

BALKABAĞININ AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCUDA KURUTULMASININ DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ

Mert GÜR *

Alınma: 16.05.2016; düzeltme:16.08.2016; kabul: 31.08.2016

Öz: Bu çalışmada balkabağının akışkan yataklı kurutucuda kurutma karakteristiği incelenmiştir. Deneyler için balkabağı tarla hasadından sonra küp şeklinde kesilerek, 50, 60 ve 70 °C'deki üç farklı sıcaklıktaki hava ile akışkan yataklı kurutucuda kurutulmuştur. Kurutulan balkabağının başlangıç nemi ıslak bazda %95 (kuru bazda %1930) mertebelerinde olup akışkanlaşma hızı 3,5 m/s seçilmiştir. Deney sonuçlarından, akışkan yataklı kurutucuda oldukça yüksek kuruma hızlarına ulaşıldığı ve böylece kuruma sürelerinin klasik yöntemlere ve sabit yataklı kurutuculara göre çok kısa sürelerle indiği görülmüştür. Kurutma deneylerimizde en fazla 120 dakika sonunda %6'dan düşük bal kabağı nemlerine ulaşmak mümkün olmuştur. Bal kabağı kurutmanın matematiksel modellenmesi için literatürde sıkça kullanılan yarı-teorik modellerden Lewis modeli, Henderson ve Pabis modeli, Page modeli ve logaritmik ince tabaka kurutma modelleri seçilmiştir. Bunun yanında Fick'in birinci yasası olan kurutma teorik modeli ile de kurutma karakteristiği incelenmiştir. Bu modelde hesaplanan etkin difüzyon katsayılarının sonuçları, literatürdeki değerleri ile karşılaştırılmıştır. Akışkan yataklı kurutucuda hesaplanan etkin difüzyon katsayıları, sabit yataklı kurutuculara göre %70'lere varan daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Bunun yanında etkin difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılıkları Arrhenius denklemi ile açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balkabağı, Kurutma, Akışkan Yataklı Kurutucu, Kurutma Karakteristiği

Experimental and Theoretical Investigation of Pumpkin Drying in Fluidized Bed Dryer

Abstract: Thin layer drying characteristics of pumpkin cube were experimentally investigated in a fluidized bed dryer. Experiments were performed at three different drying temperatures: 50, 60 and 70 °C. Pumpkin used in the experiments had an initial moisture content of 95% wet basis (1930 % dry basis). The drying air velocities were set to 3.5 m/s to achieve fluidization. Experimental results show that large drying rates are obtained in the fluidized bed dryer, which are much higher than those obtained with conventional methods and convective tray dryer. In just 120 minutes moisture contents lower than 6% wet basis were achieved. Pumpkin drying was mathematically modeled using the Lewis, Henderson ve Pabis, Page, and logarithmic models, all of which are semi-empirical models widely applied in the literature. Using Fick's first law effective diffusivities were calculated and compared with those in the literature. Effective diffusion coefficients obtained in the fluidized bed dryer were up to 70% higher than the diffusion coefficients obtained in convective tray dryers. Temperature dependence of effective diffusion coefficients was described by an Arrhenius-type relationship.

Anahtar Kelimeler: Pumpkin, Drying, Fluidized Bed Dryer, Drying Characteristics

1. GİRİŞ

Balkabağı (*Cucurbita mixta*) A vitamini, potasyum, lif ve karbonhidrat açısından zengin bir meyvedir (Tunde-Akintunde and Ogunlakin, 2013). Kabağın mutfakta sebze olarak veya börek, çorba, güveç ve ekmek gibi sofraya ürünlerinde içerik olarak sayısız kullanım alanı

* İTÜ Makina Fakültesi, İnönü Caddesi, No. 65 Gümüşsuyu 34437 Beyoğlu / İstanbul
İletişim Yazarı: Mert GÜR (gurme@itu.edu.tr)

vardır(Ratnayake et al., 2004). Fakat taze balkabağı, soğutulmuş olsa dahi, mikrobik bozulmalara açıktır ve bu sebepten dolayı dondurulması veya kurutulması gerekmektedir (Doymaz, 2007). Dünya üzerinde tarım ürünlerinin kurutulması için en yaygın yöntem güneşin altında açık havada kurutmadır. Fakat bu tür kurutmada uzun kurutma süreleri gerekmekte ve dolayısıyla gıdanın hava yoluyla aktarılan kir ile kolayca kontamine olmasına sebep olabilmektedir (Öztekın et al., 1999). Bundan dolayı, özellikle de nem oranı çok yüksek olan kabak gibi tarım ürünlerini hızlı şekilde kurutabilen endüstriyel kurutuculara ihtiyaç oluşmuştur. Literatürde çeşitli gıda kurutma yöntemleri araştırılıp incelenmiştir. Bu yöntemler arasında akışkan yatakta kurutma, kurutma ortamları arasındaki etkili temastan kaynaklanan kısa kurutma süreleri ve yüksek enerji tasarrufu ile öne çıkmaktadır (Wang and Chen, 2000; Tatamoto et al., 2001).

Kurutma prosesi, zamana bağlı değişken ısı ve nem geçişlerinin aynı anda yaşandığı karmaşık bir ısıl süreçtir (Sahin and Dincer, 2005). Dolayısıyla kurutulan ürünün kurutma karakteristiğini bilmek ve kurutma parametrelerini optimize edebilmek için kurutma kinetiğinin anlaşılması gerekmektedir (Gur and Gur, 2014). Kurutma prosesi için birçok matematiksel modeller geliştirilmiş olup bunların arasından en çok ince tabaka kurutma modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Doymaz, 2007). İnce tabaka kurutma modeli, kurutulan ürünün tek bir ince tabakadan meydana geldiği, dolayısıyla homojen sıcaklık dağılımının kabul edilmesini ve böylece toplam kütle (lumped) modelinin seçilmesini mümkün kılmaktadır (Erbay and İcier, 2010).

