



Kırmızı Kapy Biberlerinin (*Capsicum Annuum* L.) Kurutma ve Rehidrasyon Kinetiklerinin Belirlenmesi, Kurutma İşleminin Termodinamik Analizi

Determination of Drying and Rehydration Kinetics of Red Capia Pepper (*Capsicum Annuum* L.), Energy Analysis of Drying Process

Faruk Kılıç¹, Tuğba Tabanlıgil Calam^{2*}

¹ Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, TÜRKİYE. farukkilic@gazi.edu.tr.

² Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Ankara, TÜRKİYE.

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: ttabanligil@gazi.edu.tr.

Geliş Tarihi / Received: 28.03.2019

Kabul Tarihi / Accepted: 23.12.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI: 10.21205/deufmd.2020226503

Atıf şekli/How to cite: KILIÇ, F., TABANLIGİL, CALAM, T.(2020). Kırmızı Kapy Biberlerinin (*Capsicum Annuum* L.) Kurutma ve Rehidrasyon Kinetiklerinin Belirlenmesi, Kurutma İşleminin Termodinamik Analizi. DEUFMD 22(65), 331-342.

Öz

Bu çalışmada, kapy biber dilimlerinin kurutma karakteristikleri bir konvektif sıcak havalı kurutucu kullanılarak incelenmiştir. Biberlerin kuruma işleminden önce, sıcak NaOH çözeltisi ve zeytinyağı/K₂CO₃ karışımı ile ön işleme tabi tutulmuştur. Ön işleme tabi tutulan ve herhangi bir ön işleme tabi tutulmayan biber numuneleri, gıda kurutma fırınında 50 ve 60°C sıcaklıklarda kurutulmuştur. Uygulanan ön işlemin ve kurutma sıcaklığındaki artışın, kuruma süresini azalttığı ve rehidrasyon kapasitesini değiştirdiği görülmüştür. 50 °C sıcaklıkta ön işlemsiz, NaOH ve zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemleri uygulanmasıyla ile kurutulan kapy biberlerin efektif difüzyon katsayıları sırasıyla 1,62×10⁻¹⁰, 3,24×10⁻¹⁰ ve 8,11×10⁻¹⁰ m²s⁻¹, 60 °C sıcaklıkta ise sırasıyla 3,24×10⁻¹⁰, 4,87×10⁻¹⁰ ve 9,74×10⁻¹⁰ m²s⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjisinin değerleri ise sırasıyla 57,62, 33,88 ve 15,23 kJ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kurutma işlemlerinin termodinamik analizleri de yapılarak her bir kurutma sıcaklığı ve uygulanan ön işlemler için kümülatif tüketilen enerji miktarları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kurutma kinetiği, rehidrasyon kapasitesi, kapy biber, termodinamik analiz, efektif difüzyon katsayısı

Abstract

In this study, drying characteristics of the capia pepper slices were investigated using a food drying oven. Prior to drying process of the peppers, the peppers were pretreated with a mixture of hot NaOH solution and olive oil / K₂CO₃ mixture. The pre-treated and non-pretreated pepper samples were dried in the food drying oven at temperatures of 50 and 60 ° C. It was observed that the applied pre-treatment and the increasement in the drying temperature decreased the drying time and changed the rehydration capacity. At 50 °C, the effective diffusion coefficients of the chickens dried by pre-

treatment with NaOH and olive oil/K₂CO₃ pretreatments were 1.62×10^{-10} , 3.24×10^{-10} and 8.11×10^{-10} m²s⁻¹, respectively. At 60 °C, they were calculated as 3.24×10^{-10} , 4.87×10^{-10} and 9.74×10^{-10} m²s⁻¹ respectively. Activation energy values were calculated as 57.62, 33.88 and 15.23 kJ, respectively. In addition, thermodynamic analyzes of drying processes were carried out and cumulative consumed energy amounts were determined for each drying temperature and the pretreatment applied.

Keywords: Drying kinetics, rehydration capacity, capia pepper, thermodynamic analysis, effective diffusion coefficient

1. Giriş

Kırmızıbiber (*Capsicum annum* L.), kanserojen bileşenlere karşı koruma sağlayan ve yaşlanma sürecini geciktiren karotenoidler (provitamin A), alkaloidler, C vitamini ve E vitamini içeriği ile fizyolojik sağlığı teşvik eden özelliklere sahip iyi bir antioksidan madde kaynağıdır [1, 2]. Biberler ayrıca kalsiyum, fosfor, potasyum ve demir gibi mineraller içerirler [3]. Kırmızı biberler, çiğ ya da pişmiş olarak tüketilmesinin yanında konserve, turşu, salça, ketçap, sos, hazır çorbalar, konsantre domates çorbaları, tarhana, sucuk, çocuk maması, pastırma yapımı gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak biberin en geniş kullanım alanı kurutulmuş olarak hazırlanan baharat (toz ve pul biber) halindedir ve biber en çok tercih edilen baharatlar arasındadır.

Kurutma, eş zamanlı ısı ve kütle aktarımına bağlı olmak üzere nem giderme işlemi olarak tanımlanmaktadır [4]. Gıda maddelerinin kurutulmuş olarak saklanması endüstride en çok kullanılan ancak en yoğun enerji gerektiren yöntemlerinden biridir [5]. Kurutma işleminde gıda su aktivitesi değeri düşürülerek ürünün raf ömrünün uzaması sağlanır [6]. Su aktivitesi değerinin belli bir değerin altına düşmesi depolama sırasında gıdanın bozulmasını önler, kalite özelliklerini korur, ürün hacmini azaltarak taşıma ve depolama sırasında kolaylık sağlar [7, 8].

Geleneksel olarak, biberler Türkiye'de açık havada kurutulur ve tam olarak kurumanın sağlanabilmesi için 8-10 gün süren güneş ışığına maruz kalır. Bu uygulama yaygın bir yöntem olmakla birlikte, zaman alıcıdır. Kuruma sırasında biber, toz, toprak, kum parçacıkları ve böceklerle kirlenmeye karşı eğilimlidir. Ayrıca bu yöntem hava durumuna bağlı olarak her zaman aynı kalitede ürün elde edilememesi gibi bir dezavantaja daha sahiptir [9, 10]. Tüm bu dezavantajları gidermek amacıyla daha hızlı ve kontrol edilebilen kurutma yöntemleri geliştirilmektedir. Geliştirilen kurutma yöntemleri kullanılarak ürünün kuruma

süresinin büyük oranda kısalması ile beraber daha temiz ve standart kalitede kuruma sağlanması, daha az vitamin ve besin kayıpları meydana gelmesi amaçlanmaktadır [11].

