

Özgün Araştırma/Original Article

Siyah havuç posasının radyo frekans kurutma sistemiyle kurutulması ve kalite özellikleri üzerine etkisi

Drying of black carrot pomace by radio frequency drying system and its effect on quality properties

Aysel Elik^{1*} 

¹Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda Teknolojisi, MERSİN, TÜRKİYE

ORCID ID: 0000-0003-4949-9108, Dr. Öğr. Üyesi

*Sorumlu yazar/Corresponding author: ayselik@tarsus.edu.tr

Geliş Tarihi : 12.04.2022

Kabul Tarihi : 24.06.2022

Öz

Amaç: Bu çalışmada, radyo frekans kurutma teknolojisi kullanılarak siyah havuç posası kurutulmuştur ve radyo frekans kurutma sisteminin etkinliği ve kurutulmuş siyah havuç posasının kalite özellikleri incelenmiştir.

Materyal ve yöntem: Siyah havuç posasının radyo frekans kurutma sisteminde kurutulması için 80 mm elektrot yüksekliği, 20 mm ürün kalınlığı ve 500 g ürün ağırlığı koşulları kullanılmıştır. Siyah havuç posasını kurutmak için kullanılan radyo frekans kurutma tekniğinin kuruma özelliklerini tanımlamak için altı farklı matematiksel model uygulanmıştır. Ayrıca, kurumanın etkin nem difüzyon katsayı değerini tahmin edebilmek için difüzyon denklemi (Fick'in ikinci yasası) ve eğim yöntemi (the slope method) kullanılmıştır. Son olarak, radyo frekans kurutma sistemiyle kurutulan siyah havuç posasının ürün kalitesi; renk, toplam fenolik içerik, toplam antosiyanin içerik ve antioksidan kapasite açısından değerlendirilmiştir.

Bulgular ve sonuç: Hedef nem içeriğine (0,04 g su/g kuru madde) ulaşmak için gereken toplam kuruma süresi 210 dk olarak tespit edilmiştir. Radyo frekans kurutmanın kuruma özelliğini tanımlayan en iyi model Midilli modeli olarak belirlenmiştir. Difüzyon denklemi yöntemiyle $0,42 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$ ve $1,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$ olmak üzere iki etkin nem difüzyon katsayısı ($D_{\text{eff-fick}}$) elde edilirken, eğim yöntemiyle elde edilen etkin nem difüzyon katsayısı ($D_{\text{eff-sm}}$) değerlerinin $0,41-1,59 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$ aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: siyah havuç posası; radyo frekans kurutma; ürün kalitesi; kurutma kinetiği

Abstract

Objective: In this study, black carrot pomace was dried by using the radio frequency drying technology and the drying efficiency of radio frequency drying and the quality of black carrot pomace were investigated.

Materials and methods: Electrode gap of 80 mm, sample thickness of 20 mm and sample weight of 500 g were conditions used for drying of black carrot pomace. Six different mathematical models were applied to define the drying characteristics of black carrot pomace. Moreover, the slope and the diffusion equation (Fick's second law) methods were used for estimating the effective moisture diffusivity of radio frequency. Finally, the product quality of black carrot pomace dried by radio frequency drying were evaluated in terms of color, total phenolic content, anthocyanin content and antioxidant capacity.

Results and conclusion: The total drying time required to achieve target moisture content (0.04 g water/g dry solid) were determined to be 210 min. Midilli model was found to be the best model to describe the drying characteristic of radio frequency drying. Two effective moisture diffusion coefficients ($D_{\text{eff-fick}}$) of 0.42 and $1.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{min}$ were obtained by the diffusion equation method while the $D_{\text{eff-sm}}$ values obtained by the slope method varied in range of $0.41-1.59 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{min}$.

Keywords: black carrot pomace; radio frequency drying; product quality; drying kinetics

1. Giriş

Türkiye ile Orta ve Uzak Doğu'da yoğun bir şekilde yetiştirilen siyah havuç önemli bir endüstriyel bitkidir (Ağcam vd., 2017). Antosiyaninler, siyah havuca kırmızı-mor rengi veren pigmentlerdir (Türkyılmaz vd., 2012). Siyah havuç antosiyanin açısından oldukça zengindir ve ayrıca gıda ve kozmetik sanayinde doğal renklendirici olarak kullanılmaktadır (Kumar vd., 2019). Doğal gıda renklendiricilerine artan talep nedeniyle antosiyanin açısından zengin siyah havuç konsantresi üretimi gün geçtikçe artmaktadır (Ağcam vd., 2017; Kumar vd., 2019). Üretimdeki bu artışla beraber proses sonrası oluşan atık miktarı da dolaylı olarak artmaktadır. Atık olarak oluşan siyah havuç posası yüksek oranda antosiyanin ve lif içermektedir (Ağcam vd., 2017; Sucheta vd., 2020). Bu sebeple, bu kıymetli atıkların hem çevreye zarar vermemesi hem de biyoaktif bileşiklerinin tekrar kullanılabilmesi için geri dönüştürülmesi önem arz etmektedir. Ancak yüksek oranda su içeren siyah havuç posası hızlı bir şekilde kurutulmadığı takdirde kolaylıkla bozulmakta ve tekrar kullanımı oldukça güçleşmektedir (Kumar vd., 2019). Hızlı kurutma yöntemlerinin araştırılması siyah havuç posasının endüstride kullanımını mümkün kılmak adına oldukça önem arz etmektedir.