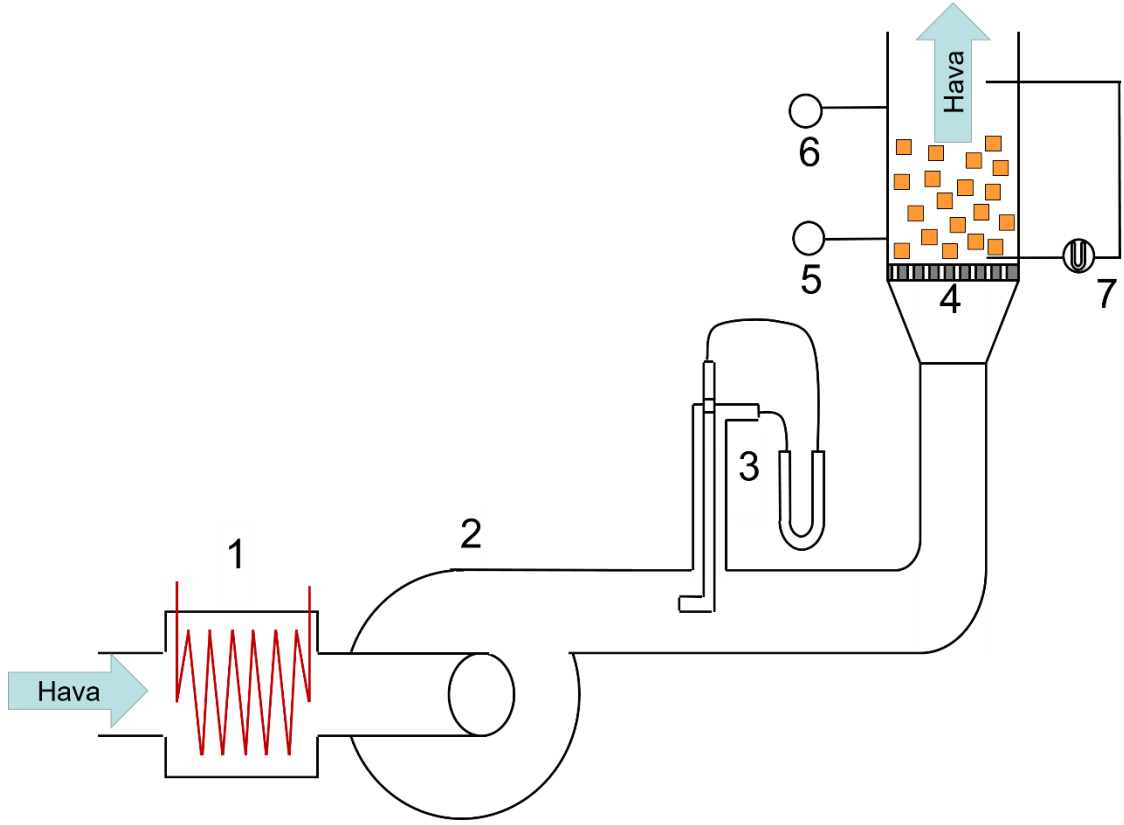
İnce tabaka modelleri ise teorik, yarı-teorik ve ampirik olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. Yıldız ve Ertekin (2001), güneş/solar kurutumaya kabininde 0,5, 1 ve 1,5 m/s hava hızlarında 1,25 cm ölçülerinde küp şeklinde balkabağı dilimlerini kurutmuşlardır. Akpınar ve çalışma arkadaşları (Akpınar et al., 2003) ise silindirik şekilde dilimlenmiş balkabağını (5 mm uzunluk ve 35 mm çapında) siklon tipi kurutucu içerisinde 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda ve 1 ve 1,5 m/s'deki hava hızlarında kurutma deneylerinde incelemişlerdir. Arevalo-Pinedo ve Murr (Arévalo-Pinedo and Murr, 2006) önceden işlem görmüş ve görmemiş 0.5x4x2cm boyutlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki balkabağı dilimlerini vakum kurutucusunda 50-70 °C sıcaklık aralığında kurutmuştur. Doymaz (2007) ise silindirik şekilli kabak dilimlerini (0,7cm çap) laboratuvar ölçekli sabit yataklı sıcak hava kurutucusunda 50, 55 ve 60°C sıcaklıklarında 1m/s'deki hava hızı ile kurutulmasını gerçekleştirmiştir. Alibas(Alibas, 2007), balkabağını 0.5x0.4x2cm boyutlarındaki dikdörtgen prizma şeklinde keserek, sabit yataklı kurutucuda üç farklı yöntem ile a) mikrodalga, b) sıcak hava (1m/s hava hızı ve 50 ve 75°C sıcaklıklarında) ve c) mikrodalga-sıcak hava kombinasyonu/karışımı ile kurutmasını incelemiştir. Tunde-Akintunde ve Ogunlakin, (Tunde-Akintunde and Ogunlakin, 2011; Tunde-Akintunde and Ogunlakin, 2013) önceden işlem görmüş ve görmemiş balkabağını sıcak hava kurutucusunda 40-80 °C sıcaklık aralığında ve 1,5 m hava hızında kurutmuşlardır. Seremet ve çalışma arkadaşları(Seremet ve diğerleri, 2016) ise silindir şeklinde kabak dilimlerini (0,5 cm uzunluk ve 2,5 cm çapında) 50-70 °C sıcaklık aralığında iki farklı yöntem ile kurutmuşlardır: Birincisinde sadece sıcak hava ile taşınım mekanizmalı kurutma, ikincisi ise sıcak hava ile başlayıp sonrasında mikrodalga ve beraberinde taşınım ile devam eden kurutma yapılmıştır.

Yapılan kapsamlı literatür incelemesinde, balkabağı kurutulmasında şimdiye dek akışkan yataklı kurutucularda bir çalışmanın yapılmamış olduğu göze çarpmaktadır. Öte yandan özellikle gıda kurutmasında akışkan yataklı kurutucuların hem çok kısa kurutma süreleri hem de homojen sıcaklık ortamında kurutma özelliğine sahip olduğu bilinmektedir. Çünkü kurutulan ürün, akışkan yataklı kurutucuda alttan verilen sıcak hava ile askıda tutulur, böylece her bir parçacık sıcak hava içinde serbest olarak yüzer ve akışkan gibi davranır. Bu da kuruma hızını oldukça artırmaktadır. Dolayısıyla akışkan yataklı kurutucunun balkabağı kurutulmasına uygunluğu ve uygun kurutma proses parametrelerinin ortaya çıkarılması üzerine bir çalışmanın yapılmasına ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada balkabağının akışkan yatakta kurutma karakteristiğinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL METOT

