

## Kırmızıbiberin Fan Destekli Mikrodalga ile Kurutulmasında Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi ve Uygun Kuruma Modelinin Belirlenmesi

Sevil KARAASLAN\*, İ.Kurtuluş TUNÇER  
ÇÜ, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümü, Adana

Geliş Tarihi: 07.11.2008

Kabul Tarihi: 15.07.2009

**ÖZET:** Bu çalışmada, kırmızıbiberin kurutulması mikrodalga fan destekli konveksiyonel fırın kombinasyonunda incelenmiştir. Kırmızıbiber, mikrodalga, mikrodalga-sıcak hava kombinasyonu ve sıcak havayla kurutulmuştur.. Kırmızıbiberin kuruma zamanı, kuruma oranı değerleri üzerindeki mikrodalga, mikrodalga ile sıcak hava ve sadece sıcak havayla kurutmanın etkileri araştırılmıştır. Mikrodalga enerjisi ile yapılan kurutma denemelerinde kullanılan güç seviyeleri 180, 360, 540, 720, 900W olarak seçilmiştir. Sıcak hava ile kurutma denemeleri ise 100, 180, 230°C' de yapılmıştır. Mikrodalga ve sıcak hava birleşiminde ise 180W+100 °C, 180W+180 °C, 180W+230 °C, 540W+100 °C, 540+180 °C, 540+230 °C' de kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bir laboratuvar kurutucusunda ürünlerin kuruma süresinin belirli bir anındaki nem içeriğini belirlemek amacıyla Newton, Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Pabis, Logaritmik, Wang ve Singh, Difüzyon yaklaşımı, Verma, İki Terimli Eksponansiyel, Basitleştirilmiş Fick Difüzyonu, Midilli ve ark. modelleri birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu modellerin performansları; gözlemlenen ve tahmini nem oranları arasında belirtme katsayısı değeri ( $R^2$ ), tahmini standart hatası (SEE) ve kalanların kareleri toplamına (RSS) göre karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tüm ürünlerde Midilli ve ark. modelinin ürünlerin kuruma davranışını diğerlerinden daha iyi açıkladığı belirlenmiştir. Modeller, model katsayıları ve hesaplanan değerlerle deneysel veriler arasındaki belirtme katsayıları incelendiğinde en yüksek belirtme katsayısı Midilli ve ark. modelinde sağlanmış olup 0,9986–1,0000 düzeyindedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kırmızıbiber, kuruma süresi, kuruma hızı, matematiksel modeller, mikrodalga

### Investigating of Drying Characteristics and Determining of a Drying Model for Microwave-Fan Assisted Convection Drying of Red Pepper

**ABSTRACT:** In this work, the drying of red pepper leaves was investigated in a combined microwave–fan assisted convection oven. Red pepper leaves were dried by using microwave, microwave-fan combination and hot air. The effects of microwave power drying, combining of microwave power and fan drying on drying time, drying ratio of red pepper were investigated. The selected microwave output powers were 180, 360, 540, 720, 900W. For hot air drying, 100, 180, 230 °C temperatures were applied. Combining the hot air and microwave energy was applied in 6 selection which were 180W+100 °C, 180W+180 °C, 180W+230 °C, 540W+100 °C, 540W+180 °C, 540W+230 °C. The drying data were applied to eleven different mathematical models, namely, Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Wang and Singh, Diffusion Approach, Verma, Two Term Exponential, Simplified Fick's Diffusion, Midilli *et al.* Equation Models. The performances of these models were compared according to the coefficient of determination ( $R^2$ ), standard error of estimate (SEE) and residual sum of square (RSS), between the observed and predicted moisture ratios. It was found that the Midilli *et al.* model described the drying ratio satisfactorily in all drying methods. The performances of these models were compared according to the coefficient of determination ( $R^2$ ), the highest  $R^2$  values obtained at Midilli *et al.* and changed between 0,9986 and 1,0000.

**Keywords:** Red pepper, drying time, drying ratio, mathematical models, microwave

#### GİRİŞ

Genel bir ifadeyle kurutma, ürünlerin içerdiği nemin, belli bir amaca bağlı olarak, belirli bir sınır değere kadar buharlaştırılarak üründen alınmasına denir. Tarımsal ürünlerin kurutulmasındaki amaç; depolama süresi içerisinde ürünün bozulmadan saklanması sağlamaktır. Ürün nemi, ortam sıcaklığı, ortamdaki oksijen miktarı, zararlı mikroorganizmalar ürünlerin bozulmasına neden olan başlıca etmenlerdir. Ülkemizde ürünlerin büyük bir kısmı doğal kurutma işlemiyle kurutulmaktadır. Doğal kurutma işlemleriyle kurutulan bu ürünlerde ekonomik açıdan iç ve dış pazarda kalite ve değer kaybı gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Aynı zamanda açık hava koşullarında yapılan doğal kurutma

işlemleri sonucu kuru ürünün elde edilmesinde uzun sürelerle gereksinim vardır.

Radyasyon ve mikrodalga teknolojileri, yüksek frekanslı sistem olarak adlandırılırlar. Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumun bir parçası olup görünür ışık ile radyo dalgaları arasında yer almaktadır. Dalga boyları 1 mm–1 m ve frekansları 300 MHz -300 GHz arasında değişmekte olan mikrodalgaların ısıtma frekansları endüstriyel, bilimsel ve tıbbi kullanımlar için belirlenmiştir (Kemahloğlu ve Baysal, 2002). Mikrodalga kurutma ve ısıtma uygulamalarında kullanılabilen frekanslar; 14, 56–27, 12–40, 68–896, 915 ve 2450 MHz'dir (Yağcıoğlu,1999).

