

## GIDALARDA İNCE TABAKA KURUTMA MODELLERİ

Naciye Kutlu\*, Aslı İşci, Özge Şakıyan Demirkol

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş tarihi / *Received*: 02.05.2014

Düzeltilerek Geliş tarihi / *Received in revised form*: 14.07.2014

Kabul tarihi / *Accepted*: 27.08.2014

### Özet

Kurutma, ısı ve kütle aktarımıyla gerçekleşen en karmaşık proseslerden biridir. En genel tanımı ile kurutma, gıdadan suyun uzaklaştırılmasıdır. Kurutma işlemi ile su aktivitesi azalan gıda ürünlerinde, mikrobiyel aktivite ve enzim aktivitesi oldukça düşük seviyededir. Bu sebeple gıdaların kurutulması, uzun süreli depolamalarda çoğunlukla tercih edilir. Bu derlemede kurutma işleminin mekanizması, endüstride sıklıkla kullanılan kurutma yöntemleri ve ince tabaka kurutma modelleri özetlenmiştir. İnce tabaka eşitlikleri teorik, yarı teorik ve ampirik modeller olarak sınıflandırılabilir. Her ne kadar teorik modeller tüm proses koşulları için kullanılabilir olsa da, pratik olmayışları sebebiyle gıdalarda yapılan kurutma çalışmalarında genellikle yarı teorik ve ampirik modeller tercih edilmektedir. Bu modeller incelendiğinde, gıdaların kurutma verilerine en iyi uyum sağlayanların, yarı teorik modellerden Page ve Midilli olduğu görülmüştür. Ayrıca, Fick'in ikinci yasasından elde edilen efektif difüzyon katsayısı ve Arrhenius bağıntısı kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi, kurutma işlemi hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Literatürdeki farklı çalışmalarda efektif difüzyon katsayısının ve aktivasyon enerjisinin sırasıyla  $10^{-7}$ - $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s ve 10-80 kJ/mol aralığında değiştiği bildirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Gıdalarda kurutma yöntemleri, kurutma mekanizması, ince tabaka kurutma modelleri, difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi

## THIN LAYER DRYING MODELS IN FOOD SYSTEMS

### Abstract

Drying is one of the most complicated food processes which include simultaneous heat and mass transfer. It is generally defined as the removal of moisture from food. The microbial and enzyme activity in dry food products are quite low due to reduced water activity. Therefore, drying is widely preferred in long term storage of foods. The drying mechanism, common drying techniques used in industry and thin layer drying models were summarized in this review. Thin layer drying models can be classified as theoretical, semi-theoretical and empirical. Theoretical models can be applied to all process conditions. However, due to their practical inconvenience, semi-theoretical and empirical models are widely preferred in drying studies. Among the models studied in food drying, semi-theoretical models, Page and Midilli, were found to be the best fitting models. In addition, the effective diffusion coefficient calculated from Fick's Second Law and the activation energy, which is determined using Arrhenius equation, give valuable information regarding drying. The effective diffusivities and activation energy values in foods were reported in the range of  $10^{-7}$ - $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s and 10-80 kJ/mol, respectively.

**Keywords:** Food drying methods, drying mechanism, thin layer drying models, diffusion coefficient, activation energy

\*Yazışmalardan sorumlu yazar / *Corresponding author*;

✉ nkutlu@ankara.edu.tr,

© (+90) 312 203 3300-3632,

☎ (+90) 312 317 8711

## GİRİŞ

Kurutma işleminin amacı, gıdanın içerdiği %80-90 oranındaki suyu %10-20 oranına düşürerek, ürünün raf ömrünü arttırmaktır. Kurutulmuş üründe mikrobiyolojik bozulma ve enzim aktivitesi en düşük seviyededir. Depolanması, sevkiyatı kolay ve daha az masraflı olmaktadır. Kurutma birçok yöntemden daha ucuz bir muhafaza yöntemi olup, daha az işçilik ve daha az ekipman gerektirmektedir. Ayrıca, diğer koruma yöntemleri uygulanmış gıdalara göre, besin öğeleri özellikle lif içeriği açısından daha zengin durumdadır (1).

Meyve ve sebzelerde kurutma işlemi eski çağlardan beri kullanılan, gıda koruma yöntemlerinden biridir. Kurutma işlemi, eski tarihlerde sadece güneş ile doğal yolla yapılmakta idi. Fakat güneş ışınlarının sadece yılın belli dönemlerinde etkili olması, geniş alanlara ve uzun süreye ihtiyaç duyulması, böceklenme, tozlanma gibi hijyenik etkenlerden dolayı artık çok fazla tercih edilmemektedir. Günümüzde teknolojinin de ilerlemesiyle kurutma işlemi artık çok farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir (2).

Kurutma sistemleri, "konveksiyon kurutma", "kondüksiyon kurutma" ve "elektro manyetik dalgalarla kurutma" olmak üzere başlıca üç farklı yöntemle ayrılabilir. Konveksiyon kurutmada (sıcak hava ile kurutma), buharlaştırma için gerekli olan sıcak gaz (hava) kurutulacak maddenin içinden, üzerinden ve arasından geçirilir, kurutucu yüzeye temas yoktur. Kondüksiyon kurutmada, buharlaştırma için gerekli ısı, sıcak bir yüzeyden kurutulacak olan maddeye iletilir. Sonuncu yöntemde ise, kurutulacak maddeye ısı, elektromanyetik dalgalar şeklinde transfer edilir (1).

