

**Borik Asitin Yüzey Neminin Mikrodalga ile Kurutulması****Hasan Bircan<sup>1</sup>, Osman Battal<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Dumlupınar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, 43100 Kütahya, Türkiye<sup>2</sup>Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, 43100 Kütahya, Türkiye

e-posta: hasan.bircan@dpu.edu.tr

Geliş Tarihi:23.12.2016

; Kabul Tarihi:13.02.2018

**Özet**

Bor mineralleri, Türkiye'nin ihraç ettiği en önemli endüstriyel hammaddelerinden biridir. Ülkemiz, gerek bor minerallerinin sahip olduğu rezerv büyüklüğü, niteliği ve çeşitliliği açısından, gerekse işletme maliyeti ve tenör avantajları ile dünyada birinci sırada bulunmaktadır. Bu çalışmada borik asit numunelerinin yüzey nemi 2,45 GHz mikrodalga kaynak ile incelenmiştir. Deneysel 10g kütleli ve 120, 350, 460, 600, 700 W mikrodalga güçlerinde gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga kullanarak borik asit numunesinin belli bir andaki nem içeriğinin belirlemek amacıyla Page, Difüzyon yaklaşımı, Verma, Midilli ve Küçük, Henderson ve Pabis, İki Terimli Üstel modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel verilerden nem içeriği ile kurutma süresi arasında bir ilişki elde etmek amacıyla Page, Difüzyon Yaklaşımı, Verma, Midilli ve Küçük, Henderson ve Pabis, İki Terimli Üstel olmak üzere istatistiksel olarak toplam altı model kıyaslanmıştır. Belirleme katsayısı ( $r^2$ ), standart tahmin hatası (SEE), kalanlarının karelerinin toplamı (RSS), ki kare ( $\chi^2$ ) ve ortalama karesel hata (RMSE) değerlerine göre en uygun kurutma modeli Midilli ve Küçük model eşitliği bulunmuştur. Midilli ve Küçük modeli ile farklı çalışma modellerine ait özel k, a, b ve m katsayıları elde edilmiştir. Modelleme yeterliliği 0,9661 ile 0,9999 arasında değişmiştir. Bu mikrodalga kurutma prosesi borik asit kristallerinin bozunmasına ve parçalanmasına yol açmamaktadır. Borik asit numunelerinde bulunan kaba nemin ithalat, ihracat ve ürün tesliminde sorun olmaması için mikrodalga ile kurutulması önerilmiştir.

**Anahtar kelimeler**

Borik Asit;  
Mikrodalga Enerji;  
Nem;  
Kurutma modelleri;  
Midilli ve Küçük

**Microwave Drying of Surface Moisture of Boric Acid****Abstract**

Boron minerals are one of the most important industrial raw materials exported by Turkey. In terms of the size of the reserves of boron minerals quality, operating cost and diversity of the boron minerals Turkey ranks the first in the world. Surface moisture of boric acid samples were examined in this study with 2.45 GHz microwave source. Experiments were carried out 10g sample mass at 120, 350, 460, 600 and 700 W microwave power. In order to determine the time of a particular card contents of boric acid sample using a microwave moisture Page, Diffusion Approximation, Verma, Midilli and Kucuk, Henderson and Pabis, Two Term Exponential models were compared with each other. The moisture content using the experimental data in order to provide a relationship between drying time, a total of four models, Page, Diffusion Approach, Verma including a Midilli and Kucuk were compared statistically. Regression coefficient ( $r^2$ ), standard error of estimate (SEE), residual sum of squares (RSS), chi-square ( $\chi^2$ ) and root mean square error (RMSE) optimal drying model based on the values of Midilli and Kucuk model equation parameters were found. The special coefficients m, a, b and k were obtained belonging to Midilli and Kucuk model and other different models. Regression coefficient ranged from 0.9661 to 0.9999. This microwave drying process does not lead to decomposition and disintegration of crystalline molecules. It was recommended that rough moisture present in boric acid was dried with microwave to avoid problems in import-export and delivering of the products.

**Keywords**

Boric acid;  
Mikrowave energy;  
Moisture;  
Drying models;  
Midilli and Kucuk

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

**1. Giriş**

Bor element olarak ilk defa Fransa'da 1808 yılında Gay-Lussac, Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humpry Davy tarafından

bulunmuştur. 1892 yılında ise H. Moissan bor trioksiti magnezyum ile indirgeyerek % 95-98 saflıkta bor elde etmiştir (Lagowski 1997). 1828 yılında Francesca Lardoret tarafından İtalya'da

Tuscany yakınlarındaki sıcak su kaynaklarında borik asit varlığı saptanmıştır (Bayrak vd. 2001).

Amorf toz halinde bor elementinin rengi koyu kahverengidir. Monoklinik kristal halinin rengi ise sarımsı kahverengi olup çok gevrek ve sert yapıdadır. Yüksek sıcaklıkta bor su ile reaksiyona girerken borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlama şeklinde mineral asitleri ile reaksiyonu olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur (Kılıç 2004).

