızı ve enerji verimliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Teorik çalışmalar, örgü toplayıcıların katı plaka toplayıcılara kıyasla daha iyi bir performans gösterdiğini tahmin etse de, deneysel doğrulamanın hala eksik olduğunu belirtmişlerdir. Bu boşluğu gidermek için araştırmalarında, üç deşarj elektrotu (çivil, iğne, pin elektrot iğne) ve iki malzeme (ıslak kağıt ve elma dilimleri) ile kurutma deneylerinde plaka ile ağ toplayıcı elektrotların performansını karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, ağ toplayıcının plakaya kıyasla %25'e kadar daha yüksek kurutma akısı oluşturduğunu ve %20-35 daha küçük özgül enerji tükettiğini tespit etmişlerdir. Örneğin, elma dilimlerinin ağ ile EHD yöntemle kurutulması 719-731 kJ/kg, plaka toplayıcı ile kurutulması ise 935-968 kJ/kg özgül enerji tüketimi ile sonuçlandığını belirlemişlerdir. Elma kurutmanın özgül enerji tüketiminin ıslak kağıt kurutmadan daha düşük bulmuşlardır. Çivi ve iğne elektrotları, 719 ila 815 kJ/kg aralığında en iyi özgül enerji

tüketimini gösterirken, pin elektrotlar 1025 ila 1220 kJ/kg arasında en kötü enerji özelliklerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Tel yoğunluğu ve aralığının daha fazla optimizasyonu, ağ toplayıcının enerji faydalarını iyileştirilebileceğinin ve böylece EHD kurutma teknolojisinin endüstriyel olarak kullanılması için benzersiz bir fırsat sağlayabileceğini belirtmişlerdir.

Yang ve ark. (2021a) çalışmalarında EHD kurutma ve ön dondurma (yıkama, -20°C'de 24 saat ön dondurma, çözdürme, dilimleme, renk bakımı ve kurutma) ve ön pişirme (yıkama, dilimleme, renk bakımı, ön pişirme ve kurutma) işlemlerinin patates unlarının fizikokimyasal ve fonksiyonel özellikleri üzerinde etkilerini değerlendirmişlerdir. Ayrıca, standart yöntemler kullanarak bir kontrol numunesi (yıkama, dilimleme, renk bakımı ve kurutma) ile karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre EHD kurutmanın erken aşamasında, patateslerin kuruma hızının gerilim değerlerinin artmasıyla kademeli olarak arttığını ortaya koymuşlardır. İlk kurutma periyodunda hem EHD kurutmanın hem de ön dondurma işleminin patateslerin kuruma hızını artırabileceğini göstermişlerdir. 20 kV kurutma gerilimi ile hazırlanan patates unlarının yağ absorpsiyon indeksi ve suda çözünürlük indeksi değerlerinin ise diğer gerilimlerden daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Kontrol grubu ve ön pişirme işlemi ile karşılaştırıldığında, ön dondurma işleminin patateslerin kuruma süresi değerlerini 1-2 saat aralığında azalttığını tespit etmişlerdir. Ön dondurma işlemi ile hazırlanan patates unlarının amiloz içeriği, su absorpsiyon indeksi, şişme gücü ve viskozite değerlerinin kontrol grubu ve ön pişirme işlemine göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Şişme gücü ve viskozitesi yüksek patates ununun yüksek koyulaştırma gücünün gerekli olduğu gıda formülasyonlarında kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında, EHD kurutmadan önce ön dondurma işlemi yapılarak patates yumrusunun ön işleme tabi tutulmasının, kontrol numunesine kıyasla daha kaliteli patates unu sağladığını belirlemişlerdir.

Bashkir ve Martynenko (2021) çalışmalarında, emitörlerin tipini ve düzenini optimize ederek çoklu emitörlü deşarj elektrotlarının tasarımına odaklanmışlardır. Farklı uç açılarına sahip dört tip emitörü (inşaat çivileri, kalın el dikişi iğneleri, ince iğneler ve elipsoidal makine dikiş iğneleri) ve kare veya satranç ızgarası düzenlemeleri ile test etmişlerdir. Emitörlerin şeklinin kuruma hızı ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini

incelemişlerdir. Kalın el dikişi iğnelerinden ve makine dikiş iğnelerinden yapılan emitörlerin, keskin uçlu, dar flama benzeri iyonik rüzgar jeti nedeniyle EHD kurutma için uygun olmadığı ve bunun da kararsız bir elektrik deşarjına neden olduğunu bulmuşlardır. İnce pin emitörler kullanılarak yapılan çoklu emitör deşarj elektrotlu kurutmanın en yüksek kuruma hızını sağladını tespit etmişlerdir. EHD kurutmada paslanmaz çelik çiviler gibi yarım küre uçlu kalın emitörlerin kulanımı ile en düşük enerji tüketimini elde etmişlerdir ve bu nedenle endüstriyel kullanım için yarım küre uçlu kalın emitörlerin kullanımını tavsiye etmişlerdir. Çok emitörlü bir deşarj elektrotunun kurutma verimliliğini, kuruma hızı ve özgül enerji tüketimi (ÖET) ile değerlendirmişlerdir. En küçük ÖET değerini (107,19 kJ/kg), inşat çivileri elektrotunun kullanıldığı 4,5 kV/cm elektrik alan gücünde, deşarj ve toplayıcı elektrotlar arasında 2 cm'lik bir boşlukta ve emitörlerin kare düzenine sahip olduğu deneyde elde etmişlerdir. Buna ek olarak, elektrik alan kuvvetinin veya boşluğun artmasının, kuruma hızının ve ÖET'nin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Emitörlerin kare düzenine sahip çoklu emitörlü deşarj elektrodu, satranç düzenlemesinden daha verimli olduğunu ve bunun da daha yüksek bir toplam kuruma hızı sağladığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, satranç ve kare dizilimleri arasında enerji tüketim değerlerinin farklı olmadığını bulmuşlardır.

Mirzaei-Baktash ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada mantar dilimlerini EHD ve sıcak hava yöntemlerini kullanarak kurutmuşlardır. Kurutma işleminden önce üç farklı ön işlemin (darbeli elektrik alanı (PEF), ultrases (US) ve geleneksel haşlama (GH) mantar dilimlerinin kuruma süresi, kuruma hızı, D_{eff}, özgül enerji tüketimi, toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivitesi üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Kurutma işleminden önce uyguladıkları GH, US ve PEF ön işlemleri mantar dilimlerinin kuruma süresini sırasıyla sıcak hava kurutma yöntemi için %5,78, %11–39 ve %7–25 ve EHD kurutma yöntemi için %12,81, %33–38 ve %16–28 aralıklarında azalttığını belirlemişlerdir. US ve PEF ön işlemlerinin, mantar dilimlerinin enerji tüketimini önemli ölçüde azalttığını ve ayrıca kuruma hızını ve efektif difüzyon katsayı değerini iyileştirdiğini bulmuşlardır. Antioksidan aktivitesi değerlerini incelendiklerinde, US veya PEF ile ön işleme tabi tutulan kurutulmuş mantar dilimlerinin, GH ile ön işleme tabi tutulmuş numunelerinkinden önemli ölçüde düşük olduğunu belirlemişlerdir. Genel olarak, US ön işleminin, PEF ön işlemine göre kurutma kinetiği ve özgül enerji tüketiminin azaltılması

üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sıcak havayla kurutmanın EHD kurutmadan çok daha hızlı olduğunu bulmuşlardır. EHD'nin mantarlarnın toplam fenolik bileşikleri ve antioksidan aktivitesi üzerinde sıcak hava ile kurutmaya göre zararlı etkileri olduğunu belirlemişlerdir. Bu veriler ışığında, yüksek kaliteli kurutulmuş gıdaların yanı sıra düşük enerji tüketimi sağlamak için US ve PEF ön işlemlerinde ve EHD kurutma yöntemlerinde uygun kontrol değişkenleri setinin seçilmesinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir.

Iranshahi ve ark. (2022) çalışmalarında EHD kurutma yönteminin otuz yıldan fazla bir süredir araştırılmış olmasına rağmen, farklı dehidrasyon mekanizmalarının EHD'deki göreceli katkısı hakkında hala çok az şey bilindiğini belirtmişlerdir. Bu çerçevede, gıda ve çevresindeki hava içindeki farklı EHD denetimli kütle transfer süreçlerinin etkisinin doğru bir şekilde anlaşılması, EHD kurutma teknolojisinin hedeflenen bir gelecek optimizasyonu ve başarılı bir şekilde iyileştirilmesi için bu çalışmayı yapmışlardır. Dehidrasyon mekanizmalarının örnekleri, konvektif nem giderme, hücre zarının elektroporasyonu veya meyvedeki elektro-ozmotik akış olduğunu açıklamışlardır. Bu modelleme çalışmalarında, ilk olarak bitki bazlı gıda malzemelerinin EHD kurutma işlemi sırasında kütle transferi için olası dehidrasyon mekanizmalarını tanımlamışlardır. Mevcut teorik modelleri kullanarak, sabit hız periyodu boyunca her bir dehidrasyon mekanizmasının toplam kütle transferine göreceli katkısını tahmin etmişler ve katkılarına göre sıralamışlardır. İyonik rüzgar ile konvektif dehidrasyonun, kılcal gözenekli bir malzeme için toplam su akışına yaklaşık %93'lük bir katkı ile baskın dehidrasyon mekanizması olduğunu göstermişlerdir. Hücre zarı elektroporasyonunun, meyve dokusundaki toplam kütle akışının yaklaşık %6,5'ine transmembran su akışının katkısını artıran ikinci önemli itici güç olduğunu belirtmişlerdir. Diğer tüm su taşıma mekanizmalarının katkısının sadece % 0,5 olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sonuçların, düşme hızı periyodu da dahil olmak üzere EHD tarafından tam fizik tabanlı bir dehidrasyon süreci modelini geliştirmeye yönelik bir adım olabileceğini ifade etmişlerdir.

Paul ve ark. (2022) çalışmalarında EHD yöntemle farklı kalınlıkta (1, 2, 3 ve 4 mm) kurutulan elma ve çilek dilimlerinin kurutma kinetiği, enerji tüketimi ve kalite parametleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Örnek kalınlığının EHD kurutma kinetiğini ve enerji

tüketimini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır. Meyve kalınlığı arttıkça kuruma hızının azaldığını, bunun sonucunda da denge nem içeriğine kadar gereken süreyi elma dilimleri için 3 saatten (1 mm) 16 saate (4 mm) ve çilek dilimleri için 14 saatten (3 mm) 19 saate (4 mm) yükseldiğini tespit etmişlerdir. Efektif difüzyon katsayısı ve enerji tüketim değerlerini doğrudan ölçümlerle belirlerken, renk ve büzülme gibi görsel kalite niteliklerini görüntü analiziyle belirlemişlerdir. Efektif difüzyonun kalınlıktan bağımsız olarak elma örnekleri için 0,5 × 10^{-11} m^2/s ve çilek örnekleri için 0,24 × 10^{-11} m^2/s dolayında olduğunu bulmuşlardır. Ortalama özgül enerji tüketim değerleri, elma dilimleri için 601,13 kJ/kg'dan (1 mm) 1433,83 kJ/kg'a (4 mm) ve çilek dilimleri için 1324,17'den (3 mm) 1756,71 kJ/kg'a (4 mm) yükseldiğini belirlemişlerdir. EHD kurutmanın elma rengi üzerindeki etkisi, geleneksel sıcak havayla kurutmaya göre önemli ölçüde daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. EHD kurutmanın elma ve çilek dilimlerinin büzülmesi üzerindeki etkisi sırasıyla yaklaşık olarak %85 ve %90 olduğunu, bu sonuçların sıcak havayla kurutmadan elde edilen sonuçlara göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Özgül enerji tüketimi kalınlıkla birlikte arttığını ve termal kurutmaya kıyasla çok düşük olduğunu belirlemişlerdir. EHD yöntemiyle kurutulmuş meyve dilimlerinin, termal kurutmaya göre daha iyi görsel kaliteye sahip olduklarını gözlemlemişlerdir. EHD'nin düşük enerji tüketimi gerektirmesi ve daha kaliteli ürün sağlaması nedeniyle ince meyve dilimlerinin kurutulmasında etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Xiao ve Ding (2022) çalışmalarında EHD kurutma sisteminin, shiitake mantarlarının kurutma kinetiği, mikroyapıları ve besin bileşimi değerleri üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. Shiitake mantar dilimlerini 0 (control), 18, 22, 26, 30 ve 34 kV'da kurutmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre EHD uygulanan deney grubunun kuruma hızının, efektif difüzyon katsayısının ve büzülmenin kontrol grubuna göre önemli ölçüde yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. 34 kV uygulama grubunun, en yüksek kuruma hızına (0,24 g su/g kurumadde x h) ve efektif difüzyon katsayısına (1,01 x 10^{-10} m^2/s) sahip olduğunu belirlemişlerdir. Kontrol grubunun en yüksek rehidrasyon oranına (7,72) sahip olduğunu ve tatmin edici olmayan renk performansı gösterdiğini bulmuşlardır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçlarına göre, EHD ile kurutulan numunelerin yüzeyinin farklı seviyelerde kabuklanma sergilediğini ve artan gerilim ile kabuklanma alanının

arttığını gözlemlemişlerdir. Fourier transform kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizlerine göre, hem EHD ile muamele edilmiş hem de kontrol gruplarının numunelerinin benzer absorpsiyon pik pozisyonlarına sahip olduğunu, ancak EHD ile kurutulmuş örneklerin absorpsiyon pikinin yoğunluğunun daha büyük olduğunu bulmuşlardır. Kontrol grubu ile karşılaştırıldığında, EHD ile kurutulan shiitake mantarı dilimlerinin daha yüksek protein içeriğine ve polisakarit içeriğine sahip olduklarını belirlemişlerdir. 22 kV uygulaması ile polisakkarit içeriği en yüksek değeri (4,67 g/100 g), protein içeriği bakımından ise 26 kV ve 34 kV uygulamaları ile en yüksek değerleri elde etmişledir (17,0 g/100 g).

Li ve ark. (2022) çalışmalarında elma dilimlerini EHD yöntemini kullanarak kurutmuşlardır. Gerilim değerleri ve iğneler arasındaki mesafenin kuruma hızı, efektif difüzyon katsayısı, özgül enerji tüketimi, rehidrasyon oranı değerleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca, elma dilimlerinin kuruma davranışını tanımlamak için genel matematiksel modelleri kullanmışlardır. Çalışmalarında 30, 40 ve 50 kV gerilimler ve iğneler arasındaki mesafeler 5, 6 ve 7 cm olacak şekilde deneme desenini oluşturmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre elma dilimlerinin kuruma hızlarının, efektif difüzyon katsayılarının, rehidrasyon oranlarının ve kurutmanın özgül enerji tüketim değerlerinin artan gerilim değerlerinde arttığını belirlenmişlerdir. Başlangıçta, düşük gerilim değerlerinde EHD kuruma hızının yaklaşık olarak sabit olduğu, ancak yüksek gerilim değerleri koşullarında sabit olmadığı bir dönemin varlığını tespit etmişlerdir. Aynı gerilim değerlerinde, iğneler arası mesafe 6 cm olduğunda kuruma hızının en yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. İğneler arasındaki gerilim değerlerinin ve mesafenin, efektif difüzyon katsayısı ve özgül enerji tüketimi üzerinde önemli ($p<0,05$) bir etkiye sahip olduğunu, ancak rehidrasyon oranı üzerinde etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Midilli ve Küçük modeli ile Logaritmik modeli sırasıyla 0,998803 ve 0,998267 korelasyon katsayıları ile en iyi uyuma sahip modeller olarak tespit etmişlerdir. Elma dilimlerinin nem oranı için gerilim değerleri ve iğneler arasındaki mesafeye dayalı tahmin fonksiyonları kurmuşlar ve doğrulamışlardır. Logaritmik modelin, EHD yöntemi kullanılarak kurutulan elma dilimlerinin nem oranını daha doğru bir şekilde tahmin edebileceğini belirlemişlerdir.

Nasrabadi ve ark. (2023) çalışmalarında iki tür akım elektriği oluşturdukları elektrik alanın ve pin elektrot sayılarının kurutulmuş kabak (*Cucurbita pepo*) dilimlerinin kuruma hızı ve fizyokimyasal indeksleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneylerinde kabak dilimlerini kurutmak için 1, 2 ve 4 pim elektrotlu, 9,5 kV gerilim ve 20 mm'lik bir pim elektrot aralığına sahip sistem kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre 4,75 kV/cm elektrik alan yoğunluğunda kabak dilimlerinin kuruma hızının arttığını belirlemişlerdir. Kuruma hızının, doğal havayla kurutma işleminden 2,66 kat daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, artan sayıda pim elektrot ile kuruma hızının arttığını tespit etmişlerdir. Doğru akımın alternatif akımdan daha yüksek bir efektif difüzyon katsayı değerine sahip olduğunu; ancak alternatif akımın daha düşük enerji tükettiğini belirlemişlerdir. Efektif difüzyon katsayı değerlerini 3,12 x 10^{-10} ve 4,23 x 10^{-10} m^2/s aralığında hesaplamışlardır. İstatistiksel sonuçlar, elektrik alanının rehidrasyon oranı, yüzeysel ve hacimsel büzülme ve kabak dilimlerinin renkleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Kabak diliminin deneysel ve tahmin edilen kurutma kinetiği, maksimum belirtme katsayısı, minumum ki-kare değerleri ve hataların karelerinin karekök ortalaması kullanılarak mevcut deneysel modeller tarafından doğrulandığını tespit etmişlerdir. Verma modelinin kabak dilimlerinin kuruma verilerinin tanımlanması için uygun bir model olduğunu bulmuşlardır.

2.3. Tezde kullanılan ürünler

2.3.1. Sarımsak

Sarımsak *Alliaceae* (Soğangiller) familyasının Allium cinsine dahil bir bitki türüdür. Orta Asya kökenli olduğu bilinen sarımsak mutfak ve tıbbi özellikleri nedeniyle tüm dünyada yüzyıllardır yetiştirilmektedir (Rahman ve Lowe, 2006). FAO'nun verilerine göre dünya genelinde 2021 yılında 28 204 854,32 ton üretilmiştir. Çin 13 956 053,55 ton ile üretimde ilk sırada yer alırken onu Hindistan, Kore ve Mısır takip etmektedir. Türkiye'de ise 2021 yılı üretim miktarı 132 617 ton iken 2022 yılında %5,9'luk artış ile 140 464 ton olarak belirlenmiştir (TÜİK, 2023).

Genel olarak sarımsak ürününün %65'i sudan oluşmaktadır ve kuru ağırlığın büyük kısmı fruktoz içeren karbonhidratları oluşturmaktadır. Bunu protein, lif, kükürt bileşikleri ve serbest amino asitler takip etmektedir. Ayrıca yapılarında yüksek oranda saponinler, fosfor, potasyum, kükürt, çinko, orta düzeyde selenyum, A ve C Vitaminleri ve düşük oranda kalsiyum, magnezyum, sodyum, demir, manganez ve B-kompleks vitaminleri bulunmaktadır. Buna ek olarak, sarımsak yüksek fenolik içeriğine de sahiptir (Rahman ve Lowe, 2006). Sarımsak zengin besin içeriği sayesinde hastalıkların önlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Sarımsağın, insan vücudunu çok çeşitli hastalıklardan koruma kapasitesine sahip iki yüzden fazla kimyasal sağlayabileceği belirtilmiştir. Hücreleri serbest radikal hasarına karşı korumak için etkili bir antioksidan olarak kabul edilmektedir. Bazı kanser türlerini, viral enfeksiyonları, felçleri ve kalp hastalıklarını önlemeye yardımcı olabilmektedir. Ayrıca kan şekerini, kan kolesterolünü ve kan basıncını düşürebilir, kanın pıhtılaşmasını önleyebilir, potansiyel hastalıklarla savaşmak ve sağlığı korumak için bağışıklık sistemini güçlendirebilmektedir (Gebreyohannes ve Gebreyohannes, 2013).

Sarımsak ketçap, mayonez, salata sosları, yemekler ve turşu gibi çeşitli gıda ürünlerinde kullanılmaktadır. Fakat yüksek nem içeriği sebebiyle yarı bozulabilen bir ürün olan sarımsağın mahsulünün yaklaşık %30'u, depolama sırasında solunum ve mikrobiyal bozulma nedeniyle tahrip olmaktadır (Sharma ve Prasad, 2001). Bunun önüne geçebilmek ve sarımsak en hızlı ve uygun şekilde işlenmesi için kurutma yöntemi kullanılmaktadır. Kurutulmuş sarımsak ürünü, yarı-pişirilmiş gıdalar, soslar, hazır çorbalar, sarımsak tozu hapları ve hazır gıdaların bir bileşeni olarak kullanım alanı bulmuştur (Sharma ve Prasad, 2006). Literatürde sarımsak ürünü çeşitli formlarda (bütün, dilim ve püre) farklı kurutma yöntemleri (vakumlu dondurarak kurutma, sıcak hava kurutma, kızılötesi-sıcak hava kurutma, ultrason destekli sıcak hava konvektif kurutma, güneş kurutma, mikrodalga ve kızılötesi kurutma) ile kurutularak kalite parametreleri incelenmiştir (Tao ve ark., 2018; İlter ve ark., 2018; Younis ve ark., 2018; Malakar ve ark., 2021; Feng ve ark., 2021). Tez kapsamında sarımsak örnekleri iki farklı sıcaklık (50 ve 55 °C) ve dört farklı gerilim değeri (15, 20, 25 ve 30 kV) kullanılarak EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemi ile kurutulmuştur.

2.3.2. Armut

Armut, *Rosaceae* familyasında sınıflanan Pyrus cinsine aittir. Orijini Asya bölgesi olan armut genellikle ılıman bölgelerde yetiştirilmektedir (AlJuhaimi ve ark., 2016). FAO'nun 2021 verilerine göre dünya genelinde armut üretim 25 658 713,07 ton olarak raporlanmıştır. Çin bu üretimin 18 875 900 tonluk kısmına sahip olarak en büyük üretici konumundadır. Türkiye ise 530 349 tonluk üretim ile Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Arjantin'den sonra dördüncü sırada bulunmaktadır (FAO, 2023). Dünya genelinde 5000'in üzerinde, Türkiye'de ise 640 adet armut çeşidinin bulunduğu belirtilmektedir (Özaydın ve Özçelik, 2014). Türkiye'de yetiştirilen armutlardan bir tanesi de tez kapsamında kullanılan Ankara armududur. Bu çeşit Türkiye'deki armut üretiminin %17'lik kısmını oluşturmaktadır. Armut, orta irilikte (150-200 g), kısa ve kalın saplı, ince kabuklu, pürüzsüz yüzeyli ve sulu meyve olarak tanımlanmaktadır (Özaydın ve Özçelik, 2014; Öztekin ve Sacilik, 2020).

