



## Taguchi metodu kullanılarak gıda kurutulmasına etki eden parametrelerin optimizasyonu

### Optimization of parameters effecting food drying using Taguchi method

Burak TÜRKAN<sup>1</sup> , Akın Burak ETEMOĞLU<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.  
burakt@uludag.edu.tr, aetem@uludag.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 28.01.2019  
Kabul Tarihi/Accepted: 15.10.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 05.08.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.93695  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

*Bu çalışma, konvektif kurutucuda salatalığın kurutulmasına etki eden parametrelerin optimizasyonunun Taguchi metodu ile uygulamasını göstermektedir. Kurutma parametreleri olarak 0.5, 0.8 ve 1 m/s hava hızları, 40, 50 ve 60 °C hava sıcaklıkları ve 0.5, 1 ve 1.5 cm ürün kalınlıkları alınmıştır. Kurutma süresi sonunda her bir parametrenin ürün nemi, büzülme katsayısı, ekserji verimliliği ve ekserjetik gelişme potansiyeli değerleri üzerindeki katkı faktörü ANOVA analizi ile araştırılmıştır. Ürünün kurutulmasında kalınlığın etkisinin, ekserji veriminde ise hava sıcaklığının etkisinin en fazla olduğu görülmüştür. Kuruma süresinin minimize edilmesinde optimum kurutma koşullarının 1 m/s hava hızı, 60 °C hava sıcaklığı ve 0.5 cm ürün kalınlığı olduğu tespit edilmiştir. Ekserji veriminin en fazla olması için 0.5 m/s hava hızı, 60 °C hava sıcaklığı ve 0.5 cm ürün kalınlığı seçilmelidir.*

**Anahtar kelimeler:** Taguchi metodu, Kurutma, büzülme, Ekserji verimliliği.

#### Abstract

*This study indicates the optimization of the parameters affecting the drying of the cucumber using the Taguchi method in the convective dryer. Air velocity of 0.5, 0.8 and 1 m/s, air temperature of 40, 50 and 60 °C and product thickness of 0.5, 1 and 1.5 cm were taken as drying parameters. At the end of the drying period, the contribution factor of each parameter on the product moisture, shrinkage coefficient, exergy efficiency, and exergetic improvement potential was investigated by ANOVA analysis. It was detected that the effect of thickness on the drying of the product and the effect of air temperature on exergy efficiency were the highest. The optimum drying conditions were found to be air velocity of 1 m/s, air temperature of 60°C and product thickness of 0.5 cm to minimize drying time. For maximum exergy efficiency, air velocity of 0.5 m/s, air temperature of 60 °C and product thickness of 0.5 cm should be selected.*

**Keywords:** Taguchi method, Drying, Shrinkage, Exergy efficiency.

## 1 Giriş

Kurutma işlemi bilinen en eski gıda saklama tekniğidir. Su içeren meyve ve sebzelerde kimyasal bozulma görülebilir. Bu yüzden tarım ürünlerinin uzun süre dayanıklı olması için kurutma metodu uygulanmaktadır. Doğada kurutma güneş enerjisi ile kendi kendine gerçekleşmektedir. Kurutulan ürünün kalitesinin artırılması için çeşitli kurutma yöntemleri geliştirilmiştir. En yaygın kurutma metodu sıcak hava kullanan zorlanmış taşınım sistemleridir [1]. Salatalık, bilimsel olarak bilinen *Cucumis sativus*, bir kavun meyve ailesi olan Cucurbitaceae familyasında kategorize edilir. Salatalık içerdiği yüksek nem içeriğine rağmen sahip olduğu besin değeri, kolay hammadde değeri ve ulaşılabilirliğinden dolayı kurutulmuş ürün olarak tercih edilmektedir [2]. Bununla birlikte yüksek nem içeren meyve ve sebze gibi tarım ürünlerinin kurutulması genellikle dikkate değer bir deformasyon etkisi oluşturur. Gıda ürünlerinde meydana gelen büzülme etkisi kuruma hızı ve kurutulan ürün yapısı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olup gözlemlenebilir bir durumdur [3],[4].

Kurutma işleminde enerji tüketimi fazla olmaktadır. Üretim sektöründe toplam maliyetin %60-70'i kurutma maliyetine harcanmaktadır. Bu yüzden enerjinin verimli kullanılması gerekmektedir [5]. Kurutma sistemlerinin performansının belirlenmesinde enerji verimi ifadesi tek başına yeterli olamamaktadır, bu yüzden ekserji veriminin de hesaba katılarak iyileştirme potansiyelinin belirlenmesi

gerekmektedir. Ekserji bir sistemde kullanılabilir enerjinin ölçüsüdür. Dolayısı ile ekserjinin bir kısmı kullanılmakta bir kısmı ise kayıp olarak atılmaktadır. Ekserji analizi uygun bir tasarım sistemini ve işletme şartlarının seçilmesi için bize bilgi vermektedir. Bu bilgi bize işletme maliyeti, enerjinin korunumunun tanımlanmasında etkili bir bilgi sunmaktadır [6]. Sistemdeki kayıp işin en aza indirilmesinin verimi artırdığı vurgulanmaktadır. Bu yüzden kurutma parametreleri ekserji verimi üzerinde etkilidir. Ekserji analizi ile kayıp enerji, tersinmezlikler ve sistemden atılan kayıp enerji belirlenebilmektedir [7]. Geleneksel deneysel çalışmalar yüksek maliyet süreci ve uygulama süresi istemektedir. Arzu edilen kalite parametrelerinin test edilebilmesi için çok fazla miktarda faktörlerin uygulanması ve araştırılması için oldukça fazla zaman gerekmektedir. Aynı zamanda deneylerin tekrar edilebilir olması ve doğrulama çalışmaları gibi bir takım zorluklar da olacaktır. Bu yüzden deneysel tasarım ve ürün kalitesini geliştirmek için minimum maliyetli deneysel çalışmaların uygulanması gerekmektedir. Bu deneysel çalışmaların sistematik analizi ve doğru çözüm için alternatif bir yöntem olarak Taguchi metodu kullanılmaktadır. Bu yöntem deneysel çalışma verisi üzerine etki eden parametrelerin optimum koşullarının değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Son zamanlarda Taguchi metodu, endüstriyel uygulamalarda hızlı ve düşük maliyetli ürünleri elde etmek için ARGE çalışmaları ile desteklenen güçlü bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Analizlerde ortogonal dizi ve ANOVA metodu

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

kullanılmaktadır. ANOVA karakteristik özellikler üzerinde faktörlerin etkisinin incelenmesine yardım eder. Taguchi metodunun geleneksel istatistik yöntemlerine göre avantajı optimum koşullarda en az çeşitliliğe sahip deneysel koşulları tanımlamasıdır [8].

Literatürde kurutma ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Vega ve diğ. [9] meyve ve sebzelerin kurutulmasında ürün yüzeyinde maksimum sıcaklık değerini araştırmışlardır. Elma dilimlerini deneysel olarak otomatik kontrol ünitesinde kurutmuşlardır. Simülasyon modelinde deneysel datalar ile optimum kontrolü tanımlamışlardır. Kumar ve diğ. [10] çalışmalarında zorlanmış taşınım ile meyve kurutulması sırasında eş zamanlı ısı ve kütle transferinin matematik modelini geliştirmişlerdir. Kaya ve diğ. [11] yapmış olduğu çalışmada dikdörtgen, silindirik ve küre şekilli gıda ürünlerinin kurutulmasını karakterize eden ısı ve kütle transferi denklemlerini teorik olarak çözmüştür. Lemus-Mondaca ve diğ. [12] 40 °C'den 80 °C'ye kadar farklı kurutma havası sıcaklıklarını kullanarak katı bir gıda ürününün kurutulmasını hem nümerik hem deneysel olarak incelemişlerdir. Bezerra ve diğ. [13] gıda kabuğunun kurutulmasında literatürde bulunan analitik modeli kullanarak nem difüzyonunu ve kütle transfer katsayılarını hesaplamışlardır. Deneysel ve korelasyondan uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Karim ve Hawlader [14] 2005 yılında yaptıkları çalışmada tropik meyvelerin zorlanmış taşınım ile kurutulması sırasında ısı ve kütle transfer denklemlerini çözen bir matematik model geliştirmişlerdir. Hussain ve Dincer [15] çalışmalarında nemli 2 boyutlu dikdörtgen kesitli ürünün zorlanmış taşınım ile kurutulması sırasında eş zamanlı olarak ısı ve nem transferini sayısal olarak modellemişlerdir. Etemoglu ve diğ. [16] kâğıt kurutma prosesini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çarpan hava jeti ve TAD metodu ile kâğıt kurutulmasında eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri için model geliştirmişlerdir. Her iki metod ile geçici rejimde hesapladıkları kâğıt sıcaklığını deneysel veriler ile karşılaştırıp sonuçların uygun olduğunu göstermişlerdir. Doymaz ve Aktaş [17] yaptıkları çalışmalarında sitrik asit ve sıcak su ile ön işleme tabi tutulan patlıcan dilimlerinin kurutma karakteristiklerini incelemişlerdir. Bu uyguladıkları ön ısı işlemlerin, ürünün kurutma süresi ve renk değişimi üzerinde etkili olduğunu göstermişlerdir. Turkan ve diğ. [18] ince mürekkep film tabakasının buharlaştırılarak kurutulmasını oluşturan ısı ve kütle transferi katsayılarının elde edilmesi için bir çalışma uygulamışlardır. Teorik sonuçlar sabit ve azalan hız periyodu için bazı deneysel sonuçlar ile özellikle kuruma zamanı uygun olarak bulunan teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Turkan ve diğ. [19] gıda ürününün kurutulması işleminde farklı hava hızı ve sıcaklıklarının ürün geometrisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Saha ve diğ. [20] kurutma çalışmaları için büzülme etkisini hesaba katarak iki difüzyon modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, muz dilimlerinin kurutulması için bir ısı pompası kurutucusu kullanmışlardır. Yazarlar, daha iyi kurutma sonuçları için büzülme etkisinin ince tabaka kurutma modellerine eklenmesi gerektiğini önermişlerdir. Folayan ve diğ. [21] farklı kalınlıklarda (0,5, 1 ve 1,5 cm) dilimledikleri soğanın kurutma karakteristiklerini farklı sıcaklıklarda (65 °C, 75 °C, 85 °C ve 95 °C) incelemişlerdir. Bununla birlikte kurutma sırasında enerji ve ekserji verimliliği için optimum kurutma koşullarını da araştırmışlardır. Bütün sıcaklıklar için 1,5 cm kalınlığındaki ürünün kurutulmasında ekserji veriminin en yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Singh ve Talukdar [22] patatesin kurutma kinetiğini farklı hava hızı