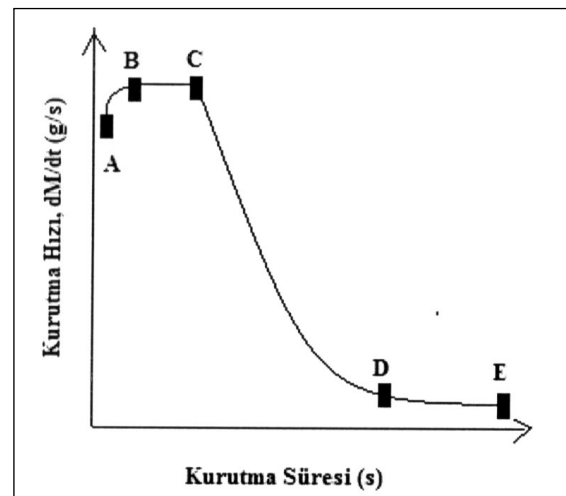
Türkiye’de kurutulmuş gıda sektöründe ürün çeşitliliği çok fazladır. Bu ürünlerin başında sebze, meyve ve et ürünleri gelmektedir. Kuru sebzeler, hazır çorba, bebek mamaları ve sos üretiminde direk olarak kullanılabilirler için tercih edilmektedirler. Toplam kurutulmuş sebze ihracatımızın yaklaşık %92’sini domates oluşturmaktadır. İhracattaki diğer önemli kurutulmuş sebzeler ise, mantar, patlıcan ve kabaktır (3). Kuru meyve sektöründe ise dünyadaki üretimin yaklaşık 9.5 milyar olduğu ve Türkiye’nin oranının ise %11 olduğu belirtilmiştir. Kuru incir, kuru üzüm ve kuru kayısı ürünlerinin ihracattaki payı çok yüksektir (4). Sucuk ve pastırma

ülkemizde en çok üretilen kurutulmuş et ürünlerindedir. İstatistiksel verilere göre, toplam et ürünleri pazarında sucuğun oranı yaklaşık %55, pastırmanın ise yaklaşık %6’dır (5).

İnce tabaka kurutma, genel anlamı ile örnek dilimlerinin bir tabaka halinde kurutulmasıdır. İnce tabaka eşitlikleri son yıllarda kullanım kolaylığından ve daha az veri gereksiniminden dolayı, karmaşık modellerin çözümünde geniş kullanım alanı bulmuştur (6). İnce tabaka eşitlikleri teorik, yarı-teorik ve ampirik modeller olabilir. Teorik modeller ile nem transferinde sadece iç direnç hesaba katılırken, diğerlerinde ürün ile hava arasındaki nem transferindeki dış direnç düşünülür (7).

## KURUTMA MEKANİZMASI

Kurutma, genel tanımı ile gıdadan suyun uzaklaştırılmasıdır ve uzun süreli depolama için en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu aşamada depolama koşulları çok önem taşımaktadır. Ürünler kurutulduktan sonra, nem, sıcaklık ve hava hızı ayarlanabilen depolarda saklanmalıdır. Gıda maddelerinde, ürünün nem içeriği kuruma süresi boyunca azalarak belli bir noktadan sonra sabitlenmektedir. Kurutma hızı ise ilk saatlerde çok yüksek iken, sürenin ilerlemesiyle azalmaktadır (Şekil 1). Kurutma hızı, ürünün özellikleri, şekli, iriliği, kalınlığı, kurutma hava hızı, sıcaklığı ve nemi, kurutulacak olan ürünün miktarı gibi özelliklere bağlıdır. Kurutma sıcaklığının ve hava hızının artması, aynı zamanda kurutulacak gıdanın kalınlığının ve miktarının azalması, kurutma hızını arttırmaktadır (8).



Şekil 1 Kurutma hızının kurutma süresi ile değişimi (9)

Burada A-B bölgesi, denge bölgesidir. Kurutma hızı artıyor gözükmese rağmen bu anlık bir durumdur ve gıda kurutma işlemlerinde bu bölge ihmal edilmektedir (10). B-C bölgesi, sabit hızda kuruma bölgesidir. Bu bölge çok kısa olmakta ve gıda ürünlerinin kurutulması sırasında sabit hızda kuruma görülmemektedir (11). C-D bölgesi, azalan kuruma periyodu olup, asıl kurutma işleminin gerçekleştiği bölgedir. Bu bölgede gıda maddelerinde difüzyon etkilidir. İlk kuru nokta bu bölgede görülmektedir ve bu noktaya kritik nokta adı verilmektedir (C noktası) (12). D noktasında ürünün yüzeyi artık tamamen kurudur ve ikinci azalan hız periyodu başlar. Buharlaştırma düzlemi, yüzeyden yavaşça iç kısımlara doğru çekilir. Buharlaştırma ısısı, katıdan geçerek buharlaştırma bölgesine aktarılır (10).