\* Sorumlu Yazar: Karaaslan, M., sevilnk@cu.edu.tr

Mikrodalga enerji ile kurutma geleneksel kurutma yöntemlerinden belirgin bir şekilde farklılık gösterir. Konvansiyonel kurutmada sıcak yüzey ile daha soğuk olan iç kısım arasındaki sıcaklık farkından dolayı ısının materyalin yüzeyinden iç kısımlarına doğru kademeli olarak iletimi söz konusudur. Mikrodalga ile kurutmada ise elektromagnetik alan materyali bir bütün olarak etkilemekte ve materyal içerisindeki su moleküllerinin saniyede milyonlarca kes titreşmesi sağlanmaktadır. Bu titreşim ve oluşan enerji materyalin içindeki nemin oldukça hızlı bir şekilde buharlaşmasını sağlamaktadır (Eren ve ark. 2005).

Bu çalışmada Kahramanmaraş Bölgesi'nde yetiştirilen kırmızıbiberin farklı kurutma koşullarındaki kurutma davranışı ile laboratuvar tipi mikrodalga kurutucusunda yapılan denemeler ile incelenmiş ve nem içeriği değişimlerine farklı mikrodalga güçleri ve hava sıcaklığı etkisi farklı modeller ile açıklanmaya çalışılmıştır.

## MATERYAL ve METOT

### *Kurutma Materyali ve Laboratuvar Kurutucusu*

Kurutma denemelerinde *Capsicum annum* (kırmızıbiber) kullanılmıştır. Kırmızıbiber, Kahramanmaraş bölgesindeki üretici tarlalarından toplatılmıştır. Hasat edilen kırmızıbiber, laboratuvar ölçekli kurutma işlemlerini gerçekleştirmek üzere Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü'ne getirilmiş,  $4 \pm 0.5^\circ\text{C}$  deki buzdolabında bir gece bekletilmiş ve ertesi gün kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Ürünlerin başlangıç nem içerikleri, laboratuvar koşullarında kurutma dolabında (etüv) kurutulmuş olarak ölçülmüştür. Kurutma işlemine başlamadan önce sapları ve iç çekirdekleri çıkarılmış kırmızıbiber yıkanmıştır. Başlangıç nem içeriği %87 olan kırmızıbiber örnekleri daha sonra tartılmış ve darası alınmış alüminyum folyo üzerine 20'şer gram konularak  $105^\circ\text{C}$  sıcaklığındaki etüvde 24 saat bırakılmıştır. Bu işlem 5 tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş ve ortalaması alınmıştır.

Kurutma denemelerinde kullanılan ürünlerin nem içeriği yaş baza göre aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M = \frac{m_w}{m_w + m_d} \times 100 \quad [1]$$

Eşitlikte;

M: Yaş baza göre nem içeriği (%),

$m_w$ =Su miktarı (g),

$m_d$ =Kuru madde miktarı (g) ve

Kuruma hızı ise aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Doymaz,2006).

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad [2]$$

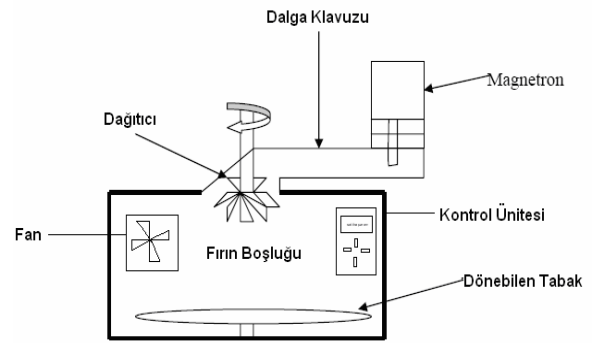
Eşitlikte;

$\Delta M/\Delta t$ : Kuruma hızı ( $g_{su}/g_{kuru\ madde} \cdot \text{dak}$ )

$M_t$ =t anındaki nem içeriği ( $g_{su}/g_{kuru\ madde}$ )

$M_{t+\Delta t}$ =t+ $\Delta t$  anındaki nem içeriği ( $g_{su}/g_{kuru\ madde}$ )  
t,  $\Delta t$ =zaman (dak)

Kurutma materyali olarak seçilen kırmızıbiber ile denemeler yapılmıştır. Mikrodalga ile kurutma denemeleri, 180 W, 360 W, 540 W, 720 W ve 900 W olmak üzere toplam 5 güç seviyesinde çalışabilen ev tipi bir mikrodalga fırın kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikrodalga fırın, fan ve ızgara pişirme özelliklerinin de bulunduğu çok fonksiyonlu bir fırındır. Yapılan ön denemelerde çok amaçlı bir fırının kullanılmasının sebebi, mikrodalga ile kurutma, sıcak hava+mikrodalga ve sadece sıcak havayla kurutmanın karşılaştırılabilir olmasıdır (Şekil 1).



Şekil 1. Mikrodalga fırın

Kurutma işlemleri için kırmızıbiber 10 gram olarak belirlenmiştir. Örnekler 20x20mm ölçülerinde tel teflon malzeme üzerine koyularak fırın döner cam tepsisinin tam ortasına yerleştirilmiştir. 1 dakikalık zaman aralıklarında kurutma işlemi gerçekleştirilmiş ve her 1 dakika sonunda hassas terazi ile ürünün ağırlığı ölçülerek nem kaybı bulunmuştur (Soysal ve ark.,2006).

### *Kurutma Denemeleri*

Denemelerde her üç ürün için 3 farklı kurutma yöntemi kullanılmıştır. Bunlar mikrodalga ile kurutma, sıcak hava mikrodalga kombinasyonu ve sıcak havayla kurutma olarak gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga ile kurutmada güç seviyeleri 180 W, 360 W, 540W, 720 W ve 900 W olarak alınmıştır. Her mikrodalga gücünde nem içeriği değerleri ölçülmüştür.

