



Optimization of microwave apple drying using response surface method

Hakan Yoğurtçu

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Munzur University, Tunceli, 62000, Turkey

Highlights:

- Apple drying with time controlled microwave power generator
- Effects of microwave output power and slice thickness on microwave drying of apple slices
- Response surface method and central composite design

Keywords:

- Response surface method
- Microwave drying
- Optimization
- Apple

Graphical/Tabular Abstract

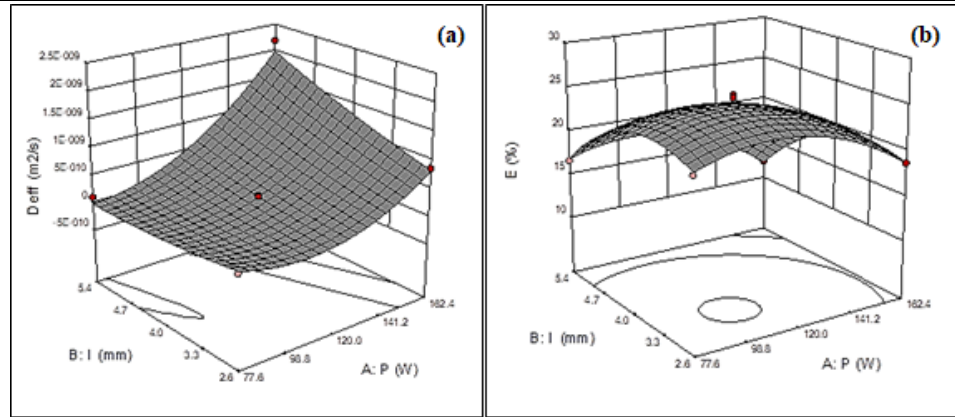


Figure A. Three-dimensional response surface graphs showing the effect of microwave power and apple slice thickness on response variables. (a) Effective diffusion coefficient, (b) Color changes

Article Info:

Research Article
Received: 11.02.2018
Accepted: 14.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460532

Purpose: In this study, the effects of microwave output power and slice thickness on microwave drying of apple slices were studied by using response surface method (RSM) in a modified domestic microwave oven.

Theory and Methods: In this study, a domestic microwave oven with maximum output power of 800 W (2450 MHz) was used for drying apple slices. The microwave oven was modified to monitor the weight change of the apple slices during drying and to adjust the desired microwave output power. Using response surface method (RSM), the relationship between the independent variables of microwave output power and slice thickness and the responses of effective diffusion coefficient, drying rate constant, color change, Hue angle, total drying time and energy consumption were modeled. In the experimental design, the rotatable Box-Wilson central composite design (CCRD) approach was used.

Correspondence:

Author: Hakan Yoğurtçu
e-mail:
hakanyogurtcu@munzur.edu.tr
phone: +90 428 213 1794-
2473

Results: The effects of the independent variables on the responses and the significance level of these effects were evaluated statistically and the optimum drying conditions were determined for the aims of min color change, total drying time, energy consumption and max Hue angle. It was seen that the obtained second order polynomial equations successfully represent the response variables. Verification experiments were performed with a maximum of 9.54% error at the recommended optimum test conditions.

Conclusion: The results of analysis of variance (ANOVA) and response surface curves revealed that microwave output power and slice thickness were significantly effective on response variables. It has been shown that the response surface method can be successfully applied in the microwave drying of apples.



Yanıt yüzey metodu kullanarak mikrodalga ile elma kurutmanın optimizasyonu

Hakan Yoğurtçu*^{ID}

Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Tunceli, 62000, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Zaman kontrollü mikrodalga güç üretici ile elma kurutma
- Elma dilimlerinin mikrodalga ile kurutulması üzerine mikrodalga çıkış gücü ve dilim kalınlığının etkileri
- Yanıt yüzey metodu ve merkezi kompozit tasarım

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.02.2018

Kabul: 14.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460532

Anahtar Kelimeler:

Yanıt yüzey metodu,
mikrodalga kurutma,
optimizasyon,
elma

ÖZET

Bu çalışmada elma dilimlerinin mikrodalga ile kurutulması üzerine mikrodalga çıkış gücü ve dilim kalınlığının etkileri yanıt yüzey metodu (YYM) kullanılarak modifiye edilmiş ev tipi bir mikrodalga fırında incelendi. Deneysel tasarım için dönebilen merkezi kompozit deney tasarım (CCRD) yaklaşımı kullanıldı. Tasarım koşullarında gerçekleştirilen deneylerden etkin difüzyon katsayısı, kuruma hız sabiti, renk değişimi, Hue açısı, toplam kuruma süresi ve enerji tüketimi yanıt değişkenlerinin değerleri belirlendi. Elde edilen ikinci derece polinom denklemlerinin yanıt değişkenlerini temsil etmede başarılı oldukları görüldü. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları ve yanıt yüzey eğrilerinden yanıt değişkenleri üzerinde mikrodalga çıkış gücü ve dilim kalınlığının önemli düzeyde etkili oldukları tespit edildi. Bağımsız değişkenlerin yanıtlar üzerindeki etkileri ve anlamlılık düzeyleri istatistiki olarak değerlendirildi ve en az renk değişimi, en kısa kuruma süresi, en az enerji tüketimi ve en yüksek Hue açısı için optimum çalışma şartları belirlendi. Optimum deney koşullarında en fazla %9,54 hata ile doğrulama deneyleri gerçekleştirildi. Mikrodalga ile elma kurutmada yanıt yüzey metodunun başarılı bir şekilde uygulanabildiği görüldü.