Son yıllarda özellikle sebze ve meyvelerin kurutulmasında çeşitli yeni teknikler araştırılmaktadır. Bu yeni tekniklerden biri de radyo frekans enerjisi kullanarak ürünün kurutulmasıdır. Radyo frekans enerjisinin kullanıldığı bu ısınma işlemi dielektrik ısıtma olarak bilinmektedir (Yazar ve İçier, 2013). Gıda ürünlerinin hızlı ve homojen ısınmasını sağlayan radyo frekans sistemleri, gıda endüstrisinde oldukça popüler olmaya başlayan yeni bir teknoloji olarak bilinmektedir (Roknul vd., 2014; Hou vd., 2020).

Literatür incelendiğinde, radyo frekans kurutma başlığı altında raporlanan çalışmaların çoğunun tek başına radyo frekans enerjisini kullanmadıkları görülmüştür. Bunun yerine, sıcak hava veya vakum sistemleriyle birleştirilmiş radyo frekans kurutma sistemleri kullanılmaktadır (Wang vd., 2014a; Wang vd., 2014b; Zhang vd., 2016; Zhou vd., 2018; Ran vd., 2019; Zhou vd., 2019; Gong vd., 2020; Wang vd., 2020a; Wang vd., 2020b; Özbek, 2021; Wang vd., 2021; Mahmood vd., 2022). Siyah havuç posasının kurutulması ile ilgili yapılmış olan bir çalışmada da sıcak hava destekli radyo frekans kurutma sistemi kullanılmıştır (Elik, 2021). Dolayısıyla, literatürde tek başına radyo frekans sisteminin kuruma karakteristiği ve ürün kalitesi üzerine etkisini inceleyen yeterli sayıda çalışma

bulunmamaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmanın temel amaçları, siyah havuç posasının tek başına radyo frekans sistemi kullanılarak kurutulması, sistemin kuruma karakteristiğinin incelenmesi ve matematiksel olarak modellenmesi ve son olarak elde edilen kuru siyah havuç posasının renk, toplam fenolik içerik, toplam antosiyanin içerik ve antioksidan kapasite açısından incelenmesidir.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

Siyah havuç posası endüstriyel atık olarak Konya'daki bir siyah havuç konsantresi üreticisinden (Erkon Konsantre Co.) temin edilmiştir. Kurutma işlemine kadar -20°C'de polietilen torbalarda saklanmıştır. Kurutma işleminin öncesinde, siyah havuç posası gece boyunca oda sıcaklığında dengeye gelmesi için bekletilmiştir.

Siyah havuç posasının kurutma öncesi özellikleri Elik (2021) tarafından yapılan çalışmada açıklanmıştır. Buna göre havuç posasının başlangıç nem içeriği, L*, a* ve b* renk değerleri sırasıyla %84,30± 0,30, 26,29± 0,26, 22,61± 0,09 ve 4,04± 0,09 olarak belirlenmiştir. Ayrıca siyah havuç posasının başlangıç toplam fenolik, antosiyanin ve plazmanın ferrik indirgeme yeteneği (FRAP) değerleri sırasıyla 21,39±0,21 mg GAE/g kuru madde, 11,26±0,15 mg CGE/g kuru madde ve 179,17±11,50 µmol/g kuru madde olarak belirlenmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Radyo frekans kurutma

Radyo frekansla kurutma işlemi, 10 kW güçle çalışan, 27,12 MHz serbest salınımlı ve çapraz elektrotlu bir sistemin içerisinde gerçekleştirilmiştir (09010RF27/190521, Sonar Radyo Frekans Ekipmanı, İzmir, Türkiye). Radyo frekans kurutucu içerisinde ayarlanabilir elektrotlar (50 ila 200 mm) mevcuttur.

Siyah havuç posası, polipropilenden (U: 285 mm, G: 200 mm ve Y: 50 mm) yapılmış delikli dikdörtgen plastik bir kap içine 500 g ürün ve 20 mm ürün kalınlığı olacak şekilde homojen olarak yayılmıştır. Ardından plastik kap radyo frekans kurutma sistemine yerleştirilmiştir. Elektrot yüksekliği 80 mm'ye ayarlandıktan sonra kurutma işlemi başlatılmıştır. Uzaklaşan suyun tespit edilebilmesi için her 10 dakikada bir plastik kap radyo frekans kurutma sisteminden çıkartılmış, elektronik bir terazi (Cas Corporation, SW-1S/1C model, Çin) kullanılarak tartılmış ve plastik kap kurutma sistemine hemen geri yerleştirilmiştir.