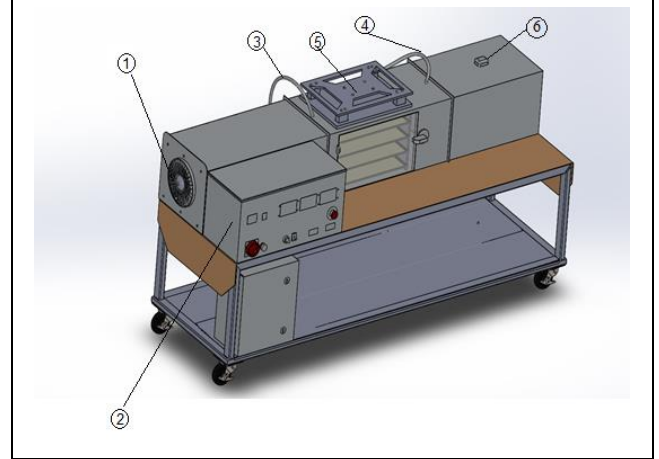
(2, 4 ve 6 m/s) ve hava sıcaklıkları (40 °C, 50 °C ve 60 °C) için test etmişlerdir. Enerji tüketimi için yaptıkları ANOVA analizi sonuçlarına göre kurutma üzerinde en fazla katkıyı %82.2 ile sıcaklık parametresinin sağladığını göstermişlerdir. Hava hızının 2 m/s den 6m/s değerine çıkartıldığında kuruma süresinin %30 azaldığını ve hava sıcaklığının 40 °C'den 60 °C'ye çıkartıldığında ise kuruma süresinin %36 kısaldığını tespit etmişlerdir. Yuan ve diğ. [23] elma dilimlerinin sıcak hava ile kurutulması sırasında oluşan büzülme etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçları doğrulamak için Comsol Multiphysics programını kullanarak büzülme etkisine bağlı sıcaklık ve nem dağılımlarını elde etmişlerdir. Doğrulama sonucu olarak nümerik çözüm ile deneysel veriler arasında %10'dan daha az bir hata oranı olduğunu göstermişlerdir.

Salatalık kurutulması ile ilgili literatürde yayınlanmış çalışmalar olmasına rağmen konvektif kurutmada Taguchi metodu ile deneysel parametrelerin optimizasyon çalışması bulunmamaktadır. Bu yüzden bu çalışma Taguchi metodu kullanılarak konvektif yöntem ile salatalık kurutmasını optimize etmek için uygulanmıştır. Deneysel sonunda nem içeriği, büzülme, ekserji verimi ve ekserjetik gelişme potansiyeli değerleri tespit edilmiştir. Her bir hesaplanan çıktı değeri için optimum kurutma koşullarının (hız, sıcaklık ve kalınlık) etkisi ANOVA analiz sonuçları ile araştırılmıştır.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Kurutma ekipmanları ve kurutma metodu

Deneysel yerel bir marketten alınan salatalıklar kullanılmıştır. Kurutma işlemi Uludağ Üniversitesi Isı Tekniği Laboratuvarında bulunan konvektif tünel tipi kurutucuda uygulanmıştır. Deney tesisatı Şekil 1'de verilmiştir. Salatalıklar silindirik şekilde 0,5, 1 ve 1,5 cm kalınlıklarında dilimlenmiştir. Salatalık dilimlerinin çapı 2,3 cm ile 3,4 cm arasında değişmektedir.



(1): Fan (Taze hava girişi), (2): Otomatik kontrol ünitesi (hız, sıcaklık, nem ve ağırlık), (3-4): Sıcaklık ve nem sensörleri, (5): Hassas terazi, (6): Hız sensörü.

Şekil 1. Deneysel olarak kullanılan konvektif kurutucu.

Figure 1. Convective dryer used in experiments.

### 2.2 Başlangıç nem içeriğinin tespiti

İlk nem tayininin belirlenmesi için 80±0.05 g ağırlığındaki salatalık dilimleri kurutma cihazına konularak 75±0.3 °C hava sıcaklığında kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma sırasında tepsilerin ağırlıkları 5 dk aralıklar ile bilgisayara kaydedilmiştir. Ürün içerisinde hiç nem kalmayınca kadar

deneysel sürdürülmüştür. Son iki ağırlık ölçümü arasındaki fark %1 olduğunda deney sonlandırılarak ürünün kuru ağırlığı elde edilmiştir. Daha sonra ortalama başlangıç ürün nem içeriği yaş ve kuru bazda sırası ile %91 ve 10.11 g su/g kuru madde olarak elde edilmiştir.

### 2.3 Deneylerin uygulanması

Alınan salatalıklar öncelikle buzdolabında 4 °C'de 24 sa. boyunca muhafaza edilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar 3 sa. laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Bu arada sürekli rejime ulaşıncaya kadar deney cihazı çalıştırılmıştır. Boş tepsilere ağırlığı ölçülerek kaydedilmiştir. İstenen şartlara ulaştığı zaman tepsi cihaza yerleştirilmiştir. Deney sırasında ürünün ağırlığındaki değişim 0.05g hassasiyete sahip dijital terazi yardımı ile periyodik olarak kaydedilmiştir. Farklı hava hızı (0.5, 0.8 ve 1 m/s), hava sıcaklığı (40, 50 ve 60 °C) ve ürün kalınlığı (0.5, 1 ve 1.5 cm) için deneyler gerçekleştirildi. Her bir kalınlık değerine sahip dilimlenen ürünler toplam ağırlık 80±0.05 g gelecek şekilde tepsilere yerleştirildi. Bu işlemi sağlamak için 0.5 cm kalınlıkta daha fazla sayıda salatalık dilimi tepsilere yerleştirilirken, 1.5 cm kalınlıkta olan dilimlerden ise daha az sayıda kullanılmıştır.

### 2.4 Taguchi metodu

Bu çalışmada kurutma sürecine etki eden parametreleri (hava hızı, hava sıcaklığı ve ürün kalınlığı) optimize etmek için Taguchi metodu kullanıldı. Kurutma sürecini etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça yapılacak deney sayısı da fazlalaşmaktadır. Bu durum aynı zamanda maliyetleri artırmakta ve uygulamayı zorlaştırmaktadır. Bu yüzden karar verilmesi gereken çok faktörlü durumlarda uygulanması verimli olan Taguchi metodu kullanılabilir. Bu yöntemde, önce, her bir parametre için SD (serbestlik derecesi) değerleri toplanarak elde edilen toplam serbestlik derecesine (TSD) uygun bir ortogonal dizi seçilmelidir

Bu çalışmada 3 parametre değerlerinin her biri için 3 seviye seçilmiştir. Her bir parametre için TSD değeri parametrelerin seviyelerinden 1 çıkarılarak elde edilmiştir. 3 parametre değerinin 3 seviyesi için toplam 6 TSD vardır (Tablo 1). Kurutma parametrelerinin seviyelerini gösteren örneklerin numaralandırılması ve Taguchi L9 ortogonal dizi kullanılarak seçilen deneysel düzen Tablo 2'de verilmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlar Taguchi metodunda S/N (sinyal gürültü) oranına çevrilir. Veri analizinde yanıtın kontrolüne izin vermek ve yanıtla ilgili değişkenliği azaltmak için sinyal-gürültü (signal-to-noise) (S/N) oranı kullanılır. Taguchi metodunda S/N oranının minimum (smaller-the better), maksimum (larger-the-better) ve ortalama (nominal-the-best) olmak üzere üç performans kriteri bulunmaktadır. Bu çalışmada maksimum (ekserji verimliliği, büzülme katsayısı ve ekserjetik gelişme potansiyeli) ve minimum (nem içeriği) amaç fonksiyonları tanımlandı. Maksimum ve minimum performans değerleri için Eş. 1 ve 2 kullanılır [24].

$$S/N_{max} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

$$S/N_{min} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

Burada,  $n$  test sayısı ve  $y_i$  performans karakteristikleri için gözlenen deneysel veri sayısıdır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan kurutma parametreleri ve seviyeleri.

