


Termosonikasyon ve Mikrodalga Ön İşlemlerinin Kırmızı Pancar (*Beta vulgaris L.*) Pestilinin İnce Tabaka Kuruma Kinetiği Üzerine Etkileri

Neslihan Ersoyak¹ , Elif Koç Alibaşoğlu¹ , Büşra Acoğlu Çelik^{1,2} , Perihan Yolcu Ömeroğlu^{1,2}  ✉

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bursa

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bursa

Geliş Tarihi (Received): 27.11.2024, Kabul Tarihi (Accepted): 28.12.2024

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): pyomeroglu@uludag.edu.tr (P. Yolcu Ömeroğlu)

☎ +90 224 294 1401 📠 +90 224 294 1402

ÖZ

Meyve ve sebzelerin zengin biyoaktif bileşenler içermesi, pestillerin fonksiyonel bir atıştırılabilirlik olarak tüketilmesini cazip kılmaktadır. Koyu kırmızı bir kök sebzesi olan pancar (*Beta vulgaris L.*), sağlık üzerindeki olumlu etkileri ve zengin besin içeriği ile son yıllarda dikkat çekmiştir. Bu çalışmanın amacı, termosonikasyon ve mikrodalga ön işlemlerinin fonksiyonel bir atıştırılabilirlik olarak geliştirilen kırmızı pancar pestilinin ince tabaka kuruma kinetiği üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Ayrıca ön işlem süresini ve etkisini azaltmak için pestil herlesinin suda çözünür kuru madde oranını geleneksel yöntemlerde uygulanan 40°Brix (Bx) değerinden 15-20°Bx'e düşürme olanağının irdelenmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışma sırasında pestil herlesine uygulanan ön işlemlere bağlı olarak kuruma süresi 75-120 dakika arasında değişmiştir. Geleneksel haşlama yöntemine alternatif olarak uygulanan termosonikasyon ön işlemi, kuruma süresini %4-10 aralığında azaltmıştır. Kuruma süresi, termosonikasyon ve mikrodalga ön işleme yöntemlerinin birlikte uygulanmasıyla %12-22 aralığında azalmıştır. Dolayısıyla farklı ön işlem uygulamaları, kırmızı pancar pestillerinin kuruma süresi ve buna bağlı olarak kuruma hızını etkilemiştir. Kırmızı pancar pestillerinin kuruma davranışına en uygun ince tabaka matematiksel modellerinin belirlendiği çalışmada, ön işlem koşulları değiştikçe kurutma kinetiğini açıklayan en uygun model de değişmiştir. Pestillerin efektif nem difüzyon katsayısı (m^2/s) 8.91×10^{-8} - 1.14×10^{-7} arasında değişmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kırmızı pancar, Pestil, Mikrodalga, Termosonikasyon, İnce tabaka kurutma modelleri

Effects of Thermosonication and Microwave Pre-treatments on Thin Layer Drying Kinetics of Red Beetroot (*Beta vulgaris L.*) Pestils

ABSTRACT

The rich bioactive components found in fruits and vegetables make pestils an attractive option as a functional snack. Beetroot (*Beta vulgaris L.*), a dark red root vegetable, has received a great attention in recent years due to its positive health effects and rich nutritional content. The aim of this study is to investigate the effects of thermosonication and microwave pre-treatments on the thin-layer drying kinetics of red beetroot pestil developed as a functional snack. Additionally, it aims to explore the possibility of reducing the water-soluble dry matter content of the pestil pulp from the traditionally applied 40°Brix (Bx) to 15-20°Bx to minimize pre-treatment time and influence. During the study, the drying time of the pestil pulp varied between 75 and 120 min depending on the pretreatments applied. Thermosonication pre-treatment, used as an alternative to the conventional blanching method, reduced the drying time by 4-10%. When thermosonication and microwave pretreatment methods were applied together, the drying time decreased by 12-22%. Therefore, different pretreatment applications influenced the drying time and, consequently, the drying rate of red beetroot pestils. In the study, which identified the most suitable thin-layer mathematical models for the drying behavior of red beetroot pestils, the optimal model explaining the drying kinetics changed as the pre-treatment conditions varied. The effective moisture diffusion coefficient (m^2/s) of the pestils ranged between 8.91×10^{-8} and 1.14×10^{-7} .

Keywords: Red beet, Pestil, microwave, Thermosonication, Thin layer drying models

GİRİŞ

Günümüz endüstrisi; artan dünya nüfusu ile birlikte tüketime hazır gıda çeşitliliğinin artırılmasına odaklanmıştır. Bununla birlikte, sağlıklı beslenmeye olan taleplerin karşılanması için ise çevre dostu yaklaşımlar ile enerji ve zaman tasarrufu sağlayacak ve aynı zamanda kaliteli ürünler geliştirecek çalışmaları da ele almaya başlamıştır. Global fonksiyonel ürün pazarının 2030 yılında 285.3 milyon Dolar hacmine ulaşması beklendiğinden [1] bu yükselişe geçen pazara yenilikçi ürün alternatifinin eklenmesi, bilimsel olarak ürün ve proses detaylarının incelenmesi çok önemlidir. Ürünlerin fonksiyonel özelliklerinin ortaya koyulması, geliştirilmesi ve üretim metotlarının optimize edilmesi gibi hususlar ele alınmalıdır ve tüketim oranlarının artırılması için farkındalık yaratma çalışmalarına devam edilmelidir [2].

Chenopodiaceae familyasının koyu kırmızı bir kök sebzesi olan pancar (*Beta vulgaris L.*), sağlık üzerine olumlu etkileri ve zengin besin içeriği ile son yıllarda bilim dünyasının ilgisini çekmektedir. Vitaminler, mineraller, fenoller, karotenoidler, nitrat, askorbik asit ve betalainler gibi temel bileşenleri içeren, bitki dünyasının en zengin gıdalarından biridir [3, 4, 5]. Pancar yaygın olarak sebze formunda tüketilse de çeşitli mutfak ve beslenme amaçları için meyve suyu, turşu, toz ve gıda takviyeleri formuna da işlenebilmektedir [5-10]. Buna rağmen kırmızı pancarın zengin sağlıklı atıştırılabilir formülasyonlarında daha fazla yer alması gerektiği düşünülmektedir. Diğer taraftan kırmızı pancar ürüne işlendiği zaman terapötik etkilerinin korunması için buna uygun optimum koşulların seçilmesi önem arz etmektedir [11].

Pestil, meyve pulpuna şeker ve nişasta gibi katkı maddelerinin eklenerek koyulaştırılmasından sonra kurutulmasıyla üretilen geleneksel üründür. Pestillerin uzun raf ömrüne sahip olması, kurutma sonrası gelişen hacim küçülmesi, ağırlığının azalması ve paketlenme aşamasının kolay olması gibi özellikleri tercih edilmesini artırmıştır. Üretildiği meyve ve sebzelerin, zengin biyoaktif bileşenleri içermesi, pestillerin fonksiyonel atıştırılabilir olarak kullanımını cazip kılmaktadır [12-14]. Literatürde çeşitli meyve ve sebzelerden üretilmiş sağlıklı atıştırılabilir kategorisinde sıralanabilecek pestiller üzerine çalışmalar mevcuttur [12, 14-19]. Ancak, literatürde yapılan çalışmalarda ve marketlerde kırmızı pancarından elde edilen fonksiyonel pestil gibi yenilikçi alternatif bir geleneksel ürün bulunmamaktadır.

Kurutma, gıda ürünlerini korumanın geleneksel yollarından biridir. Kurutmanın temel amacı bünyesindeki suyun gıda matrisinden kısmen uzaklaştırılması, sonuç olarak raf ömrünün uzatılması ve gıda bozulmasının önlenmesidir [20]. Kurutma sayesinde, gıdanın hacim ve ağırlığında azalma, buna bağlı olarak ambalaj boyutunda küçülme, nakliyede ve depolamada daha düşük maliyet ve kolaylık gibi avantajlar sağlanmaktadır [21]. Öte yandan, kurutma işlemi, gıdadaki fiziksel ve biyokimyasal değişikliklere bağlı olarak nihai ürünün kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Gıda matrisindeki bu değişiklikler, kuruma süresi, sıcaklık ve ürünün su aktivitesi gibi faktörlerden etkilenmektedir [22]. Kurutmayı hızlandırmak, enzimlerin etkin bir şekilde

inaktivasyonunu sağlamak ve oksidasyona engel olmak amacıyla kurutmadaki bazı dezavantajları azaltmak ve gidermek adına kurutma öncesi ön-muamele teknikleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır [23]. Konvansiyonel ön işlemler genellikle sıcak su ile haşlama, buharda haşlama, hiperözotik solüsyon, alkali solüsyonlar, sülfatlama ve asit ile muameleleri içerir. Bu ön işlemlerin, kuruma süresini kısaltarak ve kaliteyi artırarak kurutma işlemi üzerinde olumlu etkileri olmasına rağmen, özellikle uzun süreli kurutma sırasında kimyasal absorpsiyon, kalite bozulması, yetersiz rehidrasyon, yapısal çökme, besin kayıpları ve yüksek enerji tüketimi gibi olası sorunları da ortaya çıkarabilmektedir. Dolayısıyla, kurutma prosesini daha da iyileştirmek ve geliştirmek için yeni ısı ve ısı olmayan ön işlemler de araştırılmaktadır. Yeni ön işlem tekniklerinin geliştirilmesi ve uygulanması, kuruma süresini kısaltmakla birlikte kuruma hızını artırmaktadır, nem dağılımını iyileştirmektedir ve enerji tüketimini azaltmaktadır. Aynı zamanda kurutulmuş ürünlerin fonksiyonel ve besinsel kalite özelliklerini gelenekselden daha iyi hale getirebilmektedir [24]. Bu tip ihtiyaçlar doğrultusunda, soğuk plazma (CP), darbeli elektrik alanı (PEF), yenilebilir film kaplama, termal olmayan ultrasonikasyon, yüksek nemli sıcak havayla haşlama (HHAIB), kızılötesi haşlama (IRB) ve mikrodalga (MW) gibi alternatif termal teknikler araştırılmıştır [24]. Ultrases, 20 kHz veya daha yüksek sonik dalgalarla üretilen bir enerji şeklidir [24]. Meyve sebzelerin kurutulma işlemlerinden önce US ile ön muamelesinin, gıda kalitesini geliştirici etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Böylece kurutma süresinde azalma, enerji tüketiminde tasarruf ve kurutulmuş ürün kalitesinin korunması sağlanır [24-27]. Mikrodalgalar, 300 MHz ila 300 GHz arasında değişen frekansa sahip elektromanyetik dalgalardır. Gıda endüstrisindeki uygulamaları, işleme süresinin azaltılması, ısıtma verimliliği, güvenli kullanım ve kolaylığı, kalitede iyileşme ve suda çözünür besin kayıplarını azaltma gibi avantajlar nedeniyle büyük popülerlik kazanmıştır [28]. Bu nedenle mikrodalga, yüzey neminin hızla giderilmesi için bir ön işlem tekniği olarak tavsiye edilmektedir [24]. Literatürde, farklı işleme tekniklerinin kırmızı pancarın kuruma kinetiği üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Yapılan bir çalışmada, kırmızı pancar dilimlerine farklı sıcaklık ve sürelerde (65°C ve 85°C'de 10-15 dakika) sıcak su ile haşlama ve ultrasonikasyon (5-10 dakika 40 kHz) ön işlemleri uygulanmış, ardından dondurarak kurutma tekniği ile kurutma gerçekleştirilmiştir. Bu ön işlemler sonrasında haşlama uygulanan örneklerde büzülme oranının azaldığı, aynı zamanda gözenekliliğin arttığı gözlemlenmiştir [29]. Başka bir çalışmada mikrodalga ön işleminin kırmızı pancarın kuruma süresi, kimyasal bileşenler ve besin içeriği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kırmızı pancarın suda haşlama ve mikrodalga (600 W) ön işlemine tabi tutulduktan sonra kurutulması karşılaştırılmış ve mikrodalga ön işleminin, besin bileşenlerinin korunmasına yardımcı olduğu belirtilmiştir [30]. Ayrıca, farklı mikrodalga güçlerinin kırmızı pancar püresinin kuruma karakteristiği üzerine etkileri incelenmiş ve mikrodalga işleminin kuruma süresini önemli ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır [31]. Bu tür ön işlemler, kırmızı pancar ürünlerinin kalitesini iyileştirebilecek potansiyel yöntemler olarak öne çıkmaktadır.