Mikrodalga ile sıcak hava kombinasyon çalışması da iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga ve fanlı fırının birlikte çalışması halinde güç seviyesi sabit tutularak (180 W), farklı sıcaklıklarda ( $100^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$ ,  $230^\circ\text{C}$ ) çalışılmıştır. İkinci güç seviyesi olan 540 W' da çalışırken de yine farklı sıcaklıklarda ( $100^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$  ve  $230^\circ\text{C}$ ) çalışılmıştır

Son olarak da sıcak havayla ( $100^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$  ve  $230^\circ\text{C}$ ) kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. 3 sıcaklıkta nem içeriği değerleri ölçülmüştür.

Kırmızıbiberin kuruma kinetiği kuruma zamanına bağlı olarak değişen nem içeriği ve kuruma hızı ile karakterize edilebilmektedir.

Ürünün kurumadan önceki ve sonraki nem değerlerinden yola çıkılarak kuruma sırasında ortaya

çıkan nem kaybı bulunmuştur. Nem kayıpları, kurutma eğrilerini oluşturmak için kurutma işlemi süresince 1'er dakikalık aralıklarla hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür (Maskan,2001). Kırmızıbiber denge nem içeriğine ulaşana kadar kurutulmuştur.

### **Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi**

Deneyel verilerden yararlanarak nem içeriği ile kuruma süresi arasında bir ilişki sağlanması amacıyla Newton (Ayensu,1997), Page (Agrawal ve Singh,1977),

Geliştirilmiş Page (White ve ark., 1981), Henderson ve -Pabis (Akpınar ve ark, 2006), Logaritmik (Yaldız ve ark., 2001), Wang ve Singh (Wang ve Singh,1978), Difüzyon Yaklaşımı (Toğrul ve Pehlivan, 2003), Verma (Verma ve ark, 1985), İki Terimli Üssel (Sharaf-Elden ve ark, 1980), Basitleştirilmiş Fick Difüzyon Eşitliği (Toğrul ve Pehlivan, 2003), Midilli ve ark. (Sacilik ve Eliçin, 2006) olmak üzere toplam onbir model istatistiksel olarak kıyaslanmıştır. (Tablo 1).

Tablo 1. Kırmızıbiberin kuruma eğrilerinin modellenmesinde kullanılan model eşitlikler

	Model	Model adı	Kaynak
1	$MR=\exp(-kt)$	Newton	Ayensu(1997)
2	$MR=\exp(-kt^n)$	Page	Agrawal ve Singh (1977)
3	$MR=\exp(-(kt)^n)$	Geliştirilmiş Page	White ve ark.(1981)
4	$MR=a \exp(-kt)$	Henderson ve Pabis	Akpınar ve ark.(2006)
5	$MR=a \exp(-kt)+c$	Logaritmik	Yaldız ve ark.(2001)
6	$MR=1+at+bt^2$	Wang ve Singh	Wang ve Singh (1978)
7	$MR=a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$	Difüzyon Yaklaşımı	Toğrul ve Pehlivan (2003)
8	$MR=a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$	Verma	Verma ve ark.(1985)
9	$MR=a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$	İki terimli üssel	Sharaf-Elden ve ark.(1980)
10	$MR=a \exp(-c(t/L^2))$	Basitleştirilmiş Fick Difüzyon eşitliği	Toğrul ve Pehlivan (2003)
11	$MR=a \exp(-kt^m)+bt$	Midilli ve ark.	Sacilik ve Eliçin (2006)

Yapılan denemelerde elde edilen veriler literatürde bulunan on bir farklı ayrılabilir nem içeriği modellerinden elde edilen değerlere göre karşılaştırılmış, belirtme katsayısı ( $R^2$ ), kalanların kareleri toplamı (RSS) ve tahminin standart hatası (SEE) değerlerine göre değerlendirilerek en uygun model bulunmuştur.

Değerlendirme aşamasında;

- ❖ Kalanların kareleri toplamı (RSS) en küçük,
- ❖ Tahminin standart hatası (SEE) en küçük,
- ❖ Belirtme katsayısı değeri ( $R^2$ ) 1,000'a en yakın model en uygun model olarak nitelendirilir.
- ❖ Belirtme katsayısı değeri 0,00 değerine yaklaştıkça modelin verileri temsil etme yeteneği de kötüleşir.
- ❖ Belirtme katsayısı değerinin %95 gibi yüksek bir değerde olması arzu edilir.

Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Kuruma sabitlerinin hesaplanmasında doğrusal olmayan regresyon analizi yapan SIGMAPLOT ve EXCEL gibi bilgisayar programları kullanılmıştır.

Ayrılabilir nem oranı (ANO) belirli bir t anında materyalde bulunan alınabilir nem miktarını gösterir. Boyutsuz bir terim olan ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilen ayrılabilir nem oranı (ANO) genel kurutma denklemlerinin sol tarafında yer alan oransal bir ifadedir (Yağcıoğlu,1999).

$$ANO = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad [3]$$

Eşitlikte;

M:(kg su/kg kuru madde) herhangi bir andaki su miktarını belirtir.

Mo: (kg su/kg kuru madde) kurutmaya başlamadan önceki ürünün içerdiği su miktarıdır.

Me: kurutma koşullarındaki havanın içerdiği su miktarıdır. Bunu ya bir higrometre ile ya da kurutma dolabındaki yaş ve kuru termometre sıcaklıkları yardımıyla psikometri diyagramından bulunur.

Genelde diğer nem miktarlarına göre küçük olduğundan dolayı birçok çalışmada ihmal edilmiştir (Doymaz,2005).

### **BULGULAR ve TARTIŞMA**

Kırmızıbiber kurutulmasında uygulanan kurutma yöntemlerinin kurumaya etkileri incelenmiştir. Üç farklı yöntemle kırmızıbiber kurutulması konusunda çalışılmış ve bu yöntemler birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler, mikrodalga kurutma, sıcak havayla kurutma ve bunların kombinasyonu olarak sıralanabilir.

