

Fındığın dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutma davranışının deneysel incelenmesi ve matematiksel modellenmesi

Abdullah ÇIRAK¹, Haydar KÜÇÜK², Adnan MİDİLLİ³

¹TORSAN Makina, Engindere Mahallesi, Selçuklu Sokak, No:18, Merkez, Rize, Türkiye.

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, 61380, Trabzon, Türkiye.

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşsuyu Yerleşkesi, 34437, İstanbul, Türkiye.

Özet: Bu çalışmada, kabuklu fındıkların dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutma davranışı deneysel olarak araştırılmış ve matematiksel modellemesi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, 100 g kabuklu fındık için 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W kızılötesi ışınım güç değerlerinde yapılmış ve zamana bağlı olarak kütle kayıpları ölçülmüştür. Boyutsuz kütle oranı, nem içeriği ve kurutma hızı gibi kurutma karakteristikleri zamana ve kütle kaybına bağlı olarak hesaplanmıştır. Kabuklu fındıkların, dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi kurutucudaki kurutma eğri denklemini belirlemek için literatürde sunulan 24 adet ince tabaka kurutma denklemi dikkate alınmıştır. En iyi modeli belirlemek için 7 farklı model uygunluk parametresi kullanılmıştır. Sonuç olarak, en iyi kurutma modelleri 250 W ve 500 W için sırasıyla Alibaş; Balbay ve Şahin; 750 W ve 1000 W için ise Geliştirilmiş Midilli-Kucuk olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, kurutma zamanı dikkate alınarak, kabuklu fındığın kurutulması için dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutma yönteminde ideal kızılötesi ışınım güç değerlerinin 1000 W olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kabuklu fındık, kızılötesi ışınımlı kurutma, akışkan yataklı kurutma, dönmeli akışlı kurutma, matematiksel modelleme

Experimental investigation and mathematical modeling of swirling flow fluidized bed infrared drying behavior of hazelnut

Abstract: In this study, swirling flow fluidized bed infrared drying behavior of shelled hazelnuts was experimentally investigated, and mathematical modeling was performed. Drying experiments were carried out at 250 W, 500 W, 750 W and 1000 W infrared power values for 100 g shelled hazelnut, and mass losses were measured depending on drying time. Drying characteristics such as dimensionless mass ratio, moisture content and drying rate were calculated based on time and mass loss. Mathematical modeling was performed to determine the thin layer drying behavior of shelled hazelnuts in swirling flow fluidized bed infrared dryer by using 24 thin layer drying equations in the literature. 7 different evaluation criteria were used to determine the best model. As a result, the best drying models were found to be Alibaş, and Balbay and Şahin for 250 W and 500 W, respectively, and Improved Midilli-Kucuk for 750 W and 1000 W. In addition, considering the drying time, it was found that the most appropriate infrared power value was 1000 W for drying of shelled hazelnut in swirling flow fluidized bed infrared drying method.

Keywords: Shelled hazelnut, infrared drying, fluidized bed drying, swirling flow drying, mathematical modeling

Araştırma Makalesi

Yazışma yazarı: Haydar Küçük E-mail: haydarkucuk@ktu.edu.tr

Referans: Çirak, A., Küçük, H., & Midilli, A. (2024). Fındığın dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutma davranışının deneysel incelenmesi ve matematiksel modellenmesi, *ITU Journal of Food Science and Technology*, 2(1), 19-28.

Makale Gönderimi: 7 Şubat 2024

Online Kabul: 8 Mart 2024

Online Basım: 31 Mart 2024

1.Giriş

Tarımsal ürünlerin bozulmadan uzun süre saklanması, besin, tat ve aroma özelliklerinin korunması kurutmaya olan ihtiyacı zorunlu kılmıştır (Türkan, 2020). Kurutulacak gıdaların raf ömrünün arttırılabilmesi için, denge nemi değerine ulaşıncaya kadar kurutma işlemi yapılmalıdır (Türkan, 2020). Kurutulacak ürünlerin kimyasal ve biyolojik özelliklerine göre kurutma yöntemi seçilmesi ürün kalitesi, enerji verimliliği ve zaman tasarrufu sağlanması açısından oldukça önemlidir (Kurtuluş, 2007). Kurutma işlemine sanayide gıda, kimya, seramik, deri, kağıt, kereste ve tekstil gibi birçok sektörde ihtiyaç duyulmaktadır. Kurutulacak ürünün yapısına ve özelliklerine göre rafli, tünel, sprej, dondurmalı, akışkan yataklı, kızılötesi ışınım ve mikrodalga kurutucular yaygın olarak kullanılmaktadır (Kurtuluş, 2007). Yapılan literatür araştırmalarında fındık üzerine bazı kurutma çalışmalarının gerçekleştirildiği görülmüştür.

Demirtas ve diğ. (1999), kabuklu fındığın tek tabaka kurutma davranışını deneysel olarak incelemiş ve modelleme için difüzyon tabanlı bir kurutma modeli kullanmışlardır. Fındık difüzyon hızı, verilere en iyi uyan teorik eğriler kullanılarak 25-45°C, hava hızı 0,2-0,3 ms⁻¹, havanın %60 bağıl neminde belirlenmiştir ve kurutma havası sıcaklığı ile hızının bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir.

Topuz (2002), fındığın akışkan yataktaki kuruma davranışını incelemiş ve matematiksel modellemesini gerçekleştirmiştir. Deneylerde, bir yıl önce hasat edilmiş, güneşte serilerek kurutulmuş fakat depolama sonucu nemlenmiş fındık ile yeni hasat edilmiş taze fındıklar kullanılmıştır. Deneysel çalışma neticesinde, yatak havası sıcaklığı arttıkça kuruma hızının arttığı fakat ürünün gıda ve kimyasal bozulmaya uğramaması için sıcaklığın belli bir değeri aşmaması gerektiği ifade edilmiştir.

Aktaş (2007), ısı pompası destekli otomatik kontrollü bir kurutma fırını deney düzeneği imal etmiş ve fındığın kuruma performansını deneysel olarak incelemiştir. Deney düzeneğindeki kurutma havası sıcaklıkları 50 °C, 45 °C ve 40 °C olarak seçilmiştir. Isı pompalı kurutucuda kurutma havası sıcaklığının 50 °C olduğu durumda fındıklar 24 saatte kurutulurken 45 °C'de 27 saatte 40 °C ise 30 saatte kurutulmuştur. Kurutma havası hızları 50°C için 0,25 m/s, 45 °C için 0,32 m/s ve 40 °C için 0,38 m/s olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak ısı pompalı kurutucuya ait ısıtma tesir katsayısı COP_{wh} değeri 50 °C kurutma havası sıcaklığı için 1,70; 45 °C için 1,58 ve 40 °C için 1,40 olarak bulunmuştur.