İnce tabaka kurutma modelleri, gıda ve tarım ürünlerinin kurutma kinetiğinin analiz edilmesine yardımcı olarak, ürün kalitesinin korunmasına, hasat ve işleme sırasında ortaya çıkabilecek kayıpların azaltılmasına destek olabilecek yaklaşımlardır [32]. İnce tabaka kurutma denklemleri teorik, yarı teorik ve ampirik modeller olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadırlar [32, 33]. İnce tabaka kurutma modelleri gıdaların ve pestillerin kurutulması sırasında başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmalarda hint inciri pestillerinin kuruma kinetiğini açıklayan en uygun modelin Page modeli olduğu [34], muşmula, dut, havuçlu kırmızıbiber biberli pestilinin kurutulmasının incelendiği çalışmada Page ve Modifiye Page modelleri [13, 35, 36], kivi, muşmula ve mango pestillerinde Midilli modelinin uygun olduğu [14, 37] sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın amacı elma (doğal tatlandırıcı) ve tapyoka nişastasını (kıvam artırıcı) kullanarak kırmızı pancar pestil formülasyonunu optimize etmek ve geleneksel haşlama ön işlemine alternatif olarak mikrodalga ve termosonikasyon kullanımının ince tabaka kuruma kinetiğine olan etkisini irdelenmektir.

MATERYAL ve METOT

Materyal

Çalışma için kullanılan kırmızı pancarlar (*Beta vulgaris var. conditiva*) ve elma (*Starkrimson delicious*) Bursa ilinde yerel bir marketten temin edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan kırmızı pancarlar ve elmalar, pestil üretim sürecine kadar, $4.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta buzdolabında 1 ay süreyle saklanmıştır. Diğer hammaddelerden olan sitrik asit Bursa Uludağ Üniversitesi Gıda Mühendisliği Pilot Tesisi'nden temin edilmiştir. Tapyoka nişastası (TMS Organik Gıda San. Tic. Ltd. Şti) ise glutensiz bir

ürün olup Talya Foods isimli internet alışveriş marketten temin edilmiştir.

Pestil Üretimi

Bu çalışma kapsamında yapılan ön denemeler aşamasında, pestil formülasyonunun optimize edilmesi için farklı oranlarda elma, tapyoka nişastası ve kırmızı pancar kullanılmıştır. Üretim aşamasında ise uygulanan haşlama süresi ve yöntemi (açık kazan, termosonikasyon ve mikrodalga), koyulaştırma süresi, hedef briks değerleri (40, 20 ve 15°Bx) ve kurutma sıcaklığı gibi parametreler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ön denemeler aşamasında bu parametrelerin pestilin hedonik açıdan genel kabul edilebilirliği (9: çok fazla beğendim; 1: hiç beğenmedim) üzerine olan etkisi 12 adet eğitimli panelist tarafından analiz edilmiştir [19]. Genel beğenin 7 puan üzerinde elde edildiği nihai formülasyon aşağıda açıklanmıştır ve çalışma kapsamında irdelenecek ön işlemlere ait koşullar Tablo 1'de sunulduğu gibi oluşturulmuştur.

Pestillerin üretimi sırasında, kırmızı pancarların ve elmaların yaprakları ve sapları ayrılmıştır. Meyve ve sebzelerin dış yüzeyi, toprak ve diğer kirliliklerden arındırılmak için etkili bir şekilde yıkanmıştır. Yıkama sonrası kabukları soyulmuştur ve elmaların çekirdekleri çıkarılmıştır. Kırmızı pancarlar ve elmalar, bir sonraki ön işlemler aşamasında kullanılmak üzere $2 \times 2 \times 2$ cm ebatlarında küpler halinde kesilerek hazırlanmıştır. Küp kesilmiş kırmızı pancar (reçetenin ağırlıkça %47'i) ve elma (reçetenin ağırlıkça %47'i) ağırlıkça "1:1" oranında tartılmıştır ve üzerine ağırlıkça "1:1" oranında su ilave edilmiştir. Sonra, açık kazan, termosonikasyon, termosonikasyon ve mikrodalga'nın hibrit uygulanmasını içeren ön haşlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Tablo 1. Ön işlem koşulları

Table 1. Pre-treatment conditions

Koşul	Kurutma Öncesi Uygulanan Ön İşlemler				
	Haşlama	Koyulaştırma ⁶			
	1. Ön İşlem	2. Ön İşlem	Püre Eldesi	Süre (min)	Hedef Son Brix (°)
Kontrol	Açık kazan-15 dk ¹	-	√ ⁴	105	40
1	Termosonikasyon ² - 30 dk	-	√ ⁴	78	40
2	Termosonikasyon ² - 45 dk	-	√ ⁴	58	40
3	Termosonikasyon ² - 30 dk	Mikrodalga ³ -10 dk	√ ⁴	60	40
4	Termosonikasyon ² - 45 dk	Mikrodalga ³ -10 dk	√ ⁴	30	40
5	Açık kazan-15 dk ¹	-	√ ⁴	63	20
6	Termosonikasyon ² - 30 dk	-	√ ⁴	27	20
7	Termosonikasyon ² - 45 dk	-	√ ⁴	6	20
8	Termosonikasyon ² - 30 dk	Mikrodalga ³ -10 dk	√ ⁴	6	20
9	Termosonikasyon ² - 45 dk	Mikrodalga ³ -10 dk	√ ⁴	4	20
10	Termosonikasyon ² - 45 dk	-	√ ⁵	-	15
11	Termosonikasyon ² - 45 dk	Mikrodalga ³ -10 dk	√ ⁵	-	15

¹Atmosferik basınçta açık kazanda 95°C 'de ısıtma işlemi, ²35 kHz frekansta ve 80°C sıcaklıkta termosonikasyon, ³Mikrodalga gücü: 360 W, ⁴1. Ön işlem sırasında kullanılan su ile birlikte püre haline getirilir, ⁵1. Ön işlem sırasında kullanılan su süzildükten sonra kalan meyve ve sebze püre haline getirilir, ⁶Atmosferik basınçta açık kazanda $100-103^\circ\text{C}$ 'de ısıtma işlemi,

¹Heat treatment at 95°C in an open boiler at atmospheric pressure, ²Thermosonication at a frequency of 35 kHz and a temperature of 80°C , ³Microwave power: 360 W, ⁴1. Pureed together with the water used during pre-treatment, ⁵1. After draining the water used during pre-treatment, the remaining fruit and vegetables are pureed. ⁶Heat treatment at $100-103^\circ\text{C}$ in an open boiler at atmospheric pressure

Haşlama amaçlı yapılan birinci aşama ön işlemlerin sonunda yumuşayan kırmızı pancar ve elma, haşlama suyu ile birlikte bir parçalayıcıda (Arzum, İstanbul, Türkiye) püre haline getirilmiştir. Bu işlem kontrol üretimi dahil olmak üzere 1 ve 9. Koşulları içeren tüm üretimlerde uygulanmıştır. 10 ve 11. koşullar uygulanarak gerçekleştirilen üretimde, haşlama suyunun süzülmesinin ardından yumuşayan meyve ve sebzeler mekanik bir parçalayıcı kullanılarak püre haline getirilmiştir. Tüm üretimler sonucu elde edilen pürenin %25'si ayrılarak tapyoka nişastası (reçetenin ağırlıkça %5.8'i) ve sitrik asit (reçetenin ağırlıkça %0.2'i) ile karıştırılmak üzere ayrılmıştır. Geri kalan püre atmosferik basınçta açık kazanda koyulaştırma (100-103°C) işlemine tabi tutulmuştur. Hedef son çözünür kuru madde oranına ulaşmaya yakın bir zamanda, nişasta içeren püre koyulaştırma işlemi sırasında yavaş yavaş eklenmiştir. Bu aşamadan sonra belirlenen kurutma öncesi hedef suda çözünür kuru madde oranına ulaşıldığında koyulaştırma işlemi sonlandırılmıştır. Ancak 10. ve 11. koşullarda koyulaştırma işlemi uygulanmadığından haşlama işlemi sonrasında elde edilen püreye katkı maddeleri eklenip homojen bir şekilde karıştırılarak kurutma işlemine geçilmiştir. Tüm ön işlem koşullarda gerçekleştirilen üretim sonucu elde edilen koyulaştırılmış püreler (pestil herlesi), kurutma işlemi gerçekleştirilinceye kadar, +4°C'de 1-2 gün süreyle düşük yoğunluklu polietilen film ile paketlenmiş ve analiz edilene kadar depolanmıştır.