Kurutma hızını arttırmak amacıyla gıdaya kuruma öncesinde çeşitli ön işlemler uygulanmaktadır. Kimyasal ön işlemler gıdanın yüzey geçirgenliğini artırarak kurutma işlemi sırasında ısı ve nem transferini hızlandırmaktadır. Bunun yanında renk kaybının da önlenmesi amaçlanmaktadır [12]. Haşlama işlemi ile gıdanın hücre duvarının geçirgenliği artarken seçiciliği azalmaktadır. Böylece kuruma esnasında nem atma hızı artmaktadır [12, 13]. Ayrıca oleat esterlerinin alkali veya asit çözeltilerine daldırılan gıdanın renk kayıpları önlenmeye çalışılmaktadır [14-16].

Kırmızıbiberin kurutulması çok yaygın olarak yapılan bir işlem olması nedeniyle yapılan çalışmalarda, kurutma hızını artırmak, bu sırada üründe oluşabilecek kalite kaybını önlemek ve işlem sırasında geçen zamandan ve harcanan enerjiden tasarruf sağlamak amaçlanmaktadır. Pangavhane ve ark. [17], ön işlem olarak kurutmadan önce yapılan kimyasal daldırma işleminin kuruma süresini azalttığını ve kuru ürünün renk, lezzet ve besin kalitesini iyileştirdiğini belirtmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada NaOH kullanılarak yapılan ön işlem sonrasında kuruma oranının önemli miktarda arttığı gözlemlenmiştir. Christensen ve Peacock [18], gıdanın kurutulması öncesinde yapılan ön işlemlerde en yaygın olarak kullanılan kimyasalın, zeytinyağı ve potasyum karbonat (K₂CO₃) karışımı, ya da etil oleat gibi etil ester ve K₂CO₃'ün bir karışımı olduğunu belirtmektedir. Kullanılan bu karışım, gıdanın su difüzyonuna karşı iç direncinin azalmasını sağlamaktadır.

Literatürde kurutma işlemi için yapılan kimyasal ön işlemlerde sıklıkla etil oleat/K₂CO₃ karışımı kullanılmaktadır. Bu çalışmada etil oleat yerine literatürdeki kullanımı kısıtlı olarak yer alan

zeytinyağı/ K_2CO_3 karışımı kullanılmıştır. Zeytinyağı/ K_2CO_3 karışımının kullanımı, hem maliyetinin daha düşük olması hem de temin edilebilirliğinin kolaylığı açısından avantajlıdır. Ayrıca bu çalışmada, literatürdeki yeri kısıtlı olan, ön işlem uygulanarak yapılan kurutma işlemlerinde termodinamik analize yer verilmiştir.

Bu çalışmada herhangi bir ön işlem uygulanmamış olan kapyta biberler ile bazık ortamda haşlama ve zeytinyağı/ K_2CO_3 karışımında bekletme şeklinde kimyasal ön işlemler uygulanan kapyta biberlerin 50 ve 60 °C sıcaklıklarında kuruma kinetiği incelenmiş ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Her bir kurutma işlemi için efektif difüzyon katsayısı (D_{eff}) ve aktivasyon enerjisi hesaplanmış, rehidrasyon kapasiteleri belirlenmiştir. Ayrıca kurutma işlemlerinin termodinamik analizleri de yapılarak 50 ve 60 °C kurutma sıcaklığı ve uygulanan ön işlemler için kümülatif tüketilen enerji miktarları belirlenmiştir. Yapılan termodinamik analizle ön işlem uygulaması sonucunda, kurutma işleminde harcanan zamanın yanı sıra enerjiden sağlanan % tasarruf değerleri tespit edilmiş ve yapılan ön işlemler birbiri ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kapyta biberlerin kurutma işlemine hazırlanması

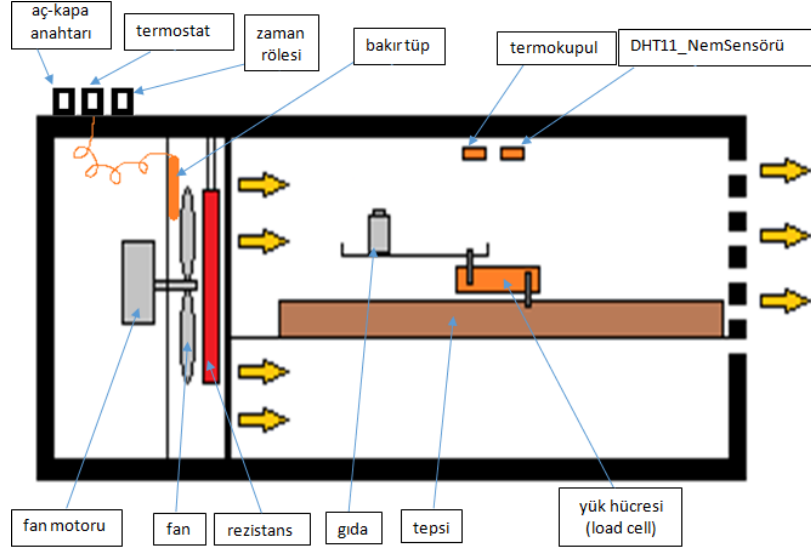
Bu çalışmada, bir süpermarkette satın alınan kapyta biberleri kullanılmıştır. Kapyta biberler eni ve boyu 1,5 cm olacak şekilde bir bıçak yardımıyla dilimlenmiş ve her birinin ağırlığı 100 g olan üç gruba ayrılmıştır. Bunlardan ilkinen hiçbir ön işlem uygulanmamıştır. Diğeri 90 °C sıcaklığındaki kütlece % 0,5'lik NaOH çözeltisi içerisinde 10 s süre ile bekletilip çıkarılmış ve üzerine NaOH çözeltisinden gelen kalıntıları gidermek için saf su ile yıkanmıştır. Son grup ise 25 °C sıcaklığında kütlece %4 zeytinyağı ve %5

K_2CO_3 içeren karışımda 15 dakika bekletilerek ön işleme tabi tutulmuş ve bu işlemin ardından kurutmaya alınmıştır.