Kimyasal bileşimi  $H_3BO_3$  olan sasolit (katı borik asit) triklinik sistemde kristallenir. Sertliği 1, özgül ağırlığı  $1,48 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Bor içeriği %17,5  $B_2O_3$  içeriği %56,3'dür. Beyaz ve yağlı parlak görümlü kristaller şeklindedir (Sarız ve Nuhoğlu 1992).

Borik asit yavaşça ısıtıldığı zaman suyunu kaybederek metaborik asite dönüşür (Kirk-Othmer 1990).

Metaborik asidin 3 ayrı kristal modifikasyonu vardır;

Ortorombik metaborik asit : ( $HBO_2$ -III, ergime noktası=  $176^\circ\text{C}$ ),

Monoklinik metaborik asit: ( $HBO_2$ -II, ergime noktası=  $200,9^\circ\text{C}$ ),

Kübik metaborik asit: ( $HBO_2$ -I, ergime noktası=  $236^\circ\text{C}$ )

Sıcaklık  $150^\circ\text{C}$ 'in üzerine çıkmadığı sürece dehidrasyon  $HBO_2$  formunda kalır. Daha yüksek sıcaklıklarda borik asit bünyesindeki tüm su uzaklaşarak susuz borik asit elde edilir. Kristal susuz borik asit  $450^\circ\text{C}$  de ergir. Amorf susuz borik asit belli bir ergime derecesine sahip değildir.  $500^\circ\text{C}$  de tamamen akışkan hale gelir (Kocakuşak vd. 1998; Sevim vd. 2006).

Mikrodalga enerjisi ile yaygın olarak kullanılan kurutma yöntemlerine göre zamandan ve enerjiden tasarruf sağlanmaktadır. Kurutma, ısı ve kütle aktarımıyla gerçekleşen karmaşık proseslerden biridir. En genel tanımı ile kurutma, maddeden suyun uzaklaştırılmasıdır (Kemahlıoğlu ve Baysal 2002). Elektromanyetik spektrumda görünür ışık ile radyo dalgaları arasında yer alan mikrodalgaların dalga boyları 1 mm – 1 m arasındadır. Endüstriyel, bilimsel ve tıbbi kullanımlar için belirlenen mikrodalgaların ısıtma frekansları 300 MHz - 300 GHz arasında değişmektedir. Mikrodalga enerji kurutma ve ısıtma uygulamalarında kullanılabilen frekanslar, 14, 56–27, 12–40, 68–896, 915 ve 2450 MHz'dir (Yağcıoğlu 1999).

Mikrodalga enerji ile kurutma, geleneksel kurutma yöntemlerinden belirgin bir şekilde farklılık gösterir. Konvansiyonel kurutmada soğuk olan iç kısım ile sıcak olan yüzey arasındaki sıcaklık farkından dolayı materyalin yüzeyinden ısının iç kısımlara doğru kademeli iletimi söz konusudur, mikrodalga ile kurutmada ise bütün olarak etkilenen elektromagnetik alan materyali ve materyal içerisindeki su moleküllerinin saniyede milyonlarca kez titreşmesi sağlanmaktadır. Su moleküllerinin titreşmesi ve oluşan enerji ile materyal içerisindeki nemin çok hızlı buharlaşmasını sağlamaktadır (Eren vd. 2005).

Li Yu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, ilmenitin mikrodalga ile kurutma özellikleri farklı mikrodalga güç değerlerinde (119, 231, 385, 539, 700 W) ve farklı numune kütlelerinde (5-25 g) incelenmiştir. 119 W'da kurutma süresi en uzun, 700 W'da en kısa kurutma süresi gerçekleştiği bulunmuştur. 231, 385, 539 W'da kurutma süreleri yaklaşık aynı olduğu ve Henderson-Pabis modelinin en uygun model bulunmuştur (Li Yu et al. 2011).

İbrahim Doymaz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, yeşil fasulye dilimlerinin mikrodalga kurutulması, kurutma kinetiği ve fiziksel kalitesi incelenmiştir. Yeşil fasulye dilimlerinin başlangıç nem içeriği  $9,89 \text{ kg.su/kg}$  kuru madde miktarı (KM) olduğu belirlenmiş, kurutma sonrasında  $0,08 \text{ kg.su/kg.KM}$  değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Artan mikrodalga güçlerine (180, 360, 600, 800 W) karşılık azalan kurutma süresi sırasıyla 1320, 600, 540, 480 s'dir. 180 W'dan 800 W'a kadar mikrodalga gücü arttıkça kurutma hızı ve kurutma süresinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır ve elde edilen verilerde en iyi modelin Midilli modeli olduğu bulunmuştur (Doymaz vd. 2015).

Azmi Seyhun Kıpçak tarafından yapılan çalışmada, midye (*Mytilus edulis*) mikrodalga kurutma tekniği ile incelenmiştir. Kurutma tekniğinin rehidrasyon özelliği üzerine etkilerini belirlemek için 90, 180, 360, 600, 800 W mikrodalga güçleri uygulanmıştır. 90, 180 ve 360 W mikrodalga güç seviyelerinde sırasıyla 16, 5 ve 2 dakikalık kurutma süreleri belirlenmiştir. 600 ve 800 W mikrodalga güç seviyelerinde kurutma süreleri sırasıyla 80 ve 60s bulunmuştur. İnce tabakalı kurutma tekniğinde midyenin rehidrasyon değerleri  $0,957 - 0,563 \text{ kg.su/kg.KM}$  bulunmuştur. Araştırmada en iyi uyumu Weibull modelinin sağlandığı gözlemlenmiştir (Kıpçak 2017).