Optimization of microwave apple drying using response surface method

H I G H L I G H T S

- Apple drying with time controlled microwave power generator
- Effects of microwave output power and slice thickness on microwave drying of apple slices
- Response surface method and central composite design

Article Info

Research Article

Received: 11.02.2018

Accepted: 14.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460532

Keywords:

Response surface method,
microwave drying,
optimization,
apple

ABSTRACT

In this study, the effects of microwave output power and slice thickness on microwave drying of apple slices were studied by using response surface method (RSM) in a modified domestic microwave oven. For experimental design, the central composite rotatable design approach was used. The values of response variables, effective diffusion coefficient, drying rate constant, color change, Hue angle, total drying time and energy consumption, were determined from the experiments performed under design conditions. It was seen that the obtained second order polynomial equations successfully represent the response variables. The results of analysis of variance (ANOVA) and response surface curves revealed that microwave output power and slice thickness were significantly effective on response variables. The effects of the independent variables on the responses and the significance level of these effects were evaluated statistically and the optimum drying conditions were determined for the aims of min color change, total drying time, energy consumption and max Hue angle. Verification experiments were performed with a maximum of 9.54% error at the recommended optimum test conditions. It has been shown that the response surface method can be successfully applied in the microwave drying of apples.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sağlığın zenginlik olduğuna inanan bilinçli tüketiciler arasında lezzetli ve gevrek yapılı elma meyvesi en popüler meyvelerden biridir. Zengin vitamin ve lif içeriği nedeni ile güçlü bir antioksidan olan elma bir şifa kaynağı olarak görülmektedir. Meme kanseri [1], pankreas kanseri [2], kolon ve karaciğer kanseri [3], bağırsak kanseri [4] gibi kanser türlerinin gelişim riskini azalttığı bilinen elma aynı zamanda hafıza kaybı, alzaimer ve Parkinson [5, 6] hastalıkları için koruyucu özelliklere sahiptir. Haftada en az iki elma yemenin astım ve akciğer kanseri riskini azalttığı bilinmektedir [7-9]. Kötü tip kolesterole (LDL) bağlı olarak kalp rahatsızlıkları oluşma riskini düşüren elma, yapısındaki pektin esaslı çözünebilir lif sayesinde immün sisteminin gelişimine de katkı sağlamaktadır [10-12]. Dünya üzerinde çok yaygın bir şekilde yetişen elma, taze olarak tüketilebildiği gibi elma suyu, elma kuru suyu, reçel, sirke vb. türleri şeklinde de tüketilmektedir.

Taze meyve ve sebzelerin, besleyici özellikleri en az zarar görecektir şekilde saklanarak mevsimi dışında da kullanılabilmesi için kullanılan yöntemler arasında kurutma en eski ve en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Kurutma işlemi sırasında ham maddedeki su uzaklaştırılır ve bu sayede mikroorganizma gelişimi ve akabinde bozulma önlenir [13]. Meyve ve sebzelerin kurutulmasında genellikle güneşte kurutma ve sıcak hava ile kurutma tercih edilir. Ancak açık havada kurutma kir ve toz bulaşmasına neden olurken sıcak hava ile kurutmada uzun süre yüksek sıcaklığa ve oksijen atmosferine maruz kalan taze meyve veya sebze örneğinde kimyasal bozulma reaksiyonları etkili bir şekilde gerçekleşir ve bu da ürün kalitesinde düşmeye neden olur. Ürün kalitesini artırmak için daha kısa sürede kuruma işlemi tamamlamak üzere mikrodalgalar ile kurutma kullanılan bir başka yöntemdir. Mikrodalga ile kurutmada, oluşan elektromanyetik dalgalar ürün içindeki su moleküllerini hedef alarak hem homojen hem de hızlı bir ısıtma sağlamaktadır. Bu sayede ürün bünyesindeki nem hızlı bir şekilde uzaklaşmakta ve daha kaliteli kuru ürün elde edilmesi mümkün olmaktadır. Birçok araştırmacı mikrodalga ile gıdaların kurutulmasına yönelik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda, buğday [14], havuç [15], şeftali [16], ıspanak [17], bamya [18], elma püresi [19], soğan [20], çay [21], sarımsak [22], kabak [23] gibi gıda maddelerinin mikrodalga ile kuruma koşulları incelenmiştir.

Yanıt yüzey metodu (YYM) süreç değişkenleri ve çıktıları (yanıtlar) arasındaki ilişkiyi ortaya koymada istatistiksel ve matematiksel teknikleri birlikte kullanarak prosesin modellenmesi ve optimize edilmesinde kullanılan faydalı bir tekniktir [24]. YYM kullandığı tasarım yaklaşımları ile daha az sayıda deney yaparak çok sayıda değişkeni ve bu değişkenler arasındaki etkileşimleri değerlendirerek optimum koşulların belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu yönüyle birçok bilim dalında kullanıldığı gibi gıda endüstrisindeki süreçlerin optimizasyonunda da kullanılabilir. Gıda maddelerin kurutulması sonucu

elde edilen ürünün kalitesi üzerine kurutma parametrelerinin etkilerinin optimize edilmesi bu inceleme alanlarından biridir. Birçok araştırmacı tarafından sıcak hava ile kurutma ve mikrodalga ile kurutma yöntemleri kullanılarak çeşitli meyve ve sebze örneklerinin kuruma süreçleri YYM ile modellenmiş ve süreç değişkenlerinin ürün kalitesi üzerine etkileri optimize edilmiştir [25-31].