Ön işlemlerin tamamlanmasının ardından, 25.0±0.5 g koyulaştırılmış püre (herle), 8×8×0.5 cm ebatlarında bir kalıp kullanılarak yağlı kağıt üzerine bir spatül yardımıyla serilmiştir. Daha sonra, kurutma işlemi için %20 nispi nemde ve 70°C'de, 2 m/s hızında konveksiyonel kabin tipi kurutucu (Yücebaş Makine Tic. Ltd. Şti., İzmir) kullanılarak kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi, pestillerin nem içeriğinin 0.90 ile 0.10 g su/g kuru madde (KM) oranına ulaşınca sonlandırılmıştır. Kurutma işlemi boyunca, başlangıçta 15 dakika arayla, daha sonra ise sona yaklaşırken 20 dakika aralıklarla, 0.01 g hassasiyetinde dijital bir terazi (Mettler Toledo, MS3002S) ile tartımlar yapılmış ve nem içeriğinin kuruma boyunca değişimi izlenmiştir. Tartımlar, kısa bir sürede (10 s) gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi tamamlanan pestiller soğutularak 4°C'de depolanmıştır.

Kurutma Kinetiği

Pestil örneklerinin kurutulması sırasında, nem içeriği değerleri Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_t = \frac{(M - KM)}{KM} \quad (1)$$

Burada; M_t kuruma sürecinin "t" zamanındaki pestillerin nem içeriğini (g su/ g KM), M pestillerin "t" anındaki ağırlığını (g), KM ise pestillerin kuru madde miktarını (g) ifade etmektedir.

Pestil örneklerinin kuruma hızı (KH) Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KH = \frac{(M_{t+dt} - M_t)}{dt} \quad (2)$$

Bu eşitlikte KH; kuruma hızı (g su/g KM. dakika), M_{t+dt} ; t+dt zamanındaki nem içeriği (g su/kg KM), d_t kuruma zamanıdır (dakika).

Nem oranının (MR, birimsiz) hesaplanmasında Eşitlik 3 kullanılmıştır.

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (3)$$

Bu eşitlikte, M_e ; denge anındaki nem içeriği (g su/g KM), M_0 ; başlangıçtaki nem içeriğidir (g su/g KM).

MR değerleri hesaplanırken, M_e değerinin her ürünün son nem içeriği olduğu öngörülmüştür [32, 38].

İnce Tabaka Matematiksel Modellerle Uyum

Kırmızı pancar pestillerinin kuruma davranışını analiz etmek için farklı ince tabaka kurutma modellerinin kullanılması, ürünlerin nem içeriği ve kuruma hızı gibi önemli parametrelerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yaygın olarak kullanılan yedi farklı ince tabaka kurutma modeli, literatürde tanımlanmış ve önerilmiş olan modeller arasında seçilmiştir. Bu modeller (Tablo 2), kırmızı pancar pestilinin kuruma sürecini analiz etmek ve kuruma kinetiğini anlamak için kullanılmıştır.

Kırmızı pancar pestillerinin deneysel çalışması sırasında elde edilen MR değerlerini açıklayan en uygun ince tabaka kurutma modelleri istatistiksel parametreler kullanılarak seçilmiştir. Bu kapsamda korelasyon katsayısını (R^2)'nin 1'e yakın olacak şekilde en yüksek değeri sağlayan, tahmini standart hata (RMSE) ve k-kare (χ^2) değerlerinin de 0'a yakın olacak şekilde en düşük değerlerini sağlayan modeller belirlenmiştir. Bu parametreler Eşitlik 4, 5 ve 6 kullanılarak hesaplama yapılmıştır [32].

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{(MR_{exp,i} - MR_{ort})^2}{(MR_{exp,i} - MR_{ort})^2} \right] \quad (6)$$

Burada, "MR" nem oranını, alt indis olarak kullanılan "exp,i" i. deney sırasında elde edilen değerini, "pre,i" i. tahmin edilen değerini, "ort" ortalama değerini, "N" gözlemlenen deneysel veri adedini, "n" modelde yer alan bağımsız değişken sayısını ifade etmektedir.

Tablo 2. İnce tabaka kurutma modelleri

Table 2. Thin layer drying models

Model No	Model	Denklemler*	Kaynaklar
1	Lewis (Newton)	MR = exp(-kt)	[39]
2	Page	MR = exp(-kt ⁿ)	[40]
3	Modifiye Page	MR = exp[-(kt) ⁿ]	[41]
4	Henderson & Pabis	MR = a exp(-kt)	[42]
5	Logaritmik	MR = a exp(-kt) + c	[43]
6	Two Term	MR = a exp(-kt) + (1-a) exp(-kat)	[44]
7	Wang ve Singh	MR = 1 + at + bt ²	[45]

*MR: nem oranı; a, b, c: kurutma katsayıları; k: kurutma sabiti; t: kurutma süresi

*MR: moisture ratio; a, b, c: drying coefficients; k: drying constant; t: drying time

Efektif Nem Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

Kırmızı pancar pestil örneklerinin kuruma davranışlarını incelemek için Fick'in İkinci Yasası kullanılmıştır. Bu yasa, kurutma işlemi sırasında nem transferinin difüzyon ile gerçekleştiğini varsaymaktadır. Özellikle plaka şeklindeki malzemeler için geçerli olan bu varsayım, nemin homojen bir şekilde dağıldığı, üründe deformasyon olmadığı, yüzey direncinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve ortam koşullarının değişiminin önemsiz olduğu durumları kapsamaktadır [46]. Bu bağlamda, sonsuz levhalar için efektif difüzyon katsayısı literatürde yer alan varsayımlar ve sadeleştirmelerle kırmızı pancar pestillerinin nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) kuruma süresine karşılık çizilen ln MR grafiğinin eğiminden elde edilmiştir (Eşitlik 7) [47]. Burada sıcaklığın her noktada eşit olduğu öngörülmüştür [48].

$$D_{eff} = \frac{4kL^2}{\pi^2} \quad (7)$$

Burada k, çizilen grafiğin eğimidir. D_{eff} nem difüzyon katsayısı (m^2/s), L levhanın yarı kalınlığını ifade etmektedir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Kırmızı Pancar Pestilinin Kurutma Kinetiği: Nem Değişimi

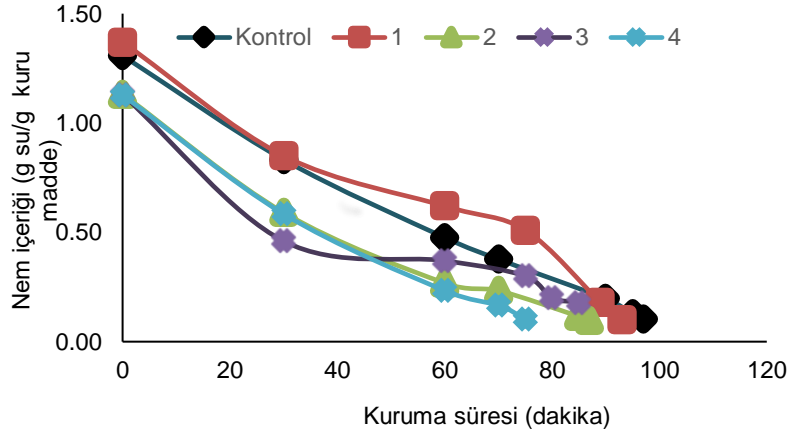
Farklı ön işlemlerle (Tablo 1) elde edilen koyulaştırılmış kırmızı pestil püresi (herle) 70°C'de sıcak hava ile kurutulmuştur. Kurutma işlemi sırasında nem içeriklerinin zamanla değişimi Şekil 1-3'de sunulmuştur.

Kurumadde içeriği 40°Bx'e kadar koyulaştırılan ve başlangıç nem içeriği 1.13-1.37 g su/g KM olan kırmızı pancar pestil herleleri, 0.10 g su/g KM'ye kadar kurutulmuştur (Şekil 1). Kurutma süreci sonunda, istenen nem oranına ulaşabilmek için 75-95 dakika arasında bir kurutma süresi gerekmiştir. Benzer şekilde, 20°Bx'e kadar koyulaştırılan ve başlangıç nem içeriği 2.42-2.72 g su/g KM olan kırmızı pancar herlelerinden 75-120 dakika

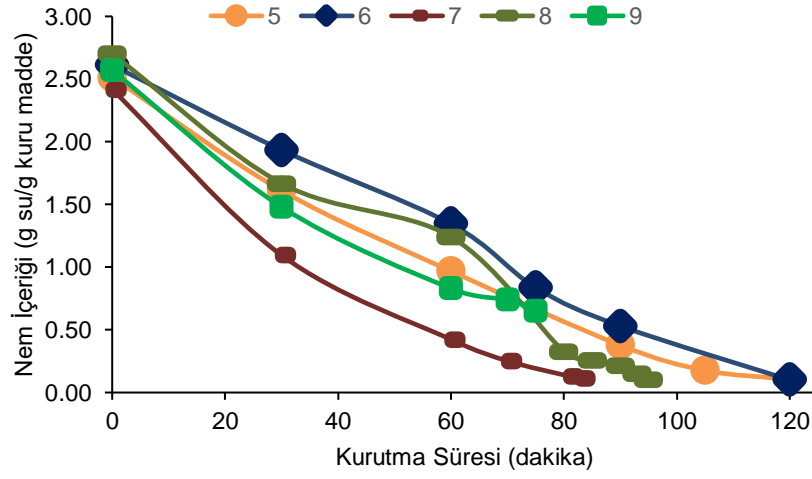
arasında değişen bir kurutma süresi sonrası pestil üretilmiştir (Şekil 2). Çalışma kapsamında, 45 dakika termosonikasyon (10. Koşul) ve 10 dakika mikrodalga (11. Koşul) kombinasyonu ile gerçekleştirilen haşlama ön işlemlerinin ardından, koyulaştırma işlemi uygulanmadan herle elde edilmiştir ve başlangıç nem içeriği 2.84-3.92 g su/g KM olan bu herleler, hedef nem oranı olan 0.10 g su/g KM'ye kadar kurutulmuştur. Gerçekleştirilen kurutma süresi, Şekil 3'te görüldüğü üzere 75-120 dakika aralığında değişmiştir.