2.1. Deney Düzenegi

Deneyisel çalışmalar için, Akışkan yataklı bir kurutucu tasarımı yapılarak imalat edilmiştir. Akışkan yataklı kurutucuyu oluşturan ekipman ve kısımları Şekil 1'de gösterilmiştir. Burada, kurutucu havanın ısıtıldığı elektrikli ısıtıcı(1), kurutma havasını kurutucuya gönderilmesi için fan (2) ve balkabağının konulduğu silindirik kurutucu akışkan yatak reaktör (4) bulunmaktadır. Akışkan yataklı kurutucu, silindirik şeklinde olup 10 cm çapında ve 50 cm yüksekliğindedir. Silindirik kurutucunun tabanında bulunan eleğin delik çapları 2 mm olarak seçilmiştir. Böylece havanın daha homojen dağıtılması sağlanmıştır. Silindirik kurutucu iç içe geçmiş iki silindirden meydana gelmektedir. İçteki silindir serbest olarak birinci silindirin içine yerleştirilmiştir. Deney esnasında içteki silindir periyodik zaman aralıklarında dışarıya çıkartılarak ürünün kurutulması nedeniyle azalan kütleinin ölçülmesi mümkün olmuştur. Bu şekilde deney düzenegine kabak eklenmesi ve çıkarılması son derece hızlı ve kolay gerçekleşmektedir. Burada akışkana yatakta ihtiyaç duyulan yüksek basıncı sağlaması amacıyla radyal fan seçilmiştir. Radyal fanın devir sayısı yükseltilerek gerekli debi ve basınç seviyeleri ayarlanmıştır. Radyal fanı tahrik eden elektrikli motorun devir sayacını ayarlamak için Siemens Micromaster 6SE92 frekans çevirici kullanılmıştır. Kurutma havasının sıcaklığı ise Şekil 1'de gösterildiği gibi, elektrikli ısıtıcı ile sağlanmaktadır. Bu ısıtıcının elektriksel gücü istenen kurutma sıcaklıklarını elde etmek için otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Kurutma havasının hızını ölçmek için bir pitot tüpü (3) ve bir manometre (7) kullanılmaktadır. Deneylerde havanın sıcaklık (5) ve nem değerleri (6), beş dakikalık zaman aralıklarında ölçülmüştür. Ölçümler Testo 454 çok fonksiyonlu cihaz, Testo 905-T1 sıcaklık ölçü sensörü ve Testo 605-H1 nem ölçü sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Balkabağı örneklerinin nem içeriği Sartorius MA 30 nem analizörü ile gravimetrik yöntemlerle ölçülmüştür. Deney düzeneginde kullanılan ölçme cihazlarının ölçme hassasiyetleri sırasıyla, sıcaklık ve nem ölçümleri yapan testo 454-H1 cihazında %0,3 hassasiyette, testo 454-P1 cihazında %0,2 hassasiyette ve Sartorius 30 MA 30 cihazında ise % 0,05 hassasiyet mertebelerindedir.



Şekil 1:

Deneylerde kullanılan Akışkan Yataklı Kurutucu (1: Isıtıcı, 2: Fan, 3: Pitot tüpü, 4: Reaktör, 5-6: Sıcaklık ve nem sensörleri, 7:Manometre).

2.2. Deney Malzemesi, Yöntemi ve Planı

Deneyler için kullanılan balkabağı, Sakarya ilinde tarla hasadından sonra toplanmış taze olarak soyulduktan ve çekirdeğinden ayrıldıktan sonra 1,5 cm ölçülerinde küp şeklinde kesilerek hazırlanmıştır. Kurutulan balkabağının başlangıç nemi ıslak bazda % 95 (kuru bazda %1930) mertebelerinde ölçülmüştür. Her bir deneyde kurutucuya 2 kg ağırlığında kabak küpleri yerleştirilmiştir. Akışkan yatakta kurutma hava hızı 3,5 m/s olarak seçilmiştir. Kurutma hava hızı şekil 1’de gösterilen manometre(7) kullanılarak kurutma havasının reaktöre giriş noktasında ölçülmüştür. Kurutma sıcaklığının etkisini görmek için 50, 60 ve 70 °C deki üç farklı sıcaklıktaki hava kullanılmıştır. Deneyler esnasında her 20 dakikada bir kabak numuneleri alınarak, her biri Sartorius 30 MA 30 cihazında 105 °C sıcaklığında 99 dakika süreyle kurutulmuş ve böylece nem değerleri belirlenmiştir. Her bir deney 120 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir.

2.3. Matematiksel Model

Üründeki nemi ifade etmek için ıslak veya kuru bazda nem tanımları kullanılır. Eğer nem kütlesi ürünün kuru kütlesine bölünerek ifade edilirse bu kuru bazda nem, aksi takdirde toplam (nem artı kuru ürün) kütlesine bölünerek hesaplanıyorsa ıslak bazda nem olarak ifade edilir. Yapılan kurutma deneylerinde zamana bağlı olarak ürünün nem değişimi bu şekilde ölçülerek belirlenir.

Matematiksel modellerde ayrıca boyutsuz nem ifadeleri kullanılır. Böylece kurutma hızının ve kurumanın etkinliğini daha rahat görmek mümkün olmaktadır. Kurutmayı karakterize etmek için Nem oranı (NO) boyutsuz bir parametre olup kabak içerisindeki nem miktarını belirtmektedir ve tanımı şu şekildedir:

$$NO(t) = \frac{N(t) - N_{denge}}{N_0 - N_{denge}} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde $NO(t)$, herhangi bir t anında balkabağının boyutsuz nem oranını vermektedir. N_0 ise başlangıçtaki nem oranını belirtirken N_{denge} denge durumunda nemi göstermektedir. Yıldız ve Ertekin'nin (2001) çalışmaları, işlenmemiş balkabağının başlangıç nem değerinin, N_0 , denge nemine, N_{denge} , göre oldukça büyük olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yukarıdaki denklem (1) ile hesaplanan boyutsuz nem hesaplamasında, denge nemi N_{denge} ihmal etmişlerdir. Dolayısıyla bizim çalışmamızda da balkabağının denge nem değeri, N_{denge} , sıfır olarak alınmıştır.

Kurutma süreci, başlangıçta kurutma hızının sabit olduğu ve ilerleyen zamanda ise kurutma hızının azaldığı 2 farklı aşamalı olarak gerçekleşmektedir. Kurutmanın birinci aşamasında, ürün oldukça nemli olduğundan, nem ürün dış yüzeyinde bir film tabakasında bulunur. Buradan nemin alınması esnasında, kuruma hızı sadece kurutmanın dış şartlarına (hava sıcaklığına ve hızına) bağlı olarak gerçekleşir. Kuruma hızı bu esnada hep sabit kalır. Ürün nemi azaldığında yani ürün içindeki nem alınmaya başladığında, ürünün fiziksel özellikleri kurumayı etkilemeye başlar. Bu da kurumanın azalan kurutma sürecidir. Kuruma hızı bu noktadan itibaren sürekli olarak azalır. Bir süre sonra çok yavaşlar. Ürün artık denge nemine ulaşmaya yaklaşmıştır. Literatürdeki kurutma çalışmalarının çoğu gıda kurutmasının çoğunlukla kurutma hızının düştüğü ve kurutmanın ikinci aşamasında (ingilizcesi falling rate period) gerçekleştiğini göstermiştir. Bu çalışmadaki deneylerde de kurutmanın ilk aşaması olan sabit hızlı kurutma dönemi görülmüştür. Bunun muhtemel sebebi kurutmanın söz konusu birinci aşamasının ölçüm aralıklarımızla belirlenemeyecek kadar kısa olmasıdır.