Bu çalışmada Türkiye’de ekşi elma olarak bilinen Granny Smith çeşidi elmanın mikrodalga ile kurutulması incelendi. Kuruma sürecinde etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}) ve kuruma hız sabiti (k), kuru elmanın renk parametreleri (renk değişimi: ΔE ve Hue açısı: $^{\circ}Hue$), toplam kuruma süresi (t_{top}) ve enerji tüketimi (ET) üzerine mikrodalga gücünün ve elma dilim kalınlığının etkileri YYM kullanılarak modellendi ve optimum deney koşulları belirlendi.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

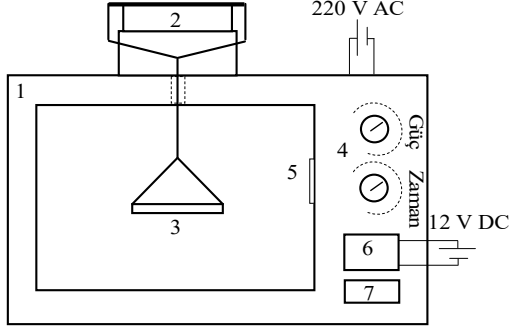
2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada kullanılan Granny Smith çeşidi elmalar yerel marketten temin edildi ve kurutma deneyleri öncesinde + 4 °C sıcaklıkta buzdolabında saklandı. Kurutulacak elma örneklerinin nem içerikleri halojen lambalı nem analiz cihazı (AND MX-50, Japonya) kullanılarak $\pm 0,5$ olarak belirlendi. Buzdolabından çıkarılarak oda sıcaklığında bir saat süre ile bekletilen elma örnekleri dilim kalınlığı ayarlanabilir bir dilimleyici ile istenilen kalınlıkta elma eksenine dik olarak dilimlendi. Elde edilen dilimlerin kabuk ve çekirdek içermeyen etli kısmı 4 cm çapında dairesel olarak kesilerek kurutma deneylerinde kullanıldı.

2.2. Mikrodalga kurutma deney düzeneği (Microwave drying experimental setup)

Elma dilimlerinin kurutulmasında Şekil 1’de görülen maksimum çıkış gücü 800 W olan 2450 MHz frekanslı ev tipi bir mikrodalga fırın (SIEMENS HF12G240 220V 50Hz, Almanya) kullanıldı. Kuruma süresince elma dilimlerinin ağırlık değişiminin takip edilebilmesi ve istenilen mikrodalga çıkış gücünün ayarlanması için mikrodalga fırın modifiye edildi. Elma örneklerinin ağırlık değişimlerini takip edebilmek için mikrodalga fırının üzerine 0,01 g hassasiyetli bir elektronik terazi (SHIMADZU BL-3200H, Japonya) yerleştirildi ve mikrodalga fırın içindeki 120 mm çaplı ve 5 mm derinlikli teflon (PTFE) bir tabak PTFE ipli sarkaç ile teraziye bağlandı. Kurutmada istenilen mikrodalga gücü zaman kontrollü olarak sağlandı. Bunu gerçekleştirebilmek için magnetrona güç sağlayan trafo öncesine 12V DC röle içeren saniyenin %1’i (santi saniye, cs) hassasiyetli zaman kontrollü bir elektronik kart bağlandı. Bu sayede akım hattı açık-kapalı tutularak mikrodalga çıkış gücü kontrol edildi. 15 saniyelik periyodun belli bir süresinde ($t_{açık}$) maksimum güçte akım hattı açık geriye kalan sürede ($t_{kapalı}$) kapalı tutulmak sureti ile istenilen güçlerde magnetronun enerji üretmesi sağlandı. Belli kalınlıktaki elma dilimleri istenilen mikrodalga gücünde başlangıç

ağırlığının %20'sine ulaşıncaya kadar kurutuldu. Başlangıç ağırlığının kuruma üzerine etkisini ortadan kaldırmak için bütün deneylerde 11,91±0,04 g elma örneği kullanıldı. Ağırlık değişimleri bir kronometre ile 2 dakika periyotlarla takip edildi.