#### **KURUTMA HIZINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER**

Kurutma hızı, kurutma süresi boyunca birçok parametreden etkilenebilmektedir. Ürün kimyasal bileşimi, ürün boyutları, kurutma hava sıcaklığı, hava hızı, kuruluğu ve atmosfer basıncı, kurutma hızını etkileyen başlıca faktörlerdendir. Zhu ve Shen (2014) şeftali (13) ile yaptıkları çalışmada, kurutma hava hızının 0.423 m/s'den 1.120 m/s'ye artırılması ile kurutma hızının yaklaşık 2 kat arttığını göstermişlerdir. Kurutma sıcaklığının 20 °C artması ile kurutma hızında yaklaşık 1.7 kat artış gözlenmiştir. Aynı çalışmada dilim kalınlığının yarıya düşürülmesi de kurutma hızının 2 kat artmasına sebep olmuştur. Kurutma hızının, hava hızı ve sıcaklık artışı ile doğru, dilim kalınlığı artışı ile ters orantılı değiştiği görülmektedir. Kimyasal bileşimi bakımından, ürünün içerisinde yağ bulunması kuruma hızını sınırlamaktadır. Nişasta ve pektin içeren gıdalarda, kurutma çok zordur. Çünkü bu bileşenler suyu içinde tutarak jel oluşturur ve kuruma zorlaşır. Ayrıca, yüksek şeker içeren ürünler de geç kurumaktadır (14). Örneğin, benzer koşullarda gerçekleştirilen iki çalışmada, bal kabağı şeker içeriği sebebiyle 13.3 saatte kururken (15), patlıcan örnekleri yaklaşık 8 saatte kurumuştur (16).

#### **GIDA KURUTMA YÖNTEMLERİ**

Gıda endüstrisinde en çok kullanılan kurutma yöntemleri güneşte kurutma, dondurarak kurutma, tepsili kurutma, döner kurutucular, tünel kurutucular, sprey kurutucular, akışkan yatak kurutucular, vakum kurutma, mikrodalga ile kurutma ve radyo frekans kurutmadır. Bu yöntemler kısaca özetlenmiştir.

Bilinen en eski kurutma yöntemi güneşte kurutmadır. Güneşte kurutmanın en büyük avantajı düşük maliyetli olması, dezavantajı ise, ürünlerin kurutulurken toprak, toz, yağmur, böcek ve diğer hayvanların etkisine maruz kalması ve kalitenin olumsuz yönde etkilenmesidir. Bu tür dezavantajlar nedeniyle, güneş enerjisinden yararlanılan kurutma sistemleri geliştirilmiştir. Meyve ve sebzelerin yanında hububat, baharat, çay ve kahvenin kurutulmasında tercih edilmektedir (17, 18). Dondurarak kurutma yönteminde, kurutulacak olan gıdadaki su, donmuş halde tutulurken, yüksek vakum uygulaması sırasında ısı verilmesi ile buzun sublimasyonu sağlanır. Bu işlem sırasında, ürünlerdeki bağlı suyun bir miktarı donmamış halde bulunur. En önemli avantajı, ürünlerin duyu özelliklerinin ve besin değerlerinin, diğer yöntemlerle kurutulmuş ürünlere göre daha üstün olmasıdır. Dezavantajı ise ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasıdır. Kahve ve çay esansları, hazır çorba, sebzeler, deniz ürünleri ve et ürünleri bu yöntemle kurutulabilirler (18, 19). Tepsili kurutucular, motor, fan ve tepsilerden oluşmaktadır. Bu tür kurutucularda, kurutulacak olan ürün, tepsi üzerine düzgün dağılımlı olarak serilir ve ürün kurumaya bırakılır. Tepsili kurutucuların dezavantajı, tepsiler üzerinde aynı kurutma hızının sağlanamamasıdır. Bu nedenle kurutma işlemi homojen olmamaktadır. Genellikle laboratuvar ölçekli çalışmalarda tercih edilmektedir (18). Döner kurutucular, dönen ve genellikle çıkışa doğru hafif eğimli olan boş bir silindir şeklindedir. Ürün girişi ile hava akımı zıt yönlüdür. Kurutulmuş üründe, sürtünme sonucu meydana gelen olumsuzluklar nedeniyle, bu yöntemin uygulandığı ürün sayısı çok fazla değildir. Genellikle, ıslak granül halindeki katıların ya da tohumların kurutulmasında kullanılırlar (10, 18). Tünel kurutucular, fan, ısıtıcı ve kurutulacak ürünlerin taşındığı araçlardan oluşmaktadır. Kurutulacak ürün, aralıklarla yerleştirilmiş tablaların üzerine yayılır ve tünel içerisinden geçirilir. Meyve ve sebze ürünlerinin, çoğunlukla da balık ürünlerinin kurutulmasında kullanılır (18). Sprey kurutucular, atomizer, büyük bir silindirik kurutma hücresi ve separatörden oluşur. Püskürtmeli kurutucu ile düzgün küresel şekilli, homojen boyutlu ürün elde edilebilmekte ve hızlı kurutma imkânı sağlanmaktadır. Fakat bu tür kurutucuların ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir ve diğer kurutuculara göre fiziksel olarak daha büyüktürler. Süt tozu ve kahve üretiminde