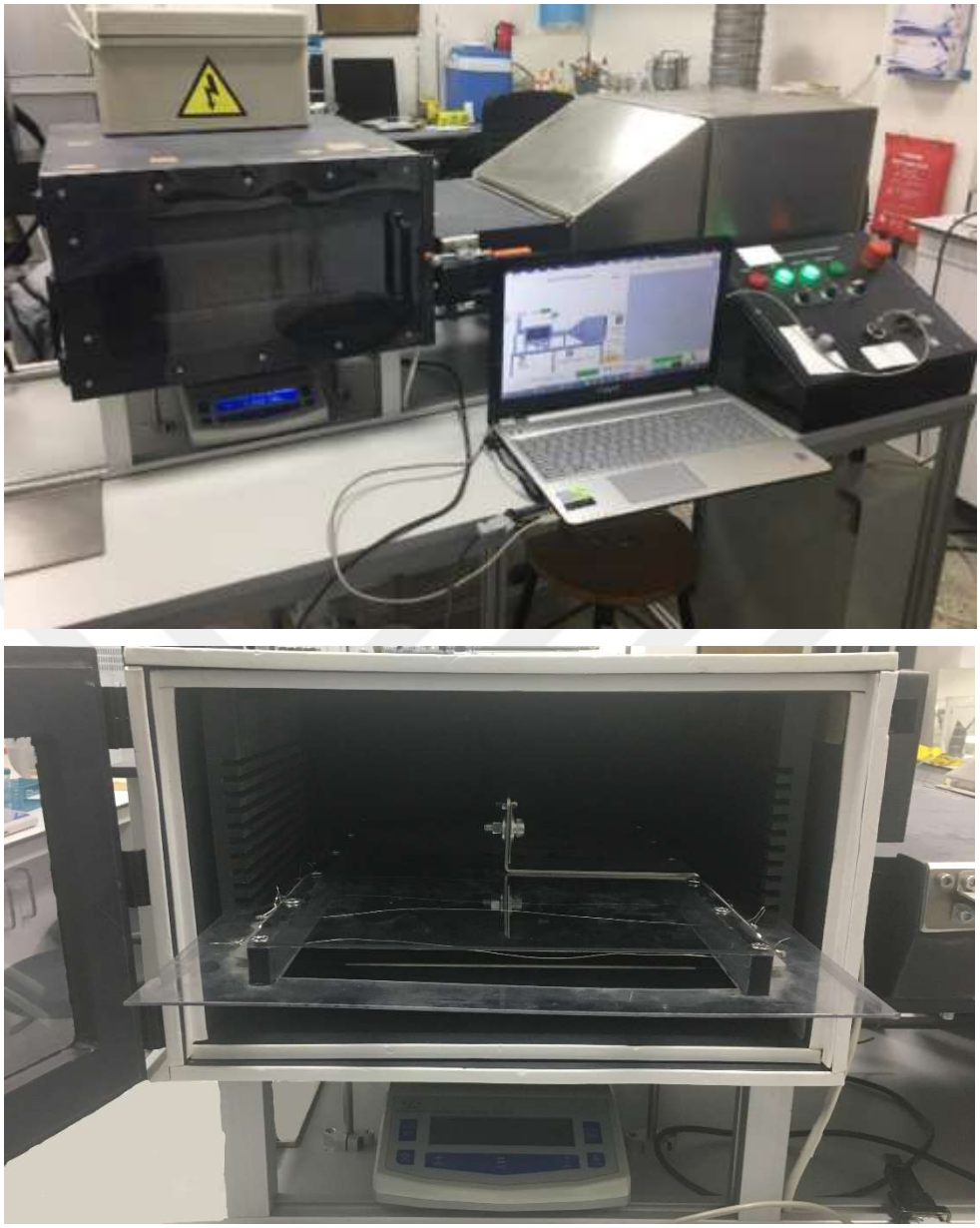
Armut meyvesi içerdiği şeker, organik asit, fenol (kafeik, klorojenik, , arbutin, p-kumaroil kinik ve p-kumarik asitler ve bir dizi prosiyanidin ve flavonol glikozitler), diyet lifi, vitamin (C, B6) ve mineraller (Magnezyum, Potasyum, Fosfor, Demir) ile beslenmede önemli bir yeri bulunmaktadır. Sahip oldukları zengin içerikler ile düzenli tüketildiklerinde yüksek tansiyon, kanser ve kalp damar hastalıklarının tedavisinde iyileştirici rol oynayabileceği belirtilmektedir (Santos ve ark., 2014; Özaydın ve Özçelik, 2016; İzli, 2018). Armut ürünleri taze olarak tüketildiği gibi kurutularak, konservelerde, yoğurtlarda ve nektarlarda kullanılmak üzere püre şeklinde de değerlendirilmektedir. Kurutulmuş armut örnekleri kompostolarda, unlu mamullerde ve soslarda kullanılabilmektedir. Literatürde armut çeşitlerinin kullanıldığı kurutma çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalarda farklı yöntemler (güneş, sıcak hava, mikrodalga, ısı pompası, osmotik, vakum-mikrodalga) kullanılarak armut meyvesinin farklı çeşitlerinin kurutma kinetikleri ve kalite parametreleri incelenmiştir. Tez çalışmasında armutlar sabit sıcaklık (60 °C) altında, 2 farklı hava hızı (1,5 ve 2,5 m/s) ve dört farklı gerilim değeri (15, 20, 25 ve 30 kV) kullanılarak EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemi ile kurutulmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışmasında kapsamında kurutulmak üzere sarımsak (*Allium sativum* L.) ve armut (*Pyrus communis* L. cv. 'Ankara') örnekleri kullanılmıştır. Ürünler Bursa ilinde yerel bir marketten alınmıştır. Sarımsak örnekleri deneyler tamamlanana kadar vakum poşet içinde ve oda sıcaklığında (25 °C) muhafaza edilmiştir. Armut örnekleri ise vakum poşet içinde ve buzdolabında (4 ± 0,5 °C) korunmuştur.

Doktora tez deneylerinin gerçekleştirileceği elektrohidrodinamik-sıcak hava kurutma fırını ilk olarak bilgisayar programında (SolidWorks 2017) tasarlanmıştır. Tasarım tamamlandıktan sonra fırın için kullanılacak malzeme temini gerçekleştirilmiştir. Ardından fırının imalat aşamalarına geçilmiştir. Kurutma işlemlerinin gerçekleştirildiği EHD-sıcak hava kurutma sisteminin son hali Şekil 3.1'te verilmiştir. EHD kurutma ana kontrol düzeneğinde EHD sistemi, fan ve rezistans denetimleri yapılmaktadır. EHD sisteminde 10, 15, 20, 25 ve 30 kV'lık yüksek gerilim seviyeleri uygulanabilmektedir.



Şekil 3.1. EHD-sıcak hava kurutma sistemi

Ana kontrol ve terazi sistemleri bilgisayarda kurulan program ile kontrol edilmektedir (Şekil 3.2). Arayüzde,

‘Sıcaklık : 0’ : Fırın içi sıcaklığı gözlenmektedir.

Dikdörtgen bölge : Rengin kırmızı olması halinde EHD sisteminin çalışmadığını, yeşil olması halinde ise sistemin sorunsuz çalıştığını göstermektedir.

‘Ağırlık: 0 ‘ : Ürün ağırlığındaki değişiklikler takip edilmektedir.

‘İstenilen sıcaklık: 35 °C’ : Deney için belirlenen kurutma sıcaklığını göstermektedir.

‘Hava Hızı’ : Sistemin hava hızı gözlenmektedir.

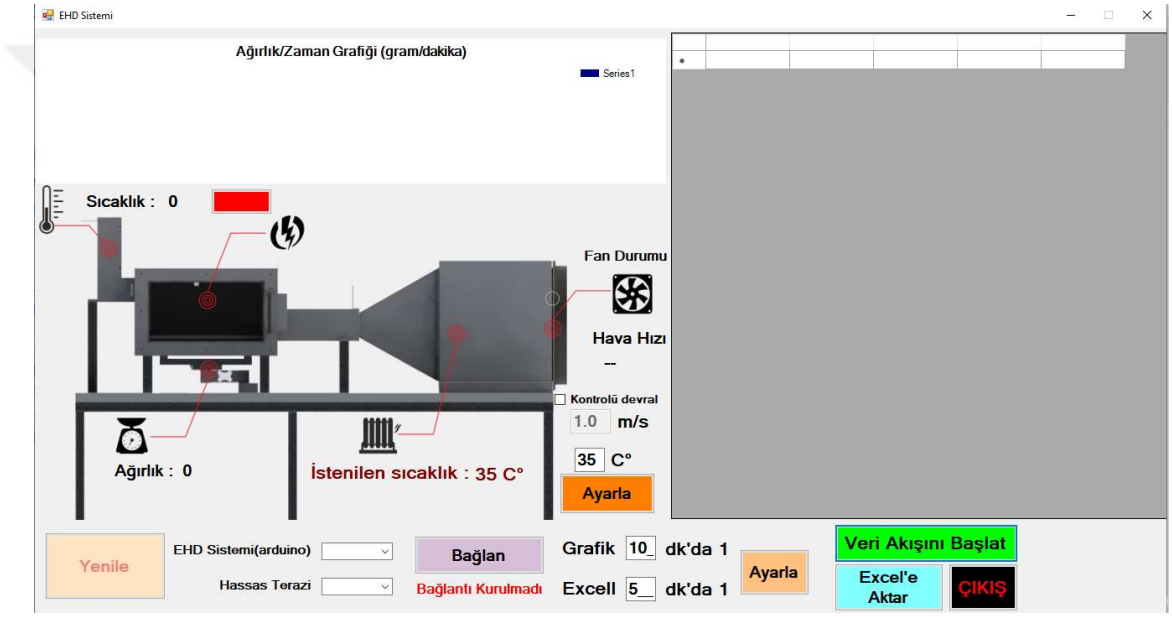
‘Kontrolü devral’ : Bu kutucuğa basıldığında sistem için istenen hava hızı ayarlanabilmektedir.

‘Ayarla’ : Üst kısımdaki kutucuğa deneyde istenen sıcaklık girilip ve ayarla tuşuna basılarak sıcaklık değerleri kontrol edilmektedir.

‘Grafik’ ve ‘Excel’ : Kutucuklar doldurularak grafik ve Excel dosyası oluşturulma aralığı ayarlanmaktadır.

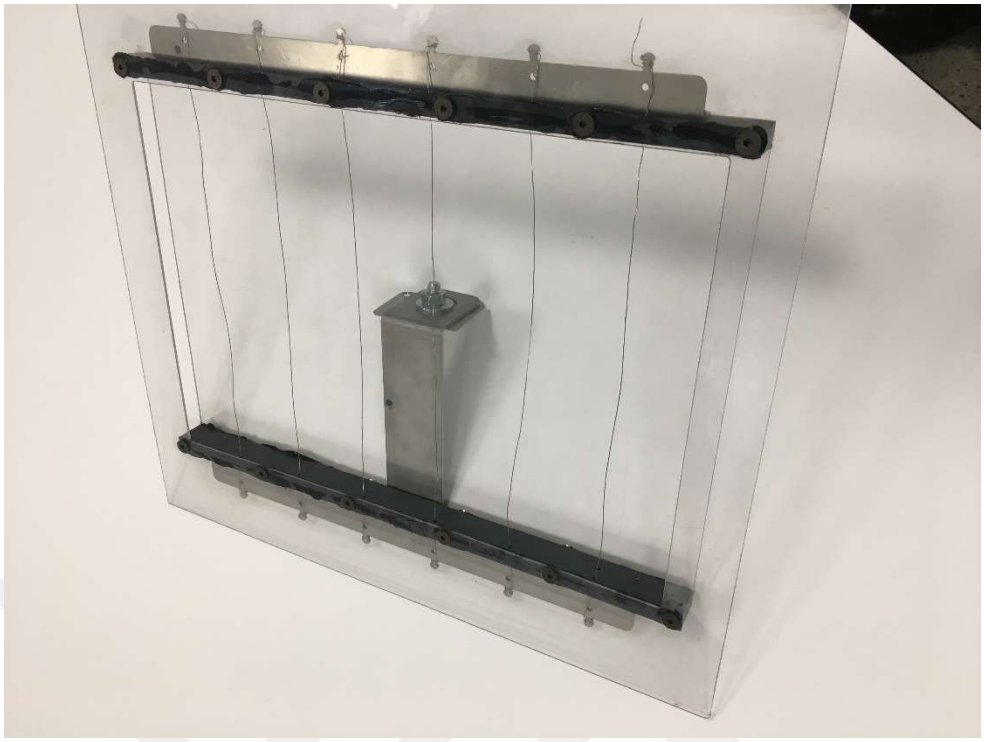
‘Veri Akışını Başlat’ : Bu kısım aktif hale getirildiğinde, program veri alımına başlamaktadır.

‘Excel’e aktar’ : Bu buton tıklandığında veriler Excel dosyanına aktarılmaktadır.



Şekil 3.2. EHD-sıcak hava kurutma sistemi kontrol arayüzü

Şekil 3.3’te EHD-tel sistemi gösterilmiştir. EHD-tel sisteminde 6 adet tel kullanılmış ve teller arası 50 mm mesafe bırakılmıştır. Tel çapları 0,4 mm olarak ölçülmüştür (Dinani ve ark., 2014).



Şekil 3.3. EHD tel sistemi

Taze ve kurutulmuş sarımsak ve armut örneklerinin renk değişimlerinin belirlendiği renk ölçer (HunterLab, ABD) cihazı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Renk ölçer cihazı

Deneyler sırasında harcanan enerji Şekil 3.5'te gösterilen dijital güç ölçer (EU TS-836A; Floureon, China) yardımı ile belirlenmiştir.



Şekil 3.5. Güç ölçer cihazı

Kurutulan sarımsak ve armut örneklerinin mikroyapı değişimleri Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM, ZEISS EVO 40, Germany) ile gözlenmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.2. Yöntem

Bu bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen deneyler detaylı olarak anlatılmıştır.

3.2.1. Kurutma deneyleri

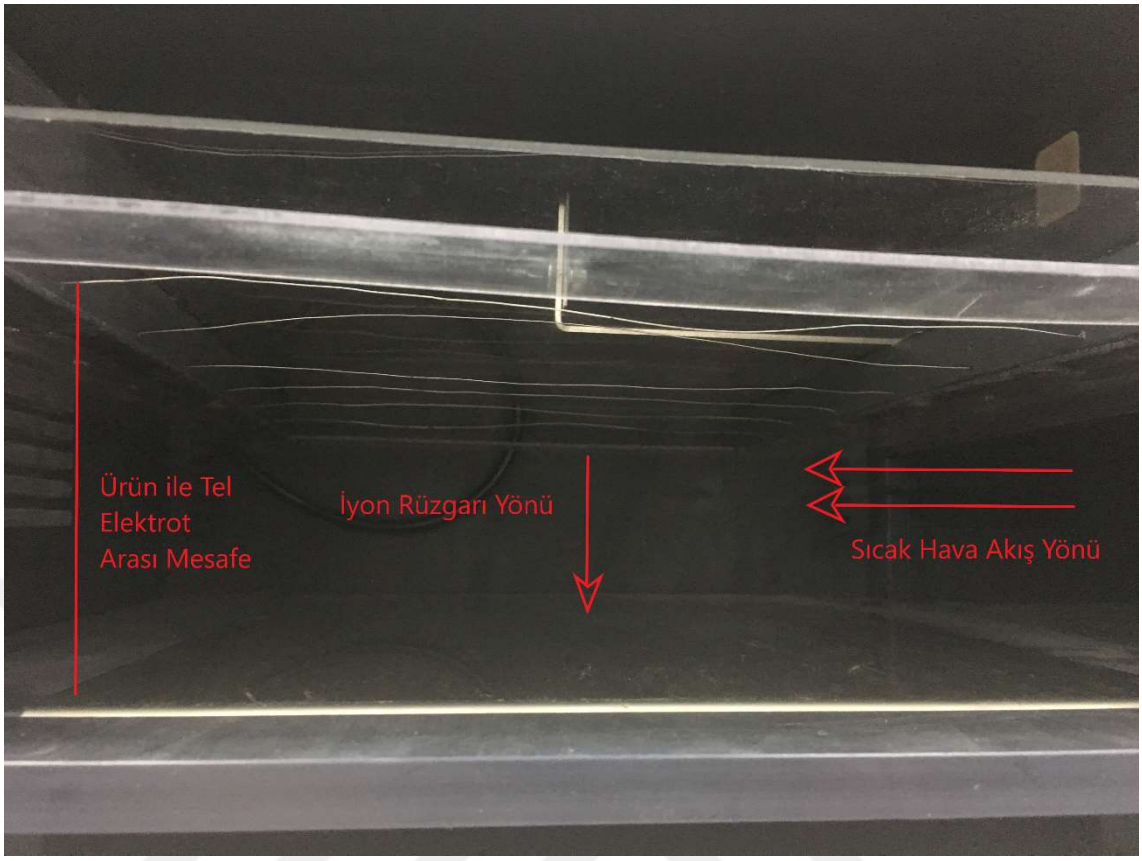
Deneylerde olgun, fiziksel ve mikrobiyal açıdan zarar görmemiş sarımsak ve armut örnekleri kullanılmıştır. Sarımsak örnekleri oda sıcaklığında muhafaza edildiğinden doğrudan kurutma işlemine tabi tutulurken, armut örnekleri ise buzdolabından çıkarılıp oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Sarımsak tanelerinin dış kabuk kısmı çıkarılarak özel bir dilimleyici (Nicer Dicer, Almanya) ile ortalama 2,757 ± 0,20 kalınlıkta kesilmiştir. Kurutma işlemi için 35±0,01 g örnek sarımsak örneği kullanılmıştır. Armut örnekleri ise soyulduktan sonra küp (11,604 x 11,675 x 3,929 mm) haline getirilmiştir. Deneylerde 100±0,01 g armut örneği kullanılmıştır. Sarımsak ve armut örneklerinin ilk nemi rastgele seçilen numunelerin etüvde (Electromag, Türkiye) 70 °C, 24 saat boyunca kurutulması sonucunda sırasıyla kuru bazda (k.b.) 1,46 ve 5,80 (g su/g kurumadde) olarak bulunmuştur.

Ürünlerin kurutma deneylerinin belirlenmesinde farklı yollar izlenmiştir. Sarımsak örneklerinin kurutma işlemleri 1,5 m/s hava hızı altında iki farklı sıcaklık (55 ve 60 °C) ve dört farklı gerilim değerlerinde (15, 20, 25 ve 30 kV) gerçekleştirilirken, armut örneklerinin kurutulmasında, 2 farklı hava hızı (1,5 ve 2,5 m/s) tek sıcaklık (60 °C) ve dört farklı gerilim değeri (15, 20, 25 ve 30 kV) kullanılmıştır. Ürünlerin kurutulmasında uygulanacak deneyler ve ortam koşulları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Ürünlerin kurutulmasında uygulanan deneyler

Ürün	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Gerilim değeri (kV)	Hava hızı (m/s)	Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortam Nemi (%)
Sarımsak	55	15	1,5	25,5 ± 0,1	30 ± 1
	55	20	1,5	25,5 ± 0,1	30 ± 1
	55	25	1,5	25,5 ± 0,1	30 ± 1
	55	30	1,5	25,5 ± 0,1	30 ± 1
	60	15	1,5	25,5 ± 0,1	30 ± 1
	60	20	1,5	25,5 ± 0,1	30 ± 1
	60	25	1,5	25,5 ± 0,1	30 ± 1
	60	30	1,5	25,5 ± 0,1	30 ± 1
Armut	60	15	1,5	26 ± 0,1	28 ± 1
	60	20	1,5	26 ± 0,1	28 ± 1
	60	25	1,5	26 ± 0,1	28 ± 1
	60	30	1,5	26 ± 0,1	28 ± 1
	60	15	2,5	26 ± 0,1	28 ± 1
	60	20	2,5	26 ± 0,1	28 ± 1
	60	25	2,5	26 ± 0,1	28 ± 1
	60	30	2,5	26 ± 0,1	28 ± 1

Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere sarımsak örneklerinde farklı gerilim ve farklı sıcaklığın, armut örnekleri için ise farklı hava hızı ve farklı gerilim değerlerinin kuruma üzerine etkileri incelenmiştir. Her iki ürün de paslanmaz çelik tepsi (26,5 x 34,5 cm) üzerine yerleştirilerek son nem içeriği 0,1 (k.b.) olana kadar kurutulmuştur. EHD tel sistemi ile sıcak hava akış yönü birbirine çapraz olacak şekilde konumlandırılmıştır. Ürünler ile EHD sistem arasında 30 mm boşluk bırakılmıştır. Ürünlerin kurutma sırasında nem değişimleri fırının altında bulunan 0,01 g hassasiyetindeki terazi ile 20 dakika aralıklarla belirlenmiştir. Şekil 3.7'de EHD-sıcak hava kurutma sisteminin içyapısı ve deney koşulları görsel olarak verilmiştir.



Şekil 3.7. EHD-sıcak hava kurutma sisteminin içyapısı

3.2.2. Nem içeriğinin belirlenmesi

Sarımsak ve armut örneklerinin EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemiyle kurutulması çalışmasının modellenmesi için öncelikle kuruma eğrilerinin oluşturulması ve nem oranı değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kuruma eğrilerinin oluşturulması için gereken ürünlerin anlık nem içeriği aşağıda verilen eşitlik (3.1) ile hesaplanmıştır (Dadalı, 2007):

$$M_t = \frac{m - KM}{KM} \tag{3.1}$$

Burada M_t, m ve KM sırayla herhangi bir t anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde), numunenin ağırlığı (g) ve numunenin içerdiği kuru madde miktarı (g) olarak tanımlanmıştır.

3.2.3. Nem oranının belirlenmesi

Modelleme çalışmalarında kullanılan nem oranının belirlenmesinde aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \tag{3.2}$$

Burada,

MR: Nem oranı (birimsiz),

M_t : Ürünün herhangi bir t anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde),

M_0: Ürünün kurutulmaya başlamadan önceki nem içeriği (g su/g kuru madde),

M_e: Denge anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde) olarak tanımlanmıştır.