İlknur Alibaş tarafından yapılan çalışmada, hava, mikrodalga ve migrodalga-hava bileşik kurutma

teknikleri ile üzüm yapraklarının kurutulması ve bazı kalite parametrelerinin hesaplanması araştırılmıştır. 50g ağırlığındaki üzüm yaprağının mikrodalga, hava ve mikrodalga-hava bileşik üç farklı kurutmayla kurutulmuştur. Mikrodalga, hava ve mikrodalga-hava bileşik kurutma için kurutma süreleri sırasıyla 5-11, 30-70, 1,5-6 dakika olduğu belirlenmiş ve Alibaş modeli en uygun mikrodalga-hava bileşik kurutuma yöntemi ile 75 °C ile kombine edilen 500 W'da optimum kurutma süresi 3 dakika sürdüğü araştırmaları sonucunda belirlenmiştir (Alibaş 2014).

Mortaza Ayhbashlo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, havucun ince katmanlı kurutma matematiksel modellenmesi incelenmiştir. Bağlı nem %35-42 ve sıcaklık 18-23 °C olan ortamda kurutma deneyini yapmak için havuçlar 2x2x2 cm boyutlarında mekanik bir kesici kullanılarak küp haline getirilmiş ve havuçların hava sıcaklığı sabit 50, 60, 70 °C hava hızı  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  olan kurutucu olan bir ortamda deneyler gerçekleştirilmiştir. Havuçlar yaklaşık 150g alınmış ve ölçümler 0,01 hassasiyet tartı ile 20 dakikada bir yapılmıştır. Literatürden 15 model arasındaki uyum gösterilmiş ve yeni formül önerilmiştir (Aghbashlo et al. 2009).

Selma Kılıcı yaptığı bir çalışmada borik asitin dehidrasyonunu incelemiştir. 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 °C'lerde borik asit numunelerini 1, 2 ve 3 saat fırında bekletmiş, fırından aldığı numuneleri soğuması için desikatörde 15 dakika bekletmiştir. Soğuyan numuneleri tartarak ağırlık değişimini gözlemlemiştir. Borik asitin 50 °C 'den itibaren ağırlık değişimi gösterdiği, 100 °C'ye kadar ağırlık değişiminin yapıdaki fiziksel anlamda suyun çıkışına karşılık geldiğini göstermiştir. Borik asitin nem değerini %0,05 olarak belirtmiş yapılan kalsinasyon çalışmalarında ortaya toplam ağırlık kaybının %46,62 olmasının sebebinin yapıdaki hidrat suyun uzaklaşmasına bağlanmıştır. (Kılıcı 2011).

Kocakuşak, Köroğlu vd. (1998) 5-10% nem içeriğine sahip ıslak borik asitin 2450 Mhz 100 -700W güç ile mikrodalga enerjide kurutulmasını incelemiş ve çalışmalarında borik asitin başka bir kristal forma geçmediğini ve metaborik asite dönüşmediğini bildirmişlerdir. Başka bir çalışmalarında borik asitten bor oksit üretimi için 250°C fırın ısıtmalı 700W mikrodalga enerji kullanmışlardır (Kocakuşak 1995; 1998).

Bu çalışmada literatürden farklı olarak Eti Bor tesislerinde kurutma aşamasını tamamlamış ve paketleme aşamasına geçmiş <1% altında nem

içeriği bulunan borik asit numuneleri çalışılmış ve kurutma modeli ve kurutma kinetik parametreleri belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kurutma Materyali ve Metod

Bu çalışmada Emet Bor işletmesinde kolemanitten üretilen ve ihraç edilen, borik asit  $\text{H}_3\text{BO}_3$  numunelerinin yüzeysel kaba neminin mikrodalga fırın kullanılarak kurutulması (dehidrasyonu) incelenmiş ve ince tabaka kurutma modeli olan yarı teorik modeller (Sarı ve Karaaslan 2014; Özbek ve Dadalı 2007; Soysal vd. 2001; Li Yu et al. 2011) çalışılmıştır.

Deneysel mikrodalga gücü sırasıyla 120, 350, 460, 600 ve 700W güç değerlerine ayarlanabilen, Arçelik marka MD-574 model 230-240V, 50Hz teknik özelliklerine sahip ev tipi mikrodalga fırın kullanılmıştır. Kütle kayıpları 0,001g hassasiyetli AND marka GF-600 model hassas terazi ile ölçülmüştür. 120mm çapa sahip üç ayrı petri kabına 10'ar gram numune konularak fırın içerisinde ayarlanan güçte 1 dakika bekletildikten sonra tartma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga güç ile kurutma süreleri ve değişimleri incelenmiştir. Kütle değişimi terazinin hassasiyet sınırında deney sonlandırılmıştır. Borik asit numunelerinin nem miktarları üç numunenin ortalama değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Kurutma işleminin bozulmaması için numunelerin ağırlık ölçümleri 10 saniye içinde tamamlanmıştır (Alibaş 2012).