yaygın olarak kullanılırlar (18, 20). Akışkan yatak kurutucular, ürünün parçacıklar halinde güçlü bir hava akımı ile kurutulması esasına dayanır. Bezelye ve hindistancevizi gibi gıda ürünlerinin kurutulmasında kullanılırlar (18, 21). Vakum kurutma, düşük derecelerde gerçekleştiği, hem sıvı hem de katı parçacıklar halindeki ürünlerin kullanılabilirdiği bir yöntemdir. Kurutma oksijensiz ortamda olduğu için ürün kalitesi yüksektir. Fakat maliyeti çok yüksek olduğu için, genellikle sıcaklığa duyarlı ürünlerde kullanılırlar. Meyve, sebze ve püreler bu yöntem ile kurutulurlar (22). Mikrodalga sistemleri elektrik enerjisini mikrodalgaya dönüştüren magnetron, dalga yayıcı, dönebilen tabla ve fandan oluşmaktadır. (23). Mikrodalga kurutma, yüksek frekans dalgalarını gıdanın direkt olarak absorbe etmesi ve bu enerjiyi ısıya dönüştürmesi prensibine dayanmaktadır (24). Bu iki şekilde gerçekleşir; dipolar rotasyon ve iyonik yer değiştirme (25). Mikrodalga içerisinde kurutulacak olan ürünlerin mümkün olduğu kadar homojen olması, etli doku, sap, çekirdek ve aşırı sıvı içermemesi gerekmektedir (26). Mikrodalga fırının avantajı, materyalin daha çok ve homojen ısınmasını sağlamasıdır. En önemli dezavantajı ise, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Mikrodalga kurutma son dönemlerde yaygınlaşan cips sektöründe, oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur (23). Radyo frekans kurutma, 1-300 MHz frekansları arasında elektromanyetik alan uygulanarak yapılan işlemdir. Kurutulacak ürün iki elektrot arasına alınır ve bir elektrik alanına maruz bırakılır. (27). Dalga boyunun yüksek olması, nüfuz derinliğini arttırmaktır, bu da homojen kuru ürün eldesini sağlamaktadır. Sürenin kısa olması da önemli avantajlarından. (28). Dondurulmuş ürünlerin çözündürülmesinde, ambalajlı

ekmeklerin ısıtılmasında, sebzelerin haşlanması gibi durumlarda kullanılabilir (29).

### İNCE TABAKA KURUTMA MODELLERİ

İnce tabaka kurutma, genel anlamı ile örneklerin bir tabaka halinde kurutulmasıdır. İnce tabaka eşitlikleri son yıllarda birçok kurutma çalışmasında yer almıştır. Bunun nedeni, kullanım kolaylığı ve az veri gereksinimidir (6). İnce tabaka eşitlikleri teorik, yarı teorik ve ampirik modeller olarak sınıflandırılabilir. Her ne kadar teorik modeller tüm proses koşulları için kullanılabilir olsa da, pratik olmayışları sebebiyle gıdalarda yapılan kurutma çalışmalarında genellikle yarı teorik ve ampirik modeller tercih edilmektedir. Teorik modeller Fick'in ikinci yasasından türetilmektedir. Yarı-teorik modeller ise Fick yasasının yanı sıra Newton'un soğuma kanunundan da türetilmektedir. Yarı-teorik modellerin uygulanışları kolaydır ve deneysel verileri kullanmak için daha az varsayıma ihtiyaç vardır. Fakat, bu modeller sadece uygulanan proses koşulları için geçerlidir. Ampirik modeller yarı-teorik modellere yakın özelliktedir. Deneysel verilerine bağlıdır ve ürünlerin kurutma davranışları hakkında sınırlı bilgi verirler (7, 30). Kurutma çalışmalarında kullanılan ince tabaka modelleri genellikle yarı teorik ve ampirik modellerdir (Çizelge 1).

Bu modellerde "ANO" olarak ifade edilen terim, ayrılabilen nem oranıdır ve aşağıdaki formül ile hesaplanır (34). "a, b, n, k, g, h" model katsayıları, "t" ise süredir.

$$ANO = [(M - M_e)/(M_0 - M_e)] \quad (1)$$

Bu eşitlikte, M, ürünün belli bir t anındaki nem içeriği, M<sub>e</sub>, denge nem içeriği ve M<sub>0</sub>, ürünün başlangıç nem içeriğidir. M<sub>e</sub> değeri, diğer terimlerle

Çizelge 1 Gıda kurutma proseslerinde kullanılan matematiksel modeller

| Model   | Model Adı                        | Kaynak |
|---|----------------------------------|--------|
| $ANO = \exp(-kt)$                               | Newton                           | 31     |
| $ANO = \exp(-kt^n)$                             | Page                             | 32     |
| $ANO = \exp[(-kt)^n]$                           | Geliştirilmiş Page I             | 33     |
| $ANO = \exp[-(kt)^n]$                           | Geliştirilmiş Page II            | 34     |
| $ANO = a \exp(-kt)$                             | Henderson ve Pabis               | 15     |
| $ANO = a \exp(-kt) + c$                         | Logaritmik                       | 35     |
| $ANO = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$         | İki terimli                      | 36     |
| $ANO = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$          | İki terimli exponansiyel         | 37     |
| $ANO = 1 + at + bt^2$                           | Wang ve Sing                     | 38     |
| $ANO = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$          | Difüzyon yaklaşım                | 39     |
| $ANO = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$           | Verma ve ark.                    | 40     |
| $ANO = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ | Geliştirilmiş Henderson ve Pabis | 41     |
| $ANO = a \exp(-kt^n) + bt$                      | Midilli ve ark.                  | 42     |

karşılaştırıldığında çok küçüktür. Bu sebeple uzun kurutma süreleri için ANO aşağıdaki formülü ile hesaplanabilir.

$$ANO = (M/M_o) \quad (2)$$

Bu modellerdeki katsayılar, doğrusal olmayan regresyon analizi yapılarak belirlenir. Modellerden en uygun olanı belirlemek için bazı istatistiksel parametrelerin hesaplanması gerekir. Bunlar RMSE (tahmini standart hata), R<sup>2</sup> (determinasyon katsayısı) ve  $\chi^2$  (ki-kare) değerleridir. Bu parametreler aşağıdaki eşitlikler kullanılarak bulunmaktadır. Tahmini standart hata (RMSE), modelden elde edilen tahmini ve deneysel veri arasındaki sapmayı ve ki-kare ( $\chi^2$ ) uyumun iyilik derecesini göstermektedir. En uygun model seçilirken, RMSE ve ki-kare değerinin sıfıra, determinasyon katsayısının ise bire yakın olması göz önünde bulundurulur (43).

