

Freeze-Drying Kinetics Modeling of Banana

Dondurularak Kurutulan Muzun Kinetik Modeli

Bahadır Acar^{1*}, Abdullah Dağdeviren¹⁺ and Mehmet Özkaymak¹

¹Enerji Sistemleri Mühendisliği/Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük

*Sorumlu Yazar: acar@karabuk.edu.tr

+Sunucu: abdullahdagdeviren@karabuk.edu.tr

Sunum/Bildiri Türü: Sözlü/Tam Paper

Abstract – In this study, freeze drying (FD) technology, which is used commonly to preserve the beneficial aromas of the products by prolonging the shelf life and therefore shown as the healthiest drying method. Bananas were used as the dried product that consumes a lot among the fruits and has a high human health benefit as it is a fruit rich in fiber and potassium content. Firstly, sliced banana fruit was freeze dried and the kinetic models are development according to the weight loss. The freeze drying process was took along the 14 hours and the weight of the banana, about 100 gr, was measured per 2 hours and calculated the moisture ratios. According to the experimental results, total 8 kinetic drying models are performed via Matlab software. As a result, the lowest khi square (X²) and expected standard failure (RMSE) were calculated as 241x10⁻⁶ and 155x10⁻⁴ respectively. In addition, the correlation value (R²) was about 0.9982 as well. Within the 8 kinetic models, the Page model is given the best results.

Keywords – Freeze-drying, Drying kinetic, Drying of banana, Page model

Özet –Yapılan bu çalışmada son yıllarda kullanılan, ürünlerin raf ömrünü uzatarak içerdiği faydalı aromaları koruyan ve bundan dolayı en sağlıklı kurutma yöntemi olarak gösterilen dondurarak kurutma (FD) teknolojisi kullanılmıştır. Kurutulan ürün olarak, meyveler arasında çok fazla tüketilen ve içerdiği lif ve potasyum miktarı olarak zengin bir meyve olduğundan dolayı insan sağlığı açısından faydaları oldukça fazla olan muz kullanılmıştır. Çalışmada 5 mm kalınlığında dilimler halinde kesilen muz dondurarak kurutma cihazına yerleştirilerek kurutma işlemi başlatılmış ve kurutma esnasında ağırlık kayıpları kaydedilerek kinetik modelleri oluşturulmuştur. Toplam 14 saat süren deneyde 100 gr. olan muzun her iki saatte bir ağırlıkları ölçülmüş ve MR (Nem oranları) hesaplanmıştır. Deneysel veriler ışığında Matlab Programı kullanılarak toplam 8 kinetik kurutma modeli üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en düşük khi-kare (X²) ve tahmini standart hata (RMSE) değerleri sırasıyla 241x10⁻⁶ ve 155x10⁻⁴ olarak bulunmuş bunun yanı sıra bire yakın olacak şekilde artış gösteren Korelasyon değeri (R²) ise 0.9982 olarak hesaplanmıştır. Toplam 8 modelden bu sonuçları veren en iyi model Page modeli olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Dondurarak kurutma, Kurutma kinetiği, Muzun kurutulması, Page modeli

I. GİRİŞ

Meyve ve sebzeler çoğunlukla su, vitamin, karbonhidrat, protein ve lipitlerden oluşur. Bunlardan dolayı fonksiyonel özellikleri temel olarak antioksidan kapasitelerine bağlı olan birçok mikro besin ve biyoaktif bileşik kaynağıdır[1]. Meyveler, sebzeler ve fonksiyonel gıdalar gibi ısıya duyarlı biyomalzemelerin kurutulması, termal ayrışma, oksidasyon veya enzimatik esmerleşmeden dolayı zaman içerisinde ürünlerde bozulmalar meydana gelir. Bu tür bozulmaları ve deformasyonu önlemek bununla birlikte kurutma sonucunda ürünün raf ömrünü uzatmak için özel kurutma teknikleri gerekmektedir. Doku, renk ve aroma, gıda ürünlerinin tüketici tarafından kabul edilebilirliğini etkileyen gıdaların temel kalite özellikleridir[2]. Kurutma esnasında bu tür yapısal özellikler kurutulmuş ürünlerdeki su içeriğine bağlı olarak kaybolabilir veya değişebilir. Meyve ürünlerinin kurutma sonucunda kalitesini arttırmak için birçok

yaklaşımında bulunulmuştur. Bu yöntemlerden biriside gıdaların vakum altında kurutulmasını sağlayan dondurarak kurutma teknolojisidir[1].