Özdemir ve Devres (1999) kavurma sırasında fındığın ince tabaka kuruma özelliklerini 100, 120, 140 ve 160 °C sıcaklık değerleri için incelemişler, matematiksel modellemesini gerçekleştirmişler ve en iyi model olarak Thompson ampirik modelini belirlemişlerdir.

Acar ve diğ. (2020) tarafından güneş enerjisi destekli bir fındık kurutma sistemi tasarlanmış, kurutma performansı incelenmiş ve matematiksel modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. İç sıcaklığı 40 °C'de sabit tutmak için proses kontrol cihazı kullanılmış ve deney normal güneş ışığı koşullarında bir günde 09:00 ile 17:00 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir. Bu

kurutma süresi boyunca fındıkların 20 kg ağırlığının 17,201 kg'a düştüğü gözlemlenmiş ve Page modeli en iyi kurutma modeli olarak belirlenmiştir.

Kandemir (2019), LED teknolojilerinden yararlanarak kurutma sistemi deney düzeneği imal etmiştir. Deneyde üç farklı LED sıcaklığına sahip (3000 K, 4000 K ve 6500 K) LED'ler kullanılmış ve ışınım ısı transferinin kütle transferine etkileri incelenmiştir. LED'li fındık kurutma sisteminin, güneşte ve etüvde kurutma yöntemlerine göre daha kısa sürede bulunduğu denge nemine (%6) düşürdüğü belirlenmiştir. Aynı zamanda, fındıkla LED arasındaki mesafenin ve fındık boyutunun artmasıyla kuruma süresinin arttığı tespit edilmiştir.

Kızılötesi ışınım kurutma yöntemi kullanılarak pastırma (Batman, 2016), arı poleni (Çiftçi, 2021), Hicaz narı (Öztürk Erdem, 2018), fasulye, bulgur, esmer ve beyaz pirinç (Albayrak ve diğ., 2021), havuç dilimleri (Guo ve diğ., 2020), havuç (Doymaz, 2013), kara dut (Doymaz ve Kıpçak, 2019), Mantar (Darvishi ve diğ., 2013), safran (Torki-Harchegani ve diğ., 2017), muz (Pekke ve diğ., 2013), kahverengi pirinç (Ding ve diğ., 2018), çeltik (Zare ve diğ., 2014), kivi (Özdemir ve diğ., 2017), ejder gözü meyvesi (Nathakaranakule ve diğ., 2010), soğan dilimleri (Jain ve Pathare, 2004), kabuklu fındık (Keleş ve Saçılık, 2019), nane yaprakları (Kocacıyık ve Demirtürk, 2008), yeşil fasulye (Doymaz ve diğ., 2015), nane (Demir, 2019), ayva dilimleri (Aktaş ve diğ., 2013), tatlı patates (Onwude ve diğ., 2019) ve çilek (Adak ve diğ., 2017) ürünlerinin kurutma davranışları incelenmiştir.

Akışkan yataklı kurutucuda bazı zirai ürünlerin kurutma davranışı incelenmiş ve bu kapsamda kivi meyvesi (Dağcı, 2014), odun yongası (Selbaş, 1998) patates, yeşil fasulye ve bezelye (Senadeera ve diğ., 2003), Hindistan cevizi (Niamnuy ve Devahastin, 2005), havuç (Zielinska ve Markowski, 2007), pirinç (Jaiboon ve diğ., 2009), karabiber (Promvong ve diğ., 2011), elma (Kaleta ve diğ., 2013) ve sago çekirdeği atıkları (Rosli ve diğ., 2020) çalışılmıştır.

Dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutma yöntemi kullanılarak literatürde buğday taneleri (Özbey ve Söylemez, 2005), yaban mersini (Gaewsondee ve Duangkhamchan, 2019), kakao çekirdekleri (Zulkarnain ve diğ., 2019), acı biber (Basrawi ve diğ., 2019), biber (Chuwattanakul ve Eiamsa-ard, 2019) ve çeltik (Sitorus ve diğ., 2021) zirai ürünlerinin kurutma davranışları çalışılmıştır.

Okur ve diğ. (2023) tarafından yeşil çayın dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınım kurutucuda kurutma davranışı incelenmiş ve matematiksel modellemesi yapılmıştır. Kurutma, 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W kızılötesi ışınım gücü değerinde gerçekleştirilmiş ve boyutsuz nem oranı, nem içeriği ve kurutma hızı hesaplanmıştır. Ayrıca, kurutulan yeşil çay için su ekstraktı, toplam kül, toplam polifenol, kafein ve ham lif gibi kalite parametreleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, proses için en uygun kızılötesi gücün 500 W ve en iyi ince tabaka kurutma modelinin Aghbashlo ve diğ. (Aghbashlo ve diğ., 2009) modeli olduğu belirlenmiş ve en yüksek su ekstraktı değeri 500 W kızılötesi gücü değerinde %44,04 olarak elde edilmiştir.

Türkiye'de üretilen fındık miktarının yıllık 400.000-450.000 ton (Topçuoğlu, 2008; Kılıç, 2022) ile dünyanın ortalama %70-80'nini (Topçuoğlu, 2008) karşılmasına rağmen, bu önemli ürünün kurutulmasında halen çoğunlukla geleneksel yöntemler

kullanılmaktadır. Geleneksel kurutma yönteminde güneş altında doğal kurutma yapılması nedeniyle iklim koşullarına bağımlılığın artması, sergi yapılacak yer sorunlarının oluşması, homojen kurutma yapılamaması gibi dezavantajlar ortaya çıkabilmektedir (Turan ve İslam, 2016). Bu çalışmanın amacı, dönmeli akış, akışkan yatak ve kızılötesi ışınlama etkilerini içeren yeni bir kurutma yöntemini kullanarak kabuklu fıncığın kurutma davranışını belirlemek ve bu prosesin matematiksel modelini gerçekleştirmektir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan yuvarlak şekilli fıncık grubundan tombul fıncık (*Betulaceae* familyasının *Corylus* cinsi) Şekil 1'de gösterilmiştir. Fıncıklar Trabzon'un Sürmene ilçesinin Yemişli mahallesinden toplanmıştır. Günlük olarak toplanan taze fıncıklar yeşil kabuklarından ayrılıp Kett marka 4044 model nem ölçüm cihazıyla kabuklu fıncıkların nem oranları %35 olarak belirlenmiş ve 100 g olarak deneylerde kullanılmıştır. Deneyler Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü İDEA-L İnovasyon laboratuvarında yapılmıştır.