Herlelerin kurutma öncesi başlangıç suda çözünür kuru madde oranından bağımsız olarak, en fazla kurutma süresine (120 dakika) 5., 6. ve 11. koşullarında ulaşılmıştır. En az kurutma süresi (75 dakika) ise, haşlama işleminin "45 dakika termosonikasyon ve 10 dakika mikrodalga" kombinasyonu ile desteklendiği ön işlem koşullarında (4., 9. ve 11. Koşul) elde edilmiştir. Açık kazanda gerçekleştirilen ön haşlama işlemine alternatif olarak uygulanan termosonikasyon işleminde, kurutma süresinin, artan termosonikasyon süresi ile %4-10 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Termosonikasyon işlemi sonrası haşlama işlemine eklenen 10 dakikalık mikrodalga işlemi ise kurutma süresini %12-22 oranında azaltmıştır. Sonuç olarak, farklı ön işlem uygulamalarının ardından, aynı sıcaklıkta ve koşullarda konveksiyonel yöntemlerle kurutulan kırmızı pancar pestillerinin kuruma sürelerine ön işlemlerin etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

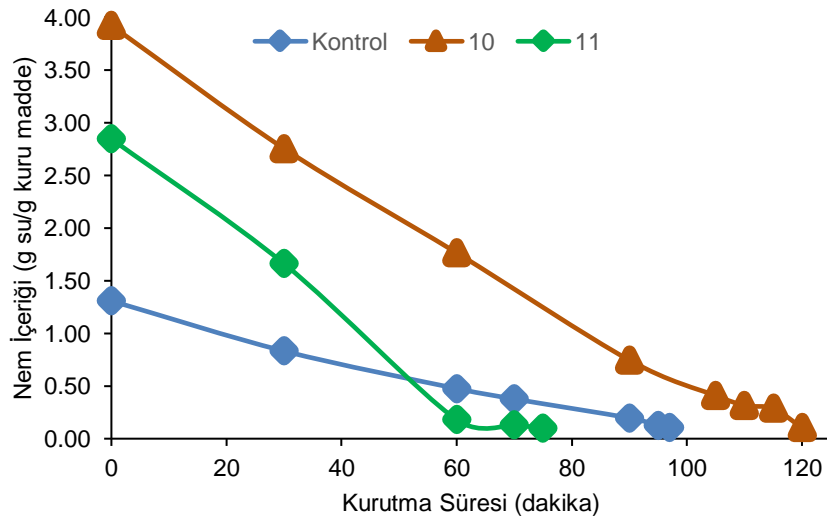
Literatürde yapılan bir çalışmada, havuçlu kırmızı biber pestil karışımı açık kazanda 40°Bx'e kadar koyulaştırılmış ve akabinde 60 ve 70°C'de sıcak hava kurutma işlemiyle 0.07 g su/g KM'e kadar kurutulmuştur. Kurutma işlemi sırasında 175 ve 110 dakikada tamamlanmıştır [13]. Benzer koşullarda koyulaştırma işlemi geçiren muşmula (42° Bx) ve dut pestilinin (45°Bx) 70°C'de sıcak hava kabin kurutucuda kurutulması için kurutma süresi sırasıyla 115 dakika ve 100 dakika olarak raporlanmıştır [35, 36]. Bu çalışma kapsamında "Kontrol" (Tablo 1) koşulunda üretilen kırmızı pancar pestili kurutma süresinin, literatürde raporlanan bu sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 1. Kurutmalar sırasında pestillerin nem oranı değişimi (Kontrol, 1-4. Koşul).
Figure 1. Moisture content change of pestils during drying (Control, Condition 1-4).



Şekil 2. Kurutmalar sırasında pestillerin nem oranı değişimi (5-9. Koşul).
Figure 2. Moisture content change of pestils during drying (Condition 5-9)



Şekil 3. Kurutmalar sırasında pestillerin nem oranı değişimi (10-11. Koşul).
Figure 3. Moisture content change of pestils during drying (Condition 10-11).

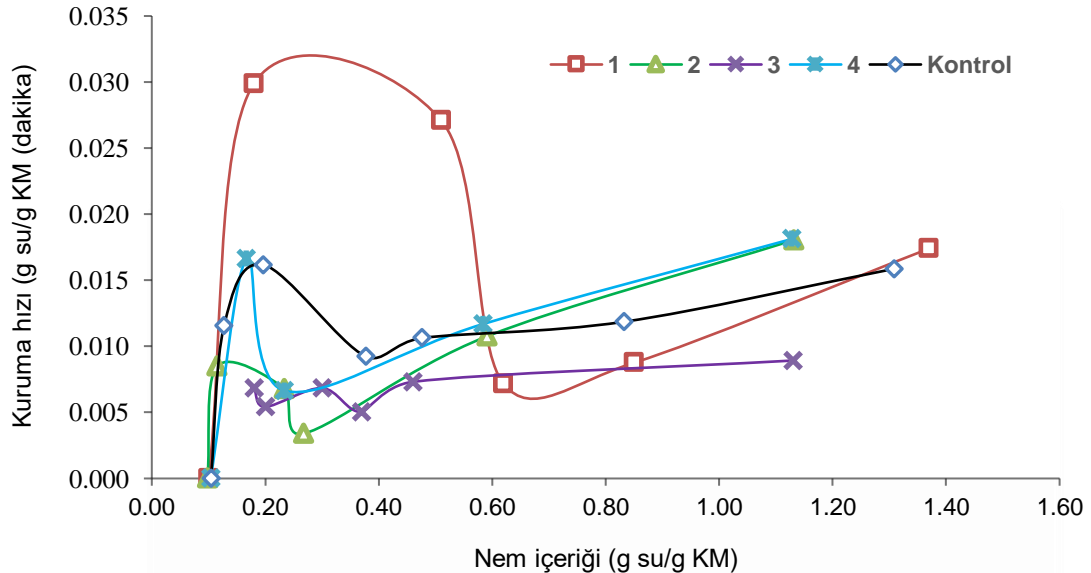
Literatürde yapılan çalışmalarda pestil üretiminde kurutma öncesi ön işlem olarak haşlama işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır [13, 49]. Ancak, haşlama işlemine alternatif olarak veya destekleyen nitelikte ultrasonikasyon/termosonikasyon ve mikrodalga uygulamalarına ait çalışmalara rastlanmamıştır. Diğer taraftan, bu tekniklerin ön işlem olarak meyve ve sebzelerin kurutulması sırasında kurutma süresini azaltmak ve nihai ürünün kalitesini iyileştirmek amacıyla kullanıldığı raporlanmıştır. Yapılan bir çalışmada, ultrason banyosunda 10, 20 ve 30 dakika süreyle 35 kHz ultrason gücü ile ön işlem görmüş elma küpleri konveksiyon yöntemi kullanılarak 70°C'de ve 1.5 m/s hava hızında kurutulmuştur ve çalışmanın sonucunda 30 dk ultrason banyo uygulamasının, işlem görmemiş örneklerle kıyasla kuruma süresini %31 oranında azalmasına neden olduğu raporlanmıştır [50]. Kavun dilimlerinin kurutulması için yapılan bir çalışmada, 25 kHz frekansda 10, 20 ve 30 dakika sürelerinde uygulanan ultrason ön işlemi sonrasında kurutma işlemi 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, 20 ve 30 dakika boyunca uygulanan ultrason ön işleminin kuruma süresini sırasıyla %25 (50°C) ve %40 (70°C) oranında azalttığı belirtilmiştir [51]. Benzer şekilde, yer elmasının kurutulması için yapılan bir çalışmada, kurutma öncesi 5-15 dakika arasında uygulanan ultrasonikasyon ön işlemlerinin kurutma süresini azalttığı raporlanmıştır [52].

Tatlı patatesin 80°C sıcak hava ile kurutulması öncesi uygulanan mikrodalga ön işleminin, geleneksel buharda ve geleneksel sıcak suda haşlama ön işlemlerine göre kurutma süresini azalttığı raporlanmıştır [53]. Ahududuların üzerine yapılan bir çalışmada, ahududunun mikrodalga enerjisi ve ultrason destekli hibrit bir sistemi

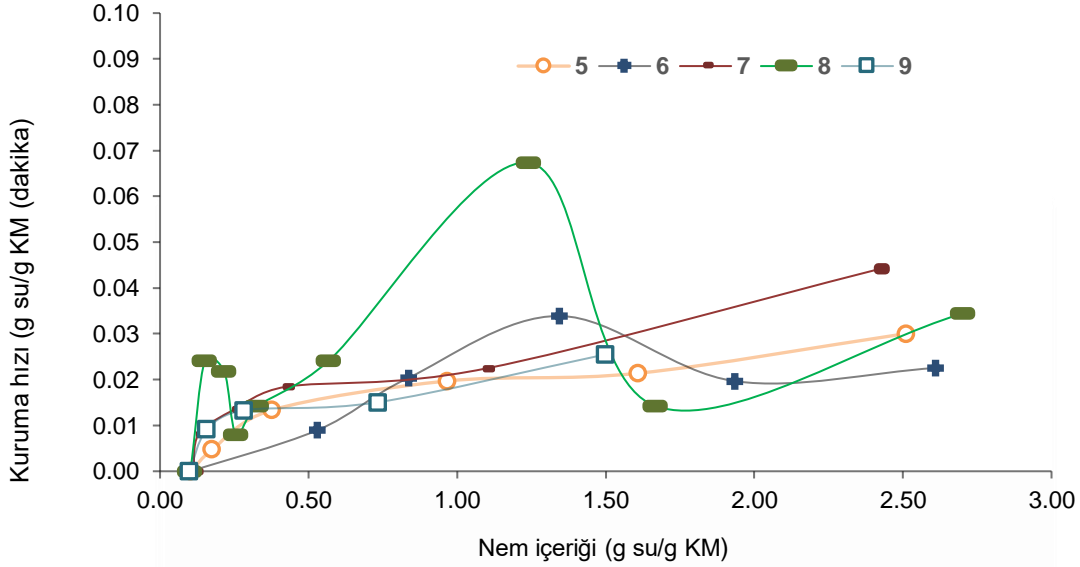
(100-200 W, 55°C) kullanılarak kurutulmasında, kurutma süresinin mikrodalga kullanımıyla %79, mikrodalga kullanılmadığı koşullara göre ise konveksiyonel kurutmaya göre %59 oranında azaldığı rapor edilmiştir [54]. Benzer şekilde Abbaspour-Gilandeh ve ark. [55] tarafından alıç meyvesinin kurutulması üzerine yapılan bir çalışmada, ultrasonik ön işleminin mikrodalga destekli sıcak hava kurutma işleminin diğer farklı kurutma tekniklerine (sıcak hava, mikrodalga-sıcak hava, kızılötesi-sıcak hava, dondurarak kurutma, ultrasonik + sıcak hava, ultrasonik + mikrodalga-sıcak hava, ultrasonik + kızılötesi-sıcak hava) göre kurutma süresini kısalttığı raporlanmıştır. Rocha armutunun kurutulması için yapılan bir çalışmada, mikrodalga (4 dakika boyunca 539 W) ve ultrasonikasyon (35 kHz- 160 W gücü ile 30°C sıcaklıkta 10 dakikalık uygulama) ön işlemleri karşılaştırılmış ve mikrodalga ön işlem koşulunun daha kısa kuruma süresi sağladığı tespit edilmiştir [27]. Kurutma süresinde belirgin değişiklik yaratmayan ultrasonik ön işlem örneklerinde ise kalite özelliklerinin daha iyi korunduğu raporlanmıştır. Literatürde yer alan bu sonuçlarla çalışmamız kapsamında elde edilen sonuçların uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Kırmızı Pancar Pestilinin Kurutma Kinetiği: Kuruma Hızı Değişimi