Dondurarak kurutma teknolojisinde ilk önce gıda dondurulur. Ardından kimyasal nem alıcı veya düşük sıcaklık yoğunlaştırıcusu ile bağlantılı yüksek vakum uygulanan hacme alınır. Dondurulan gıdaya iletim ile ısı geçişi sağlanır. Bu esnada katı fazındaki su buharlaşarak (süblimleşme) kurutma işlemi gerçekleşmektedir[3]. Dondurarak kurutma teknolojisi özellikle hazır kahve üretiminde kullanılmakta olup, kahve aromasını en iyi koruyan gıda teknolojisi olarak bilinmektedir. Ayrıca dondurarak kurutma eczacılıkta kullanılan ürünler, serumlar, ilaç sanayi, bakteri kültürleri, meyve, meyve suları, sebze ve çay özlerinin elde edilmesinde, et ve süt kurutulması gibi birçok alanda kullanılmaktadır[4,5].

Dondurarak kurutma pahalı bir işlemdir, ısıya duyarlı materyaller için uygundur. Dondurarak kurutma ile diğer kurutma yöntemlerine göre daha kaliteli kurutulmuş ürün elde edilir. Ürünün raf ömrünün uzaması, ağırlığının azalması, depolama alanından tasarruf ve soğutma gibi ek muhafaza işlemlerine ihtiyaç duyulmaması dondurarak kurutmanın avantajlarından biridir[6]. Meyvelerin dondurarak kurutulması üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Kırmacı ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada 5 mm ve 7 mm kalınlığında kesilmiş çileklerin dondurarak kurutulmuş ve kurutma süresince ağırlık kayıplarını alarak (MR) nem oranlarını hesaplamıştır. Çalışma sonunda tahmini standart hata (RMSE) ve korelasyon değerlerine göre en uygun kinetik kurutma modelini belirlemiştir[2]. Acar ve arkadaşlarının değerli bir baharat olan safran bitkisini dondurarak ve geleneksel yöntemle kurutma işlemi gerçekleştirmiştir. Daha sonra her iki kurutma yöntemi sonrası ürünlerin içerdiği kimyasal bileşenleri inceleyerek dondurarak kurutma sonucunda çıkan ürünün daha kaliteli sonuç verdiğini belirtmişlerdir[7]. Wang ve arkadaşları muz püresini, vakumlu bantta kurutma (VBD), dondurarak kurutma (FD) ve havada kurutma (AD) olarak üç farklı kurutma yöntemi kullanarak muz tozu elde etmişlerdir. Bu üç kurutma sonunda kurutulmuş muz tozundan katı faz mikro-ayırma (SPME) ile ayırtmış ve gaz kromatografi-kütle spektrometresi (GC-MS) ile tanımlama yapmışlardır. Ana uçucuların katkısını değerlendirmek için SAS (istatistiksel analiz sistemi) kullanmışlardır. İstatistiksel analize dayanarak, optimum aroma ile muz tozu üretmek için tercih edilen yöntemin FD, ardından VBD ve daha sonra AD olduğu sonucuna varmışlardır[4].