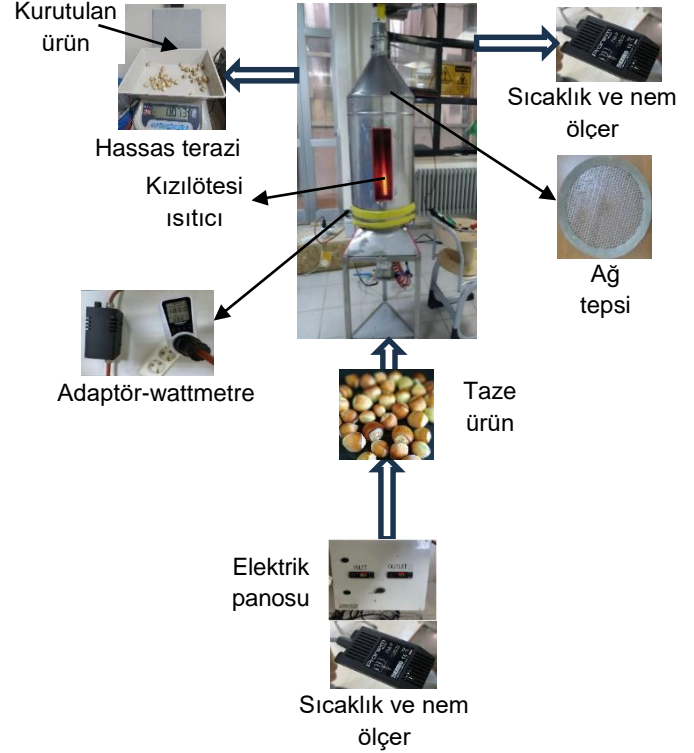
Şekil 1. Yeşil kabuklu ve kabuklu fıncık.
Figure 1. Green-husked and shelled hazelnuts.

2.2 Metot

Kabuklu fıncık kurutmak için kullanılan kızılötesi ışınlı kurutma sisteminin genel görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Kullanılan ürün tepsi 355 mm çapındadır ve paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Tepsinin yüksekliği 30 mm ve tepsinin delik çapı 10 mm'dir. 301L 2B paslanmaz çelikten imal edilen kabinin çapı 400 mm ve yüksekliği 600 mm'dir.

Deneyler 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W kızılötesi güç değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkları ölçmek için TEM marka ETEKOTER+LCD/00/00 1 g hassas terazi kullanılmıştır. Sıcaklık ve nem EMKO Pronem Mini PMI-P (-

20/80°C (±0,1) ve %0-100 (±%2)) kullanılarak ölçülmüştür. Nem ve sıcaklık EMKO marka ESM-3723 dijital sıcaklık ve nem kontrol cihazı kullanılarak saptanmıştır. Kızılötesi güç seviyeleri bir adaptör kullanılarak ayarlanmış ve kızılötesi gücü okumak için WellHise marka PM-004+LCD wattmetre kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınlı kurutma sisteminin genel görünümü.
Figure 2. General view of the swirling flow fluidized bed infrared drying system.

2.3 Matematiksel modelleme

İnce tabaka kurutma prosesine uygun olarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerden yararlanarak yapılan matematiksel modelleme, 24 adet ince tabaka kurutma eğrisi denklemi (bkz. Tablo 1) ve 7 adet model uygunluk parametresi (bkz. Tablo 2) (Şimşek ve diğ., 2021; Küçük ve diğ., 2022; Midilli ve Kucuk, 2023) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellemede doğrusal olmayan tahmin yöntemi (Statistica) ve model uygunluk parametrelerinin hesaplanmasında Microsoft Excel programı kullanılmıştır.

Tablo 1. İnce tabaka kurutma denklemleri.
Table 1. Thin-layer drying-curve equations.

Model adı	Model denklemi	Denklem No	Kaynak
Newton (Lewis, Üstel)	$MR = \exp(-kt)$	(1)	Midilli ve diğ., 2002; McMinn ve diğ., 2005; Kucuk ve diğ., 2014
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(2)	Midilli ve Kucuk, 2003; Ghazanfari ve diğ., 2006; Kucuk ve diğ., 2014
Modifiye Edilmiş Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	(3)	Vega-Galvez ve diğ., 2008; Kucuk ve diğ., 2014; Şimşek ve diğ., 2021
Modifiye Edilmiş Page-I	$MR = \exp((-kt)^n)$	(4)	Mohamed ve diğ., 2008; Kucuk ve diğ., 2014; Midilli ve Kucuk, 2023
Modifiye Edilmiş Page-II	$MR = \exp\left(-c \left(\frac{t}{L^2}\right)^n\right)$	(5)	Kumar ve diğ., 2012; Kucuk ve diğ., 2014; Okur ve diğ., 2023
Henderson ve Pabis (Tek Terimli)	$MR = a \exp(-kt)$	(6)	McMinn ve diğ., 2005; Kucuk ve diğ., 2014; Okur ve diğ., 2023

Tablo 1. İnce tabaka kurutma denklemleri (devamı).

Table 1. Thin-layer drying-curve equations (continue).

Model adı	Model denklemleri	Denklem No	Kaynak
Logaritmik (Asimptotik)	$MR = a \exp(-kt) + c$	(7)	McMinn ve diğ., 2005; Kucuk ve diğ., 2014; Küçük ve diğ., 2022
Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(8)	Midilli ve diğ., 2002; McMinn ve diğ., 2005; Kucuk ve diğ., 2014
Demir ve diğ.	$MR = a \exp(-kt)^n + b$	(9)	Kaleta ve diğ., 2013; Kucuk ve diğ., 2014; Okur ve diğ., 2023
İki Terimli	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(10)	McMinn ve diğ., 2005; Kucuk ve diğ., 2014; Küçük ve diğ., 2022
İki Terimli Üstel	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	(11)	Chavan ve diğ., 2008; Kucuk ve diğ., 2014; Şimşek ve diğ., 2021
Verma ve diğ. (Modifiye Edilmiş İki Terimli Üstel)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	(12)	Ganesapillai ve d.ğ., 2008; Kucuk ve diğ., 2014; Şimşek ve diğ., 2021
Difüzyon Yaklaşımı	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	(13)	Kaleta ve diğ., 2013; Kucuk ve diğ., 2014; Küçük ve diğ., 2022
Modifiye Edilmiş Henderson ve Pabis (Üç Terimli Üstel)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	(14)	McMinn ve diğ., 2005; Kucuk ve diğ., 2014; Okur ve diğ., 2023
Thompson	$t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2$	(15)	Pardeshi ve diğ., 2009; Kucuk ve diğ., 2014; Midilli ve Kucuk, 2023
Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(16)	McMinn ve diğ., 2005; Kucuk ve diğ., 2014; Şimşek ve diğ., 2021
Hii ve diğ.	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$	(17)	Kumar ve diğ., 2012; Kucuk ve diğ., 2014; Okur ve diğ., 2023
Basitleştirilmiş Fick Difüzyonu	$MR = a \exp\left(-c \left(\frac{t}{L^2}\right)\right)$	(18)	Kumar ve diğ., 2012; Ruiz ve diğ., 2013; Kucuk ve diğ., 2014
Weibull	$MR = \exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right)$	(19)	Aghbashlo ve diğ., 2009; Kucuk ve diğ., 2014; Midilli ve Kucuk, 2023
Aghbashlo ve diğ.	$MR = \exp\left(-\frac{k_1t}{1 + k_2t}\right)$	(20)	Aghbashlo ve diğ., 2009; Kucuk ve diğ., 2014; Küçük ve diğ., 2022
Parabolik	$MR = a + bt + ct^2$	(21)	Doymaz, 2012; Kucuk ve diğ., 2014; Okur ve diğ., 2023
Balbay ve Şahin	$MR = (1 - a) \exp(-kt^n) + b$	(22)	Balbay ve Şahin, 2012; Kucuk ve diğ., 2014; Midilli ve Kucuk, 2023
Alibas (Modifiye Edilmiş Midilli-Kucuk)	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt + g$	(23)	Alibas, 2012; Kucuk ve diğ., 2014; Midilli ve Kucuk, 2023
Geliştirilmiş Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-k_1t^n) - \exp(-k_2t^n) - bt^n$	(24)	Midilli ve Kucuk, 2023