M_e değeri higrometre veya kurutma sırasında ölçülen yaş ve kuru termometre sıcaklıkları ile psikrometrik diyagramdan elde edilebilmektedir. M_e değerleri, M_t ve M_0 ile karşılaştırıldığında nispeten küçüktür, bu nedenle M_e değeri ihmal edilerek *MR* formülü aşağıdaki gibi sadeleştirilmiştir (Calin-Sanchez ve ark., 2014):

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \tag{3.3}$$

3.2.4. Kuruma eğrilerinin matematiksel modellenmesi

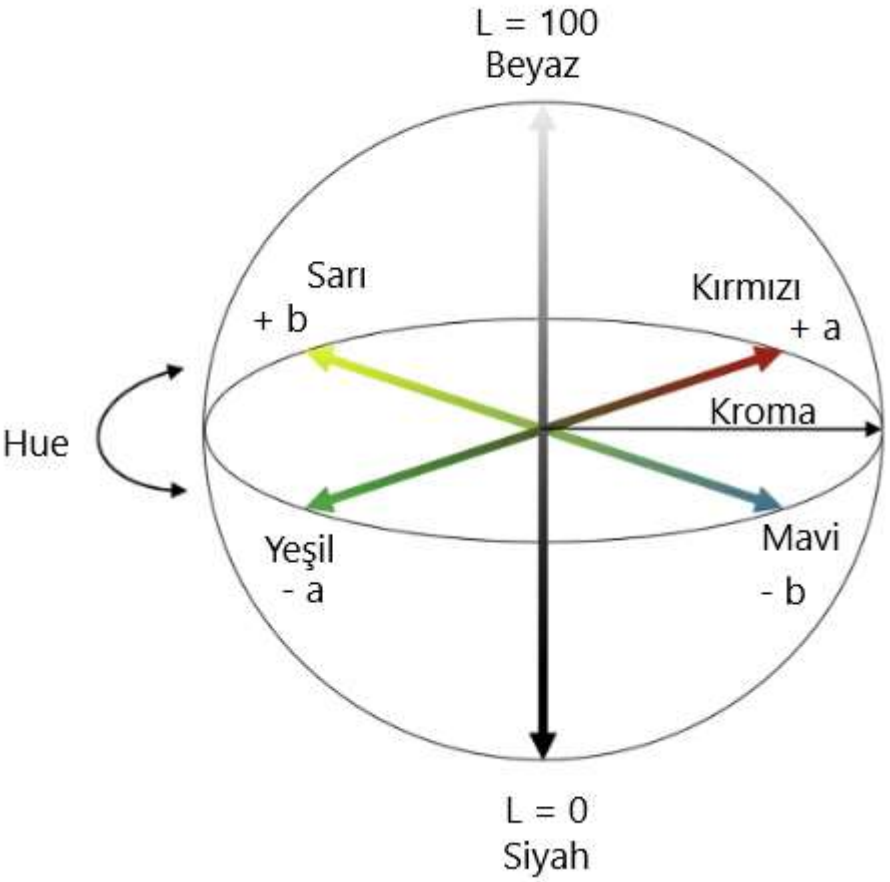
Farklı kurutma koşullarında kurutulan sarımsak ve armut örneklerinin kuruma eğrilerinin modellenmesi çalışmasında literatürde yaygın olarak kullanılan on farklı ince tabaka kurutma modeli Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. İnce tabaka kurutma modelleri

No	Model adı	Model	Referans
1	Henderson ve Pabis	$MR = a\exp(-kt)$	Caliskan ve Dirim (2017)
2	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Pirnazari ve ark. (2016)
3	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Sacilik ve Unal (2005)
4	Logaritmik	$MR = a\exp(-kt) + c$	Mota ve ark. (2010)
5	İki Terimli	$MR = a\exp(-k_0 t) + b\exp(-k_1 t)$	Bhattacharya ve ark. (2015)
6	İki Terimli Eksponansiyel	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	Ergün ve ark. (2016)
7	Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Belghith ve ark. (2016)
8	Difüzyon Yaklaşım	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	Perea-Flores ve ark. (2012)
9	Verma ve ark.	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	Taşkın ve ark. (2018)
10	Midilli ve ark.	$MR = a\exp(-kt^n) + bt$	Midilli ve ark. (2002)

3.2.5. Renk parametrelerinin belirlenmesi ve hesaplanması

Taze ve kurutulan sarımsak ve armut örneklerinin yüzey renk değerlerinin ölçümü bir renk ölçer cihazı ile ölçülmüştür. Renkler okumaları, renklerin üç eksen üzerindeki nicel ilişkisini temsil edildiği CIELAB veya CIE L^* a^* b^* renk sistemine göre yapılmıştır. CIELAB renk uzayı diyagramı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. CIELAB renk uzayı diyagramı (Ly ve ark., 2020)

Diyagramda görüldüğü gibi; L^* parlaklığını temsil ederken a^* ve b^* değerleri kromatiklik koordinatları olarak tanımlanmıştır. L^*, a^* ve b^* sırasıyla parlaklık (0 = siyah and 100 = beyaz), yeşil (-) / kırmızı (+) and mavi (-) / sarı (+) temsil etmektedir (Ly ve ark., 2020). Renk okumalarından önce renk ölçüm cihazı siyah ve beyaz plakalar kullanılarak kalibre edilmiştir. Renk okumaları her bir uygulama için 10 defa gerçekleştirilmiştir. Cihazdan okunan L^*, a^* ve b^* değerleri aşağıda verilen formüllerde kullanılarak insan gözünün ayırt edebileceği renk parametreleri olan kroma (C, renk doygunluğu) ve hue açısı ($\alpha°$, 0° veya 360°=kırmızı, 270°= mavi, 180°= yeşil ve 90°= sarı) değerleri elde edilmiştir (Udomkun ve ark., 2017):

$$C = \sqrt{(a^2 + b^2)} \tag{3.4}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(\frac{b}{a}) \quad (3.5)$$

3.2.6. Rehidrasyon kapasitesinin belirlenmesi

Kurutulmuş sarımsak ve armut örneklerinin rehidrasyon kapasitesinin belirlenmesi için kurutulmuş ürünler, hassasiyeti 0.01 g olan bir dijital terazi ile tartılmış ve daha sonra katı sıvı oranı 1:50 olacak şekilde oda sıcaklığındaki damıtılmış su içeren beherlere daldırılarak 14 saat bekletilmiştir. (de Jesus Junqueira ve ark., 2017). Bu süreçten sonra beherdeki su boşaltılarak rehidre edilmiş ürün çıkarılıp üzerindeki fazla su filtre kâğıdı ile uzaklaştırıldıktan sonra tartılmıştır. Her bir kurutma uygulaması için üç tekerrürlü rehidrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kurutulmuş ürün ağırlığı (M_1) ve rehidre edilmiş ürün ağırlığı (M_2) aşağıdaki eşitlikte kullanılarak rehidrasyon kapasitesi hesaplanmıştır (İsmail ve ark., 2017).

$$Rehidrasyon\ kapasitesi\ (\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} x100 \quad (3.6)$$

3.2.7. Örneklerin mikroyapılarının incelenmesi

Kurutulmuş sarımsak ve armut örneklerinin rastgele bir örnek şeçilmiş ve her zaman aynı yönde olmak kaydıyla neşter ile enine kesitleri alınmıştır. Ardından örnekler çift yapışkanlı iletken bantlarla bir numune tutucuya yerleştirilmiş ve üzeri argon varlığında altın/paladyum (60/40) karışımı ile kaplanmıştır. Hazırlanan numunelerin mikroyapı görüntüleri 20 kV hızlanma geriliminde alınmıştır (Ju ve ark., 2020).

3.2.8. Enerji değerlerinin belirlenmesi ve hesaplanması

Örneklerin EHD-sıcak kombinasyon yöntemi ile kurutulmasında kullanılan kurutucunun kurutma sırasındaki enerji tüketim değerleri tasarlanan fırına bağlı olan dijital güç ölçer ile ölçülmüştür. Her bir yöntem için enerji tüketimleri ekrandan okunup kaydedilmiştir (Nozad ve ark., 2016). Tasarlanan kurutucunun verimliliğini belirlemek için özgül nem

uzaklaştırma hızı (*SMER*), nem uzaklaştırma hızı (*MER*) ve Özgül Enerji Tüketimi (*ÖET*) değerlerinin hesaplamaları aşağıdaki formüllere göre yapılmıştır (Altay ve ark., 2019).

$$SMER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi (kg)}}{\text{Toplam enerji tüketimi (kWh)}} \tag{3.7}$$

$$MER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi (kg)}}{\text{Kuruma zamanı (h)}} \tag{3.8}$$

$$\text{Ö}ET = \frac{\text{Sisteme giren toplam enerji (kWh)}}{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi (kg)}} \tag{3.9}$$

3.2.9. İstatistiksel değerlendirmeler

Renk ve rehidrasyon deneylerinin sonuçlarının analizini yapmak için JMP (Sürüm 7.0, SAS Institute Inc., Cary, NC, ABD) programı kullanılmıştır. Ortalama farkların hesaplanması ve anlamlılığı ölçmek için LSD (en küçük önemli fark) testinin uygulanması %5 anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan regresyon analizi, matematiksel modelleri tanımlamak için MATLAB (MathWorks Inc., Natick, MA) programı kullanılmıştır. Örneklerin kuruma davranışlarını açıklayan en iyi modelin belirlenmesinde belirtme katsayısı (R^2), ki-kare (χ^2) ve hataların karelerinin karekök ortalaması (*RMSE*) değerleri istatistiksel parametreler olarak kullanılmıştır. Ki-kare (χ^2) ve hataların karelerinin karekök ortalaması (*RMSE*) değerleri aşağıdaki formüllerle belirlenmiştir (Gull ve ark., 2017).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{t,i} - MR_{d,i})^2}{N}} \tag{3.10}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{d,i} - MR_{t,i})^2}{N - n} \tag{3.11}$$

Formülde bulunan;

$MR_{t,i}$: Tahmini nem oranını,

$MR_{d,i}$: Deneysel nem oranını,

N: Gözlemlenen deneysel veri sayısını,

n: Modeldeki bağımsız değişkenlerin sayısını ifade etmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde deney sonuçları incelenmiştir.

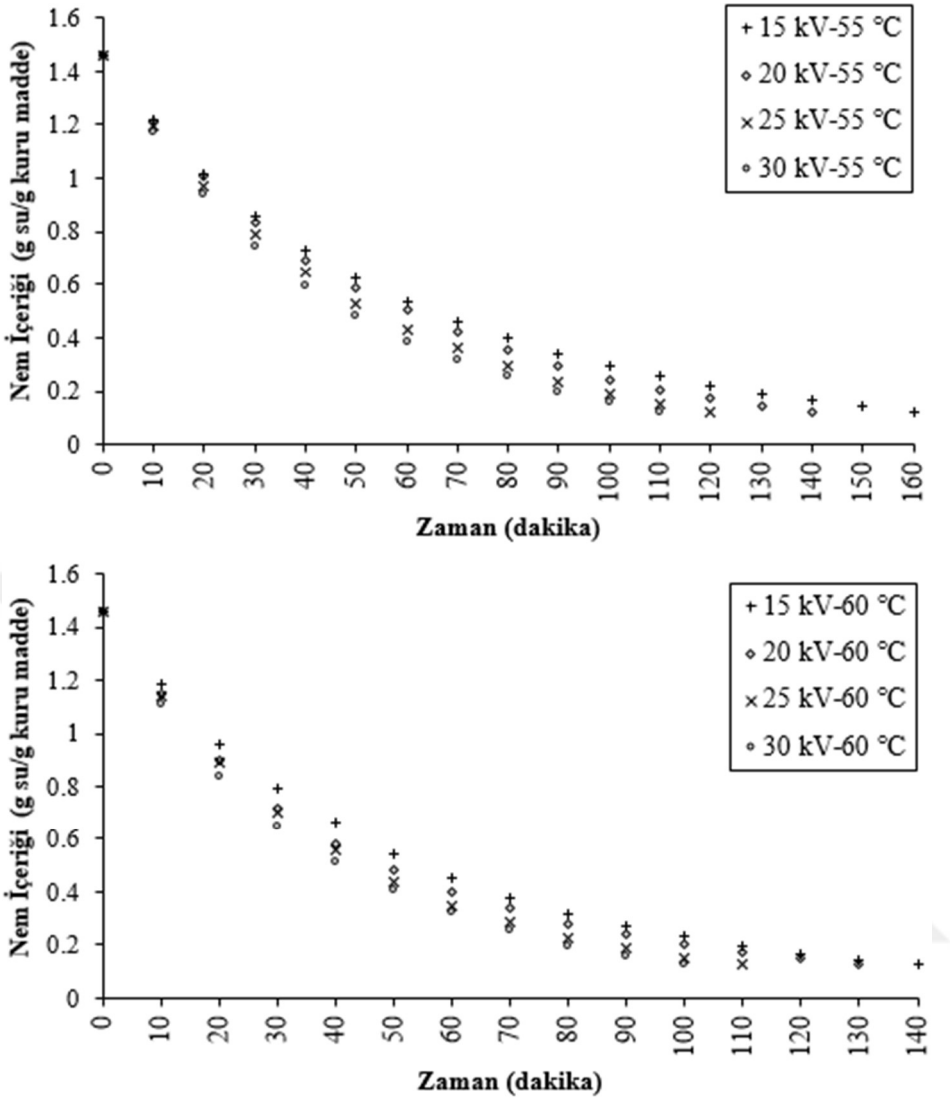
4.1. Sarımsak Örneklerinin Kurutulması

Bu bölümde sarımsak örneklerinin farklı sıcaklık ve gerilim değerleri kullanılarak EHD-sıcak hava kombinasyonu yöntemiyle kurutulması ile ilgili sonuçlara yer verilmiştir.

4.1.1. Sarımsak örneklerinin nem içeriklerinin değişimleri

Farklı hava sıcaklıkları (55 ve 60 °C) ve gerilim değerleri (15, 20, 25 ve 30 kV) ile kurutulan sarımsak dilimlerinin nem içeriği değerlerinin zamanla değişimleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Sarımsak örneklerinin nem içeriği değerlerinin kuruma sürelerinin artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir. Sarımsak örneklerinin kurutulmasında sabit bir kuruma hızı periyodu olmadığı ve tüm kuruma sürecinin azalan hız periyodunda gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu durum difüzyonun sarımsak dilimlerinin yüzeylerine nem hareketini yöneten baskın fiziksel mekanizması olduğunu göstermektedir (Xiao ve ark., 2010). Sabit hava hızı (1,5 m/s) ve 55 °C sıcak havanın kullanıldığı kurutma uygulamalarında 15, 20, 25 ve 30 kV gerilim altında sarımsak örnekleri için kuruma süreleri sırasıyla 160, 140, 120 ve 110 dakika olarak bulunmuştur. Ayrıca sabit hava hızı (1,5 m/s) ve 60 °C sıcak havanın kullanıldığı deneylerde ise sarımsak örneklerinin kuruma süreleri 15, 20, 25 ve 30 kV uygulamaları için sırasıyla 140, 130, 120 ve 100 dakika olarak belirlenmiştir. Sıcaklık değerinin 60 °C ve gerilim değerinin 20, 25 ve 30 kV olduğu uygulamalarda kuruma sürelerinin 60 °C sıcaklık değeri ve 15 kV gerilim uygulamasına göre sırasıyla 20, 30 ve 40 dakika daha kısa sürdükleri tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, gerilim seviyelerinin artması ile ürünlerin kuruma sürelerinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, gerilim değerinin artması ile EHD yönteminin temelinde yer alan elektrik alan şiddetinin ve korona rüzgar gücünün arttığı tespit edilmiştir. Hızlanan korona rüzgarı akışı sarımsak dilimlerine daha yüksek ivme ile çarparak sınır tabakanın bozulmasına yol açmış ve bu durum suyun buharlaşma hızının artmasına neden olmuştur (Dinani ve Havet, 2015b). Elmizadeh ve ark. (2017)

ayva kurutma çalışmalarında, uyguladıkları gerilim değerlerinin artması ile ayva dilimlerinin kuruma sürelerinin azaldığını bulmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlar bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, örnekler 15 kV-55 °C kurutma uygulaması ile 160 dakikada istenilen nem içeriği değerlerine düşerken, 15 kV-60 °C kurutma uygulamasında istenilen nem içeriği değerlerine gelmesi için 140 dakika gerekmiştir. Aynı gerilim değerindeki kurutma uygulamalarında sıcaklığın artması ile örneklerin kuruma süreleri azalmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına benzer olarak, havuç, cape bektaşi üzümü ve domates örneklerinin kurutulmaları çalışmalarında kurutma sıcaklıklarının artışı ile ürünlerin kuruma sürelerinin azaldığı belirlenmiştir (Demiray ve Tülek, 2012; Vega-Gálvez ve ark., 2015; Doymaz, 2017).



Şekil 4.1. Farklı EHD-sıcak hava kombinasyonlarıyla kurutulan sarımsak örneklerinin nem içeriklerinin zamanla değişimi

4.1.2. Sarımsak örneklerinin kuruma eğrilerinin modellenmesi

Tarımsal ürünlerin kurutulmasında matematiksel modelleme, kurutma işleminin davranışını tahmin etmek için matematiksel denklemlerin kullanılmasıdır. Farklı sıcaklık ve gerilim değerlerinde kurutulan sarımsak örneklerinin nem oranı değerlerinin kuruma zamanları ile değişimi Çizelge 3.2'de verilen ve literatürde yaygın olarak kullanılan 10 farklı ince tabaka kurutma modelleri ile incelenmiştir. En iyi modelin seçilmesinde en düşük *RMSE* ve χ^2 değerleri ile en yüksek R^2 değerleri kriter olarak alınmıştır.

Hesaplamaların sonucunda elde edilen kurutma katsayıları ve istatistiksel parametreler Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, 25 kV-55 °C ve 30 kV-55 °C kurtma koşullarında kurutulan örnekler için en iyi istatiksel parametre değerlerinin elde edildiği modelin Newton modeli olduğu tespit edilmiştir. Bu modele göre 25 kV-55 °C uygulamasıyla kurutulan sarımsak örnekleri için R^2=0,9998, *RMSE*=0,0046 ve χ^2=0,1153 x 10^{-4} değerleri elde edilirken, 30 kV-55 °C uygulaması için R^2=0,9998, *RMSE*=0,0042 ve χ^2=0,0998 x 10^{-4} değerleri elde edilmiştir. Difüzyon Yaklaşımı modelinin ise 15 kV-55 °C ve 20 kV-55 °C uygulamaları kurutulan sarımsak örneklerinden elde edilen nem oranı değerlerini yeterli düzeyde açıklayan en uygun model olduğu bulunmuştur. Difüzyon Yaklaşımı modeline göre 15 kV-55 °C uygulamasıyla kurutulan sarımsak örnekleri için R^2=0,9999, *RMSE*=0,0031 ve χ^2=0,0347 x 10^{-4} değerleri elde edilirken, 20 kV-55 °C ise uygulaması için R^2=0,9999, *RMSE*=0,0029 ve χ^2=0,1414 x 10^{-4} değerleri elde edilmiştir. Verma ve ark. modeli, sıcaklık değerinin 60 °C olduğu tüm gerilim değerlerindeki kurutma uygulamalarında nem oranı değerlerinin zamana göre değişimini en iyi derecede tanımlamıştır. Bu modelden elde edilen R^2, *RMSE* ve χ^2 değerleri sırasıyla 0,9999-0,9998, 0,0020-0,0041 ve 0,0296 x 10^{-4}-0,1513 x 10^{-4} arasında değiştiği belirlenmiştir.

Şekil 4.2'de deneysel ve en uygun modellerden (Difüzyon Yaklaşımı, Newton ve Verma ve ark.) elde edilen tahmini değerlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Difüzyon Yaklaşımı modelinin 15 kV-55 °C ve 20 kV-55 °C uygulamaları, Newton modelinin ise 25 kV-55 °C ve 30 kV-55 °C uygulamaları ile kurutulan sarımsak örneklerinin kurutma karakteristiklerini tanımlamada uygunluğu gözlenmiştir (Şekil 4.2a). Şekil 4.2b'de ise sıcaklığın 60 °C olduğu tüm gerilim değerlerindeki EHD-sıcak hava kombinasyon kurutma uygulamalarından elde edilen nem oranı değerlerinin zamanla değişiminin Verma ve ark. modeli ile açıklanması gösterilmiştir. Verma ve ark. modelinden elde edilen tahmini sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirine oldukça yakın oldukları gözlenmiştir. Calin-Sanchez ve ark (2014) sarımsak dilimlerini kurutma çalışmalarında 60 °C konvektif kurutmada Verma ve ark. modelinin sarımsak dilimlerinin kurutma kinetiklerini açıklamada en iyi model olduğunu bildirmiştir. Elde ettikleri sonuçların bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu tez

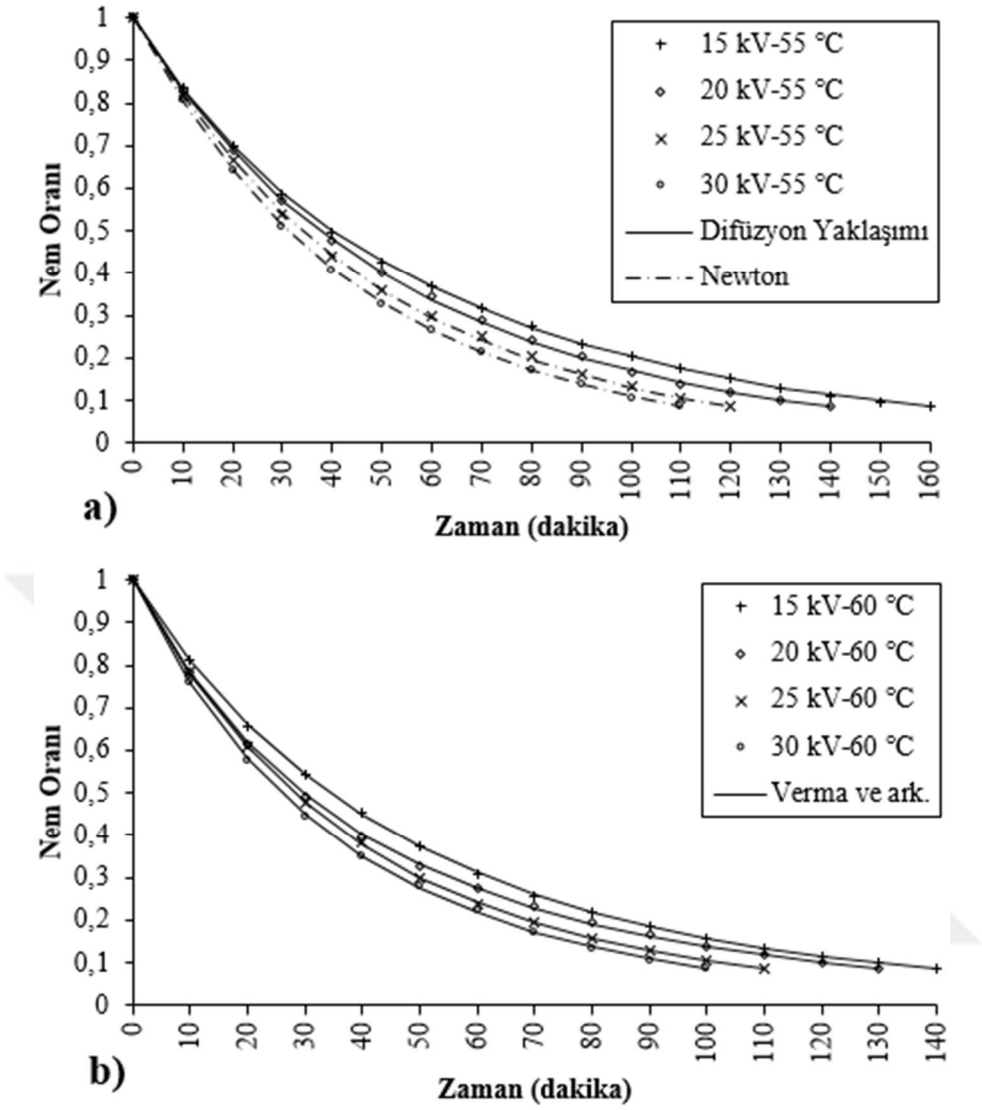
çalışmasına benzer şekilde, Hossain ve ark. (2007) sıcak hava ile kırmızıbiberin kurutulması çalışmalarında ürünün kurutma özelliklerini Newton modelinin en uygun bir şekilde tanımladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca Pirnazari ve ark. (2016) farklı gerilim değerlerinde muz dilimlerini kurutmuşlar ve Difüzyon Yaklaşımı modelinden elde edilen değerlerin deneysel değerlere en iyi uyum sağladığını belirlemişlerdir. Bu tez çalışmasındaki 15 kV-55 °C ve 20 kV-55 °C kurutma uygulamalarında da benzer sonuçlar bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Farklı gerilim değerleri ve 55 °C hava sıcaklığı kullanılarak EHD-sıcak hava kombinasyonu yöntemi ile kurutulan sarımsak dilimleri için uygulanan modellerin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları.