Dolayısıyla balkabağı kurutulması burada azalan kurutma hız periyodunda gerçekleştiğinden, ince tabaka kurutma kinetiği ile modellenmesi için gerekli olan şart yerine getirilmiş olacaktır. Diğer taraftan bu kabulün doğruluğu aslında daha önceden yapılmış balkabağı kurutma deneyleri ile de desteklenmektedir (Akpınar, Midilli, and Bicer, 2003; Doymaz, 2007). Böylece kurutmanın sadece ürün içindeki kütle transferi yani kütle(nem) difüzyonu hızı ile kontrol edildiği kabul edilmektedir. Diğer bir deyişle ürün dışındaki ısı ve kütle taşınımının çok yüksek olduğu ve ürün içinde sıcaklığın homojen dağıldığı düşünülmektedir. Dolayısıyla burada Fick'in difüzyon modelinin genelde kurutma hızının teorik belirlenmesinde oldukça yeterli ve başarılı olduğu bilinmektedir. Bunun için Fick'in difüzyon modelinde sadece ürün cinsine bağlı olarak etkin difüzyon sabitinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. İbrahim Doymaz'ın havuç küplerinin ince tabaka kurutmasını incelediği çalışmasına (Doymaz, 2004) dayanarak kabak küpleri için Fick'in difüzyon denklemi küre geometrisi kabulü ile çözülecektir. Bu durumda Fick'in difüzyon denklemi, kabak içerisinde nem geçişinin difüzyonla olduğu, hacimsel küçülmelerin önemsenmeyecek derecede olduğu ve kabağın sıcaklık ve difüzyon katsayılarının sabit kaldığı kabul edilmesi durumunda şu şekilde ifade edilir (Crank, 1979; Pala et al., 1996):

$$NO(t) = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2)$$

Burada t kurutma zamanı, D_{eff} etkin difüzyon katsayısı ve r kürenin yarı çapıdır. Kürenin çapı ise küp ölçüsüne eşittir.(Doymaz, 2004). Uzun kuruma süreleri için serinin ilk teriminden sonrasının ihmal edilmesi sonucu çok etkilemeyeceğinden dolayı (Ramesh et al., 2001) denklem şu şekilde basitleştirilebilir (Gur and Gur, 2014).

$$NO(t) = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (3)$$

İki tarafın doğal logaritmasını aldığımızda aşağıdaki denklem elde edilecektir.

$$\ln NO(t) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}\right) t \quad (4)$$

Yukarıdaki denklem, deney verilerinden etkin kurutma katsayılarının hesaplanması için kullanılacaktır; $\ln NO(t)$ 'in zamana bağlı grafiği çizildiğinde, $\left\{0, \ln \frac{6}{\pi^2}\right\}$ noktalarından geçip grafikteki veri noktalarına en iyi uyum doğru bulunacaktır. Bu doğrunun eğimi $\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}$ 'e eşit olup, buradan da D_{eff} hesaplanacaktır.

Genel olarak etkin difüzyon katsayısı, D_{eff} , hem sıcaklıkla ve hem de ürünün fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Literatürde, etkin difüzyon katsayısının (D_{eff}) sıcaklık ve ürün özellikleri ile olan ilişkisi Arrhenius denklemi ile ele alınmıştır(Mazza and LeMaguer, 1980; Madamba et al., 1996).

$$D_{eff} = D_o \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

Burada E_a aktivasyon enerjisi, ürünün özelliğine ve kurutma koşullarına bağlı olarak kurutmanın başlaması için gereken enerji olarak tanımlanmıştır. D_o referans noktasında difüzyon faktörü ve R ise ideal gaz sabitidir. T ise sıcaklığın etkisini göstermektedir.

Diğer taraftan, Denklem (4) literatürde bir çok ampirik ve yarı ampirik (Page denklemi, iki terim modeli ve Henderson & Pabis modeli gibi) modeller ile geliştirilmiştir. Bu modeller arasında Page denklemi, iki terim modeli ve Henderson & Pabis modeli kabağın ince tabaka kurutma kinetiğini modellemek, belirlemek için kullanılmıştır.

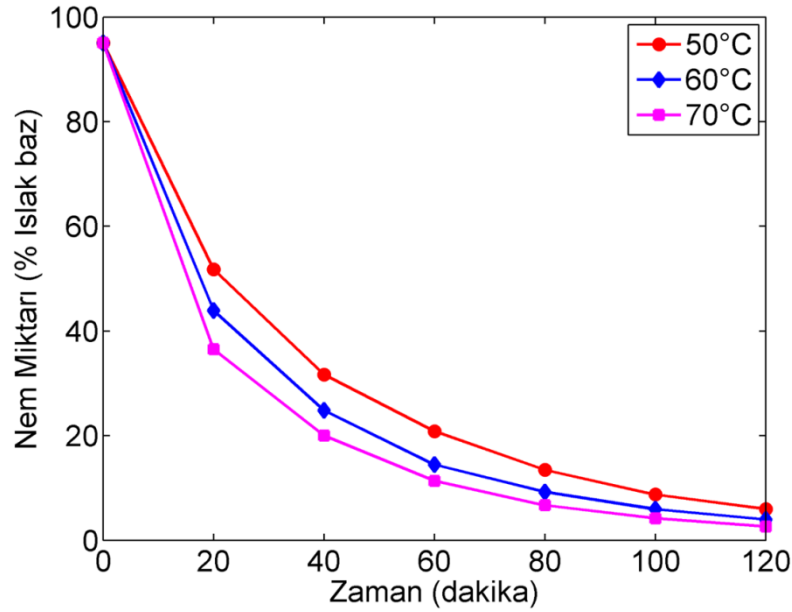
Kurutma hızı, belirli bir zaman aralığında ürün neminin değişimi olarak şu şekilde tanımlanır:

$$KH(t) = \frac{N(t + dt) - N(t)}{dt} \quad (6)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Balkabağının, akışkan yataklı kurutucuda gerçekleştirilen üç farklı sıcaklıktaki kuruma eğrileri Şekil 2 de gösterilmiştir. Genel olarak ilerleyen zamanla kuruma hızlarının azaldığı ve yaklaşık 80 dakikadan sonra oldukça düşük hızlarda olduğu görülmektedir. Bu da kurutmanın tipik olarak azalan kurutma hızı bölgesinde meydana geldiğini yani kurutmanın ürün içindeki nem difüzyonunun kontrollü olduğunu göstermektedir. Bu bölgedeki yavaşlayan kurutmanın

nedeni, ürünün içerisinde nem difüzyonuna gösterilen artan iç direnç ile açıklanabilir (Keey, 2013). Dolayısıyla, bu deney sonuçlarının teorik olarak Fick'in difüzyon denklemi (3) ile hesaplanmasının mümkün olabileceği anlaşılmaktadır. Kurutmanın sonlarına doğru bünye nemi çok azalmıştır. Balkabağının diğer meyve ve bitkilere göre yüksek başlangıç nemlerinde olması ve bu nemin yaklaşık 2 saat gibi sürede akışkan yataklı kurutucuda istenen nem değerlerine düşürülmesi mümkün olmuştur. Kurutma eğrilerine bakıldığında, yüksek sıcaklıklarda kuruma hızları artış göstermiştir. Akışkan yataklı kurutucuda 50-70°C sıcaklıkları arasında ulaşılan kuruma süreleri yaklaşık olarak en fazla 2 saat iken, diğer sabit yataklı kurutucularda kurutma sıcaklığı, kurutma havasının hızı, ve parçacık şekli ve büyüklüğüne bağlı olarak yaklaşık 4-11 saat arasında bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. (Akpınar, Midilli, and Bicer, 2003; Doymaz, 2007; Seremet et al., 2016).