Kurutma işlemi, siyah havuç posasının nem içeriğinin $5,37 \pm 0,11$ g su/g kuru madde değerinden

$0,04 \pm 0,01$ g su/g kuru madde değerine düşene kadar gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Radyo frekans kurutma için altı farklı ince tabaka kurutma modelinin istatistiksel değerleri

Model	Parametreler	
Newton $MR = \exp(-kt)$	R^2	0,9512
	RMSE	0,0743
	k	0,0159
Page $MR = \exp(-kt^n)$	R^2	0,9938
	RMSE	0,0272
	k	0,0012
	n	16,031
Hend, &Pab. $MR = a \cdot \exp(-kt)$	R^2	0,9620
	RMSE	0,0671
	a	11,101
	k	0,0174
Wang and Singh $MR = 1 + at + bt^2$	R^2	0,9886
	RMSE	0,0368
	a	-0,0112
	b	$3,108 \times 10^{-5}$
Logarithmic $MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	R^2	0,9774
	RMSE	0,0531
	a	11,872
	c	-0,1140
	k	0,0133
Midilli $MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$	R^2	0,9950
	RMSE	0,0243
	a	0,9488
	b	$-1,5096 \times 10^{-7}$
	k	0,0006
	n	17,728

2.2.2. İnce tabaka kurutma modeli

Radyo frekans kurutmanın modellenmesi için Newton, Page, Hend, &Pab., Wang and Singh, Logarithmic ve Midilli olmak üzere altı farklı ince tabaka kurutma modeli kullanılmıştır (Çizelge 1). Boyutsuz nem oranı (MR) ve kuruma hızı (DR, g su/gkuru madde*dk) sırasıyla denklem 1 ve 2 kullanılarak belirlenmiştir:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

M: kurutma sırasında herhangi bir zamandaki nem içeriği (g su /g kuru madde)

M_o : başlangıç nem içeriği (g su /g kuru madde)

M_e : son nem içeriği (g su /g kuru madde)

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

$M_{t+\Delta t}$: “t+Δt” zamanındaki nem içeriği (g su /g kuru madde)

M_t : “t” zamanındaki nem içeriği (g su /g kuru madde)

t: kuruma süresi (dk)

Deneysel veriler, SigmaPlot yazılımı (Sürüm 12, Systat Software, Inc.) kullanılarak altı farklı kurutma modeli için uygulanmıştır. Her bir model için, korelasyon katsayısı (R^2) ve denklem (3)’te tanımlanan kök ortalama kare hatası (RMSE) değerleri belirlenmiştir. Siyah havuç posasının radyo frekans kurutulmasını en iyi açıklayan model, en yüksek R^2 ve en düşük RMSE değerlerine sahip model olarak kabul edilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{deneysel,i} - MR_{teorik,i})^2}{N}} \quad (3)$$

$MR_{deneysel,i}$: deneme sonuçlarından elde edilen nem oranı değeri

$MR_{teorik,i}$: model ile hesaplanan nem oranı değeri,

N : deneysel veri sayısı

n : kullanılan modeldeki katsayı

2.2.3. Etkin nem difüzyonu

Çalışmada elde edilen verilere göre etkin nem difüzyon katsayısı; difüzyon denklemi (Fick'in ikinci yasası) ve eğim yöntemi (the slope method) kullanılarak iki farklı şekilde hesaplanmıştır.

İlk olarak, Fick'in ikinci yasası kullanılarak deneysel kurutma verilerinden etkin nem difüzyon katsayısı ($D_{eff-fick}$) hesaplanmıştır. Bu metodun kullanılabilmesi için şu varsayımlar yapılmıştır (Crank, 1979): (i) başlangıç nem içeriği numunenin kütlesi boyunca eşit olarak dağılmıştır; (ii) siyah havuç posası homojen bir dikdörtgen plakadır; (iii) difüzyon katsayısı sabittir ve büzülme ihmal edilebilir düzeydedir; (iv) nem hareketi tek boyutludur; (v) dış direnç ihmal edilebilir.

Dikdörtgen plaka için $D_{eff-fick}$ değeri aşağıdaki şekilde (denklem 4) hesaplanmıştır (Crank, 1979):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff-fick} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

MR: nem oranı (boyutsuz)

n: Fourier serisinin terimlerinin sayısı

t: kuruma süresi (dk)

$D_{eff-fick}$: Etkin nem difüzyon katsayısı (m^2/dk)

L: Kurutulan dilimin yarı kalınlığı (m)

Uzun kuruma süreleri için $n = 1$ olur ve bu eşitlik sadeleştirilerek denklem (5) elde edilir.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2}{4L^2} D_{eff-fick} t\right) \quad (5)$$

$\ln(MR)$ karşı kuruma süresi (t) eğrisi çizilir ve eğrinin eğiminden (denklem 6) $D_{eff-fick}$ değeri hesaplanır.