No	15 kV-55 ºC				20 kV-55 ºC				25 kV-55 ºC				30 kV-55 ºC			
	Model Katsayıları	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**
1	a=0,9773 k=0,01603	0,9984	0,0109	1,2600	a=0,9916 k=0,01786	0,9996	0,0056	0,3431	a=0,999 k=0,0203	0,9997	0,0047	0,1247	a=1,001 k=0,02206	0,9990	0,0144	0,2152
2	k=0,01644	0,9977	0,0133	1,7959	k=0,01802	0,9995	0,0062	0,4075	k=0,02032	0,9998	0,0046	0,1153	k=0,02205	0,9998	0,0042	0,0998
3	k=0,02261 n=0,9247	0,9996	0,0062	0,4293	k=0,02061 n=0,9675	0,9997	0,0053	0,4360	k=0,02082 n=0,9939	0,9997	0,0046	0,1175	k=0,02244 n=0,9955	0,9995	0,0143	0,1284
4	a=0,9539 k=0,01775 c=0,03661	0,9996	0,0056	0,3965	a=0,9795 k=0,0187 c=0,01759	0,9998	0,0038	0,2530	a=0,9981 k=0,02037 c=0,001295	0,9997	0,0050	0,1391	a=0,9958 k=0,02243 c=0,006698	0,9991	0,0243	0,1974
5	a=0,8318 k_o=0,01425 b=0,1676 k_1=0,04163	0,9997	0,0052	0,3404	a=0,9147 k_o=0,01689 b=0,08619 k_1=0,04399	0,9994	0,0075	0,4530	a=0,9872 k_o=0,0201 b=0,01422 k_1=0,06975	0,9997	0,0050	0,1406	a=0,6332 k_o=0,01984 b=0,3699 k_1=0,02688	0,9996	0,0137	0,1503
6	a= 0,4626 k=0,0255	0,9998	0,0039	0,1283	a=0,5988 k=0,02232	0,9997	0,0062	0,2228	a=0,7894 k=0,02138	0,9997	0,0047	0,1217	a=0,7503 k=0,02373	0,9992	0,0242	0,4623
7	a=-0,01324 b=0,00004914	0,9828	0,0360	13,9920	a=-0,01456 b=0,00005958	0,9892	0,0294	9,1130	a=-0,01642 b=0,00007583	0,9916	0,0267	7,1218	a=-0,01789 b=0,00009019	0,9922	0,0260	6,7324
8	a=0,165 k=0,04235 b=0,3371	0,9999	0,0031	0,0347	a=0,08974 k=0,04225 b=0,3991	0,9999	0,0029	0,1414	a=0,01189 k=0,06641 b=0,3029	0,9997	0,0048	0,1274	a=0,8939 k=0,02306 b=0,6624	0,9993	0,0222	0,9892
9	a=0,835 k=0,01427 g=0,04235	0,9996	0,0059	0,4368	a=0,9103 k=0,01686 g=0,04225	0,9997	0,0049	0,1828	a=0,9883 k=0,02012 g=0,06723	0,9997	0,0048	0,1281	a=0,1143 k=0,01552 g=0,02311	0,9996	0,0144	0,2352
10	a=1 k=0,02187 n=0,9356 b=0,00004532	0,9997	0,0047	0,1201	a=1,001 k=0,02044 n=0,9711 b=-0,0000222	0,9997	0,0042	0,378	a=1,002 k=0,02173 n=0,9808 b=-0,00005585	0,9997	0,0049	0,1211	a=1,002 k=0,0222 n=1,001 b=-0,00004751	0,9994	0,0204	0,8474

Çizelge 4.2. Farklı gerilim değerleri ve 60 °C hava sıcaklığı kullanılarak EHD-sıcak hava kombinasyonu yöntemi ile kurutulan sarımsak dilimleri için uygulanan modellerin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları.

No	15 kV-60 ºC				20 kV-60 ºC				25 kV-60 ºC				30 kV-60 ºC			
	Model Katsayıları	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**
1	a=0,9795 k=0,01887	0,9979	0,0128	1,4163	a=0,9718 k=0,02089	0,9948	0,0201	4,2093	a=0,9897 k=0,02355	0,9991	0,0090	0,6935	a=0,9875 k=0,02551	0,9989	0,0096	1,0731
2	k=0,0193	0,9974	0,0143	1,8055	k=0,02155	0,9940	0,0218	5,0565	k=0,02381	0,9990	0,0094	0,7455	k=0,02586	0,9988	0,0103	1,2394
3	k=0,02659 n=0,9215	0,9996	0,0051	0,1838	k=0,03416 n=0,8844	0,9990	0,0087	0,6307	k=0,0287 n=0,9517	0,9997	0,0049	0,2016	k=0,0321 n=0,9429	0,9997	0,0048	0,2137
4	a=0,9524 k=0,02129 c=0,04252	0,9995	0,0046	0,1400	a=0,9345 k=0,0251 c=0,0611	0,9994	0,0069	0,6278	a=0,9684 k=0,02559 c=0,03078	0,9996	0,0058	0,2367	a=0,9657 k=0,0277 c=0,03072	0,9993	0,0092	0,8427
5	a=0,4971 k_o=0,02907 b=0,5023 k_1=0,01348	0,9990	0,0072	0,1928	a=0,4511 k_o=0,01301 b=0,5514 k_1=0,03529	0,9993	0,0082	0,7355	a=0,07348 k_o=0,006144 b=0,9264 k_1=0,02647	0,9991	0,0078	0,6337	a=0,7831 k_o=0,02218 b=0,2172 k_1=0,05043	0,9994	0,0083	0,7752
6	a=0,4618 k=0,03	0,9991	0,0069	0,1696	a=0,3638 k=0,04311	0,9997	0,0047	0,1448	a= ,5321 k=0,03248	0,9997	0,0050	0,2379	a=0,5138 k=0,03637	0,9996	0,0075	0,6996
7	a=-0,01544 b=0,00006638	0,9821	0,0375	13,7842	a=-0,01714 b=0,00008145	0,9742	0,0450	22,1482	a=-0,01912 b=0,0001019	0,9876	0,0325	10,5513	a=-0,02079 b=0,0001209	0,9867	0,0341	13,4567
8	a=0,4847 k=0,02943 b=0,4625	0,9992	0,0081	0,1397	a=0,5708 k=0,03435 b=0,3698	0,9996	0,0051	0,1297	a=0,9252 k=0,0265 b=0,236	0,9996	0,0047	0,2197	a=0,2203 k=0,04998 b=0,443	0,9991	0,0084	0,8950
9	a=0,5153 k=0,01361 g=0,02943	0,9999	0,0020	0,0366	a=0,4291 k=0,0127 g=0,03435	0,9998	0,0041	0,1296	a=0,07481 k=0,006256 g=0,0265	0,9999	0,0027	0,0296	a=0,7797 k=0,02214 g=0,04998	0,9999	0,0033	0,1513
10	a=1,001 k=0,02402 n=0,9539 b=0,0001278	0,9994	0,0059	0,0939	a=1,003 k=0,02974 n=0,9333 b=0,0002409	0,9995	0,0060	0,3885	a=1 k=0,02609 n=0,9854 b=0,0001814	0,9997	0,0039	0,1594	a=1 k=0,03082 n=0,9581 b=-0,00009434	0,9997	0,0048	2,0166



Şekil 4.2. Seçilen kurutma koşulları altında deneysel ve Difüzyon Yaklaşımı, Newton ve Verma ve ark. modellerinden elde edilen nem oranı değerlerinin karşılaştırılması

4.1.3. Sarımsak örneklerinin renk analiz sonuçları

Ürünlerin renk özellikleri en önemli kalite parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir (Guiné, 2011). Taze ve farklı sıcaklık ve gerilim değerlerinde kurutulan sarımsak örneklerinin renk değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Taze sarımsak örnekleri için L^*, a^* ve b^* değerleri sırasıyla 75,70±0,18, -1,26±0,02 ve 23,50±0,07 olarak bulunmuştur. Kurutma işlemlerinin etkisi ile L^* değeri azalırken a^* ve b^* değerlerinde artış gözlenmiştir. İlter ve ark. (2018) sarımsak püresi ve Feng ve ark. (2019) sarımsak kurutma çalışmalarında benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Taze ürüne en yakın L^* değeri

15 kV-55 °C uygulamasında kurutulan örneklerde belirlenirken, en düşük *L** değeri ise 30 kV-60 °C uygulamasında kurutulan örneklerde belirlenmiştir. Deneylerde uygulanan sıcaklık ve gerilim değerlerinin artışı ile örneklerin *L** değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan iki sıcaklık (55 ve 60 °C) için gerilim değerinin artması ile (30 kV hariç) sarımsak dilimlerinin *a** değerlerinin arttığı, bu durumun kurutma işleminde örneklerin rengindeki kırmızı oranının arttığının göstergesi olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı durum (*a** değerlerinin artışı) sıcaklığın artmasıyla da gerçekleşmiştir. Aynı gerilim değerlerinde sıcaklığın artması örneklerin *b** değerlerini arttırmıştır. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, kuruma sıcaklıklarının artmasıyla ürünlere ait sarı rengin bozulmasını arttırabileceği ve yüksek sıcaklıkların oksidasyon reaksiyonunu hızlandırabileceği bildirilmiştir (Xiao ve ark., 2014). Ürün renginin donukluğunu veya parlaklığını ifade eden renk parametresi olan Kroma (*C*) değerleri kurutma parametrelerinin etkisiyle 23,54±0,07'den (taze) 33,54±0,08'e (25 kV-60 °C) artmıştır. En yüksek Hue açısı ($\alpha°$) değeri taze üründe (93,03±0,04) belirlenirken, farklı sıcaklık ve gerilim değerlerinde kurutulan sarımsak dilimleri arasında önemli bir farklılık bulunmuş ve değerler 84,51±0,06 ile 77,04±0,06 arasında farklılık göstermiştir ($p<0,05$). Uygulanan sıcaklık artışıyla Hue açısı ($\alpha°$) değerleri düşmüş ve bunun sebebi olarak kurutma işlemi sırasında gerçekleşen esmerleşme reaksiyonu ve klorofil bozulmasının olabileceği bildirilmiştir (Bai ve ark., 2013b). Dinani ve ark. (2015b) mantarın EHD ile kurutulmasında gerilim değeri artışının, Fante ve Noreña (2015) ise sarımsağın sıcak hava ile kurutulması çalışmalarında sıcaklık artışının ürünlerin *L** değerini azalmasına, *a** değerinin ise artmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır. Bu sonuçlar yapılan çalışmanın sonuçları ile paralellik göstermektedir.

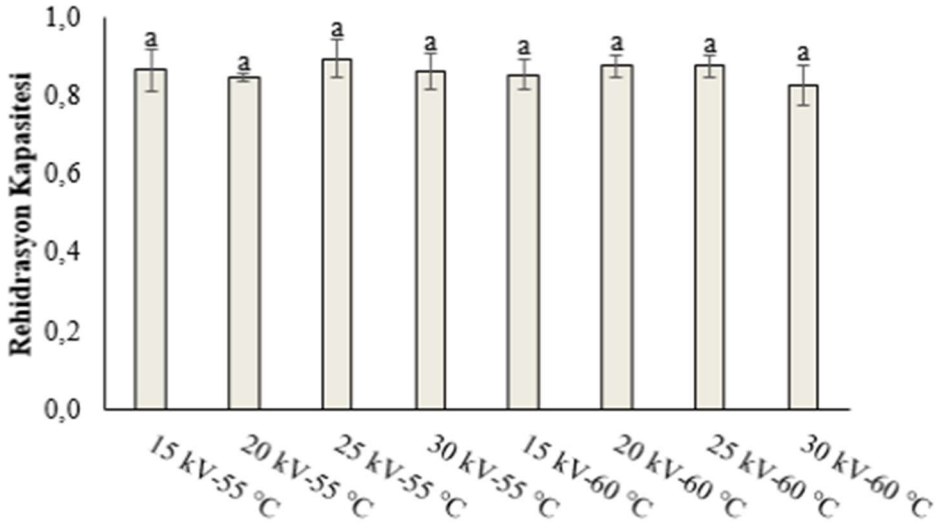
Çizelge 4.3. Taze ve kurutulmuş sarımsak dilimlerinin renk değerleri

Örnek	*L**	*a**	*b**	*C*	$\alpha°$
Taze	75,70±0,18 a	-1,26±0,02 g	23,50± 0,07 i	23,54±0,07 i	93,03 ±0,04 a
15 kV-55 °C	72,62 ±0,18 b	2,86 ±0,02 f	28,26 ±0,05 h	28,40±0,04 h	84,26 ±0,05 c
20 kV-55 °C	71,26 ±0,85 c	3,29 ±0,01 e	29,24 ±0,13 g	29,42±0,13 g	83,62 ±0,03 d
25 kV-55 °C	70,46 ±0,04 d	3,68 ±0,04 d	31,00 ±0,08 d	31,22 ±0,08 d	83,28 ±0,06 e
30 kV-55 °C	66,24 ±0,05 h	2,89 ±0,03 f	29,83 ±0,05 f	29,97 ±0,04 f	84,51±0,06 b
15 kV-60 °C	68,88 ±0,27 e	5,41 ±0,04 c	30,37 ±0,07 e	30,85±0,07 e	79,95±0,06 f
20 kV-60 °C	68,39 ±0,29 f	6,45 ±0,04 b	32,31 ±0,18 b	32,95 ±0,19 b	78,76±0,02 g
25 kV-60 °C	67,67 ±0,50 g	7,26 ±0,04 a	32,75 ±0,08 a	33,54 ±0,08 a	77,55 ±0,04 h
30 kV-60 °C	61,85 ±0,14 i	7,26 ±0,03 a	31,47 ±0,13 c	32,30±0,13 c	77,04 ±0,06 i

Her bir renk parametresi sütunun istatistiği ayrı ayrı uygulanmıştır ve aynı sütunda farklı harfler taşıyan ortalamalar arasındaki farklılıklar önemlidir ($p<0,05$).

4.1.4. Sarımsak örneklerinin rehidrasyon kapasitesi analiz sonuçları

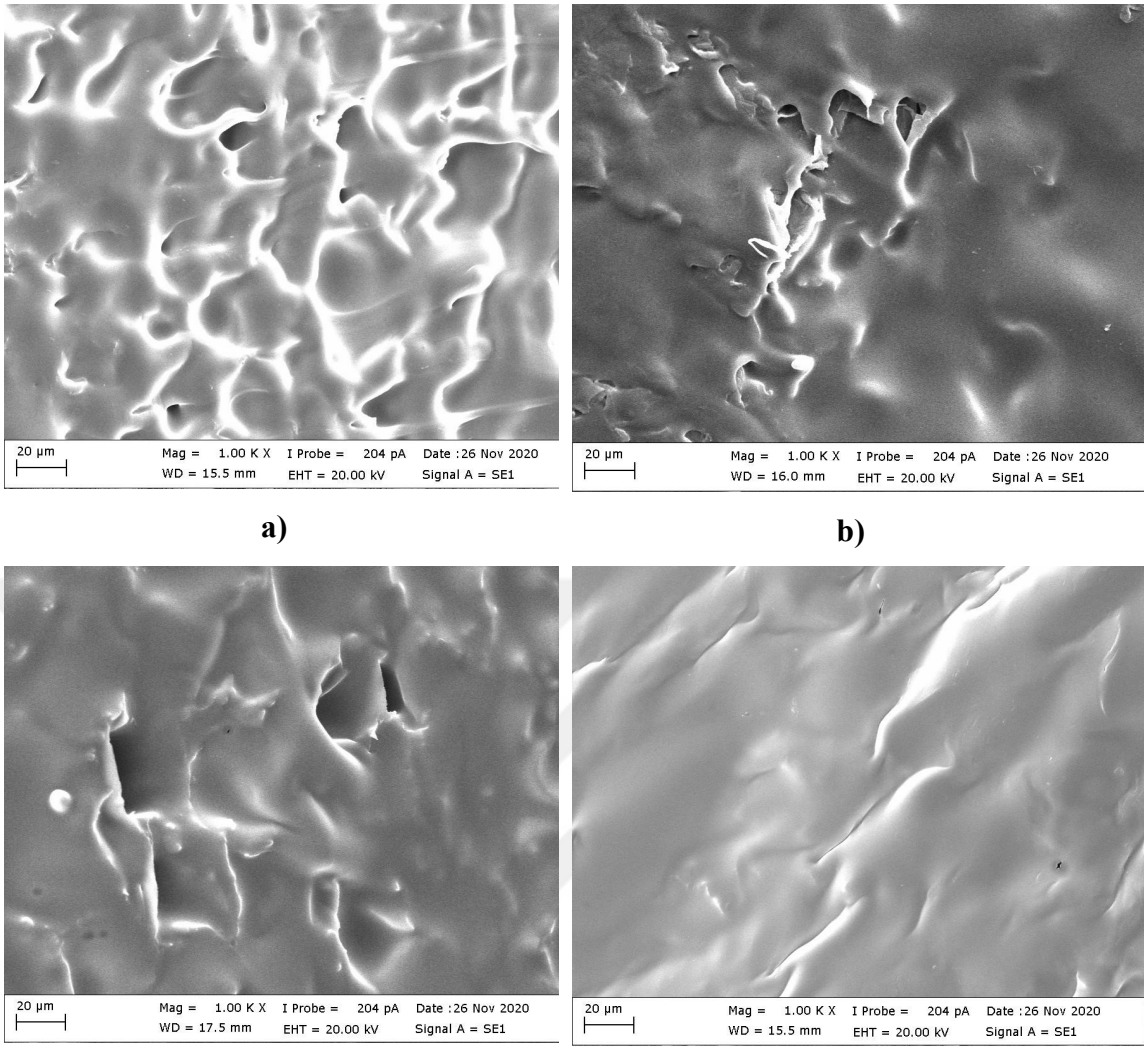
Kurutulmuş ürünlerin rehidrasyon özellikleri uygulanan kurutma işleminin ürün üzerine fiziksel ve kimyasal etkisini gösteren kalite parametresi olarak kullanılmaktadır (Bai ve ark., 2012b). Farklı EHD-sıcak hava kombinasyonları ile kurutulmuş sarımsak ürünlerinin rehidrasyon kapasitesi değerleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Sarımsak örneklerinin rehidrasyon kapasitesi değerleri 0,83±0,05 (30 kV-60 °C) ile 0,90±0,05 (25 kV- 55 °C) arasında değişmiştir. Örneklere uygulanan farklı sıcaklık ve gerilim uygulamalarının örneklerin rehidrasyon kapasiteleri değerlerine istatistiksel açıdan önemli bir etkisi bulunmamıştır ($p>0,05$). Bu çalışmanın sonuçlarına benzer şekilde, Dinani ve Havet (2015b) 45 °C sıcaklıkta, 2,2 m/s hava hızında ve farklı gerilimlerde (0, 20, 25 ve 30 kV) yapmış oldukları mantar örneklerinin kurutulması çalışmalarında, değişen gerilim değerlerinin rehidrasyon değerleri üzerine önemli bir fark oluşturmadığı sonucuna varmışlardır ($p>0,05$). Ayrıca, Sacilik ve Unal (2005) sarımsağın farklı sıcaklıklar (40 ve 50 °C) ile kurutulması çalışmalarında, kurutulan örneklerin rehidrasyon değerleri arasında istatistiksel fark tespit etmezlerken ($p>0,05$), 60 °C sıcaklık uygulamasıyla daha düşük sonuçlar bulmuşlardır.