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ANO_{\text{tahmini}} - ANO_{\text{deneysel}})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \left[ \sum_{i=1}^N (ANO_{\text{deneysel}} - ANO_{\text{tahmini}})^2 \right] / (N - n) \quad (4)$$

Bu eşitliklerde, ANO<sub>tahmini</sub> modellerden elde edilen tahmini ayrılabilir nem oranı, ANO<sub>deneysel</sub> ise deneysel verilerden elde edilen ayrılabilir nem oranıdır. "N" deneysel veri sayısı ve "n" kullanılan modeldeki katsayı sayısıdır.

Modelleme ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, zeytin küspesi farklı sıcaklıklarda kurutulmuş (50, 60, 70, 80 ve 90 °C), kuruma eğrisi modellenmiştir. Deney verileri 6 farklı modele (Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Pabis, Geliştirilmiş Henderson ve Pabis, İki terimli,

Logaritmik) uygulanmış ve en iyi uyum sağlayan model Geliştirilmiş Henderson ve Pabis (R<sup>2</sup>=0.999,  $\chi^2$ =9.3034x10<sup>-5</sup>) olarak bulunmuştur (44). Diğer bir çalışmada, altın çilek 4 farklı sıcaklıkta kurutulmuş (60, 70, 80 ve 90 °C) ve deneysel veriler 11 farklı modele uygulanmıştır. R<sup>2</sup> ve  $\chi^2$  değerleri hesaplanarak en iyi uyum sağlayan model Midilli olarak bildirilmiştir (45). Soğan halkalarının güneşte, fırında ve mikrodalgada kurutulması ile yapılan bir çalışmada, deneysel veriler 8 farklı modele uygulanmıştır. Tüm koşullar için, Page, Geliştirilmiş Page ve Midilli modelleri en iyi uyumu göstermiştir (46). Antep fıstıklarının 500 W mikrodalga gücünde kurutulması ile ilgili çalışmada, deneysel veriler ile en iyi uyumun Page modeli ile sağlandığı belirtilmiştir (47). Mikrodalga ile 180-540 W güç aralığında kurutulan kırmızıbiberin deneysel verileri 7 modele uygulanmıştır. RMSE, R<sup>2</sup> ve  $\chi^2$  değerleri incelendiğinde, deneysel veriler ile Midilli modelinin uyumlu olduğu görülmüştür (48). Literatürde kullanılan modeller incelendiğinde gıdaların kurutma verilerine en iyi uyum sağlayanların yarı teorik modellerden Page ve Midilli olduğu saptanmıştır (Çizelge 2).

#### Difüzyon Katsayısı ve Aktivasyon Enerjisi

Gıdaların kurutulması sırasında gerçekleşen difüzyon karmaşık bir prosestir. Azalan hız periyodunda biyolojik ürünlerin kurutma karakteristikleri Fick'in difüzyon eşitliği kullanılarak tanımlanabilir (39, 57). Bu eşitlik, Crank (1975) tarafından (58) bazı varsayımlar kullanılarak aşağıdaki gibi çözülmüştür (Eşitlik 5). Bu çözüm yapılırken, nem transferinin sadece difüzyonla gerçekleştiği, ürünün büzülmediği, sıcaklık ve difüzyon katsayısının sabit olduğu ve kuruma süresinin uzun olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 2. Gıdalarda en iyi uyum sağlayan ince tabaka kurutma modelleri, Deff ve EA değerleri

| Gıda ürünü      | Kurutma yöntemi            | Belirlenen uygun model           | D <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> /s)             | E <sub>A</sub> (kJ/mol) | Kaynak |
|-----------------|----------------------------|----------------------------------|--|-------------------------|--------|
| Havuç           | Püskürtme-yataklı kurutucu | İki terimli                      | 2.58x10 <sup>-10</sup> -1.72x10 <sup>-9</sup>    | -                       | 49     |
| Patates         | Bantlı kurutucu            | Page                             | 3.17x10 <sup>-7</sup> -15.45x10 <sup>-7</sup>    | 39.49-42.34             | 50     |
| Kekik           | Güneşte kurutma            | Page ve Geliştirilmiş Page       | -  | -                       | 51     |
| Domates         | Tepsili Kurutucu           | Midilli ve ark.                  | -  | -                       | 52     |
| Hurma           | Tünel Kurutucu             | Midilli ve ark.                  | 7.05x10 <sup>-11</sup> -2.34x10 <sup>-10</sup>   | 43.26                   | 53     |
| Kişniş          | Mikrodalga Kurutma         | Midilli ve ark.                  | 6.3x10 <sup>-11</sup> -2.19x10 <sup>-10</sup>    | -                       | 54     |
| Şeftali         | Tünel Kurutucu             | Logaritmik                       | 6.6626x10 <sup>-10</sup> -1.135x10 <sup>-9</sup> | 42.53                   | 13     |
| Muz             | Tepsili Kurutucu           | Page                             | -  | -                       | 55     |
| Bal kabağı      | Tepsili kurutucu           | Logaritmik ve Verma ve ark.      | 3.88x10 <sup>-10</sup> -9.38x10 <sup>-10</sup>   | 78.93                   | 15     |
| Hintyağı tohumu | Akışkan Yataklı Kurutucu   | Difüzyon yaklaşımı               | 8.21x10 <sup>-10</sup> -2.61x10 <sup>-9</sup>    | 41.41                   | 56     |
| Zeytin küspesi  | Tepsili kurutucu           | Geliştirilmiş Henderson ve Pabis | 2.03x10 <sup>-9</sup> -1.17x10 <sup>-9</sup>     | 12.43                   | 44     |