Table 1. Drying parameters and levels used in the study.

Parametre	Serbestlik derecesi (SD)	Seviye1	Seviye 2	Seviye 3
Sıcaklık (°C)	2	40	50	60
Hız (m/s)	2	0.5	0.8	1
Kalınlık (cm)	2	0.5	1	1.5
Toplam SD	6			

Tablo 2. Taguchi ortogonal L9 dizisi kullanılarak seçilen parametreler ve seviyeleri.

Table 2. Parameters and levels selected using the Taguchi orthogonal L9 array.

Ortogonal dizi	Deney no	Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Kalınlık (cm)
111	1	0.5	40	0.5
122	2	0.5	50	1.0
133	3	0.5	60	1.5
212	4	0.8	40	1.0
223	5	0.8	50	1.5
231	6	0.8	60	0.5
313	7	1.0	40	1.5
321	8	1.0	50	0.5
332	9	1.0	60	1.0

### 2.5 Nümerik sonuçlar ve doğrulaması

#### 2.5.1 Nümerik analiz için matematik modelleme

Katı içerisindeki enerji ve kütle dengesini tanımlamak için yaygın olarak Fourier's (ısı transferi) ve Fick's (kütle transferi) yasaları kullanılabilir. Sıcak kurutma havasından ısı taşınım ile ürün yüzeyine transfer edilirken, katı içerisindeki sıvı difüzyon ile ürün yüzeyine aktarılır ve yüzeyden havaya buharlaşma meydana gelir. Fourier's yasasına dayalı katı içerisindeki enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \nabla(-k\nabla T) = 0 \quad (3)$$

Burada,  $c_p$  gıdanın özgül ısısı [J/(kg K)],  $k$  gıdanın ısı iletim katsayısı [W/(mK)],  $\rho$  gıdanın yoğunluğudur (kg/m<sup>3</sup>). Fick's yasasına bağlı olarak elde edilen kütle korunum ifadesi Eş. 4'te verilmiştir [25].

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla(-D_{eff}\nabla M) = 0 \quad (4)$$

Burada,  $D_{eff}$  efektif difüzyon katsayısı (m<sup>2</sup>/s) ve  $M$  nem içeriği (g su /g kuru madde).

#### 2.5.1.1 Isı transfer sınır koşulları

Isı transfer için yüzey sınır koşul ifadesi şu şekilde verilmektedir;

$$-n(-k\nabla T) = \lambda h_m(M - M_s) + h_t(T - T_s) \quad (5)$$

$h_m$  kütle transfer katsayısı (m/s),  $h_t$  ısı transfer katsayısı [W/(m<sup>2</sup>K)],  $T_s$  kurutma havası sıcaklığı (°C),  $M_s$  denge nem içeriği (g su /g kuru madde) ve  $n$  yüzey normal yön vektörüdür. Isı transferi için simetrik sınır koşulları ifadesi Eş. 6'da verilmiştir.

$$n(k\nabla T) = 0 \quad (6)$$

### 2.5.1.2 Kütle transfer sınır koşulları

Kütle transferi için yüzey sınır koşulu, ürünün içinden yüzeye difüzyon ile nem transferi ve yüzeyden kurutma havasına buhar aktarımı arasındaki denge için verilmiştir.

$$-n(D\nabla M) = h_m(M - M_s) \quad (7)$$

Kütle transferi için simetrik sınır koşulları Eş. 8'de verilmiştir.

$$n(D\nabla M) = 0 \quad (8)$$

### 2.5.2 Isı ve kütle transfer katsayılarının hesaplanması

Literatürde iyi bilinen korelasyonlarla ısı ve kütle transferi katsayıları hesaplanabilir [10],[14],[26].

$$Nu = \frac{h_T L}{k} = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (9)$$

$$Sh = \frac{h_M L}{D_{AB}} = 0.664 Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (10)$$

Deneysel olarak büzülme katsayısını hesaplamak zordur. Bu çalışmada büzülme için lineer dağılım metodu kullanılmıştır. Gıdanın herhangi bir konumundaki büzülme oranı Eş. 11 kullanılarak hesaplanabilir.

$$u(x) = u(b) \frac{x}{b} \quad (11)$$

Yüzey üzerindeki hız değeri Eş. 12 de verilmiştir.

$$u(b) = \frac{b - b(old)}{\Delta t} \quad (12)$$

Burada,  $b$  (old) bir sonraki zamanda gıdanın yarı kalınlığı ve  $b$  başlangıçta ürün yarı kalınlığıdır [14]. Gıdanın herhangi bir sürede yarı kalınlığını hesaplamak için gıdanın nem içeriğine bağlı olarak elde edilen aşağıdaki eşitlik kullanılabilir [27].

$$b = b_0 \left[ \frac{\rho_w + M\rho_s}{\rho_w + M_0\rho_s} \right] \quad (13)$$

### 2.5.3 Efektif difüzyon katsayısı ve kuruma süresinin hesaplanması

Difüzyon kurutma sırasında üründe nem içeriğinin akışını göstermektedir. Kurutmada azalan hız periyodunda nem transferi moleküler difüzyon ile gerçekleşir [28],[29]. Efektif difüzyon katsayısı sonlu silindirik geometri için geliştirilen Fick difüzyon yasası kullanılarak hesaplanmaktadır. Kullanılan ifade sabit difüzyon katsayısı ve difüzyonla gerçekleşen nem transferinin olduğu varsayılmaktadır. Efektif nem difüzyon katsayısı Eş. 14 kullanılarak hesaplanmıştır [30],[31].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8r^2}{l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_i \beta_j} \exp\left(-(\lambda_i^2 + \beta_j^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (14)$$

Burada,  $D_{eff}$  efektif difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ),  $r$  yarıçap ve  $l$  karakteristik uzunluk (m),  $t$  kuruma süresi (s),  $\lambda_i$  Bessel fonksiyonu kökü olarak ifade edilmektedir.

$$\beta_j = \frac{(2j-1)\pi r}{2l} \quad j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

Uzun kuruma süreleri için seri çözümün yalnızca ilk terimi kullanılabilir [29].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2} \exp\left(-(\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (16)$$

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2}\right) - \left(-(\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (17)$$

Burada, Eş. 7 için  $\lambda_1 = 2,4048$  alınmıştır.

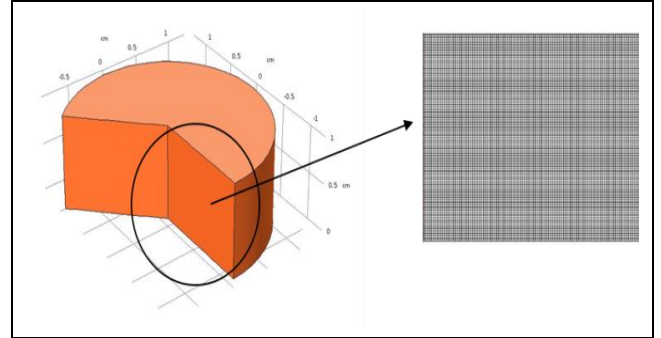
Efektif difüzyon katsayısı deneysel çalışmadan elde edilen kuruma süresinin  $\ln(MR)$  ile olan değişim eğrisinden elde edilir. Eş. 17'de verilen  $\ln(MR)$  değerlerinin kuruma süresi ile olan değişim grafiğinden eğim değeri Eş. 18'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Eğim} = \frac{(5.7831 + \beta_1^2) D_{eff}}{r^2} \quad (18)$$

Efektif difüzyon katsayısı ise eğim metodu kullanılarak hesaplanmıştır [28],[29],[32]. Gıda ürünleri için efektif difüzyon katsayısı büyük oranda  $10^{-9}$  ile  $10^{-10}$  aralığı içerisinde olmaktadır [31],[33].

### 2.5.4 Nümerik çalışma

Sıcak hava zorlanmış taşınım kurutma sürecinde eş zamanlı ısı ve kütle transfer denklemlerini elde etmek için 2 boyutlu aksisimetrik model kullanıldı. Silindirik şekilli gıda ürünü aksisimetrik olarak modellenildiğinden dolayı nümerik yöntemde düzlemsel kesişimin sadece bir çeyrek dilimi hesaba katıldı (Şekil 2). Literatürde de bazı nümerik çalışmalarda bu aksisimetrik model yaklaşımı kullanılmıştır [10],[25].



Şekil 2. Analizde kullanılan model ve ağ yapısı.

Figure 2. Model and mesh structure used in analysis.

Modelin basitleştirilmesi için varsayılan kabuller;

- Ürün içerisinde ısı üretimi yoktur,
- Gıda içerisinde ısı transferinin iletim (Fourier's Law) ile kütle transferinin difüzyon (Fick's Law) ile gerçekleştiği kabul edildi,
- Kurutma sırasında üründe büzülme etkisi hesaba katıldı,
- Kurutma süreci boyunca havanın ve ürünün termofiziksel özellikleri sabit alındı,
- Kurutma havasının hızı ve sıcaklığı sabit olarak değerlendirildi.