2.2. Kurutma deneyleri

Bu çalışmada en, boy ve yüksekliği sırasıyla 0.42m* 0.60m* 0.38m olan kurutucu kullanılmıştır. Isıtılan fırın hacmi 0.0846m³ tür. Kuruma parametrelerini belirleyebilmek için fırının ortam sıcaklığı ve nemi ile gıdanın ağırlığı kurutma esnasında kaydedilmiştir. Nem sensörü (DHT11) fırın içi bağıl nemini, termokupl ise ortam sıcaklığını ölçmektedir. DHT11 düşük maliyetli dijital sıcaklık ve nem sensörüdür. Termokupl ise sıcaklık sensörüdür. -20 °C ile 85 °C ölçüm aralığında ve 0.25 °C hassasiyete çalışmaktadır. Gıda kurutma fırını için uygun sıcaklık aralığına sahip ve ucuz elde edilebilen geleneksel K tipi termokupl kullanılmıştır. Bu ölçümler mikro-denetleyici içeren arduino kartı yardımı ile yapılmıştır. Bu kart yazılım ile ölçümleri bilgisayar ortamına kaydetmektedir.

Kurutma parametrelerini belirlemek için ürünün ağırlığını ölçmek gerekmektedir. Ancak kurutma sırasında ürünün kurutucudan çıkartılıp hassas terazide tartılması ve tekrar fırının içerisine yerleştirme işlemi hem ölçümün hata miktarını arttırmakta hem de enerji kaybına yol açmaktadır. Böylece meydana gelebilecek hatayı azaltmak amacıyla kurutma sırasında ürünün ağırlığı, fırının içerisine bir yük hücresi yerleştirilerek anlık olarak ölçülmüştür. Deney düzeneğinde HT Sensör Teknolojisi TAL201 model yük hücresi kullanılmıştır. HX711 kartı, basit haberleşme ara yüzüne sahip olup çok hassas ölçümler yapabilmektedir. Yük hücresi baskı fiziksel parametresini basit elektronik bir sinyale dönüştüren sensördür. Yapılan yazılım sayesinde ve yük hücresi yardımı ile gıda kurutucudan çıkartılmadan istenilen zaman aralığında hassas olarak tartılmıştır.



Şekil 1. Konvektif sıcak havalı kurutucu

Kurutma işleminden önce uygulanan ön işlemlerde ısıtıcı olarak Mtops marka MS300HS model ısıtıcı manyetik karıştırıcı kullanılmıştır.

Kurutma işleminden sonra elde edilen kuru kırmızıbiberin rehidrasyon kapasitesi ölçümleri sırasında ürünlerdeki ağırlık değişimleri için Kern marka ABJ 220-4 NM model dijital hassas terazi ile her 15 dakikada bir kaydedilmiştir. Terazi 10 mg ile 200 g arasında, 0,1 mg hassasiyette ölçüm yapabilmektedir.

2.3. Nem içeriği ve kurutma hızının hesaplanması

Kurutma işlemi süresince, kullanılan kırmızıbiberlerin nem oranı (yaş baz) (MR) aşağıdaki eşitlik (Eş. 1) kullanılarak hesaplanmıştır [19, 20].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Bu eşitlikte MR: nem oranı, M_t : t anındaki nem içeriği (kg H₂O/kg kuru madde), M_e : Kurutma koşullarındaki havanın denge nem içeriği (kg H₂O /kg kuru madde), M_0 : Ürünün kurutmaya başlamadan önceki nem içeriğidir (kg H₂O/kg kuru madde).Eş. 1'de M_e 'nin değeri M_t veya M_0 ile karşılaştırıldığında nispeten küçüktür. Bu nedenle Eş. 1 basitleştirilerek Eş. 2 elde edilmiştir.

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

Kurutma hızı ise Eş. 3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (3)$$

Eş. 3'de t: süre (dakika), $M_{t+\Delta t}$: t+Δt anındaki nem içeriği (kg H₂O/kg kuru madde) olarak ifade edilmektedir.

2.4. Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisinin hesaplanması

Efektif difüzyon katsayısı D_{eff} (m²/s), kurutulan sebzenin kaybettiği nemin taşınımıyla ilişkili önemli bir kinetik parametredir [21]. Gıda maddelerinin ince tabaka kurutma parametreleri Fick'in difüzyon eşitliği kullanılarak tanımlanabilir [22, 23]. Efektif difüzyon katsayısı, gıda kurutma işlemlerinde önemli parametrelerden biridir. Kappa biberlerin ön işlem uygulanmadan ve uygulanarak kurutulması işlemleri için hesaplanmıştır. İlk nem içeriğinin homojen olduğu ve difüzyon katsayısının sabit olduğu dilim şeklinde kesilen sebze için Crank tarafından aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir [24].

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

Eş. 4'de MR: nem oranı, M_t : t anındaki nem içeriği (kg H₂O/kg kuru madde), M_e : Kurutma koşullarındaki havanın denge nem içeriği (kg H₂O /kg kuru madde), M_0 : Ürünün kurutmaya başlamadan önceki nem içeriği (kg H₂O/kg kuru madde), D_{eff} : difüzyon katsayısı (m²/s), L: kurutulan ürünün yarı kalınlığı (m), t: kurutma süresi (s) olarak ifade edilir. Eş. 4. uzun kuruma

süreleri için serinin ilk terimi alınarak basitleştirilirse ve Eş. 5. halini alır [25];

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

Kurutma süresine karşı çizilen ln (MR) grafiğinin eğimi k olmak üzere, Eş. 6'ya göre D_{eff} hesaplanmıştır.

$$D_{eff} = \frac{4kL^2}{\pi^2} \quad (6)$$

Efektif difüzyon katsayısının değişimi Arrhenius tipi üssel bir fonksiyonla açıklanmaktadır. Aktivasyon enerjisi Eş. 7. kullanılarak hesaplanabilir [26]. Gerçekleşen bir prosesin aktivasyon enerjisinin yüksek ise, o prosesin sıcaklık değişimine daha duyarlı olduğunu söylenebilir [27].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

Eş. 7'de D_{eff} : Efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), D_0 : sonsuz sıcaklıkta difüzyon hızı (m^2/s), R: Gaz sabiti ($8,314 \text{ kJ}/(\text{mol}\times\text{K})$), E_a : Aktivasyon enerjisi (kJ/mol) ve T: kurutma sıcaklığıdır (Kelvin). Eş. 7'ye göre sıcaklığa karşı $\ln D_{eff}$ grafiğinden elde edilen doğrunun eğimi aktivasyon enerjisi değerini verir.