Jasim ve arkadaşları yine muz tozunu dondurarak kurutma (FD) ve sıcak hava tepsisinde kurutma (TD) olmak üzere iki farklı yöntemle kurutma gerçekleştirmiş ve elde edilen her iki muz tozu kalitesi, fizikokimyasal, fonksiyonel, yapısal, dielektrik ve reolojik ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Toz örneklerinin yapısal ve reolojik özellikleri taramalı elektron mikroskopu, X-Ray Difraktometre, reometre ve visko-amilograf kullanılarak incelenmiştir. Hem TD hem de FD, muz tozu parçacık boyutunu, rengini, nişastasını, dirençli nişastayı ve su tutma özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini görmüşlerdir[8]. Apinya ve arkadaşları 2019 da yapmış olduğu çalışmada, atıştırılabilir muz çipsleri için kızıl ötesi destekli dondurarak kurutma (IRAFD) gerçekleştirerek kurutma kinetiğini ve enerji tüketimini incelemişlerdir. Kızıl ötesi destekli dondurarak kurutma IRAFD, dondurarak kurutmaya kıyasla kuruma süresini 213 dakikaya kadar önemli ölçüde azaltabildiği ve % 70'den fazla zaman tasarrufu sağlayabildiğini görmüşlerdir. IRAFD çalışmadaki kurutma kinetiği ve difüzyon modelleri kullanılarak tahmini kurutma modeli tespit etmişlerdir[5]. Mikrodalga dondurarak kurutulmuş (MFD) ve dondurarak kurutulmuş (FD) muz çipslerinin farklı aşamalarında fiziko-kimyasal değişimleri gözlemleyen Hao ve arkadaşları, Mikrodalga dondurularak kurutma (MFD) normal olarak üç aşama içerir, ön donma aşaması, birincil kurutma aşaması ve ikincil kurutma aşamasıdır. Yapmış oldukları bu çalışmada mikrodalgalı dondurarak kurutmanın muz çipslerinin birincil aşamalarında yapı, nişasta içeriği, şeker içeriğini azaltma, renk değişiminin yanı sıra genleşme oranındaki değişiklikleri incelemişler.

Sonuç olarak, muz dilimlerinin nişasta içeriğindeki birincil kurutma aşamasında en büyük değişikliklerin, düşük şeker içeriği, yapıları ve değişen renklerinde, genleşme oranındaki en büyük değişimin ikincil kurutma aşamasında gerçekleştiğini görmüşler. FD örnekleri için de benzer sonuçlar elde edilebildiğini ve bu nedenle, birincil aşamanın muz çipslerine en fazla zarar verebileceği sonucuna varmışlardır[6]. Yine başka bir çalışmada Moraga ve arkadaşları, Dondurarak kurutulmuş elma ve muz dilimlerinin mekanik ve optik özellikleri üzerine gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma, dondurulmuş muz ve elma dilimlerinin dokusal ve optik özelliklerinde önemli değişiklikleri tanımlayan su içeriği ve su aktivitesi değerleri, her iki üründe cam geçişine neden olan kritik su içeriği ve su aktivitesi ile ilgilidir. Elde edilen sonuçlardan, hem yaklaşımların, hem de cam geçişinin ve su aktivitesinin, mekanik özelliklerde değişiklikleri önlediği görmüş, ancak meyvelerde meydana gelen esmerleşme reaksiyonlarını kontrol etmek için sadece su aktivitesi miktarının gerekli olduğu sonucuna varmışlardır[1].

Yapmış olduğumuz çalışmada dondurularak kurutulacak meyve olarak muz tercih edilmiştir. Muz, birçok ülkede yetişen, yüksek şekere sahip önemli tropikal bir meyvedir ve bozulmaya karşı çok hassastır. Gıda muhafazalarında kullanılan en eski yöntem olan geleneksel sıcak havayla kurutma, muzları kurutmak için yaygın olarak uygulanmıştır. Muzlardaki yüksek şeker içeriği nedeniyle, onları kurutmak normalde yüksek sıcaklıklar ve uzun süreli kuruma süreleri gerektirir, bu da kurutma sonrası ürünlerin lezzet, renk, doku ve besinlerine ciddi olumsuz değişikliklere neden olabilir [9]. Geleneksel sıcak hava kurumasının en büyük dezavantajları, düşük kalitede ürün ve uzun kurutma süreleridir[10]. Bu nedenle yapılan çalışmada, muz dondurarak kurutup, elde ettiğimiz ağırlık kayıpları ile dondurarak kurutulmuş muzun en uygun kinetik kurutma modeli belirlenmeye çalışılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmada kullanılan muz 100 gr. olacak şekilde 5 mm lik dilimler halinde kesilerek kaplara yerleştirilmiştir. Şekil 1. de görüldüğü gibi toplam 7 adet hazırlanan dilimlenmiş muz numuneleri bir gün önceden derin dondurucuya konularak bekletilmiş ve ertesi gün deneylere başlanmıştır.