Şekil 2:

Akışkan yataklı kurutucuda üç farklı sıcaklıklarda ölçülen balkabağı kuruma eğrileri

Literatürde geliştirilen ince tabaka kurutma modelleri; teorik, yarı-ampirik/teorik ve ampirik olarak üçe ayrılmışlardır. Yarı teorik yöntemler içinde, Lewis modeli (Lewis, 1921), Page(Diamante and Munro, 1993), two term(Henderson, 1974), ve Henderson ve Pabis (Henderson and Pabis, 1961) modelleri bulunmaktadır. Bu modellerin akışkan yataklı kurutucularda uygulanmış olduğu literatür çalışmalarından görülmektedir (Madhiyanon et al., 2009). Bu çalışmada yarı-teorik modellerden Lewis modeli(Lewis, 1921), Henderson ve Pabis modeli, Page modeli(Diamante and Munro, 1993) ve logaritmik(Yağcıoğlu et al., 1999) modelin, balkabağın akışkan yataklı kurutucudaki kurutulmasının modellenmesi için uygunluğu irdelenecektir.

Bu amaçla, denklem (1) kullanılarak deney sonuçları/verileri önce kuru bazda nem oranlarına dönüştürülerek boyutsuz nem değerleri elde edilmiştir. İkinci adımda ise yukarıda ifade edilen yarı teorik modellerin denklemleri ile bu nem değerleri üzerinden geçen uygun eğrilerin bulunması için çalışılmıştır. Uygun eğrinin belirlenmesi için MATLAB programında, doğrusal olmayan en küçük kareler çözücüsünden yararlanılmıştır. Eğri uygunluğu ise eğrinin

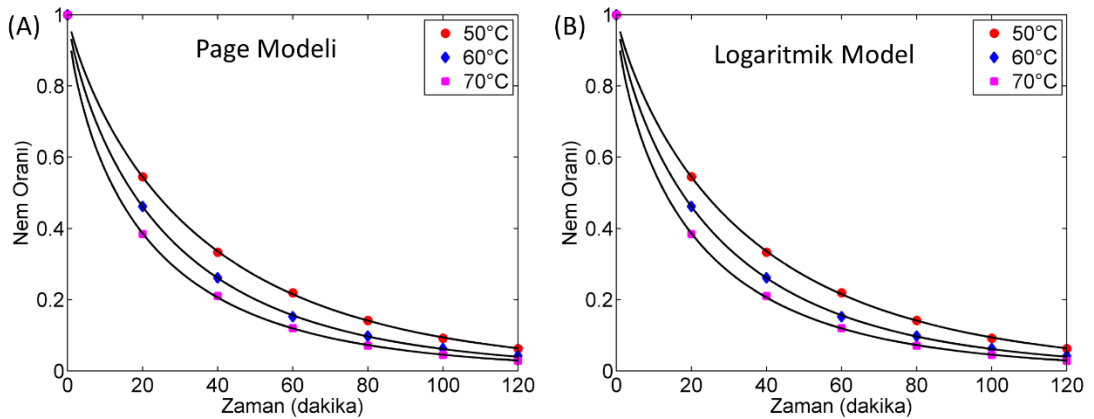
hata katsayısı değerini veren determinasyon katsayısı, R^2 , ve toplam hata kareleri ortalamasının kara kökü ile ölçülmüştür. Determinasyon katsayısı en genel hali ile şu şekilde ifade edilebilir:

$$R^2 \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^S (\text{NO}(t_i)_{\text{model}} - \text{NO}(t_i)_{\text{deney}})^2}{\sum_{i=1}^S (\text{NO}(t_i)_{\text{model}} - \text{NO}_{\text{ortalama}})^2} \quad (7)$$

Burada $\text{NO}(t_i)_{\text{deney}}$ deneylerde t_i anında ölçülen nemi, $\text{NO}(t_i)_{\text{model}}$ ise yine t_i anında model eğrisinin gösterdiği nem değeridir. $\text{NO}_{\text{ortalama}}$ ise deneylerde ölçülen nem değerlerinin ortalamasıdır. Toplam hata kareleri ortalamasının kara kökü, OHKT şu şekilde tanımlanmıştır

$$\text{OHKT} \equiv \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^S (\text{NO}(t_i)_{\text{model}} - \text{NO}(t_i)_{\text{deney}})^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

Böylece en uygun model eğrisi için determinasyon katsayısının, R^2 bire en yakın olması ve toplam hata kareleri ortalamasının kara kökünün, OHKT, ise sıfıra yakın olması gerekir. Burada seçilen dört farklı modelin deney sonuçlarına uygunluğu için Denklemler (7) ve (8) kullanılarak hata değerleri hesaplanmış ve Tablo 1’de verilmiştir. En düşük OHKT ve yüksek R^2 değerleri Page modeli ile sağlanmış olup seçilen modellerin arasında en başarılısı olmuştur. Bu modeli ise deneysel verilere uyumluluk başarısında logaritmik model takip etmektedir. Tüm modellerin OHKT değerlerinin 0.088-0.99 arasında olduğu gözönüne alındığında bu dört modelin de deneylerimizde görülen kurutma davranışlarını başarıyla modelleyebildikleri görülmektedir. Doymaz (2007) da, sabit yataklı kurutucularda yaptığı balkabağı kurutma deneylerinde de bu modelleri başarıyla kullanabileceğini göstermiştir. Dolayısıyla balkabağı kurutulmasında bu dört modelin kurutucunun cinsinden bağımsız olarak uygun olduğu sonucuna varılmaktadır. Şekil 3’te bu modellerden Page ve logaritmik model ile belirlenen kuruma eğrileri ve deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Burada her iki modelin de pratikte deney sonuçlarına çok yakın oldukları görülmektedir.



Şekil 3:

Akışkan yataklı kurutucuda ölçülen deneysel sonuçlar ile matematiksel model ile elde edilen kurutma eğrisinin karşılaştırılması.