Nümerik çalışma için modellenen gıda ürünü için öncelikle ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak model yapısında 800 dörtgen eleman, 360 kenar elemanı ve 4 köşe elemanı seçilmiştir. Kısmi diferansiyel denklemleri Comsol Multiphysics 5.3 [35] programı kullanılarak 0.001 bağıl tolerans ve 0.0001 mutlak tolerans kriteri altında Newton's metodu uygulanarak zamana bağlı çözülmüştür. Analizde kullanılan parametreler ile ürünün termofiziksel özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

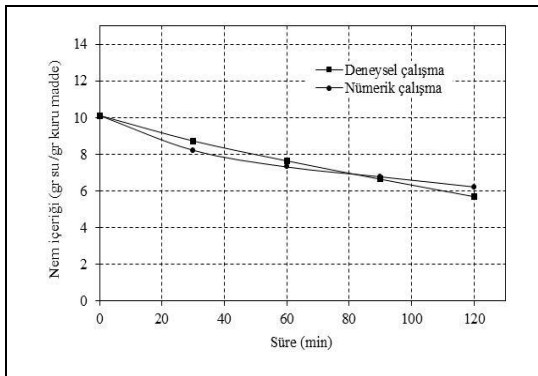
Tablo 3. Salatalığın termofiziksel özellikleri ve deney kurutma koşulları.

Table 3. Thermophysical properties of cucumber and experimental drying conditions.

Parametre	Değer	Referans
Hava hızı (m/s)	1	
Ürün sıcaklığı (°C)	25.6	
Ürün kalınlığı (cm)	1	
Ürün yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	959	[34]
Hava sıcaklığı (°C)	60	
Ürün nem içeriği (g su/g kuru madde)	10.11	
Hava bağıl nemi (%)	30	
Ürünün ısı iletim katsayısı (W/mK)	0.62	[34]
Ürünün özgül ısısı (J/kgK)	4030	[34]
Buharlaşma ısısı (kJ/kg)	2442	[26]
Isı transfer katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)	22	
Kütle transfer katsayısı (m/s)	1	
Büzülme hızı (m/s) × 10 <sup>7</sup>	2.56	
Nem difüzyon hızı (m <sup>2</sup> /s) × 10 <sup>9</sup>	1	

Ürün içerisindeki nem dağılımını tanımlamak için numerik metod kullanılarak lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri çözülmüştür. Ürünün kuruma sırasında hacmindeki değişimden dolayı ortaya çıkan deformasyon yapısına ait ağ yapısını tanımlamak için Arbitrary Lagrange Eulerian yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem hareketli sınır tanımlamasına izin veren Lagrangian ve Eulerian yaklaşımları temelinde dayanmaktadır.

1 m/s hız, 60 °C ve 1 cm kalınlığındaki ürün için 2 sa.'lik kurutma süresi boyunca deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile nümerik çözümle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç verileri Şekil 3 üzerinde gösterilmiştir. 2 sa.'lik kuruma süresi boyunca deneysel veriler ile nümerik değerlerin birbirine yakın olarak değiştiği görülmektedir. İki karşılaştırılan çözüm arasında ortalama %5.2'lik bir fark ortaya çıkmıştır.



Şekil 3. Deneysel ve nümerik çalışmanın nem içeriklerinin karşılaştırılması.

Figure 3. Comparison of moisture contents of the experimental and numerical study.

## 2.6 Nem içeriğinin belirsizlik analizi

Deneysel çalışmada ölçüm aletlerinden dolayı hata ortaya çıkabilir. Bu yüzden ölçüm sonuçlarının belirsizlik analizi hesaplanarak toplam hata değerinin tanımlanması gerekmektedir. Genel belirsizlik ifadesi aşağıdaki ifade kullanılarak elde edilebilir;

$$W_r = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$e = \frac{W_r}{R} \quad (20)$$

Burada,  $R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu,  $W_r$  genel belirsizlik değeri,  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  bağımsız değişkenlerin hata değeri ve  $e$  bağıl belirsizlik değeridir [10],[36]. Kuru bazda nem içeriğinin hesaplanması için ürünün kuru ve başlangıç ağırlıklarının hassas terazide ölçülmesi gerekmektedir. Bu yüzden ürünün ağırlık ölçümüne bağlı olarak hesaplanan nem içeriğinde bağıl belirsizlik değeri ortaya çıkacaktır. Gıdanın kuru bazda nem içeriği ile ilgili belirsizlik denklemi Eş. 19 ve 20 kullanılarak elde edilmiştir.

$$e_m = \left\{ \left( \frac{\delta W}{W - W_{dr}} \right)^2 + \left( \frac{W \delta W_{dr}}{(W - W_{dr})W_{dr}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Burada,  $\delta W$  ve  $\delta W_{dr}$  ağırlık cihazı belirsizliği  $\pm 0.05$ ,  $W_{dr}$  ürünün kuru ağırlığı 7.2 g ve  $W$  ürünün başlangıç ağırlığı 80g olarak alınmıştır. Eş. 21 kullanılarak salatalık için hesaplanan bağıl belirsizlik değeri  $\pm \%0.76$ 'dır.

Ölçüm cihazlarının toplam belirsizlik değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Cihazdan kaynaklanan hata değeri üretici tarafından cihazın özellikleri arasında belirtilirken, ölçümden kaynaklı hata kişinin yanlış okumasından kaynaklanır [37].

Tablo 4. Kurutma testinde kullanılan ölçüm cihazlarının toplam belirsizlik değerleri.

Table 4. Total uncertainty values of the measuring devices used in the drying test.

Parametre	Cihaz belirsizliği (±)	Okuma hatası(±)	Toplam belirsizlik (±)
Hava Sıcaklığı	0.3 °C	0.1	0.3162
Hava hızı	0.1 m/s	0.1	0.1414
Ağırlık	0.05 g	0.01	0.0509

## 3 Sonuçlar ve tartışmalar

### 3.1 Nem içeriği hesabı için taguchi analizi

#### 3.1.1 Nem içeriği teorik hesabı

İki saatlik kuruma süresi sonunda her bir deney seti için ağırlık değişimleri ölçülerek nem içerikleri hesaplanmıştır. Eş. 22 ve 23 kuru ve yaş bazda nem içeriği ifadelerini vermektedir.

$$M_{DB} = \left( \frac{W_w}{W_{dr}} \right) = \left( \frac{W - W_{dr}}{W_{dr}} \right) \quad (22)$$

$$\%M_{WB} = \left( \frac{W_w}{W_w + W_{dr}} \right) \times 100 \quad (23)$$

Burada,  $W$  ürünün başlangıç ağırlığı (g),  $W_w$  ürünün suyun kütlesi (g) ve  $W_{dr}$  kuru ürünün ağırlığı (g) [38]. Nem içeriğine

bağlı olarak elde edilen boyutsuz nem içeriği (MR) Eş. 24'te verilmiştir.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (24)$$

Burada;  $M_e$  kurutma sonunda ürünün denge nem içeriği (g su/g kuru madde) ve  $M_i$  ürünün başlangıç nem içeriği (g su/g kuru madde).

### 3.1.2 Taguchi analizinin nem içeriğine uygulanması

9 farklı deneye ait hesaplanan 3 tekrarlı 27 farklı nem içeriği değerleri Minitab 18 programına girilmiştir. Daha sonra Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. 2 sa.'lik kurutma süreci için nem içeriği ve hesaplanan S/N oranı.

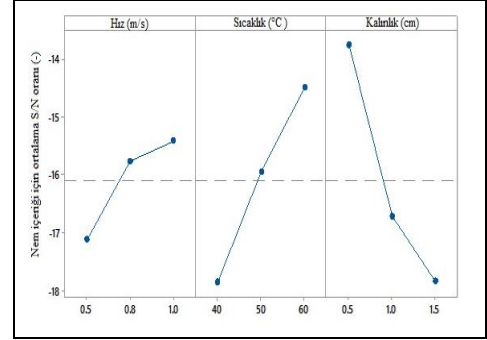
Table 5. Moisture content and calculated S/N ratio for the drying process of 2 h.

Ortogonal dizi	Nem içeriği (g su /g kuru madde)	S/N oranı	Standart sapma
111	7.21667	-17.1669	0.056862
122	7.25667	-17.2155	0.115902
133	7.06667	-16.9853	0.135031
212	7.82333	-17.8680	0.066583
223	7.94000	-17.9978	0.174356
231	3.73333	-11.4420	0.020817
313	8.45333	-18.5406	0.025166
321	4.28667	-12.6427	0.041633
332	5.67000	-15.0736	0.145258

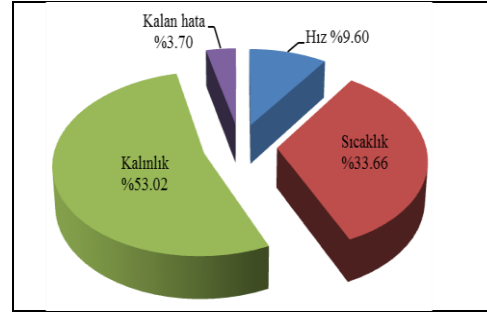
İki saatlik kuruma süresi sonunda elde edilen nem içeriğinin deneysel sonuçları ve hesaplanan S/N oranlarını göstermektedir. En büyük ortalama S/N oranı en küçük nem içeriği değerini göstermektedir. Şekil 4(a)'da verilen ortalama S/N oran analizine göre en küçük nem içeriği değeri (optimum koşul), en büyük ortalama S/N oranlarının elde edildiği 1 m/s hava hızı, 60 °C hava sıcaklığı ve 0.5 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir. İki saatlik kuruma süresinde en fazla nem içeriğine (en yavaş kuruma hızı) sahip deneysel koşullar 0.5 m/s hava hızı, 40 °C hava sıcaklığı ve 1.5 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir. Daha yüksek hava sıcaklığı ve hava hızı ürünün ortama geçen buharlaşma miktarını artırmıştır. Hava hızının 0.5 m/s'den 0.8 m/s'ye artışının kurutma üzerine etkisi görülürken, 0.8 m/s'den 1 m/s hıza geçişte bu etkinin azaldığı söylenebilir. 10 °C sıcaklık artışlarının ise ürünün nem içeriğinin azalmasında büyük bir etkisi olduğu açıkça görülebilmektedir.