2.5. Rehidrasyon kapasitesinin ölçülmesi (Measurement of rehydration capacity)

Rehidrasyon kapasitesi (RC), kurutma sonrasında elde edilen ürünün kalite ölçütlerinden biridir ve kurutma koşulları, ön işlem, suyun sıcaklığı, süre ve örnek yapısından etkilenir [28]. Kurutulmuş gıda maddesinin rehidrasyon kapasitesi, onun suda belirli bir sürede belirli koşullarda bekletilmesi sonucunda kazandığı su miktarı ile belirlenir [29]. Sabit tartıma getirilen beherlere 400 mL saf su ilave edilmiştir. Rehidrasyon denemeleri sabit 25 °C ve 50 °C sıcaklıklarda yapılmıştır. İlk ağırlıkları bilinen kuru biber örnekleri hazırlanan sulara atılmıştır. 15 dakikada zaman periyotlarında çıkarılıp kurulama kâğıdıyla kurulandıktan sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Ürünlerdeki ağırlık değişimleri için Kern marka ABJ 220-4 NM model dijital hassas terazi kullanılmıştır. Elde edilen verilerden yararlanarak Eş. 8 ile rehidrasyon kapasitesi değerleri hesaplanmıştır.

$$RC = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (8)$$

Eş. 8'de W_1 ve W_2 sembelleri sırasıyla rehidrasyon işleminden önceki ve sonraki madde miktarını (kg) ifade etmektedir.

2.6. Termodinamik analiz

Kullanılan kurutucuda kurutma işleminin yapılabilmesi için ısıtıcı rezistans üzerinden W_r kadar enerji verilmiştir. Fırın içindeki ısının homojen dağılımının sağlanabilmesi için rezistansla eş zamanlı bir fan çalışmaktadır ve bu fan W_f kadar enerji harcamaktadır. Fırının kapalı hacminin duvarlarından ısı transferiyle Q_d kadar enerji atılmaktadır. Kuruyan gıda Q_g kadar enerji almaktadır. Aynı zamanda fırın kapağının kenarlarından Q_k kadar ısı kaçakları olduğu kabul edilmiştir. Çalışma boyunca fırın iç sıcaklığı sabit tutulmuştur bir termometre ile kontrol edilmiştir. Termodinamiğin 1. yasasına göre, kullanılan kurutucunun ısıtılması için harcanan toplam enerji ve kurutma işlemi için harcanan toplam enerjiler arasındaki ilişki Eş. 9 ile gösterilebilir.

$$W_f - W_r - Q_k - Q_g - Q_d = 0 \quad (9)$$

Eş. 9'da Q_k , Q_g ve Q_d sembelleri ile gösterilen ısı değerlerinin genel formülü Eş. 10, Eş. 11 ve Eş. 12 ile verilir.

$$Q_k = m_k c_k \Delta t \quad (10)$$

$$Q_g = m_g c_g \Delta t \quad (11)$$

$$Q_d = m_d c_d \Delta t \quad (12)$$

Çalışmada kurutma için harcanan enerji miktarını tespit edebilmek için Köhler marka monofaze aktif sayaç kullanılmıştır. Kullanılan sayacın çalışma sıcaklık aralığı -40 ile 80 °C arasındadır. Frekans değeri 50 Hz ve referans voltajı 220 V'dur.

3. Bulgular

3.1. Ön işlem ve kurutma sıcaklığının kurutma süresine etkisi

Kapya biberlerin kurutma karakteristikleri 50 ve 60 °C kurutma sıcaklığında incelenmiştir. Biberler % 6 son nem içeriğine kadar kurutulmuştur [30]. Tablo 1'de, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda kurutulmuş kapya biber dilimlerinin kurutma süreleri gösterilmektedir. Tablo 1'de, kapya biberlerin 50 °C'de ön işlem uygulanmadan kurutma süresi 420 dakika, NaOH ve Zeytinyağı/ K_2CO_3 ön işlemleri uygulanmasıyla kurutma süresi sırasıyla 255 ve 150 dakikaya düşmüştür. 50 °C'de NaOH ve Zeytinyağı/ K_2CO_3 ön işlemleri uygulanmasıyla kurutma süresi sırasıyla % 39,28 ve % 64,28 oranında azalmıştır. 60 °C'de ise ön işlem uygulanmadan kurutma süresi 330 dakika

olmuş, 60 °C'de NaOH ve zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemleri uygulanmasıyla kurutma süresi sırasıyla % 40,91 ve % 59,09 oranında azalmıştır.

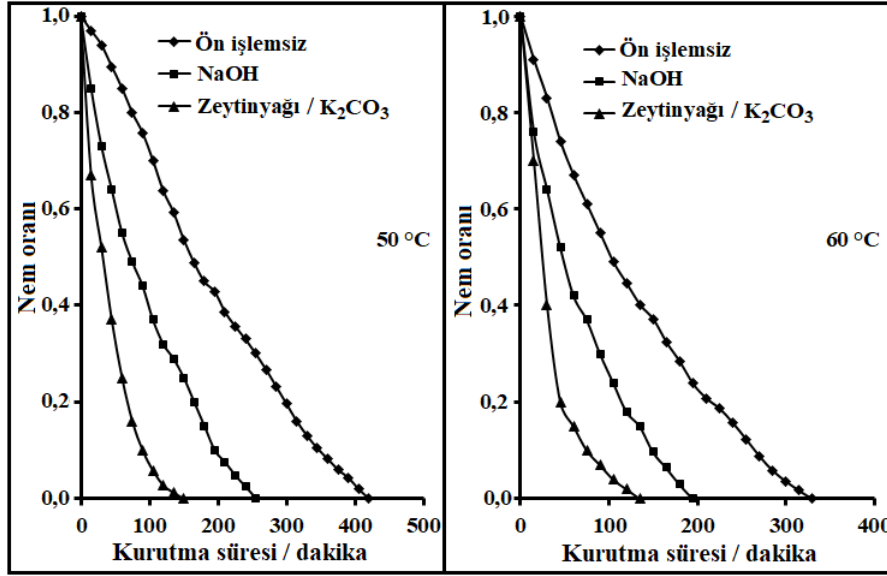
Uygulanan ön işlemler ile her iki sıcaklık için kurutma sürelerinde anlamlı düşüşler gerçekleşmiştir. Uygulanan işlemlerden Zeytinyağı/K₂CO₃ uygulamasının kapyta biberlerinin kuruma süresini kısaltmada etkili yöntem olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca sıcaklık artışıyla da her bir işlem için kurutma sürelerinde azalma gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışı sonucunda kurutma havasındaki bağıl nem oranındaki düşüşün, kurutma süresindeki azalmaya sebep olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla sıcaklık artışı kurutmada çok etkin bir rol üstlenmektedir.