(a) Page modeli ile karşılaştırma (b) Logaritmik model ile karşılaştırma

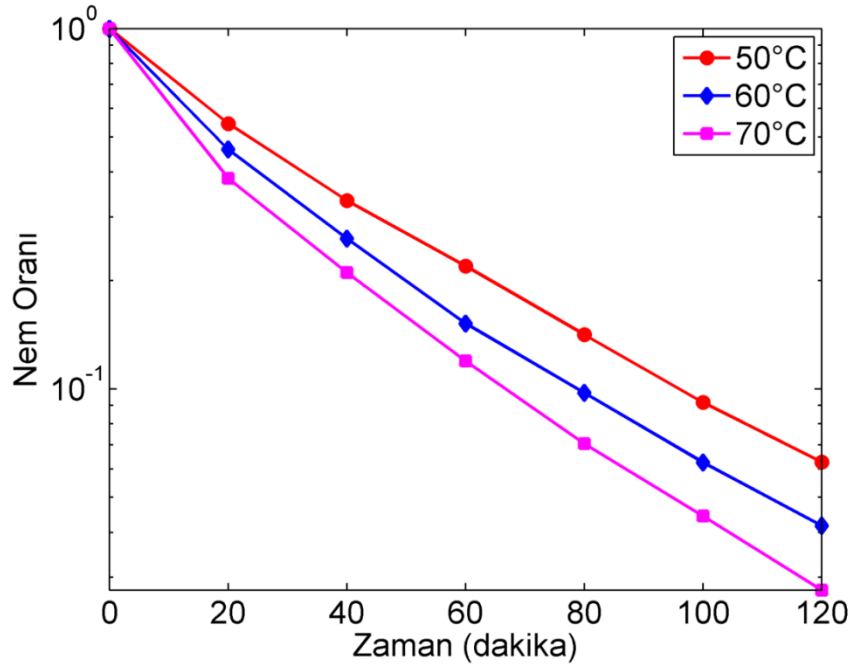
Tablo 1. Kurutma modellerinin uygunluğunu gösteren hata değerleri

Model ismi	Model	Kurutma Sıcaklığı (°C)	R ²	OHKT
Lewis	$NO(t) = \exp(-kt)$	50	0.9945	0.0229
		60	0.9930	0.0266
		70	0.9905	0.0313
Henderson ve Pabis	$NO(t) = a \exp(-kt)$	50	0.9951	0.0217
		60	0.9934	0.0257
		70	0.9908	0.0308
Page	$NO(t) = \exp(-kt^n)$	50	0.9999	0.0021
		60	0.9999	0.0018
		70	0.9999	0.0021
Logaritmik	$NO(t) = a \exp(-kt) + c$	50	0.9986	0.0115
		60	0.9984	0.0125
		70	0.9969	0.0180

Deneylerden elde edilen nem değerlerinin boyutsuzlaştırılmış nem oranlarının logaritması alınarak zamana göre dağılımı Şekil 4 da gösterilmiştir. Böylece sabit tutulan kuruma sıcaklığında farklı kuruma doğruları elde edilmiştir. Burada sıcaklık yükseldikçe, beklendiği gibi kurutma doğrularının eğimleri artmaktadır. Şekil 4'teki doğrular, diğer taraftan kurutmayı teorik olarak hesaplayan Fick'in difüzyon denklemini ifade etmektedir. Dolayısıyla Denklem (4)'teki formülasyona sahip doğru, Şekil 4'teki veri noktalarına uydurulduğunda elde edilen doğrunun eğimi $\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}$ olmaktadır. Buradan ise efektif difüzyon katsayısı kolayca belirlenmiştir. Efektif difüzyon katsayıları 50, 60 ve 70°C sıcaklıkları için sırasıyla $11.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $14.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $16.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 3'te sabit yatakta yapılan balkabağı kurutmasının deney sonuçlarından elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Buradaki difüzyon katsayılarının, (Doymaz, 2007) tarafından yapılan sabit yataktaki balkabağı kurutmasında elde edilen değerlerinden 50 °C'de %198 ve 60 °C'de ise %52 daha yüksek çıktığı görülmüştür. Benzer şekilde Akpınar ve çalışma arkadaşlarının (Akpınar, Midilli, and Bicer, 2003) elde ettiği değerlere nazaran 60 °C'de %276-356 ve 70 °C'de ise %170-257 daha yüksek difüzyon katsayıları elde edilmiştir. Bu iyileşmenin akışkan yataklı kurutucunun ısı ve kütle transferini önemli miktarda artırması ile açıklanabilir.

Tablo 2. Balkabağı kurutulmasının difüzyon katsayılarının literatür değerleri ile karşılaştırılması

Karşılaştırılan Çalışmalar			
Referans	(Akpınar, Midilli, and Bicer, 2003)		(Doymaz, 2007)
Kurutucu	Siklon tipi kurutucu		Kabin tipi kurutucu
Hava hızı (m/s)	1	1,5	1
Difüzyon katsayılarında karşılaştırma sonucu görülen yaklaşık artış (%)			
50°C	-	-	%198
60°C	%299-356	%276-296	%52
70°C	%211-257	%170-220	-



Şekil 4:

Akışkan yataklı kurutucuda balkabağı kurutulmasında elde edilen logaritmik kuruma eğrileri

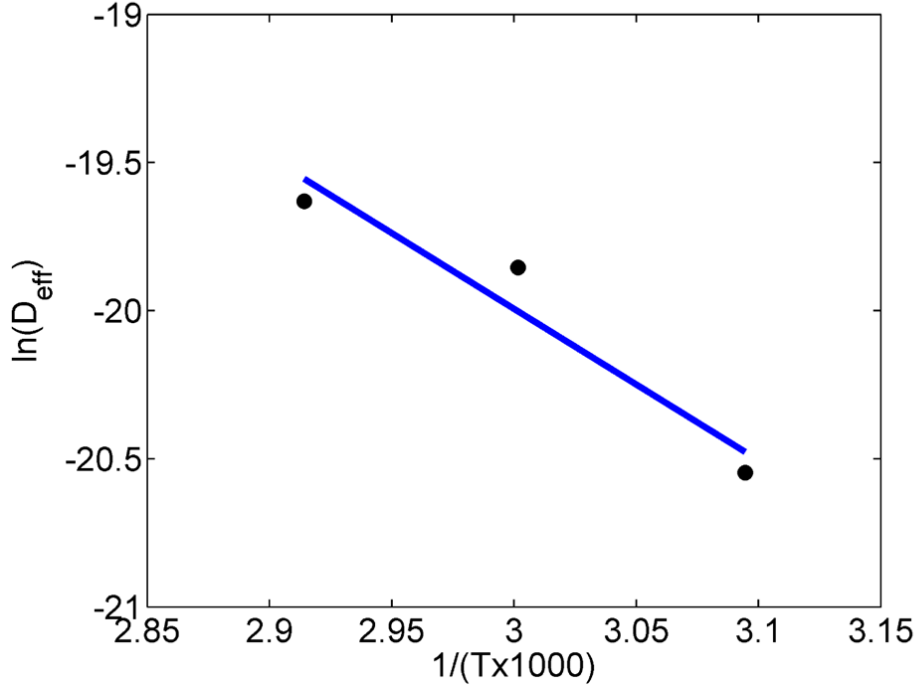
Etkin difüzyon katsayısının sıcaklıkla değiştiği yukarıda görülmüştür. Ancak sıcaklığa bağlılığının nasıl olduğunu bulmak için Denklem (5) ile tanımlanan Arrhenius denkleminde yararlanılacaktır. Bu amaçla hesaplanan efektif difüzyon katsayılarının logaritması alınarak, Denklem (9)'a uygun olarak sıcaklığın tersi alınarak Şekil 5'te çizilmiştir. Bu değerler

