

Infrared Kurutucuda Ayçiçeği Tohumlarının Kuruma Davranışı ve Kuruma Modellerine Uyum Analizi

*Mehmet KALENDER¹, Cevdet AKOSMAN²

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Elazığ
²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Elazığ
*mkalender@firat.edu.tr

(Geliş/Received:25.09.2014; Kabul/Accepted:23.02.2015)

Özet

Bu çalışmada, ayçiçeği tohumlarının infrared kuruma karakteristiği incelendi. Kurutma deneyleri laboratuvar tipi bir infrared kurutucuda 50-80 °C sıcaklık aralığında yürütüldü. Deneysel verilerden ayçiçeği tohumu örneklerinin azalan hız periyodunda kuruduğu belirlendi. Çalışılan sıcaklıklardaki difüzyon katsayısı değerleri 1.109×10^{-10} , 1.118×10^{-10} , 1.162×10^{-10} , 1.333×10^{-10} m²/s olarak hesaplandı. Deneysel nem oranı değerleri literatürde yaygın olarak kullanılan teorik kuruma denklemleriyle (Newton, Page ve Difüzyon) kıyaslandı. Sonuç olarak, difüzyon modelinin ayçiçeği tohumlarının infrared kurumasını en iyi temsil ettiği sonucuna ulaşıldı.

Anahtar Kelimeler: Infrared Kurutma, Ayçiçeği Tohumu, Non-Linear İstatistiksel Analiz.

Drying Behaviour of Sunflower Seeds in Infrared Dryer and Fitting Analysis to Drying Models

Abstract

In this study, infrared drying characteristic of sunflower seeds was investigated. The drying experiments were performed in the infrared dryer and in the temperature range of 50-80 °C. It was determined that all the drying process of sunflower seeds occurred in the falling rate period. The values of diffusion coefficient at the temperatures studied were calculated as 1.109×10^{-10} , 1.118×10^{-10} , 1.162×10^{-10} , 1.333×10^{-10} m²/s. The experimental moisture ratio values were compared with theoretical drying equations (Newton, Page, and Diffusion) commonly used in literature. As a result, it was found that the most available model for the infrared drying was Diffusion model.

Keywords: Infrared Drying, Sunflower Seeds, Non-Linear Statistical Analysis.

1. Giriş

TÜİK 2013 verilerine göre yılda 1.523.000 ton üretimle ayçiçeği dünyada lider ürünlerimiz sıralamasında 8. sırada yer almaktadır [1]. Ayçiçeği yağlı tohumlardan yağ üretiminde büyük paya sahip bir bitkidir. Yağ oranı nispeten daha az olan ayçiçeği tohumları genelde çerez olarak değerlendirilir [2]. Ham yağ, rafine yağ ve kabuklardan plastik, lesitin ve emülgatör gibi birçok farklı ürün elde edilebilir. Gıda endüstrisinin yanında ayçiçeğinin biyodizel üretiminde de ilgi gördüğü yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur [3-5].

Ayçiçeği tohumları hasat edildikten sonra uygun depolama şartları altında muhafaza

edilmelidir. Uygun olmayan depolama şartları altında mikrobiyal gelişmeler, kuru madde kaybı, kızışma, ekstraksiyon sonrası da yüksek serbest yağ asidi oluşumu, tohumlamada çimlenme kayıpları gibi birçok istenmeyen durum meydana gelebilir. Ayçiçeği tohumunun zarar görmeden depolanabilmesi için nem oranının % 10'un üzerinde olmaması gerekir. Ayçiçeği bitkisinin hasat zamanı geldiğinde nem oranı % 25'in altına düşer. Ayçiçeği tohumlarının bitki üzerinde kurumasını beklemek, tohum dökülmesi ve kuş gibi zararlıların ürün kaybına yol açmasına neden olabilir. Bu nedenle, hasat edilen ayçiçeği tohumlarının nem oranı yaklaşık olarak % 18 civarındadır [6, 7].

Görüldüğü üzere, ayçiçeği tohumlarının hasat edildikten sonra nem içeriğinin istenen seviyeye düşürülmesi amacıyla kurutulması gerekmektedir.