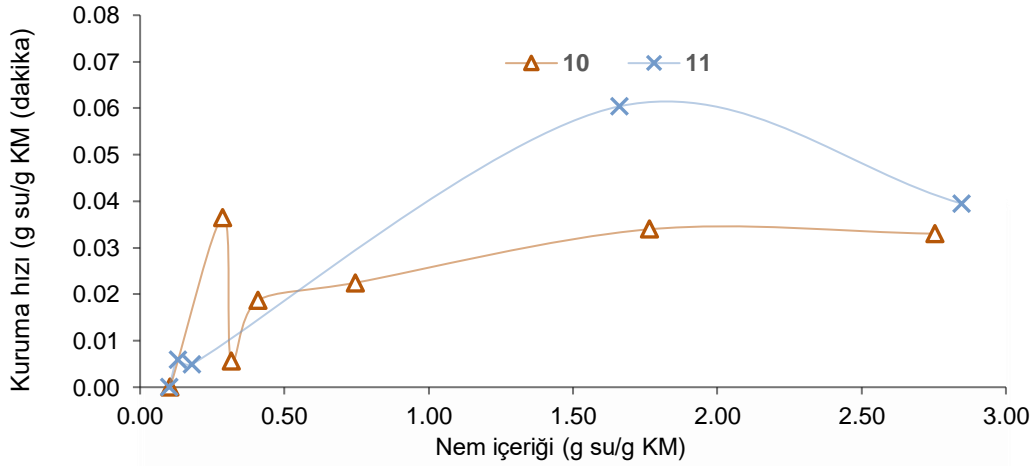
Farklı ön işlem koşullarıyla hazırlanmış herlerin kurutulmasıyla elde edilmiş kırmızı pancar pestil örneklerinin kuruma hızlarını hesaplamak için Eşitlik 2 kullanılmıştır. Kırmızı pancar pestillerinin değişen nem içeriklerine karşı kuruma hızı değişimleri Şekil 4-6'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Kurutmalar sırasında pestillerin kuruma hızı değişimi (Kontrol, 1-4.Koşul)
Figure 4. Drying rate variation of pestils during drying (Control, Conditions 1-4)



Şekil 5. Kurutmalar sırasında pestillerin kuruma hızı değişimi (5-9.Koşul)
 Figure 5. Drying rate variation of pestils during drying (Conditions 5-9)



Şekil 6. Kurutmalar sırasında pestillerin kuruma hızı değişimi (10.-11.Koşul)
 Figure 6. Drying rate variation of pestils during drying (10th -11th conditions)

Şekil 4, 5 ve 6'da görüldüğü üzere gerçekleştirilen termosonikasyon ve termosonikasyon ile kombine edilmiş mikrodalga ön işlem uygulamalarının kuruma hızını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Başlangıç nem içeriğinin (g su/g KM) diğer koşullara göre yüksek olduğu durumlarda (5.-11. koşullarda) kuruma hızının da başlangıç periyodunda yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında kuruma evresinde genellikle azalan bir kuruma hız periyodu gözlemlenmiştir, yani birim zamanda buharlaşan nem miktarı, bir önceki zamana kıyasla azalmıştır. Kuruma hızının azalmaya başladığı, difüzyonun etkili olduğu dönemlerde oluşan bu hız düşüşleri, yüzeyde oluşan kuru tabakanın altındaki nemli tabakalara büzüşerek baskı yapması ve alt tabakalarda nemin bulunması nedeniyle baskıya direnç göstermesinden kaynaklanabildiği belirtilmektedir. Bu durum, kuruma sonucunda üst tabakada büzüşmenin gerçekleşmediği ve sert kabuk oluşumunun meydana geldiği durumlarda kuruma hızını ani bir şekilde düşürebilmektedir. Kabuk bağlanması, çözünür kuru

madde göçüne bağlı olarak da meydana gelebilmektedir [56].

Diğer taraftan bu çalışma kapsamında, sabit oranlı bir kuruma hız periyodunun da belirgin olarak ortaya çıkmadığı da görülmüştür (Şekil 4-6). Isı iletimi ve kütle iletimi hızının eşit olduğu bu periyodun görülmemesi, pestil ürünlerinin üst tabakasında uzun bir süre boyunca sabit su tabakasının bulunmamasından veya nem ölçümlerinin uzun zaman aralıklarında gerçekleştirilmemesinden kaynaklanabildiği düşünülmektedir [57].

Bazı üretim koşullarında (1, 8, 9 ve 10) azalan kuruma hız periyodu sırasında kuruma hızında ani kısa artışlar da gözlemlenmiştir. En yüksek kuruma hızı, haşlama ön işleminin 45 dakika termosonikasyon ile gerçekleştirildiği ve koyulaştırmanın 20°Bx'e kadar sürdürüldüğü üretimde (8. Koşul), dakikada 0.0067 g su/g kuru madde olarak elde edilmiştir. Literatürde raporlanan ultrason destekli

kurutma çalışmalarında, kuruma hızının genellikle kısa bir süre arttığı belirtilmiştir. Bu dönemin, yoğunlukla ortam ile ürün yüzeyi nemindeki farka bağlı olduğu ve aynı zamanda ön ısıtma dönemi olarak adlandırıldığı belirtilmektedir. Bu ani artış periyodunun ardından daha uzun süre devam eden ve asıl kuruma işleminin gerçekleştiği düşen hız periyodunun gözlemlendiği raporlanmıştır [58-60].

Bozkır ve ark. [61] tarafından Trabzon hurmasının kurutma ve kalite özelliklerine ultrason ve ozmotik dehidrasyon ön işlemlerinin etkisinin araştırıldığı çalışmada, ultrason destekli ozmotik dehidrasyon uygulaması ile kurutulan numunelerin kuruma süresinin önemli ölçüde azaldığı ve kuruma hızının arttığı raporlanmıştır. Yapılan bir araştırmada, sarı manyok örneklerine kurutma işlemi (sıcak havayla konveksiyonel kurutma) öncesi uygulanan ultrasonikasyon işleminin (20 kHz ve 600 W güçte 10 dakika), kuruma süresini kontrol

örneklerine göre %35 oranında azalttığı, kuruma hızını da %63'lük arttırdığı belirtilmiştir [58]. Mikrodalga ve ultrason destekli konvektif kurutmanın çilek örneklerinde, ısı ve kütle transferini önemli ölçüde iyileştiren etkileri olduğunu raporlanmıştır [62]. Mikrodalğanın ısıtma etkisi ve ultrasonun titreşim etkisi ile birlikte hareket eden bu enerji kaynaklarının sinerjistik etkisi, kuruma hızında artışa yol açmıştır.

İnce Tabaka Matematiksel Modelleri ile Kurutma Davranışının Açıklanması

Farklı ön işlemler sonucu elde edilen kırmızı pancar pestil herlelerinin kuruma davranışına uygun ince tabaka matematiksel modelleri irdelenmiştir. Kurutma modellerine uygun parametreler Tablo 3 ve 4'te sunulmuştur.

Tablo 3. Kuruma modellerine ait sabitler ve modellerin istatistiksel uygunluk parametreleri (Kontrol, Koşul 1-4).
Table 3. Constants of the drying models and statistical fit parameters of the models (Control, Conditions 1-4).

Model No ¹			Ön İşlem Koşulları ²				
			Kontrol	1	2	3	4
1	Model sabitleri	k	0.02140	0.02060	0.02490	0.01830	0.02840
	İstatistiksel parametreler	R^2	0.98360	0.93210	0.99210	0.98340	0.99260
		$RMSE$	0.01056	0.02848	0.00917	0.17831	0.01452
		X^2	0.00223	0.00982	0.00077	0.32191	0.00172
2	Model sabitleri	n	1.43470	1.41960	1.16690	1.34160	1.33440
	İstatistiksel parametreler	k	0.00303	0.00310	0.01200	0.00410	0.00690
		R^2	0.94860	0.82970	0.97330	0.97450	0.98730
		$RMSE$	0.00542	0.02017	0.00594	0.00821	0.00440
3	Model sabitleri	n	1.43470	1.41960	1.16690	1.34160	1.33440
	İstatistiksel parametreler	k	0.01755	0.01690	0.02258	0.01650	0.02400
		R^2	0.94860	0.82970	0.97330	0.97450	0.98730
		$RMSE$	0.00542	0.02017	0.00594	0.00821	0.00440
4	Model sabitleri	k	0.02140	0.02090	0.02490	0.01830	0.02840
	İstatistiksel parametreler	a	2.14470	1.47060	1.10010	1.52590	1.12513
		R^2	0.98360	0.91540	0.99210	0.98340	0.99260
		$RMSE$	0.07266	0.05295	0.01419	0.07287	0.02001
5	Model sabitleri	k	0.03070	0.02690	0.03460	0.02910	0.03920
	İstatistiksel parametreler	a	1.85726	1.54130	1.11728	1.23146	1.08112
		c	0.07972	0.07001	0.08670	0.14173	0.09198
		R^2	0.93920	0.88750	0.95340	0.92390	0.97060
6	Model sabitleri	k	0.01356	0.01303	0.01440	0.01057	0.01618
	İstatistiksel parametreler	a	0.57781	0.58105	0.52380	0.73106	0.75494
		R^2	0.98360	0.93210	0.99210	0.98340	0.99260
		$RMSE$	0.04739	0.05774	0.07691	0.06219	0.06876
7	Model sabitleri	b	0.00010	0.00001	0.00010	0.00003	0.00009
	İstatistiksel parametreler	a	-0.01300	0.98738	-0.01870	-0.01220	-0.01880
		R^2	0.93490	0.87800	0.97390	0.88830	0.99030
		$RMSE$	0.17720	0.06086	0.00786	0.00838	0.00467
		X^2	0.69780	0.04980	0.00066	0.00081	0.00021

¹Tablo1'de İnce tabaka matematiksel modellerin detayları sunulmuştur. ²Tablo 2'de ön işlem koşullarının detayları sunulmuştur.
¹Details of the thin layer mathematical models are presented in Table 1. ²Details of the pretreatment conditions are presented in Table 2.