$$ANO = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{[2n+1]^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

Burada;

ANO: Ayrılabilir nem oranı ( $M/M_0$ ), t: Kurutma süresi (s),  $D_{\text{eff}}$ : Efektif difüzyon katsayısı ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), L: Ürünün yarım dilim kalınlığı (m)'dir.

Uzun kuruma süreleri için bu formülde sadece serinin ilk terimi kullanılır ve logaritmik formda yazıldığında eşitlik (6) elde edilmektedir.

$$\ln ANO = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \quad (6)$$

ANO değerlerinin doğal logaritmik dönüşümleri zamana karşı grafiğe geçirilirse, elde edilen doğrunun eğimi kullanılarak  $D_{\text{eff}}$  değerleri eşitlik (7) ile hesaplanabilmektedir. Bu denklemde (Eşitlik 7) K, doğrunun eğimini göstermektedir (57).

$$K = \left[ \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \right] \quad (7)$$

Difüzyon katsayısının değişimi Arrhenius tipi üssel bir fonksiyonla açıklanabilmektedir. Eşitlik (8) kullanılarak aktivasyon enerjileri hesaplanabilmektedir. Bir prosesin aktivasyon enerjisinin yüksek olması, o prosesin sıcaklık değişimine daha duyarlı olduğunu göstermektedir (59).

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (8)$$

Bu denklemde;

$D_{\text{eff}}$ : Efektif difüzyon katsayısı ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $D_0$ : Sonsuz sıcaklıktaki difüzyon katsayısına eşdeğer sabit ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $E_A$ : Aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R: Evrensel gaz sabiti (kJ/mol.K), T: Kurutma hava sıcaklığıdır (K).

Yapılan çalışmalara bakıldığında, altın çileğin 4 farklı sıcaklıkta kurutulması sonucunda, efektif difüzyon katsayılarının  $4.67-14.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  aralığında değiştiği, aktivasyon enerjisinin ise  $38.78 \text{ kJ/mol}$  olarak hesaplandığı görülmüştür (45). Sarımsak dilimlerinin  $55, 65$  ve  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kurutulması ile efektif difüzyon katsayısının  $2.221-4.214 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  aralığında değiştiği ve aktivasyon enerjisinin  $30.582 \text{ kJ/mol}$  olarak hesaplandığı bildirilmiştir (60). Güneş, fırın ( $50$  ve  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ve mikrodalga ( $210$  ve  $700 \text{ W}$ ) olmak üzere 5 farklı koşulda kurutulmuş soğan dilimlerinin efektif difüzyon katsayıları sırasıyla,  $8.339 \times 10^{-10}$ ,  $7.468 \times 10^{-10}$ ,  $1.554 \times 10^{-9}$ ,  $4.009 \times 10^{-8}$  ve  $4.869 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

olarak hesaplanmıştır (46). Diğer bir çalışmada Sardalya balığı 4 farklı mikrodalga gücünde ( $200, 300, 400$  ve  $500 \text{ W}$ ) kurutulmuş ve efektif difüzyon katsayılarının  $7.158 \times 10^{-8}-3.408 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  aralığında değiştiği belirtilmiştir (61). Mikrodalga ile 7 farklı güçte ( $180-540 \text{ W}$ ) kurutulmuş kırmızıbiberin efektif difüzyon katsayıları  $8.315 \times 10^{-8}-2.363 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  aralığında değişmektedir. Aktivasyon enerjisi ise  $14.19 \text{ W/g}$  olarak hesaplanmıştır (48). Gıda kurutma üzerine yapılan bazı çalışmalarda hesaplanan  $D_{\text{eff}}$  ve  $E_A$  değerleri çizelge 2'de verilmiştir.

