SİDAS MEDYA
Akademik Gıda®
ISSN Online: 2148-015X
http://www.academicfoodjournal.com

Akademik Gıda 15(4) (2017) 355-367, DOI: 10.24323/akademik-gida.370103

Araştırma Makalesi / Research Paper

Karbon Fiber Destekli Kabin Kurutucuda Farklı Sıcaklıklarda Elma Dilimlerinin Kurutulmasının İncelenmesi: Kurutma Karakteristikleri ve Performans Değerlendirmesi

Serpil Pekdoğan Göztok[1], Filiz İçier[2]

[1]Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Bornova, İzmir
[2]Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir

Geliş Tarihi (Received): 15.02.2017, Kabul Tarihi (Accepted): 10.04.2017
Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): serpilpekdogan@hotmail.com (S. Pekdoğan Göztok)
0 232 311 30 31 0 232 342 75 92

ÖZ

Elma dilimlerinin karbon fiber destekli kabin kurutucuda (KFKK) 60, 70 ve 80°C'de kuruma davranışı incelenmiş ve işlemin performans değerlendirmesi yapılmıştır. On dört farklı ince tabaka kuruma modelinin deneysel verilere uyumluluğu istatistiksel olarak incelenmiştir. Model uyumluluğu kriteri olarak en yüksek düzeltilmiş belirleme katsayısı, en düşük indirgenmiş ki-kare ve en düşük hata kareleri ortalamasının karekökü seçilmiştir. Difüzyon yaklaşım" modeli kuruma davranışını en iyi ifade eden model olarak belirlenmiştir. Efektif difüzyon katsayısı (D_{eff}) $2.06x10^{-10}$ ve $4.56x10^{-10}$ m^2/s değerleri arasında bulunmuştur. 60-80°C kurutma sıcaklıklarında, işlemin enerji verimliliğinin %10.51-13.12, ekserji verimliliğinin %9.44-11.64 arasında olduğu tespit edilmiştir. Elma örneklerinin KFKK'da özgül nem kaybı hızı 60, 70 ve 80°C kurutma sıcaklıkları için sırasıyla $4.44*10^{-5}$±0.00, $4.85*10^{-5}$±0.00, $5.63*10^{-5}$±0.00 kg buharlaşan su/kJ olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon fiber, Kurutma, Elma, Enerji-ekserji

Investigation of Drying of Apple Slices in Carbon Fiber Assisted Cabin Dryer at Different Temperatures: Drying Characteristics and Performance Evaluation

ABSTRACT

Drying behaviour of apple slices in carbon fiber assisted cabin dryer (CFACD) was investigated, and performance evaluation of the process was conducted. The compatibilities of fourteen different thin layer drying models to the experimental data were examined. The highest corrected coefficient of determination, the lowest reduced chi-square and the lowest root mean square error were chosen as the model compatibility criterion. "Diffusion approach" model was determined as best model describing the drying behavior. Effective diffusion coefficient (D_{eff}) was found between $2.06x10^{-10}$ and $4.56x10^{-10}$ m^2/s. For the temperature between 60-80°C, energy efficiency was in the range of 10.51-13.12% while exergy efficiency values were between 9.44-11.64%. The specific moisture removal rate of apple slices in KFKK was found as $4.44*10^{-5}$±0.00, $4.85*10^{-5}$±0.00, $5.63*10^{-5}$±0.00 kg removed water/kJ for the drying temperatures of 60, 70 and 80°C, respectively.

Keywords: Carbon fiber, Drying, Apple, Energy-exergy

GİRİŞ

Türkiye coğrafi konum itibariyle meyve türü ve çeşidi açısından oldukça zengin olup, meyvecilik sektörü gelişmiş ülkeler arasında yer almaktadır. Yetiştirilen meyvelerin bir kısmı döneminde satışa sunulup bir kısmı çeşitli işlemlere tabi tutulmaktadır [1]. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) 2015 verilerine göre, Türkiye elma üretiminde dünya çapında üçüncü sırada yer almaktadır [2]. Elmaların kolay ve ucuz taşınması, uzun raf ömrüne sahip olması ve her mevsimde tüketilmesi imkânlarını sağlayabilmek amacıyla uygulanan kurutma işlemi, gıda endüstrisinde alışılagelmiş ve geniş çapta uygulanan metotlar arasında yer almaktadır [3, 4]. Kurutma, gıdaların sahip olduğu suyun uzaklaştırılması işlemidir. Geleneksel olarak güneş altında kurutma işlemi, ucuz ve pratik olması nedeniyle dünya çapında tercih edilen bir kurutma işlemi olmasına rağmen iklimsel koşullara bağlı olarak uzun süren kurutma işlemi, homojen olmayan su içerikli ürün eldesi ve çevresel koşullar nedeniyle ürüne istenmeyen bulaşmalar (mikrobiyolojik, pestisit kalıntıları, toz, yabancı maddeler vb.), geniş çaplı kurutma yer ihtiyacı, direkt güneş ışınlarıyla temas etmesinden dolayı vitamin ve aroma kayıpları gibi dezavantajlara sahiptir [5-8]. Bu olumsuz etkenleri ortadan kaldırmak için yapay kurutucular kullanılmaya başlanmıştır [3, 9]. Günümüzde yapay kurutucular kabin kurutucular, tünel kurutucular, akışkan yatak kurutucular, ısıl elektriksel yöntemler (mikrodalga, kızılötesi vb.) vb. 400 farklı tipe yakın kurutucu sistemi bulunmaktadır [10].

Gıdaların ince tabaka halinde yayılarak kurutulmasına yönelik oldukça yaygın kurutma sistemleri bulunmaktadır. Kurutma işlemlerinde ürün geliştirme ve tasarım çalışmalarında, deneysel çalışmaların yanı sıra farklı işlem parametrelerin etkilerini de dikkate alan kuramsal öngörülerden de yararlanılmaktadır. Gıdaların ince tabaka kurutulmasının matematiksel modellemesi pratik ve doğru sonuçlar vermektedir [4]. Elmanın dilimler halinde konvektif [11-13], konvektif silikon [14], mikrodalga [15] kurutuculardа, kızılötesi kurutucu [16], güneş enerjisi destekli kurutucu [17-18], ısı pompalı kurutucu [18] gibi kurutucularda kurutulmasının ince tabaka modelleri ile başarı ile incelendiği çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Yeni bir ısıtma kaynağı tasarımı içeren karbon fiber destekli kurutucularda, yüksek sıcaklıklarda çalışabilen, enerji verimliliği yüksek olduğu belirtilen karbon fiber destekli ısıtma ortamları kullanılmakta ve kombine ısı aktarım mekanizmaları (taşınım, iletim, ışınım) yoluyla gıda maddesinin ısınması sağlanmaktadır [19-24].

Kurutma işlemi yüksek enerji gerektiren bir prosestir. Bu nedenle, günümüzde yüksek verimli ve düşük maliyetli kurutma sistemleri tercih edilmekte ve sistemlerin performans analizleri üzerine çalışmalar yoğun bir şekilde yapılmaktadır. Kurutucu sistemlerinin performanslarını belirlemek için son yıllarda ekserji analizleri tercih edilmektedir [10, 25-38]. Sistemlerin birinci yasa analizlerinin gerçekleştirilmesi, üretim sırasında kullanılan enerjinin miktarı ile ilgili sonuçlar veren, temel ve geleneksel bir analiz metodudur [39]. Termodinamiğin birinci yasası ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda sistemin enerji performansı ile ilgili bilgi edinilebilmektedir. Ancak, termodinamiğin ikinci yasa analizi olarak bilinen ekserji analizi ile birlikte enerjinin maksimum kullanılabilirlik değeri belirlenebilmektedir. Ayrıca, sistemlerin her bir parçasına ve prosesin her bir aşamasına gerçekçi bir bakış açısıyla güçlü verilerin elde edilmesini sağlamaktadır [10, 25-40].

Alternatif bir kurutma sistemi olarak oluşturulan karbon fiber destekli kabin kurutucuda elma örneklerinin kurutulması sırasında kurutma sıcaklığının kurutma davranışı ve performans analizleri üzerine etkilerini inceleyen herhangi bir çalışmaya, yazarların bilgisi dahilinde literatürde rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, elma dilimlerinin (4.5 cm x 4.5 cm x 0.5 cm) karbon fiber destekli kabin kurutucuda (KFKK), farklı sıcaklıklarda (60, 70 ve 80°C) kurutulması amaçlanmıştır. Elma örneklerinin kuruma süresi, nem değişimi, kurutmayı temsil eden en iyi ince tabaka modeli ve kurutmanın efektif difüzivite değeri belirlenmiştir. Ayrıca, sistemin enerjetik/ekserjetik analizi gerçekleştirilerek performans analizi, geliştirme potansiyeli ve kurutmanın özgül nem kaybı incelenmiştir.