### 2.2. Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi

Deneysel veriler kullanılarak kurutma süresi ile nem içeriği arasında bir ilişki sağlamak için Çizelge 1'de Page, Difüzyon Yaklaşımı, Verma, Midilli ve Küçük, Henderson ve Pabis, İki Terimli Üstel olmak üzere toplam altı model istatistiksel olarak kıyaslanmıştır (Özbek ve Dadalı 2007; Agrawal and Singh 1977; Toğrul ve Pehlivan 2003; Verma et al. 1985).

Ayrılabilir nem oranı (MR) belirli bir t anında materyalde bulunan ayrılabilir nem miktarını gösterir. 1 numaralı denklemde ifade edilen ayrılabilir nem oranı genel kurutma denklemlerinin sol tarafında yer alan boyutsuz bir terim ve oransal bir ifadedir (Yağcıoğlu 1999).

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Burada M (kg su/kg kuru madde) nem içeriği,  $M_0$ , (kg su/kg kuru madde) kurutma işlemine

başlamadan önceki ürünün içeriğindeki su miktarıdır.  $M_e$ , ürün denge nemidir. Genelde diğer nem miktarlarına göre küçük olduğundan dolayı birçok çalışmada ihmal edilmiştir (Doymaz 2005; Taheri et al. 2011).

Belirleme katsayısı ( $r^2$ ), borik asitin mikrodalga ile kurutulmasında en uygun matematiksel modelin seçiminde başlıca kriter olmuştur. Tahmini standart hatanın (SEE) kurutma işlemleri boyunca tüm ölçüm aralarında ölçülen ve ideal değeri sıfır olmalıdır. Belirleme katsayısı ( $r^2$ ) ve tahmini standart hata (SEE) aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,mean,i})^2 - (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,mean,i})^2} \quad (2)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n_i}} \quad (3)$$

Burada  $MR_{exp,i}$  deneyler sırasında ölçülen ayrılabilir nem oranı,  $MR_{pre,i}$  modelin tahmin ettiği ayrılabilir nem içeriği, N gözlem sayısı,  $n_i$  sabit ve katsayıların sayısıdır.

Model uyumluluğunu belirlemede kullanılan ortalama hata kareleri toplamı kökü (RMSE), deneysel ve tahmin verileri ortalamalarının karesi olan ki kare ( $\chi^2$ ) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n_i} \quad (5)$$

Kalanların karelerin toplamı (RSS), deneysel ve tahmin verilerinin farkların, toplamının karesidir. Model yeterliliği için bu değer mümkün oldukça küçük olması gerekmektedir. RSS aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RSS = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (6)$$

Borik asit için kinetik sabitler kullanılarak Arrhenius denklemini temel alarak türetilmiş eksponansiyel bir denkleme dayanarak aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır (Dadalı 2007).

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_a m}{P}\right) \quad (7)$$

Burada k; kinetik sabit (kurutma kinetiği için  $dak^{-1}$ ),  $k_0$ ; eksponansiyel sabit, m; numune ağırlığı (g),  $E_a$ ; aktivasyon enerjisi ( $W.g^{-1}$ ), P; mikrodalga çıkış gücü (W) olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmada model belirleme için en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen verilerin kurutma sabitlerinin hesaplanmasında doğrusal olmayan regresyon analizi yapmak için bilgisayar programı EXCEL çözücü eklentisi kullanılmıştır. Doğrusal olmayan GRG (Generalized Reduced Gradient) metodu seçilmiştir (Brown 2001).

**Çizelge 1.** Borik asitin kurutma eğrilerinin modellenmesinde kullanılan eşitlikler

No	Model	Model Adı	Kaynak
1	$MR = a \exp(-k(t^m)) + bt$	Midilli ve Küçük	Özbek ve Dadalı, 2007
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page	Agrawal ve Singh, 1977
3	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Difüzyon Yaklaşımı	Toğrul ve Pehlivan, 2003
4	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Verma	Verma ve ark, 1985
5	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson ve Pabis	Bengtston ve ark, 1988
6	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	İki Terimli Exponansiyel	Sharaf-Elden ve ark, 1980

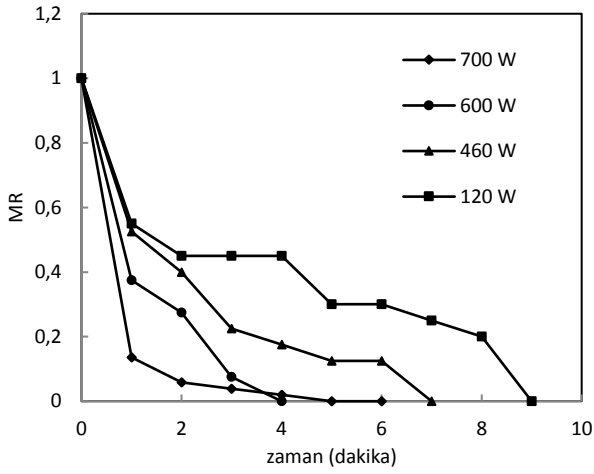
### 3. Bulgular

Mikrodalga ile kurutma işlemine başlamadan önce Borik asit numunelerinin sahip olduğu nem miktarını belirlemek için 105 °C sıcaklığında etüvde 3 saat bekletilmiştir. Etüvden alınan numunelerin ağırlık ölçümleri yapıldığında %28,49 azaldığı görülmüştür (AOAC 1999). Bu su kaybının mikrodalga kurutma ile bulunan %1'in altındaki ağırlık kaybına göre yüksek