(1) Mikrodalga fırın, (2) Elektronik terazi, (3) Teflon (PTFE) tabak, (4) Ayar düğmeleri, (5) Dalga kılavuzu, (6) Röleli kontrol paneli, (7) Kapı açma butonu

Şekil 1. Mikrodalga kurutma deney düzeneği (Microwave drying experimental setup)

2.3. Renk ölçümleri (Color measurements)

Deneyler sonunda elde edilen kuru elma dilimlerinin renk katsayıları (L^* , a^* ve b^*) taşınabilir bir renk ölçüm cihazı (Konica Minolta CR-400, Japonya) ile tespit edildi. Burada L^* ; aydınlık değerini, a^* ; kırmızı ve yeşilliği, b^* ; sarı ve maviliği temsil eder. Ölçümlerde her ölçüm öncesi standart beyaz ($L^*=93,71$, $a^*=-0,84$ ve $b^*=1,83$) ve siyah plakalar ile cihazın kalibrasyonu gerçekleştirildi ve her bir örneğin renk ölçümü 5 kez tekrarlanarak ortalama değer belirlendi. Her deney sonunda elde edilen kuru elma örneğinin taze elmaya göre renk değişimi Eş. 1 ile belirlendi.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_o^*)^2 + (a^* - a_o^*)^2 + (b^* - b_o^*)^2} \quad (1)$$

burada, ΔE renk değişimini ve “o” indisi taze elma örneğini temsil etmektedir.

Örneğin renk uzayındaki konumu Hue açısı ($^\circ$ Hue) ile tanımlanmaktadır ve Eş. 2 ile belirlenmektedir [30].

$$^\circ \text{Hue} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2)$$

2.4. Kuruma hız sabiti ve etkin difüzyon katsayısının belirlenmesi

(Determination of drying rate constant and effective diffusion coefficient)

Mikrodalga fırında kurutulan elma dilimlerinin kuruma süresince nem içerikleri (MC) ve boyutsuz nem oranları (MR) sırasıyla Eş. 3 ve Eş. 4 ile belirlendi.

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (3)$$

$$MR = \frac{MC_t - MC_e}{MC_0 - MC_e} \quad (4)$$

burada w_t (kg) herhangi bir andaki örnek ağırlığı, w_d (kg) kuru madde ağırlığı, MC (kg su · kg kuru madde⁻¹) nem içeriği ve MR boyutsuz nem oranıdır. MC_0 (kg su · kg kuru madde⁻¹), MC_t (kg su · kg kuru madde⁻¹) ve MC_e (kg su · kg kuru madde⁻¹) ise sırasıyla başlangıçta, herhangi bir anda ve denge anındaki nem içerikleridir. Mikrodalga kurutmada denge nem içeriği kuruma sonundaki nem içeriği olarak kabul edildi [32].

Kuruma hız sabitinin belirlenmesi için kuruma kinetiği çalışmaları yaygın olarak kullanılan modellerden olan Page modeli kullanıldı. Page model denklemi Eş. 5’de görülmektedir [33].

$$MR = \exp(-k t^n) \quad (5)$$

burada k (dk⁻ⁿ) kuruma hız sabiti ve n model sabitidir. k ve n değerleri STATISTICA (Versiyon 10) veri analiz paket programı kullanılarak lineer olmayan regresyon tekniği ile belirlendi.

Elma dilimlerinin kurutulmasında etkin difüzyon katsayısı Eş. 6 ile verilen Fick’in difüzyon denkleminde belirlendi [34].

$$MR = \frac{M_{C_t} - M_{C_e}}{M_{C_0} - M_{C_e}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left(- (2i+1)^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4 \cdot L^2} \cdot t\right) \quad (6)$$

Uzun kurutma süreleri için Eş. 6’daki Taylor serisinin sadece ilk terimi dikkate alınarak Eş. 7 yazılabilir ve bunun da logaritmik formu Eş. 8 ile verilmiştir.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4 \cdot L^2} \cdot t\right) \quad (7)$$

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

burada t (s) zaman, L (m) dilim yarı kalınlığı ve D_{eff} (m² · s⁻¹) etkin difüzyon katsayısıdır. Eş. 8 bir doğru denklemi olup zamana karşı $\ln(MR)$ grafiğinin eğiminden etkin difüzyon katsayısı hesaplandı.

2.5. Yanıt yüzey metodu ve deney tasarımı (Response surface method and experimental design)

YYM kullanılarak mikrodalga çıkış gücü (P) ve dilim kalınlığı (l) bağımsız değişkenleri ile etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}), kuruma hız sabiti (k), renk değişimi (ΔE), Hue açısı ($^\circ$ Hue), toplam kuruma süresi (t_{top}) ve enerji tüketimi (ET) yanıtları arasındaki ilişki modellendi. Deney tasarımında dönebilen Box-Wilson merkezi kompozit tasarım (CCRD) yaklaşımı kullanıldı. Deneysel tasarım ve veri değerlendirme işlemleri için Design-Expert Version 10 (Statease Inc. ABD) paket programı kullanıldı. Merkez noktada 3, faktöriyel ve yıldız noktalarda 1’er tekrarlı olmak üzere toplam 11 deneme içeren tasarım oluşturuldu. Bağımsız değişkenlerin tasarım noktalarına ait değerleri Tablo 1’de görülmektedir. En büyük ve en küçük değerler yıldız noktalar olarak kullanıldı. Bağımsız değişkenlerin

kodlanmış ve gerçek değerleri Tablo 2’de görülmektedir. Her bir yanıt değişkeni (Y) için bağımsız değişkenlerle (P , l) olan ilişkileri Eş. 9 ile verilen ikinci dereceden polinom eşitliği ile temsil edildi. Modelin istatistiksel olarak önem düzeyi %95 güven aralığında F-değeri ($p < 0,05$) ile ölçüldü. Modelin değerlendirmesinde uyum eksikliği (Lack of fit) testi, hata (Pure error), varyasyon katsayısı (CV), tahmini hataların karelerinin toplamı (PRESS), belirleme katsayısı (R^2), düzeltilmiş belirleme katsayısı (Adj. R^2) ve tahmini belirleme katsayısı (Pred. R^2) parametreleri kullanıldı.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_{AB} A B + \beta_{AA} A^2 + \beta_{BB} B^2 \quad (9)$$

Burada Y_i herhangi bir yanıt değişkenini, β denklem katsayılarını göstermektedir.