Gıda maddelerinin kurutulmasında en ilkel yöntem güneş enerjisi kullanılarak açık havada gerçekleştirilen kurutmadır. Bu tür bir kurutma hava şartlarına bağlı kalma, uzun kuruma süresi, zararlı böceklerin etkileri gibi birçok dezavantaja sahiptir. Endüstriyel olarak gerçekleştirilen kurutma işlemlerinden en çok kullanılan kurutma prosesleri sıcak havanın kullanıldığı proseslerdir. Sıcak hava kurutması ise yüksek enerji gerektirmesi ve yine uzun kuruma süresi gibi sınırlamalara sahiptir. Gıda ürünlerinin uzun kuruma sürelerinde kurutulması materyalde biyolojik bozunmalara yol açabilir. Kuruma süresini azaltmak için yüksek sıcaklıklarda çalışmak gerekir. Gıda maddelerinin yüksek sıcaklıklarda kısa süreli kurumalarına imkân sağlayan infrared ve mikrodalga kurutma yöntemleri son zamanlarda araştırmacıların ilgi odağı olmuştur [7-11].

İnfrared kurutmanın esası materyalin geniş yüzey alanına çarpan ışınların ısı enerjisine dönüşerek ince tabaka halinde kuruma meydana getirmesidir [12]. İnfrared kurutmada gıda materyallerinin nem içeriği kuruma kinetiğini önemli ölçüde etkilemektedir. Katı maddeler infrared ışınları genellikle ince bir yüzey tabakası içinde absorplar. Fakat, gözenekli katı maddelerde ışınlar daha derin noktalara nüfuz eder. Gözenekli materyallerin iletkenlikleri nem içeriğine bağlıdır. Kuruma esnasında materyalin ışınma özelliği nem içeriği azalışından dolayı değişir. İnfrared ışınlar kısa dalga boylarında su içinde iletilirken, uzun dalga boylarında absorplanır. İnfrared kurutmanın konvektif kurutmaya göre sahip olduğu bazı avantajlar vardır: İnfrared kurutma yüksek ısı transfer katsayısı, kısa proses zamanı ve düşük enerji ihtiyacına sahiptir. İnfrared ışınlar için hava geçirgen olduğundan kurutma hava ortamında yapılabilir. Kurutucu ekipman kompakttır ve proses parametrelerinin kontrolünde yüksek derecede kontrol edilebilir özelliğe sahiptir [11, 12].

Yapılan literatür taramasında ayçiçeği tohumunun ince tabaka kuruması üzerine konvektif kurutma yöntemiyle birkaç çalışmaya rastlanmıştır [2, 7, 13], fakat infrared ve

mikrodalga kurutmaya ilişkin çalışma bulunmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada ayçiçeği tohumunun infrared kurutucuda kuruma karakteristiği incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda Elazığ piyasasından satın alınan ayçiçeği tohumu kullanıldı. Ayçiçeği tohumu örnekleri temizlendikten sonra deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere nemlendirildi ve saklama kapları ile buzdolabında muhafaza edildi.

2.2. İnfrared Kurutucu Deneylei

Deneysel çalışmalar Şekil 1’de gösterilen Mettler LJ16 marka infrared kurutucuda gerçekleştirildi. Ayçiçeği tohumu örnekleri hasat zamanlarında yaklaşık olarak sahip olunan % 20 [6, 7] nem oranlarına sahip olacak şekilde nemlendirildi. Nemlendirilmiş örnekler buzdolabında saklama kaplarında muhafaza edildi. Örneklerin başlangıç nem içerikleri infrared kurutucuda 105 °C’de belirlendi. Deneyleerde 10 g ayçiçeği tohumu örnek miktarı kullanıldı. Ayçiçeği tohumu örnekleri kurutma sıcaklıkları 50-80 °C aralığında olacak şekilde ayarlanan cihazın alüminyum kabına yerleştirildi. Deneysel çalışmalar örneklerin belirli zaman aralıklarında tartım değerleri alınarak yürütüldü. İki tartım değeri arasındaki fark % 0.5 oluncaya kadar tartım işlemine devam edildi.