MATERYAL ve METOT

Materyal

Golden elma *(Golden delicious)* yerel bir marketten temin edilerek, kullanım süresi boyunca iklimlendirme kabininde 0-5°C sıcaklıkta %90-96 nisbi nemde depolanmıştır. Elmalar 4.5 x 4.5 x 0.5 cm boyutunda kesilerek kurutma işleminden önce esmerleşmesini önlemek amacıyla 5 dakika sitrik asit (%0.2 w/v) ve askorbik asit (%1 w/v) karışım çözeltisinde bekletilmiştir [41].

Elma örneklerinin kurutma öncesi kompozisyonu şu şekilde alınmıştır; %84.4 su, %0.2 protein, %14.5 karbonhidrat, %0.6 yağ, %0.3 kül [42]. Enerji ve ekserji analiz çalışmasında, elma örneklerinin kurutma sırasındaki kompozisyon değişimi uzaklaşan su dikkate alınarak düzenlenmiştir.

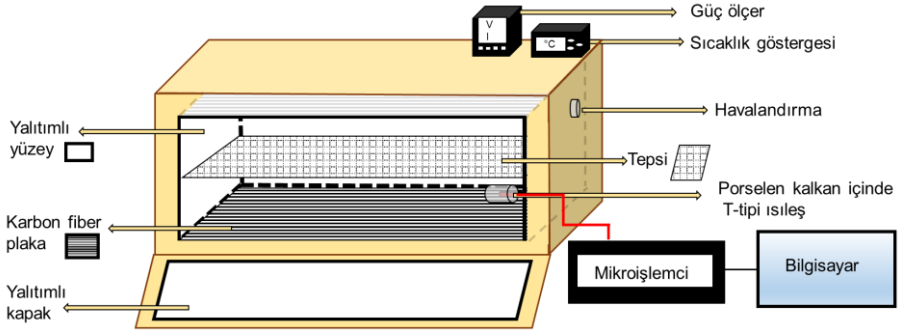
Karbon Fiber Destekli Kabin Kurutucuda Kurutma İşlemi

Bu çalışmada, Denizkızı Isıtma ve Soğutma Sistemleri (İzmir) tarafından özel olarak tasarlanmış karbon fiber destekli kabin kurutucu ünitesi kullanılmıştır [19]. KFKK ünitesinin alt ve üst kısmının iç yüzeyleri karbon fiber ısıtıcı plakaları ile kaplanmıştır ve ünite iç ortam sıcaklığı ayarlanabilmektedir [20] (Şekil 1). Ünitenin iç hacmi 0.01 m^3'dir. Ünite üzerine entegre edilen güç ölçer (Entes, Mpr 45s, Türkiye) yardımıyla sistemden geçen voltaj ve akım değerleri kaydedilmiştir. Kabin yan duvarında havalandırma ünitesi bulunmaktadır. Kurutma işlemleri süresince iç ortam sıcaklığı porselen kalkan yerleştirilmiş T-tipi ısıleş kullanılarak mikroişlemci (Cole Parmer, UK) ile kaydedilmiştir.

Boyutları belli olan elma örnekleri 36.5 x 8.6 x 0.82 cm boyutlarına sahip teflon malzemeden yapılmış ve

perfore edilmiş (delikli) tepsi üzerine dizilmiş ve karbon fiber destekli kabin kurutucuda (KFKK) farklı kurutma ortamı sıcaklıklarında (60, 70 ve 80°C) 0.12–0.11 kg su/kg kurumaddeye ulaşıncaya kadar kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Toplam kuru madde içeriği gravimetrik yöntemle vakumlu etüvde (Nüve EV 018, Türkiye) 0.5 bar vakumda 70°C'de gerçekleştirilmiştir [43]. Örneklerin ağırlık ölçümleri hassas terazi (Mettler-Toledo JB3002, ABD) ile belirlenmiştir.

Kurutma işlemi sırasında elma örneklerinin yüzeylerinden alınan termal kamera (Testo 880-3, Almanya) görüntüleri, cihaza ait görüntü işleme paket programı (IRSoft V 3.3, Testo) kullanılarak işlenmiş ve örnek yüzey sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.



Şekil 1. KFKK sisteminin şematik gösterimi

Kurutma Davranışının Belirlenmesi

Azalan hız periyodunda kuruyan biyolojik materyallerin kuruma işleminin temel mekanizmasının sıvı ve/veya gaz difüzyonu olduğu kabul edilir ve bu mekanizma Fick'in 2. yasası ile ifade edilir [Denklem (1)]. Fick'in difüzyon modelinde konsantrasyon değişkeni yerine ürün nem içeriği değişkeni kullanılmıştır.

$$\frac{dM}{dt} = D_{eff} \frac{d^2M}{dx^2} \quad (1)$$

Denklem (1)'de M ürün nem içeriği (kg su/kg kuru madde), x difüzyon yolu (m), t süre (s) ve D_{eff} ise efektif difüzivite (m^2/s) değerini ifade etmektedir.

Kurutmanın gerçekleştirildiği kabin içinde ısı aktarımı açısından ışınım mekanizmasının yanı sıra doğal taşınımla aktarım mekanizması da etkilidir. Hava, doğal sirkülasyon ile kabin içinde harekete sahip olmakla beraber, momentum aktarımı açısından ölçülebilir ve akış olarak ifade edilebilir hız değerlerinin çok altında hareketliliğe sahip olduğu için durağan olarak ifade edilmiştir. Diğer yandan kabin boyutları ve örneğin yerleştirildiği ızgara dikkate alındığında, havanın doğal sirkülasyon hareketini engelleyecek direncin oluşmadığı kabul edilmiştir.

Kütle aktarımı açısından incelendiğinde ise, kurutma süresince su gıda içinde yüzeye doğru moleküler difüzyon mekanizması ile aktarılmaktadır. Kurutma işleminin karmaşık süreci nedeniyle, sabit ve azalan akı bölgelerinin tamamı için suyun gıda içindeki difüzyonu efektif difüzyon katsayısı ile ifade edilmiştir. İncelenen kurutma işlemi için gıdayı çevreleyen havanın durağan olması nedeniyle, su buharının gıda yüzeyinden hava içine moleküler difüzyon mekanizması ile aktarılmaya devam etmesi beklenmektedir. Ancak kurutma işlemi sırasında doğal taşınımla ısı aktarımının etkisiyle oluşan hareketliliğin de sınır koşulunda yer alması açısından, Fick'in 2. Kanunu'nun çözümü için sınır koşulu olarak dikkate alınan bazı matematiksel yaklaşımlar bulunmaktadır [44]. Bu yaklaşımlardan biri olan film teorisi, kurutma işlemi gibi karmaşık aktarım mekanizmalarının pratik çözümü amacıyla havanın difüze olmayan bileşen olduğu ve durağan ortam olarak kabul edildiği durumda, su buharının hava içinde aktarımını moleküler difüzyon tetikli-taşınımla kütle aktarımı olarak kabul etmektedir. Bu yaklaşımda, su buharının hava içindeki kütle aktarımını ifade eden kütle aktarım katsayısı, difüzyon katsayısına ve sınır katmanı kalınlığına bağlı olarak yazılmaktadır [44].

Başka bir deyişle sınır koşulu, difüzyon tetikli-taşınımla kütle aktarımı olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle yüzeyde kütle aktarımına oluşacak direnç, difüzyon tetikli-taşınımla kütle aktarımı direnci olarak dikkate alınmaktadır. Su buharının hava içindeki difüzyon katsayısı ve penetrasyonuna bağlı olarak belirlenen bu direncin gıda içinde gerçekleşen difüzyonla aktarım direncine göre oldukça düşük olması nedeniyle, Fick'in 2. Kanunu'nun çözümlenmesinde yüzey sınır koşulunda ihmal edilebilir dış kütle aktarım direnci olarak dikkate alınmıştır. Film teorisi, özellikle düşük hızlarda ve durağan ortamda kurutma işlemlerinde Fick'in 2. Kanunu'nun çözümünde sınır koşulunun dikkate alınması açısından pratiklilik sağlamaktadır. Özellikle yığın akışının olmadığı, hava neminin düşük olduğu ortamlardaki gibi seyreltik durumlarda k_c^0 taşınımla kütle aktarım katsayısı k_c taşınımla kütle aktarım katsayısına dönüşmektedir. Yüzey konsantrasyonuna ve sınır katmanındaki havanın ortalama mol kesrine bağlı olarak düzeltme faktörleri de tanımlanabilmektedir. k_c^0 değerleri deneysel olarak da belirlenebilmektedir. Film teorisinin, yığın akışının olmadığı durağan ortamlar için penetrasyon teorisi ve sınır katmanı teorilerinin sonuçlarına da yakın sonuçlar verdiği belirtilmektedir [44].