Tablo 1. Bağımsız değişkenlerin CCRD için tasarım noktalarındaki gerçek değerleri
(Real values of independent variables at design points for CCRD)

Bağımsız değişkenler	Tasarım noktaları değerleri				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Mikrodalga gücü, P (W)	60	77,6	120	162,4	180
Elma dilim kalınlığı, l (mm)	2	2,6	4	5,4	6

Tablo 2. CCRD deneme sayısı ve bağımsız değişkenlerin değerleri
(Run numbers for CCRD and values of independent variables)

Deneme Sırası	Bağımsız değişkenlerin değerleri			
	Kodlanmış		Gerçek	
	A	B	P (Watt)	l (mm)
1	-1	-1	77,6	2,6
2	1	-1	162,4	2,6
3	-1	1	77,6	5,4
4	1	1	162,4	5,4
5	-1,414	0	60,0	4,0
6	1,414	0	180,0	4,0
7	0	-1,414	120,0	2,0
8	0	1,414	120,0	6,0
9	0	0	120,0	4,0
10	0	0	120,0	4,0
11	0	0	120,0	4,0

2.6. Enerji tüketimi (Energy consumption)

Mikrodalga ile elma dilimlerinin kurutulması sırasında, uzaklaştırılan su miktarına bağlı olarak tüketilen enerji miktarı, mikrodalga fırının güç üretmek üzere açık kalma süresi ve toplam kurutma süresi dikkate alınarak Eş. 10 ile hesaplandı. Deneysel tasarıma göre gerekli mikrodalga gücünü elde edebilmek için magnetronun çalışma periyotları Tablo 3’de görülmektedir. Mikrodalga fırında enerji tüketen elemanlar magnetron, döner tepsi motoru ve fırın fanı olup döner tabla motoru devre dışı tutulmuştur. Fırın fanı ise sürekli çalışır durumda değerlendirilmiştir.

$$ET = \frac{\text{Harcanan Enerji Miktarı (kWh)}}{\text{Uzaklaştırılan su miktarı (g)}} \quad (10)$$

Burada ET ($\text{kWh}\cdot\text{g}^{-1}$) enerji tüketimini ifade etmektedir.

Tablo 3. Mikrodalga fırının zaman kontrollü çalışma periyotları
(Working periods of time controlled microwave oven)

Mikrodalga çıkış gücü P (W)	Açık süre $t_{\text{açık}}$ (cs)	Kapalı süre $t_{\text{kapalı}}$ (cs)	Açık kalma oranı %
60	113	1387	7,5
77,6	146	1354	9,7
120	225	1275	15
162,4	305	1195	20,3
180	336	1164	22,5

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Deney Tasarımı (Experimental Design)

CCRD yaklaşımı ile oluşturulan deney tasarımına göre yapılan deneylerden elde edilen yanıt değişkenlerinin değerleri Tablo 4’de görülmektedir. Farklı mikrodalga çıkış gücü ve elma dilim kalınlıklarında yanıt değişkenlerinin değerleri D_{eff} için $6,8 \cdot 10^{-11} - 2,188 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; k için $0,00067-0,09977 \text{ dk}^{-n}$; ΔE için $12,0-25,1$; $^{\circ}\text{Hue}$ için $77,4-88,3$; t_{top} için $20-612 \text{ dk}$ ve ET için $0,00630-0,10642 \text{ kWh}\cdot\text{g}^{-1}$ aralıklarında değişmektedir. Genel olarak bütün deney koşullarında etkin difüzyon katsayısı değerlerinin düşük olması kuruma sürecinin difüzyon kontrollü gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Diğer taraftan kuruma hız sabiti değerleri üzerinde mikrodalga çıkış gücünün oldukça etkili olduğu görülmektedir. Renk değişimi değerlerine göre genel olarak mikrodalga çıkış gücünün ve dilim kalınlığının etkili olduğu söylenebilir. Ayrıca Hue açılarında göre kuru ürünlerin renk değerleri renk uzayında I. bölgeye ($^{\circ}\text{Hue} < 90^{\circ}$) karşılık gelmektedir. Benzer şekilde kuruma süresi ve enerji tüketimi değerleri üzerinde de mikrodalga çıkış gücünün ve dilim kalınlığının birlikte etkin oldukları aşikardır. Tablo 5’de, yanıt değişkenleri ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki için CCRD yaklaşımı ile önerilen ikinci derece polinom fonksiyonlarının varyans analizi (ANOVA) sonuçları görülmektedir. Bütün yanıt değişkenleri için önerilen model denklemlerinin belirleme katsayıları (R^2) $0,9749-0,9953$ aralığında olup 1’e oldukça yakındır. Bu sonuç denklemlerin deneysel verileri temsil etmede gayet başarılı oldukları anlamına gelmektedir.