$$Eğim = \frac{\pi^2}{4L^2} D_{eff-fick} \quad (6)$$

Etkin nem difüzyon katsayısı (D_{eff-sm}) eğim yöntemi (the slope method) kullanılarak da hesaplanmıştır. Deneysel kurutma eğrisi (kurutma süresine karşı log MR), teorik difüzyon eğrisi (log MR'ye karşı F_0) ile karşılaştırılmıştır. Deneysel kurutma eğrisinin (dMR/dt)_{deneysel} ve teorik eğrinin (dMR/dF_0)_{teorik} eğimi, differentiation metodu kullanılarak belirlenmiştir (Goula vd., 2016). D_{eff-sm} değeri denklem (7) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D_{eff-sm} = \frac{\left(\frac{dMR}{dt}\right)_{deneysel}}{\left(\frac{dMR}{dF_0}\right)_{teorik}} \times L^2 \quad (7)$$

MR: nem oranı (boyutsuz)

F_0 : Fourier sayısı (Dt/L^2)

t: kuruma süresi (dk)

D_{eff-sm} : Etkin nem difüzyon katsayısı (m^2/dk)

L: Kurutulan dilimin yarı kalınlığı (m)

2.2.4. Renk parametreleri

Kuru siyah havuç posasının aydınlık değeri (L^*), kırmızılık indeksi (a^*) ve sarılık indeksi (b^*) değerleri CIE Lab sisteminde HunterLab ColorFlex (A60-1010-615 Model Colorimeter, Hunter Lab, Reston, VA) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Toplam renk değişimi (ΔE) denklem (8) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 - (a_0^* - a^*)^2 - (b_0^* - b^*)^2} \quad (8)$$

L_0^* , a_0^* ve b_0^* başlangıç renk değerlerini, L^* , a^* ve b^* ise radyo frekans kurutma sistemiyle kurutulmuş ürünün renk değerlerini ifade eder.

2.2.5. Toplam fenolik içerik, toplam antosiyanin içerik ve antioksidan kapasite

Toplam fenolik içerik, Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Singleton vd., 1999). Kısaca, 450 μ l örnek ekstrakta 2,25 ml seyreltilmiş Folin-Ciocalteu reaktifi (9:1 h,h) eklenmiştir. 3 dk oda sıcaklığında karıştırıldıktan sonra 1,8 ml sodyum karbonat çözeltisi (75 g/L) eklenmiş ve 2 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. 760 nm'de spektrofotometre (Beckman Coulter, Brea, CA) kullanılarak absorbans değeri okunmuştur. Toplam fenolik içerik değeri, mg gallik asit eşdeğerleri (GAE)/g kuru ağırlık olarak ifade edilmiştir. Tüm ölçümler üç kez yapılmıştır.

Toplam antosiyanin içeriğini belirlemek için pH diferansiyel yöntemi kullanılmıştır (Lee vd., 2005). Bu metotta potasyum klorat (pH=1) ve sodyum asetat (pH=4,5) olmak üzere iki farklı tampon çözeltisi kullanılmıştır. 0,5 mL örnek ekstrakt iki ayrı kapa aktarılmış ve her iki tampon çözeltisinden 7,5 ml eklenmiştir. Hazırlanan karışımların absorbansı 515 ve 700 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Örneğin absorbansı (A), aşağıdaki denklem kullanılarak bulunmuştur:

$$A = (A_{515} - A_{700})_{pH 1,0} - (A_{515} - A_{700})_{pH 4,5}$$

Örnekleredeki antosiyanin konsantrasyonu ise aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\text{Toplam antosiyanin içerik (mg/L)} = A \times MW \times DF \times 1000 / (\epsilon \times 1)$$

Burada siyanidin-3-glukozit'in moleküler ağırlığı (MW = 449,2) ve molar soğurma ($\epsilon = 26,900$) sabitleri kullanılmıştır. Toplam antosiyanin içerik değeri, mg siyanidin-3-glukozit eşdeğerleri (CGE)/g kuru ağırlık olarak sunulmuştur. Tüm ölçümler üç kez yapılmıştır.

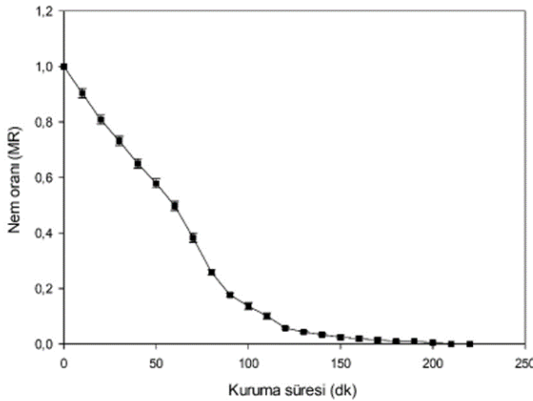
Antioksidan kapasite, Benzie ve Strain (1996) tarafından önerilen FRAP yönteminde hafif