Bu çalışmada kurutma işleminin gerçekleştirildiği kabin tasarımına bağlı olarak, kabin içinde doğal sirkülasyona engel oluşturacak direncin ihmal edilebilir olması ve

kurutucu tasarımında yer alan havalandırma ünitesi ve karbon fiber ısıtıcılar sayesinde kabin içi neminin düşük tutulabilmesiyle nem sürükleme kuvvetinin etkin olması sağlanabilmiştir. Diğer yandan su buharının hava içindeki aktarımına karşı oluşan direncin, suyun gıda içindeki aktarımına karşı oluşan dirence kıyasla oldukça düşük olması nedeniyle, yüzeyde kütle aktarımı direncinin ihmal edilebilir olduğu ve kurutmanın örnek içindeki difüzyon ile kontrol edildiği varsayımıyla çözüm gerçekleştirilmiştir.

Yukarıdaki açıklamalarda da belirtildiği gibi, doğal taşınımla ısı aktarımı ve moleküler difüzyon tetikli-taşınımla kütle aktarımı yapılan varsayımlar doğrultusunda Fick'in 2. Kanunu film teorisi yaklaşımıyla çözülmüştür. Bu yöntem, diferansiyel denklemin çözümü açısından hata doğurmamakla birlikte yapılan varsayımlar doğrultusunda çözüm yaklaşımı sağlamaktadır.

Aşağıdaki başlangıç ve sınır koşullarına göre (Denklem (2));

$$\begin{array}{lll} t = 0 & -L < x < L & M = M_i \\ t > 0 & x = 0 & dM/dx = 0 \\ t > 0 & x = L & M = M_e \end{array} \quad (2)$$

Kurutma işleminde ortam nemi sabit olduğu sonsuz düzlem geometrisi için, nem içeriği boyutsuz nem içeriği oranı (MR) değişkenine, gıda içindeki merkezden olan uzaklık değişkeni boyutsuz mesafe değişkenine (n=x/L) ve süre boyutsuz süreye (Kütle Fourier sayısı; $Fo_m = D_{eff}\, t/L^2$) dönüştürülerek analitik olarak çözüldüğünde Denklem (3) elde edilir [44- 45];

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[\frac{-(2n+1)^2\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (3)$$

Burada M_i başlangıç nem içeriği, M_e denge nem içeriği, M_t t anındaki ürünün nem içeriğidir ve tüm nem içerikleri kuru madde üzerinden hesaplanmaktadır. D_{eff} efektif difüziviteyi (m^2/s) ve L ise örneğin yarı kalınlığını (m) temsil etmektedir.

Uzun sürelerde ilk terimin alınması yeterlidir (Denklem (4)).

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

D_{eff} değerinin belirlenmesi için ln(*MR*) değerlerinin zamana bağlı değişimi grafik olarak çizilerek, elde edilen doğruların eğimleri (Denklem (5)) ile D_{eff} değerleri hesaplanmıştır [4]:

$$\text{eğim} = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (5)$$

Yapılmış olan kabuller aşağıda maddeler halinde verilmiştir [4]:

- Malzeme özellikleri sabit kabul edilir ve kuruma süresi boyunca büzüşme ihmal edilir.
- Basınç değişimleri ihmal edilir.
- Üründe meydana gelen ısı transferinin ürün içerisinde iletimle, yüzeyde ise doğal taşınımla olduğu kabul edilir.
- Üründe meydana gelen kütle transferinin ürün içerisinde moleküler difüzyon, ürün dışında ise difüzyon tetikli taşınımla kütle transferi mekanizması olduğu kabul edilir.
- Buharlaşmanın sadece yüzeylerde gerçekleştiği kabul edilir.
- Başlangıç nem dağılımı homojen alınır ve işlem sırasında nem dağılımı simetrik kabul edilir.
- Kurutma işlemi süresince efektif nem difüzivitesi sabit kabul edilir.

Bu çalışmada kurutma işlemi sırasında alınan zamana bağlı fraksiyonel nem oranı değerlerini en iyi karakterize eden matematiksel modelin belirlenmesi amacıyla, literatürde yaygın olarak kullanılan on dört farklı teorik ince tabaka denklemi incelenmiştir (Tablo 1). Modellerin deneysel verilere uyumunu incelemek amacıyla, istatistik paket programında (SPSS, Ver. 20, 2012) doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmış ve temel uyum değeri en yüksek düzeltilmiş belirleme katsayısı, en düşük indirgenmiş ki-kare ve en düşük hata kareleri ortalamasının karekökü olması dikkate alınmıştır. Modellerde yer alan a, b, c, n, g, model sabitlerini, k kurutma hızı sabitini (s^{-1}), t kurutma süresini (s), MR ise fraksiyonel nem oranını temsil etmektedir.

Enerji Ekserji Analizi

Kurutma işlemi sırasında kurutucu kabin içerisinde kurutulan üründen kurutma havasına su geçişi vardır. Ekserji analizinin uygulanması amacıyla öncelikle kütle ve enerji denklikleri incelenmiş ve ardından entropi ve ekserji denklikleri incelenmiştir.

Kütle Denklikleri

Genel kütle korunumu, kontrol hacimde her bir zaman dilimini baz alarak incelenmiştir (Denklem (6)). Kurutma işlemi süresince buharlaşan su buharı (m_{bs}) de dikkate alınmıştır ve kuruma başlangıcındaki örnek miktarı (m_b), buharlaşan ve son örnek miktarına (m_s) eşitlenmiştir (Denklem (7)).

$$\sum m_g = \sum m_ç \quad (6)$$

$$(m_b) = (m_s) + (m_{bs}) \quad (7)$$

Tablo 1. Kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla deneysel verilerle uyumu incelenen ince tabaka kuruma modelleri

Model	Model Eşitliği	Kaynak
Lewis	$MR = e^{(-k*t)}$	[46]
Page	$MR = e^{(-k*t^n)}$	[47]
Modifiye Page	$MR = e^{(-(k*t)^n)}$	[48]
Henderson ve Pabis	$MR = a * e^{(-k*t)}$	[49]
Logaritmik (Asimptotik)	$MR = a * e^{(-k*t)} + c$	[50]
Midilli	$MR = a * e^{(-k*t^n)} + b * t$	[51]
İki Terimli	$MR = a * e^{(-k_1*t)} + b * e^{(-k_2*t)}$	[52]
İki Terimli Üstel	$MR = a * e^{(-k*t)} + (1-a) * e^{(-k*a*t)}$	[53]
Difüzyon Yaklaşımı	$MR = a * e^{(-k*t)} + (1-a) * e^{(-k*b*t)}$	[54]
Verma	$MR = a * e^{(-k*t)} + (1-a) * e^{(-g*t)}$	[55]
Modifiye Henderson ve Pabis	$MR = a * e^{(-k*t)} + b * e^{(-g*t)} + c * e^{(-h*t)}$	[56]
Kaleta ve ark. Model 1	$MR = a * e^{(-k*t^n)}$	[57]
Kaleta ve ark. Model 2	$MR = a * e^{(-k*t^n)} + b * e^{(-g*t^n)}$	[57]
Kaleta ve ark. Model 3	$MR = a * e^{(-k*t^n)} + (1-a) * e^{(-g*t^n)}$	[57]

Enerji Analizi

Genel enerji korunumu, kontrol hacimdeki her bir zaman dilimini dikkate alınarak incelenmiştir (Denklem (8)). Verilen enerjinin bir kısmı üründe sıcaklık artışına ve kütle kaybına sebep olurken, diğer kısım kayıp (Q_k) olarak kabul edilmiştir (Denklem (9)).

$$\sum E_{\mathrm{g}} = \sum \mathrm{E}_{\mathrm{ç}} + Q_k \quad (8)$$

$$E_{\mathrm{b}} + W_{kfkk} = E_{\mathrm{s}} + E_{\mathrm{bs}} + Q_k \quad (9)$$

Sistemler için kurulan enerji denkliğinde elde edilen kayıp enerji terimi (Q_k), sistemlerde işlem sırasında ürün yüzeyi ile ortam arasında meydana gelen ısı aktarımını, ışık enerjisini ve diğer enerji kayıpları temsil etmektedir. Karbon fiber destekli kabin kurutucu sistemlerinde kurutma işlemleri sırasında tüketilen güç değerleri her bir işlem saniyesi (t, s) sırasında kaydedilen voltaj (V, volt), akım (I, amper) değerleri kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem (10)).

$$W_{kfkk} = \sum VIt \quad (10)$$

Sistemin enerji denkliği Denklem (11) belirtildiği gibi;

$$m_{\mathrm{b}}\mathrm{x}h_{\mathrm{b}} + W_{kfkk} = m_{\mathrm{s}}\mathrm{x}h_{\mathrm{s}} + m_{\mathrm{bs}}\mathrm{x}h_{\mathrm{fg}} + Q_k \quad (11)$$

Elma örneklerinin Cp değeri, sıcaklığa ve kompozisyona bağlı ilişkiyi veren Denklem (12-17)'deki gibi hesaplanmıştır [58]. Gıdanın Cp değeri hesaplamasında '*X*' elma örneklerinin kütlesel kompozisyon dağılımlarını temsil etmektedir.