Bütün yanıt değişkenleri için tanımlanan ikinci derece denklemlerin p-değerleri önemli düzeyde ($p < 0,05$) olup model denklemlerinin deneysel verileri temsil etmede uygun oldukları anlamına gelmektedir. Deneysel veri kümesi içinde olup ta regresyon analizinde yer almayan verilerin modelin başarısı üzerindeki etkisinin göstergesi olan uyum eksikliği (Lack of fit) testi için $p > 0,05$, yani önemsiz, olması beklenir. Bu çalışmada D_{eff} , k ve ET yanıt değişkenleri için uyum

Tablo 4. CCRD uygulaması için bağımsız değişkenler ve yanıtların değerleri
(Values of independent variables and responses for CCRD)

Deney No	Değişkenler		Yanıtlar					
	P (W)	L (mm)	$D_{eff} \cdot x$ 10^{l^0} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	k (dk $^{-n}$)	ΔE (%)	Hue (°)	t_{top} (dk)	ET (kWh $\cdot g^{-1}$)
1	77,6	2,6	1,51	0,00124	22,0	79,7	268	0,03637
2	162,4	2,6	8,64	0,06647	18,7	79,3	69	0,01960
3	77,6	5,4	1,05	0,00067	16,6	84,8	612	0,08304
4	162,4	5,4	21,88	0,04774	12,0	86,8	129	0,03665
5	60,0	4,0	1,88	0,00419	21,1	81,6	443	0,04649
6	180,0	4,0	19,32	0,09977	14,6	82,7	20	0,00630
7	120,0	2,0	0,68	0,00723	21,7	78,7	177	0,03715
8	120,0	6,0	4,98	0,00084	13,0	88,3	507	0,10642
9	120,0	4,0	2,63	0,00236	25,1	77,8	315	0,06612
10	120,0	4,0	2,12	0,00148	24,8	77,4	303	0,06360
11	120,0	4,0	2,38	0,00154	22,9	78,4	310	0,06507

eksikliği önemli düzeyde olurken, ΔE , $^{\circ}Hue$ ve t_{top} yanıt değişkenleri için önemsiz düzeyde olduğu görülmektedir. Ancak model denkleminin yeterli kesinliğinin (adequate precision) göstergesi olan sinyal gürültü oranları D_{eff} , k , ΔE , $^{\circ}Hue$, t_{top} ve ET için sırasıyla 18,26, 33,509, 20,325, 37,633, 41,691 ve 19,971 olup yeterli düzey olan 4 ün üzerindedir. Tahmini belirleme katsayısı (Pred. R^2), bağımsız değişkenlerin yeni değerleri için model denkleminin bağımlı değişkenin değerlerini çeşitlendirebilme yeteneğini ifade etmektedir ancak tek başına yeterli bir parametre değildir [35]. Düzeltilmiş belirleme katsayısı (Adj. R^2) ve tahmin belirleme katsayısı (Pred. R^2) değerlerinin birbirine yakın olması ve aralarındaki farkın 0,2 den daha az olması ((Adj. R^2 - Pred. R^2)<0,2) beklenmektedir [25, 36]. Bütün yanıt değişkenleri için bu fark değerleri 0,2 den küçük olup bu durum önerilen model denklemlerinin başarı düzeyinin oldukça iyi olduğu anlamına gelmektedir.

3.2. Yanıt Yüzey Eğrilerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of response surface curves)

Yanıt yüzey yöntemi ile merkezi kompozit deney tasarımı yaklaşımı kullanılarak D_{eff} , k , ΔE , $^{\circ}Hue$, t_{top} ve ET yanıtları için elde edilen ikinci dereceden model denklemleri sırasıyla Eş. 11, 12, 13, 14, 15 ve 16 ile verilmiştir. Bu model denklemlerinde, bağımsız değişkenlerin doğrusal, etkileşimli ve ikinci derece terimlerinin önem düzeylerini gösteren değerlendirme Tablo 6'da görülmektedir.

$$D_{eff} = 4,54334 \cdot 10^{-9} - 6,73349 \cdot 10^{-11} \cdot P - 7,64537 \cdot 10^{-10} \cdot l + 5,71301 \cdot 10^{-12} \cdot P \cdot l + 2,49936 \cdot 10^{-13} \cdot P^2 + 3,07151 \cdot 10^{-11} \cdot l^2 \quad (11)$$

$$k = 0,10183 - 2,34855 \cdot 10^{-3} \cdot P + 1,06679 \cdot 10^{-3} \cdot l - 7,56646 \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot l + 1,40848 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 + 6,886 \cdot 10^{-4} \cdot l^2 \quad (12)$$

$$\Delta E = -17,91317 + 0,40635 \cdot P + 12,55656 \cdot l - 5,29167 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot l - 1,81580 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 1,75859 \cdot l^2 \quad (13)$$

$$^{\circ}Hue = 111,55215 - 0,31284 \cdot P - 10,04401 \cdot l + 9,8125 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot l + 1,17766 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 1,39552 \cdot l^2 \quad (14)$$

$$t_{top} = -363,54549 + 6,72536 \cdot P + 170,87556 \cdot l - 1,18333 \cdot P \cdot l - 0,02402 \cdot P^2 + 6,01042 \cdot l^2 \quad (15)$$

$$ET = -0,15649 + 2,88185 \cdot 10^{-3} \cdot P + 0,02057 \cdot l - 1,23465 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot l - 1,14231 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 + 1,06731 \cdot 10^{-3} \cdot l^2 \quad (16)$$