ANOVA her bir parametrenin yüzdesel katkısını tanımlamak için deneysel sonuçların yaygın olarak uygulandığı istatistiksel bir yöntemdir. ANOVA yöntemi bize tüm ana faktörlerin önemini ve birbiri ile olan etkileşimlerini test etmemize olanak sağlar. Bu çalışmada kurutma parametrelerinin her birinin katkısını tanımlamak için S/N oranları kullanılarak ANOVA metodu uygulandı. Tablo 6'da verilen ANOVA sonuçları ile parametrelerin nem içeriği üzerindeki katkı oranları elde edilmiştir. Bu yüzde oranları Şekil 4(b)'de verilmiştir. İki saatlik kurutma süreci sonunda hava hızının etkisinin %9.6 hava sıcaklığının etkisinin %33.66 ve ürün kalınlığının etkisinin ise %53.02 olduğu elde edilmiştir. Bu sonuca göre nem içeriğine etki eden kurutma parametrelerinin önem sırası kalınlık>sıcaklık>hız olarak elde edilmiştir. Kurutma sürecinde en önemli parametre ürün kalınlığıdır. Artan hava hızı ve

sıcaklık ile ortalama S/N oranı da artarken, artan kalınlık değeri ile ortalama S/N değeri azalmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4. (a): Farklı kurutma parametreleri (hız, sıcaklık ve kalınlık) için nem içeriğinin S/N oranı. (b): Parametrelerin nem içeriği üzerinde etki yüzdeleri.

Figure 4. (a): S/N ratio of moisture content for different drying parameters (velocity, temperature and thickness). (b) Percentage of influence of the parameters on moisture content.

Tablo 6: Nem içeriğine ait S/N oranları için ANOVA tablosu.

Table 6. ANOVA table for S/N ratios of moisture content.

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Hız	2	4.857	4.857	2.4283	2.59	0.278
Sıcaklık	2	17.020	17.020	8.5099	9.09	0.099
Kalınlık	2	26.805	26.805	13.4026	14.32	0.065
Kalan hata	2	1.872	1.872	0.9362		
Toplam	8	50.554				

DF: Serbestlik derecesi, Seq SS: Ardışık kareler toplamı, Adj SS: Düzeltilmiş kareler toplamı, Adj MS: Düzeltilmiş ortalama kareleri, F: İstatistik değeri, P: Olasılık değeri.

## 3.2 Büzülme katsayısı için taguchi analizi

### 3.2.1 Büzülme katsayısı hesabı

Kurutma süreci boyunca silindirik ürünlerin çap ve kalınlıklarında büzülme etkisi yaygın olarak gözlenmektedir. Bu durum ürün kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu yüzden kurutma işleminde bu etkinin göz önüne alınması gerekmektedir. Yapılan çalışmada ürünün çapında ve kalınlığında meydana gelen değişim dikkate alınarak büzülme katsayısı ( $S_b$ ) Eş. 25 kullanılarak elde edilmiştir [39].

$$S_b = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \times 100 \quad (25)$$

Burada,  $V_t$  ürünün t süre sonundaki hacim değeri,  $V_0$  ürünün başlangıçtaki hacim değeridir.

### 3.2.2 Taguchi analizinin büzülme katsayısına uygulanması

İki saatlik kuruma süresi sonunda üründe meydana gelen hacimsel değişim oranları da hesaplanmıştır. Daha sonra Taguchi analizi ile ANOVA tabloları oluşturulmuştur. 9 farklı deneye ait hesaplanan 3 tekrarlı 27 farklı hacimsel değişim değerleri Minitab 18 programına girilmiştir. Daha sonra Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. Tablo 7'de iki saatlik kuruma süresi sonunda elde edilen hacimsel değişim katsayısı (büzülme katsayısı) değerleri, S/N oranları ve standart sapma değerleri verilmiştir.

Tablo 7. 2 sa. sonraki kuruma süreci için büzülme katsayısı değerleri ve hesaplanan S/N oranları.

Table 7. Shrinkage coefficient values and calculated S/N ratios for the drying process after 2 h.

Ortogonal dizi	Büzülme katsayısı (%)	S/N oranı	Standart sapma
111	30.2667	29.5538	2.71539
122	28.4000	28.9738	2.83549
133	30.4667	29.6008	2.74287
212	31.7000	30.0026	1.46257
223	28.9700	29.1014	3.79838
231	67.7333	36.6138	1.07858
313	33.5000	30.4932	1.00000
321	57.0633	35.0966	3.31376
332	36.9333	31.3054	2.56970

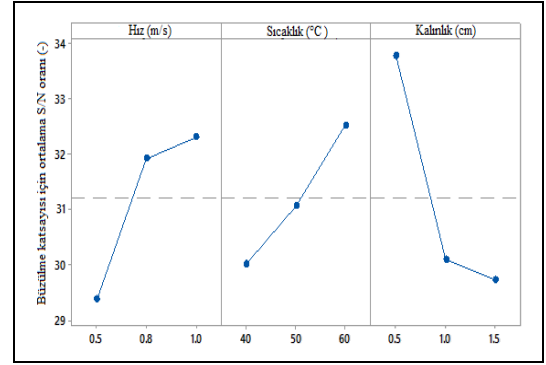
Şekil 5(a)'da verilen ortalama S/N oran analizine göre en büyük hacimsel değişim değeri (optimum koşul), en büyük ortalama S/N oranlarının elde edildiği 1 m/s hava hızı, 60 °C hava sıcaklığı ve 0.5 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir. Hava sıcaklığı ve hava hızı arttıkça üründe daha fazla sıvı buharlaşması meydana gelmiştir. Hacimsel değişim oranları için elde edilen ortalama S/N oranlarının değişimi, nem içeriği için elde edilen değerler ile benzer eğilim göstermektedir. 0.8 m/s hız ile 1 m/s hız arasında üründe meydana gelen hacimsel değişim miktarı birbirine yakın olarak değişmektedir. 10 °C'lik sıcaklık artışı ile hacimsel değişim doğrusal olarak artmaktadır.

ANOVA tablosu ile elde edilen etki yüzdeleri Şekil 5(b)'de verilmiştir. Hacimsel değişim üzerinde en fazla katkısı olan parametrenin %48.66 ile ürün kalınlığının olduğu görülmektedir. Hava hızının ve hava sıcaklığının hacimsel değişim üzerindeki katkısı ise sırası ile %24.71 ve %15.36 olarak hesaplanmıştır. Kurutma parametrelerinin hacimsel değişim üzerindeki önem sırası ise şu şekildedir; kalınlık>hız>sıcaklık. Büzülme katsayısına ait S/N oranları için elde edilen ANOVA değerleri Tablo 8'de verilmiştir.

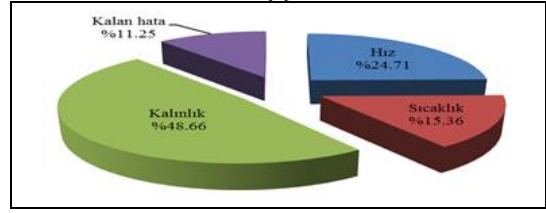
Tablo 8. Büzülme katsayısına ait S/N oranları için ANOVA tablosu.

Table 8. ANOVA table for S/N ratios of shrinkage coefficient.

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Hız	2	15.093	15.093	7.547	2.20	0.313
Sıcaklık	2	9.385	9.385	4.692	1.37	0.423
Kalınlık	2	29.717	29.717	14.859	4.33	0.188
Kalan hata	2	6.870	6.870	3.435		
Toplam	8	61.065				



(a)



(b)

Şekil 5. (a): Farklı kurutma parametrelerinde (hız, sıcaklık ve kalınlık) büzülme katsayıları için hesaplanan S/N oranları. (b): Parametrelerin büzülme katsayısı üzerinde etki yüzdeleri. Figure 5. (a): S/N ratios calculated for the shrinkage coefficients in different drying parameters (velocity, temperature and thickness). (b): Percentage of influence of the parameters on the shrinkage coefficient.