$$Cp_{yağ} = 1.9842 + 1.4733x10^{-3}T - 4.8008x10^{-6}T^2 \quad (12)$$

$$Cp_{kül} = 1.0926 + 1.8896x10^{-3}T - 3.6817x10^{-6}T^2 \quad (13)$$

$$Cp_{protein} = 2.0082 + 1.2089x10^{-3}T - 1.3129x10^{-6}T^2 \quad (14)$$

$$Cp_{su} = 4.1762 - 9.0864x10^{-5}T + 5.4731x10^{-6}T^2 \quad (15)$$

$$Cp_{karbonhidrat} = 1.5488 + 1.9625x10^{-3}T - 5.9399x10^{-6}T^2 \quad (16)$$

$$Cp = Cp_{su}X_{su} + Cp_{yağ}X_{yağ} + Cp_{kül}X_{kül} + Cp_{protein}X_{protein} + Cp_{karbonhidrat}X_{karbonhidrat} \quad (17)$$

Elma örneklerinin başlangıç (h_b) ve son entalpi değerleri (h_s) Denklem (18)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$\mathrm{h} = \mathrm{Cp(T)} \times \mathrm{T} \quad (18)$$

Kurutma sistemindeki enerji verimliliğinin (η_I) hesaplamasında aşağıda belirtilen Denklem (19) kullanılmıştır.

$$\eta_I = \left(\frac{Q_{bs}}{W_{kfkk}}\right)x100 \quad (19)$$

Ekserji Analizi

Ekserji, enerjiden farklı olarak, tersinmez ve atıklarla orantılı bir şekilde sistemdeki entropi üretimini incelemektedir. Başka bir deyişle Termodinamiğin 1. ve 2. yasalarını birlikte inceleyebilmektedir. Dolayısıyla, ekserji analizi ile sistemdeki tersinmezlikler belirlenebilmekte, enerji kayıpları minimize edilebilmekte ve kullanılmadan atılan enerjinin değerlendirilmesi sağlanabilmektedir.

Sistemin ekserji analizinin inceleyebilmek için elma örneklerinin başlangıç (b) ve son (s) entropileri Denklemi (20)'deki gibi hesaplanmıştır. '*i*' indeksi b ve s durumunu temsil etmektedir.

$$s_i = m_i \left(\frac{cp_i + cp_o}{2}\right) x \ln \frac{T_i}{T_o} \quad (20)$$

Sistem için ekserji denkliği genel olarak Denklem (21) ve (22)'deki gibi düzenlenmiştir.

$$\sum Ex_{\mathrm{g}} = \sum \mathrm{Ex}_{\mathrm{ç}} + Ex_{yıkım} \quad (21)$$

$$Ex_{\mathrm{b}} + Ex_{kfkk} = Ex_{\mathrm{s}} + Ex_{\mathrm{bs}} + Ex_{yıkım} \quad (22)$$

Örneklerin başlangıç, son ekserjileri ile buharlaşan suyun ekserjileri sırasıyla Denklem (23), (24), ve (25) ile hesaplanmıştır.

$$Ex_{\mathrm{b}} = m_b[h_b - T_o s_b] \quad (23)$$

$$Ex_{\mathrm{s}} = m_s[h_s - T_o s_s] \quad (24)$$

$$Ex_{\mathrm{bs}} = m_{bs}\left[h_{fg} - T_o s_{fg}\right] \quad (25)$$

KFKK kurutucusunda verilen ekserji Denklem (26)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$Ex_{kfkk} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{ortam}}\right) x W_{kfkk} \quad (26)$$

Ekserji yıkımı, kurutma işleminin ekserji denkliğini kontrol etmek amaçlı kullanılır (Denklem (27)).

$$Ex_{\mathrm{yıkım}} = S_{birikim} T_o \quad (27)$$

Kurutma sistemindeki enerji verimliliğinin (η_{II}) hesaplamasında aşağıda belirtilen Denklem (28) kullanılmıştır.

$$\eta_{II} = \left(\frac{Ex_{bs}}{Ex_{kfkk}}\right) x100 \quad (28)$$

Ekserji analizinin uygulanma amacına göre, uygulandığı işlem veya sistemdeki geliştirme olanaklarını belirlemek açısından geliştirilmiş olan "geliştirme potansiyeli (GP)" terimi de hesaplanmıştır (Denklem (29)) [59]. GP teriminde kullanılan işleme giren ekserji (Ex_g) değeri, kurutucun verdiği ekserji (Ex_{kfkk}) ile başlangıç elma örneklerinin ekserji (Ex_{b}) değerlerini ifade ederken, işlemden çıkan ekserji değeri ($Ex_ç$) kurutma sonundaki elma örneklerinin ekserji (Ex_s) değeri ile örnekten buharlaşan suyun ekserji (Ex_{bs}) değerlerini ifade etmektedir.

$$\mathrm{GP} = (1 - \eta_{II})(Ex_{\mathrm{g}} - Ex_{\mathrm{ç}}) \quad (29)$$

Ayrıca kurutma işleminde sistemden uzaklaşan su buharı miktarı ile sistemin verdiği enerji arasındaki ilişkiyi veren özgül nem kaybı hızı Denklem (30)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Özgül nem kaybı hızı} = \left(\frac{kg\ buharlaşan\ su}{kJ_{kfkk}}\right) \quad (30)$$

Varsayımlar

i. Ölü durumdaki sıcaklık (T_o) 10°C, basınç ise 1 atm olarak varsayılmıştır.
ii. Uzaklaşan suyun entalpi ve entropi değerleri, ürünün sıcaklığı kabul edilerek dikkate alınmıştır.
iii. Potansiyel ve kinetik enerji ihmal edilmiştir.

İstatistiksel Değerlendirme

Çalışma süresince, bütün kurutma denemeleri 3 tekerrürlü olarak yapılmıştır. Elma örneklerinin kurutulması işleminde uygulanan farklı koşulların ince tabaka modelleme katsayılarına, enerji ve ekserji verimlilikleri üzerine etkisi İstatistik Paket Programı (SPSS, ver. 22, 2013) kullanılarak değerlendirilmiştir. Kurutma işleminin ince tabaka model eşitliklerinin katsayıları ve en yüksek düzeltilmiş belirleme katsayısı (R^2) değerleri Doğrusal Olmayan Regresyon analizi ile belirlenmiştir. Ayrıca uygulanan ince tabaka modellerinin deneysel verilere uyumluluklarının incelendiği, en düşük indirgenmiş ki-kare (χ^2) ve en düşük hata kareleri ortalamasının karekökü (RMSE) değerleri arasındaki farklılıklar belirlenmiştir. Güven seviyesi %95 olarak kabul edilmiştir. Tek yönlü varyans analizi kullanılmış ve önemli farklılıklar Duncan çoklu fark testi ile tespit edilmiştir. χ^2 ve RMSE değerleri aşağıda verilen denklemlere göre hesaplanmıştır (Denklem 31-32):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{dny,i} - MR_{bkl,i})^2}{N-n} \quad (31)$$

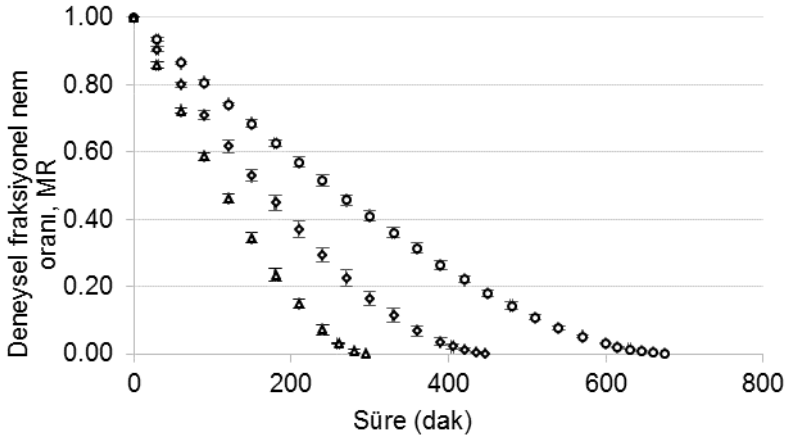
$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{bkl,i} - MR_{dny,i})^2\right]^{1/2} \quad (32)$$

Burada, $MR_{dny,i}$ değeri i.deneysel gözlemde ölçülen değer, $MR_{bkl,i}$ değeri modeldeki i.gözlemde beklenen değer, N gözlem sayısı ve n kullanılan modeldeki katsayı adedidir.