YYM kullanılarak CCRD deney tasarımına göre, etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}), kuruma hız sabiti (k), renk değişimi (ΔE), Hue renk açısı ($^{\circ}Hue$), toplam kuruma süresi (t_{top}) ve enerji tüketimi (ET) değişkenlerine ait yanıtların mikrodalga gücü (P) ve dilim kalınlığı (l) ile değişimlerini üç boyutlu olarak gösteren yanıt yüzey eğrileri Şekil 2'de görülmektedir.

Etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}) için Eş. 11'deki denklemi oluşturan mikrodalga gücü (P) ve dilim kalınlığı (l) değişkenlerinin doğrusal ve etkileşimli değişimleri önemli olurken ikinci derece değişim için sadece mikrodalga gücü önemli düzeydedir ($p < 0,05$). Dilim kalınlığının ikinci dereceden değişimi önemsizdir ($p > 0,1$). Şekil 2a'da görülen yanıt yüzey eğrisine göre tüm mikrodalga güçlerinde dilim kalınlığı ile etkin difüzyon katsayısının büyük ölçüde doğrusal olarak değiştiği, parabolik değişimin hemen hiç olmadığı söylenebilir. Buna karşın mikrodalga gücündeki artma ile etkin difüzyon katsayısı artan bir eğimle ikinci dereceden değişim göstermektedir. Düşük mikrodalga güçlerinde dilim kalınlığının etkisi yok denecek kadar az iken mikrodalga gücündeki artma ile dilim kalınlığının da doğrusal olarak etkili olduğu görülmektedir. Etkin difüzyon katsayısındaki değişimin benzeri kuruma hız sabitinde de görülmektedir. Şekil 2b'ye göre mikrodalga çıkış gücündeki artma ile kuruma hız sabitinin değeri de belirgin bir şekilde artmaktadır. Buna karşın dilim kalınlığı hemen hemen bütün mikrodalga çıkış güçlerinde çok az bir etkiye sahiptir. Bu durum kuruma hız sabiti için tanımlanan Eş. 12'deki

Tablo 5. Yanıt değişkenleri için ikinci derece modellere ait ANOVA sonuçları
(ANOVA results belong to quadratic models for response variables)

Yanıt	Kaynak	SS*	df*	MS*	F değeri	p-değeri** (prob>F)
Deff	Model	5,549·10 ⁻¹⁸	5	1,110·10 ⁻¹⁸	46,51	0,0003
	Uyum eksikliği	1,180·10 ⁻¹⁹	3	3,933·10 ⁻²⁰	59,70	0,0165
	Hata	1,318·10 ⁻²¹	2	6,588·10 ⁻²²		
	CV %	25,34				
	PRESS	8,420·10 ⁻¹⁹				
	R ²	0,9790				
	Adj, R ²	0,9579				
	Pred, R ²	0,8515				
k	Model	0,012	5	2,339·10 ⁻³	144,27	<0,0001
	Uyum eksikliği	8,059·10 ⁻⁵	3	2,686·10 ⁻⁵	111,55	0,0089
	Hata	4,817·10 ⁻⁷	2	2,408·10 ⁻⁷		
	CV %	18,97				
	PRESS	5,742·10 ⁻⁴				
	R ²	0,9931				
	Adj, R ²	0,9862				
	Pred, R ²	0,9512				
ΔE	Model	211,76	5	42,35	63,21	0,0002
	Uyum eksikliği	0,41	3	0,14	0,092	0,9579
	Hata	2,94	2	1,47		
	CV %	4,24				
	PRESS	9,51				
	R ²	0,9844				
	Adj, R ²	0,9689				
	Pred, R ²	0,9558				
°Hue	Model	141,45	5	28,29	210,99	<0,0001
	Uyum eksikliği	0,18	3	0,061	0,25	0,8573
	Hata	0,49	2	0,24		
	CV %	0,45				
	PRESS	2,4				
	R ²	0,9953				
	Adj, R ²	0,9906				
	Pred, R ²	0,9831				
t _{top}	Model	3,341·10 ⁵	5	66825,95	164,06	<0,0001
	Uyum eksikliği	1693,93	3	654,64	18,02	0,0530
	Hata	72,67	2	36,33		
	CV %	7,04				
	PRESS	14129,5				
	R ²	0,9939				
	Adj, R ²	0,9879				
	Pred, R ²	0,9580				
ET	Model	8,089·10 ⁻³	5	1,618·10 ⁻³	34,84	0,0005
	Uyum eksikliği	2,051·10 ⁻⁴	3	6,835·10 ⁻⁵	42,70	0,0230
	Hata	3,202·10 ⁻⁶	2	1,601·10 ⁻⁶		
	CV %	12,52				
	PRESS	1,465·10 ⁻³				
	R ²	0,9749				
	Adj, R ²	0,9498				
	Pred, R ²	0,8234				