Tablo 2. Model uygunluk parametreleri.

Table 2. Evaluation criteria.

Model uygunluk parametreleri	Denklem	Denklem No
Korelasyon katsayısı	$r = \frac{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})(MR_{exp,i}) - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})}{\sqrt{(N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})^2)(N \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})^2)}}$	(25)
Belirlilik (belirleme) katsayısı	$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{avg})^2}$	(26)
Düzeltilmiş R ²	$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N - 1}{N - k - 1}$	(27)
İndirgenmiş ki-kare	$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n}$	(28)
Ortalama hata kareleri karekökü	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}}$	(29)
İndirgenmiş hata kareler toplamı	$RSSE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{cal,i})^2}{N}$	(30)
Ortalama sapma hatası	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})}{N}$	(31)

Boyutsuz nem oranı, nem içeriği ve kurutma hızı sırasıyla Denklem (32), Denklem (33) ve Denklem (34)'te verilmiştir. (Midilli ve diğ., 1999; Kucuk ve diğ., 2022).

Boyutsuz nem oranı

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (32)$$

Nem içeriği

$$MC(\%) = \frac{M_t - M_e}{M_i} \quad (33)$$

Kurutma hızı

$$DR = -\frac{dM}{dt} = -\frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (34)$$

2.3 Deneysel hatalar ve belirsizlik analizi

Deneysel çalışma sırasında ölçüm aparatları, imalat, deneyci ve gözlemden kaynaklanan hatalar doğruluğu etkilemektedir. Bu deneysel çalışma için toplam hata oranı Denklem (35) kullanılarak hesaplanmıştır (Midilli ve diğ., 1999; Dogru ve diğ., 2002; Akpınar, 2005):

$$WR = \pm \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} W_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (35)$$

(a1) Deneyler sırasında kütle, güç ve zaman ölçümlerinden kaynaklanan toplam hata = ± 2,001

(a2) Kütle, güç ve zaman değerlerinin okunmasından kaynaklanan toplam hata = ± 0,01501

$$W_R = [(a1)^2 + (a2)^2 + \dots]^{1/2} = \% 2,001 \quad (36)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutucuda 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W olmak üzere 4 farklı kızılötesi güç değerinde kabuklu fındık kurutma deneyleri yapılmıştır.

Deneylerde giriş sıcaklığı 18 °C ile 24,5 °C, bağıl nem % 20 ile % 28, çevre sıcaklığı 25 °C ile 28 °C ve hava hızı 4 m/s ile 5 m/s arasında değişmektedir. Kütle kaybı ve zamana bağlı olarak boyutsuz nem oranı, nem içeriği ve kurutma hızı hesaplanmıştır.

Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak Tablo 1’de sunulan tek ya da ince tabaka kurutma eğrisi denklemleri elde edilmiştir. Oluşturulan modeller Tablo 2’te verilen model uygunluk parametrelerine göre değerlendirilmiş ve en iyi 5 model belirlenmiştir. En iyi 5 model ve deneysel verilerden elde edilen boyutsuz nemin (MR) zamana bağlı grafikleri sunulmuş ve en iyi model için kurutma eğrisi denklemleri elde edilmiştir (Bkz. Şekil 3) Ayrıca, kurutma hızının ve nem içeriğinin zamana bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’te gösterilmiştir.

En iyi beş model r, R², R², χ², RMSE, RSSE ve MBE model uygunluk parametreleri dikkate alınarak seçilmiş ve bu parametrelerin değerleri 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W için Tablo 3’te verilmiştir. En iyi model, 1’e en yakın r, R², R² değerleri ile 0’a en yakın χ², RMSE, RSSE ve MBE değerleri bulunarak belirlenmiştir.

Bu modellerdeki model sabitleri, dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutma sisteminin işletme şartlarından etkilenmektedir. Bunlar, hava sıcaklığını artıran kızılötesi güç, akışkan yatak şartını sağlayan hava hızı ve dönmeli akıştır.

Tablo 3. Model uygunluk parametreleri verileri.

Table 3. Data for the evaluation criteria.