üzerinden geçen aşağıda formülasyonu verilmiş doğru ile etkin difüzyon katsayısının sıcaklık bağımlılığı ifade edileceği anlaşılmaktadır:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_o) + \left(\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T} \quad (9)$$

Başka bir deyişle veri noktalarına Arrhenius tipi denklemin uydurulması ile aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjisi balkabağı küplerinin tüm yüzeylerinin yüksek hızdaki kurutma havası ile temasta olduğu, akışkanlaşmanın sağlandığı, bu çalışmadaki kurutma koşullarında $E_a = 16.6 \text{ kJ/mol}$ olarak elde edilmiştir/bulunmuştur. Bu değer Doymaz'ın (Doymaz, 2007) düşük kurutma hava hızında elde ettiği $E_a = 78.93 \text{ kJ/mol}$ değerinden önemli miktarda düşüktür. Bu fark özellikle nemi yüksek ürün için kurutma şartlarının aktivasyon enerjisini önemli ölçüde etkileyebileceğine işaret etmektedir. Aktivasyon enerjisinin kurutma havasının hızına göre değişebileceği Aghbashlo ve çalışma arkadaşları (Aghbashlo ve diğerleri, 2008) tarafından da gözlenmiştir. Kurutma havasının alttan verildiği sabit yataklı kurutucularda hava hızının yeterince artırılması sonucu kurutucu, akışkan yataklı kurutucuya dönüşecektir. Akışkan yataklı kurutucu, kurutma süresinin azaltılması ve kurutma kalitesinin artırılması açısından çok daha uygun şartlar sağlamaktadır. Genel olarak kabak kurutmanın difüzyon kontrollü (kabak içindeki difüzyonla ısı-kütle geçişi) şartlarda yani taşınım kontrollü (dış ortamın kurutma hızı) olmadığı yapılan çalışmalar göstermektedir. Öte yandan difüzyonun fiziksel olarak sıcaklıkla ilişkili olarak değiştiği bilinmektedir. Dolayısıyla yüksek difüzyon hızlarını sağlayan homojen ve yüksek sıcaklıklar ancak akışkan yataklı kurutucuda sağlanabilmektedir. Kurutma havasının üstten verildiği gelenekselsabit yataklı kurutucularda ise hava hızının artırılması ile kabak küplerinin akışkanlaşması (akışkan yataklı kurutucu) sağlanamayacak ve sabit yatak durumu devam edecektir. Burada kabak küplerinin sadece kısmı bir yüzeyinin hava ile temas edeceğinden dolayı yatakta homojen sıcaklık dağılımı elde edilemeyecektir. Dolayısıyla kurutma havasının artırılmasının akışkan yataklı kurutuculardaki görülen olumlu etkisi geleneksel sabit yataklı kurutucularda mümkün olmayacaktır.

Akışkanlaşmanın olmadığı Doymaz'ın kabak kurutma deneylerinde sıcaklığın 50 °C'den 60°C'a çıkarılması D_{eff} değerinde %142'lik bir artışa sebep olmuştur. Akışkanlaşmanın gerçekleştiği bu çalışmada ise D_{eff} değerinin sıcaklığa bağımlılığı daha düşük olarak gözlemlenmiştir. Bu çalışmadaki deneylerinde sıcaklığın 50 °C'den 60 °C'a çıkarılması D_{eff} değerinde %23, 70 °C'e çıkarılması durumunda ise D_{eff} değerinde %43'lük bir artışa sebep olmaktadır. Arevalo-Pinedo ve Murr'un (Arévalo-Pinedo ve Murr, 2006) 5kPa-25kPa gibi düşük basınçlarda gerçekleştirdikleri deneylerde D_{eff} 'in sıcaklığa göre yüzdesel değişimi buradaki deneylerle benzer mertebelerde gerçekleşmiştir.



Şekil 5:

Etkin difüzyon ile kurutma sıcaklığın ters değerleri arasındaki ilişki

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, aynı zamanda balkabağının akışkan yataklı kurutucuda kurutulmasının test edildiği öncü bir çalışma özelliği taşımaktadır. Deneylerde kullanılan balkabağının başlangıç nem değerleri %95 mertebelerindedir. Akışkan yataklı kurutucuda, oldukça kısa sürelerde yaklaşık 2 saatte istenen nem değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum seçilen hava sıcaklıklarına (50, 60 ve 70°C) bağlı olarak da kısalmıştır. Dolayısıyla akışkan yataklı kurutucudan beklenen yüksek ısı ve kütle geçişi burada sağlanmış olduğu görülmüştür. Akışkan yataklı kurutucuda balkabağının kurutulması, geleneksel sabit yataklı kurutuculara göre çok kısa sürelerde gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde, kurutma hızının sürekli olarak azaldığı gözlenmiştir. Bu da kurutmanın tipik olarak sadece azalan kurutma hızı fazında gerçekleştiği sonucunu çıkarmaktadır. Diğer deyişle balkabağının kurutulmasında ürün içindeki nem difüzyonunun kuruma hızını belirlediği anlaşılmaktadır. Bu da kurutma tekniğinde, difüzyon kontrollü kuruma olarak nitelenmektedir. Balkabağı kabak kurutma deney sonuçlarımız, söz konusu kurutmanın kurumanın kabak içerisindeki nem difüzyonu ile kontrol edildiği, dolayısıyla kuruma hızının düştüğü süreçte gerçekleştiğini göstermiştir.