### 3.3 Ekserji verimliliği, ekserji yıkımı ve ekserjetik gelişme potansiyel değerleri için Taguchi analizi

#### 3.3.1 Termodinamiğin 2. kanunu: ekserji analizi

Kurutma işleminin ekserji analizi, enerjinin nicelik kadar niteliğe sahip olduğunu iddia eden ikinci termodinamik yasasına dayanılarak yapılmıştır. İkinci yasa, ısıl sisteme giren ekserjinin bir kısmının, sistem içinde tersinmezliklerden dolayı yıkıma uğradığına işaret eder. Bu varsayımlar ışığında, toplam ekserji girişi, kurutma işleminin çıkışı ve kayıpları tahmin edilmiştir. İzlenen temel prosedür, çalışma ortamının birinci kanun enerji dengesinden özelliklerini kullanarak kararlı hal noktalarındaki ekserji değerlerini belirlemektir. Bu amaçla, ekserji dengesini gerçekleştirmek için kullanılan matematiksel formülasyonlar, açık bir sistem için Eş. 26'da verilmiştir [40].

$$E = (U - U_{\infty}) - T_{\infty}(S - S_{\infty}) + P_{\infty}(V - V_{\infty}) + \frac{v^2}{2} + (Z - Z_{\infty})g + V(P - P_{\infty}) \quad (26)$$

Burada,  $(U - U_{\infty})$  iç enerji bileşeni (J/kg),  $T_{\infty}$  ortam sıcaklığı (°C),  $(S - S_{\infty})$  entropi bileşeni (J/kg),  $P_{\infty}(V - V_{\infty})$  iş bileşeni (J/kg),  $\frac{v^2}{2}$  moment bileşeni (J/kg),  $(Z - Z_{\infty})g$  yerçekimi bileşenidir (J/kg). Kurutma prosesinde herhangi bir kaldırma ve hareket olmadığı için momentum ve yerçekimi değişimleri ihmal edilebilir. İç enerji, entropi ve PV değerleri ile denklem yeniden düzenlenirse,

$$E = (U - U_{\infty}) - T_{\infty}(S - S_{\infty}) + P_{\infty}(V - V_{\infty}) + V(P - P_{\infty}) \quad (27)$$

İç enerji, entropi ve PV değerleri ile denklem yeniden düzenlenirse Eş. 28 elde edilir.

$$E = (U + PV) - (U_{\infty} + P_{\infty}V_{\infty}) - T_{\infty}(S - S_{\infty}) \quad (28)$$

$U + PV$  terimleri yerine h entalpi değeri yazılırsa;

$$E = c_p \left[ (T - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T}{T_{\infty}} \right] \quad (29)$$

eşitliği elde edilir. Eş. 29 kurutma çemberinde ekserji değerlerini hesaplamak için kullanılır. Kurutucunun giriş ve çıkış sıcaklık değerlerine bağlı olarak ekserji girişi ve ekserji çıkışı değerleri Eş.30 ve Eş. 31 kullanılarak hesaplanabilir.

$$E_g = c_p \left[ (T_g - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T_g}{T_{\infty}} \right] \quad (30)$$

$$E_c = c_p \left[ (T_c - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T_c}{T_{\infty}} \right] \quad (31)$$

Ekserji yıkımı ise Eş. 32'de verildiği gibi yazılabilir.

Ekserji yıkımı = Ekserji girişi - Ekserji çıkışı

$$E_Y = \sum E_g - \sum E_c \quad (32)$$

Ekserji verimliliği, ürünün kurutulmasındaki ekserji kullanımının sisteme verilen kurutma havasının ekserji değerine oranı olarak tanımlanabilir [41]. Bu ifade;

Ekserji verimliliği= (Ekserji girişi-Ekserji yıkımı)/Ekserji girişi

Ekserji verimliliği=1- (Ekserji yıkımı/ Ekserji girişi)

$$\eta_E = 1 - \frac{E_Y}{E_g} \quad (33)$$

şeklinde yazılabilir.

### 3.3.2 Ekserji dengesi ve ekserjetik gelişme potansiyeli

Sürekli akışlı bir sistemin ekserji dengesi Eş. 34'te verildiği gibi ifade edilebilir [41].

$$\sum E_g - \sum E_c - E_Y = 0$$

veya

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - W + \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) - E_Y = 0 \quad (34)$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (35)$$

Burada,  $\dot{Q}_k$  ısı miktarı (kW),  $W$  iş miktarı (kW),  $\dot{m}$  akışkanın kütesel debisi (kg/s),  $T_0$  ölü hal sıcaklığı (K),  $\psi$  akış ekserjisi (J/kg),  $h_0$  ölü hal noktası entalpi değeri (kJ/kg),  $s_0$  ölü hal noktası entropi değeri (kJ/kgK). Burada ekserji yıkımı ve entropi üretim değeri 0 olduğu takdirde  $W$  işi tersinir iş olacaktır. Tersinir iş ise belirli koşullarda yapılabilecek en çok iş diye tanımlanmaktadır.

Ekserji yıkımı veya tersinmezlik değeri entropi üretim ifadesine bağlı olarak Eş. 36'da verilmiştir [41].

$$E_Y = T_0 S_{\dot{u}} \quad (36)$$

Burada,  $S_{\dot{u}}$  entropi üretimi (kJ/K).

Van Gool [42] bir sistemde ekserji yıkımı yada tersinmezlik değeri en aza indirildiğinde ekserji veriminde maksimum iyileşmenin meydana geleceğini önermiştir. Aynı zamanda ekonominin farklı süreçlerini veya sektörlerini analiz ederken,

“ekserjetik gelişme potansiyeli” kavramının kullanılmasının yararlı olacağını ileri sürmüştür. Kurutma prosesinin ekserjetik gelişme potansiyeli değerini tanımlamak için Eş. 37 kullanılmaktadır [41],[43].

$$IP = (1 - \eta_E)(E_g - E_c) \quad (37)$$

Burada IP ekserjetik gelişme potansiyel değeri (kJ/kg).

### 3.3.3 Taguchi analizinin ekserji verimine uygulanması

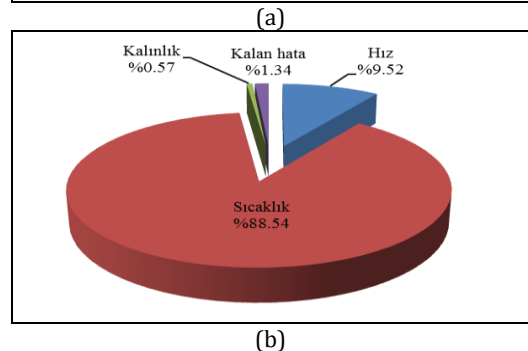
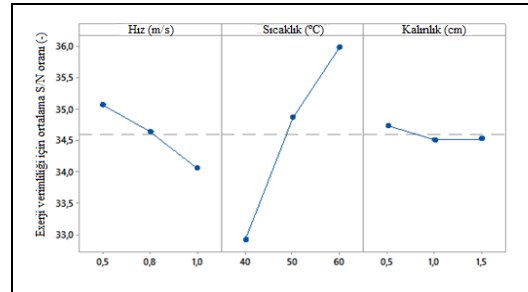
Her bir deney seti için Eş. 33'ten elde edilen ekserji verim değerleri için Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. 2 sa. sonraki kurutma süreci için ekserji verimliliği ve hesaplanan S/N oranı.

Table 9. Exergy efficiency and calculated S/N ratio for the drying process after 2 h.

Ortogonal dizi	Ekserji verimliliği (%)	S/N oranı	Standart sapma
111	48.7667	33.7369	2.59294
122	56.9333	35.0793	3.16596
133	65.9900	36.3893	0.32909
212	44.1000	32.8718	1.91572
223	56.5667	35.0490	0.90738
231	63.0667	35.9959	0.20817
313	40.5000	32.1304	1.90000
321	52.8667	34.4612	0.87369
332	60.0667	35.5672	1.49778

Maksimum ekserji verimi en büyük S/N oranında elde edilmiştir. Şekil 6'da S/N oranının parametrelere göre değişim grafiği verilmiştir. En fazla ekserji verimi 0.5 m/s hız, 60 °C sıcaklık ve 0.5 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir.



Şekil 6. (a): Farklı kuruma parametreleri (hız, sıcaklık ve kalınlık) için elde edilen ekserji verimliliği için S/N oranları. (b): Parametrelerin ekserji verimliliği üzerinde etki yüzdeleri.

Figure 6. (a): S/N ratios for exergy efficiency achieved for different drying parameters (velocity, temperature and thickness). (b): Percentage of influence of the parameters on exergy efficiency.



Ekserji veriminin sıcaklık artışı ile kademeli olarak arttığı görülmektedir. Yapılan deneylerin ekserji verimlerinin %44.1 ile %65.9 arasında değiştiği görülmektedir. Literatürde de tepsili kurutucuda 40-93 °C sıcaklık aralığında ve 0.5-1.5 m/s hava hızlarında yapılan gıda ürünlerinin kurutulması işlemlerinde hesaplanan ekserji verimlerinin %3.17 ile %100 arasında değiştiği görülmektedir [44].

Tablo 10'da ekserji verimliliğine ait S/N oranları için ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Parametrelerin ekserji verimi üzerindeki etki yüzdeleri ise Şekil 6(b)'de verilmiştir. Ekserji verimine en büyük katkı %88.54 ile sıcaklık parametresinde elde edilmiştir. Hava hızı (%9.52) ve ürün kalınlığı (%0.57) parametrelerinin ise ekserji verimi üzerindeki etkisinin düşük olduğu görülmüştür.

Tablo 10. Ekserji verimliliğine ait S/N oranları için ANOVA tablosu.

Table 10. ANOVA table for S/N ratios of exergy efficiency.