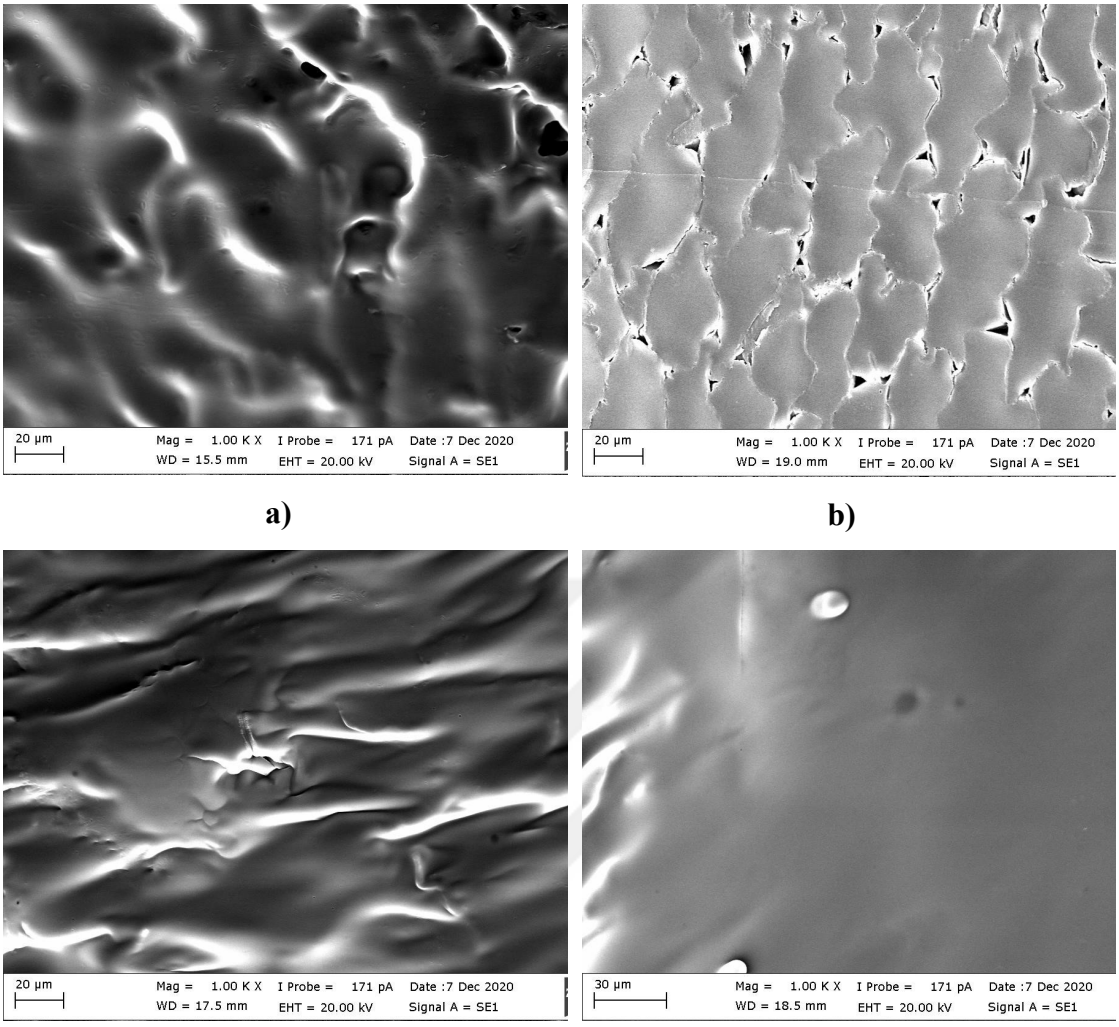
Şekil 4.3. Kurutulmuş sarımsak örneklerinin rehidrasyon kapasiteleri

4.1.5. Sarımsak örneklerinin mikroyapı analiz sonuçları

Farklı EHD-sıcak hava kombinasyonları uygulanarak kurutulan sarımsak örneklerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.4 ve 4.5'te sunulmuştur. Elde edilen görüntüler incelendiğinde, tüm kurutma uygulamalarında sarımsak örneklerinin enine kesit yapısının kompakt olduğu belirlenmiş ve sadece birkaç küçük gözeneklik tespit edilmiştir. Bu durum, örneklerin rehidrasyon kapasitesi değerleri ile ilişkilendirilebilir (Aral ve Beşe, 2016). Ayrıca, yüksek sıcaklıkta kurutulan sarımsak örneklerinin mikroyapılarında daha düz bir yapı görülürken, düşük sıcakta kurutulan örneklerde daha dalgalı bir yapı görülmüştür. López-Ortiz ve ark. (2013) yapmış oldukları sarımsağın kurutulması çalışmalarında, yüksek sıcaklıkta kurutulan sarımsak örneklerinin mikroyapılarında üç boyutlu hücresel yapı kaybı gözlemişlerdir. Bu durum çalışmamızda elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir. Sıcaklık değerinin 55 °C olduğu EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemde kurutulan örneklerin yapıları gerilim değerleri artıkça örnek üzerinde bulunan boşlukların kapanmaya ve mevcut dalgalı yüzeylerin erimenin etkisiyle daha düz bir görünüme sahip oldukları sonucuna varılmıştır. Sıcaklık değerinin 60 °C olarak kullanıldığı EHD-sıcak hava kombinasyon yönteminde ise 15 kV uygalamasıyla kurutulan örneklerden elde edilen görüntülerde dalgalı ve çok az boşluk gözlemlenirken, 20 kV uygulamasıyla kurutulan örneklerden elde edilen görüntülerde düz bir görüntü ve boşluk sayısında artış gözlenmiştir. Aynı yöntemin 25 ve 30 kV uygulamalarıyla kurutulan örneklerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde boşlukların yok olduğu ve hafif dalgalı yüzeylerin oluştuğu görülmüştür.



Şekil 4.4. Sarımsak örneklerinin SEM görüntüleri (15 kV-55 °C (a), 20 kV-55 °C (b), 25 kV-55 °C (c) ve 30 kV-55 °C (d)).

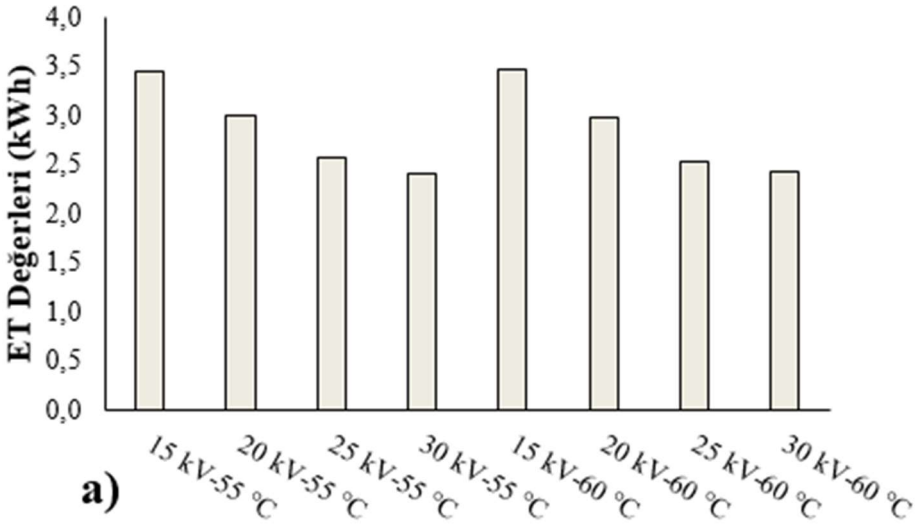


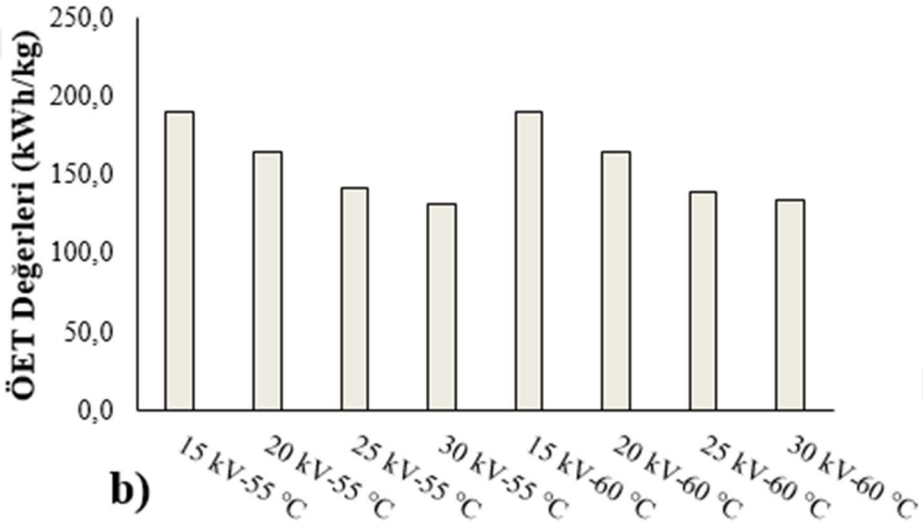
Şekil 4.5. Sarımsak örneklerinin SEM görüntüleri (15 kV-60 °C (a), 20 kV-60 °C (b), 25 kV-60 °C (c) ve 30 kV-60 °C (d))

4.1.6. Sarımsak örneklerinin kurutulmasında enerji performans parametreleri

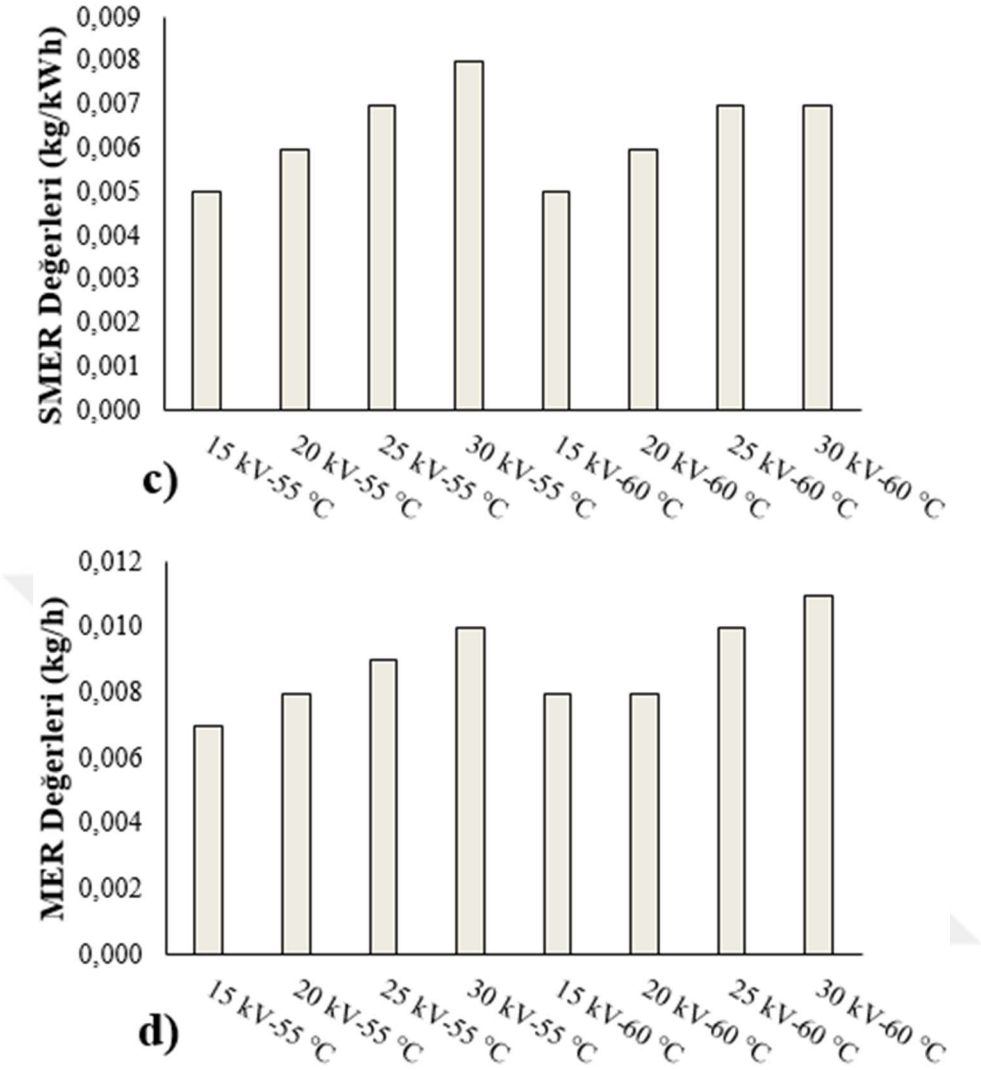
Farklı sıcaklık (55 ve 60 °C) ve gerilim değerlerinde (15, 20, 25 ve 30 kV) EHD-sıcak hava kombinasyon yöntemle kurutulan sarımsak örneklerinin enerji değerlerleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Sarımsak örneklerinin kurutulmasında sırasında en yüksek enerji tüketimi (*ET*) 15 kV-60 °C uygulamasında gerçekleşmiştir. Aynı sıcaklık uygulamalarında gerilim değerinin artmasıyla enerji tüketim değerleri azalmıştır (Şekil 4a). Özgül enerji tüketim (Ö*ET*) değerleri bir kurutucunun birim nemi uzaklaştırmak için kullandığı faydalı termal enerji olarak tanımlanmıştır (Singh ve Kumar, 2013). *ÖET*

değerleri 190,699 kWh/kg (15 kV-60°C) ile 132,306 kWh/kg (30 kV-55°C) arasında değişmiştir. Aynı sıcaklıkta kurutulan sarımsak örneklerinin gerilim değerinin artması *ÖET* değerlerini azaltmıştır (Şekil 4b). Taghian Dinani ve ark. (2014) mantarın kurutulması çalışmasında EHD-sıcak hava kombinasyon sisteminin birim azaltılmış kütle başına tüketim enerjisinin gerilim değeri arttıkça azaldığını tespit etmişlerdir. Bu sonuçlar çalışmamızla uyum göstermiştir. *MER* değeri tasarlanan kurutucunun etkinliğini temsil ederken, *SMER* değeri ise kurutma işlemi sırasında kullanılan enerjinin etkinliğini temsil etmektedir (Yang ve ark., 2021b). Yüksek *SMER* değerleri yüksek enerji verimliliğini belirtmektedir. Şekil 4c incelendiğinde, sarımsağın kurutulmasında en düşük *SMER* değeri (0,005 kg/kWh) 15 kV-55 °C ve 15 kV-60 °C uygulamalarında gözlenmiştir. 30 kV haricindeki diğer gerilim değerleri ile yapılan kurutma işlemlerinde sıcaklığın artması *SMER* değerlerini değiştirmemiştir. Tez çalışmasına benzer olarak, Altay ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada 50 ve 55 °C kurutma uygulamalarının *SMER* değerlerini değiştirmediğini bulmuşlardır. Şekil 4d'den *MER* değerleri incelendiğinde 15 kV-60 °C dışındaki aynı sıcaklıktaki kurutma koşullarında gerilim değerinin artması ve aynı gerilim koşullarında sıcaklığın artması *MER* değerlerini artmıştır. Sıcaklık ve gerilim değerinin artışı ile kuruma süresini azalması bunun sebebi olarak açıklanmaktadır. Yousaf ve ark. (2020) çeltik kurutma çalışmasında düşük sıcaklıkların kuruma süresini uzattığı ve böylelikle *MER* değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir.


ET Değerleri (kWh)
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
15 kV-55 °C
20 kV-55 °C
25 kV-55 °C
30 kV-55 °C
15 kV-60 °C
20 kV-60 °C
25 kV-60 °C
30 kV-60 °C
a)


ÖET Değerleri (kWh/kg)
250,0
200,0
150,0
100,0
50,0
0,0
15 kV-55 °C
20 kV-55 °C
25 kV-55 °C
30 kV-55 °C
15 kV-60 °C
20 kV-60 °C
25 kV-60 °C
30 kV-60 °C
b)

Far



Şekil 4.6. Sarımsak örneklerinin enerji değerleri

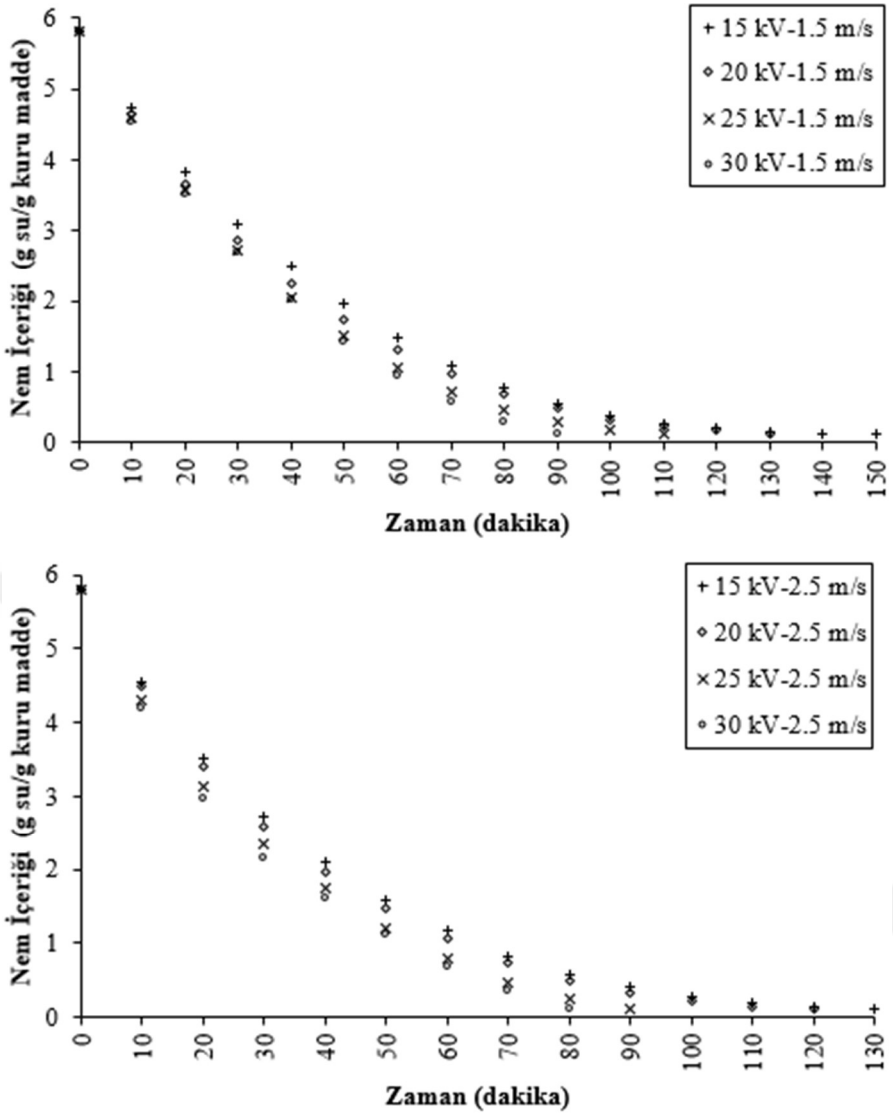
4.2. Armut Örneklerinin Kurutulması

Bu bölümde armut örneklerinin farklı hava hızı ve gerilim değerleri kullanılarak EHD-sıcak hava yöntemiyle kurutulması ile ilgili sonuçlara yer verilmiştir.

4.2.1. Armut örneklerinin nem içeriklerinin değişimleri

İki farklı hava hızları (1,5 ve 2,5 m/s) ve 4 farklı gerilim değerlerinin (15, 20, 25 ve 30 kV) kullanıldığı EHD-sıcak hava yöntemiyle kurutulan armut örneklerinin nem içeriği değerlerinin zamanla değişimleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Armut örnekleri 15 kV-1,5

m/s uygulamasında 150 dakikada kurutulurken, 15 kV-2,5 m/s uygulamasında ise 130 dakikada kurutulmuştur. Aynı gerilim değerinde kurutulan armut örneklerinin kuruma süreleri hava hızının artması ile azalmıştır. Hava hızının 1,5 m/s olduğu uygulamalarda, 30 kV ile kurutulan armut örneklerinin kuruma süresi 90 dakika iken gerilim değerinin 25, 20 ve 15 kV düşürülmesi kuruma sürelerinde sırasıyla %22,22, 44,44 ve 66,67 oranında artmasına sebep olmuştur. Ayrıca, 2,5 m/s hava hızında 15 kV gerilim değerinde kurutulan armut örneklerinin kuruma süresi 130 dakika olarak gözlenirken, 20, 25 ve 30 kV için kuruma süreleri sırasıyla 10, 40 ve 50 dakika azalmıştır. Elde edilen sonuçlara göre gerilim değerlerinin artmasının, elektrik alan şiddeti ve kütle transfer hızını arttırdığı ve örneklerin kuruma sürelerini azalttığını göstermiştir. Pirnazari ve ark. (2016) yaptıkları muz kurutma çalışmalarında benzer sonuçları gözlemlemişlerdir. Dinani ve Havet (2015b) mantarın EHD sistemi ile kurutulması çalışmasında iki farklı hava hızları (0,4 ve 2,2 m/s) ve 4 farklı gerilim değerleri (0, 20, 25 ve 30 kV) kullanmışlardır. Yüksek hava hızında (2,2 m/s) yaptıkları çalışmalarda düşük hava hızında (0,4 m/s) yapılan çalışmalara göre kuruma hızını daha yüksek bulmuşlardır. Ayrıca düşük hava hızında (0,4 m/s) gerilim değerinin artması kuruma hızını arttığını belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar bu çalışmanın sonuçları ile uyumluluk göstermiştir. Bu tez çalışmasının sonuçlarının aksine, yüksek hava hızında (2,2 m/s) korona rüzgarının etkisinin azaldığını ve böylelikle kuruma hızının tüm uygulamalar için oldukça sabit olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun sebebinin ise iki deneyde kullanılan hava hızlarının farklı oluşu ve EHD kurutma sisteminin tasarımı olarak gösterilebilir.



Şekil 4.7. Farklı koşullar altında EHD-sıcak hava kombinasyonlarıyla kurutulan armut örneklerinin nem içeriklerinin zamanla değişimi

4.2.2. Armut örneklerinin kuruma eğrilerinin modellenmesi

İki farklı hava hızları (1,5 ve 2,5 m/s) ve 4 farklı gerilim değerleri (15, 20, 25 ve 30 kV) ile kurutulan armut örneklerinden elde edilen nem içeriği verileri kullanılarak nem oranı değerleri bulunmuş ve zamana bağlı kuruma eğrileri oluşturulmuştur. Çizelge 3.1'de verilen 10 farklı ince tabaka kurutma eşitliklerini kullanılarak modelleme işlemleri yapılmıştır. Bu modellere ait kurutma katsayıları, R^2, *RMSE* ve χ^2 istatistiksel parametrelerinin sonuçları Çizelge 4.4 ve 4.5'te verilmiştir. Elde edilen nem oranı değerlerinin zamanla değişimini en iyi açıklayan modelin belirlenmesinde en yüksek R^2

değeri ve en düşük *RMSE* ve χ^2 değerleri göz önüne alınmıştır. İstatistiksel hesaplamalar sonucunda R^2, *RMSE* ve χ^2 değerlerinin sırasıyla 0,9845-0,9997, 0,0060-0,0412 ve 0,3183 x 10^{-4}-17,9873 x 10^{-4} arasında olduğu bulunmuştur. Armut örneklerinin kurutma kinetiklerini en iyi açıklayan modelin 30 kV-1,5 m/s uygulaması hariç tüm kurutma uygulamaları için Midilli ve ark. modeli olduğu belirlenmiştir. Bu modele göre 30 kV-1,5 m/s uygulaması hariç tüm kurutma uygulamaları için R^2=0,9987-0,9997, *RMSE*=0,0116-0,0060 ve χ^2= 1,2030-0,3724 x 10^{-4} değerleri elde edilmiştir. Logaritmik modelin (R^2=0.9996 *RMSE*= 0.0063 ve χ^2= 0.3471 x 10^{-4}) ise 30 kV-1,5 m/s uygulamasıyla kurutulan armut örneklerinden elde edilen nem oranı değerlerini yeterli düzeyde açıklayan en uygun model olduğu bulunmuştur.