çıkmasının sebebi Ortorombik metaborik asit : (HBO<sub>2</sub>-III) oluşumu olabilir. Literatürdeki termogravimetrik analiz (TGA) grafiğine göre 105 °C'de borik asitte kütle kaybı gerçekleşmektedir (Sevim vd. 2006).

Mikrodalğanın 5 farklı ayarlanabilir güç değerinde borik asitin kurutulması üzerinde çalışılmış ve karşılaştırılmıştır. 120 W, 350W, 460W, 600 W ve 700 W mikrodalga güç değerlerinde kurutma işlemi

gerçekleştirilmiştir. Farklı mikrodalga güç değerlerinde nem oranının zamanla azalması Şekil 1’de gösterilmiştir.

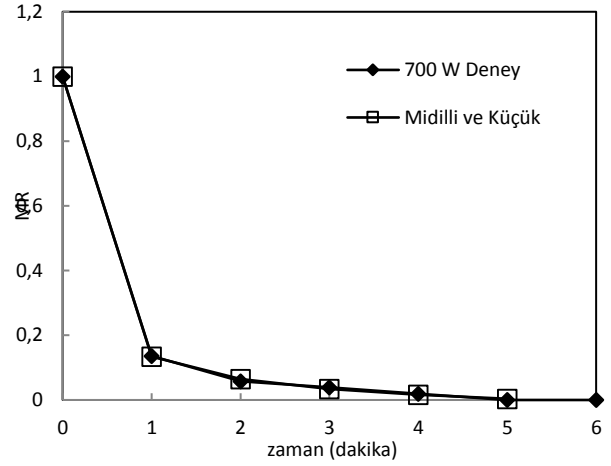


Şekil 1. Farklı mikrodalga güç değerleri için nem oranının zamanla değişimi.

Yapılan kurutma işlemi sonucunda borik asitin nem içeriğinde meydana gelen değişim zamana bağlı olarak incelenmiştir. Borik asitin belli bir t anındaki nem içeriğinin (M) ve borik asitin ilk nem içeriğine ( $M_0$ ) oranı olarak sadeleştirilen ayrılabilir nem oranı (MR) 6 farklı model ile belirlenmiştir.

Hesaplanan değerler ile deneysel veriler arasındaki belirleme katsayıları ve model katsayıları incelendiğinde, belirleme katsayısı en yüksek Midilli ve Küçük modelinde saptanmış olup 0,9661-0,9999 düzeyindedir. Elde edilen sonuçlar, deneylerin gerçekleştiği koşullarda tahmin için Midilli ve Küçük modelinin pratikte kullanılabileceğini göstermektedir.

700 W değeri için mikrodalga kurutmanın deneysel değerler ile uyumu Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Mikrodalga kurutmanın model ile uyumu.

Mikrodalga gücü ile borik asitten uzaklaşan % 1’den daha küçük kaba nem yüzdesi Çizelge 3’de verilmiştir. 700 Watt mikrodalga güç değerinin bile kristal bağ suyunu yapıdan uzaklaştıracak güçte olmadığı görülmektedir. Bu kadar küçük değişim değerinde olsa da matematiksel modeller çalışmaktadır. Mikrodalga güç değeri arttıkça bağlı nemin yapıdan uzaklaşması için gereken süre azalmaktadır. Güç azaldıkça borik asit yapısından daha az miktarda nem ayrılmaktadır.

Borik asit mikrodalga ile kurutma işlemlerine ilişkin kullanılan modellerin analiz sonuçları Çizelge 2 ve Çizelge 3’de verilmiştir. Borik asitten mikrodalga güç ile atılan kaba nem yüzdesi ve uzaklaşma süreleri Çizelge 4’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Farklı mikrodalga güçlerindeki Borik Asit numunesini için kurutma modellerinin analiz sonuçları

Model	Güç	k	n	a	b	g	m
Midilli ve ark.	120W	0,479	-	0,99997	-0,058	-	0,001
	350W	0,195	-	1,00635	-0,047	-	0,538
	460W	0,604	-	0,99996	-0,015	-	0,609
	600W	0,679	-	1,00001	-0,126	-	0,044
	700W	1,981	-	1,00001	-0,003	-	0,415
Difüzyon Yaklaşımı	120W	11,315	-	0,320	0,014	-	-
	350W	11,314	-	-0,012	0,018	-	-
	460W	16,642	-	0,219	0,023	-	-
	600W	16,640	-	0,225	0,040	-	-
	700W	16,633	-	0,722	0,044	-	-
Page	120W	0,482	0,583	-	-	-	-
	350W	0,190	1,040	-	-	-	-