Şekil 1. Hazırlanan 7 adet muz numuneleri

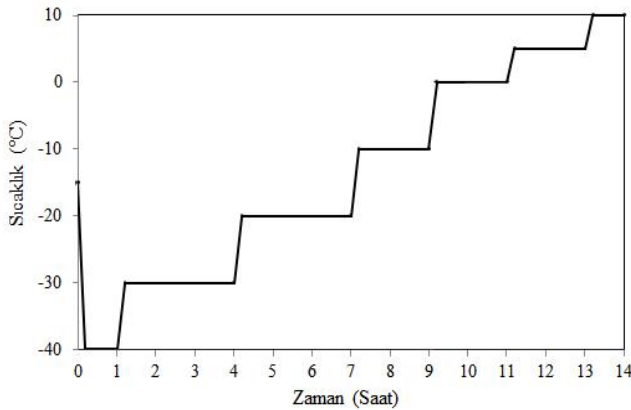
Çalışmalarımızda kullanılan dondurarak kurutma cihazı, Labogene markasının Scanvac Coolsafe tip cihazıdır. -55 °C ye kadar düşen evaporatör sıcaklığı ile ürünleri dondurma işlemi, cihaz içerisinde gerçekleşmektedir. 4×10^{-4} mbar

vakum gücüne sahip vakum pompasına bağlı olan cihaz ile çalışmamızda ihtiyaç duyulan basınç, 0.01 kPa basınca kadar düşürerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında numunenin görünümü Şekil 2. de gösterilmektedir.



Şekil 2. Muz numunesinin cihaz içerisinde görünümü

Cihaz çalıştırılmadan önce cihazın üzerinde bulunan kontrol paneline, yapılacak çalışma için uygun görülen basınç, sıcaklık ve çalışma süreleri girilerek gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Numuneleri dondurarak kurutma süresi 14 saat olarak ayarlanmıştır. Zaman ve sıcaklık çizelgesi Şekil 3. de görüldüğü gibi düzenlenmiştir. Planlanan sisteme göre $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ de derin dondurucudan çıkartılan muz cihaza yerleştirilerek ilk 60 dk. $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ de ve 0.01 kPa basınçta ayarlanır ve daha sonra basınç sabit tutularak sırasıyla $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 180 dk., $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 180 dk., $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 120 dk., $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 120 dk., $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 120 dk. ve son olarak $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 60 dk. işlem gördükten sonra toplam 14 saatin sonun da dondurarak kurutma işlemi gerçekleştirilmiş olur.



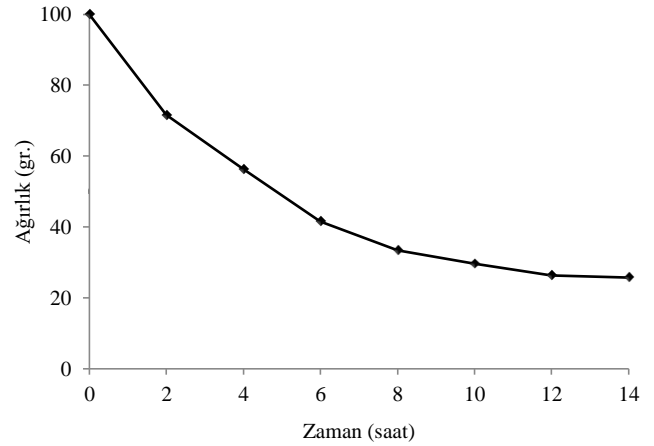
Şekil 3. Sıcaklık ve zaman grafiği

Çalışmada 7 farklı numune hazırlanmasının sebebi her iki saatte bir ağırlık kayıplarını ölçebilmektir. Bunun için ilk

numuneyi cihaza yerleştirdikten sonra cihazı çalıştırıp, 2 saat sonra numuneyi çıkarıp 0.001 gr. hassasiyete sahip olan hassas terazide tartılarak 2 saat sonunda numunenin ağırlık kaybı ölçülmüş olur. İkinci numune cihaza alınarak aynı kurutma ayarlarına bağlı olarak cihaz çalıştırılır ve bu sefer 4 saat sonunda numune cihazdan alınarak 4. saat sonundaki ağırlık kayıpları hesaplanmış olur.