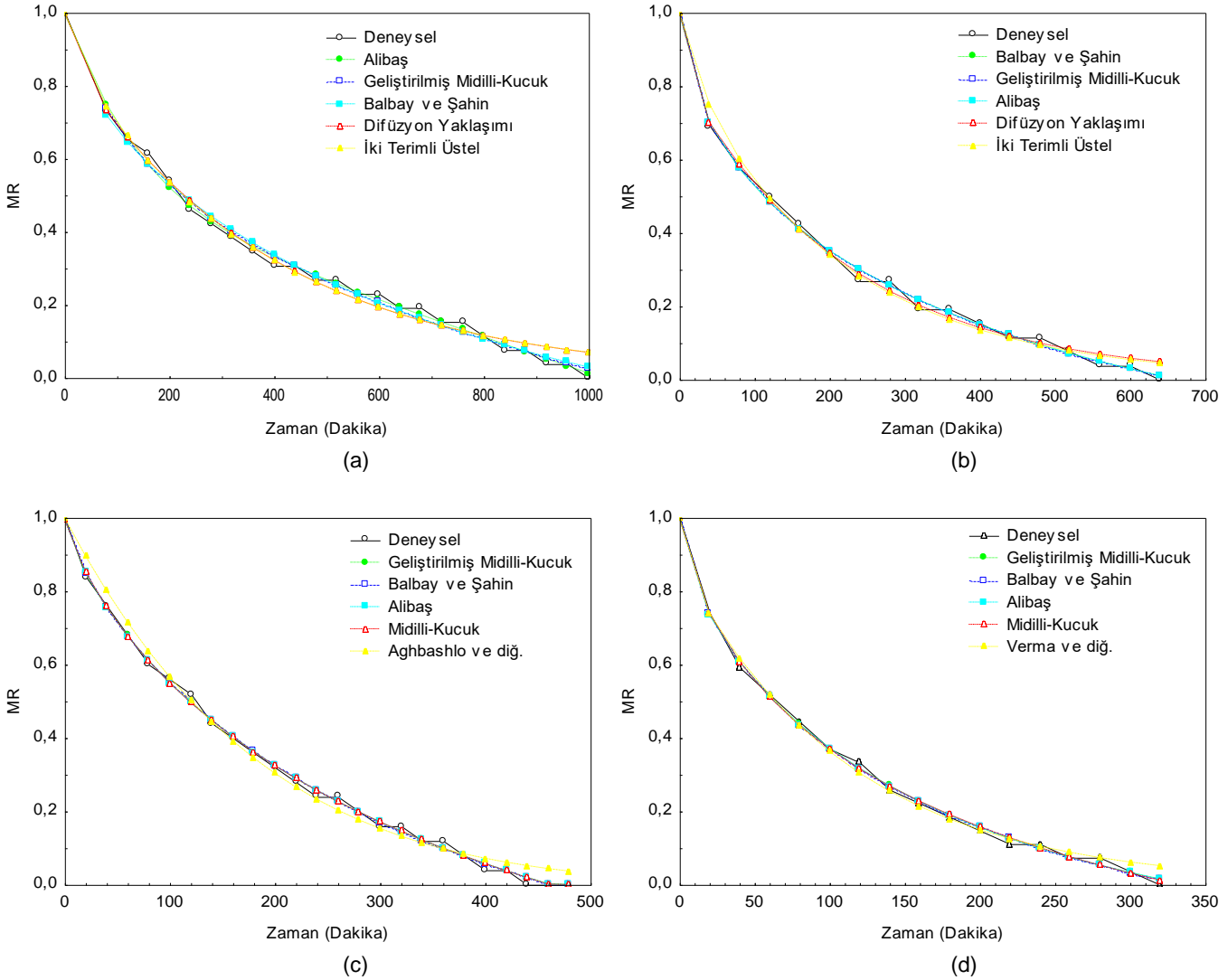
Model adı	r	R ²	χ ²	R ²	RMSE	RSSE	MBE
Kızılötesi Işınım gücü							
250 W							
İki Terimli Üstel	0,99428	0,99531	0,00073	0,99488	0,02590	0,00067	0,00260
Difüzyon Yaklaşımı	0,99436	0,99536	0,00075	0,99470	0,02577	0,00066	0,00236
Balbay ve Şahin	0,99707	0,99764	0,00040	0,99717	0,01838	0,00034	0,00001
Geliştirilmiş Midilli-Kucuk	0,99753	0,99801	0,00036	0,99749	0,01687	0,00028	0,00003
Alibas (Modifiye Edilmiş Midilli-Kucuk)	0,99833	0,99866	0,00024	0,99830	0,01386	0,00019	0,00008
500 W							
İki Terimli Üstel	0,99582	0,99555	0,00069	0,99491	0,02474	0,00061	0,00351
Difüzyon Yaklaşımı	0,99742	0,99728	0,00045	0,99665	0,01933	0,00037	0,00287
Alibas (Modifiye Edilmiş Midilli-Kucuk)	0,99864	0,99865	0,00026	0,99803	0,01365	0,00019	0,00002
Geliştirilmiş Midilli-Kucuk	0,99864	0,99864	0,00026	0,99803	0,01365	0,00019	0,00001
Balbay ve Şahin	0,99864	0,99865	0,00024	0,99819	0,01365	0,00019	0,00000
750 W							
Aghbashlo ve diğ,	0,99554	0,99545	0,00084	0,99503	0,02778	0,00077	0,00651
Midilli-Kucuk	0,99915	0,99922	0,00016	0,99907	0,01147	0,00013	0,00001
Alibas (Modifiye Edilmiş Midilli-Kucuk)	0,99915	0,99923	0,00016	0,99902	0,01146	0,00013	0,00003
Balbay ve Şahin	0,99917	0,99924	0,00015	0,99909	0,01136	0,00013	0,00000
Geliştirilmiş Midilli-Kucuk	0,99918	0,99925	0,00016	0,99905	0,01126	0,00013	0,00010
1000 W							
Verma et al,	0,99789	0,99779	0,00039	0,99728	0,01803	0,00033	0,00307
Midilli-Kucuk	0,99920	0,99922	0,00015	0,99896	0,01074	0,00012	0,00001
Alibas (Modifiye Edilmiş Midilli-Kucuk)	0,99923	0,99925	0,00016	0,99890	0,01054	0,00011	0,00002
Balbay ve Şahin	0,99922	0,99924	0,00015	0,99899	0,01058	0,00011	0,00000
Geliştirilmiş Midilli-Kucuk	0,99923	0,99924	0,00016	0,99890	0,01054	0,00011	0,00000

Şekil 3, dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutma sisteminde kurutulan kabuklu fındığın boyutsuz nem oranının kurutma süresine bağlı değişimini göstermektedir. En yüksek nem kaybının sırasıyla ilk, orta ve son kurutma periyotlarında meydana geldiği ve nem kaybının son kurutma

periyodunda oldukça düşük olduğu görülmüştür. Şekil 3’te görüldüğü gibi kurutma eğrisi genel kurutma eğrisi karakteristiğine uygun olarak üstel değişim göstermiştir. Dönmeli akış, akışkan yatak ve kızılötesi ışınım etkilerinin olduğu bu kurutma sisteminde kuruma süresi ve boyutsuz nem

oranının kızılötesi ışınım güç değerinin artmasıyla azaldığı görülmektedir. Kurutma süresi 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W güç değerleri için sırasıyla 1000 dakika, 640 dakika, 480 dakika ve 320 dakika olarak belirlenmiştir. Bu kurutma süreleri

sonunda ürünün son nem değerleri sırasıyla %9, %9, %10 ve %8 olarak elde edilmiştir. Keleş ve Saçılık (2019) kızılötesi ışınimli ısıtıcı ve hava kurutucu destekli bir sistemde fındığı %6 nem değerine 8-14 saatte düşürmüşlerdir.



Şekil 3. Boyutsuz nem oranının zamanla değişimi (a) 250 W, (b) 500 W, (c) 750 W, (d) 1000 W.
Figure 3. Variation of dimensionless moisture ratio over time a) 250 W, (b) 500 W, (c) 750 W, (d) 1000 W.