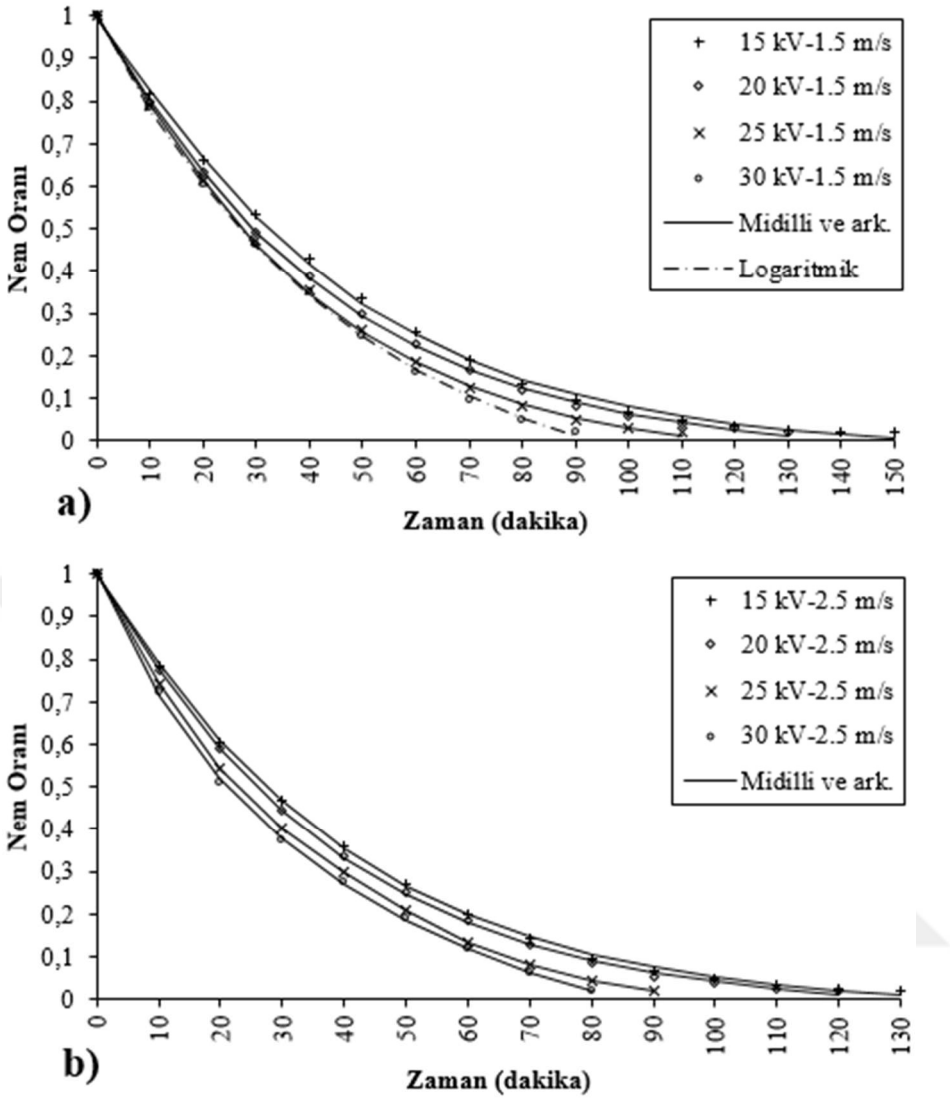
Şekil 4.8'de armudun deneysel ve en uygun modellerden (Midilli ve ark. ve Logaritmik) elde edilen tahmini değerlerin karşılaştırması gösterilmiştir. Şekil 4.8a'dan 60 °C sabit sıcaklık ve 1,5 m/s hava hızında farklı gerilim değerlerinde kurutulan armut örneklerinin 30 kV-1,5 m/s uygulaması haricindeki uygulamalarından elde edilen deneysel kuruma değerlerinin Midilli ve ark. modeline dayalı tahmini kuruma değerlerine yakın olduğu gözlenmiştir. Logaritmik modelden elde edilen eğriler ise 30 kV-1,5 m/s ile kurutulan örneklerden elde edilen deneysel verilere uyumluluk göstermiştir. Şekil 4.8b'de ise 60 °C sabit sıcaklık ve 2,5 m/s hava hızında farklı gerilim değerlerinde kurutulan armut örneklerinin deneysel verileri ile Midilli ve ark. modelinden elde edilen tahmini sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 4.8b incelendiğinde deneysel sonuçlar ile Midilli ve ark. modelinden elde edilen tahmini sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasının sonuçlarına benzer olarak, Öztekin ve Sacilik (2020) armut ürünün sıcak hava ile kurutulması çalışmalarında Midilli ve ark. modelinin deneysel verilere uygunluk açısından en iyi model olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, Murthy ve Manohar (2014) mango zencefili farklı sıcaklık ve hava hızı ile kurutma çalışmalarında tüm kurutma koşulları için aynı sonuçları elde etmişlerdir. Diğer taraftan 30 kV-1,5 m/s uygulamasında kurutma kinetiklerini en iyi açıklayan Logaritmik modelin, Darvishi ve ark. (2017) dereotu yapraklarının sıcak hava (40, 50, 60 ve 70 °C) ile kuruttukları, Kumar ve ark. (2019) ise muz örneklerini 45, 55 ve 65 °C sıcak hava ile kuruttukları çalışmalarda kuruma eğrilerini en iyi açıklayan model olduğunu tespit etmişlerdir (Darvishi ve ark., 2017; Kumar ve ark., 2019).

Çizelge 4.4. Farklı gerilim değerleri ve 1,5 m/s hava hızı kullanılarak EHD yöntemiyle kurutulan armut örnekleri için kullanılan modellerin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları.

No	15 kV-1,5 m/s				20 kV-1,5 m/s				25 kV-1,5 m/s				30 kV-1,5 m/s			
	Model Katsayıları	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**
1	a=1,028 k=0,02359	0,9944	0,0233	5,5307	a=1,022 k=0,02534	0,9967	0,0181	3,3658	a=1,03 k=0,02816	0,9938	0,0255	6,8089	a=1,03 k=0,02919	0,9880	0,0363	13,8302
2	k=0,02299	0,9941	0,0238	6,1899	k=0,02482	0,9963	0,0190	3,7608	k=0,02738	0,9932	0,0267	7,4962	k=0,02835	0,9879	0,0363	13,9901
3	k=0,0132 n=1,139	0,9985	0,0125	1,3850	k=0,01632 n=1,108	0,9991	0,0095	0,7916	k=0,01491 n=1,161	0,9988	0,0110	1,2090	k=0,01382 n=1,193	0,9957	0,0218	4,53010
4	a=1,06 k=0,02059 c=-0,05023	0,9982	0,0140	2,0850	a=1,056 k=0,02223 c=-0,05004	0,9995	0,0071	0,4913	a=1,088 k=0,02323 c=-0,07982	0,9993	0,0088	0,8847	a=1,169 k=0,02067 c=-0,1699	0,9996	0,0063	0,3471
5	a=0,8073 k_o=0,02357 b=0,2199 k_1=0,02349	0,9937	0,0246	6,4531	a=0,7966 k_o=0,02534 b=0,2253 k_1=0,02534	0,9960	0,0198	4,0390	a=0,7033 k_o=0,02814 b= 0,3264 k_1=0,0282	0,9923	0,0285	8,5149	a=7,885 k_o=0,0451 b=-6,894 k_1=0,04895	0,9948	0,0238	5,4996
6	a=1,642 k=0,02931	0,9986	0,0118	1,2663	a=1,589 k=0,03082	0,9992	0,0089	0,6759	a=1,675 k=0,03568	0,9989	0,0110	1,1961	a=1,709 k=0,03778	0,9955	0,0222	4,8182
7	a=-0,01626 b=0,0000668	0,9920	0,0278	6,9845	a=-0,01789 b=0,00008212	0,9911	0,0295	8,2947	a=-0,01999 b=0,000103	0,9960	0,0205	3,7439	a=-0,02099 b=0,000114	0,9978	0,0156	1,9141
8	a=0,5049 k=0,02296 b=1	0,9932	0,0256	7,1475	a=0,491 k=0,02482 b=0,9999	0,9957	0,0206	4,4448	a=4,126 k=0,01662 b=0,8543	0,9995	0,0069	0,5477	a=0,5538 k=0,02835 b=1	0,9845	0,0412	17,9873
9	a=0,558 k=0,02296 g=0,02296	0,9932	0,0256	7,1475	a=0,1185 k=0,02482 g=0,02482	0,9957	0,0206	4,4446	a=0,2144 k=0,02742 g=0,02737	0,9917	0,0295	9,1623	a=9,692 k=0,04516 g=0,04814	0,9955	0,0223	4,8103
10	a=0,991 k=0,01377 n=1,12 b=-0,0001042	0,9987	0,0116	1,2030	a=0,9982 k=0,01881 n=1,06 b=-0,000196	0,9996	0,0064	0,3183	a=0,9977 k=0,01787 n=1,097 b=-0,0003064	0,9997	0,0060	0,3724	a=0,9988 k=0,02174 n=1,024 b=-0,001126	0,9995	0,0074	0,4872

Çizelge 4.5. Farklı gerilim değerleri ve 2,5 m/s hava hızı kullanılarak EHD yöntemiyle kurutulan armut örnekleri için kullanılan modellerin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları.

No	15 kV-2,5 m/s				20 kV-2,5 m/s				25 kV-2,5 m/s				30 kV-2,5 m/s			
	Model Katsayıları	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**	**Model Katsayıları**	**R^2**	**RMSE**	**$\chi^2(10^{-4})$**
1	a=1,019 k=0,02713	0,9972	0,0164	2,6620	a=1,017 k=0,0285	0,9974	0,0160	2,6637	a=1,014 k=0,03232	0,9949	0,0233	5,2900	a= 1,009 k=0,03435	0,9948	0,0237	5,3157
2	k=0,02664	0,9970	0,0171	2,9236	k=0,02804	0,9973	0,0165	2,8439	k=0,03188	0,9952	0,0227	5,0529	k=0,03405	0,9953	0,0224	4,8029
3	k=0,01808 n=1,101	0,9993	0,0081	0,6279	k=0,0196 n=1,095	0,9993	0,0084	0,7727	k=0,02247 n=1,096	0,9970	0,0177	0,7727	k=0,02654 n=1,07	0,9960	0,0207	3,8727
4	a=1,045 k=0,0244 c=-0,03879	0,9994	0,0080	0,6514	a=1,044 k=0,02563 c=-0,03939	0,9994	0,0075	0,4113	a=1,075 k=0,02675 c=-0,07936	0,9995	0,0076	0,3717	a=1,07 k=0,02862 c=-0,07818	0,9984	0,0130	1,3005
5	a=0,7465 k_o=0,02713 b=0,2728 k_1=0,02714	0,9967	0,0180	3,1936	a=0,7506 k_o=0,0285 b=0,2669 k_1=0,0285	0,9968	0,0177	3,2547	a=0,8555 k_o=0,03232 b=0,1586 k_1=0,03233	0,9932	0,0269	7,0527	a=5,575 k_o=0,04589 b=-4,58 k_1=0,0494	0,9950	0,0230	4,8165
6	a=1,577 k=0,03285	0,9995	0,0071	0,4945	a=1,564 k=0,03433	0,9994	0,0074	0,6435	a=1,56 k=0,03902	0,9973	0,0171	2,5501	a=0,9999 k=0,03405	0,9946	0,0240	5,4890
7	a=-0,01878 b=0,00008937	0,9880	0,0343	11,6620	a=-0,01996 b=0,0001016	0,9888	0,0334	11,4759	a=-0,02341 b=0,0001427	0,9912	0,0306	8,5087	a=-0,02527 b=0,000168	0,9882	0,0357	12,0000
8	a=0,4882 k=0,02664 b=1	0,9965	0,0186	3,4551	a=0,4864 k=0,02804 b=1	0,9967	0,0181	3,4127	a=0,1827 k=0,0319 b=0,9994	0,9938	0,0257	6,4968	a= 0,1168 k= 0,03401 b=1,001	0,9938	0,0259	6,4022
9	a=6,126 k=0,03749 g=0,04048	0,9995	0,0066	0,4371	a=0,4892 k=0,02804 g=0,02803	0,9967	0,0181	3,4128	a=0,2554 k=0,03188 g=0,03188	0,9938	0,0257	6,4966	a=4,283 k=0,04512 g=0,04964	0,9958	0,0213	4,0706
10	a=0,9962 k=0,01958 n=1,072 b=-0,0001257	0,9996	0,0064	0,4111	a=0,9972 k=0,02152 n=1,061 b=-0,0001512	0,9996	0,0066	0,3603	a=1 k=0,03165 n=0,9686 b=-0,0008004	0,9996	0,0069	0,3673	a=1,001 k=0,04008 n=0,9092 b=-0,0012	0,9993	0,0087	0,4815



Şekil 4.8. Seçilen kurutma koşulları altında deneysel ve Midilli ve ark. ve Logaritmik modellerinden elde edilen nem oranı değerlerinin karşılaştırılması

4.2.3. Armut örneklerinin renk analiz sonuçları

Taze ve farklı hava hızları ve farklı gerilim değerlerinde kurutulmuş armut örneklerinin renk parametreleri değerleri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Çizelge incelendiğinde, kurutmanın etkisi ile taze örneklerin L^* ve Hue açısı (α°) değerlerinde azalma gözlenirken a^*, b^*, ve C değerlerinde artış gözlemlenmiştir ($p<0,05$). Santos ve ark. (2013) çalışmalarında farklı bölgelerden alınan Rocha armudu örneklerini püre halinde sıcak hava ile kurutmuş ve kurutmanın etkisi ile bu tez çalışmasına benzer olarak örneklerin a^* ve b^* değerlerinin arttığını ve L^* değerlerinin azaldığını tespit etmiştir. Örneklerin L^*

değerlerinin azalması ile *a** ve *b** değerlerindeki artması yapılan işlemin örneklerde kimyasal esmerleşme reaksiyonuna neden olduğunu göstermektedir (Yi ve ark., 2016). Gerilim değerinin 25 kV olduğu kurutma uygulamaları hariç tüm kurutma uygulamalarıyla kurutulan örneklerde hava hızının artmasıyla ile *L** değerlerinde azalma gözlenmiştir ($p<0,05$). Ayrıca 15 kV-2,5 m/s uygulaması ile kurutulan örnekler haricinde tüm kurutma uygulamalarıyla kurutulan örneklerde gerilim değerlerinin artmasıyla *L** değerlerinde azalma gözlenmiştir ($p<0,05$). Benzer sonuçları Dinani ve ark. (2015b) mantar kurutma çalışmasında elde etmişlerdir. Taze örneğe en yakın *a** değeri 20 kV-1,5 m/s uygulaması ile kurutulan örneklerde görülmüştür. Hava hızının 1,5 m/s olduğu kurutma uygulamalarında, 15 ve 20 kV uygulamaları ile kurutulan örnekler *b** değerleri arasında istatistiksel bir fark görülmezken ($p>0,05$), gerilim değerlerinin artışı ile kurutulan örneklerin *b** değerlerinde artış gözlenmiştir ($p<0,05$). Çizelge 4.7 en yüksek *C* değeri 30 kV-2,5 m/s uygulamasıyla kurutulmuş örneklerde gözlenirken, gerilim değerlerinin artışı ile birlikte kurutulmuş örneklerin *C* değerlerinde istatistiksel bir fark gözlenmiştir ($p<0,05$). Hue açısı (α°) değerlerinin 96.28±0.03 ile 77.72±0.42 arasında değiştiği ve uygulanan kurutma işlemlerinin, hue açısı (α°) değerlerinde istatiksel bir fark oluşturduğu gözlenmiştir ($p<0,05$).

Çizelge 4.6. Taze ve kurutulmuş armut örneklerinin renk değerleri

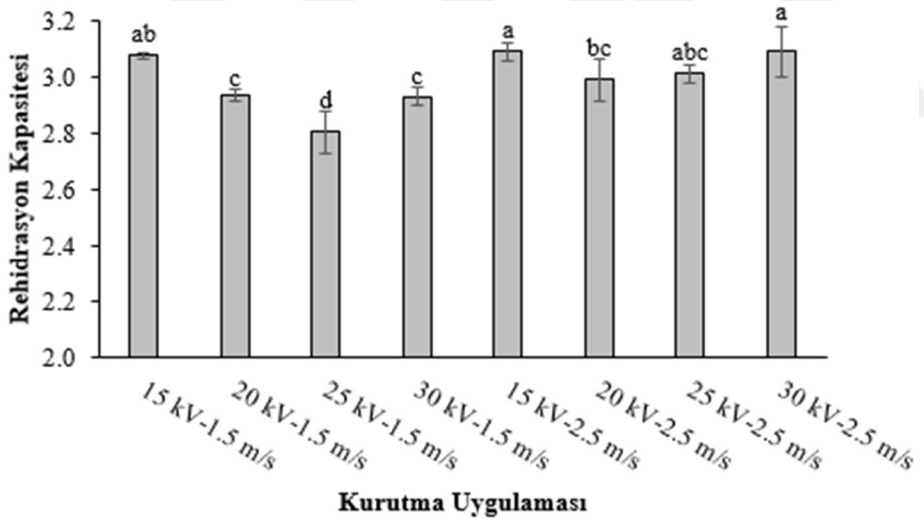
Örnek	*L**	*a**	*b**	*C*	*α°*
Taze	75,49±0,07 a	-1,94±0,01 h	17,47±0,06 h	17,57±0,06 g	96,28±0,03 a
15 kV-1,5 m/s	67,85±0,08 b	4,01±0,01 e	26,45±0,05 e	26,75±0,05 d	81,42±0,02 d
20 kV-1,5 m/s	65,59±0,61 c	3,45±0,05 g	26,18±0,18 e	26,41±0,18 e	82,54±0,06 b
25 kV-1,5 m/s	62,86±0,11 f	4,76±0,01 c	26,78±0,05 d	27,20±0,05 c	79,97±0,02 g
30 kV-1,5 m/s	61,94±0,22 g	4,40±0,01 d	27,84±0,13 b	28,19±0,13 b	81,07±0,05 e
15 kV-2,5 m/s	64,28±0,13 e	3,82±0,01 f	25,87±0,09 f	26,15±0,09 e	81,64±0,04 c
20 kV-2,5 m/s	65,15±0,24 d	4,09±0,01 e	24,66±0,07 g	25,00±0,07 f	80,61±0,01 f
25 kV-2,5 m/s	62,56±0,27 f	5,09±0,10 b	27,49±0,21 c	27,96±0,23 b	79,56±0,12 h
30 kV-2,5 m/s	60,64±0,22 h	6,21±0,35 a	28,42±0,63 a	29,09±0,69 a	77,72±0,42 i

[a-i] Her bir renk parametresi sütunun istatistiği ayrı ayrı uygulanmıştır ve aynı sütunda farklı harfler taşıyan ortalamalar arasındaki farklılıklar önemlidir ($p<0,05$).

4.2.4. Armut örneklerinin rehidrasyon kapasitesi analiz sonuçları

Kurutulmuş örnekler için önemli kalite parametrelerinden biri olan rehidrasyon kapasitesi değeri yüksek değerlerde örnekteki dokularının daha az hasara uğradığını ve yüksek su emilimini göstermektedir (Doymaz, 2013). Şekil 4.9'da farklı EHD-sıcak hava

kombinasyonları ile kurutulmuş armut örneklerinin rehidrasyon kapasitesi değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde, hava hızının 1,5 m/s olduğu kurutma şartlarında gerilim değerleri arttıkça örneklerin rehidrasyon kapasitesi değerleri azalmıştır (30 kV-1,5 m/s hariç) ($p<0,05$). Yang ve Ding (2016) Çin kurt üzümü ve Yu ve ark. (2018) patates kurutma çalışmalarında gerilim değerlerinin artmasıyla örneklerin rehidrasyon kapasitesi değerlerinin arttığını bulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar bu tez çalışmasının sonuçları ile farklılık göstermiştir. Bu farklılığın sebebinin bahsedilen çalışmada kullanılan sıcaklık değeri (25 °C) ile bu çalışmada kullanılan sıcaklık değeri (60 °C) arasındaki farkın olabileceği öngörülmektedir. Gerilim değerlerinin 15 ve 20 kV olduğu kurutma uygulamalarında hava hızının artması örneklerin rehidrasyon kapasitesi değerini değiştirmezken ($p>0,05$), gerilim değerlerinin 25 ve 30 kV olduğu kurutma uygulamalarında örneklerin rehidrasyon kapasite değerleri artmıştır ($p<0,05$). Bu tez çalışmasının sonuçları ile benzer olarak, Aral ve Beşe (2016) yaptıkları çalışmada aynı şartlarda artan hava hızının rehidrasyon oranını düşürdüğünü belirtmiştir.