## SONUÇ

Kurutma, bir sıvı, katı ya da yarı-katı hammaddeyi nem düzeyi azaltılmış katı bir ürüne dönüştüren temel işlem olarak tanımlanabilir. Gıda endüstrisinde, güneş enerjili kurutma, dondurarak kurutma, tepsili kurutma, mikrodalga ile kurutma gibi çok sayıda farklı kurutma teknikleri kullanılmaktadır. Kurutma işlemi, sabit ve azalan kurutma hız periyotlarından oluşmaktadır. Ancak, gıdaların kurutulması sırasında sabit hız periyodu genellikle gözlenmemektedir. Kurutma hızı, kurutma süresi boyunca ürün kimyasal bileşimi, ürün boyutları, kurutma hava sıcaklığı ve hava hızı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Literatürde gıdaların kurutma verileri Newton, Page, Logaritmik, Wang ve Sing, Midilli ve ark. gibi yarı teorik ve ampirik modellerle açıklanmıştır. Bu modeller arasında Page ve Midilli'nin öne çıktığı gözlenmiştir. Ek olarak, kurutma ile ilgili modelleme çalışmaları incelendiğinde efektif difüzyon katsayısının ve aktivasyon enerjisinin sırasıyla  $10^{-7}-10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  ve  $10-80 \text{ kJ/mol}$  aralığında değiştiği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

1. Cemeroglu B, Özkan M. 2004. Kurutma teknolojisi, *Meyve Sebze İşleme Teknolojisi*, 2. Cilt, Cemeroglu B (baş editör), Bizim Büro Yayınevi, Ankara, Türkiye, s. 479-613.
2. Saldamlı İ, Saldamlı E. 2004. *Gıda Endüstrisi Makineleri*. Savas Yayınları, Ankara, Türkiye, 547 s.
3. Aytac G. 2008. T.C. Kurutulmuş Sebzeler. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı, İhracatı geliştirme etüt merkezi.
4. Kuru meyve üretim miktarları. <http://www.ihracat.info.tr/> (Erişim 01 Temmuz 2014).

5. Kuru et ürünleri üretim miktarı. <http://www.ukon.org.tr/> (Erişim 04 Temmuz 2014).
6. Özdemir M, Devres YO. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *J Food Eng*, 42, 225-233.
7. Fortes M, Okos MR. 1981. Non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer in corn kernels. *Trans. ASAE*, 22, 761-769.
8. Sarsılmaz C. 1998. *Güneş Enerjisi Destekli Kayısı Kurutma Sistemi*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 49-51 s.
9. Demirtaş C, Ayhan T, Kaygusuz K. 1998. Drying behaviour of hazelnuts. *J Sci Food Agric*, 76, 559-564.
10. Geankoplis CJ. 2011. *Taşınma Süreçleri ve Ayırma Süreci İlkeleri*, Yapıcı S (Çeviren), İzmir Güven Kitabevi, İzmir, Türkiye.
11. Hall CW, Kunze OR, Calderwood DL, Hall CW, Maddex RL, Shove GC, Davis DC. 1980. *Drying and storage of agricultural crops*. Washington State Univ, Pullman, WA 99164, 381 p, USA.
12. Roberts JS. 1999. *Understanding The Heat and Mass Transfer of Hygroscopic Porous Materials*, Doktora Tezi, The State University Of New Jersey, Food Science, New Brunswick, NJ, USA.
13. Zhu A, Shen X. 2014. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *Int J Heat and Mass Trans*, 72, 345-351.
14. Chen XD, Mujumdar AS. 2008. *Drying Technologies in Food Processing*. Blackwell Publishing, OX, UK.
15. Doymaz İ. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J Food Eng*, 79, 243-248.
16. Ertekin C, Yaldız O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J Food Eng*, 63, 349-359.
17. Doymaz İ, İsmail O. 2011. Drying Characteristics of sweet cherry, *Food Bioprod Process*, 89, 31-38.
18. Cemeroğlu B, Soyer A. 2004. Kurutma, *Gıda Mühendisliğinde Temel İşlemler*, Cemeroğlu B (baş editör), Bizim Grup Yayınevi, Ankara, Türkiye, s. 347-466.
19. Fissore D, Pisano R, Barresi AA. 2014. Applying quality-by-design to develop a coffee freeze-drying process. *J Food Eng*, 123, 179-187.
20. Kim EHJ, Chen XD, Pearce D. 2009. Surface composition of industrial spray-dried milkpowders. *J Food Eng*, 94, 169-181.
21. Madhiyanon T, Phila A, Soponronnarit S. 2009. Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. *Appl Therm Eng*, 29, 2849-2854.
22. Zielinska M, Zapotoczny P, Alves-Filho O, Eikevik TM, Blaszcak W. 2013. A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas. *J Food Eng*, 115, 347-356.
23. Karaaslan SN. 2008. *Sebze ve Endüstri Bitkilerinin Mikrodalgayla Kurutulması Üzerine Çalışmalar*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Adana, Türkiye, 195 s.
24. Li Z, Raghavan GSV, Wang N, Vigneault C. 2011. Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *J Food Eng*, 104, 234-238.
25. Sumnu G. 2001. A review on microwave baking of foods. *Int J Food Sci Technol*, 36, 117-127.
26. Tunçer İK. 1990. *Characterization And Drying of Vegetables By Hot Air And Microwave Energy*. In Proceedings of The 4th Int Congress On Mechanization And Energy In Agri, Adana, Turkey (In Turkish). 1-4 October 1990, 472-480.
27. Shinde A, Das S, Datta AK. 2013. Quality improvement of orthodox and CTC tea and performance enhancement by hybrid hot air-radio frequency (RF) dryer. *J Food Eng*, 116, 444-449.
28. Baysal AH, İçier F, Baysal T. 2011. *Güncel Elektriksel Isıtma Yöntemleri*. Sıdaş Yayınevi, Türkiye 348 s.
29. Zhu X, Guo W, Wu X, Wang S. 2012. Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio-frequency and microwave energy. *J Food Eng*, 113, 143-150.
30. Keey RB. 1972. *Introduction. In: Drying Principles and Practice*. Pergamon Press. Oxford, 1-18.
31. Bengston G, Rahman MS, Stanley R, Perera CO. 1998. *Effect Specific Pretreatment on the Drying Behaviour of Apple Rings*. New Zeland Inst Food Sci and New Zeland Conference, Nelson, 10 s.
32. Sarsavadiva P, Sawhney R, Pangavhane DR, Sing I. 1999. Drying Behaviour of Brined Onion Slices. *J Food Eng*, 40, 219-226.
33. Yaldız O, Ertekin C, Uzun Hİ. 2000. *Çekirdeksiz Üzümün İnce Tabaka Halinde Güneş Enerji İse Kurutulmasının Matematiksel Modellemesi Üzerinde Bir Araştırma*. 19. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi Bildiri Kitabı, Erzurum, 345-350 s.
34. Yaldız O, Ertekin C. 2001. Thin Layer Solar Drying of Some Vegetables. *Drying Technol*, 19, 583-597.