En iyi kurutma modelleri 250 W ve 500 W için sırasıyla Alibaş; Balbay ve Şahin; 750 W ve 1000 W için ise Geliştirilmiş Midilli-Kucuk olarak tespit edilmiş ve model denklemleri sırasıyla Denklem (37), Denklem (38), Denklem (39) ve Denklem (40)'da verilmiştir. Okur ve diğ. (2023) yeşil çay yapraklarının dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınimli kuruma isteminde en iyi modelleri 250 W ve 1000 W için Parabolik, 500 W ve 750 W için sırasıyla Aghbashlo ve diğ. ve Wang ve Singh olarak belirlemişlerdir.

$$M_R = 0,490748 \exp(-0,004908t^{1,075147}) - 0,000493t + 0,505994 \quad (37)$$

$$MR = (1 + 0,359177) \exp(-0,027189t^{0,59847}) - 0,359983 \quad (38)$$

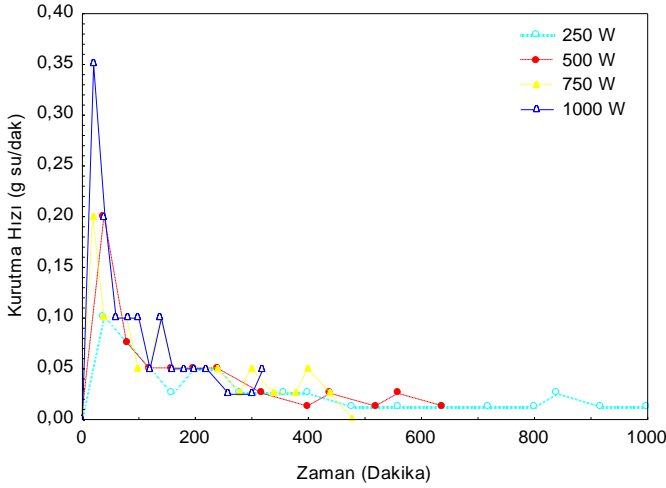
$$MR = 1,99809 \exp(-0,042689t^{0,636555}) - \exp(-0,070353t^{0,636555}) - 0,004197t^{0,636555} \quad (39)$$

$$MR = 2,000 \exp(0,086339t^{0,38005}) - \exp(-0,290611t^{0,38005}) - 0,473938t^{0,38005} \quad (40)$$

Şekil 4, dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınimli kurutma sisteminde kurutulan kabuklu fındık için 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W güç değerlerinde zamana bağlı kurutma

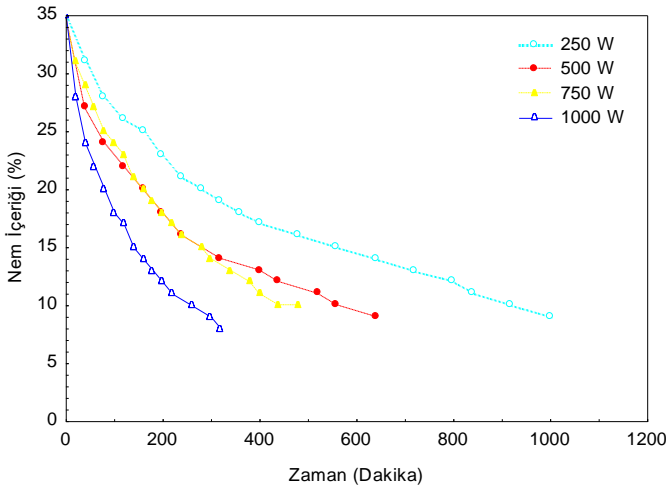
hızı değişimini göstermektedir. Kızılötesi ışınım güç değeri arttıkça kurutma zamanının önemli ölçüde azaldığı ve özellikle ilk kurutma periyodunda kurutma hızının ise önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu yöntemde, kızılötesi ışınım doğrudan kabuklu fındıkların yüzeyine etki eder ve böylece ısı üretilir ve nemin ürünlerin içinden daha hızlı buharlaşması gerçekleşir.

Giriş havasında herhangi bir ısıtma yoktur ve deneyler sırasında giriş havasının sıcaklığı 18 °C ile 24,5 °C arasında değişmektedir. Kurutma havasının ortalama çıkış sıcaklığı 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W için sırasıyla 28,7 °C, 35 °C, 41°C ve 42,6 °C olarak ölçülmüştür. Enerji, üründeki nemi buharlaştırmak için kızılötesi ışınım kaynağı tarafından kızılötesi ışınım yoluyla doğrudan kabuklu fındıklara iletilir. 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W kızılötesi ışınım güç değerlerinde Denklem (34)'ten hesaplanan kurutma hızının maksimum değerleri sırasıyla 0-40 dakikalık kurutma periyodunda 0,1 g su/dakika, 0-40 dakikalık kurutma periyodunda 0,2 g su/dakika, 0-20 dakikalık kurutma periyodunda 0,2 g su/dakika ve 0-20 dakikalık kurutma periyodunda 0,35 g su/dakika'dır.



Şekil 4. Kurutma hızının zamanla değişimi.
Figure 4. The variation of drying rate over time.

Şekil 5, Denklem (33) kullanılarak hesaplanan kabuklu fındığın nem içeriğinin zamanla değişimini göstermektedir. Şekil 5'te gösterildiği gibi, nem içeriği kurutma zamanının artmasıyla azalmaktadır. Ayrıca, kızılötesi ışınım güç değeri arttığında kabuklu fındıklara kızılötesi ışınım yoluyla transfer edilen enerji miktarının arttığı ve böylece kurutma süresinin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. En hızlı nem kaybı 1000 W kızılötesi ışınım güç değerinde meydana gelirken en yavaş nem kaybı ise 250 W güçte meydana gelmiştir. 500 W ve 750 W güç değerlerinde ise nem içeriğindeki değişimin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Benzer değişimler bu güç değerlerinde kurutma hızında da görülmüştür (Bkz. Şekil 4). Kabuklu fındığın başlangıç nem içeriği %35 iken, son nem içeriği 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W kızılötesi ışınım güç değerleri için sırasıyla %9, %9, %10 ve %8 olarak tespit edilmiştir. Olgun ve Rzayev (2000) fındığın açık havada 82 saatte, kabinet tipli kurutucuda ise ek ısıtıcı kullanıldığında 28 saatte, ek ısıtıcı kullanılmadığında 50 saatte, çadır tipli kurutucuda 73 saatte ve ek ısıtıcı kullanılmayan dolap tipli kurutucuda ise 72-76 saatte kurduğunu belirlemiştir.



Şekil 5. Nem içeriğinin zamanla değişimi.
Figure 5. The variation of moisture content over time.

4. Sonuç

Bu çalışma, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W kızılötesi ışınım güç değerleri için kabuklu fındıkların dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutma davranışı deneysel olarak araştırmaya ve matematiksel modellemesini yapmaya odaklanmıştır. Bazı önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- ✓ Kabuklu fındığın kurutulması için dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınımlı kurutma yönteminde ideal kızılötesi ışınım güç değeri 1000 W'tır.
- ✓ En iyi kurutma modelleri 250 W ve 500 W için sırasıyla Alibaş; Balbay ve Şahin; 750 W ve 1000 W için ise Geliştirilmiş Midilli-Kucuk olarak tespit edilmiştir.
- ✓ Kurutma hızı kızılötesi güç değerinin artmasıyla artar.
- ✓ Kuruma süresi kızılötesi güç değerinin artmasıyla önemli ölçüde azalır.

Dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi kurutma teknolojisinin ilk kez fındığın kurutulmasında kullanılmış olması çalışmanın bilimsel özgünlüğünü göstermektedir. Ayrıca, elde edilen verilerin fındık meyvesi ile ilgilenen işletmeler, üreticiler, politika geliştiriciler, araştırmacılar ve sanayiciler için kaynak teşkil edeceği gerçeği çalışmanın endüstriyel ve teknolojik önemine işaret etmektedir.

5. Teşekkür ve Bilgi

Yazarlar bu çalışmaya teknik destek sağladığı için Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi'ne teşekkür eder.

6. Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

7. Kaynaklar

- Acar, B., Dağdeviren, A., & Özkaymak, M. (2020). Design of hazelnut drying system supported by solar energy, investigation of drying performance and determination of proper drying model. *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(2), 570-577.
- Adak, N., Heybeli, N., & Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. *Food Chemistry*, 219, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.103>
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Khani, S., & Ghasemi, M. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *International Agrophysics*, 23(4), 313-317.
- Akpınar E. K. (2005). Deneysel çalışmalardaki hata analizine bir örnek: kurutma deneylerindeki hata analizi. *Mühendis ve Makina*, 46(540), 41-48.
- Aktaş, M. (2007). Isı pompası destekli fındık kurutma fırınının tasarımı, imalatı ve deneysel incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Aktaş, M., İlbaş, M., Yalçın, A., & Şahin, M. (2013). Kızılötesi ışınımlı bir kurutucuda kuruma davranışlarının deneysel incelenmesi. *Journal of Gazi University Faculty of Engineering and Architecture*, 28(4), 767-775.
- Albayrak, B. B., Tuncel, N. B., & Kocabıyık, H. (2021). Bazı instant gıdaların üretiminde kızılötesi kurutmanın etkisi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 7(1), 100-113. <https://doi.org/10.28979/jarnas.890536>
- Alibas, I. (2012). Selection of the best suitable thin-layer drying mathematical model for vacuum dried red chili pepper. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 6(17), 161-170.

- Balbay, A., & Şahin, Ö. (2012). Microwave drying kinetics of a thin-layer liquorice root. *Drying Technology*, 30(8), 859-864. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.670682>
- Basrawi, F., Redzlan, F., Ibrahim, T. K., & Yudin, A. S. M. (2020). Experimental study on the effect of bed aspect ratio to the drying rate of chilli for swirling fluidized bed dryer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863, 012044.
- Batman, S. G. (2016). Pastırma üretiminde infrared kurutma yönteminin kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- Chavan, B. R., Yakupitiyage, A., & Kumar, S. (2008). Mathematical modeling of drying characteristics of Indian mackerel (*Rastrilliger kangurta*) in solar-biomass hybrid cabinet dryer. *Drying Technology*, 26(12), 1552-1562. <https://doi.org/10.1080/07373930802466872>
- Chuwattanakul, V., & Eiamsa-Ard, S. (2019). Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100389.
- Çiftçi, S. (2021). Sıcak hava ve kızılötesi kurutma işleminin arı polenin bazı fiziksel özellikleri ve uçucu bileşen profili üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu, Türkiye.
- Dağcı, G. (2014). Ozmotik ön kurutma yapılmış kivi meyvesinin kızılötesi dalga destekli akışkan yatak kurutucu ile kurutulması. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Türkiye.
- Darvishi, H., Najafi, G., Hosainpour, A., Khodaei, J., & Aazdbakht, M. (2013). Far- infrared drying characteristics of mushroom slices. *Chemical Product and Process Modeling*, 8(2), 107-117. <https://doi.org/10.1515/cppm-2013-0035>
- Demir, Ö. (2019). Kızılötesi kurutucuda nane bitkisinin optimum kurutma sıcaklığının belirlenmesi. *BEU Journal of Science*, 8(3), 1094-1100.
- Demirtas, C., Ayhan, T., & Kaygusuz, K. (1998). Drying behaviour of hazelnuts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76, 559-564. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199804\)76:4<559::AID-JSFA988>3,0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199804)76:4<559::AID-JSFA988>3,0.CO;2-J)
- Ding, C., Khir, R., Pan, Z., Wood, D. F., Venkitasamy, C., Tu, K., El-Mashad, H., & Berrios, J. (2018). Influence of infrared drying on storage characteristics of brown rice. *Food Chemistry*, 264, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.042>
- Dogru, M., Midilli, A., & Howarth, C. R. (2002). Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis. *Fuel Processing Technology*, 75(1), 55-82. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00234-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00234-X)
- Doymaz, I. (2012). Sun drying of seedless and seeded grapes. *Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 214-220.
- Doymaz, I. (2013). Determination of infrared drying characteristics and modelling of drying behaviour of carrot pomace. *Journal of Agricultural Sciences*, 19(1), 44-53. https://doi.org/10.1501/tarimbil_0000001227
- Doymaz, I., Kipcak, A. S., & Piskin, S. (2015). Characteristics of thin-layer infrared drying of green bean. *Czech Journal of Food Sciences*, 33(1), 83-90. <https://doi.org/10.17221/423/2014-CJFS>
- Doymaz, I., & Kipcak, A. S. (2019). Drying characteristics investigation of black mulberry dried via infrared method. *Journal of Thermal Engineering*, 5(2), 13-21.
- Gaewsondee, T., & Duangkhamchan, W. (2019). A novel process for preparing instant riceberry using fluidized bed drying assisted with swirling compressed-air: kinetic aspects. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1422-1434.
- Ganesapillai, M., Regupathi, I., & Murugesan, T. (2008). An empirical model for the estimation of moisture ratio during microwave drying of plaster of paris. *Drying Technology*, 26(7), 963-978. <https://doi.org/10.1080/07373930802142978>
- Ghazanfari, A., Emami S., Tabil, L. G., & Panigrahi, S. (2006). Thin-layer drying of flax fiber, II: Modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. *Drying Technology*, 24(12), 1637-1642. <https://doi.org/10.1080/07373930601031463>
- Guo, Y., Wu, B., Guo, X., Ding, F., Pan, Z., & Ma, H. (2020). Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characterizations. *LWT-Food Science and Technology*, 126, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109312>
- Jaiboon, P., Prachayawarakorn, S., Devahastin, S., & Soponronnarit, S. (2009). Effects of fluidized bed drying temperature and tempering time on quality of waxy rice. *Journal of Food Engineering*, 95(3), 517-524.
- Jain, D., & Pathare, P. B. (2004). Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Engineering*, 89(3), 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.07.011>
- Kaletka, A., Górnicki, K., Winiczenko, R., & Chojnacka, A. (2013). Evaluation of drying models of apple (var, Ligo) dried in a fluidized bed dryer. *Energy Conversion and Management*, 67, 179-185.
- Kandemir, L. (2019). LED teknolojisi ile fındık kurutma. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu, Türkiye.
- Keleş, C. Ö., & Saçılık, K. (2019). Basınçlı hava kullanılan infrared ısıtıcılı kurutucuda kabuklu fındık kurutulması. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*, 34, 65-72. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.434531>
- Kılıç, Y. (2022). Zor ayrışabilen katı atıkların biyoreaktörlerde parçalanması. Yüksek lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.