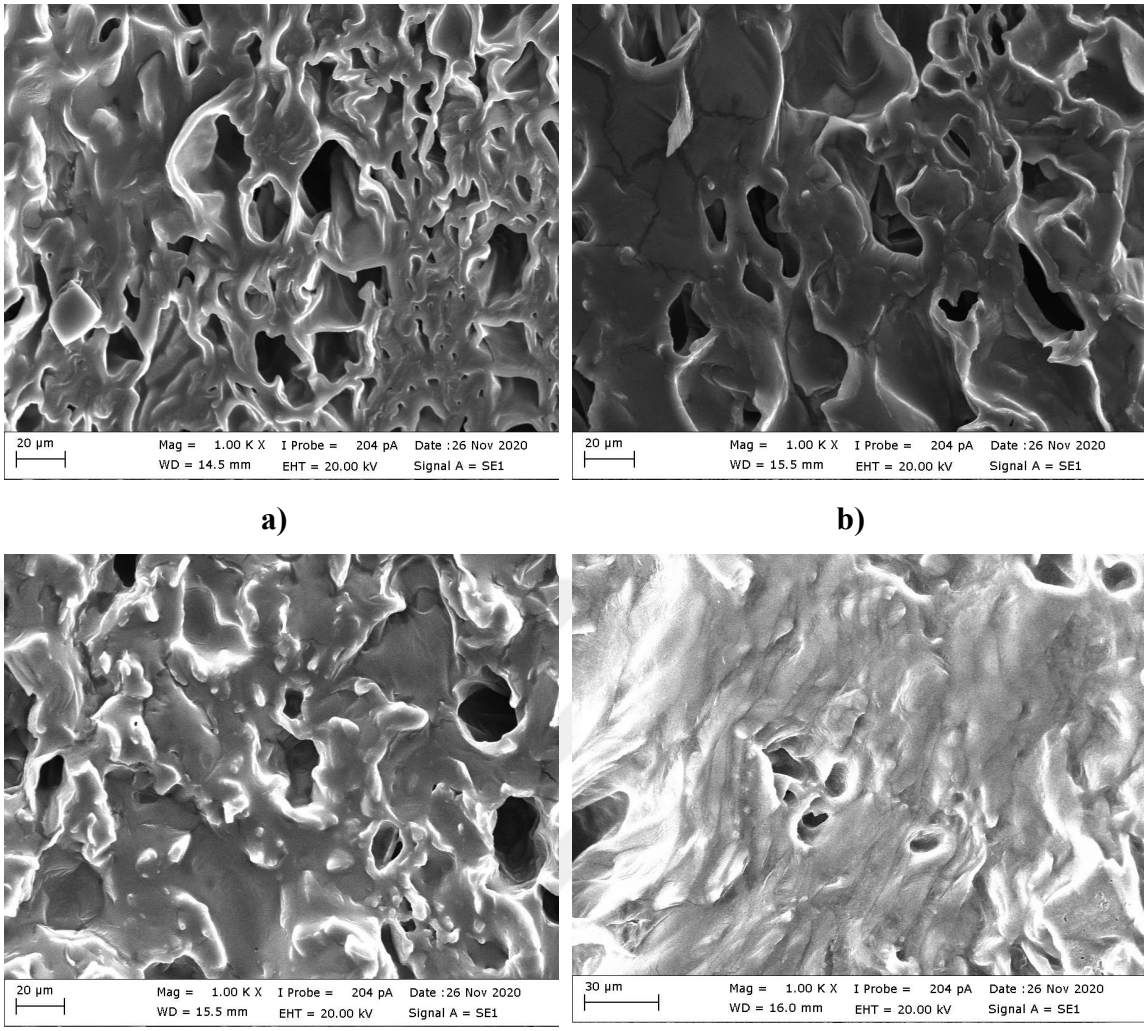


Şekil 4.9. Kurutulmuş armut örneklerinin rehidrasyon kapasite değerleri

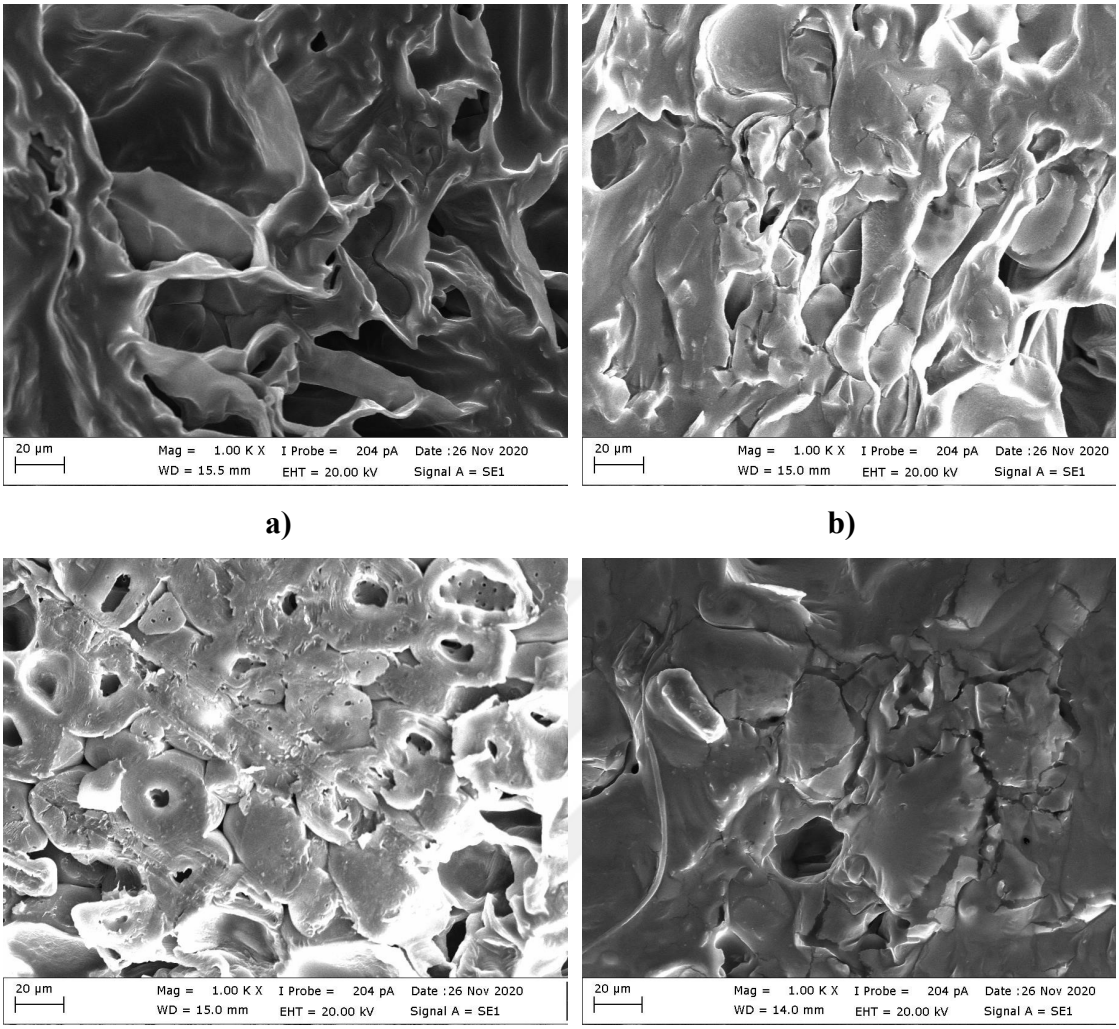
4.2.5. Armut örneklerinin mikroyapı analiz sonuçları

Armut meyvesinin dokusu çok sayıda hücrelerden ve bunlar arasında boşluklardan oluşmaktadır. Kurutma işlemi ile dokularda bulunan su uzaklaştırılmakta ve suyun uzaklaşmasıyla oluşan boşluklar nedeniyle dokular yapılarını koruyamamaktadırlar.

(Proietti ve ark., 2018). Farklı gerilim değerlerinde ve hava hızlarında kurutulan armut örneklerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilmiştir. 15 kV–1,5 m/s uygulaması ile kurutulmuş armut örneklerinin mikroyapısında tek tip petek ağı ve daha az çökmüş yapı gözlemlenmiştir. Aynı hava hızında gerilim değerlerinin artması ile örnek mikroyapısında daha eriyik ve pürüzlü yüzey görülmesine neden olmuştur (Yu ve ark., 2018). Kurutma uygulamasının 20 kV-2,5 m/s olduğu örneğin yapısının, 20 kV-1,5 m/s uygulaması ile kurutulan örneğin yapısına göre hücresel boşlukların azaldığı gözlenmiştir. Benzer durum diğer gerilim değerleri ile kurutulan örnekler için de gözlenmiştir. Aynı gerilim değerlerinde kurutulan örneklerde hava hızının artışı hücre duvarının erimesine ve boşlukların kapanmasına neden olmuştur. Bu sonuçları Hidar ve ark. (2020) stevia yapraklarını kurutma çalışmalarında gözlemişlerdir.



Şekil 4.10. Armut örneklerinin SEM görüntüleri (15 kV-1,5 m/s (a), 20 kV-1,5 m/s (b), 25 kV-1,5 m/s (c), ve 30 kV-1,5 m/s (d))



Şekil 4.10. Armut örneklerinin SEM görüntüleri (15 kV-2,5 m/s (a), 20 kV-2,5 m/s (b), 25 kV-2,5 m/s (c), ve 30 kV-2,5 m/s (d))

5. SONUÇ

Tez kapsamında sarımsak ve armut örnekleri EHD-sıcak hava yöntemiyle kurutulmuştur. Sarımsak örnekleri için farklı sıcaklık ve gerilim değerlerinin armut içinse farklı hava hızı gerilim değerlerinin örneklerin kuruma süresi, renk, rehidrasyon kapasitesi ve mikroyapı üzerindeki etkilerini araştırma amaçlanmıştır. Ayrıca örneklerin kuruma davranışlarını en iyi açıklayan modeli elde etmek için kurutma işlemlerinin deneysel sonuçlarına 10 adet matematiksel kurutma modeli uygulanmıştır. Buna ek olarak sarımsak örneklerinin kurutulması sırasındaki yöntemin enerji verimlilik değerleri de araştırılmıştır. Deneylerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Sıcaklık ve gerilim değerlerinin arttırılması, sarımsak örneklerinin son nem içeriğine ulaşma süresini kısaltmıştır. Armut örneklerinin kuruma süresi ise hava hızı ve gerilim değeri arttıkça azalmıştır.
- Deneysel veriler ile teorik modellerden elde edilen veriler karşılaştırılmış ve deneysel veriler için en uygun matematiksel modellerin sarımsak örnekleri için 60 °C sıcaklığın kullanıldığı tüm kombinasyon kurutma uygulamalarında Verma ve ark., 15 kV-55 °C ve 20 kV-55°C kurutma uygulamalarında Difüzyon Yaklaşımı ve 25 kV-55 °C ve 30 kV-55 °C kurutma uygulamalarında Newton modeli olduğu bulunmuştur. Armut örnekleri için Midilli ve ark. modelinin, 30 kV-1,5 m/s uygulaması dışındaki tüm kurutma uygulamaları için en uygun matematiksel model olduğu belirlenmiştir. Armut örneklerinin 30 kV-1,5 m/s uygulaması ile elde edilen kurutma kinetiklerini en iyi açıklayan modelin ise Logaritmik model olduğu tespit edilmiştir.
- Sarımsak örneklerine uygulanan sıcaklık ve yüksek gerilim değerleri örmneklerin L^* değerlerinin azalmasına, a^* ve b^* değerlerinin artmasına neden olmuştur. Armut örnekleri için L^* değerindeki en belirgin azalma 30 kV-2,5 m/s uygulamasından elde edilen ürünlerde tespit edilmiştir.
- Sarımsak örneklerinin kurutulması sırasında en düşük enerji tüketimi 30 kV-55 °C uygulamasında bulunmuştur. Aynı sıcaklıktaki sarımsak örneklerinin kurutulması uygulamalarında, enerji tüketimi (ET) ve özgül enerji tüketimi (ÖET) değerleri azalırken, SMER ve MER değerleri genellikle gerilim değerlerinin artmasıyla artmıştır.

- Sıcaklık ve gerilim değerlerinin değişimi kurutulmuş sarımsak örneğinin rehidrasyon kapasitesi üzerine önemli bir etkisi tespit edilememiştir ($p>0,05$). Kurutulmuş armut örneklerinin en düşük rehidrasyon kapasitesi değerleri 25 kV-1,5 m/s uygulamasında bulunmuştur.
- Yüksek sıcaklık (60 °C) kullanılan kombinasyon yöntemle kurutulan sarımsak örneklerinin mikroyapısının, düşük sıcaklık (55 °C) kullanılan kombinasyon yöntemiyle kurutulan örneklerin mikroyapısına göre daha düz olduğu görülmüştür. Armut örneklerinde ise gerilim değerinin ve hava hızının artması ile örneklerin mikroyapılarında çökmeler gözlenmiştir.

Yapılan tez çalışmasında EHD kurutma işlemlerini optimize etme ve termodinamik ve kalitatif özellikleri iyileştirme konusunda daha fazla araştırma için faydalı olabilecek önemli ipuçları sağlanmıştır. Gelecekteki çalışmalarda, EHD-sıcak havayla kurutma yöntemi ile yüksek kaliteli kurutulmuş tarımsal örnekler elde etmek için gerilim değerleri, havanın sıcaklık derecesi ve kurutma havası hızının yeniden ayarlanması planlanmaktadır. EHD yönteminin kullanılmasının, tarımsal örneklerin kurutulmasında kuruma süresini kısalttığı ve enerji verimliliği sağladığı için sıcak havayla kurutma yöntemine bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Abuzairi, T., & Ramadhanty, S. (2018, November 27-29). Analysis of Small-Scale Electrohydrodynamic Drying Device for Rough Rice using Response Surface Methodology [paper presentation]. 4th International Conference on Nano Electronics Research and Education, Hamamatsu, Japan

Ahmedou, O., Rouaud, O., & Havet, M. (2009). Assessment of the electrohydrodynamic drying process. Food and Bioprocess Technology, 2(3), 240-247. https://doi.org/10.1007/s11947-008-0078-6

Alemrajabi, A.A., Rezaee, F., Mirhosseini, M., & Esehaghbeygi, A. (2012). Comparative evaluation of the effects of electrohydrodynamic, oven, and ambient air on carrot cylindrical slices during drying process. Drying Technology, 30(1), 88-96. https://doi.org/10.1080/07373937.2011.608913

AlJuhaimi, F., Uslu, N., Özcan, M. M., ElBabiker, E. F., & Ghafoor, K. (2016). Effect of drying on antioxidant activity, total phenol and mineral contents of pear fruits. Journal of Food Safety and Food Quality, 67, 164-167. https://doi.org/10.2376/0003-925X-67-164

Altay, K., Hayaloglu, A. A., & Dirim, S. N. (2019). Determination of the drying kinetics and energy efficiency of purple basil (Ocimum basilicum L.) leaves using different drying methods. Heat and Mass Transfer, 55(8), 2173-2184. https://doi.org/10.1007/s00231-019-02570-9

Anukiruthika, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Electrohydrodynamic drying of foods: Principle, applications, and prospects. Journal of Food Engineering, 295, 110449. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110449

Aral, S., & Beşe, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (Crataegus spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. Food Chemistry, 210, 577-584. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.128

Ayuttaya, S. S. N., Chaktranond, C., & Rattanadecho, P. (2013). Numerical analysis of electric force influence on heat transfer in a channel flow (theory based on saturated porous medium approach). International Journal of Heat and Mass Transfer, 64, 361-374. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.010

Bai, J. W., Sun, D. W., Xiao, H. W., Mujumdar, A. S., & Gao, Z. J. (2013b). Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 20, 230-237. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.08.011

Bai, Y. X., & Sun, B. (2009, January 19-23). Influence of Operating Parameters on Energy Consumption of Electrohydrodynamic Drying [paper presentation]. ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability collocated with the Heat Transfer and InterPACK09 Conferences, San Francisco, California, USA

Bai, Y. X., & Sun, B. (2011a). Study of electrohydrodynamic (EHD) drying technique for shrimps. Journal of Food Processing and Preservation, 35(6), 891-897. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00542.x

Bai, Y. X., Li, J., Mei, Y., & Kang, D. M. (2008, November 9-13). Experiment of drying kelp with high voltage electric fields [paper presentation]. 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China.

Bai, Y. X., Shi, H., & Yang, Y. X. (2012a). Application of Electrohydrodynamic Drying Technology in Sludge. In Advanced Materials Research (Vols. 424–425, pp. 61–

64). Trans Tech Publications, Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.424-425.61

Bai, Y. X., Yang, G. J., Hu, Y. C., & Qu, M. (2012c). Physical and sensory properties of electrohydrodynamic (EHD) dried scallop muscle. Journal of Aquatic Food Product Technology, 21(3), 238-247. https://doi.org/10.1080/10498850.2011.590271

Bai, Y., Hu, Y., & Li, X. (2010, March 28-31). The tofu's characteristics of electrohydrodynamic drying with wire electrode [paper presentation]. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China.

Bai, Y., Li, X., Sun, Y., & Shi, H. (2011c). Thin layer electrohydrodynamic (EHD) drying and mathematical modeling of fish. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 36(3), 217-228. https://doi.org/10.3233/JAE-2011-1361

Bai, Y., Qu, M., Luan, Z., Li, X., & Yang, Y. (2013a). Electrohydrodynamic drying of sea cucumber (Stichopus japonicus). LWT-Food Science and Technology, 54(2), 570-576. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.06.026

Bai, Y., Sun, B., & Yang, G. (2011b, March 25-28). Drying characteristics of Spanish mackerel during electrohydrodynamic (EHD) drying [paper presentation]. In 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China.

Bai, Y., Yang, Y., & Huang, Q. (2012b). Combined electrohydrodynamic (EHD) and vacuum freeze drying of sea cucumber. Drying Technology, 30(10), 1051-1055. https://doi.org/10.1080/07373937.2012.663435

Bajgai, T. R., Raghavan, G. V., Hashinaga, F., & Ngadi, M. O. (2006). Electrohydrodynamic drying—A concise overview. Drying Technology, 24(7), 905-910. https://doi.org/10.1080/07373930600734091

Balcer, B. E., & Lai, F. C. (2004). EHD-enhanced drying with multiple-wire electrode. Drying Technology, 22(4), 821-836. https://doi.org/10.1081/DRT-120034265

Bardy, E., Hamdi, M., Havet, M., & Rouaud, O. (2015). Transient exergetic efficiency and moisture loss analysis of forced convection drying with and without electrohydrodynamic enhancement. Energy, 89, 519-527. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.017

Bardy, E., Manai, S., Havet, M., & Rouaud, O. (2016). Drying kinetics comparison of methylcellulose gel versus mango fruit in forced convective drying with and without electrohydrodynamic enhancement. Journal of Heat Transfer, 138(8). https://doi.org/10.1115/1.4033390

Bashkir, I., & Martynenko, A. (2021). Optimization of multiple-emitter discharge electrode for electrohydrodynamic (EHD) drying. Journal of Food Engineering, 305, 110611. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110611

Basiry, M., & Esehaghbeygi, A. (2010). Electrohydrodynamic (EHD) drying of rapeseed (Brassica napus L.). Journal of Electrostatics, 68(4), 360-363. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2010.05.002

Belghith, A., Azzouz, S., & ElCafsi, A. (2016). Desorption isotherms and mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato. Heat and Mass Transfer, 52, 407-419. https://doi.org/10.1007/s00231-015-1560-0

Bhattacharya, M., Srivastav, P. P., & Mishra, H. N. (2015). Thin-layer modeling of convective and microwave-convective drying of oyster mushroom (Pleurotus ostreatus). Journal of Food Science and Technology, 52, 2013-2022. https://doi.org/10.1007/s13197-013-1209-2

Calin-Sanchez, A., Figiel, A., Wojdyło, A., Szarycz, M., & Carbonell-Barrachina, A. A. (2014). Drying of garlic slices using convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying: kinetics, energy consumption, and quality studies. Food and Bioprocess Technology, 7(2), 398-408. https://doi.org/10.1007/s11947-013-1062-3

Calin-Sanchez, A., Figiel, A., Wojdyło, A., Szarycz, M., & Carbonell-Barrachina, A. A. (2014). Drying of garlic slices using convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying: kinetics, energy consumption, and quality studies. Food and Bioprocess Technology, 7, 398-408. https://doi.org/10.1007/s11947-013-1062-3

Caliskan, G., & Dirim, S. N. (2017). Drying characteristics of pumpkin (Cucurbita moschata) slices in convective and freeze dryer. Heat and Mass Transfer, 53, 2129-2141. https://doi.org/10.1007/s00231-017-1967-x

Cao, W., Nishiyama, Y., & Koide, S. (2004). Electrohydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field. Journal of Food Engineering, 62(3), 209-213. https://doi.org/10.1007/s00231-017-1967-x

Chaktranond, C., & Rattanadecho, P. (2010). Analysis of heat and mass transfer enhancement in porous material subjected to electric fields (effects of particle sizes and layered arrangement). Experimental Thermal and Fluid Science, 34(8), 1049-1056. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.02.015

Chen, Y., Barthakur, N. N., & Arnold, N. P. (1994). Electrohydrodynamic (EHD) drying of potato slabs. Journal of Food Engineering, 23(1), 107-119. https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90126-0

Dadalı, G. 2007. Bamya ve ıspanagın mikrodalga tekniği kullanılarak kurutulması, doku ve renk özelliklerinin incelenmesi ve modellenmesi. [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız teknik Üniversitesi]. http://localhost:6060/xmlui/handle/1/5096

Dalvand, M. J., Mohtasebi, S. S., & Rafiee, S. (2014a). Optimization on drying conditions of a solar electrohydrodynamic drying system based on desirability concept. Food Science & Nutrition, 2(6), 758-767. https://doi.org/10.1002/fsn3.168

Dalvand, M. J., Mohtasebi, S. S., & Rafiee, S. (2014b). Modeling of electrohydrodynamic drying process using response surface methodology. Food Science & Nutrition, 2(3), 200-209. https://doi.org/10.1002/fsn3.96

Darvishi, H., Farhudi, Z., & Behroozi-Khazaei, N. (2017). Mass transfer parameters and modeling of hot air drying kinetics of dill leaves. Chemical Product and Process Modeling, 12(2). https://doi.org/10.1515/cppm-2015-0079

de Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., de Oliveira, H. M., Avelar, R. I. S., & Pio, L. A. S. (2017). Convective drying of cape gooseberry fruits: Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters. LWT-Food Science and Technology, 82, 404-410. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.072

Defraeye, T., & Martynenko, A. (2018a). Future perspectives for electrohydrodynamic drying of biomaterials. Drying Technology, 36(1), 1-10. https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1326130

Defraeye, T., & Martynenko, A. (2018b). Electrohydrodynamic drying of food: New insights from conjugate modeling. Journal of Cleaner Production, 198, 269-284. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.250

Defraeye, T., & Martynenko, A. (2019). Electrohydrodynamic drying of multiple food products: Evaluating the potential of emitter-collector electrode configurations for upscaling. Journal of Food Engineering, 240, 38-42. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.011

Demiray, E., & Tulek, Y. (2012). Thin-layer drying of tomato (Lycopersicum esculentum Mill. cv. Rio Grande) slices in a convective hot air dryer. Heat and Mass Transfer, 48(5), 841-847. https://doi.org/10.1007/s00231-011-0942-1

Dinani, S. T., & Havet, M. (2015a). The influence of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the kinetics and energy consumption of mushroom slices. Journal of Cleaner Production, 95, 203-211. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.033

Dinani, S. T., & Havet, M. (2015b). Effect of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices. Industrial Crops and Products, 70, 417-426. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.047

Dinani, S. T., Hamdami, N., Shahedi, M., & Havet, M. (2014). Mathematical modeling of hot air/electrohydrodynamic (EHD) drying kinetics of mushroom slices. Energy Conversion and Management, 86, 70-80. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.010

Dinani, S. T., Hamdami, N., Shahedi, M., & Havet, M. (2015a). Quality assessment of mushroom slices dried by hot air combined with an electrohydrodynamic (EHD) drying system. Food and Bioproducts Processing, 94, 572-580. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.08.004

Dinani, S. T., Hamdami, N., Shahedi, M., Havet, M., & Queveau, D. (2015b). Influence of the electrohydrodynamic process on the properties of dried button mushroom slices: A differential scanning calorimetry (DSC) study. Food and Bioproducts Processing, 95, 83-95. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.04.001

Ding, C., Lu, J., & Song, Z. (2015). Electrohydrodynamic drying of carrot slices. PLoS One, 10(4), e0124077. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124077

Ding, C., Lu, J., Song, Z., & Bao, S. (2014). The drying efficiency of electrohydrodynamic (EHD) systems based on the drying characteristics of cooked beef and mathematical modeling. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 46(3), 455-461. https://doi.org/10.3233/JAE-141781

Doymaz, İ. (2013). Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. International Journal of Food Science & Technology, 48(9), 1909-1915. https://doi.org/10.1111/ijfs.12170

Doymaz, İ. (2017). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. Heat and Mass Transfer, 53(1), 25-35. https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8