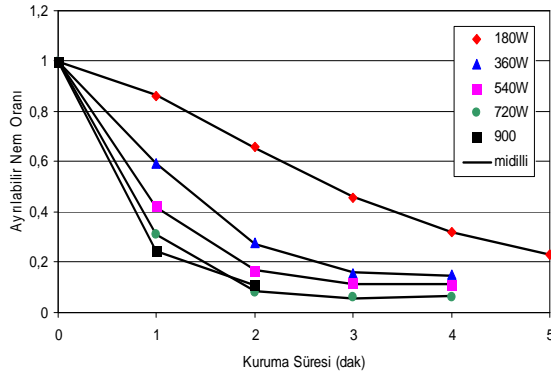
Mikrodalga ile gerçekleştirilen kuruma işlemi, 180 W, 360W, 540W, 720 W ve 900 W mikrodalga güçlerinde sırasıyla 5, 4, 4, 4 ve 2 dakika sürmüştür. Mikrodalga güçlerinin artmasıyla kuruma süreleri kısalmıştır (Şekil 2).

Kurutma hızı zamana bağlı olarak giderek azalan bir eğilim sergilemekte olup, 180 W, 360W, 540W, 720W ve 900 W mikrodalga güçlerinde sırasıyla 1.80; 3.54; 5.04; 6.02; 6.56 kg su/ kg kuru madde. dak olarak hesaplanmıştır. Mikrodalga kurutmada güç seviyesinin artmasıyla kuruma hızı artmış kuruma süresi kısalmıştır. Sıcak havayla kurutmada ise ürünlerdeki nem kaybı oranı başlangıçta yüksektir fakat daha düşük nem içeriklerinde su hareketi yavaşlamaktadır (Şekil 3).

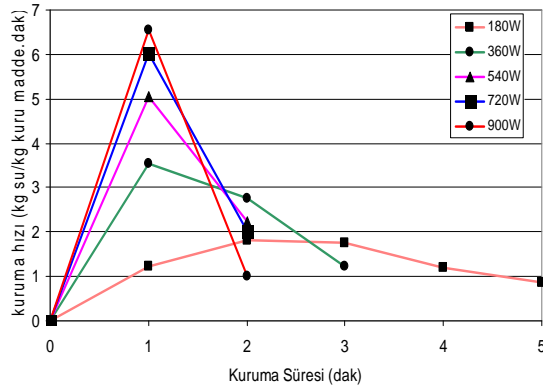
Kurutma hızı ilk 1 dakika süresince 5 çalışma koşulunda da artmıştır ve daha sonra devamlı olarak

azalmıştır. Bu sonuç göstermiştir ki, üründeki nem hareketini yöneten baskın fiziksel bir mekanizmadır.

Örneklerin tüm çalışma koşullarında sabit hız periyodu saptanmamıştır. Kurutma denemelerinde önce artan daha sonra azalan hız periyodu mevcuttur. Azalan hız periyodunda materyal yüzeyi daha fazla suyla doymuş hale gelir ve kuruma hızı katının içinden yüzeye doğru nemin difüzyonu tarafından kontrol edilir. Diamante ve Munro, 1993, Doymaz, 2004, Lahsani ve ark. 2004, Toğrul ve Pehlivan, 2003 yaptıkları çalışmalarda aynı sonuçları elde etmişlerdir.



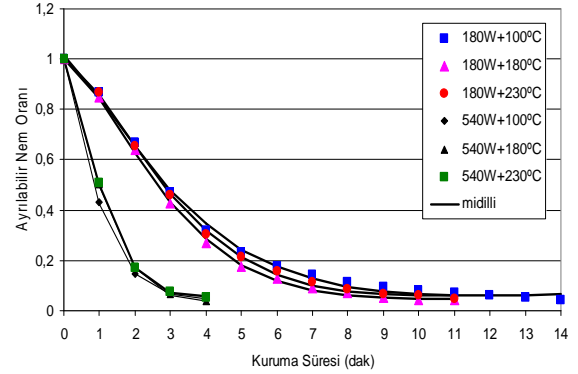
Şekil 2. Farklı mikrodalga güçlerinde kurutulmuş kırmızıbiberin nem içeriğindeki değişim



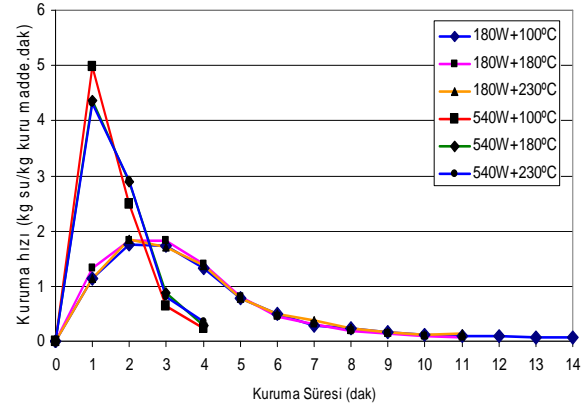
Şekil 3. Farklı mikrodalga güçlerinde kurutulmuş kırmızıbiberin kuruma hızındaki değişim

Mikrodalga ve sıcak havanın kombinasyonu ile gerçekleştirilen kuruma işlemi, 180W+100°C, 180W+180°C, 180W+230°C ve 540W+100°C, 540W+180°C, 540W+230°C mikrodalga güçlerinde ve sıcaklıklarda sırasıyla 14, 11, 10, 4, 4 ve 3 dakika sürmüştür. Mikrodalga güçlerinin artmasıyla kuruma süreleri kısalmıştır (Şekil 4).

Kurutma hızı zamana bağlı olarak giderek azalan bir eğilim sergilemekte olup, 180W+100°C, 180W+180°C, 180W+230°C ve 540W+100°C, 540W+180°C, 540W+230°C mikrodalga güçlerinde ve sıcaklıklarda sırasıyla 1.76; 1.83; 1.85; 4.37; 4.35; 4.30 kg su/kg kuru madde.dak olarak hesaplanmıştır. Mikrodalga ve sıcak havayla kurutmada güç seviyesinin artmasıyla kuruma hızı artmıştır (Şekil 5).