Tablo 4. Kuruma modellerine ait sabitler ve modellerin istatistiksel uygunluk parametreleri (Koşul 5-11)
 Table 4. Constants of the drying models and statistical fit parameters of the models (Control, Conditions 5-11)

Model No ¹			Ön İşlem Koşulları ²						
			5	6	7	8	9	10	11
1	Model sabitleri	<i>k</i>	0.02370	0.02030	0.03400	0.02780	0.03200	0.02300	0.06510
	İstatistiksel parametreler	<i>R</i> ²	0.97770	0.96830	0.99410	0.96180	0.99020	0.96010	0.97900
		RMSE	0.03524	0.02724	0.01084	0.03696	0.01701	0.03646	0.08232
		χ^2	0.00894	0.00972	0.00131	0.01383	0.00236	0.01215	0.04879
2	Model sabitleri	<i>n</i>	1.43730	1.71760	1.32260	1.67180	1.33190	1.59820	2.04740
	İstatistiksel parametreler	<i>k</i>	0.00310	0.00070	0.00840	0.00137	0.00610	0.00138	0.00054
		<i>R</i> ²	0.98490	0.96950	0.98730	0.90000	0.98430	0.97310	0.98260
		RMSE	0.01065	0.00913	0.00357	0.02150	0.01782	0.01028	0.00655
3	İstatistiksel parametreler	χ^2	0.00102	0.00120	0.00016	0.00535	0.00209	0.00113	0.00039
		<i>n</i>	1.43730	1.71760	1.32260	1.67180	1.33190	1.59820	2.04740
		<i>k</i>	0.01790	0.01500	0.02710	0.01939	0.02560	0.01620	0.02520
	İstatistiksel parametreler	<i>R</i> ²	0.98490	0.96950	0.98730	0.90000	0.98430	0.97310	0.98260
RMSE		0.01065	0.00913	0.00357	0.02150	0.00509	0.01028	0.00655	
χ^2		0.00102	0.00120	0.00016	0.00535	0.00025	0.00113	0.00039	
4	Model sabitleri	<i>k</i>	0.02370	0.02190	0.03400	0.02780	0.03200	0.02300	0.04150
	İstatistiksel parametreler	<i>a</i>	1.99210	1.64560	1.21680	1.52166	1.17304	1.47110	1.50863
		<i>R</i> ²	0.97770	0.96540	0.99410	0.96180	0.99020	0.96010	0.96870
		RMSE	0.17710	0.05654	0.02236	0.06286	0.02656	0.06086	0.08948
5	İstatistiksel parametreler	χ^2	0.28229	0.04604	0.00625	0.04572	0.00691	0.03951	0.07205
		<i>k</i>	0.02720	0.02780	0.04620	0.33320	0.04220	0.02530	0.05090
		<i>a</i>	1.29540	2.08760	1.46961	1.66500	1.19650	1.48914	1.62418
	İstatistiksel parametreler	<i>c</i>	0.04165	0.03861	0.04712	0.03792	0.06682	0.02652	0.03525
<i>R</i> ²		0.96700	0.92540	0.95940	0.95330	0.96860	0.97150	0.93620	
RMSE		0.05092	0.09636	0.05600	0.08215	0.04084	0.06666	0.11575	
6	İstatistiksel parametreler	χ^2	0.03177	0.14857	0.04481	0.09111	0.02044	0.05687	0.16078
		<i>k</i>	0.01510	0.01350	0.02195	0.01734	0.02078	0.01442	0.02592
		<i>a</i>	0.56970	0.62201	0.54889	0.60344	0.53982	0.59532	0.60138
	İstatistiksel parametreler	<i>R</i> ²	0.97770	0.96540	0.99410	0.96180	0.99020	0.96010	0.96870
RMSE		0.06276	0.04683	0.06017	0.05636	0.07470	0.05448	0.06040	
χ^2		0.03545	0.03158	0.04525	0.03675	0.05468	0.03166	0.03284	
7	Model sabitleri	<i>b</i>	0.00004	0.00008	0.00010	0.00010	0.00010	0.00002	0.00020
	İstatistiksel parametreler	<i>a</i>	-0.01310	-0.00900	-0.02170	-0.01310	-0.02000	-0.01050	-0.01620
		<i>R</i> ²	0.98070	0.90380	0.98770	0.88790	0.99080	0.94950	0.89320
		RMSE	0.00786	0.22820	0.04011	0.25862	0.00583	0.00449	0.31303
İstatistiksel parametreler	χ^2	0.00056	0.74989	0.02011	0.77394	0.00033	0.00021	0.88188	

¹Tablo1'de İnce tabaka matematiksel modellerin detayları sunulmuştur. ²Tablo 2'de ön işlem koşullarının detayları sunulmuştur.

¹Details of the thin layer mathematical models are presented in Table 1. ²Details of the pretreatment conditions are presented in Table 2.

Farklı ön işlemlerden geçirilen yaklaşık 40°Bx'e sahip kırmızı pancar pestillerinin (Kontrol, 1.2, 4. Koşullar) kuruma davranışlarını en iyi açıklayan modeller için en yüksek *R*² (0.93210-0.99260) değerini ve en düşük χ^2 (0.00077-0.00982) ve RMSE (0.00917-0.02848) değerlerini veren Lewis, yaklaşık 20°Bx'e sahip kırmızı pancar pestillerinin (5, 6, 10 ve 11) için ise en yüksek *R*² (0.9650-0.98490) değerini ve en düşük χ^2 (0.000127 – 0.001108) ve RMSE (0.000655– 0.1065) değerlerini veren Page ve Modifiye Page modelleri olarak belirlenmiştir. Bunların dışında kalan 3. ve 8. Koşulları için en yüksek *R*² değerini (0.96180-0.9910) ve en düşük χ^2 (0.03675-0.06309) ve RMSE (0.05636-0.07691) değerlerini Two Term modeli, 7. ve 8. koşulları için en yüksek *R*² değerini (0.99020-0.99410) ve en düşük χ^2 (0.00691-0.00625) ve RMSE (0.02236-0.026561) değerlerini Henderson & Pabis modeli sağlamıştır. Elde edilen bu sonuçlar, kırmızı pancar pestili kuruma davranışını açıklayan tek bir matematiksel model olmadığı ve uygulanan ön işlemlere de bağlı olarak farklı modeller ile açıklanabileceği sonucuna varılmıştır. Mikrodalga ve konvansiyonel kurutma tekniklerini de içeren farklı tekniklerle kurutulan dut ve muşmula pestilinin kurutma kinetiği Page ve Modified Page modeli ile açıklanmıştır [34, 35]. Son yıllarda yapılan güncel bir

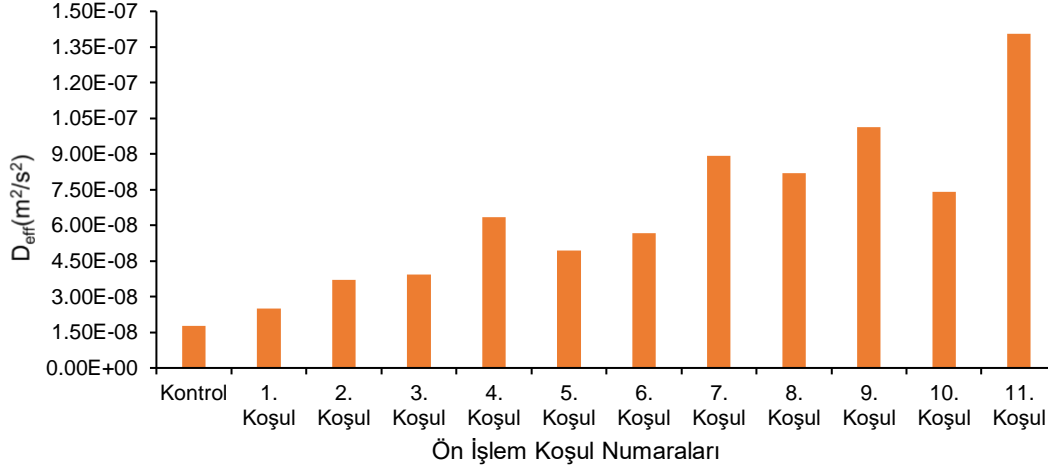
çalışmada da ısı pompası ile kurutulan kızılıcak-kapya pestilinin kuruma davranışını en iyi bu iki modelin açıkladığı raporlanmıştır [63].

Termosonikasyon ön işlemine tabi tutulan pestilin kurutulmasıyla ilgili ince tabaka modellerine uyum literatürde sıklıkla çalışılmasa da, sebze ve meyvelerin kurutulması öncesinde ultrasonikasyon uygulanmasıyla ilgili çalışmalar mevcuttur ve bu alandaki çalışmaların sayısı artmaktadır. Ananas dilimlerinin 40 kHz'de 20 ve 30 dakika ultrasonik banyo ön işlem sonrası 70°C'de sıcak hava ile kurutulmasında, Logaritmik model en yüksek *R*² (0.99602 ve 0.99692) en düşük RMSE (0.0156 ve 0.0138) değerleri ile uyum gösteren model olarak belirlenmiştir [64]. Patatesin ultrasonik (20 kHz) ön muamelesi sonrası 60°C'de sıcak hava ile kurutulmasında Modifiye Page ve Henderson & Pabis modelinin en iyi uyumu gösterdiği raporlanmıştır [65]. Tatlı muz kabuğu dilimlerinin kuruma hızlarını ve kalite parametrelerini arttırmak için ultrasonikasyon ve karbonasyon-ultrasonikasyon destekli konvektif kurutma tekniklerinin değerlendirilmesi üzerine yapılan bir araştırmada, Wang and Singh modeli deneysel verilere en iyi şekilde uyan model olarak tanımlanmıştır [66].