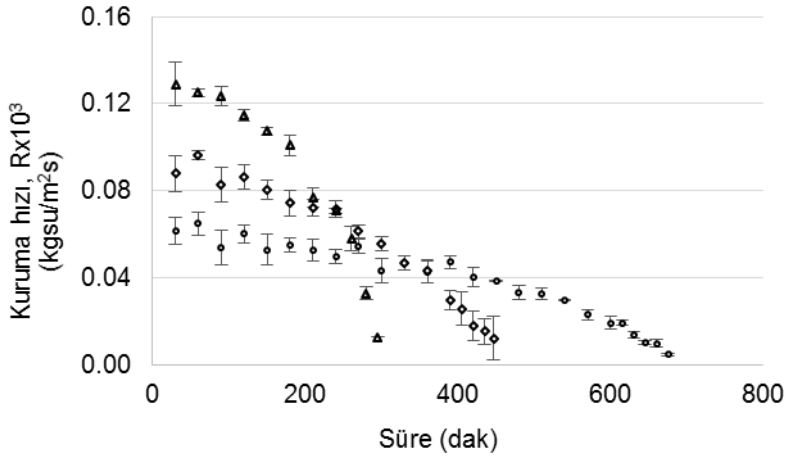
BULGULAR ve TARTIŞMA

Kuruma Süresi

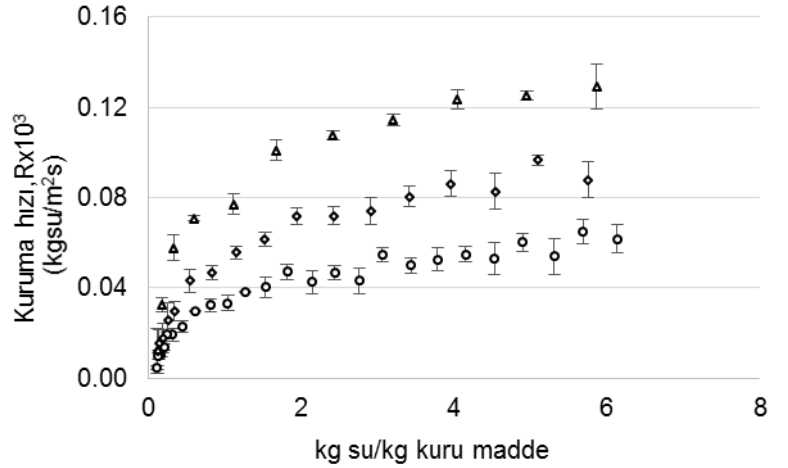
Kurutma işleminin başlangıcında ortalama nem içeriği %86±2 olan elma dilimleri %10±0.6 nem içeriğine kadar kurutulmuştur. Farklı kurutma sıcaklıklarının elma örneklerinin kuruma davranışı üzerine etkilerini daha detaylı karşılaştırmak amacıyla, fraksiyonel nem oranının (MR) zamana bağlı değişimi (Şekil 2) incelenmiştir. Beklendiği gibi, kurutma sıcaklığı arttıkça kuruma süresi azalmaktadır. Ayrıca, elma örneklerinden saniyede birim alandan uzaklaşan suyu temsil eden kurutma hızının (R, kg su/m^{2}s), zamana ve kuru madde başına düşen su içeriğine bağlı değişimi Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir. KFKK sisteminde, örneklerinin kurutma sıcaklığı arttıkça elma dilimlerinden suyun uzaklaşma hızının arttığı belirlenmiştir.



Şekil 2: Farklı sıcaklıklarda kurutulan elma örneklerinin kuruma süresine karşı fraksiyonel nem oranı değişimi (○ 60°C; ◊ 70°C; Δ 80°C)



Şekil 3: Farklı sıcaklıklarda kurutulan elma örneklerinin kuruma süresine karşı kuruma hızı (○ 60°C; ◊ 70°C; Δ 80°C)



Şekil 4: Farklı sıcaklıklarda kurutulan elma örneklerinin serbest nem içeriğine karşı kuruma hızı (○ 60°C; ◊ 70°C; Δ 80°C)

İnce Tabaka Kurutma Modelleri İle Kuruma Davranışının Belirlenmesi

Elma örneklerinin kurutma davranışını karakterize etmek amacıyla, deneysel veriler ile elde edilen MR-zaman değerlerinin 14 farklı ince tabaka modeline (Tablo 1) uyumlulukları incelenmiştir. Farklı ince tabaka modellerinin deneysel kuruma eğrileriyle uyumları incelenmiş, farklı sıcaklıklarda kurutulan elma örneklerinin kurutma hızı katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen model katsayıları doğrusal olmayan regresyon analizi ile belirlenmiştir. On dört farklı model içerisinde yüksek R^2, düşük χ^2 ve düşük RMSE değerleri dikkate alınarak uyum sağlayan ilk 4 modelin uyum istatistikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. "Karbon fiber destekli kabin kurutucuda elma örneklerinin kurutulması işleminde en yüksek R^2 değerlerini, en düşük x^2 ve RMSE değerlerini içeren modelin 'Difüzyon Yaklaşım' modeli olduğu belirlenmiştir"

Literatürde yer alan sadece 2 farklı çalışmada, KFKK kurutucuda kurutma işleminin ince tabaka modellemesi incelenmiştir. Meyankökünün karbon fiber destekli kabin kurutucuda kurutulması ile ilgili yapılan bir çalışmada, 65±0.1°C ve 0.8 m/s hava hızında kurutulan meyankökünde, Lewis modelinin kuruma karakteristiğini en iyi ifade eden model olduğu belirtilmiştir [21]. Başka bir çalışmada ise, KFKK sisteminde meyan kökünün 90°C'de kurutulması sırasında kurutma davranışını en iyi Page modelinin ifade ettiği rapor edilmiştir [22]. Literatürde KKFK kurutucu sistemi dışında yer alan konvektif kurutucu sistemlerinde genellikle 32-80°C sıcaklık ve 0.25-5 m/s hava hız aralıkları içerisinde kurutulmuş farklı boyutlardaki meyve örneklerinin ince tabaka modellerinde genellikle Page, Logaritmik ve Midilli modellerin uygun olduğu görülmektedir [4]. Yapılan çalışmalar ışığında, kurutucu sistemi değiştikçe, kurutma koşulları ve hammadde çeşidine göre ince tabaka modellerinin uyumunun, elde edilen hız sabitlerinin değerlerinin değiştiğini ve bu sebeple farklı sistemlerde farklı kuruma davranışları tespit edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 2. KFKK sisteminde farklı sıcaklıklarda kurutulan elma örneklerinin kurutma davranışını en iyi ifade eden ince tabaka modellerinin istatistiksel uyum sonuçları

Sıcaklık (°C)	Model	Model Katsayıları	R^2	χ^2	RMSE
60	Lewis (Newton)	$k= 5.777x10^{-5}$	0.950±0.0036[a]	0.0054±0.0004[a]	0.0719±0.0027[a]
	İki Terimli	$k_1=k_2=6.325x10^{-5}$, a=0.551, b=0.551	0.961±0.0035[b]	0.0047±0.0004[a]	0.0632±0.0028[a]
	İki Terimli Üstel	$k=1.242$, $a=0.320\ x10^{-5}$	0.950±0.0036[a]	0.1185±0.0980[b]	0.2917±0.1908[b]
	Difüzyon Yaklaşımı	**$k=0.143x10^{-5}$,a=-64.42, b=0.984**	**0.987±0.0021[c]**	**0.0015±0.0002[a]**	**0.0360±0.0028[a]**
70	Lewis (Newton)	$k=8.955\ x10^{-5}$	0.952±0.0036[a]	0.0054±0.0004[b]	0.0714±0.0026[c]
	İki Terimli	$k_1=k_2=9.577x10^{-5}$, a=0.548, b=0.550	0.962±0.0020[b]	0.0053±0.0003[b]	0.0640±0.0015[b]
	İki Terimli Üstel	$k=1.753$, $a=5.105x10^{-5}$	0.952±0.0036[a]	0.0057±0.0004[b]	0.0714±0.0026[c]
	Difüzyon Yaklaşımı	**k=0.009, a=-0.1915 b=0.0115**	**0.971±0.0021[c]**	**0.0038±0.0003[a]**	**0.0561±0.0019[a]**
80	Lewis (Newton)	$k=0.1337x10^{-5}$	0.949±0.0036[a]	0.0063±0.0004[b]	0.0757±0.0020[c]
	İki Terimli	$k_1=k_2=0.144\ x10^{-5}$, a=0.540 b=0.544	0.958±0.0035[b]	0.0073±0.0005[b]	0.0686±0.0019[b]
	İki Terimli Üstel	$k=2.685$, $a=4.986\ x10^{-5}$	0.949±0.0036[a]	0.0070±0.0004[b]	0.0757±0.0020[c]
	Difüzyon Yaklaşımı	**k=0.0113, a=-0.2373 b=0.0137**	**0.973±0.0035[c]**	**0.0046±0.0010[a]**	**0.0582±0.0056[a]**

[a,b,c]; 60, 70 ve 80°C deki kolonlara ait farklı harflendirmeler ince tabaka modeller arasındaki farklılığı göstermektedir ($p<0.05$)