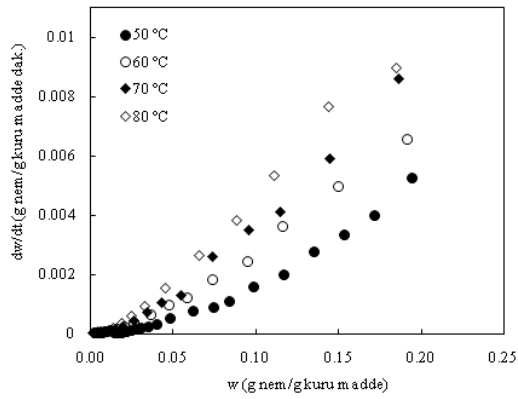


Şekil 1. Mettler LJ16 infrared kurutucu. (1) IR radyatör, (2) Alüminyum numune kabı, (3) Sıcaklık sensörü, (4) Ekran, (5) Kontrol paneli

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Kuruma Kinetiği Sonuçları

Ayçiçeği tohumu örneklerinin infrared kurutucuda zamanla ağırlık değişiminin kaydedilmesiyle kuru maddenin birim kütlesi başına ortalama nem (w , nem içeriği) ve birim zamanda kuru madde başına ortalama nem miktarı (dw/dt , kuruma hızı) değerleri hesaplandı. Kuruma periyodunun belirlenmesi için $w-dw/dt$ grafikleri oluşturuldu (Şekil 2).



Şekil 2. Ayçiçeği tohumu örneklerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma hızları

Şekil 2’de infrared kurutucuda kuruma kinetiği incelenen ayçiçeği tohumunun çalışılan tüm sıcaklıklardaki kuruma hızı periyotlarının azalan hız periyodu olduğu görülmektedir. Azalan hız periyodunda katının iç kısımlarındaki suyun yüzeye hareketi yüzeyden buharlaşan suyun yerini doldurmak için yeterli değildir ve bundan dolayı katı-sıvı ara yüzeyi yüzeyden katı içine doğru yeniden oluşmaya başlar. Böylece, katı parçacıkların sıcaklığı yükselir ve kuruma hızı hızla azalmaya başlar. Isı ve kütle transferinin meydana geldiği toplam alanın azalmasından dolayı kuruma hızında azalma gözlenir; bu nedenle, daha ileri kuruma katı parçacıkların içerisindeki nemin hareketine bağlı olarak değişir. Bu hız periyodunun sonunda kuruma hızı denge nemi noktasında sifira yaklaşır [14, 15]. Azalan hız bölgesinde katıdaki nem taşınımının Fick’in ikinci yasası ile açıklanabileceği literatürde belirtilmiştir [16]. Fick’in ikinci yasasının tek yönlü difüzyon için matematiksel ifadesi çözümünden aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\ln \frac{w - w_e}{w_0 - w_e} = \ln(M) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{D\pi^2}{L^2} t \quad (1)$$

Burada, w_0 ve w_e sırasıyla başlangıç ve denge anındaki nem içerikleri, M boyutsuz ayrılabilir nem oranı, D suyun katıdaki difüzyon katsayısı, L katı içerisinde difüzyonun gerçekleştiği boyutun kalınlığı ve t kuruma süresidir. Ayçiçeği tohumuna ait zamanla nem içeriği değişimi Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekil 3’den görüldüğü gibi çalışılan tüm sıcaklık değerlerinde zamanla nem içeriği değerleri azalmakta ve belirli bir süre sonra sabit bir nem içeriği değerine ulaşılmaktadır. Bu durumdaki nem içeriği değeri denge nem içeriği (w_e) değeridir. Infrared kurutucularda genellikle sifira yakın bir değer olan denge nem içeriği değerleri [11] çalışılan sıcaklıklarda 0.0016-0.014 arasında değişmektedir.

Denge nem içeriği değerleri belirlenen ayçiçeği tohumu örneğinin çalışılan sıcaklıklardaki difüzyon katsayıları hesaplandı.