Bu işlem diğer muz numuneleri içinde uygulanarak 6., 8., 10., 12. ve en son 14. saat sonunda numune alınır ve daha sonra etüve yerleştirilerek yaklaşık 60 dk. bekletilir. Etüv'den alınan numune içerisinde bol miktarda silikajel bulunan bombeli camdan yapılmış olan desikatöre konularak yaklaşık 15 dk. bekletilir. 15dk. sonunda desikatörden alınan muz hassas terazide tartılır ve sonuç kaydedilir. Bu işlemin amacı dondurarak kurutma sonunda üründe kalan herhangi bir nem var ise o nemi mümkün olduğunca üründen uzaklaştırıp ürünün nem oranını daha sağlıklı bir şekilde hesaplayabilmektir.

Etüv ve desikatörle yapılan nem miktarı tayini neticesinde 100 gr olan ürün 77.614 gr nem içerdiği, 22.386 gr ise ürünün kuru olan kısmı olduğu belirlenmiştir. Daha sonra yapılacak hesaplamalarda denge nemi olarak istenilen, ürünün 22,386 gr olan kuru kısmıdır. Şekil 4. te dondurarak kurutma sonucunda her iki saat'te bir alınan muz numunelerinin ağırlık kaybı eğrisi verilmektedir.



Şekil 4. Ürünün zaman göre ağırlık kaybı.

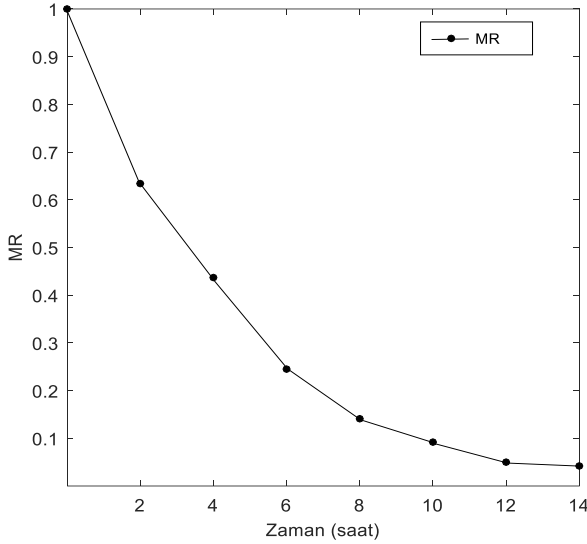
Teorik modeller her türlü madde ve koşul için uygulanabilmektedir. Ancak çözümü için gereken eşitliklerin birçok parametre ve karmaşık yapı içermesi bu tür modellerin kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Yarı teorik modeller daha az karmaşık olmakla birlikte içerdikleri parametrelerin yalnızca ele alınan ürünlerle ilgili olması, kullanımını kısıtlamaktadır.

DeneySEL yollarla elde edilen verilere dayanarak kuruma hızının belirlenmesinde, karmaşık matematiksel eşitlikler yoktur. Ancak elde edilen eşitlikler işlem yapılan numune ve deney koşulları için geçerli olmaktadır. Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulunan eşitlik "logaritmik kurutma" denklemi olarak bilinmektedir[11].

Boyutsuz bir terim olan nem oranının (MR) zamanla (t) değişimi Eşitlik 1'de verilen denklemle belirlenebilir.

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

Eşitlikte (M_0) başlangıç nemini, (M_t) t anındaki nemi, (M_d) ise denge nemini ifade etmektedir. Eşitliğin sol tarafında yer alan kısım, kurutmanın farklı t anlarındaki nem oranı (MR) değerlerini vermektedir. Şekil 5. te muz numunesinin 14 saatlik dondurarak kurutma sonucunda elde edilen deneysel nem oranı grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5. Muz numunesinin zamana göre nem oranı

Ürünlerin nem miktarı belirlenip, zaman bağlı ağırlık kayıpları da kaydedildikten sonra matematiksel modellere bağlı grafiği oluşturulup, uygulanan 8 farklı kurutma kinetik modelinden en uygununun belirlenmesi sağlanmıştır. Bu işlemler gerçekleştirmek için MATLAB programı kullanılmıştır. Tablo 1'de MATLAB programında kullanılmak üzere tahmini nem oranını (MR) gösteren toplam 8 farklı kurutma kinetik modeli verilmiştir[12].