Efektif Difüzivite Değeri

KFKK sisteminde elma dilimlerinin 60, 70 ve 80°C de kurutulması sırasında efektif difüzivite değerleri, yüksek düzeltilmiş belirleme katsayısı değerleri (R^2 >0.83) ile sırasıyla $3.02x10^{-10}$, $2.06x10^{-10}$ ve $4.56x10^{-10}$ m^2/s olarak tespit edilmiştir. Literatürde konvektif kurutucularda gıdaların kurutulmasında D_{eff} değerlerinin incelendiği çalışmaların çoğunda (%86.2) D_{eff} değerinin 10^{-10} ve 10^{-8} m^2 /s arasında olduğunu rapor edilmektedir [4]. Literatürde, sıcak havalı konvektif kurutucuda 40, 50 ve 60°C de 0.8 m/s hava hızında 5 mm ve 9 mm kalınlığında elma dilimlerinin kurutulmasında D_{eff} değerleri $2.27x10^{-10}$ ve $4.97x10^{-10}$ m^2/s aralığında bulunduğu rapor edilmiştir [13]. Bir başka çalışmada da, konvektif silikon kurutucu da 60, 70 ve 80 °C de 1-1.5 m/s hava hızında 12.5 mm ve 8 mm kalınlığında elma dilimlerinin kurutulmasında efektif difüzivite değerleri (D_{eff}) $8.41x10^{-10}$ ve $20.60\ x10^{-10}$ m^2/s aralığında olduğu rapor edilmiştir [14]. Bu çalışmada yeni bir ısıtma kaynağı tasarımına sahip olan ve durağan hava ortamında kurutma işlemi uygulayan KFKK sisteminde de elma dilimlerinin kurutulması sırasında, hava akımlı konvektif kurutuculardakine benzer efektif difüzivite değerlerinin bulunması dikkati çekmektedir. Isıtma işleminin ışınım, doğal taşınım ve iletim mekanizmalarının etkin kullanımı ile sağlanmış olmasının hava hızı gerektirmeksizin benzer kurutma davranışlarına neden olmuş olabileceği düşünülmektedir.

Enerji ve Ekserji Verimlilikleri

Bu çalışmada enerji-ekseji analizlerinde kullanılmak üzere kurutma boyunca elma yüzeylerinin sıcaklıkları termal kamera ile ölçülmüştür. Ölçümler kurutma süresince 30 dakika aralıklarla son kuruma sürelerinde ise 15 dakika alarak sıcaklık dağılımı tespiti yapılmış ve değerlendirilmiştir. 60, 70 ve 80°C'de kurutulan elma dilimi örneklerinin 270. dakikada yüzey sıcaklıklarının sırasıyla ortalama 46.5°C, 49.3°C, 68.1°C aralığında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5). Kurutma işlemi sırasında aynı zaman periyodunda farklı su içeriğine sahip örneklerin yüzey sıcaklıklarının da farklı olduğu belirlenmiştir.

Elma dilimlerinin KFKK sisteminde kurutulması işleminin enerji verimliliği %10.51-13.12 değerleri arasında tespit edilmiştir. Sıcaklık arttıkça enerji verimliliğinin arttığı, en yüksek enerji verimliliğinin 80°C'de olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). Ekserji verimliliği ise %9.44-11.64 değerleri arasında tespit edilmiş ve en yüksek ekserji verimliliği benzer şekilde 80°C olarak tespit edilmiştir ($p<0.05$) (Tablo 3 ve 4).

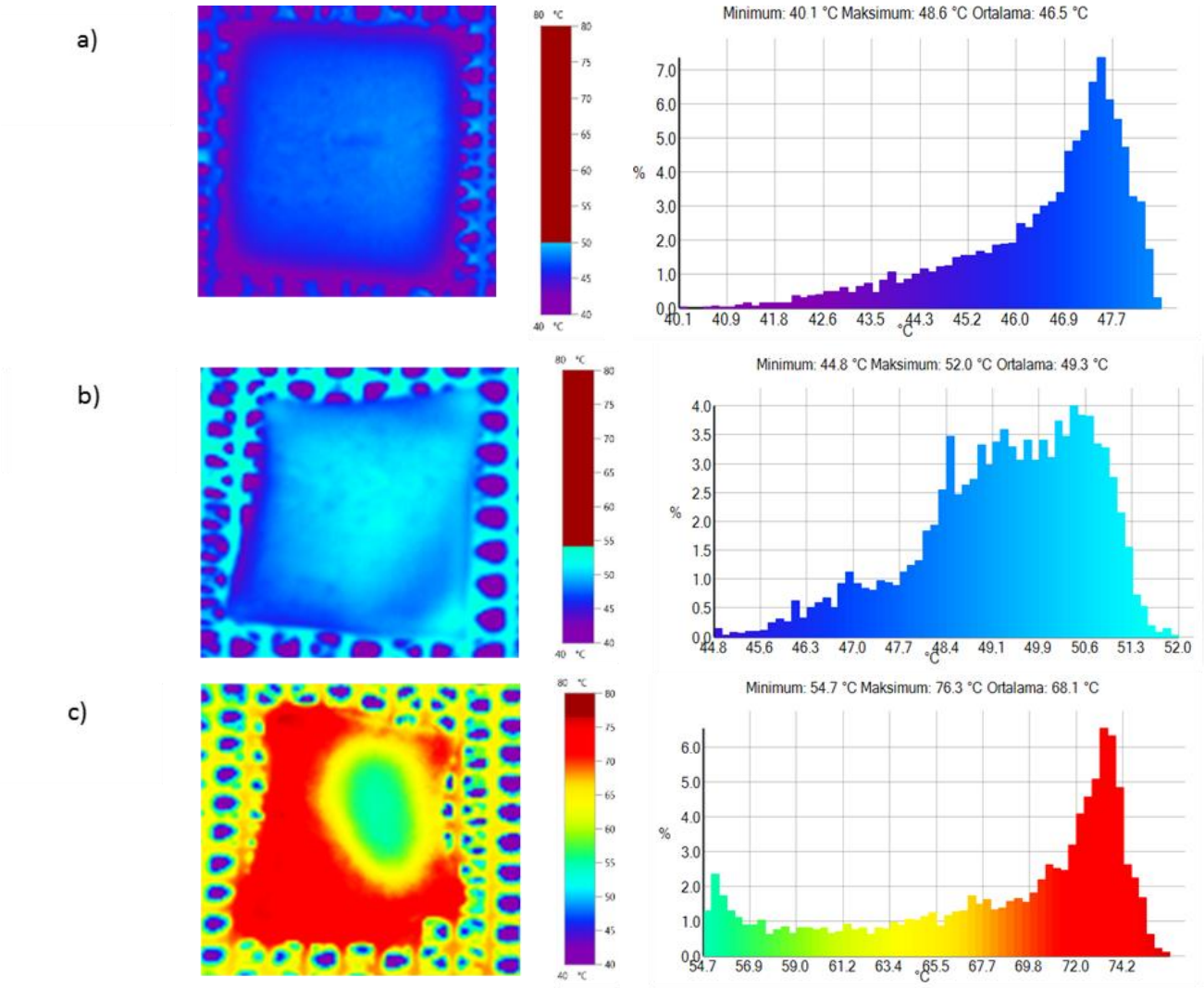
Kurutma sıcaklığı arttıkça, kurutma süresinin azalmasıyla birlikte KFKK sisteminin tükettiği enerjide azalma belirlenmiştir ($p<0.05$). Kurutmanın sonunda elma dilimlerinin yüzey sıcaklıklarında, kurutma ortam sıcaklıklarından kaynaklanan farklılıklar gözlenmiştir. Kurutma sıcaklığı arttıkça toplam işlem süresi azaldığı için, KFKK sisteminin tükettiği enerjide azalma gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak kurutma işleminde meydana gelen toplam enerji kaybında azalma ve işlem enerji verimliliklerinde artma tespit edilmiştir. Farklı kurutma sıcaklıklarında, sistemden uzaklaşan suyun sıcaklıkları farklıdır ve sıcaklık arttıkça buharlaşma gizli ısısı değerlerinde azalma gözlemlenmektedir (Tablo 3).

Ekserji analiz sonuçları incelendiğinde, kurutma başlangıcında elma örnekleri aynı ekserji değerlerine sahip iken, kurutma sonunda en düşük ekserji değerine 60°C'de ulaşılmıştır ve 70-80°C kurutma sıcaklığında istatistiksel olarak benzer sonuçlar gözlemlenmektedir. Farklı sıcaklıklarda uzaklaşan suyun buharlaşma entropisi değerlerinin değişmesi nedeniyle ekserji değerleri de etkilenmektedir. Bununla birlikte, her bir 10°C sıcaklık artışı için KFKK kurutucu sisteminde tüketilen enerjideki değişim oranının, ekserji değerlerindeki değişim oranlarından farklı olduğu saptanmıştır. KFKK sisteminde ekserji verimliliği ise sıcaklık arttıkça artış göstermektedir (Tablo 4).