Tablo 1. Kapyta biberlerin kurutma süreleri

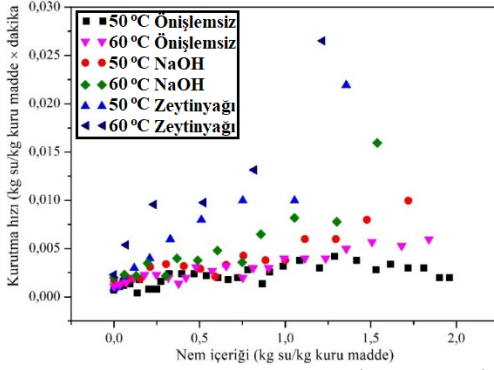
Sıcaklık (°C)	Uygulanan İşlem	Süre (dakika)
50	Ön işlemsiz	420
	NaOH	255
	Zeytinyağı/K ₂ CO ₃	150
60	Ön işlemsiz	330
	NaOH	195
	Zeytinyağı/K ₂ CO ₃	135

3.2. Ön işlem ve kurutma sıcaklığının nem oranına ve kurutma hızına etkisi

Kalınlığı ve kapladığı yüzey alanı eşit olan kapyta biberlerin 50 ve 60 °C sıcaklıklarda ön işlemsiz, NaOH ve Zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemleri ile kurutulma işlemleri için nem oranı ve kuruma hızı değerleri Eş. 2 ve Eş. 3 kullanılarak hesaplanmıştır. Nem oranının kurutma süresine karşı grafiği Şekil 2'de, kurutma hızının nem içeriğine karşı grafiği ise Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde uygulanan her bir yöntem için 60 °C kurutma sıcaklığı uygulamasındaki nem oranı düşüşünün, 50 °C uygulamasına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki sıcaklık için, nem oranındaki düşüş en hızlı zeytinyağı/K₂CO₃ uygulamasında, en yavaş düşüş ön işlemsiz kurutma işleminde gerçekleşmektedir. Şekil 3'de kurutma hızının sıcaklık artışıyla arttığı, en yüksek kurutma hızının 60 °C'de zeytinyağı/K₂CO₃ uygulamasında, en düşük kurutma hızının ise 50 °C'de ön işlemsiz kurutma işleminde olduğu görülmektedir. Şekil 2 ve 3'den sıcaklığın artışının ve uygulanan ön işlemin kapyta biberin kurutma kinetiği üzerinde çok etkili olduğu ve etkili ön işlemin zeytinyağı/K₂CO₃ uygulaması olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Kappa biberlerin 50 °C ve 60 °C sıcaklıklardaki kuruma işleminde nem oranının kurutma süresine karşı grafiği



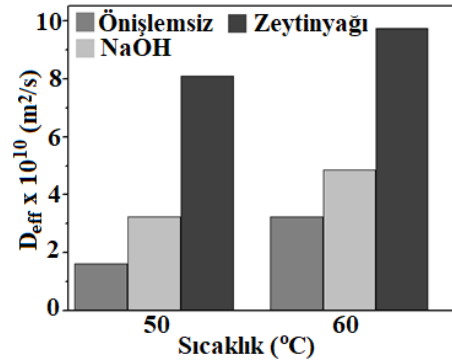
Şekil 3. Kappa biberlerin 50 °C ve 60 °C sıcaklıklardaki kuruma işleminde kuruma hızının nem içeriğine karşı grafiği

3.3. Efektif difüzyon katsayısı

50 ve 60 °C sıcaklıklarda ön işlemsiz, NaOH ve Zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemleri ile kurutulan kappa biberlerin efektif difüzyon katsayıları Eş. 6 kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4'de verilmiştir. 50 °C sıcaklıkta ön işlemsiz, NaOH ve Zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemleri uygulanmasıyla ile kurutulan kappa biberlerin efektif difüzyon katsayıları sırasıyla $1,62 \times 10^{-10}$, $3,24 \times 10^{-10}$ ve $8,11 \times 10^{-10}$ m²/s, 60 °C sıcaklıkta ise sırasıyla $3,24 \times 10^{-10}$, $4,87 \times 10^{-10}$ ve $9,74 \times 10^{-10}$ m² s⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Deneysel olarak elde edilen efektif difüzyon katsayısı değerlerinin literatürde belirtilen difüzyon katsayısı değerleri

değerleri 10^{-10} - 10^{-9} m²/s aralığı ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Kurutma sıcaklığının artmasıyla birlikte ön işlemsiz ve NaOH ve Zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemleri ile kurutulmuş kappa biberlerin efektif difüzyon katsayısı değerleri artmaktadır. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda kappa biber içerisindeki nemin daha kolay ve hızlı buharlaşmasıyla açıklanabilir. Ayrıca aynı sıcaklık değeri için zeytinyağı/K₂CO₃ uygulanarak kurutulan kappa biberlerin en hızlı kuruduğu, bunu NaOH uygulanarak kurutulan kappa biberlerin takip ettiği ve en düşük efektif difüzyon katsayısına ön işlemsiz kurutulan kappa biberlerin sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Kappa biberlerin efektif difüzyon katsayıları

3.4. Aktivasyon enerjisi

Aktivasyon enerji değerleri, Şekil 5'de verilen $1/(T+273,15)$ 'ye karşı çizilen $\ln D_{eff}$ grafiklerinin doğru denklemlerinden yararlanarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki eşitliklerde ön işlem uygulanmadan (Eş. 13), NaOH uygulanarak (Eş. 14) ve zeytinyağı/ K_2CO_3 uygulanarak (Eş. 15) kurutulmuş kapa biberleri için sıcaklığın difüzyon katsayı değerlerine etkisi gösterilmiştir.