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Hız	2	1.5594	1.5594	0.7796	7.08	0.124
Sıcaklık	2	14.4912	14.4912	7.2455	65.8	0.015
Kalınlık	2	0.0945	0.0945	0.0472	0.43	0.700
Kalan hata	2	0.2202	0.2202	0.1100		
Toplam	8	16.3652				

### 3.3.4 Taguchi analizinin ekserjetik gelişme potansiyeline uygulanması

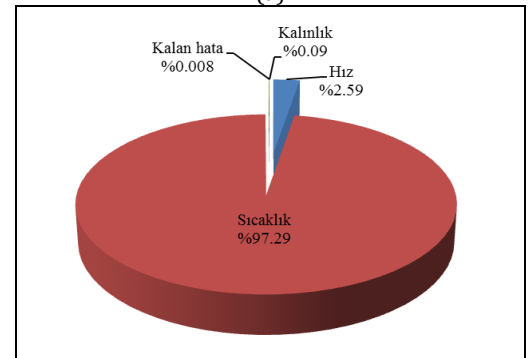
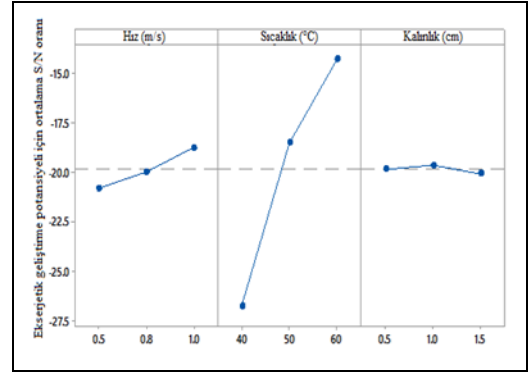
Her bir deney seti için ekserjetik gelişme potansiyeli değerleri Eş. 37'den elde edilmiştir. Taguchi yöntemi uygulanarak elde edilen S/N oran değerleri ve standart sapma değerleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. 2 sa. sonraki kurutma süreci için ekserjetik gelişme potansiyeli ve hesaplanan S/N oranı.

Table 11. Exergetic development potential and calculated S/N ratio for the drying process after 2 h.

Ortogonal dizi	Ekserjetik gelişme potansiyeli (J/kg)	S/N oranı	Standart sapma
111	0.041403	27.6745	0.0017134
122	0.112717	19.2055	0.0197719
133	0.167533	15.5213	0.0032185
212	0.046156	26.7398	0.0024834
223	0.114179	18.8603	0.0042953
231	0.191564	14.3570	0.0037052
313	0.051467	25.7874	0.0023091
321	0.134467	17.4394	0.0049635
332	0.223482	13.0189	0.0046365

En fazla ekserjetik gelişme potansiyeli en büyük S/N oranının elde edildiği 332 (1 m/s, 60 °C, 1 cm) numaralı deney setinde tespit edilmiştir. Şekil 7'de 3 farklı parametre için seçilen değerlere ait S/N oran değerlerinin değişimi verilmiştir. Hava hızı ve sıcaklık artışının ekserjetik gelişme potansiyeli değerini artırdığı, ürün kalınlığı değişiminin ise etkili bir parametre olmadığı görülmektedir. Optimum değerler 1 m/s hız, 60 °C sıcaklık ve 1 cm kalınlık değerlerinde elde edilmiştir. Ekserjetik gelişme potansiyeli değerinin en fazla olduğu durumda kurutucunun ekserji yıkım değerinin de fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 7. (a): Farklı kurutma parametreleri (hız, sıcaklık ve kalınlık) için elde edilen ekserjetik gelişme potansiyeline ait S/N oranları. (b): Parametrelerin ekserjetik gelişme potansiyeli üzerinde etki yüzdeleri.

Figure 7. (a): S/N ratios of exergetic development potential obtained for different drying parameters (velocity, temperature and thickness). (b): Percentage of influence of the parameters on the exergetic development potential.

Ekserjetik gelişme potansiyel değerlerine ait S/N oranları için elde edilen ANOVA analizi sonuçları Tablo 12'de verilmiştir. Anova sonuçlarından elde edilen parametrelerin yüzde oranları Şekil 7'de verilmiştir. En fazla katkının %97.29 ile sıcaklık parametresinde olduğu görülmektedir. %2.59 ve %0.09 ise sırası ile hız ve kalınlık parametrelerinin katkı değerleri olarak hesaplanmıştır. Parametrelerin katkı sırası ise sıcaklık>hız>kalınlık şeklinde elde edilmiştir.

Tablo 12. Ekserjetik gelişme potansiyeli değerlerine ait S/N oranları için ANOVA tablosu.

Table 12. ANOVA table for S/N ratios of exergetic development potential values.

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Hız	2	6.404	6.404	3.202	309.90	0.003
Sıcaklık	2	240.057	240.057	120.0	11616.2	0.00
Kalınlık	2	0.244	0.244	0.122	11.80	0.078
Kalan hata	2	0.021	0.021	0.010		
Toplam	8	246.726				

### 3.4 Taguchi metodunun hata analizi ve doğrulama çalışması

Deneyisel olarak elde edilen nem içeriği Taguchi yöntemi ile yapılan analiz sonucunda aynı zamanda tahmin edilebilir.

$$S/N' = S/N_{avg} + \sum_{i=0}^p (S/N_i - S/N_{avg}) \quad (38)$$

Burada; [S/N]' tahmini S/N oranı, [S/N]<sub>avg</sub> tüm S/N oranlarının ortalaması, p tasarım parametrelerinin sayısı, [S/N]<sub>i</sub> optimum seviyenin S/N oranıdır. Tablo 13'te tahmini S/N oranları kullanılarak her bir deney için Taguchi metodu kullanılarak elde edilen tahmini nem içeriği değerleri verilmiştir. Deneysel nem içeriği değerleri ile program yardımı ile hesaplanan tahmini nem içeriği değerleri arasındaki hata yüzdeleri de hesaplanmıştır. En yüksek hata değeri 332 (0.5 cm-50 °C-0.5 m/s) numaralı deney seti için elde edilmiştir. Yapılan tüm deneylerin ortalama hata değeri ise %3.58 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 13. Farklı kurutma parametrelerine ait tahmini hata değerleri.

Table 13. Estimated error values for different drying parameters.

Ortogonal dizi	Deneysel nem içeriği (g su/g kuru madde)	Tahmini S/N oranı	Tahmini nem içeriği (g su/g kuru madde)	Hata oranı (%)
111	7.21667	-16.5244	6.87963	4.89
122	7.25667	-17.5864	7.38074	1.68
133	7.06667	-17.2569	7.27963	2.92
212	7.82333	-18.1396	8.03630	2.65
223	7.94000	-17.3553	7.60296	4.43
231	3.73333	-11.8129	3.85741	3.21
313	8.45333	-18.9115	8.57741	1.44
321	4.28667	-12.9143	4.49963	4.73
332	5.67000	-14.4311	5.33296	6.31

## 4 Sonuçlar

Bu çalışmada konvektif kurutucuda salatalığın kurutma sürecinin optimizasyonu Taguchi metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taguchi analizinden, en düşük nem içeriğine ve en fazla büzülme katsayısına sahip optimum kurutma koşullarının en yüksek hava hızı (1 m/s), en yüksek sıcaklık (60 °C) ve en düşük ürün kalınlığında (0.5 cm) gerçekleştiği görülmektedir. ANOVA analizleri bize kalınlığın, nem içeriği ve ürünün hacimsel değişimi üzerinde etkili parametre olduğunu göstermektedir. Hacimsel değişim ile ürünün kalınlığının azalması üründen ortama nem transferini büyük ölçüde artırdığı söylenebilir. Ekserji verimi için Taguchi metodu kullanılarak elde edilen optimum kurutma koşulları 0.5 m/s hız, 60 °C sıcaklık ve 0.5 cm kalınlık olarak elde edilmiştir. 9 deney için kurutucudaki ekserji verimlerinin %40.5 ile %65.9 aralığında değiştiği görülmektedir. Kurutma sisteminin ekserji verimine en fazla katkı %88.54 ile hava sıcaklığında elde edilmiştir. Bununla birlikte ürün kalınlığının ve hızının etkisinin düşük olduğu görülmüştür. Aynı şekilde kurutma işleminde ekserjetik gelişme potansiyeli değeri için optimum kurutma koşulları ise 1 m/s hız, 60 °C hava sıcaklığı ve 1 cm ürün kalınlığında meydana gelmiştir. Ekserjetik gelişme potansiyeli değeri üzerindeki en fazla katkı ekserji veriminde olduğu gibi %97.29'lük oran ile hava sıcaklığında gerçekleşmiştir. Deneysel çalışmanın doğruluğu için nümerik analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Son olarak Taguchi metodunun tahmini hata analizi çalışması yapılmıştır. Programda tüm deneyler için ortalama hata %3.58 olarak elde edilmiştir. Bu çalışma endüstriyel kurutma sistemlerinin imalatında ve ürünlerin optimum kurutma koşullarının tespit edilmesinde

kullanılabilir. Bu sayede ürünün kalitesi artırılarak üretimde kullanılan enerjiden tasarruf edilmesi sağlanabilir. Sistemde kullanılabilir enerji olan ekserji verimliliğinin artırılması için ekserji yıkımının azaltılması gerekmektedir. Bunun için kurutucudan ortama olan ısı kayıplarının yalıtım yapılarak azaltılması sağlanmalıdır.