Ultrason ön işleminin (0, 20 ve 40 dakika) ve mikrodalga gücünün (120, 150 ve 180 W) olduğu 60°C'de sıcak hava ile birleştirilmiş mikrodalga uygulaması ile kurutulan domates dilimleri çalışmasında Page modeli ($R^2 > 0.99$) deneysel verilere uyum gösteren en iyi model olarak belirlenmiştir [67].

Efektif Nem Difüzyon Katsayısı (D_{eff}) Değerleri

Değerlendirilen D_{eff} değerleri, Şekil 7'de grafiksel olarak sunulmuştur. Bu değerler, Eşitlik 7 kullanılarak hesaplanmış olup, $8.91 \times 10^{-8} - 1.01 \times 10^{-7}$ (m^2/s) aralığında yer almaktadır.



Şekil 7. Farklı ön işlemler uygulanarak elde edilen kırmızı pancar pestil ürünlerinin D_{eff} değerleri

Figure 7. D_{eff} values of red beet pestil products obtained by applying different pretreatments

Kurutma öncesi kırmızı pancar pestili herlesinin sahip olduğu başlangıç suda çözünür kuru madde miktarından bağımsız olarak, herlenin elde edilmesinde uygulanan 30 dk termosonikasyon ön işlemi (1. ve 6. Koşul), sadece açık kazanda haşlama ön işleminin uygulandığı Kontrol ve 5. Koşullara göre D_{eff} değerini $1.77 \times 10^{-8} m^2/s$ 'den $2.49 \times 10^{-8} m^2/s$ 'e ve $4.94 \times 10^{-8} m^2/s$ 'den $5.67 \times 10^{-8} m^2/s$ 'ye artırmıştır. Aynı etki 45 dakika olarak uygulanan termosonikasyon (3. ve 7. Koşul) işleminde de görülmüştür. Termosonikasyon işlemi ile hibrit bir şekilde uygulanan mikrodalga işleminin de D_{eff} değerini artırdığı gözlenmiştir. Termosonikasyon uygulaması, kırmızı pancar pestil örneklerinde, mekanik ve termal uyarımlarla oluşan mikroskobik kanalların artmasını sağlamıştır ve bunlarda hücre yapısının zayıflamasına yol açmıştır. Bu durum, sıcak hava ile kurutma sırasında nem transferine karşı iç direncin azalmasına ve yüzeyde oluşan sıcaklık artışının etkisiyle kütle transferinin hızlanmasına neden olmuştur. Mikrodalga ön işlemi de kütle transfer hızını artırarak kuruma süresinde zaman tasarrufu sağlamış ve tüm mikrodalgasız ön işlemlere göre daha etkili bir performans sergilediği gözlenmiştir. Sonuç olarak, Şekil 7'de belirgin bir şekilde görüldüğü üzere, termosonikasyon ve mikrodalga ön işlemleri kırmızı pancar pestil ürünlerinde kütle transferi karakterize eden efektif nem difüzyon katsayısında artışa yol açmıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen efektif nem difüzyon katsayı aralığı, gıda ürünleri için önerilen sınırlar içindedir. Gözenekli ve katı gıdalarda nem difüzyonu genellikle $3.6 \times 10^{-10} m^2/s$ ile $3.6 \times 10^{-5} m^2/s$ arasında değişmiştir [68, 69]. Kırmızı pancar pestilinin kurutulması sırasında uygulanan kurutma koşullarında (70°C'da konvektif sıcak hava ile kurutma) dut pestilinin kurutulmasını inceleyen [35], D_{eff} değerini $8.73 \times 10^{-8} m^2/s$ olarak, [13] kabak pestilinde $9.61 \times 10^{-9} m^2/s$, olarak

raporlamıştır. Diğer taraftan bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak literatürde, acı su kabağının sıcak hava ile kurutulması öncesi uygulanan mikrodalga ön işleminin kuruma süresinin azalmasına ve nem yayılımının artmasına yol açtığı [23] ve siyah zeytin kurutulmasında farklı güçlerde uygulanan ultrasonikasyon işleminin D_{eff} değerlerini artırdığı [70] raporlanmıştır.

D_{eff} değeri üzerine kuruma sırasındaki havanın sıcaklığı, gıdanın yapısal özellikleri ve içerdiği nem etkili olduğu literatürde belirtilmiştir. D_{eff} değeri hesaplanması için kullanılan Eşitlik 7, ince tabaka matematiksel modelleri için kullanılan öngörülerle ilişkili olduğu belirtilmektedir ve bu değer tüm kurutma süresini kapsayacak şekilde hesaplanarak ortaya konulması farklı gıdaların kurutma davranışları ile karşılaştırma yapılmasına olanak sağlamaktadır [20, 71].

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, elma ve tapyoka nişastası gibi bileşenlerin kullanımı ile kırmızı pancar pestilinin formülasyonu oluşturulmuş ve mikrodalga ve termosonikasyon ön işlemlerinin geleneksel haşlama işlemine alternatif olarak kullanım olanakları araştırılmıştır. Farklı ön işlemlerin, kırmızı pancar pestilinin ince tabaka kurutma davranışı üzerine olana etkisi irdelenmiş ve en uygun matematiksel model ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, termosonikasyon, mikrodalga ve geleneksel haşlama yöntemlerinin kombinasyonlarının pestil üretiminde olumlu etkiler sağladığını ortaya koymuştur. Önerilen alternatif ön işlemlerin kurutma süresini belirgin ölçüde kısalttığı, kuruma hızını artırdığı ve efektif difüzyon katsayısı üzerine etkisi üstünde olumlu etkisinin olduğu ortaya

konulmuştur. Özellikle termosonikasyonun hücre yapısını zayıflatarak nem transferini hızlandırdığı ve mikrodalga ön işlemi sıcak hava ile kurutma sürecinde kütle transferini artırarak kuruma süresini önemli ölçüde azaltarak enerji verimliliğini artırmış ve pestilin besin değerini koruma konusunda etkili olmuştur.

Artan tüketici talebi, bu tür inovatif pestil ürünlerinin fonksiyonel gıda pazarında yüksek bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalarda, formülasyonu ve ön işlem koşulları belirlenen kırmızı pancar pestilinin duyuşal olarak hedonik tüketici testlerinin yapılması, bu ön işlemlerin ürünün nihai mineral, fenolik kompozisyon, hidrosimetil furfural içeriği gibi özellikleri üzerine olan etkisi irdelenmelidir. Ayrıca pestillerin besin değeri ve duyuşal özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla diğer doğal tatlandırıcılar ve kıvam artırıcıların araştırılması önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FYL-2023-1225 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Anonim. (2022a). Beetroot powder market growth and forecast 2022-2027: Market data forecast, (ID: 4263). *Market Data Forecast*. <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/beetroot-powder-market> (Erişim Tarihi: 22.11.2024)
- [2] Kara, O.O., Küçüköner, E. (2019). Geleneksel bir meyve çerezi: Pestil. *Akademik Gıda*, 260-268.
- [3] Chawla, H., Parle, M., Sharma, K., Yadav, M. (2016). Beetroot: A health-promoting functional food. *Inventi Rapid: Nutraceuticals*, 1(1), 0976–3872.
- [4] Babarykin, D., Smirnova, G., Pundinsh, I., Vasiljeva, S., Krumina, G., Agejchenko, V. (2019). Red beet (*Beta vulgaris*) impact on human health. *Journal of Biosciences and Medicines*, 7(3), 61–79.
- [5] Ceclu, L., Nistor, O.V. (2020). Red beetroot: Composition and health effects – A review. *Journal of Nutritional Medicine and Diet Care*, 6(1), 1-9.
- [6] Bilişli, A. (2015). *Gıda Kimyası* (3rd ed.). Sidas Medya Ltd. Şti, Çankaya, İzmir.
- [7] Dhiman, A., Suhag, R., Chauhan, D.S., Thakur, D., Chhikara, S., Prabhakar, P.K. (2021). Status of beetroot processing and processed products: Thermal and emerging technologies intervention. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 443–458.
- [8] Bahriye, G., Dadashi, S., Dehghannya, J., Ghaffari, H. H. (2023). Influence of processing temperature on production of red beetroot powder as a natural red colorant using foam-mat drying: Experimental and modeling study. *Food Science and Nutrition*, 11(11), 6955–6973.
- [9] Wang, X., Wang, P. (2023). Red beetroot juice fermented by water kefir grains: Physicochemical, antioxidant profile, and anticancer activity. *European Food Research and Technology*, 249, 939–950.
- [10] Jakubczyk, K., Melkis, K., Janda-Milczarek, K., Skonieczna-Żydecka, K. (2024). Phenolic compounds and antioxidant properties of fermented beetroot juices enriched with different additives. *Foods*, 13, 102.
- [11] Akan, S., Tuna Gunes, N., Erkan, M. (2021). Red beetroot: Health benefits, production techniques, and quality maintaining for food industry. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), e15781.
- [12] Özkan Karabacak, A. (2019). Effects of different drying methods on drying characteristics, colour and in-vitro bioaccessibility of phenolics and antioxidant capacity of blackthorn pestil (leather). *Heat and Mass Transfer*, 55(10), 2739–2750.
- [13] Özkan Karabacak, A. (2021). Farklı yöntemlerle kurutulan havuç pestillerinin kurutma karakteristikleri ile bazı kalite parametrelerindeki değişimin modellemesi ve in-vitro biyoyararlılıklarının belirlenmesi. Doktora Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- [14] Barman, M., Das, A.B., Badwaik, L.S. (2021). Effect of xanthan gum, guar gum, and pectin on physicochemical, color, textural, sensory, and drying characteristics of kiwi fruit leather. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15478.
- [15] Kamiloğlu, S., Capanoğlu, E. (2014). In vitro gastrointestinal digestion of polyphenols from different molasses (pekmez) and leather (pestil) varieties. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(4), 1027–1039.
- [16] Tontul, İ., Eroğlu, E., Topuz, A. (2019). Kırınım pencere kurutma ve sıcak hava akımında kurutma işlem şartlarının kuşburnu tozlarının fizikokimyasal özellikleri üzerine etkisi. *Gıda*, 44(1), 1-9.
- [17] Özkan-Karabacak, A., Çopur, Ö. (2020). Farklı kurutma yöntemleri ile üretilen karışık sebze pestilinin kuruma karakteristikleri, renk değişim kinetiği, mineral madde içeriği ve tekstürel özelliklerinin belirlenmesi. *Gıda*, 46(1), 1-20.
- [18] Silva Simão, R., de Moraes, J.O., Carciofi, B.A. M., Laurindo, J.B. (2020). Recent advances in the production of fruit leathers. *Food Engineering Reviews*, 12(1), 68-82.
- [19] İncedayi, B., Dogan, N., Copur, O.U. (2022). Assessment of cactus pear leather (pestil) as a new snack food. *Journal of Food Science and Technology*, 59(8), 3158-3166.
- [20] Kutlu, N., İşci, A., Şakıyan Demirkol, Ö. (2015). Gıdalarda ince tabaka kurutma modelleri. *Gıda*, 40(1), 39-46.
- [21] Al-Hilphy, A.R., Mohsen, G., Barba, F.J., Lorenzo, J.M., Al-Shalah, Z.M., Deepak, K.V. (2021). Drying of sliced tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) by a novel halogen dryer: Effects of drying temperature on physical properties, drying kinetics, and energy consumption. *Journal of Food Process Engineering*, 44(3), e13624.
- [22] Alaei, B., Dibagar, N., Chayjan, R.A., Kaveh, M., Taghinezhad, E. (2018). The effect of short and medium infrared radiation on some drying and quality characteristics of quince slices under