Literatürde benzer şekilde tepsili kurutucuda 40 ve 93°C sıcaklıkları aralıklarında ve 0.5-1.5 m/s hava hızlarında kurutulan meyve ve sebze örneklerinin ekserji verimliliklerinin %3.17-100 değerleri arasında olduğu bilgisi yer almaktadır [10]. Literatürde karbon fiber destekli kabin kurutucunun enerji ve ekserji analizleri üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. KFKK sisteminde yapılan çalışmalardan birinde [23]; zeytin yapraklarının 70°C sıcaklıklarında kurutulma işleminin enerji verimliliklerinin kurutma işleminin başlangıcında %20.48±1.71, kurutma işleminin sonunda ise %7.02±1.15 olduğu rapor edilmiştir. Aynı çalışmada ekserji verimliliği ise kurutma işleminin başlangıcında sırasıyla %15.58±0.68 iken kurutma işleminin sonunda ise %2.03±1.41 olduğu rapor etmişlerdir [23]. Başka bir çalışmada, meyan kökünün KFKK kurutucu sisteminde 90°C sıcaklıkta kurutulması işleminin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %40.2, %30.63 olarak belirtilmiştir [22]. Güncel bir başka çalışmada ise, KFKK sisteminde 55, 60 ve 65°C'de 0.8±0.05 m/s hava hızında kurutulan ince tabaka çilek örneklerinin enerji verimlilikleri %26.83 - 31.66 arasında iken, ekserji verimliliği %24.62-29.83 arasında tespit edilmiş ve sıcaklık arttıkça enerji-ekserji verimliliğinin arttığını rapor etmişlerdir ($p<0.05$) [24].

Elma dilimlerinin KFKK kurutucu sisteminde kurutma işleminin geliştirme potansiyelleri farklı sıcaklıklarda farklı değerler göstermektedir ($p<0.05$) (Şekil 6). Geliştirme potansiyeli en yüksek olan 70°C kurutma sıcaklığında gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, 70°C kurutma sıcaklığında işleme giren ve çıkan ekserji farkını gösteren ekserji yıkım değerinin daha yüksek olması ve kurutucu sisteminde tüketilen ekserji değerlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Kurutma işleminde elde edilen özgül nem kaybı hızları 60, 70 ve 80°C sıcaklıkları için sırasıyla $4.44*10^{-5}$±0.00, $4.85*10^{-5}$±0.00, $5.63*10^{-5}$±0.00 kg buharlaşan su/ kJ dir. Sıcaklık arttıkça, kurutma işleminin özgül nem kayıp hızı artmaktadır ($p<0.05$).

Yapılan çalışma sonuçları literatürdeki bulgularla karşılaştırıldığında, KFKK sisteminde elma dilimlerinin kurutulması işleminin enerji ve ekserji verimlilikleri meyan kökü, zeytin yaprağı ve çilek örneklerine nazaran daha düşük çıkmıştır. Ayrıca tepsili kurutucuda gerçekleştirilen kurutma işlemlerindeki değerlere göre de farklılık içermektedir. Çalışmalarda elde edilen bu farklılıkların nedeninin hesaplamalarda ölü faz değerlerinin farklı alınması, kurutma ortam sıcaklıklarının farklı olması, örnek çeşitliliği ve enerji ve ekserji verimliliklerinin hesaplama yönteminin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5. Elma diliminin KFKK sisteminde farklı kurutma sıcaklıklarında kurutulması sırasında (270. dakika) yüzey sıcaklıkları dağılımı; a) 60°C, b) 70°C, c) 80°C

Tablo 3. KFKK sisteminde elma dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kurutulması işleminin enerji analizi sonuçları

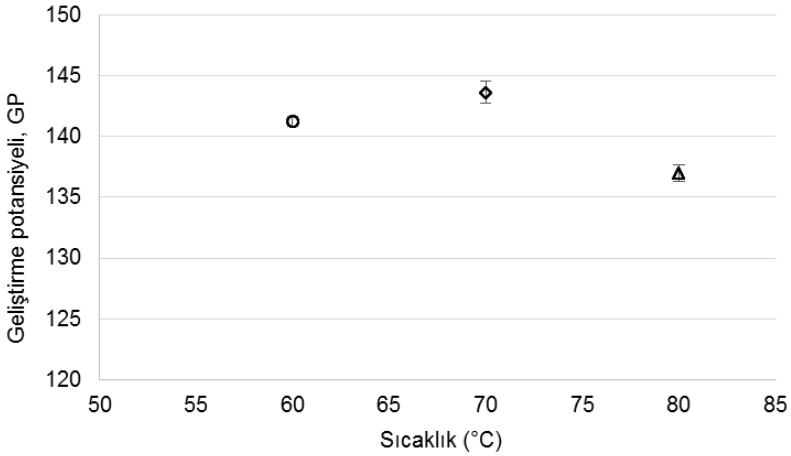
Sıcaklık (°C)	Q_{kfkk} (kJ)	Q_{bs} (kJ)	Q_b (kJ)	Q_s (kJ)	$Q_{kayıp}$ (kJ)	η_I (%)
60	1114.60±3.54^{c}	117.19±1.11^{b}	3.23±0.03^{a}	0.74±0.01^{a}	999.90±4.60^{c}	10.51±0.13^{a}
70	1007.40±7.78^{b}	114.79±1.09^{a}	3.16±0.07^{a}	0.91±0.03^{b}	894.86±4.96^{b}	11.40±0.07^{b}
80	867.4±11.63^{a}	113.77±0.68^{a}	3.17±0.12^{a}	1.04±0.12^{b}	755.51±11.67^{a}	13.12±0.18^{c}

^{a,b,c}; kolonlara ait farklı harflendirmeler enerji analiz sonuçları arasındaki farklılığı göstermektedir ($p<0.05$)

Tablo 4. KFKK sisteminde elma dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kurutulması işleminin enerji analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Ex_{kfkk} (kJ)	Ex_{bs} (kJ)	Ex_b (kJ)	Ex_s (kJ)	$Ex_{yıkım}$ (kJ)	η_{II} (%)
60	171.85±0.72^{a}	16.23±0.17^{a}	0.08±0.00^{a}	-0.29±0.00^{a}	156.00±0.00^{a}	9.44±0.06^{a}
70	178.14±1.14^{c}	18.40±0.18^{b}	0.08±0.00^{a}	-0.34±0.01^{a,b}	160.15±1.00^{b}	10.33±0.06^{b}
80	174.93±1.11^{b}	20.37±0.32^{c}	0.08±0.01^{a}	-0.36±0.04^{b}	155.00±0.85^{a}	11.64±0.12^{c}

^{a,b,c}; kolonlara ait farklı harflendirmeler ekserji analiz sonuçları arasındaki farklılığı göstermektedir ($p<0.05$)



Şekil 6. KFKK sisteminde elma dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kurutulması işleminin Geliştirme Potansiyeli (GP)

SONUÇ

Bu çalışmada, kabin kurutucuya alternatif bir ısıtma kaynağının entegre edilmiş olduğu karbon fiber destekli kurutucu sistemi kullanılmıştır. KFKK'da farklı sıcaklıklarda (60, 70 ve 80°C) kurutulan elma dilimlerinin kuruma davranışı incelenmiş ve işlemin performansının belirlenmesi için enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Kurutma sıcaklığı arttıkça elma dilimlerinin kuruma süresinin azaldığı ve kuruma hızının arttığı belirlenmiştir. İncelenen on dört farklı ince tabaka modelleri içerisinden 'Difüzyon Yaklaşım' modelinin en uygun model olduğu tespit edilmiştir. Sistemin performans analizinde en yüksek enerji ve ekserji verimliliğinin 80°C'de elde edildiği saptanmıştır. Bu çalışmanın, KFKK sisteminde gıdaların kurutulması için yapılan güncel çalışmalardan biri olması ve elma dilimlerinin kurutulmasına uygulanabilirliğinin incelenmesi konusunda ilk çalışma olması açısından literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir. KFKK sistemlerinde gıdaların kurutulması amacıyla yapılacak çalışmalarda, hava hızı, örnek miktarı, örnek boyutu, uygulama gücü gibi işlem parametrelerindeki farklılıklarının etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, karbon fiber destekli kabin kurutucunun temin edilmesinde, kurulumunda ve araştırma-geliştirme aşamasında teknik destek veren Denizkızı Isıtma ve Soğutma Sistemleri (İzmir) firmasına teşekkür ederiz. Ayrıca, bu çalışma "Karbon fiber destekli kabin kurutucuda elma kurutulmasının deneysel ve kuramsal incelenmesi ve işlemin enerjetik/ekserjetik değerlendirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinin bir bölümünü kapsamaktadır ve Ege Üniversitesi 16 MÜH 114 nolu Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) kapsamında maddi olarak desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Tarhan, S., Ergüneş, G., Güneş, M., Mutlu, A., 2009. Farklı Kurutma Koşullarının Amasya Elmasının Kuruma Süresi ve Kalitesi Üzerine Etkileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi* 2(2): 1-6.