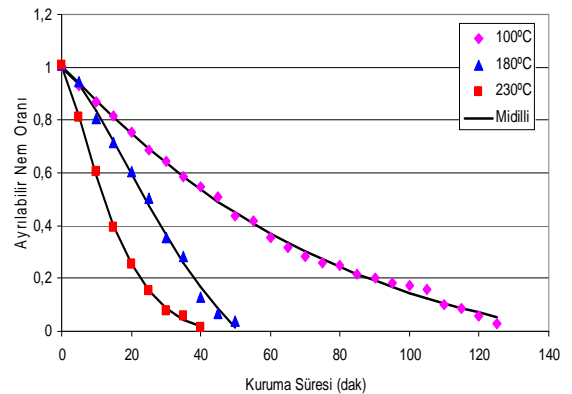
Şekil 4. Farklı mikrodalga güç ve sıcaklık kombinasyonunda kurutulmuş kırmızıbiberin nem içeriğindeki değişim



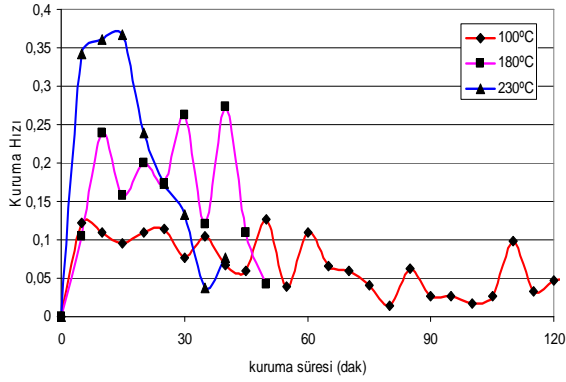
Şekil 5. Farklı mikrodalga güç ve sıcaklık kombinasyonunda kurutulmuş kırmızıbiberin kuruma hızındaki değişim

Sıcak havayla kurutma, 100 °C, 180°C ve 230 °C sıcaklıklarda sırasıyla 125, 50, 40 dakika sürmüştür. Sıcaklıkların artmasıyla kuruma süreleri kısalmıştır (Şekil 6).

Kurutma hızı zamana bağlı olarak giderek azalan bir eğilim sergilemekte olup, 100 °C, 180 °C ve 230 °C sıcaklıklarda sırasıyla 0,0242; 0,0478; 0,0684 kg su/kg kuru madde.dak olarak hesaplanmıştır. Sıcak havayla kurutmada sıcaklığın artmasıyla kuruma hızı artmıştır (Şekil 7).



Şekil 6. Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş kırmızıbiberin nem içeriğindeki değişimi



Şekil 7. Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş kırmızıbiberin kuruma hızındaki değişimi

Yapılan denemeler sonucunda ürünün zamana bağlı olarak nem içeriğinde meydana gelen değişim incelenmiştir. Ürünün belli bir t anında sahip olduğu nem içeriğinin (M) ürünün ilk nem içeriğine (Mo) oranı olarak sadeleştirilen ayrılabilir nem oranı (ANO) 11 farklı model ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Kontrol edilebilir parametre koşullarında gerçekleştirilen denemeler sonunda tüm model eşitliklerine ilişkin  $R^2$ , RSS ve SEE değerlerine ilişkin sonuçlar Tablo 2-4'de verilmiştir.

Kırmızıbiberde kuruma olayı önce artan ve daha sonra azalan hızda kuruma evresinde meydana gelmektedir. Bu uygulamayı açıklamak için kullanılan 11 modele ait istatistiksel veriler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre belirtme katsayısı ( $R^2$ ) en yüksek bulunan **Midilli ve ark.** modelinde nem içeriğinin zamana göre değişimi,

$$MR = a \cdot \exp(-kt^m) + b \cdot t \text{ eşitliği ile saptanmıştır.}$$

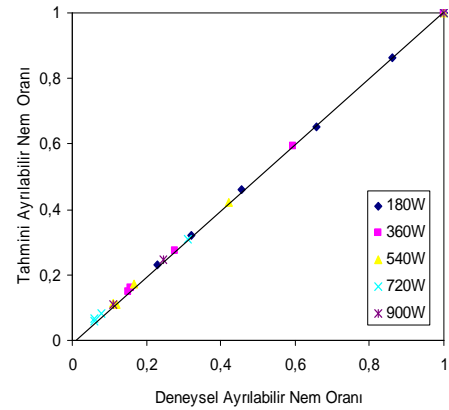
Modeller, model katsayıları ve hesaplanan değerlerle deneysel veriler arasındaki belirtme katsayıları incelendiğinde en yüksek belirtme katsayısı Midilli ve ark. modelinde sağlanmış olup **0,9986-1,0000** düzeyindedir. Bu modelin denemenin gerçekleştiği koşullarda tahmin için pratikte kullanılabilirliğini göstermektedir.

Kırmızıbiberin mikrodalga; sıcak hava+mikrodalga, sıcak hava kurutma işlemlerine ilişkin kullanılan Midilli ve ark. model eşitliğinin non lineer analiz sonuçları Tablo 5' de verilmiştir.