modifikasyonlar uygulanarak belirlenmiştir. FRAP çözeltisi, sodyum asetat tamponu (300 mM, pH 3,6), 1,3,5-tri (2-piridil)-2,4,6-triazin (TPTZ) solüsyonu (40 mM HCl içinde 10 mM TPTZ) ve 20 mM demir (III) klorür çözeltisi sırasıyla 10:1:1 (h/h/h) oranlarında 37°C'de karıştırılarak hazırlanmıştır. 100 µL örnek ekstraktı alınmış ve 3 ml FRAP solüsyonu eklenmiş ardından hazırlanan karışım 8 dk karanlıkta bekletilmiştir. Örneklerin absorbansları 593 nm'de ölçülmüştür. Çeşitli konsantrasyonlarda trolox çözeltisi (0-500 µmol/L) kalibrasyon eğrisini çizmek için kullanılmıştır. Sonuçlar µmol/g kuru ağırlık olarak verilmiştir. Tüm ölçümler üç kez yapılmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Radyo frekans kuruma karakteristiği

Şekil 1, ürünün nem oranının radyo frekans kuruma süresiyle değişimini göstermektedir. Hedef nem içeriğine (0,04 ± 0,01 g su/ g kuru madde) ulaşmak için gerekli süre 210 dk olarak belirlenmiştir.

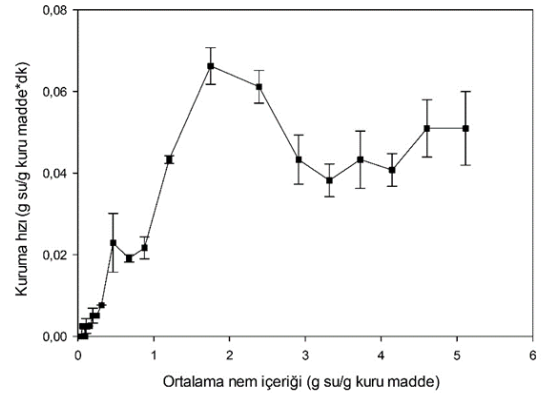


Şekil 1. Ürünün nem oranının radyo frekans kuruma süresiyle değişimi

Elik (2021) tarafından yapılan benzer çalışmamızda, sıcak hava destekli radyo frekans kurutma sisteminde siyah havuç posası aynı koşullar altında 110 dk içerisinde aynı nem içeriğine (0,04±0,01 g su/g kuru madde) düşürülmüştür. Sonuçlar, sıcak hava kullanılmadığında kurutma süresinin yaklaşık olarak %90 oranında arttığını göstermiştir. Radyo frekans ısıtma, materyalin iç ısısının artmasını ve suyun yüzeye doğru hareket etmesini sağlar. Sıcak hava ise yüzeyde biriken nemin uzaklaştırılmasına imkân tanır ve daha verimli bir kuruma sağlar (Awuah vd., 2014). Shinde vd. (2013) tarafından yapılan benzer bir

çalışmada tek başına radyo frekans sisteminin kuruma süresini artırdığı rapor edilmiştir.

Şekil 2, radyo frekans kuruma hızının ürünün ortalama nem içeriği ile değişimini göstermektedir. Radyo frekans kurutmanın kuruma hızının, kurutmanın başlangıcında yavaş bir şekilde artmaya başladığı ve kuruma sonuna doğru azaldığı bulunmuştur. Bu durum, nem içeriğinin yüksek olduğu başlangıç kuruma bölgesinde kuruma hızı yüksek iken zamanla nem içeriğinin azalmasına bağlı olarak kuruma hızının da düşmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Şekil 2'de kurutmanın sadece düşen hız periyodunda gerçekleştiği ve sabit hız periyodu olmadığı görülmektedir.



Şekil 2. Radyo frekans kuruma hızının ürünün ortalama nem içeriği ile değişimi

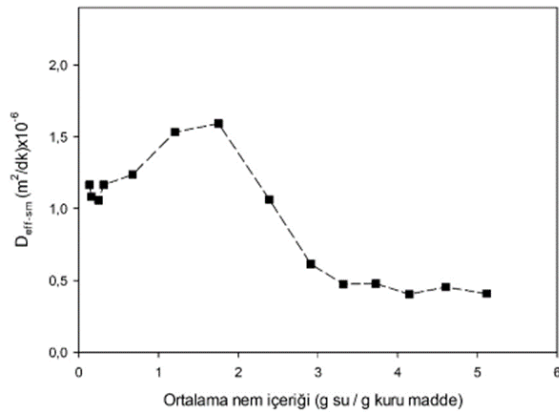
Çizelge 1, siyah havuç posasının kurutulmasında radyo frekans kurutma sistemi için modellenmiş altı farklı matematiksel model sonuçlarını göstermektedir. Kurutmanın modellenmesinde en uygun model en yüksek R² ve en düşük RMSE değerlerine sahip olanıdır (Wang vd., 2020a). Bu nedenle, siyah havuç posasının radyo frekans kuruma karakteristiğini tanımlayan en iyi model, en düşük RMSE değeri (0,0243) ve en yüksek R² değerine (0,9950) sahip Midilli modeli olarak belirlenmiştir.