	460W	0,596	0,786	-	-	-	-
	600W	0,901	0,855	-	-	-	-
	700W	1,991	0,505	-	-	-	-
Verma	120W	0,161	-	0,680	-	13,366	-
	350W	0,259	-	3,561	-	0,287	-
	460W	0,376	-	0,781	-	15,303	-
	600W	0,669	-	0,775	-	15,376	-
	700W	0,726	-	0,278	-	15,375	-
Hendeson ve Pabis	120W	0,218	-	0,868	-	-	-
	350W	0,203	-	1,004	-	-	-
	460W	0,465	-	0,963	-	-	-
	600W	0,826	-	0,989	-	-	-
	700W	1,900	-	0,999	-	-	-
İki Terimli Exponansiyel	120W	1,321	-	0,163	-	-	-
	350W	0,203	-	1,004	-	-	-
	460W	1,997	-	0,198	-	-	-
	600W	0,834	-	0,958	-	-	-
	700W	1,901	-	1,0004	-	-	-

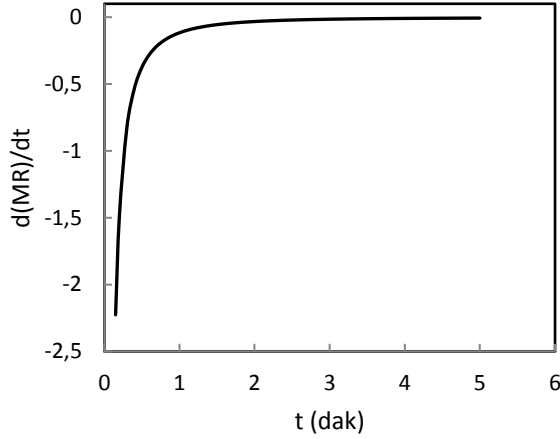
**Çizelge 3.** Farklı mikrodalga güçlerindeki Borik Asit numunesine ait kurutma modellerinin analiz sonuçları

Model	Güç	SEE	RMSE	X <sup>2</sup>	RSS	r <sup>2</sup>
Midilli ve ark.	120W	0,009	0,007	7,650x10 <sup>-5</sup>	0,021	0,966
	350W	0,009	0,007	8,048x10 <sup>-5</sup>	0,024	0,977
	460W	0,003	0,002	9,460x10 <sup>-6</sup>	0,006	0,991
	600W	0,002	0,001	7,211x10 <sup>-6</sup>	0,003	0,996
	700W	0,00006	0,00003	4,480x10 <sup>-9</sup>	0,0001	0,9999
Difüzyon Yaklaşımı	120W	0,015	0,013	2,340x10 <sup>-4</sup>	0,040	0,936
	350W	0,015	0,013	2,190x10 <sup>-4</sup>	0,042	0,966
	460W	0,003	0,002	1,000x10 <sup>-5</sup>	0,007	0,990
	600W	0,006	0,004	4,344x10 <sup>-5</sup>	0,009	0,985
	700W	0,0001	0,00007	1,030x10 <sup>-8</sup>	0,0002	0,9998
Page	120W	0,019	0,017	3,720x10 <sup>-4</sup>	0,055	0,914
	350W	0,014	0,012	1,910x10 <sup>-4</sup>	0,041	0,964
	460W	0,003	0,003	1,150x10 <sup>-5</sup>	0,008	0,988
	600W	0,006	0,005	3,730x10 <sup>-5</sup>	0,011	0,983
	700W	0,00009	0,00007	8,825x10 <sup>-9</sup>	0,0002	0,9997
Verma	120W	0,015	0,012	2,340x10 <sup>-4</sup>	0,040	0,936
	350W	0,014	0,012	2,080x10 <sup>-4</sup>	0,041	0,955
	460W	0,003	0,002	9,710x10 <sup>-6</sup>	0,007	0,990
	600W	0,006	0,004	4,338x10 <sup>-5</sup>	0,009	0,985
	700W	0,0001	0,00007	1,014x10 <sup>-8</sup>	0,0001	0,9998
Hendeson ve Pabis	120W	0,029	0,027	8,940x10 <sup>-4</sup>	0,085	0,866
	350W	0,013	0,012	1,940x10 <sup>-4</sup>	0,042	0,954
	460W	0,006	0,005	4,080x10 <sup>-5</sup>	0,015	0,978
	600W	0,007	0,005	4,9344x10 <sup>-5</sup>	0,012	0,981
	700W	0,001	0,001	2,387x10 <sup>-6</sup>	0,003	0,996
İki Terimli Exponansiyel	120W	0,026	0,024	7,040x10 <sup>-4</sup>	0,075	0,881
	350W	0,014	0,012	1,950x10 <sup>-4</sup>	0,042	0,954
	460W	0,003	0,003	1,230x10 <sup>-5</sup>	0,008	0,988

600W	0,007	0,005	$5,036 \times 10^{-4}$	0,012	0,980
700W	0,001	0,001	$2,388 \times 10^{-6}$	0,003	0,996