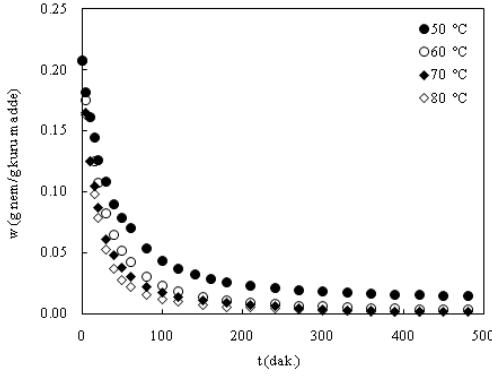
Bu amaçla, Eşit. 1 kullanılarak $t - \left(\ln \frac{w - w_e}{w_0 - w_e} \right)$

grafikleri oluşturuldu (Şekil 4). Şekil 4’deki eğrilerin lineer regrasyon ile hesaplanan eğimlerinden $D\pi^2/L^2$ değerleri hesaplandı. Ayçiçeği tohumu örnekleri için karakteristik uzunluk değeri ortalama olarak 2.3 mm olarak ölçüldü. Eğim ve L değerleri kullanılarak hesaplanan difüzyon ve regrasyon katsayısı değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

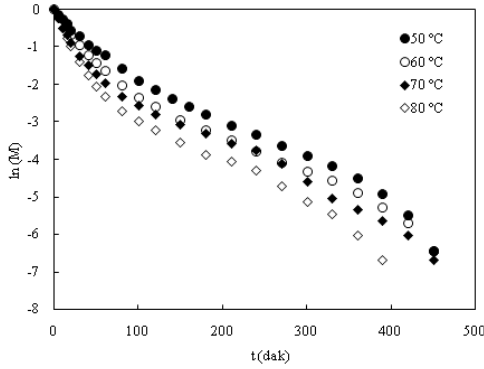
Tablo 1. Ayçiçeği tohumuna ait difüzyon katsayısı değerleri

Sıcaklık (°C)	R^2	$D \times 10^{10}$ (m ² /s)
50	0.983	1.109
60	0.971	1.118
70	0.970	1.162
80	0.949	1.333

Tablo 1’den görüldüğü gibi sıcaklık artışıyla difüzyon katsayısı değerleri artmaktadır.



Şekil 3. Ayçiçeği tohumu örneklerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri



Şekil 4. Farklı kurutma sıcaklıklarında ayçiçeği tohumuna ait logaritmik kuruma eğrileri

3.2. Deneysel Verilerin Bazı Kuruma Kinetiği Modellerine Uygulanması

Ayçiçeği tohumu örneklerinin infrared kuruma deneyleri sonucunda elde edilen ayrılabilir nem oranı değerlerinin zamanla değişimi literatürde yaygın olarak kullanılan bazı kuruma modeli eşitlikleriyle kıyaslandı. Matematiksel modeller, Newton [17], Page [18] ve Difüzyon [19] olup model parametrelerinin bulunmasında STATİSTİCA 10 programı kullanılmıştır. Kullanılan modellerin matematiksel ifadeleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. İstatistiksel hesaplarda kullanılan modeller ve matematiksel ifadeleri

No	Model	Matematiksel ifade
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Difüzyon	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$

İstatistiksel analizlerde belirleyici parametreler olan ki-kare (χ^2), MBE (ortalamadan sapma hatası) ve RMSE (ortalamadan fark kareler sapma hatası) eşitlikleri ise;

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

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{hesaplanan,i} - MR_{deneysel,i}) \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{hesaplanan,i} - MR_{deneysel,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