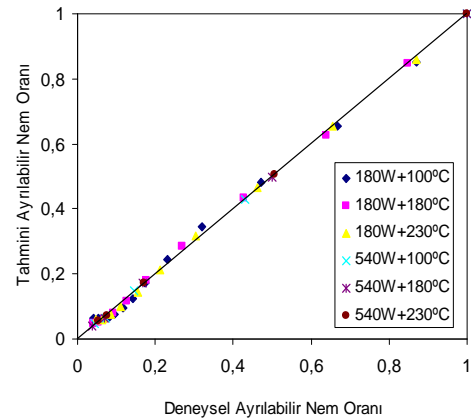
Her sıcaklık için 3 tekerrürlü ölçülen zamana bağlı ağırlık değişimlerine göre hesaplanan ayrılabilir nem oranları (ANO) değerleri kullanılarak, her bir tekerrür için çizelgede verilen kurutma modellerinin katsayıları ve  $R^2$  değerleri belirlenmiştir. Belirlenen katsayılar incelendikten sonra, her bir tekerrür için yüksek belirtme değerine sahip Midilli ve ark. modeli kırmızıbiberin kuruma modelinin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Ayrılabilir nem oranının tahmin edilmesinde kullanılacak Midilli ve ark. modelinde yer alan a, k, m, b katsayılarına kurutma havası sıcaklığı etkisi çoklu regresyon yöntemi ile incelenmiş ve incelenen kuruma modelinin katsayılarını sıcaklığa

bağlı olarak en yüksek  $R^2$  değeri ile tahminleyen en çok 3 terimli modeller oluşturulmuştur (Tablo 6).

Deneme sonuçlarına göre hesaplanan ayrılabilir nem oranı ile daha yüksek oranda bu değerleri açıklayan Midilli ve ark. Modeli ile elde edilen nem oranı değerlerinin zamana göre değişimleri Şekil 2, 4 ve 6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi deneysel ve tahmini değerler birbirine oldukça yakındır. Ayrıca kırmızıbiber için farklı koşullarda elde edilen deneysel ve tahmini ayrılabilir nem oranı değerinin dağılımı da Şekil 8-10'da gösterilmiş ve bu noktaların eğrinin üzerinde veya eğrinin çok yakınında bulunduğu saptanmıştır. Bu da modelin bir uyum içerisinde deneysel verileri açıklayabildiğinin bir göstergesidir.



Şekil 8. Mikrodalga ile kurutulmuş kırmızıbiber için deneysel ve geliştirilen model yardımıyla tahmin edilen ayrılabilir nem oranı değerlerinin değişimi



Şekil 9. Mikrodalga ve sıcak hava kombinasyonu ile kurutulmuş kırmızıbiber için deneysel ve geliştirilen model yardımıyla tahmin edilen ayrılabilir nem oranı değerlerinin değişimi

Tablo 2. Kırmızıbiberin mikrodalga ile kurutma işlemlerine ilişkin kullanılan model eşitliklerin non lineer analiz sonuçları; SEE, tahminin standart hatası;R<sup>2</sup>, belirtme katsayısı değerleri; RSS, kalanların kareleri toplamı

No	180W			360W			540W			720W			900W		
	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS
1	0.9941	0.0545	0.0149	0.9981	0.0300	0.0027	0.9999	0.0070	0.6624	0.9999	0.0099	0.0002	0.9957	0.0450	0.0061
2	0.9998	0.0118	0.0006	0.9995	0.0189	0.0007	0.9987	0,0277	0,0015	0.9998	0,0154	0,0022	0.9995	0.0189	0.0007
3	0.9999	0.0098	0,0005	0.9981	0.0368	0.0027	0.9987	0.0277	0,0015	0.9998	0.0140	0.0002	0.9957	0.0552	0.0061
4	0.9955	0.0532	0.0113	0.9982	0.0358	0.0026	0.9983	0.0322	0,0021	0.9998	0.0140	0.0002	0.7000	0.4629	0.4285
5	0.9986	0.0344	0.0036	0.9989	0.0394	0.0016	0.9993	0,0299	0,0009	0,8944	0,3418	0,1168	0.9982	0.0508	0.0026
6	0.9985	0.0314	0.0039	0.9996	0.0176	0.0006	0.9995	0,0178	0,0006	0,9971	0,0404	0,0033	0.9990	0.0268	0.0014
7	0.9984	0.0369	0.0041	0.9990	0.0385	0.0015	0.9983	0,0457	0,0021	0,9989	0,0344	0,0012	0.9983	0.0497	0.0025
8	0.9984	0.0371	0.0041	0.9981	0.0521	0.0027	0.9998	0,0355	0,0025	0,9989	0,0347	0,0012	0.9982	0.0501	0.0025
9	0.7731	0.3794	0.5759	0.9534	0.1840	0.0677	0.9992	0.0309	0.0010	0.9942	0.0803	0.0064	0.7000	0.4629	0.4285
10	0.9955	0.0614	0.0113	0.9982	0.0506	0.0026	0.9983	0,0456	0,0021	0.9998	0,0344	0,0012	0.9960	0.0759	0.0058
<b>11</b>	<b>1.0000</b>	<b>0.0049</b>	<b>0,0004</b>	<b>1.0000</b>	<b>0.0049</b>	<b>0,0002</b>	<b>0.9999</b>	<b>0.0116</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.9998</b>	<b>0.0158</b>	<b>0.0003</b>	<b>1.0000</b>	<b>0.0020</b>	<b>0,0003</b>

Tablo 3. Kırmızıbiberin sıcak hava+mikrodalga kurutma işlemlerine ilişkin kullanılan model eşitliklerinin non lineer analiz sonuçları; SEE, tahminin standart hatası;R<sup>2</sup>, belirtme katsayısı değerleri; RSS, kalanların kareleri toplamı