- Kocabiyik, H., & Demirtürk, B. S. (2008). Nane yapraklarının infrared radyasyonla kurutulması. *Journal of Tekirdag Faculty of Agriculture*, 5(3), 239-246.
- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., & Dincer, I. (2014). A review on thin-layer drying-curve equations. *Drying Technology*, 32(7), 757-773. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.873047>
- Kumar, N., Sarkar, B. C., & Sharma, H. K. (2012). Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 33-41. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0266-7>
- Kurtuluş, O. (2007). Akışkan yatakta kurutma prosesinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Küçük, H., Akbulut, U., & Midilli, A. (2022). Single-layer drying modeling of pumpkin (*Cucurbita Maxima*). *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 7(3), 110-119, 2022.
- McMinn, W. A. M., McLoughlin, C. M., & Magee, T. R. A. (2005). Thin-layer modeling of microwave, microwave-convective, and microwave-vacuum drying of pharmaceutical powders. *Drying Technology*, 23(3), 513-532. <https://doi.org/10.100081/DRT-200054126>
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- Midilli, A., & Kucuk, H. (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, 44(7), 1111-1122. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00099-7)
- Midilli, A., & Kucuk, H. (2023). Development of a new curve equation representing thin layer drying process. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(4), 9717-9730. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2240740>
- Midilli, A., Olgun, H., & Ayhan, T. (1999). Experimental studies on mushroom and pollen drying. *International Journal of Energy Research*, 23(13), 1143-1152. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(19991025\)23:13<1143::AID-ER544>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(19991025)23:13<1143::AID-ER544>3.0.CO;2-3)
- Mohamed, L. A., Kane, C. S. E., Kouhila, M., Jamali, A., Mahrouz, M., & Kechaou, N. (2008). Thin layer modelling of *Gelidium sesquipedale* solar drying process. *Energy Conversion and Management*, 49(5), pp, 940-946. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.10.023>
- Nathakaranakule, A., Jaiboon, P., & Soponronnarit, S. (2010). Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering*, 100(4), 662-668. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.016>
- Niamnuy, C., & Devahastin, S. (2005). Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer. *Journal of Food Engineering*, 66(2), 267-271.
- Okur, Ö., Kucuk, H., & Midilli, A. (2023). Triple-effect new generation drying technique. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103489. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103489>
- Olgun, H., & Rzaev, P. (2000). Fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulması. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24(1), 1-14.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2019). Experimental studies and mathematical simulation of intermittent infrared and convective drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *Food and Bioprocess Processing*, 114, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.12.006>
- Özbey, M., & Söylemez, M. S. (2005). Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains. *Energy Conversion and Management*, 46(9-10):1495-1512.
- Özdemir, M. B., Aktaş, M., Şevik, S., & Khanlari, A. (2017). Modeling of a convective- infrared kiwifruit drying process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 18005-18013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.012>
- Özdemir, M., & Devres, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42(4), 225-233. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00126-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00126-0)
- Öztürk Erdem, B. (2018). Hicaz narı (*punica granatum* L.) tanelerinin kızılötesi, mikrodalga ve konvektif kurutma yöntemleriyle kurutulması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Pardeshi, I. L., Arora, S., & Borker, P. A. (2009). Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. *Drying Technology*, 27(2), 288-295. <https://doi.org/10.1080/07373930802606451>
- Pekke, M. A., Pan, Z. L., Atungulu, G. G., Smith, G., & Thompson, J. F. (2013). Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(3), 58-70.
- Promvong, P., Boonloi, A., Pimsarn, M., & Thianpong, C. (2011). Drying characteristics of peppercorns in a rectangular fluidized-bed with triangular wavy walls. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(9), 1239-1246.
- Rosli, M. I., Abdul Nasir, A. M., Takriff, M. S., & Ravichandar, V. (2020). Drying sago pith waste in a fluidized bed dryer. *Food and Bioprocess Processing*, 123, 335-344.
- Ruiz, C. A., Francisco, C., Fernando, L.-R., & Aida, R. (2013). Thin layer drying behavior of industrial tomato by-products in a convective dryer at low temperatures. *Research Journal of Biotechnology*, 8(2), 50-60.
- Selbaş, R. (1998). Akışkan yataklı sistemlerin analizi ve sunta kurutulmasında uygulanabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye

- Senadeera, W., Bhandari, B. R., Young, G., & Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, 58(3), 277-283.
- Sitorus, A., Novrinaldi, N., Putra, S. A., Cebro, I. S., & Bulan, R. (2021). Modelling drying kinetics of paddy in swirling fluidized bed dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101572. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101572>.
- Şimşek, M., Kucuk, H., & A. Midilli, A. (2021). Experimental investigation and mathematical modeling of microwave thin layer drying behavior of apricot, kiwi and mint leaves. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 2(2), 13-35.
- Topçuoğlu, G. (2008). Uluslararası piyasada fındığın Türkiye ekonomisine katkısı ve sorunları. Yüksek lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye.
- Topuz, A. (2002). Akışkan yatakta fındık kurutma prosesinde ısı ve kütle geçişinin incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Maghsoodi, V., & Moheb, A. (2017). Infrared thin layer drying of saffron (*Crocus sativus* L.) stigmas: Mass transfer parameters and quality assessment. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(4), 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.09.005>
- Turan, A., & İslam, A. (2016). Çakıldak fındık çeşidinde kurutma ortamları ve muhafaza süresine bağlı olarak meydana gelen değişimler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 272-285.
- Türkan, B. (2020). Endüstriyel malzemelerde eşzamanlı ısı ve kütle transferinin deneysel ve nümerik incelenmesi. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Vega-Galvez, A., Ayala-Aponte, A., Notte, E., de la Fuente, L., & Lemus-Mondaca, R. (2008). Mathematical modeling of mass transfer during convective dehydration of brown algae *macrocystis pyrifera*. *Drying Technology*, 26(12), 1610-1616. <https://doi.org/10.1080/07373930802467532>
- Zare, D., Naderi, H., & Ranjbaran, M. (2014). Energy and quality attributes of combined hot-air/infrared drying of paddy. *Drying Technology*, 33(5), 570-582. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.962143>
- Zielinska, M., & Markowski, M. (2007). Drying behavior of carrots dried in a spout- fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 25(1), 261-270.
- Zulkarnain, M. A., Shahrman, M. K., & Yudin, A. S. M. (2020). Experimental study of drying characteristics of cocoa bean in a swirling fluidized bed dryer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863, 012048.