[2] TÜİK. Bitkisel Üretim İstatistikleri. http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18706 (08.01.2017).

[3] Doymaz, I., Tugrul, N., Pala, M., 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering* 77(3): 559–565.

[4] Erbay, Z., Icier, F., 2010. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 50(5): 441-464.

[5] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Hassan-Beygi, SR., 2010. Drying and rehydration characteristics of sour cherry (*Prunus cerasus* l.). *Journal of Food Processing and Preservation* 34(3): 351–365.

[6] Ertekin, C,. Yaldiz O,. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering* 63(3): 349-359.

[7] Adom, K.K., Dzogbefia, V.P., Ellis, W.O., 1997. Combined effect of drying time thickness on the solar drying of okra. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 73(3): 315–320.

[8] Midilli, A., 2001. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in solar drying system. *International Journal of Energy Research* 25(8): 715–725.

[9] Doymaz, I., Pala, M., 2002. Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering* 55(4): 331–335.

[10] Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madadlou, A., 2013. A review on exergy analysis of drying processes and systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22: 1-22.

[11] Menges, H.O., Ertekin, C., 2006. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering* 77(1): 119–125.

[12] Akpinar, E.K., 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering* 73(1):75–84.

[13] Sacilik, K., Elicin, A.K., 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering* 73(3): 281-289.

[14] Akpinar, E.K., Bicer, Y., Midilli, A., 2003. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *Journal of Food Process Engineering* 26(6): 515-541.

[15] Çelen, S., Kahveci, K., 2013. Microwave drying behaviour of apple slices. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E, Journal of Process Mechanical Engineering* 227(4): 264-272.
[16] Toğrul, H., 2005. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering* 71(3): 311-323.
[17] Blanco-Cano, L., Soria-Verdugo, A., Garcia-Gutierrez, L.M., Ruiz-Rivas, U., 2016. Modeling the thin-layer drying process of Granny Smith apples: Application in an indirect solar dryer. *Applied Thermal Engineering* 108: 1086-1094.
[18] Aktaş, M., Ceylan, İ., Yilmaz, S., 2009. Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer. *Desalination* 239(1): 266-275.
[19] Çakmak, K., 2013. Drying ovens for fruits and vegetables with a possibility of possibility of solar panel integration. Turkish Patent No:12 TR 97NA 3PJR. Turkish Patent Institude.
[20] Icier, F., Cokgezme O.F., Sabanci, S., 2016. Alternative thawing methods for the blanched/non-blanched potato cubes: microwave, ohmic, and carbon fiber plate assisted cabin thawing. *Journal of Food Process Engineering* (doi:10.1111/jfpe.12403) (Basımda).
[21] Çokgezme, O.F., Çevik, M., İçier, F., Sabancı, S., Tezcan, D., Çakmak, K., 2015. Drying of licorice in carbon fiber assisted drier". *The 3rd International Symposium on Traditional Foods from Adriatic to Caucasus*, October 01-04, 2015, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Book of Proceedings, 508p.
[22] Özmen, D., 2016. Meyankökünün kurutulmasında alternatif kurutma yöntemlerinin etkilerinin incelenmesi, kurutma kinetiğinin ve işlem performansının değerlendirilmesi. Lisans Bitirme Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
[23] Doğan, K., Güneş, D., Yılmaz, S., 2015. Alternatif kurutma sistemlerinin enerjetik ve ekserjetik değerlendirmesi. Lisans Bitirme Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
[24] Cokgezme, O.F., Cevik, M., Doner, D., Sabanci, S., 2016. Performance Evaluation of Carbon Fiber Assisted Cabin Dryer during the Drying Process of Strawberry Slices. *3rd International Conference On Thermophysical And Mechanical Properties Of Advanced Materials*, September 1 – 3, 2016, Izmir, Turkey, Book of Proceedings, 25p.
[25] Midilli, A., Kucuk, H., 2003. Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy* 28(6): 539-556.
[26] Akpinar, E.K., 2004. Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 31(8): 1165-1176.
[27] Akpinar, E., Midilli, A., Bicer, Y., 2005. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management* 46(15): 2530-2552.
[28] Akpinar, E., Midilli, A., Bicer, Y., 2005. Thermodynamic analysis of the apple drying process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 219(1): 1-14.
[29] Akpinar, E., Midilli, A., Bicer, Y., 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering* 72(4): 320-331.
[30] Ozgener, L., Ozgener, O., 2006. Exergy analysis of industrial pasta drying process. *International Journal of Energy Research* 30(15): 1323-1335.
[31] Ozgener, L., Ozgener, O., 2009. Exergy analysis of drying process: An experimental study in solar greenhouse. *Drying Technology* 27(4): 580-586.
[32] Syahrul, S., Dincer, I., Hamdullahpur, F., 2003.Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. *International Journal of Thermal Sciences* 42(7): 691-701.
[33] Dincer, I., Sahin, A.Z., 2004. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47(4): 645-652.
[34] Kuzgunkaya, E.H., Hepbasli, A., 2007. Exergetic performance assessment of a ground-source heat pump drying system. *International Journal of Energy Research* 31(8): 760-777.
[35] Liu, Y., Zhao, Y., Feng, X., 2008. Exergy analysis for a freeze-drying process. *Applied Thermal Engineering* 28(7): 675-690.
[36] Erbay, Z., Icier, F., 2011. Energy and exergy analyses on drying of olive leaves (Olea europaea L.) in tray drier. *Journal of Food Process Engineering* 34(6): 2105-2123.
[37] Çolak, N., Kuzgunkaya, E., Hepbasli, A., 2008.Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer. *Journal of Food Process Engineering* 31(3): 281-298.
[38] Corzo, O., Bracho, N., Vásquez, A., Pereira, A., 2008. Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices. *Journal of Food Engineering* 86(2): 151-161.
[39] Nazghelichi, T., Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., 2011. Optimization of an artificial neural network topology using coupled response surface methodology and genetic algorithm for fluidized bed drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 75(1): 84–91.
[40] Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2006. Thermodynamics: an Engineering Approach (5th Ed.). McGraw Hill, New York, NY.
[41] Yildiz, H., Icier, F., Eroglu, S., Dagci, G., 2016. Effects of electrical pretreatment conditions on osmotic dehydration of apple slices: Experimental investigation and simulation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 35: 149-159.
[42] Singh, R.P., Heldman, D.R., 2009. Introduction to food engineering (4th ed.). Academic Press, London, UK, 777p.
[43] AOAC, 1990. Dry matter content. In Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, Method No. 920.151 (K.Helrich, ed.) AOAC, Inc., Washington, DC.
[44] Geankoplis, J.C., 2003. Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)(4th Ed.). Prentice Hall Press, 410-512p.

[45] Kaleta, A., Górnicki, K., 2010. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. *International Journal of Food Science and Technology* 45(5): 891-898.
[46] Lewis, W.K., 1921. The Rate of Drying of Solid Materials. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 13(5): 427-432.
[47] Page, G.E., 1949. Factors ınfluencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers. M.S.Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
[48] White, G.M., Bridges, T.C., Loewer, O.J., Ross, I.J., 1978. Seed coat damage in thin layer drying of soybeans as affected by drying conditions. *ASAE* paper no. 3052, ASAE St Joseph MI.
[49] Henderson, S.M., Pabis, S.,1961. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research* 6(3): 169–174.
[50] Chandra, P.K., Singh, R.P., 1995. Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers. CRC Press, Boca Raton, FL, 163–167.
[51] Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., 2002. A new model for single-layer drying. *Drying Technology* 20(7):1503–1513.
[52] Henderson, S.M., 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transaction of the ASAE* 17(6): 1167–1172.
[53] Sharaf-Eldeen, Y.I., Blaisdell, J.L., Hamdy, M.Y., 1980. A model for ear corn drying. *Transaction of the ASAE*, 23(5): 1261–1271.
[54] Kaseem, A.S., 1998. Comparative studies on thin layer drying models for wheat". *In 13th International Congress on Agricultural Engineering,* February 2–6, Morocco.
[55] Verma, L.R., Bucklin, R.A., Ednan, J.B., Wratten, F.T., 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transaction of the ASAE* 28(1): 296– 301.
[56] Karathanos, V.T., 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 39(4): 337–344.
[57] Kaleta, A., Gornicki, K., Winiczenko, R., Chojnacka, A., 2013. Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer. *Energy Conversion and Management* 67: 179–185.
[58] Rahman, S., 1995. Food Properties Handbook. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 225–271p.
[59] Hammond, G.P., Stapleton, A.J., 2001. Exergy analysis of the United Kingdom energy system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 215 (2): 141–162.