**Çizelge 4.** Borik asitten mikrodalga ile atılan kaba nem yüzdesi

Güç	120W	350W	460W	600W	700W
Yüzeysel Nem	%0,066	%0,113	%0,133	%0,133	%0,343
Süre (dak)	10	8	7	5	4



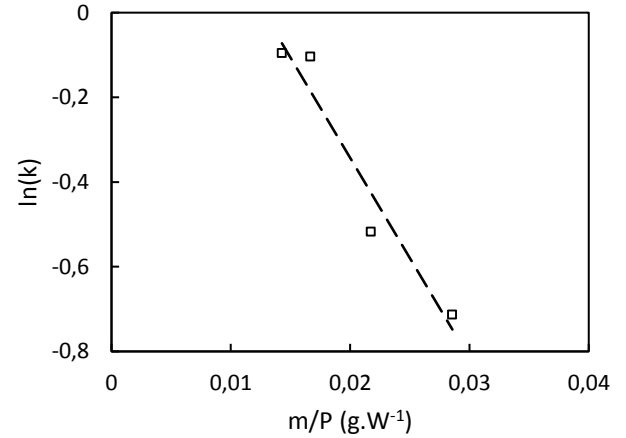
**Şekil 3.** Borik asitin kurutma hızı grafiği

Seri noktası az olduğundan sayısal türevde hata büyük olur. Bu yüzden veri noktalarıyla çok uyumlu olan teorik model üzerinden türev almak kolaylık sağlar. Bu çalışmada en iyi model olan Midilli ve Küçük modelinin türevi alınarak uygulanmıştır. Nemin uzaklaşma grafiğinin türevi reaksiyon hızı ile ilgilidir. 700 W için çizilen Şekil 3'den anlaşılacağı üzere kaba nem mikrodalga ile hızlı bir şekilde yapıdan uzaklaşmakta ve tepkime hızı git gide yavaşlamaktadır. Nemin yaklaşık %90'ı daha ilk dakikada yapıdan uzaklaşmaktadır. Bu Şekil 3'de t=0 noktasında minimumun çıkması şeklinde görülmektedir.

Page modelindeki kinetik sabitler kullanılarak borik asit numuneleri için aktivasyon enerjileri Arrhenius denklemi temel alınarak türetilen (Dadalı 2007) Eşitlik 7 kullanılarak m/P değerlerine karşılık ln(k) değerleri Şekil 4'de çizilmiştir. Lineer değişim gösteren bu grafiğin eğiminden aktivasyon enerjisi kesme noktasından ise  $k_0$  kinetik sabiti hesaplanabilir. Bulunan sonuçlar Çizelge 5'de verilmiştir.

**Çizelge 5.** Borik asitin yüzeysel neminin mikrodalga kurutma kinetik sabitleri.

$E_a$ (W/g)	$k_0$ (1/dak)	$r^2$
47,306	1,8284	0,94



**Şekil 4.** Borik asitin mikrodalga ile kurutma aktivasyon enerjisinin belirlenmesi.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada mikrodalga ile paketleme aşamasındaki borik asitin literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak yüzeysel neminin kurutulması gösterilmiştir. Borik asit numunesinin kurutma karakteristikleri 6 farklı model ile de uyum sağladığı görülmüştür. Borik asitin nem içeriğinin belirlenmesinde kullanılan modellerin hepsinin 120W dışında yüksek bir modelleme yeterliliğine sahip olduğu söylenebilir. Mikrodalga güç arttıkça kurutma süreleri azalmaktadır. Birinci dakikada %85-90 ikinci dakika sonunda %95-97 kuruma gerçekleşmektedir. Yüzeysel nem uzaklaştırmak için 600W ve 4 dakika süre kullanılabilir. Aktivasyon enerjisi 47,306 W/g, ve  $k_0$  değeri 1,8284  $\text{dak}^{-1}$  olarak bulunmuştur.

Borik asit numunelerinde %1'in altında kaba nem bulunduğu anlaşılmıştır. 700 Watt mikrodalga güç değerinde bile kristal bağ suyunu yapıdan uzaklaştıracak güçte olmadığı görülmektedir. AOAC yönteminde sıcaklık 105 °C olduğundan literatürdeki çalışmalarla uygun olacak şekilde kütle kaybı büyük çıkmıştır %28 lik kütle kaybı Ortorombik metabolik

asit oluşumunu göstermektedir (Sevim vd. 2006). Etüv kurutma kullanılmadığında bu hidrat suları uzaklaşmamaktadır.

Literatürdeki diğer bir çalışmada ise mikrodalga ile ıslak borik asit numunesi çalışılmış olup (Kocakuşak, Köroğlu 1998), kinetik modelleme yapılmamış ve bu çalışmadaki borik asit numunesinden nem içeriği olarak farklıdır.

Bu kadar küçük bir kaba nem bile ithalat, ihracat ve ürün tesliminde sorun teşkil edebilmektedir. Eti maden borik asit fabrikasında sudan süzülükten sonra kurutulan borik asit numunelerinin %1'in altında kalan nemi mikrodalga kullanarak atılabildiği bu çalışmada gösterilmiştir. Sanayi tipi mikrodalga kurutucular kullanılarak borik asit fabrikasında üretilen ihraç malı borik asit numunelerinin kaba neminin bu şekilde kurutulması önerilmektedir.