Balkabağının teorik modellenmesi çalışması yürütülmüştür. Model seçiminde, balkabağı kurutulması azalan kurutma hız periyodunda gerçekleştiğinden, ince tabaka kurutma kinetiği ile modellenmesi mümkün olmuştur. Böylece kurutmanın sadece ürün içindeki kütle transferi yani kütle (nem) difüzyonu hızı ile kontrol edildiği kabul edilebilir. Dolayısıyla burada Fick'in difüzyon modeli kurutma hızının teorik belirlenmesinde oldukça yeterli ve başarılı olmuştur. Efektif difüzyon katsayılarında akışkanlaşma yoluyla %52-%356 aralığında artışlar gözlemlenmiştir. Akışkan yatakta efektif difüzyon katsayıları 50, 60 ve 70°C sıcaklıkları için sırasıyla $11.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $14.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $16.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur.

Doymaz ise 50, 55 ve 60°C sıcaklıkları için sırasıyla $3.88 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $6.58 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $9.38 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulmuştur. Aradaki farkın temel nedeni akışkan yataklı kurutucunun kabak ile havayı homojen şekilde karıştırıp arasındaki ısı ve kütle transferini önemli derecede artırması ile açıklanabilir.

Etkin difüzyon katsayıları yüksek kurutma sıcaklıklarını artırdığı gözlemlenmiştir ve bu artışın sıcaklıkla Arrhenius tipi bir ilişki gösterdiği görülmüştür. Aktivasyon enerjisi bu çalışmada yapılan deney şartlarında hesaplanmıştır.

Bu çalışmada literatürde geliştirilen yarı-teorik modellerden Lewis modeli, Henderson ve Pabis modeli, Page modeli ve logaritmik modeller incelenmiştir. Balkabağı kurutmasında en fazla logaritmik modelin uygun olmasına rağmen diğerlerinin de yeterli hassasiyette oldukları sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Aghbashlo, M. ve diğerleri (2008) Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae), *Energy Conversion and Management*, 49, 2865-71, doi:10.1016/j.enconman.2008.03.009
2. Akpınar, E. ve diğerleri (2003) Experimental investigation of drying behaviour and conditions of pumpkin slices via a cyclone-type dryer, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, 1480-86, doi: 10.1002/jsfa.1565
3. Alibas, I. (2007) Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices, *LWT-Food Science and Technology*, 40, 1445-51, doi:10.1016/j.lwt.2006.09.002
4. Arévalo-Pinedo, A. ve Murr, F. E. (2006) Kinetics of vacuum drying of pumpkin (Cucurbita maxima): Modeling with shrinkage, *Journal of Food Engineering*, 76, 562-67, doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.06.003
5. Crank, J. 1979. *The mathematics of diffusion* (Oxford university press).
6. Diamante, L. M. ve Munro, P. A. (1993) Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices, *Solar energy*, 51, 271-76, doi:10.1016/0038-092X(93)90122-5
7. Doymaz, I. (2004) Convective air drying characteristics of thin layer carrots, *Journal of food engineering*, 61, 359-64, doi:10.1016/S0260-8774(03)00142-0
8. Doymaz, I. (2007) The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of food engineering*, 79, 243-48, doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.01.049
9. Erbay, Z. ve Icier, F. (2010) A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results, *Critical reviews in food science and nutrition*, 50, 441-64, doi:10.1080/10408390802437063
10. Gur, M. ve Gur, M. 2014. 'Comparing Corn Drying in Fluidized Bed Dryer and Convective Tray Dryer.' in, *Progress in Exergy, Energy, and the Environment* (Springer), doi: 10.1007/978-3-319-04681-5_65
11. Henderson, S. (1974) Progress in developing the thin layer drying equation, *Transactions of the ASAE*, 17, 1167-68, doi: 10.13031/2013.37052
12. Henderson, S. ve Pabis, S. (1961) Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-74,
13. Keey, R. B. 2013. *Drying: principles and practice* (Elsevier).

14. Lewis, W. K. (1921) The Rate of Drying of Solid Materials, *Industrial & Engineering Chemistry*, 13, 427-32, doi: 10.1021/ie50137a021
15. Madamba, P. S. ve diğerleri (1996) The thin-layer drying characteristics of garlic slices, *Journal of food engineering*, 29, 75-97, doi:10.1016/0260-8774(95)00062-3
16. Madhiyanon, T. ve diğerleri (2009) Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut, *Applied Thermal Engineering*, 29, 2849-54, doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.02.003
17. Mazza, G. ve LeMaguer, M. (1980) Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations, *International Journal of Food Science & Technology*, 15, 181-94, doi: 10.1111/j.1365-2621.1980.tb00930.x
18. Öztekin, S. ve diğerleri (1999) Crop drying programme in Turkey, *Renewable energy*, 16, 789-94, doi:10.1016/S0960-1481(98)00282-1
19. Pala, M. ve diğerleri (1996) Effects of pretreatments on the quality of open-air and solar dried apricots, *Nahrung-Food*, 40, 137-41, doi: 10.1002/food.19960400308
20. Ramesh, M. ve diğerleri (2001) Influence of processing parameters on the drying of spice paprika, *Journal of Food Engineering*, 49, 63-72, doi:10.1016/S0260-8774(00)00185-0
21. Ratnayake, R. ve diğerleri (2004) Influence of cultivar, storage and cooking on the mechanical properties of winter squash (*Cucurbita maxima*), *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 433-40, doi: 10.1002/jsfa.1674
22. Sahin, A. ve Dincer, I. (2005) Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids, *Journal of food engineering*, 71, 119-26, doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.10.024
23. Seremet, L. ve diğerleri (2016) Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices, *Food chemistry*, 195, 104-09, doi:10.1016/j.foodchem.2015.03.125
24. Tatemoto, Y. ve diğerleri (2001) Effect of fluidizing particle on drying characteristics of porous material in fluidized bed, *Drying Technology*, 19, 1305-18, doi:10.1081/DRT-100105290
25. Tunde-Akintunde, T. ve Ogunlakin, G. (2013) Mathematical modeling of drying of pretreated and untreated pumpkin, *Journal of food science and technology*, 50, 705-13, doi: 10.1007/s13197-011-0392-2
26. Tunde-Akintunde, T. Y. ve Ogunlakin, G. O. (2011) Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy requirements during the drying of pretreated and untreated pumpkin, *Energy Conversion and Management*, 52, 1107-13, doi:10.1016/j.enconman.2010.09.005
27. Wang, Z. H. ve Chen, G. (2000) Heat and mass transfer in batch fluidized-bed drying of porous particles, *Chemical Engineering Science*, 55, 1857-69, doi:10.1016/S0009-2509(99)00446-7
28. Yağcıoğlu, A. ve diğerleri. 1999. "Drying Characteristics of Laurel Leaves Under Different Drying Conditions. 7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy, 565-69.
29. Yaldız, O. ve Ertekin, C. (2001) Thin layer solar drying of some vegetables, *Drying Technology*, 19, 583-97, doi: 10.1081/DRT-100103936