Tablo 1. Kurutma kinetik modelleri

Model No	Model Adı	Model
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Geliştirilmiş Page I	$MR = \exp[-(kt)^n]$
4	Henderson ve Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
5	Logaritmik	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$
6	İki terimli- eksponansiyel	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
7	Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Difüzyon Yaklaşım	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$

Deneysel olarak bulunan ve modeller ile tahmin edilen nem oranı değerleri arasındaki uyumu istatistiksel olarak açıklamak amacıyla tahminin standart hatası (RMSE), khi-kare (X^2) değerleri ile modelin modelleme yeterliliği (R^2) Eşitlik 2., Eşitlik 3. ve Eşitlik 4.'te verilen denklemler yardımıyla bulunabilir[13,14].

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

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{deneysel} - MR_{tahmini})^2}{N - z} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum (MR_{deneysel} - MR_{tahmini})^2}{\sum (MR_{tahmini})^2} \right] \quad (4)$$

Eşitlik 2. de gösterilen tahmini standart hata (RMSE), model ile elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerler arasındaki sapmayı göstermektedir. Ayrıca Eşitlik 3'te khi-kare (X^2) değerinin azalması ile uyumun arttığı belirtilmektedir. Bunlarla birlikte deneysel verileri açıklayan modelin Eşitlik 4.'te modelleme yeterliliği (R^2) değerinin bire yakın olması modelin kullanılabilirliğinin bir göstergesidir. İstatistiksel olarak yapılan değerlendirme sonuçlarına göre en uygun modelde bulunan katsayılar çoklu regresyon yöntemi ile belirlenir.

III. SONUÇLAR

Elde edilen veriler ışığında toplam 8 model üzerinde uygulama yapılmış ve bu 8 farklı modelden en uygun kurutma modeli belirlenmiştir. Bu belirleme kriterleri modellerden elde edilen R^2 , X^2 ve RMSE bağlıdır.

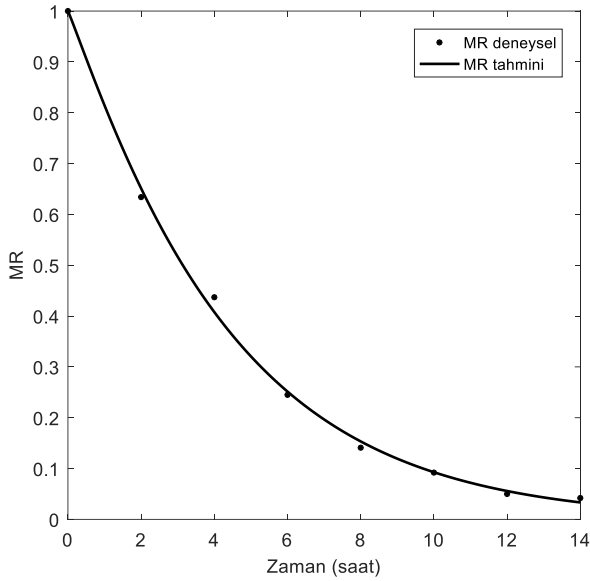
Tablo 2. Kurutma kinetiği için kullanılan modellerden elde edilen sonuçlar.

Model	Model Sabiti	R^2	X^2	RMSE
Newton	k: 0.2285	0.9974	0.000296	0.01722
Page	k: 0.2053 n: 1.064	0.9982	0.000241	0.01553
Geliştirilmiş Page I	k: 0.2329 n: 1.029	0.9976	0.000328	0.01811
Henderson ve Pabis	a: 1.007 k: 0.2299	0.9975	0.000338	0.01837
Logaritmik	a: 1.024 c: -0.02206	0.998	0.0003182	0.01785
İki terimli eksponansiyel	k: 0.2169 a: 0.002964	0.9974	0.0003539	0.01881
Wang ve Sing	k: 76.88 a: -0.1664 b: 0.007116	0.9911	0.0012042	0.0347
Difüzyon	a: 0.9685 b: 0.9609 k: 0.229	0.9974	0.0004154	0.02038

Tablo 2. de 8 modelin vermiş olduğu R^2 , X^2 ve RMSE değerleri görülmektedir. Burada 1'e en çok yaklaşan 0.9982 gibi bir R^2 değeri ve 0'a en yakın 0.000241 X^2 değeri ile Page modeli en uygun kurutma modeli olarak görülmektedir. Tahmini standart hata (RMSE) değerinin 0.01553 gibi 0'a yakın bir değer çıkması Page modelinin uygunluğunu destekleyen diğer bir faktördür.