Etkin nem difüzyon katsayısı, difüzyon denklemi (Fick'in ikinci yasası) yöntemi ve eğim yöntemi (the slope method) kullanılarak tahmin edilmiştir. Difüzyon denklemi ile elde edilen etkin nem difüzyon katsayısı değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Difüzyon denklemi ile elde edilen etkin nem difüzyon katsayı değerleri

Kurutma metot	$D_{\text{eff1-fick}} \times 10^6$ (m^2/dk)	$D_{\text{eff2-fick}} \times 10^6$ (m^2/dk)
Radyo frekans kurutma	0,42	1,31

Difüzyon denklemi kullanıldığında iki tane etkin nem difüzyon katsayısı değeri olduğu tespit edilmiştir ($0,42 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$ ve $1,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$). Sadece radyo frekans kullanılarak yapılan kurutmanın etkin nem difüzyon katsayısı değeri ($0,42 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$ ve $1,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$), siyah havuç posasının kurutulduğu diğer bir çalışmamızda kullanılan sıcak hava destekli radyo frekans kurutma tekniğinin etkin nem difüzyon katsayısı değerine ($1,92 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$) kıyasla daha düşük bulunmuştur (Elik, 2021). Bu durum, radyo frekans ısınma ile yüzeye taşınan ürünün içerisindeki nemin, sıcak hava tarafından süpürülmesi ve dolayısıyla kuruma hızı ve etkinliğini arttırmasıyla açıklanabilir (Awuah vd., 2014). Bununla beraber, Wang vd. (2020b) tarafından yapılan kabuklu fındığın kurutulduğu başka bir hava destekli radyo frekans kurutma sisteminde etkin nem difüzyon katsayısı ($5,33 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{dk}$) mevcut çalışmada belirlenene kıyasla oldukça düşük bulunmuştur. Bu durum, örneğin yapısı, konfigürasyonu ve/veya radyo frekans kurutucuya eklenen farklı sistemlerden (örn; sıcak hava, vakum) kaynaklı olabilir.



Şekil 3. Etkin nem difüzyon katsayı değerlerinin ortalama nem içeriği ile değişimi

Radyo frekans kurutma için eğim yöntemi (the slope method) ile elde edilen etkin nem difüzyon katsayı değerleri Şekil 3'te gösterilmektedir. $D_{\text{eff-sm}}$ değerleri, $0,41-1,59 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dk}$ aralığında bulunmuştur. $D_{\text{eff-}}$

$_{\text{sm}}$ değerlerinin ortalama nem içeriğinin azalmasıyla arttığı görülmüştür. Eğim yöntemi (the slope method) ile elde edilen sonuçlar ile difüzyon denklemi (Fick'in ikinci yasası) kullanılarak elde edilen etkin nem difüzyon katsayı değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu bulunmuştur.

3.2. Kurutulmuş siyah havuç posasının kalite özellikleri

Kurutulmuş siyah havuç posasının bazı kalite özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Kuru siyah havuç posasının L^* , a^* ve b^* renk değerleri sırasıyla $22,75 \pm 0,04$, $16,78 \pm 0,23$ ve $1,53 \pm 0,05$ olarak belirlenmiştir. Başlangıç ürün ile kıyaslandığında (Materyal ve yöntem bölümünde) tüm renk değerlerinin radyo frekans kurutma sonrası azaldığı görülmüştür. L^* değerindeki azalma kurutma sırasında enzimatik ve/veya enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarından kaynaklıdır (Elik, 2021). Pozitif a^* ve b^* değerleri sırasıyla ürünün kırmızılığı ve sarılığının bir ölçüsüdür ve bu renk değerlerinin azalması kurutma sırasında siyah havuç posasının kırmızılığının ve sarılığının azaldığını gösterir. Bu renk parametrelerindeki azalma siyah havuç posasının antosiyanin ve karotenoid içeriğinin azaldığına işaret ediyor olabilir. ΔE değeri ürünün uygulanan işlem sonrası toplam renk değişimini gösterir. Kurutulmuş siyah havuç posasının ΔE değeri $7,30 \pm 0,34$ olarak hesaplanmıştır. Renk değerlerinin, önceki çalışmamızda sıcak hava destekli radyo frekans kurutma sistemi kullanılarak kurutulan siyah havuç posasının renk değerlerine (L^* : $25,82 \pm 0,03$, a^* : $19,76 \pm 0,07$ ve b^* : $1,69 \pm 0,05$) kıyasla azaldığı görülmüştür (Elik, 2021). Bu çalışmada kullanılan radyo frekans kurutma sisteminde sıcak hava desteğinin olmaması, kurutma süresini arttırmıştır (110 dk'dan 210 dk'a) ve dolayısıyla bu durum daha uzun işlem süresine tabi olan ürünün renk kalitesini olumsuz yönde etkilemiş olabilir. GABA pirincin kurutulduğu bir çalışmada radyo frekans sisteminin tek başına kullanılmasının, hava destekli radyo frekans sistemine kıyasla

ürünün renk kalitesini olumsuz yönde etkilediği bulunmuştur (Akaranuchat vd., 2012).