35. Doymaz İ. 2011. Drying of Eggplant Slices in Thin Layers at Different Air Temperatures. *J Food Process Preservation*, 35, 280-289.
36. Madamba PS, Driscoll RH, Buckle KA. 1996. Thin Layer Drying Characteristics of Garlic Slices. *J Food Eng*, 29, 75-97.
37. Sharaf-Eldeen YI, Blaisdell JL, Hamdy MY. 1980. A model for Ear Corn. *Drying Technol ASAE*, 23, 1261-1271.
38. Wang CY, Sing RP. 1978. *A Single Layer Drying Equation for Rough Rice*. Am. Soc. Agr. Eng. St. Joseph, MI, 78, 3001.
39. Sacilik K, Keskin R, Elicin AK. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *J Food Eng*, 73, 231-238.
40. Verma LR, Bucklin JB, Endan F, Wratten T. 1985. Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models. *Technol ASAE*, 28, 296-301.
41. Karathanos VT. 1999. Determination of Water Content of Dried Fruits by Drying Kinetics. *J Food Eng*, 39, 337-344.
42. Midilli A, Kùçùk H, Yapar Z. 2002. A New Model for Single-Layer Drying. *Drying Technol*, 20, 1503-1513.
43. Pangavhane DR, Sawhney PN, Sarsavadia PN. 1999. Effect of Various Dipping Pretreatments on Drying Kinetics of Thompson Seedless Grapes. *J Food Eng*, 39, 211-216.
44. Vega-Galvez A, Miranda M, Diaz LP, Lopez L, Rodriguez K, Di-Scala K. 2010. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresour Technol*, 101, 7265-7270.
45. Vega-Galvez A, Puente-Diaz L, Lemus-Mondaca R, Miranda M, Torres MJ. 2012. Mathematical Modelling of Thin-layer Drying Kinetics of Cape Gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *J Food Process Preservation*, 38, 728-736.
46. Arslan D, Özcan MM. 2010. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT- Food Sci Technol*, 43, 1121-1127.
47. Kouchakzadeh A, Shafeei S. 2010. Modelling of microwave-convective drying of pistachios. *Energy Conver Manag*, 51, 2012-2015.
48. Darvishi H, Rezaeiasl A, Asghari A, Azadbakht M, Najafi G, Khodaei J. 2014. Study of the drying kinetics of pepper. *J Saudi Soc Agri Sci*, 13, 130-138.
49. Zielinska M, Markowski M. 2010. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chem Eng Process: Process Intensification*, 49, 212-218.
50. Aghbashlo M, Kianmehr MH, Arabhosseini A. 2009. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Conver Manag*, 50, 1348-1355.
51. El-Sebaai AA, Shalaby SM. 2013. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Conver Manag*, 74, 109-116.
52. Taheri-Garavand A, Rafiee A, Keyhani A. 2011. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions. *Int Trans J Eng, Manag& Appl Sci&Technol*, 2, 147-160.
53. Doymaz İ. 2012. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). *Energy Conver Manag*, 56, 199-205.
54. Sarimeseli A. 2011. Microwave drying characteristics of coriander leaves. *Energy Conver Manag*, 52, 1449-1453.
55. Silva WP, Silva CMDPS, Gama FJA, Gomes JP. 2014. Math. models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *J Saudi Soc Agri Sci*, 13, 67-74.
56. Perea-Flores MJ, Garibay-Febles V, Chanona-Perez JJ, Calderon-Dominguez G, Mendez-Mendez JV, Palacios-Gonzalez E, Gutierrez-Lopez GF. 2012. Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Ind Crops Prod*, 38, 64-71.
57. Liu X, Qiu Z, Wang L, Cheng Y, Qu H, Chen Y. 2009. Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of *Panax notoginseng* extract. *Energy Conver Manag*, 50, 928-932.
58. Crank J. 1975. *The mathematics of diffusion*. Oxford University Press, OX, UK.
59. Aghbashlo M, Kianmehr MH, Beygi SRH. 2010. Drying and Rehydration Characteristics of Sour Cherry (*Prunus Cerasus* L.). *J Food Process Preservation*, 34, 351-365.
60. Demiray E, Tùlek Y. 2014. Drying characteristics of garlic (*Allium sativum* L) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Trans*, 50, 779-786.
61. Darvishi H, Azadbakht M, Rezaeiasl A, Farhang A. 2013. Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *J Saudi Soc Agri Sci*, 12, 121-127.