Ön işlemsiz kurutulmuş kapa biberlerde;

$$D_{eff} = \exp\left(-\frac{6931}{T}\right) + 0,347 \quad (13)$$

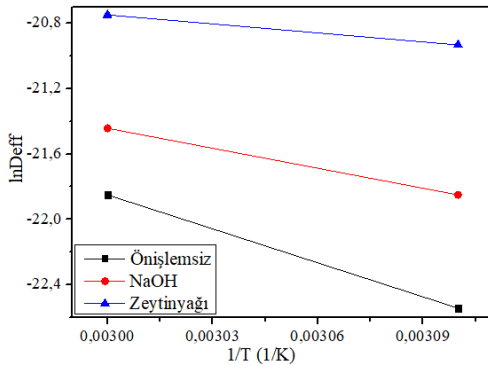
NaOH çözeltisine tabi tutulmuş kapa biberlerde;

$$D_{eff} = \exp\left(-\frac{4075}{T}\right) + 9,92 \times 10^{-5} \quad (14)$$

Zeytinyağı/ K_2CO_3 tabi tutulmuş kapa biberlerde;

$$D_{eff} = \exp\left(-\frac{1832}{T}\right) + 3,37 \times 10^{-7} \quad (15)$$

Eş. 9, Eş. 10 ve Eş. 11'den yararlanarak ön işlemsiz, NaOH ve Zeytinyağı/ K_2CO_3 ön işlemleri ile kurutulmuş kapa biberlerin aktivasyon enerjileri sırasıyla 57,62, 33,88 ve 15,23 kJ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada hesaplanan aktivasyon enerji değerleri daha önce yapılan ve literatürde yer alan veriler [31,32] ile uyum göstermektedir.

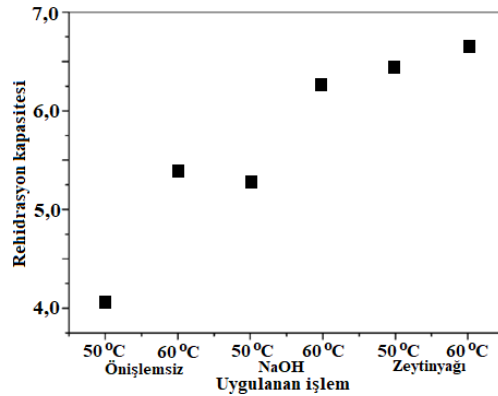


Şekil 5. Sıcaklığın efektif difüzyon katsayısı üzerindeki etkisi

3.5. Rehidrasyon kapasitesi

Rehidrasyon işlemi kurutma yöntemi, uygulanan ön işlemler, gıdanın fiziksel yapısı ve kimyasal bileşimi gibi çok çeşitli faktörlerden etkilenen bir işlemdir [33]. Kurutulmuş kapa biberlerin rehidrasyon kapasitelerini bulmak için 50°C'de

deneyler yapılmış ve elde edilen veriler (8) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6'da 50°C rehidrasyon sıcaklığında 50 ve 60°C sıcaklıklarda ön işlem uygulanmadan kurutulmuş kapa biberlerinin rehidrasyon kapasiteleri sırasıyla 4,07 ve 5,39 kg su/kg kuru madde, NaOH çözeltisinde bekletildikten sonra kurutulmuş kapa biberlerinin rehidrasyon kapasiteleri sırasıyla 5,27 ve 6,27 kg su/kg kuru madde, zeytinyağı/ K_2CO_3 karışımında bekletildikten sonra kurutulmuş kapa biberlerinin rehidrasyon kapasiteleri sırasıyla 6,43 ve 6,65 kg su/kg kuru madde olarak elde edilmiştir. Kurutma işleminden önce uygulanmış olan ön işlemlerin rehidrasyon kapasitelerini etkilediği görülmüştür. Rehidrasyon kapasitesi değeri en fazla zeytinyağı/ K_2CO_3 ön işlemi uygulanan, en az ise ön işlem uygulanmamış olan kapa biberlerde elde edilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, kurutma sıcaklığının artmasıyla rehidrasyon kapasitesinde artış olmuştur. Elde edilen veriler Vega-Gálvez ve ark. [34] ile Marques ve arkadaşlarının [35] elde ettiği sonuçlar ile uyumludur.



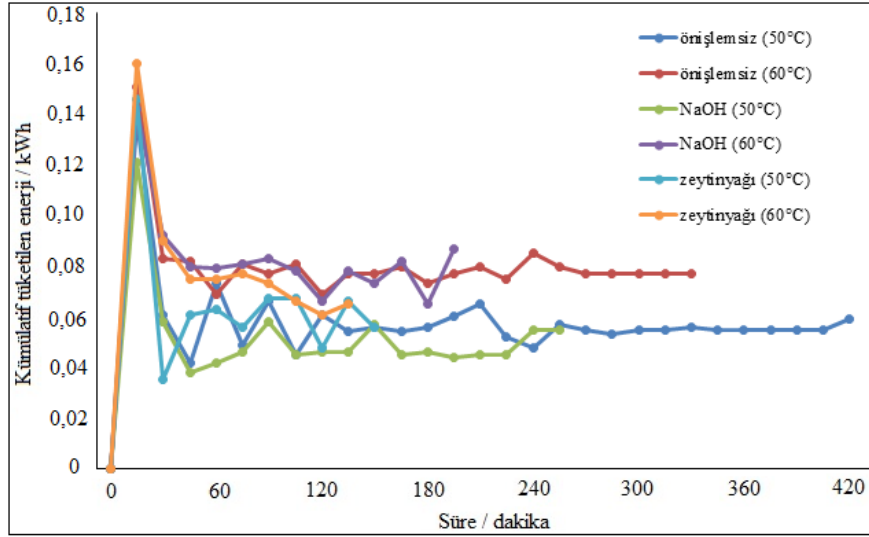
Şekil 6. Uygulanan ön işlemlere bağlı olarak değişen kuru kapa biberlerin rehidrasyon kapasiteleri grafiği

3.6. Termodinamik analiz

Kapa biberlerin kurutulması işlemleri için kurutma süresine karşı çizilen enerji tüketim grafikleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Uygulanan kurutma işlemlerinde, fırının ilk 30 dakikadaki ısıtılmasında yaklaşık 0,160 kWh enerji harcanmıştır. Isıtmanın ilk 30 dakikasında tüketilen enerjinin yüksek olmasının sebebi, fırın sıcaklığının, fırın içi hava sıcaklığının ve kurutulacak ürün sıcaklığının henüz ortam sıcaklığında olup, hedeflenen kurutma

sıcaklığından düşük olmasıdır. Fırın sıcaklığının, fırın içi hava sıcaklığının ve kurutulacak ürün sıcaklığının, hedeflenen kurutma sıcaklığına ulaşması ile beraber elektrik tüketim değerleri daha kararlı hale gelmiştir. Şekil 7'de, 60°C sıcaklığında yapılan kurutma işlemlerinin tümünde tüketilen enerji, 50 °C sıcaklığında