No	180W									540W								
	100°C			180°C			230°C			100°C			180°C			230°C		
	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS
1	0.9922	0.0386	0.0209	0.9892	0.0489	0.0263	0.9904	0.0476	0.0249	0.9990	0.0174	0.0012	0.9967	0.0324	0.0042	0.9967	0.0329	0.0043
2	0.9950	0.0321	0.0134	0.9979	0.0225	0.0051	0.9977	0.0245	0.0060	0.9991	0.0187	0.0011	0.9994	0.0158	0.0007	0.9986	0.0243	0.0018
3	0.9922	0.0401	0.0209	0.9892	0.0513	0.0263	0.9904	0.0499	0.0249	0.9990	0.0201	0.0012	0.9967	0.0374	0.0042	0.9967	0.0380	0.0043
4	0.9939	0.0353	0.0162	0.9919	0.0445	0.0198	0.9931	0.0424	0.0180	0.9990	0.0200	0.0012	0.9968	0.0367	0.0040	0.9967	0.0374	0.0042
5	0.9940	0.0364	0.0159	0.9929	0.0439	0.0174	0.9938	0.0422	0.0160	0.9990	0.0242	0.0012	0.9977	0.0387	0.0030	0.9970	0.0438	0.0038
6	0.9874	0.0508	0.0336	0.9950	0.0351	0.0123	0.9957	0.0334	0.0112	0.9947	0.0465	0.0065	0.9986	0.0243	0.0018	0.9986	0.0242	0.0018
7	0.9924	0.0412	0.0204	0.9920	0.0467	0.0196	0.9927	0.0459	0.0189	0.9990	0.0246	0.0012	0.9980	0.0361	0.0026	0.9973	0.0421	0.0035
8	0.9924	0.0412	0.0204	0.9919	0.0468	0.0197	0.9926	0.0462	0.0192	0.9992	0.0217	0.0009	0.9980	0.0361	0.0026	0.9973	0.0420	0.0035
9	0.7445	0.2292	0.6828	0.7836	0.2302	0.5299	0.7622	0.2483	0.6164	0.9974	0.0326	0.0032	0.9861	0.0772	0.0179	0.9843	0.0823	0.0203
10	0.9939	0.0368	0.0162	0.9919	0.0469	0.0198	0.9931	0.0447	0.0180	0.9990	0.0245	0.0012	0.9968	0.0450	0.0040	0.9967	0.0459	0.0042
<b>11</b>	<b>0.9986</b>	<b>0.0183</b>	<b>0.0037</b>	<b>0.9996</b>	<b>0.0104</b>	<b>0.0009</b>	<b>0.9999</b>	<b>0.0111</b>	<b>0.0010</b>	<b>0.9999</b>	<b>0.0097</b>	<b>0.0002</b>	<b>1.0000</b>	<b>0.0076</b>	<b>0.0005</b>	<b>1.0000</b>	<b>0.0074</b>	<b>0.0005</b>

Tablo 4. Kırmızıbiberin sıcak hava ile kurutma işlemlerine ilişkin kullanılan model eşitliklerinin non lineer analiz sonuçları

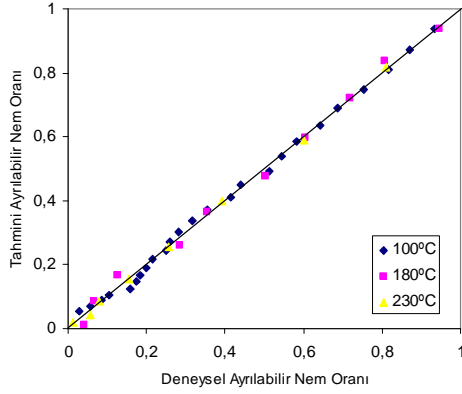
No	100°C			180°C			230°C		
	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS	R <sup>2</sup>	SEE(±)	RSS
1	0,9949	0,0369	0,0341	0,9723	0,1041	0,1084	0,9885	0,0573	0,0262
2	0,9986	0,0196	0,0092	0,9972	0,0350	0,0110	0,9997	0,0095	0,0006
3	0,9989	0,0180	0,0075	0,9977	0,0334	0,0089	0,9990	0,0195	0,0023
4	0,9962	0,0322	0,0249	0,9792	0,0953	0,0817	0,9911	0,0539	0,0203
5	0,9991	0,0157	0,0057	0,9977	0,0337	0,0091	0,9974	0,0317	0,0060
6	0,9989	0,0178	0,0076	0,9970	0,0359	0,0116	0,9986	0,0212	0,0031
7	0,9949	0,0385	0,0341	0,9723	0,1164	0,1084	0,9883	0,0667	0,0267
8	0,9991	0,0162	0,0060	0,9970	0,0384	0,0118	0,9970	0,0339	0,0069
9	0,9948	0,0380	0,0347	0,9720	0,1104	0,1097	0,9884	0,0616	0,0265
10	0,9962	0,0329	0,0249	0,9792	0,1010	0,0817	0,9911	0,0582	0,0203
<b>11</b>	<b>0,9992</b>	<b>0,0156</b>	<b>0,0054</b>	<b>0,9987</b>	<b>0,0267</b>	<b>0,0050</b>	<b>0,9998</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0005</b>

Tablo 5. Kırmızıbiberin mikrodalga; sıcak hava+mikrodalga, sıcak hava ile kurutma işlemlerine ilişkin kullanılan Midilli ve ark.model eşitliğinin non lineer analiz sonuçları