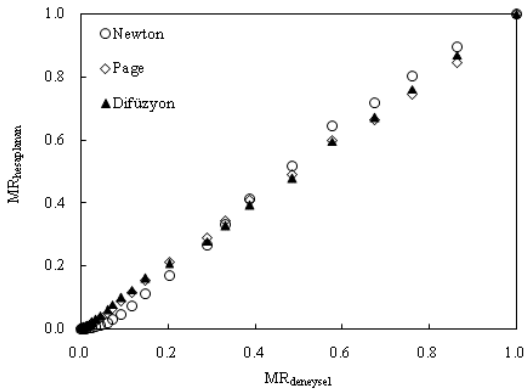
şeklinde dir. Burada, $MR_{deneysel,i}$ ve $MR_{hesaplanan,i}$ sırasıyla deneysel ve model eşitliklerinden hesaplanan ayrılabilir nem oranı değerleri, N hesaplamalarda kullanılan veri sayısı ve n ise model eşitliklerindeki sabit sayısıdır. Ki-kare değeri istatistiksel olarak deneysel değerlerle hesaplanan değerler arasındaki farklılığın bir ölçüsüdür. Ki-kare sıfır ise deneysel ve hesaplanan değerler tam olarak uyumludur, sıfırdan büyük olması durumunda ise aradaki farkın büyük olduğu anlaşılır. Bu nedenle Ki-kare değeri sıfıra ne kadar yakınsa deneysel sonuçları ifade etmede kullanılacak modelin kullanılma güvenilirliği o kadar yüksektir. Ki-kare değeri R^2 ’den daha kullanışlı istatistiksel bir değerdir [20].

Yapılan istatistiksel analiz sonucu çalışılan sıcaklıklarda ayçiçeği tohumu için hesaplanan model sabitleri ile regrasyon katsayısı, Ki-kare, MBE ve RMSE değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’den ayçiçeği tohumunun infrared kurutulmasında çalışılan tüm sıcaklık değerlerinde kuruma olayını en iyi temsil eden modelin Ki-kare değerlerinin sıfıra en yakın olan difüzyon modeli (3) olduğu görülmektedir. Regrasyon katsayılarından da benzer sonuç elde edilmiştir. Bununla birlikte, 50 °C’de 2 ve 3 no’lu modellerin regrasyon katsayılarının yaklaşık olarak aynı olması, fakat Ki-kare değerinin açık şekilde farklı olması model uyumunda Ki-karenin daha kullanışlı olduğunun göstergesidir. Ayçiçeği tohumu örneğinin 50

°C’de $MR_{deneysel,i} - MR_{hesaplanan,i}$ grafiği Şekil 5’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Çalışılan sıcaklıklarda farklı modeller için ayçiçeği tohumuna ait istatistiksel parametreler ve model sabiti değerleri

Model No	k	a	b	n	R ²	$\chi^2 \times 10^3$	RMSE	MBE
50 °C								
1	0.0222	---	---	---	0.989	1.051	0.03176	-0.00821
2	0.0473	---	---	0.7982	0.999	0.111	0.01011	-0.00323
3	0.0457	0.5032	0.2563	---	0.999	0.043	0.00615	-0.00056
60 °C								
1	0.0401	---	---	---	0.984	1.314	0.03545	-0.01255
2	0.0788	---	---	0.7872	0.993	0.594	0.02330	-0.00655
3	0.0658	0.6952	0.2162	---	0.997	0.272	0.01537	-0.00142
70 °C								
1	0.0406	---	---	---	0.984	1.2328	0.03437	-0.01278
2	0.0892	---	---	0.7521	0.997	0.2745	0.01586	-0.00568
3	0.0667	0.7120	0.1955	---	0.999	0.0318	0.00527	-0.00038
80 °C								
1	0.0468	---	---	---	0.993	0.5404	0.0227	-0.01027
2	0.0741	---	---	0.8491	0.997	0.2458	0.0149	-0.00683
3	0.0604	0.8424	0.2003	---	0.999	0.0089	0.0028	-0.00009



Şekil 5. Ayçiçeği için 50 °C’de farklı modeller için elde edilen deneysel ayrılabilir nem oranları ile hesaplanan ayrılabilir nem oranlarının değişimi

Şekil 5’den de en uygun modelin difüzyon modeli olduğu görülmektedir. Benzer grafikler çalışılan diğer tüm sıcaklıklar için de elde edilmiştir.