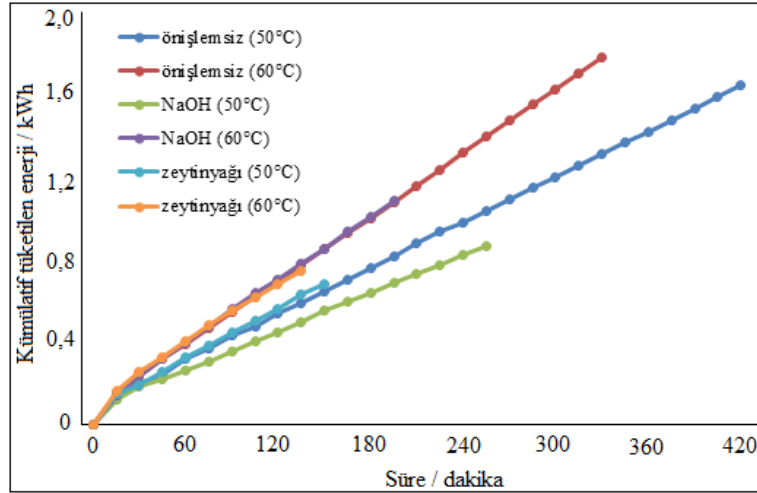
yapılan kurutma işlemlerinde tüketilen enerjiden daha fazladır. Ön işlem uygulanmadan ve uygulanarak yapılan kurutma işlemlerinin her birinde, kurutma sıcaklığının artışı ile kuruma süresinin azaldığı ancak tüketilen enerjinin arttığı görülmektedir.



Şekil 7. Kapa biberlerinin kurutulma işlemlerinde zamana karşı çizilen enerji tüketim grafiği

Şekil 7'de kurutma süresine karşı çizilen kümülatif tüketilen enerji grafikleri verilmiştir. Buna göre, 50 °C ve 60 °C sıcaklıklarında ön işlemsiz olarak yapılan kurutma işlemlerinde sırasıyla 1,645 ve 1,782 kWh, NaOH çözeltisinde haşlama ön işlemi uygulanarak yapılan kurutma işlemlerinde sırasıyla 0,867 ve 1,084 kWh, zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemi uygulanarak yapılan kurutma işlemlerinde ise sırasıyla 0,680 ve 0,742 kWh enerji tüketimi yapılmıştır. En fazla enerji tüketimi, ön işlem uygulanmadan ve 60 °C'de yapılan kurutma işleminde yapılmış olup değeri 1,782 kWh olarak belirlenmiştir. En düşük değerde enerji ise, 50 °C'de zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemi uygulanarak yapılan kurutma işleminde harcanmış olup değeri 0,680 kWh olarak belirlenmiştir. 50 °C ve 60 °C

kurutma sıcaklıklarında, NaOH çözeltisinde haşlama ve zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemi uygulanarak kapa biberlerin kurutma sürelerinden ve kümülatif tüketilen enerjiden sağlanan yüzde tasarruf miktarları belirlenmiş ve Tablo 2'de gösterilmiştir. 60 °C sıcaklıkta, NaOH ön işlemi uygulanarak yapılan kurutma işlemi, aynı sıcaklıktaki herhangi bir ön işlem uygulanmadan yapılan kurutma işlemine göre zamandan %40,90, enerji tüketiminden %39,17 tasarruf sağlamıştır. Zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemi uygulanarak yapılan kurutma işleminde ise zamandan %59,10, enerji tüketiminden %54,75 tasarruf sağlamıştır.



Şekil 8. Kappa biberlerinin kurutulma işlemlerinde zamana karşı çizilen kümülatif tüketilen enerji grafiği

Tablo 2. Uygulanan ön işlem ve kurutma sıcaklığının sağlanan kuruma süresi ve enerjiden tasarruf üzerindeki etkisi

Ön işlem	Tasarruf	% Tasarruf değerleri	
		50 °C	60 °C
NaOH	Zaman	39,28	40,90
	Enerji	47,29	39,17
Zeytinyağı/K ₂ CO ₃	Zaman	64,29	59,10
	Enerji	58,66	54,75

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, konvektif sıcak havalı kurutucuda kapa biberlerinin kurutulması işleminde, biberlerin kurutma kinetiği, rehidrasyon kapasitesi ve kurutma işleminde kümülatif tüketilen enerji üzerine, hava sıcaklığı ve ön işlemlerin etkisi incelenmiştir. Kurutma sıcaklığı arttıkça kapa biberlerin kuruma hızının arttığı ve bunun sonucu olarak da kuruma süresinin düştüğü gözlemlenmiştir. Kurutma öncesinde ön işlem uygulamasının, kurutma süresini düşürmek üzerinde önemli ölçüde olumlu etkisi olduğu saptanmıştır. Ön işlem uygulanarak kurutulan kapa biberlerin efektif difüzyon katsayısı değerleri, ön işlem uygulanmadan kurutulanlara göre daha büyüktür. Ön işlemler

uygulanması ile kurutulan kapa biberlerin rehidrasyon kapasitesi artmıştır. Ayrıca bu çalışmada kurutma sıcaklığı ve uygulanan ön işlemlerin kapa biberlerin kurutulması için harcanan kümülatif enerji üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna göre, en fazla enerji tüketiminin, 60 °C'de ön işlem uygulanmadan yapılan kurutma işleminde, en düşük değerde enerjinin ise, 50 °C'de zeytinyağı/K₂CO₃ ön işlemi uygulanarak yapılan kurutma işleminde olduğu belirlenmiştir. Uygulanan ön işlem ve kurutma sıcaklığının sağlanan kuruma süresi ve enerjiden tasarruf üzerindeki etkileri özetlenmiştir.