Çizelge 3. Radyo frekans sistemiyle kurutulmuş siyah havuç posasının kalite özellikleri

Özellik	Kurutulmuş siyah havuç posası
L*	22,75 ±0,04
a*	16,78 ±0,23
b*	1,53 ±0,05
ΔE	7,30 ±0,34
Toplam fenolik içerik (mg GAE/g kuru madde)	12,65 ±0,51
Toplam antosiyanin içerik (mg CGE/g kuru madde)	2,27 ±0,18
FRAP (μmol/g kuru madde)	108,78 ±5,32

Kurutma sonrası siyah havuç posasının toplam fenolik içeriği 12,65±0,51 mg GAE/g kuru madde olarak belirlenmiştir. Kurutma öncesi posanın toplam fenolik içeriği göz önüne alındığında (21,39±0,21 mg GAE/g kuru madde) yaklaşık %48 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca, toplam antosiyanin içeriğinin %80 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Kurutulmuş ürünün antioksidan kapasitesi FRAP metoduyla ölçülmüş ve kurutma sonrasında FRAP değerinin 179,17±11,50 μmol/g kuru madde değerinden 108,78±5,32 μmol/g kuru madde değerine düştüğü görülmüştür. Hava destekli radyo frekans ısıtma sisteminin pirinç kepeğinin kalite özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada, radyo frekans uygulaması sonrasında ürünün toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivitesinin önemli bir şekilde değişmediği raporlanmıştır (Chen vd., 2021). Havuç sebzesinin hava destekli radyo frekans kurutma sistemiyle kurutulduğu başka bir çalışmada ise kurutma sonrası ürünün toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivitesinde önemli bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir (Özbek, 2021). Radyo frekans sistemiyle çileğin kurutulduğu diğer bir çalışmada ise toplam antosiyanin ve fenolik içeriğin sırasıyla %32 ve %26 oranında azaldığı bildirilmiştir (Jiang vd., 2019). Literatürde bildirilen farklı sonuçlar, kullanılan radyo frekans sisteminin farklılığı (sıcak hava destekli olması gibi), kurutma sıcaklığı ve/veya gıdanın farklı fiziksel yapısından kaynaklı olabilir.

4. Sonuçlar

Çalışmada siyah havuç posası radyo frekans sistemi kullanılarak kurutulmuştur. Kurutma sisteminin kinetiği incelenmiş ve kurutulmuş ürünün kalite özellikleri değerlendirilmiştir. Literatür ile karşılaştırıldığında, sonuçlar sıcak hava desteği olmadan kullanılan radyo frekans sisteminin kuruma süresini uzattığını göstermiştir. Test edilen altı farklı matematiksel model arasında, radyo frekans kurutmanın kurutma özelliğini Midilli model en iyi şekilde tanımlamıştır. Siyah havuç posasının renk kalitesi, fenolik içeriği, antosiyanin içeriği ve antioksidan kapasitesinin kurutma sonrasında azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, sıcak hava desteğinin kullanılmadığı radyo frekans kurutma sistemlerinde kurutma etkinliğinin azaldığı ve ürün kalitesinin olumsuz açıdan daha fazla etkilendiği belirlenmiştir. Bu nedenle, sıcak hava ile desteklenmiş radyo frekans kurutma sistemlerinin tercih edilmesi kurutma etkinliği ve ürün kalitesi açısından önem taşımaktadır.

5. Kaynaklar

- Agcam, E., Akyıldız, A. and Balasubramaniam, V. (2017). Optimization of anthocyanins extraction from black carrot pomace with thermosonication. *Food Chemistry*, 237, 461-470.
- Akaranuchat, P., Vearasilp, S., Thanapornpoonpong, S., Krittigamas, N., Suriyong, S., Pawelzik, E. and Horsten, D. V. (2012). Combining radio frequency drying

with hot air oven for energy reduction in GABA rice. In Conference on International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development.

Awuah, G.B., Ramaswamy, H.S. and Tang, J. (2014). Radio-Frequency heating in food processing: Principles and applications. CRC Press.

Benzie, I.F. and Strain, J.J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239, 70-76.

Chen, Y. H., Yen, Y. F. and Chen, S. D. (2021). Effects of Radio Frequency Heating on the Stability and Antioxidant Properties of Rice Bran. *Foods*, 10(4), 810.

Crank, J. (1979). The mathematics of diffusion. Oxford university press.

Elik, A. (2021). Hot air-assisted radio frequency drying of black carrot pomace: Kinetics and product quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102800.

Gong, C., Liao, M., Zhang, H., Xu, Y., Miao, Y., & Jiao, S. (2020). Investigation of hot air-assisted radio frequency as a final-stage drying of pre-dried carrot cubes. *Food and Bioprocess Technology*, 13(3), 419-429.