## 5 Conclusions

In this study, the optimization of the drying process for a cucumber in a convective dryer was carried out using the Taguchi method. From the Taguchi analysis, it is seen that the optimum drying conditions with the lowest moisture content and the highest shrinkage coefficient occur at the highest air velocity (1 m/s), the highest temperature (60°C) and the lowest product thickness (0.5 cm). The ANOVA analysis shows us that thickness is the most effective parameter on the moisture content and the volume change of the product. It can be said that decreasing the thickness of the product with the volumetric change greatly increases the transfer of moisture from the product to the medium. Using the Taguchi method, the optimum drying conditions were obtained for the exergetic efficiency as 0.5 m/s air velocity, 60°C air temperature and 0.5 cm product thickness. For the 9 experiments, it is seen that the exergetic efficiency of the dryer varies between 40.5% and 65.9%. The air temperature had the greatest contribution to the exergetic efficiency of the drying system with 88.54%. However, the effects of the product thickness and air velocity were found to be low. Likewise, the optimum drying conditions for the exergetic development potential value for the drying process occurred at 1 m/s air velocity, 60°C air temperature and 1 cm product thickness. Like the exergetic efficiency the highest contribution for the exergetic development potential value was the air temperature with 97.29%. A Numerical analysis was performed to check the accuracy of the experimental study. It was seen that the results obtained were compatible with each other. Finally, the estimated error analysis of the Taguchi method was carried out. The average error for all experiments in the program was found to be 3.58%. This study can be used in the manufacturing of industrial drying systems and in determining the optimum drying conditions of products. In this way, the energy used in production can be reduced by increasing the quality of the product. In order to increase the exergetic efficiency, which is the available energy in the system, exergy destruction should be reduced. To do this, the dryer should be insulated to reduce the heat losses from the dryer to the environment.

## 6 Kaynaklar

- [1] Sahin AZ, Dincer I. "Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(16), 3267-73, 2002.
- [2] Shahari N, Hussein SM, Nursabrina M, Hibberd S. "Mathematical modelling of cucumber (Cucumis Sativus) Drying". *Proceedings of the 21<sup>st</sup> National Symposium on Mathematical Sciences (SKSM21)*, Penang, Malaysia, 6-8 November 2013.
- [3] Lima AGB, Queiroz MR, Nebra SA. "Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying solids with ellipsoidal configuration". *Chemical Engineering Journal*, 86(1-2), 83-85, 2002.
- [4] Queiroz MR, Nebra SA. "Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas". *Journal of Food Engineering*, 47(2), 127-132, 2001.

- [5] Syahrul S, Hamdullahpur F, Dincer I. "Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles". *Exergy, an International Journal*, 2(2), 87-98, 2002.
- [6] Akpınar EK. "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, 2004.
- [7] Fortes M, Ferreira WR. "Second low analysis of drying: modelling and simulation of fluidized bed grain drying". *14<sup>th</sup> International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 22-25 August 2004.
- [8] Oztop MH, Sahin S, Sumnu G. "Optimization of microwave frying of potato slices by using taguchi technique". *Journal of Food Engineering*, 79(1), 83-91, 2007.
- [9] Vega-Galvez A, Puente-Diaz L, Lemus-Mondaca R, Miranda M, Torres MJ. "Mathematical modelling of thin-layer drying kinetics of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.)". *Journal Food Process Preservation*, 38(2), 728-736, 2012.
- [10] Kumar C, Millar GJ, Karim MA. "Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material". *Drying Technology*, 33(2), 227-237, 2015.
- [11] Kaya A, Aydın O, Kolaylı S. "Effect of different drying conditions on the vitamin C (ascorbic acid) content of Hayward kiwifruits (*Actinidia deliciosa* Planch)". *Food and Bioproducts Processing*, 88(2-3), 165-173, 2010.
- [12] Lemus-Mondaca RA, Zambra CE, Vega-Gálvez A, Moraga NO. "Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying process in papaya slices". *Journal of Food Engineering*, 116(1), 109-117, 2013.
- [13] Bezerra CV, Silva LHM, Corrêa DF, Rodrigues AMC. "A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of passion fruit peel". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 750-755, 2015.
- [14] Karim MA, Hawlader MNA. "Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23), 4914-4925, 2005.
- [15] Hussain MM, Dincer I. "Numerical simulation of two-dimensional heat and moisture transfer during drying of a rectangular object". *Numerical Heat Transfer, Part A: Application: An International Journal of Computation and Methodology*, 43(8), 867-878, 2003.
- [16] Etemoglu AB, Can M, Avci A, Pulat E. "Theoretical study of combined heat and mass transfer process during paper drying". *Heat and Mass Transfer*, 41(5), 419-427, 2005.
- [17] Doymaz I, Aktas C. "Determination of drying and rehydration characteristics of eggplant slices". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 833-841, 2018.
- [18] Turkan B, Etemoglu AB, Can M. "An investigation into evaporative ink drying process on forced convective heat and mass transfer under impinging air jets". *Heat and Mass Transfer*, 55(5), 1359-1369, 2019.
- [19] Turkan B, Canbolat AS, Etemoglu AB. "Numerical investigation of multiphase transport model for hot-air drying of food". *Journal of Agricultural Sciences*, 25(4), 518-529, 2019.
- [20] Saha B, Bucknall M, Arcot J, Driscoll R, "Derivation of two layer drying model with shrinkage and analysis of volatile depletion during drying of banana". *Journal of Food Engineering*, 226(2018), 42-52, 2018.
- [21] Folyan JA, Osuolale FN, Anawe PAL, "Data on exergy and exergy analyses of drying process of onion in a batch dryer". *Data in Brief*, 21, 1784-1793, 2018.
- [22] Singh P, Talukdar P, "Design and performance evaluation of convective drier and prediction of drying characteristics of potato under varying conditions". *International Journal of Thermal Sciences*, 142, 176-187, 2019.
- [23] Yuan Y, Tan L, Xu Y, Yuan Y, Dong J, "Numerical and experimental study on drying shrinkage- deformation of apple slices during process of heat-mass transfer". *International Journal of Thermal Sciences*, 136, 539-548, 2019.
- [24] Taguchi G. *Introduction to Quality Engineering*. Tokyo, Asian Productivity Organization, 1990.
- [25] Sabarez HT. "Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes". *Journal of Food Engineering*, 111(2), 279-288, 2012.
- [26] Çengel YA. *Heat Transfer: A Practical Approach*. Boston, USA, McGraw-Hill, 2002.
- [27] Desmorieux H, Moyne C. *Analysis of Dryer Performance for Tropical Foodstuffs Using the Characteristic Drying Curve Concept*. Editors: Mujumdar AS. Drying 92, 834-843, Amsterdam, Elsevier, 1992.
- [28] Rahman MS, Lamb J. "Air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated pineapple". *Journal of Food Process Engineering*, 14(3), 163-171, 1991.
- [29] Madamba PS, Driscoll RH, Buckle KA. "The thin-layer drying characteristics of garlic slices". *Journal of Food Engineering*, 29(1), 75-97, 1996.
- [30] Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Oxford University Press, 1975.
- [31] McMinn WAM, Magee TRA. "Principles, methods and applications of the convective drying of food stuffs". *Food and Bioproducts Processing*, 77(3), 175-193, 1999.
- [32] Karathanos VT, Villalobos G, Saravacos GD. "Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data". *Journal of Food Science*, 55(1), 218-223, 1990.
- [33] Babalis SJ, Belessiotis VG. "Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs". *Journal of Food Engineering*, 65(3), 449-458, 2004.
- [34] Fasina OO, Fleming HP. "Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching". *Journal of Food Engineering*, 47(3), 203-210, 2001.
- [35] Comsol Multiphysics 5.3. "Heat Transfer Model Library". Heat Transfer Module User's Guide, USA, 2017.
- [36] Moffat RJ. "Describing the uncertainties in experimental results". *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), 3-17, 1988.
- [37] Akpınar EK. "Deneysel çalışmalarındaki hata analizine bir örnek: Kurutma deneylerindeki hata analizi". *Mühendis ve Makine*, 46(540), 41-48, 2005.
- [38] Ersöz MA, Doğan H. "Akışkan yataklı sürekli bir kurutucuda göl tuzu kurutulmasının deneysel incelenmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 155-163, 2010.
- [39] Dissa AO, Desmorieux H, Savadogo PW, Segda BG, Kouliadiati J. "Shrinkage porosity and density behaviour during convective drying of spirulina". *Journal of Food Engineering*, 97(3), 410-418, 2010.

- [40] Aviara NA, Onuoha LN, Falola OE, Igbeka JC. "Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer". *Energy*, 73, 809-817, 2014.
- [41] Colak N, Hepbasli A. "Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer". *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1188-1193, 2007.
- [42] Van Gool W. *Innovation and Technology*. Editors: Soares ODD, Cruz AM, Pereira GC, Soares IMRT, Reis AJPS. Energy Policy: Fairly Tales and Factualities, 93-105, Driebergen, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [43] Hammond GP, Stapleton AJ. "Exergy analysis of the United Kingdom energy system". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 215(2), 141-162, 2001.
- [44] Aghbashlo M, Mobli H, Rafiee S, Madadlou AA. "Review on exergy analysis of drying processes and systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 1-22, 2013.