Ayçiçeği tohumunun kurumasını en iyi temsil eden difüzyon modeli için hesaplanan sabitler (Tablo 3) kullanılarak 50 °C’de zamanla ayrılabilir nem oranı değişimi aşağıdaki eşitlikteki gibidir:

$$MR_{ayçiçeği} = 0.5032e^{-0.0457t} + 0.4968e^{-0.0117t} \quad (5)$$

4. Semboller

- D : Difüzyon katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
- M : Ayrılabilir nem oranı ($= \frac{w - w^*}{w_0 - w^*}$) (-)
- MR : İstatistiksel analizlerde kullanılan ayrılabilir nem oranı
- L : Katı içerisinde difüzyonun gerçekleştiği boyutun kalınlığı (m)
- t : Zaman (dak.)
- T : Sıcaklık (°C)
- W : Katının t anındaki nem içeriği (kg nem/kg kuru madde)
- w_0 : Katının başlangıç nem içeriği (kg nem/kg kuru madde)
- w_e : Katının denge nem içeriği (kg nem/kg kuru madde)
- x : Katı içerisinde difüzyonun gerçekleştiği konum (m)

5. Kaynaklar

1. T.C. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü (BÜGEM) Faaliyetleri Verileri, <http://www.tarim.gov.tr/sgb/Belgeler/SagMenuVeriler/BUGEM.pdf> (Son erişim tarihi: 27.02.2015)

2. De Figueiredo, A., Baumler, E., Riccobene, I., Nolasco, S., (2011). Moisture-dependent engineering properties of sunflower seeds with different structural characteristics, *Journal of food engineering*, 102, 58-65.
3. Pereyra-Irujo, G.A., Aguirrezábal, L.A., (2007). Sunflower yield and oil quality interactions and variability: Analysis through a simple simulation model, *Agricultural and forest meteorology*, 143, 252-265.
4. Georgogianni, K., Kontominas, M., Pomonis, P., Avlonitis, D., Gergis, V., (2008). Conventional and in situ transesterification of sunflower seed oil for the production of biodiesel, *Fuel Processing Technology*, 89, 503-509.
5. Antolin, G., Tinaut, F., Briceno, Y., Castano, V., Perez, C., Ramirez, A., (2002). Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification, *Bioresource technology*, 83, 111-114.
6. Seifi, M. R. & Alimardani, R. (2010). Moisture-dependent physical properties of sunflower seed, *Modern Applied Science*. 4, 135-143.
7. Darvishi, H., Azadbakht, M., Asl, A.R., (2012). Experimental Analysis of Moisture Transfer during Thin layer Drying of Black Sunflower Seeds, *International Journal of Agricultural and Food Science*, 2, 103-17.
8. Chua, K.J., Chou, S.K., (2005). A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts, *International journal of food science & technology*, 40, 23-39.
9. Hirunlabh, J., Tirawanichakul, S., Soponronnarit, S., (1992). Strategies for drying soybean: batch process, *Songklanakarin Journal of Science and Technology (Thailand)*.
10. Vadivambal, R., Jayas, D., (2007). Changes in quality of microwave-treated agricultural products—a review, *Biosystems engineering*, 98, 1-16.
11. Toğrul, H., (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot, *Journal of food engineering*, 77, 610-619.
12. Nowak, D., Lewicki, P.P., (2004). Infrared drying of apple slices, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5, 353-360.
13. Seifi, M.R., Alimardani, R., (2010). The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704), *Journal of Agricultural Science*, 2, p125.
14. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P., *Unit operations of chemical engineering*, McGraw-Hill New York, 1993.
15. Perry, J.H., (1950). Chemical engineers' handbook, *Journal of Chemical Education*, 27, 533.
16. Coulson, J.M., Coulson & Richardson's chemical engineering, Butterworth-Heinemann, 1999.
17. Liu, Q., Bakker-Arkema, F., (1997). Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66, 275-280.
18. Zhang, Q., Litchfield, J., (1991). An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer, *Drying Technology*, 9, 383-395.
19. Kassem, A., Comparative studies on thin layer drying models for wheat, in: 13th international congress on agricultural engineering, 1998, pp. 2-6.
20. Spiegel, M., Stephens, L., Çeviri Ed: Esin, A. ve Çelebioğlu, S., *İstatistik*, Nobel yayımları, Ankara, 1999.