Goula, A.M., Thymiatis, K. and Kaderides, K. (2016). Valorization of grape pomace: drying behavior and ultrasound extraction of phenolics. *Food and Bioprocess Technology*, 100, 132-144.

Hou, L., Zhou, X. and Wang, S. (2020). Numerical analysis of heat and mass transfer in kiwifruit slices during combined radio frequency and vacuum drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 154, 119704

Jiang, H., Shen, Y., Zhen, L., Li, W. and Zhang, Q. (2019). Evaluation of strawberries dried by radio frequency energy. *Drying Technology*, 37(3), 312-321.

Kumar, M., Dahuja, A., Sachdev, A., Kaur, C., Varghese, E., Saha, S. and Sairam, K. (2019). Valorisation of black carrot pomace: Microwave assisted extraction of bioactive

phytochemicals and antioxidant activity using Box–Behnken design. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 995-1007.

Lee, J., Durst, R.W. and Wrolstad, R.E. (2005). Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC International*, 88(5), 1269-1278.

Mahmood, N., Liu, Y., Munir, Z., Zhang, Y. and Niazi, B. M. K. (2022). Effects of hot air assisted radio frequency drying on heating uniformity, drying characteristics and quality of paddy. *LWT*, 113131.

Özbek, H.N. (2021). Radio frequency-assisted hot air drying of carrots for the production of carrot powder: Kinetics and product quality. *LWT*, 152, 112332.

Ran, X. L., Zhang, M., Wang, Y. and Liu, Y. (2019). Vacuum radio frequency drying: a novel method to improve the main qualities of chicken powders. *Journal of Food Science and Technology*, 56(10), 4482-4491.

Roknul, A.S., Zhang, M., Mujumdar, A.S. and Wang, Y. (2014). A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.). *Drying Technology*, 32, 657-666.

Shinde, A., Das, S. and Datta, A. K. (2013). Quality improvement of orthodox and CTC tea and performance enhancement by hybrid hot air–radio frequency (RF) dryer. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 444-449.

Singleton, V.L., Orthofer, R. and Lamuela-Raventós, R.M. (1999). [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178.

Sucheta, Misra, N. N. and Yadav, S. K. (2020). Extraction of pectin from black carrot pomace using intermittent microwave, ultrasound and conventional heating: Kinetics, characterization and process economics. *Food Hydrocolloids*, 102, 105592.

Türkyılmaz, M., Yemiş, O. and Özkan, M. (2012). Clarification and pasteurisation effects

on monomeric anthocyanins and percent polymeric colour of black carrot (*Daucus carota* L.) juice. *Food Chemistry*, 134, 1052-1058.

Wang, W., Wang, W., Jung, J., Yang, R., Tang, J. and Zhao, Y. (2020a). Investigation of hot-air assisted radio frequency (HARF) dielectric heating for improving drying efficiency and ensuring quality of dried hazelnuts (*Corylus avellana* L.). *Food and Bioproducts Processing*, 120, 179-190.

Wang, W., Wang, W., Wang, Y., Yang, R., Tang, J. and Zhao, Y. (2020b). Hot-air assisted continuous radio frequency heating for improving drying efficiency and retaining quality of inshell hazelnuts (*Corylus avellana* L. cv. Barcelona). *Journal of Food Engineering*, 279, 109956.

Wang, Y., Zhang, L., Johnson, J., Gao, M., Tang, J., Powers, J. R. and Wang, S. (2014a). Developing hot air-assisted radio frequency drying for in-shell macadamia nuts. *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 278-288.

Wang, Y., Zhang, L., Gao, M., Tang, J. and Wang, S. (2014b). Pilot-scale radio frequency drying of macadamia nuts: heating and drying uniformity. *Drying Technology*, 32(9), 1052-1059.

Wang, W., Tang, J. and Zhao, Y. (2021). Investigation of hot-air assisted continuous radio frequency drying for improving drying efficiency and reducing shell cracks of inshell hazelnuts: The relationship between cracking level and nut quality. *Food and Bioproducts Processing*, 125, 46-56.

Yazar, G. and İçier, F. (2013). Radyo Frekans Isıtma Yöntemi ve Gıda İşlemede Kullanımı. *Akademik Gıda*, 11, 80-93.

Zhang, B., Zheng, A., Zhou, L., Huang, Z. and Wang, S. (2016). Developing hot air-assisted radio frequency drying for in-shell walnuts. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 459-467.

Zhou, X., Xu, R., Zhang, B., Pei, S., Liu, Q., Ramaswamy, H. S. and Wang, S. (2018). Radio frequency-vacuum drying of kiwifruits: Kinetics, uniformity, and product quality.

Food and Bioprocess Technology, 11(11), 2094-2109.

Zhou, X., Ramaswamy, H., Qu, Y., Xu, R. and Wang, S. (2019). Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: Effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 56, 102182.