Kontrol edilebilir parametreler	Sabitler				R <sup>2</sup>	SEE (±)	RSS
<b>Mikrodalga</b>							
180W	a=0,9995	k=0,1667	m=1,5316	b=0,0177	1,0000	0,0049	4,7830.10 <sup>-5</sup>
360W	a=0,9998	k=0,5778	m=1,4479	b=0,0337	1,0000	0,0049	2,4014.10 <sup>-5</sup>
540W	a=1,0001	k=0,9318	m=1,2085	b=0,0270	0,9999	0,0116	0,0001
720W	a=1,0001	k=1,2289	m=1,2857	b=0,0168	0,9998	0,0158	0,0003
900W	a=0,9999	k=0,0030	m=1,5374	b=0,0008	1,0000	0,0020	3,8309.10 <sup>-5</sup>
<b>Mik+Fan</b>							
180W-100°C	a=1,0134	k=0,1808	m=1,3229	b=0,0045	0,9986	0,0183	0,0037
180W-180°C	a=1,0030	k=0,1748	m=1,4613	b=0,0042	0,9996	0,0104	0,0009
180W-230°C	a=1,0069	k=0,1656	m=1,4378	b=0,0050	0,9996	0,0111	0,0010
540W-100°C	a=1,0001	k=0,8715	m=1,2368	b=0,0104	0,9999	0,0097	2,456.10 <sup>-5</sup>
540W-180°C	a=1,0001	k=0,7105	m=1,3865	b=0,0081	1,0000	0,0076	5,822.10 <sup>-4</sup>
540W-230°C	a=1,0001	k=0,7088	m=1,4322	b=0,0127	1,0000	0,0074	5,4231.10 <sup>-5</sup>
<b>Fan</b>							
100°C	a=1,0019	k=0,0109	m=1,0723	b=-0,0007	0,9992	0,0156	0,0054
180°C	a=1,0005	k=0,0040	m=1,5462	b=-0,0035	0,9987	0,0267	0,0050
230°C	a=1,0039	k=0,0228	m=1,3606	b=-0,0003	0,9998	0,0100	0,0005

Tablo 6. Mikrodalga - sıcak hava kombinasyonu ve sıcak hava ile kurutulmuş kırmızıbiber için tavsiye edilen Midilli ve ark. kurutma modelindeki katsayıların sıcaklığa bağlı olarak değişimini ifade eden eşitlikler ve katsayıları

Model		y <sub>0</sub>	c	c <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>
MR=a.exp(-k.t <sup>m</sup> )+b.t					
180W	a=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	-0,2751	0,0126	-3,0515.10 <sup>-5</sup>	0,9176
	k=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,168	0,0002	-8,530.10 <sup>-7</sup>	0,9918
	m=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,9102	0,006	-1,5758.10 <sup>-5</sup>	0,9979
	b=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,0099	-7,0308.10 <sup>-5</sup>	2,1538.10 <sup>-7</sup>	0,9447
540W	a=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,9999	2,7499.10 <sup>-6</sup>	-8,3331.10 <sup>-9</sup>	1,0000
	k=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	1,36	-0,0065	1,5939.10 <sup>-5</sup>	0,9962
	m=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,9203	0,0039	-7,0197.10 <sup>-6</sup>	0,9983
	b=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,0321	-0,0003	1,0449.10 <sup>-6</sup>	0,9823
100°C	a=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	1,0152	-0,0002	6,4231.10 <sup>-5</sup>	1,0000
	k=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,0838	-0,0011	3,5641.10 <sup>-6</sup>	0,9853
	m=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,8481	0,0266	7,3791.10 <sup>-5</sup>	0,9994
	b=y <sub>0</sub> +ct+c <sub>1</sub> t <sup>2</sup>	0,0161	-0,0002	7,4637.10 <sup>-7</sup>	0,9834



Şekil 10. Sıcak hava ile kurutulan kırmızıbiber için deneysel ve geliştirilen model yardımıyla tahmin edilen ayrılabilir nem oranı değerlerinin değişimi

### SONUÇ

Çalışma sonuçlarına göre her üç çalışma koşulunda mikrodalga gücün ve sıcaklığın kırmızıbiberin kuruması üzerine önemli bir etkisi vardır. Ürünün nem içeriğinin belirlenmesinde kullanılacak olan Midilli ve ark. modeli yüksek bir modelleme yeterliliğine sahiptir, dolayısıyla Midilli ve ark. modeli ile deneysel değerlere çok yakın sonuçların elde edilmesi mümkündür.

### KAYNAKLAR

- Agrawal, Y.C., Singh, R.P. 1977. Thin layer drying studies on short grain rough rice. *ASAE Paper No 3531. St. Joseph MI:ASAE.*
- Akpınar, E.K., Biçer, Y., Çetinkaya, F. 2006. Modeling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering*, 75, 308-315.
- Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4-6), 121-126.
- Diamante, L.M., Munro, P.A. 1993. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51, 271-276.
- Doymaz, İ. 2004. Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61, 341-346.
- Doymaz, İ. 2005. Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69, 275-279.
- Doymaz, İ. 2006. Thin layer drying behavior of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74, 370-375.
- Eren, Ö., Soysal, Y., Öztekin, S., Doğantan, Z.S. 2005. Mikrodalga sistemi ile donatılmış bir bantlı kurutucuda maydanoz kurutulması. III. Tarımsal Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı, 2-4 Mayıs 2005, Antalya.
- Kemahlıoğlu, K., Baysal, T. 2002. Hububat Ürünlerinin İşlenmesinde Mikrodalga Uygulamaları. HUBUBAT 2002 Hububat Ürünleri Teknolojisi Kongre ve Sergisi. Gaziantep. 3-4 Ekim 2002
- Laşasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Jaouhari, J.T. (2004). Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering* 61(2), 173-179.
- Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and dehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177-182.
- Saçılık K., Eliçin, A.K. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73, 281-289.
- Sharaf-Elden Y I., Blaisdell, J.L., Hamdy, M.Y. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5, 1261-1265.
- Soysal, Y., Öztekin, S., Eren, Ö. 2006. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics and energy aspects. *Biosystems Engineering*, 93(4), 403-413.
- Toğrul, İ T., Pehlivan, D. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*, 58, 23-32.
- Verma L R; Bucklin, R. A., Ednan, J.B., Wratten, F.T. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28, 296-301.
- Wang C Y., Singh, R.P. 1978. A single layer drying equation for rough rice. *ASAE Paper No. 78-3001, ASAE, St. Joseph, MI.*
- White G. M., Bridges., T.C., Loewer, O.J., Ross, I.J 1981. Thin layer drying model for soybeans. *Transactions of the ASAE*, 24, 1643.
- Yağcıoğlu, A. 1999. Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Atölyesi, Yayın No:536, İzmir.
- Yaldız O., Ertekin., C., Uzun, H.I. 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of Sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.