- vacuum condition. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 10(4), 371-381.
- [23] Srimagal, A., Mishra, S., Pradhan, R.C. (2017). Effects of ethyl oleate and microwave blanching on drying kinetics of bitter melon. *Journal of Food Science and Technology*, 54(5), 1192-1198.
- [24] Basse, E.J., Cheng, J.-H., Sun, D.-W. (2021). Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 137-148.
- [25] Bozkır, H., Rayman Ergün, A., Tekgül, Y., Baysal, T. (2019a). Ultrasound as pretreatment for drying garlic slices in microwave and convective dryer. *Food Science and Biotechnology*, 28(2), 347-354.
- [26] Huang, D., Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sundén, B., Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104950.
- [27] Önal, B., Adiletta, G., di Matteo, M., Russo, P., Ramos, I.N., Silva, C.L.M. (2021). Microwave and ultrasound pre-treatments for drying of the "Rocha" pear: Impact on phytochemical parameters, color changes and drying kinetics. *Foods*, 10(4), 853.
- [28] Kumar, C., Karim, M.A. (2019). Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(3), 379-394.
- [29] Ciużyńska, A., Falacińska, J., Kowalska, H., Kowalska, J., Galus, S., Marzec, A., Domian, E. (2021). The effect of pre-treatment (blanching, ultrasound and freezing) on quality of freeze-dried red beets. *Foods*, 10(1), 132.
- [30] Er, T. (2011). Kırmızı pancarın bazı fiziksel ve fitokimyasal özellikleri üzerine farklı kurutma sıcaklıklarının etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [31] Dirim, S.N., Talih, M., Koç, G.Ç. (2019). Drying characteristics of red beet (Beta vulgaris esculentacruenta) puree in a microwave oven. *Gıda*, 44(4), 654-671.
- [32] Inyang, U.E., Oboh, I.O., Etuk, B.R. (2018). Kinetic models for drying techniques-Food materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8(02), 27-48.
- [33] Fernando, J.A.K.M., Amarasinghe, A.D.U.S. (2016). Drying kinetics and mathematical modeling of hot air drying of coconut coir pith. *SpringerPlus*, 5(1), 807.
- [34] Abraham-Juárez, M. del R., Olalde-Portugal, V., Cerón-García, A., Sosa-Morales, M.E. (2019). Hot air drying kinetics of thin layers of prickly pear fruit paste. *Sains Malaysiana*, 48(2), 361-367.
- [35] Suna, S. (2019). Effects of hot air, microwave and vacuum drying on drying characteristics and *in vitro* bioaccessibility of medlar fruit leather (pestil). *Food Science and Biotechnology*, 28(5), 1465-1474.
- [36] Suna, S., Özkan-Karabacak, A. (2019). Investigation of drying kinetics and physicochemical properties of mulberry leather (pestil) dried with different methods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(8), e14051.
- [37] Sarkar, T., Saha, S.K., Salauddin, M., Chakraborty, R. (2021). Drying kinetics, Fourier-transform infrared spectroscopy analysis and sensory evaluation of sun, hot-air, microwave and freeze-dried mango. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 10(5), e3313.
- [38] Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage, and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 177-182.
- [39] Lewis, W.K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432.
- [40] Page, G.E. (1949). Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn thin layers. Purdue University, Dissertations, AA11300089.
- [41] Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E., Ross, I. J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), 112-113.
- [42] Henderson, S.M. (1961). Grain drying theory (I) temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-174.
- [43] Doymaz, İ. (2011). Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(2), 280-289.
- [44] Ertekin, C., Yaldız, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359.
- [45] Wang, C.Y., Singh, R.P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 11(6), 668-672.
- [46] Süfer, Ö., Palazoğlu, T.K. (2019). A study on hot-air drying of pomegranate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(6), 1981-1990.
- [47] Kılıç, F., Tabanlıgil Calam, T. (2020). Kırmızı kapya biberlerinin (*Capsicum annum* L.) kurutma ve rehidrasyon kinetiklerinin belirlenmesi. *DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik*, 22(65), 343-352.
- [48] Tütüncü, M.A., Labuza, T.P. (1996). Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient. *Journal of Food Engineering*, 30(3-4), 433-447.
- [49] Özkan-Karabacak, A., Durgut-Malçok, S., Tunçkal, C., Tamer, C.E., Pandiselvam, R. (2023a). Optimization of heat pump dryer conditions on bioaccessibility of some secondary metabolites of Cornelian cherry-Capria pepper pestil. *Journal of Food Biochemistry*, 2023, 5443962.
- [50] Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113(3), 427-433.
- [51] Silva, J.H.F., Silva Neto, J.S., Silva, E.S., Cavalcanti, D.E. de S., Azoubel, P.M., Benachour, M. (2020). Effect of ultrasonic pretreatment on melon drying and computational fluid dynamic modelling of thermal profile. *Food Technology and Biotechnology*, 58(4), 381-390.
- [52] Aydar, A.Y., Mataraci, C.E., Sağlam, T.B., Yılmaz, T. (2022). Effect of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and quality properties of Jerusalem artichoke. *Latin American Applied Research- An International Journal*, 52(2), 77-82.

- [53] Liu, P., Mujumdar, A.S., Zhang, M., Jiang, H. (2015). Comparison of three blanching treatments on the color and anthocyanin level of the microwave-assisted spouted bed drying of purple flesh sweet potato. *Drying Technology*, 33(1), 66-71.
- [54] Kowalski, S.J., Pawłowski, A., Szadzińska, J., Łechtańska, J., Stasiak, M. (2016). High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 225-233.
- [55] Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M., Fatemi, H., Aziz, M. (2021). Combined hot air, microwave, and infrared drying of hawthorn fruit: Effects of ultrasonic pretreatment on drying time, energy, qualitative, and bioactive compounds' properties. *Foods*, 10(5), 1006.
- [56] Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., Ozkan, M. (2003). *Meyve ve sebze işleme teknolojisi* (pp. 541-542). Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları.
- [57] Prakash, S., Jha, S.K., Datta, N. (2004). Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *Journal of Food Engineering*, 62(3), 305-313.
- [58] Oladejo, A.O., Ekpene, M.A.M., Onwude, D.I., Assian, U.E., Nkem, O.M. (2021). Effects of ultrasound pretreatments on the drying kinetics of yellow cassava during convective hot air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(3), e15251.
- [59] Malvandi, A., Nicole Coleman, D., Loor, J.J., Feng, H. (2022). A novel sub-pilot-scale direct-contact ultrasonic dehydration technology for sustainable production of distillers dried grains (DDG). *Ultrasonics Sonochemistry*, 85, 105982.
- [60] Wang, C., Zhang, L., Qiao, Y., Liao, L., Shi, D., Wang, J., Shi, L. (2022). Effects of ultrasound and ultra-high pressure pretreatments on volatile and taste compounds of vacuum-freeze dried strawberry slices. *LWT*, 160, 113232.
- [61] Bozkır, H., Rayman Ergün, A., Serdar, E., Metin, G., Baysal, T. (2019). Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 135-141.
- [62] Szadzińska, J., Kowalski, S.J., Stasiak, M. (2016). Microwave and ultrasound enhancement of convective drying of strawberries: Experimental and modeling efficiency. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 1065-1074.
- [63] Durgut-Malçok, S., Özkan Karabacak, A., Tunçkal, C., Ece Tamer, C.E. (2023). Application of response surface methodology for optimisation of Cornelian cherry–Copia pepper leather dried in a heat pump drying system. *Journal of Agricultural Engineering*, 54, 1538.
- [64] Rani, P., Tripathy, P.P. (2019). Effect of ultrasound and chemical pretreatment on drying characteristics and quality attributes of hot air dried pineapple slices. *Journal of Food Science and Technology*, 56(11), 4911-4924.
- [65] Rashid, M.T., Jatoi, M.A., Safdar, B., Wali, A., Aadil, R.M., Sarpong, F., Ma, H. (2020). Modeling the drying of ultrasound and glucose pretreated sweet potatoes: The impact on phytochemical and functional groups. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 105226.
- [66] Kaur, M., Modi, V. K., Sharma, H.K. (2022). Evaluation of ultrasonication and carbonation-ultrasonication assisted convective drying techniques for enhancing the drying rates and quality parameters of ripe and raw banana (Musa) peel. *Journal of Food Science and Technology*, 59(11), 4542-4552.
- [67] Horuz, E., Jaafar, H.J., Maskan, M. (2017). Ultrasonication as pretreatment for drying of tomato slices in a hot air–microwave hybrid oven. *Drying Technology*, 35(7), 849-859.
- [68] Labuza, T.P. (1984). Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use. The American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.
- [69] Doulia, D., Tzia, K., Gekas, V. (2000). A knowledge base for the apparent mass diffusion coefficient (Deff) of foods. *International Journal of Food Properties*, 3(1), 1-14.
- [70] Aydar, A.Y. (2020). Quality parameters and drying kinetics of ultrasound pretreated fermented black table olives. *Latin American Applied Research-An International Journal*, 50(4), 271-276.
- [71] Jangam, S.V., Mujumdar, A.S. (2010). Basic concepts and definitions. In *Drying of foods, vegetables, and fruits* (Vol. 1, Ed. Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S.). ISBN - 978-981-08-6759-1.