Elde edilen sonuçlar neticesinde, 5 mm kalınlığında 100gr olarak hazırlanan muz numunesinin dondurarak kurutulması

sonucunda ağırlık kaybını gösteren en iyi modelin page modeli olduğu görülmüştür. Şekil 6. da page modelinin deneysel nem oranına göre oluşturduğu eğri gösterilmektedir.



Şekil 6. Page modelinin deneysel verilere ışında zamana göre eğrisi

SEMBOLLER

- MR : Nem oranı
 M_0 : Başlangıç nem oranı
 M_t : T anındaki nem oranı
 M_d : Denge nemi
 RMSE : Tahmini standart hata
 X^2 : Khi-kare
 R^2 : Modelleme yeterliliği
 $MR_{den.}$: Deneysel verilerle belirlenen nem oranı
 $MR_{tah.}$: Tahmini nem oranı
 N : Deneysel veri sayısı
 z : Kullanılan modeldeki katsayı sayısı
 k : Model sabiti
 n : Model sabiti
 a, b, c : Model sabiti

KAYNAKLAR

- [1] G. Moraga, P. Talens, M.J. Moraga ve N. Martinez, "Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 106, pp. 212-219, May 2011.
- [2] V. Kirmaci, H. Usta ve T. Memlik, "An Experimental Study on Freeze-Drying Behavior of Strawberries," *Drying Technology*, vol. 26, pp. 1570-1576, 2008.
- [3] V. Zaichick ve S. Zaichick, "A search for losses of chemical elements during freeze-drying of biological materials," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 218, pp. 249-253, 1997.
- [4] J. Wang, Y. Z. Li, R. R. Chen, J. Y. Bao ve G. M. Yang, "Comparison of volatiles of banana powder dehydrated by vacuum belt drying, freeze-drying and air-drying," *Food Chemistry*, vol. 104, pp. 1516-1521, 2007.
- [5] A. Khampakool, S. Soisungwan ve S. H. Park, "Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture," *Food Science and Technology*, vol. 99, pp. 355-363, 2019.
- [6] H. Jiang, M. Zhang, ve A. S. Mujumdar, "Physico-chemical changes during different stages of MFD/FD banana chips," *Journal of Food Engineering*, vol. 101, pp. 140-145, 2010.
- [7] B. Acar, H. Sadikoglu, ve I. Doymaz, "Freeze-Drying Kinetics And Diffusion Modeling Of Saffron (*Crocus Sativus* L.)," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 39, pp. 142-149, 2015.

- [8] J. Ahmed, L. Thomas ve R. Khashawi, "Influence of hot-air drying and freeze-drying on functional, rheological, structural and dielectric properties of green banana flour and dispersions," *Food Hydrocolloids*, vol. 99, 105331, 2020.
- [9] M. Maskan, "Microwave/air and microwave finish drying of banana," *Journal of Food Engineering*, vol. 44, pp. 71-78, 2000.
- [10] Z. Pan, C. Shih, T. H. McHugh ve E. Hirschberg, "Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying," *Food Science and Technology*, vol. 41 pp. 1944-1951, 2008.
- [11] H. Sadikoglu, A.I. Liapis ve O.K. Crosser, "Optimal control of the primary and secondary drying stages of bulk solution freeze drying in trays," *Drying Technology*, vol. 16, pp. 399-431, 2007
- [12] H.O. Menges ve C. Ertekin, "Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples," *Journal of Food Engineering*, vol. 77 pp. 119-125, 2006.
- [13] A.v. Gálvez, M. Miranda, C. Bilbao-Sáinz, E. Uribe, ve R. Lemusmondaca, "Empirical modeling of drying process for apple (Cv. Granny Smith) slices at different air temperatures," *Journal of Food Processing Preservation*, vol. 32, pp. 972-986, 2008.
- [14] K. Rayaguru, W. Routray, ve S.N. Mohanty, "Mathematical modelling and quality parameters of air-dried betel leaf (*Piper betle* L.)," *Journal of Food Processing Preservation*, vol. 35, pp. 394-401, 2011.