Teşekkür

Çalışmaya destek veren Kimya Mühendisi Elif Begüm Yılmaz'a teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Howard, L.R., Smith, R.T., Wagner, A.B., Villalon, B., Burns, E.E. 1994. Provitamin A and ascorbic acid content of fresh pepper cultivars (*Capsicum annuum*) and processed jalapenos. *Journal of Food Science*, 59, 362-365. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1994.tb06967.x
- [2] Simonne, A.H., Simonne, E.H., Eitenmiller, R. R., Mills, H.A., Green, N. R. 1997. Ascorbic acid and provitamin A contents in unusually colored bell peppers (*Capsicum annuum* L.), *Journal of Food Composition Analysis*, Cilt. 10, s. 299-311. DOI: 10.1006/jfca.1997.0544
- [3] Faustino, J.M.F., Barroca, M.J., Guine, R.P.F. 2007. Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization, *Food Bioprod. Process*, Cilt. 85, s. 163-170. DOI: 10.1205/fbp07009
- [4] Gögüs, F. 1994. The effect of movement of solutes on maillard reaction during drying. Leeds University, Ph.D. thesis. Leeds.
- [5] Dincer, I. 1998. Moisture loss from wood products during drying-Part I: moisture diffusivities and moisture transfer coefficients, *Energy Sources*, Cilt. 20, s. 531-539. DOI: 10.1080/00908319808970044
- [6] Aktaş, M., Gönen, E. 2014. Bay leaves drying in a humidity controlled heat pump dryer, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt. 29 (2), s. 433-441. DOI: 10.17341/gummfd.67707
- [7] Karacaoğlu, C., Gürsoy, O., Yılmaz, Y. 2016. Ultrasonikasyon destekli vakum impregnasyon (emdirme) tekniği ile muamele işleminin kivi dilimlerinin kuruma kinetiği üzerine etkisi, *Akademik Gıda*, Cilt. 14 (3), s. 256-266.
- [8] Aktaş, M., İbbaş, M., Yalçın, A., Şahin, M. 2013. Experimental investigation of drying behaviours in an infrared radiation dryer, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt. 28 (4), s. 767-775.
- [9] Tuncer, I.K. 1995. How Kahramanmaraş red pepper should be operated for internal market and external market, *Sutcu Imam University Publications*, Cilt. 11, s. 26-30.
- [10] Öztekin, S., Bascetincelik, A., Soysal, Y. 1999. Crop drying programme in Turkey, *Renewable Energy*, Cilt. 16 (1-4), s. 789-79. DOI: 10.1016/S0960-1481(98)00282-1
- [11] Demiray, M., Tülek, Y. 2008. Drying technology of tomatoes and some tomato antioxidant effects of compounds in the drying process, *Electronic Journal of Food Technologies (GTED)*, 9-20.
- [12] Torreggiani, D. 1993. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing, *Food Research International*, Cilt. 26 (1), s. 59-68. DOI: 10.1016/0963-9969(93)90106-SGet
- [13] Ponting, J. 1973. Osmotic dehydration of fruits: Recent modifications and applications, *Process Biochemistry*, Cilt. 8 (12), s. 18-20.
- [14] Doymaz, I., Pala, M. 2002. Hot-air drying characteristics of red pepper, *J. of Food Eng.*, Cilt. 55, s. 331-335. DOI:10.1016/S0260-8774(02)00110-3
- [15] Hussain, I., Iqbal, M., Shakir, I., Ayub, N., Rawalakot, A.J. 2004. Effect of sucrose and glucose mixture on the quality characteristics of osmotically dehydrated banana slices, *Pakistan Journal of Nutrition*, Cilt. 3 (5), s. 282-284.
- [16] Sunjka P., Raghavan G. 2004. Assessment of pretreatment methods and osmotic dehydration for cranberries, *Canadian Biosystems Engineering*, Cilt. 46 (1), s. 45-48.
- [17] Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L., Sarsavadia, P.N. 1999. Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson seedless grapes, *Journal of Food Engineering*, Cilt. 39 (2), s. 211-216. DOI:10.1016/S0260-8774(98)00168-X
- [18] Christensen, R.A., Peacock, T.D. 1997. A guide to literature on reforming American Indian research, *Tribal College*, Cilt. 9 (1), s. 25-32.
- [19] Xiao, H.W., Pang, C.L., Wang, L.H., Bai, J.W., Yang, W.X., Gao, Z.J. 2010. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer, *Biosyst. Eng.*, Cilt. 105 (2), s. 233-240. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.11.001
- [20] Wang, J., Law, C.L., Nema, P.K., Zhao, J.H., Liu, Z.L., Deng, L.Z., Gao, Z J., Xiao, H.W. 2018. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices, *J. Food Eng.*, Cilt. 224, s. 129-138. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.01.002
- [21] Barbosa-Canovas, G.V., Vega-Mercado, 1996. H. Dehydration of Foods. First Edition, Chapman Hall Publication. New York.
- [22] Sacilik, K., Keskin, R., Elicin, A.K. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato, *J. Food Eng.*, Cilt. 73, s. 231-238. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.01.025
- [23] Liu, Q., Bakker-Arkema, F.W. 1997. Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model Development, *Journal of Agricultural Engineering Research*, Cilt. 66, s. 275-280. DOI:10.1006/jaer.1996.0145
- [24] Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion, Oxford University Press, OX, UK.
- [25] Doymaz, İ. 2012. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyos kaki* L.), *Energy Conversion and Management*, Cilt. 56, s. 199-205. DOI:10.1016/j.enconman.2011.11.027
- [26] Sobukola, O.P., Dairo, O.U., Odunewu, A.V. 2008. Convective hot air drying of blanched yam slices, *International Journal of Food Science and Technology*, Cilt. 43, s. 1233-1238. DOI:10.1111/j.1365-2621.2007.01597.x
- [27] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Beygi, S.R.H. 2010. Drying and rehydration characteristic of sour cherry (*Prunus Cerasus* L.), *J. Food Process Preservation*, Cilt. 34, s. 351-365. DOI:10.1111/j.1745-4549.2008.00310.x
- [28] Feng, H., Tang, J. 1998. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed, *Journal of Food Science*, Cilt. 63, s. 679-683. DOI:10.1111/j.1365-2621.1998.tb15811.x

- [29] Doymaz, İ. 2018. Patlıcan dilimlerinin kurutma ve rehidrasyon karakteristiklerinin belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33 (3), 833-841. DOI:10.17341/gazimmfd.416386
- [30] TSE Standart detayı. <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073082085049056050116083053072056088> (Erişim Tarihi: 27.03.2019).
- [31] Darvishi, H., Asl, A. R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., Khodaei, J. 2014. Study of the drying kinetics of pepper, Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, Cilt. 13, s. 130-138. DOI: 10.1016/j.jssas.2013.03.002
- [32] Di Scala, K., Crapiste, G. 2008. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper, LWT-Food Science and Technology, Cilt. 41, s. 789-795. DOI: 10.1016/j.lwt.2007.06.007
- [33] Russo, P., Adiletta, G., Di Matteo, M. 2012. The influence of drying air temperature on the physical properties of dried and rehydrated eggplant, Food and Bioproducts Processing, Cilt. 91, s. 249-256. DOI:10.1016/j.fbp.2012.10.005
- [34] Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., Perez-Won, M. 2009. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian), Food Chemistry, Cilt. 117, s. 647-653.
- [35] Marques, L. G., Prado, M. M., & Freire, J. T. 2009. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits, LWT-Food Science and Technology, Cilt. 42, s. 1232-1237.