### Kaynaklar

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Khani, S. and Ghasemi, M., 2009. Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *International Agrophysics*, **23**, 313-317.
- Agrawal, Y.C. and Singh, R.P., 1997. Thin layer drying studies on short grain rough rice. ASAE Paper No 77-3531, St. Joseph, MI, USA.
- Alibaş, İ., 2014. Microwave, air and combined microwave-air drying of grape leaves (*Vitis vinifera* L.) and the determination of some quality parameters. *International Journal of Food Engineering*, **10(1)**, 69-88.
- Alibaş, İ., 2012. Asma yaprağının (*Vitis vinifera* L.) mikrodalga enerjisiyle kurutulması ve bazı kalite parametrelerinin belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, **18**, 43-53.
- AOAC, 1999. Official methods of analysis, 16th edn. association of official analytical chemists, Washington.
- Bayrak, D., Bozbeyoğlu, F., Çağlayan, D., Cengiz, İ., Çelebi, A., 2001. Özelleştirmenin odağındaki bor. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 59. Teknik klavuzlar serisi No:7.
- Brown, A.M., 2001. A step-by-step guide to non-linear regression analysis of experimental data using a Microsoft Excel spreadsheet. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **65**, 191-200.
- Dadali, G., 2007. Bamyacı ve ispanağın mikrodalga tekniğı kullanılarak kurutulması, doku ve renk özelliklerinin incelenmesi ve modellenmesi. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 195.
- Doymaz, İ., Kıpçak, A.S. and Piskın, S., 2015. Microwave drying of green bean slices: drying kinetics and physical quality. *Czech Journal of Food Sciences*, **33(1)**, 367-376.
- Doymaz, İ., 2005. Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, **69**, 275-279.
- Eren, Ö., Soysal, Y., Öztekin, S. and Doğantan, Z.S., 2005. Mikrodalga sistemi ile donatılmış bir bantlı kurutucuda maydanoz kurutulması. III. Tarımsal Ürünleri Kurutma Tekniğı Çalıştayı, Antalya, 2-4 Mayıs.
- Kemahlioğlu, K. and Baysal, T., 2002. Hububat Ürünlerinin İşlenmesinde Mikrodalga Uygulamaları, HUBUBAT 2002 Hububat Ürünleri Teknolojisi Kongre ve Sergisi, Gaziantep, 3-4 Ekim.
- Kılıç, S., 2011. Borik asitin dehidratasyonu. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 76.
- Kılıç, A. M., 2004. Bor madeninin Türkiye açısından önemi ve gelecekteki yeri, II. Uluslar arası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 31-41.
- Kirk-Othmer, 1990. Encyclopedia of Chemical Technology, Smith R., Boric Oxide, Boric Acid and Borates, Vol: 1, No:4.
- Kıpçak, A.S., 2017. Microwave drying kinetics of mussels (*Mytilus edulis*). *Research on Chemical Intermediates*, **43**, 1429-1445.
- Kocakuşak, S., Akçay, K., Ayok, T., Köroğlu, J., Savaşçı, T. and Tolun, R., 1998. "Akışkan yataкта bor," Tübitak Araştırma Merkezi, Rapor No:KM 323.
- Kocakuşak, S., Köroğlu, H.J., Tolun, R., 1998. Drying of wet boric acid by microwave heating. *Chemical Engineering and Processing* **37**, 197-201.
- Lagowski, J.J., 1997. Mcmillan encyclopedia of chemistry: Mcmillan, New York, 366 p.
- LI Yu, LEI Ying, ZHANG Li-bo, PENG Jin-hui and LI Chang-long, 2011. Microwave drying characteristics and kinetics of ilmenite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**, 202-207.
- Özbek, B. and Dadali, G., 2007. Thin layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, **83**, 541-549.
- Sarı, M. and Karaaslan, S., 2014. Ananasın mikrodalga ile kurutulması ve uygun kurutma modelinin belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, **9(1)**, 42-50.
- Sarıiz, K. and Nuhoğlu, İ., 1992. Endüstriyel hammadde yatakları ve madenciligi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 452 s.
- Sevim, F., Demir, F., Bilen, M., Okur, H., 2006. Kinetic analysis of thermal decomposition of boric acid from thermogravimetric data. *Korean J. Chem. Eng.*, **23(5)**, 736-740.
- Soysal, Y., Öztekin, S. and Eren, Ö., 2006. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics and energy aspects. *Biosystems Engineering*, **93(4)**, 403-413.
- Taheri-Garavand, A., Rafiee, S., Keyhani, A., (2011). Study on Effective moisture diffusivity, activation energy and mathematical modeling of thin layer drying kinetics of bell pepper, *AJCS* **5(2)**:128-131.
- Toğrul, İ.T., Pehlivan, D., 2003. Modeling of Drying Kinetics of Single Apricot, *Journal of Food Engineering*, **58(1)**, 23-32.



Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B. and Wratten, F.T.,1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. Transactions of the ASAE, **28**, 296-301.  
Yağcıoğlu, A., 1999. Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Atölyesi, Yayın No:536, İzmir.