Elmizadeh, A., Shahedi, M., & Hamdami, N. (2017). Comparison of electrohydrodynamic and hot-air drying of the quince slices. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 43, 130-135. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.030

Elmizadeh, A., Shahedi, M., & Hamdami, N. (2018). Quality assessment of electrohydrodynamic and hot-air drying of quince slice. Industrial Crops and Products, 116, 35-40. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.048

Ergün, K., Çalışkan, G., & Dirim, S. N. (2016). Determination of the drying and rehydration kinetics of freeze dried kiwi (Actinidia deliciosa) slices. Heat and Mass Transfer, 52, 2697-2705. https://doi.org/10.1007/s00231-016-1773-x

Esehaghbeygi, A. (2012). Effect of electrohydrodynamic and batch drying on rice fissuring. Drying Technology, 30(14), 1644-1648. https://doi.org/10.1080/07373937.2012.701262

Esehaghbeygi, A., & Basiry, M. (2011). Electrohydrodynamic (EHD) drying of tomato slices (Lycopersicon esculentum). Journal of Food Engineering, 104(4), 628-631. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.032

Fante, L., & Noreña, C. P. Z. (2015). Quality of hot air dried and freeze-dried of garlic (Allium sativum L.). Journal of Food Science and Technology, 52(1), 211-220. https://doi.org/10.1007/s13197-013-1025-8

FAO (2023, Nisan 14) Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/faostat/en/

Feng, Y., Xu, B., Yagoub, A. E. A., Ma, H., Sun, Y., Xu, X., Yu, X., & Zhou, C. (2021). Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic. Food Chemistry, 343, 128404. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128404

Feng, Y., Zhou, C., Yagoub, A. E. A., Sun, Y., Owusu-Ansah, P., Yu, X., Wang, X., Xu, X., Zhang, J., & Ren, Z. (2019). Improvement of the catalytic infrared drying process and quality characteristics of the dried garlic slices by ultrasound-assisted alcohol pretreatment. LWT, 116, 108577. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108577

Gebreyohannes, G., & Gebreyohannes, M. (2013). Medicinal values of garlic: A review. International Journal of Medicine and Medical Sciences, 5(9), 401-408. https://doi.org/10.5897/IJMMS2013.0960

Guiné, R. P. (2011). Influence of drying method on some physical and chemical properties of pears. International Journal of Fruit Science, 11(3), 245-255. https://doi.org/10.1080/15538362.2011.608295

Gull, A., Prasad, K., & Kumar, P. (2017). Drying kinetics of millet, poamce and wheat based pasta and its effect on microstructure, color, water absorption and pasting properties. Journal of Food Measurement and Characterization, 11(2), 675-684. https://doi.org/10.1007/s11694-016-9437-6

Hashinaga, F., Bajgai, T. R., Isobe, S., & Barthakur, N. N. (1999). Electrohydrodynamic (EHD) drying of apple slices. Drying Technology, 17(3), 479-495. https://doi.org/10.1080/07373939908917547

Hidar, N., Ouhammou, M., Mghazli, S., Idlimam, A., Hajjaj, A., Bouchdoug, M., Jaouad, A., & Mahrouz, M. (2020). The impact of solar convective drying on kinetics, bioactive compounds and microstructure of stevia leaves. Renewable Energy, 161, 1176-1183. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.124

Hossain, M. A., Woods, J. L., & Bala, B. K. (2007). Single-layer drying characteristics and colour kinetics of red chilli. International Journal of Food Science & Technology, 42(11), 1367-1375. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01414.x

Hu, Y., Huang, Q., & Bai, Y. (2013). Combined electrohydrodynamic (EHD) and vacuum freeze drying of shrimp. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 418, No. 1, p. 012143). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1742-6596/418/1/012143

Huang, M., & Lai, F. C. (2010). Numerical study of EHD-enhanced water evaporation. Journal of Electrostatics, 68(4), 364-370. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2010.05.003

İlter, I., Akyıl, S., Devseren, E., Okut, D., Koç, M., & Ertekin, F. K. (2018). Microwave and hot air drying of garlic puree: drying kinetics and quality characteristics. Heat and Mass Transfer, 54(7), 2101-2112. https://doi.org/10.1007/s00231-018-2294-6

Iranshahi, K., Martynenko, A., & Defraeye, T. (2020). Cutting-down the energy consumption of electrohydrodynamic drying by optimizing mesh collector electrode. Energy, 208, 118168. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118168

Iranshahi, K., Onwude, D. I., Martynenko, A., & Defraeye, T. (2022). Dehydration mechanisms in electrohydrodynamic drying of plant-based foods. Food and Bioproducts Processing, 131, 202-216. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.11.009

İsmail, O., Figen, A. K., & Pişkin, S. (2017). Open sun drying of green bean: influence of pretreatments on drying kinetics, colour and rehydration capacity. Heat and Mass Transfer, 53(4), 1277-1288. https://doi.org/10.1007/s00231-016-1899-x

İzli, G. (2018). Farklı kurutma uygulamalarının armut meyvesinin bazı kalite özellikleri üzerine etkileri. Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi. https://doi.org/10.24925/turjaf.v6i4.479-485.1800

Ju, H. Y., Zhao, S. H., Mujumdar, A. S., Zhao, H. Y., Duan, X., Zheng, Z. A., Gao, Z. J., & Xiao, H. W. (2020). Step-down relative humidity convective air drying strategy to enhance drying kinetics, efficiency, and quality of American ginseng root (Panax quinquefolium). Drying Technology, 38(7), 903-916. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1597373

Kamkari, B., & Alemrajabi, A. A. (2010). Investigation of electrohydrodynamically-enhanced convective heat and mass transfer from water surface. Heat Transfer Engineering, 31(2), 138-146. https://doi.org/10.1080/01457630903285401

Khuriati, A., & Fachriyah, E. (2018, May). Electrohydrodynamic (edh) drying of ginger slices (zingiber officinale). In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1025, No. 1, p. 012015). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1025/1/012015

Kirschvink-Kobayashi, A., & Kirschvink, J. L. (1986). Electrostatic enhancement of industrial drying processes. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 25(4), 1027-1030.

Kudra, T., & Martynenko, A. (2015). Energy aspects in electrohydrodynamic drying. Drying Technology, 33(13), 1534-1540. https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1009540

Kudra, T., & Martynenko, A. (2020). Electrohydrodynamic drying: Theory and experimental validation. Drying Technology, 38(1-2), 168-175. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1628773

Kumar, D., & Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. Foods, 6(1), 8. https://doi.org/10.3390/foods6010008

Kumar, P. S., Nambi, E., Shiva, K. N., Vaganan, M. M., Ravi, I., Jeyabaskaran, K. J., & Uma, S. (2019). Thin layer drying kinetics of Banana var. Monthan (ABB): Influence of convective drying on nutritional quality, microstructure, thermal properties, color, and sensory characteristics. Journal of Food Process Engineering, 42(4), e13020. https://doi.org/10.1111/jfpe.13020

Lebovka, N. I., Shynkaryk, N. V., & Vorobiev, E. (2007). Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. Journal of Food Engineering, 78(2), 606-613. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.032

Li, B., Li, X., Zhao, Y., Xiong, X., & Ding, X. (2022). Characteristics and mathematical modeling of apple slice drying in an electrohydrodynamic system with a needle-plate electrode. Journal of Food Process Engineering, e14049. https://doi.org/10.1111/jfpe.14049

Li, F. D., Li, L. T., Sun, J. F., & Tatsumi, E. (2005). Electrohydrodynamic (EHD) drying characteristic of okara cake. Drying Technology, 23(3), 565-580. https://doi.org/10.1081/DRT-200054133

Li, L. T., Sun, J. F., & Tatsumi, E. (2006). Effect of electrohydrodynamic (EHD) technique on drying process and appearance of okara cake. Journal of Food Engineering, 77(2), 275-280. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.028

López-Ortiz, A., Rodriguez-Ramirez, J., & Mendez-Lagunas, L. L. (2013). Effects of drying air temperature on the structural properties of garlic evaluated during drying. International Journal of Food Properties, 16(7), 1516-1529. https://doi.org/10.1080/10942912.2011.599090

Ly, B. C. K., Dyer, E. B., Feig, J. L., Chien, A. L., & Del Bino, S. (2020). Research techniques made simple: cutaneous colorimetry: a reliable technique for objective skin color measurement. Journal of Investigative Dermatology, 140(1), 3-12. https://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003

Malakar, S., Arora, V. K., & Nema, P. K. (2021). Design and performance evaluation of an evacuated tube solar dryer for drying garlic clove. Renewable Energy, 168, 568-580. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.068

Martynenko, A., & Kudra, T. (2016). Electrically-induced transport phenomena in EHD drying–A review. Trends in Food Science & Technology, 54, 63-73. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.019

Martynenko, A., & Kudra, T. (2021). Alternating versus direct current in electrohydrodynamic drying. Drying Technology, 1-14. https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1942899

Martynenko, A., & Misra, N. N. (2021). Thermal phenomena in electrohydrodynamic (EHD) drying. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 74, 102859. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102859

Martynenko, A., & Zheng, W. (2016). Electrohydrodynamic drying of apple slices: Energy and quality aspects. Journal of Food Engineering, 168, 215-222. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.07.043

Martynenko, A., Astatkie, T., & Defraeye, T. (2020). The role of convection in electrohydrodynamic drying. Journal of Food Engineering, 271, 109777. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109777

Martynenko, A., Astatkie, T., Riaud, N., Wells, P., & Kudra, T. (2017). Driving forces for mass transfer in electrohydrodynamic (EHD) drying. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 43, 18-25. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.022

Martynenko, A., Bashkir, I., & Kudra, T. (2021). The energy efficiency of electrohydrodynamic (EHD) drying of foods. Trends in Food Science & Technology, 118, 744-764. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.002

Martynenko, A., Iranshahi, K., & Defraeye, T. (2022). Plate versus mesh collecting electrode for electrohydrodynamic (EHD) drying. Drying Technology, 40(13), 2759-2769. https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1962338

Midilli, A., Kucuk H, & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. Drying Technology, 20(7), 1503-1513. https://doi.org/10.1081/DRT-120005864

Mirzaei-Baktash, H., Hamdami, N., Torabi, P., Fallah-Joshaqani, S., & Dalvi-Isfahan, M. (2022). Impact of different pretreatments on drying kinetics and quality of button mushroom slices dried by hot-air or electrohydrodynamic drying. LWT, 155, 112894. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112894

Mota, C. L., Luciano, C., Dias, A., Barroca, M. J., & Guiné, R. P. F. (2010). Convective drying of onion: Kinetics and nutritional evaluation. Food and Bioproducts Processing, 88(2-3), 115-123. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2009.09.004

Murthy, T. P. K., & Manohar, B. (2014). Hot air drying characteristics of mango ginger: Prediction of drying kinetics by mathematical modeling and artificial neural network. Journal of Food Science and Technology, 51(12), 3712-3721. https://doi.org/10.1007/s13197-013-0941-y

Nadery Dehsheikh, F., & Taghian Dinani, S. (2020). Influence of coating pretreatment with carboxymethyl cellulose in an electrohydrodynamic system on convective drying of banana slices. Journal of Food Process Engineering, 43(2), e13308. https://doi.org/10.1111/jfpe.13308

Nasrabadi, M. N., Esehaghbeygi, A., & Hajisadeghian, A. (2023). The Pin-Electrode Number and Current Electricity Effect on the Drying Process of Zucchini Slices by the Electric Field. Agricultural Research, 12(1), 116-125. https://doi.org/10.1007/s40003-022-00623-w

Ni, J., Ding, C., Zhang, Y., & Song, Z. (2020a). Impact of different pretreatment methods on drying characteristics and microstructure of goji berry under electrohydrodynamic (EHD) drying process. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 61, 102318. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102318

Ni, J., Ding, C., Zhang, Y., Cao, Z., Song, Z., Hu, X., & Hao, T. (2020c). Infrared Spectrum Analysis of Goji Berry during Electrohydrodynamic Drying. Journal of Spectroscopy, 2020, 1-9. https://doi.org/10.1155/2020/4395425

Ni, J., Ding, C., Zhang, Y., Song, Z., & Xu, W. (2020d). Influence of ultrasonic pretreatment on electrohydrodynamic drying process of goji berry. Journal of Food Processing and Preservation, 44(8), e14600. https://doi.org/10.1111/jfpp.14600

Ni, J., Ding, C., Zhang, Y., Song, Z., Hu, X., & Hao, T. (2019). Electrohydrodynamic drying of chinese wolfberry in a multiple needle-to-plate electrode system. Foods, 8(5), 152. https://doi.org/10.3390/foods8050152

Ni, J., Ding, C., Zhang, Y., Song, Z., Hu, X., & Hao, T. (2020b). Effect of electrohydrodynamic partially combined with oven drying on Chinese wolfberry. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 63(3), 465-482. https://doi.org/10.3233/JAE-190066

Nozad, M., Khojastehpour, M., Tabasizadeh, M., Azizi, M., Ashtiani, S. H. M., & Salarikia, A. (2016). Characterization of hot-air drying and infrared drying of spearmint (Mentha spicata L.) leaves. Journal of Food Measurement and Characterization, 10(3), 466-473. https://doi.org/10.1007/s11694-016-9325-0

Onwude, D. I., Iranshahi, K., Rubinetti, D., Martynenko, A., & Defraeye, T. (2021). Scaling-up electrohydrodynamic drying for energy-efficient food drying via physics-based simulations. Journal of Cleaner Production, 329, 129690. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129690

Ould Ahmedou, S. A., Rouaud, O., & Havet, M. (2009). Assessment of the electrohydrodynamic drying process. Food and Bioprocess Technology, 2(3), 240-247. https://doi.org/10.1007/s11947-008-0078-6

Özaydin, A. G., & Özçelik, S. (2014). Armutun bazı fizikokimyasal özellikleri üzerine fırında kurutma işleminin etkisi. Akademik Gıda, 12(4), 17-26.

Özaydin, A., & Özçelik, S. (2016). Farklı kurutma koşullarının bazı önemli armut çeşitlerinin mikrobiyolojik kalitesi üzerine etkilerinin araştırılması. Meyve Bilimi, 3(1), 37-44.

Öztekin, Y. B., & Sacilik, K. (2020). Drying characteristics of'Ankara'pear slices. Italian Journal of Food Science, 32(1). https://doi.org/10.14674/IJFS-1697

Paul, A., Astatkie, E., & Martynenko, A. (2022). Electrohydrodynamic drying of fruit slices: Effect on drying kinetics, energy consumption, and product quality. Journal of Food Processing and Preservation, 46(10), e16812. https://doi.org/10.1111/jfpp.16812

Perea-Flores, M. J., Garibay-Febles, V., Chanona-Perez, J. J., Calderon-Dominguez, G., Mendez-Mendez, J. V., Palacios-González, E., & Gutierrez-Lopez, G. F. (2012). Mathematical modelling of castor oil seeds (Ricinus communis) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. Industrial Crops and Products, 38, 64-71. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.008.

Pirnazari, K., Esehaghbeygi, A., & Sadeghi, M. (2016). Modeling the electrohydrodynamic (EHD) drying of banana slices. International Journal of Food Engineering, 12(1), 17-26. https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0005

Proietti, N., Adiletta, G., Russo, P., Buonocore, R., Mannina, L., Crescitelli, A., & Capitani, D. (2018). Evolution of physicochemical properties of pear during drying by conventional techniques, portable-NMR, and modelling. Journal of Food Engineering, 230, 82-98. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.028

Qu, J., Zhang, J., Li, M., & Tao, W. (2020). Heat dissipation of electronic components by ionic wind from multi-needle electrodes discharge: Experimental and multi-physical analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer, 163, 120406. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120406

Rahaman, A., Siddeeg, A., Manzoor, M. F., Zeng, X. A., Ali, S., Baloch, Z., Li, J., & Wen, Q. H. (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(5), 2670-2678. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03755-0

Rahman, K., & Lowe, G. M. (2006). Garlic and cardiovascular disease: a critical review. The Journal of nutrition, 136(3), 736S-740S. https://doi.org/10.1093/jn/136.3.736S

Rahman, M. S. (2020). Food preservation: an overview. Handbook of food preservation, 7-18. https://doi.org/10.1201/9780429091483

Sacilik, K., & Unal, G. (2005). Dehydration characteristics of Kastamonu garlic slices. Biosystems Engineering, 92(2), 207-215. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.06.006.

Santos, S. C., Guiné, R. P., & Barros, A. (2014). Effect of drying temperatures on the phenolic composition and antioxidant activity of pears of Rocha variety (Pyrus communis L.). Journal of Food Measurement and Characterization, 8, 105-112. https://doi.org/10.1007/s11694-014-9170-y

Santos, S. C., Guiné, R. P., & Barros, A. I. (2013). Influence of Drying on the Properties of Pears of the Rocha Variety (Pyrus communis). International Journal of Food Engineering, 9(2), 197-207. https://doi.org/10.1515/ijfe-2012-0171

Sharma, G. P., & Prasad, S. (2001). Drying of garlic (Allium sativum) cloves by microwave–hot air combination. Journal of Food Engineering, 50(2), 99-105. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00200-4

Sharma, G. P., & Prasad, S. (2006). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. Journal of Food Engineering, 75(4), 441-446. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.029

Singh, A., Orsat, V., & Raghavan, V. (2012). A comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food

and bioprocessing. Drying Technology, 30(16), 1812-1820. https://doi.org/10.1080/07373937.2012.708912

Singh, A., Vanga, S. K. K., Raveendran Nair, G., Gariepy, Y., Orsat, V., & Raghavan, V. (2017). Electrohydrodynamic drying of sand. Drying Technology, 35(3), 312-322. https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1170028

Singh, A., Vanga, S. K., Nair, G. R., Gariepy, Y., Orsat, V., & Raghavan, V. (2015). Electrohydrodynamic drying (EHD) of wheat and its effect on wheat protein conformation. LWT-Food Science and Technology, 64(2), 750-758. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.051

Singh, S., & Kumar, S. (2013). Solar drying for different test conditions: Proposed framework for estimation of specific energy consumption and CO2 emissions mitigation. Energy, 51, 27-36. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.006

Sriariyakul, W., Swasdisevi, T., Devahastin, S., & Soponronnarit, S. (2016). Drying of aloe vera puree using hot air in combination with far-infrared radiation and high-voltage electric field: Drying kinetics, energy consumption and product quality evaluation. Food and Bioproducts Processing, 100, 391-400. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.08.012

Taghian Dinani, S., Havet, M., Hamdami, N., & Shahedi, M. (2014). Drying of mushroom slices using hot air combined with an electrohydrodynamic (EHD) drying system. Drying Technology, 32(5), 597-605. https://doi.org/10.1080/07373937.2013.851086

Tao, Y., Zhang, J., Jiang, S., Xu, Y., Show, P. L., Han, Y., Ye X., & Ye, M. (2018). Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation. Journal of Food Engineering, 235, 79-88. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.028

Taşkın, O., İzli, G., & İzli, N. (2018). Convective drying kinetics and quality parameters of European cranberrybush. Journal of Agricultural Sciences, 24(3), 349-358. https://doi.org/10.15832/ankutbd.456654.

TÜİK (2023 Nisan 14), Türkiye İstatistik Kurumu. https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1

Udomkun, P., Nagle, M., Argyropoulos, D., Wiredu, A. N., Mahayothee, B., & Müller, J. (2017). Computer vision coupled with laser backscattering for non-destructive colour evaluation of papaya during drying. Journal of Food Measurement and Characterization, 11(4), 2142-2150. https://doi.org/10.1007/s11694-017-9598-y

Vega-Gálvez, A., Zura-Bravo, L., Lemus-Mondaca, R., Martinez-Monzó, J., Quispe-Fuentes, I., Puente, L., & Di Scala, K. (2015). Influence of drying temperature on dietary fibre, rehydration properties, texture and microstructure of Cape gooseberry (Physalis peruviana L.). Journal of Food Science and Technology, 52(4), 2304-2311. https://doi.org/10.1007/s13197-013-1235-0

Xiao, A., & Ding, C. (2022). Effect of Electrohydrodynamic (EHD) on Drying Kinetics and Quality Characteristics of Shiitake Mushroom. Foods, 11(9), 1303. https://doi.org/10.3390/foods11091303

Xiao, H. W., Gao, Z. J., Lin, H. A. I., & Yang, W. X. (2010). Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes. Journal of Food Process Engineering, 33(5), 899-918. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00314.x

Xiao, H. W., Law, C. L., Sun, D. W., & Gao, Z. J. (2014). Color change kinetics of American ginseng (Panax quinquefolium) slices during air impingement drying.

Drying Technology, 32(4), 418-427. https://doi.org/10.1080/07373937.2013.834928

Yang, J., Bai, A., Zhao, C., & Wen, W. (2021a). Effects of electrohydrodynamic drying and prefreezing pretreatment on physicochemical and functional properties of potato flours. Journal of Food Processing and Preservation, 45(6), e15562. https://doi.org/10.1111/jfpp.15562

Yang, K. S., Hamid, K., Wu, S. K., Sajjad, U., & Wang, C. C. (2021b). Experimental analysis of a heat pump dryer with an external desiccant wheel dryer. Processes, 9(7), 1216. https://doi.org/10.3390/pr9071216

Yang, M., & Ding, C. (2016). Electrohydrodynamic (EHD) drying of the Chinese wolfberry fruits. SpringerPlus, 5(1), 1-20. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2546-1

Yang, M., Ding, C., & Zhu, J. (2017). The drying quality and energy consumption of Chinese wolfberry fruits under electrohydrodynamic system. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 55(1), 101-112. https://doi.org/10.3233/JAE-170010

Yi, J., Zhou, L., Bi, J., Chen, Q., Liu, X., & Wu, X. (2016). Impacts of pre-drying methods on physicochemical characteristics, color, texture, volume ratio, microstructure and rehydration of explosion puffing dried pear chips. Journal of Food Processing and Preservation, 40(5), 863-873. https://doi.org/10.1111/jfpp.12664

Younis, M., Abdelkarim, D., & El-Abdein, A. Z. (2018). Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. Saudi Journal of Biological Sciences, 25(2), 332-338. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.06.011

Yousaf, K., Liu, H., Gao, X., Liu, C., Abbas, A., Nyalala, I., Ahmad, M., Ameen, M., & Chen, K. (2020). Influence of environmental conditions on drying efficiency and heat pump performance in closed and open loop drying of paddy. Drying Technology, 38(16), 2217-2230. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1691011

Yu, H., Bai, A., Yang, X., & Wang, Y. (2018). Electrohydrodynamic drying of potato and process optimization. Journal of Food Processing and Preservation, 42(2), e13492. https://doi.org/10.1111/jfpp.13492

Zamani, E., Mehrabani-Zeinabad, A., & Sadeghi, M. (2019). Sensitivity analysis pertaining to effective parameters on electrohydrodynamic drying of porous shrinkable materials. Drying Technology, 37(14), 1821-1832. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1541902