*SS: Kareler toplamı, df: Serbestlik derecesi, MS: Ortalamannın karesi

**(p<0,05) önemli

terimlere ait katsayıların önem düzeyinden de anlaşılmaktadır (Tablo 6). Zira p<0,05 önem düzeyine sahip değişken sadece mikrodalga çıkış gücü olup doğrusal ve ikinci dereceden etkili olduğu görülmektedir. Dilim kalınlığının ise birinci dereceden teriminin önem düzeyi

p=0,0553 olup kabul edilebilir sınıra yakındır. Ancak ikinci derecenin değişim önemsiz düzeydedir. Mikrodalga çıkış gücü ve dilim kalınlığının etkileşimli değişimleri de önemsiz düzeyde görülmektedir. Hem etkin difüzyon katsayısı hem de kuruma hız sabitindeki benzer yüzey eğrileri ve model

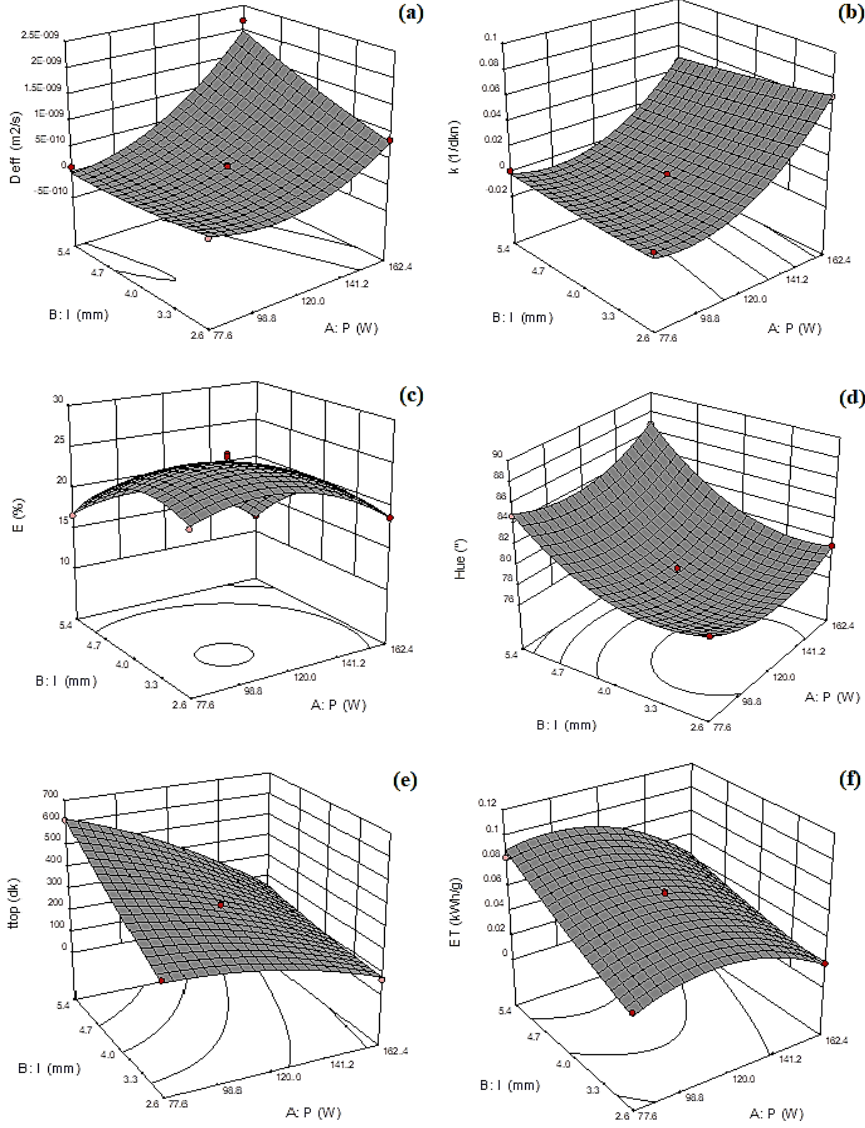
Tablo 6. Model denklemlerine ait terimlerin önem düzeyleri (Significance level of model variables)

Yanıt	Model terimleri ve parametreler	F Değeri	p –değeri* (prob>F)
D_{eff}	Model	46,51	0,0003
	P	145,01	<0,0001
	l	18,64	0,0076
	$P-l$	19,70	0,0068
	P^2	47,90	0,0010
	l^2	0,89	0,3880
	Uyum eksikliği	59,70	0,0165
	R^2	0,9790	
k	Model	144,27	<0,0001
	P	472,13	<0,0001
	l	6,19	0,0553
	$P-l$	5,08	0,0738
	P^2	223,84	<0,0001
	l^2	0,66	0,4533
	Uyum eksikliği	111,55	0,0089
	R^2	0,9931	
ΔE	Model	63,21	0,0002
	P	55,05	0,0007
	l	110,10	0,0001
	$P-l$	0,60	0,4730
	P^2	90,04	0,0002
	l^2	104,26	0,0002
	Uyum eksikliği	0,092	0,9579
	R^2	0,9844	
$\mathcal{H}ue$	Model	210,99	<0,0001
	P	8,79	0,0314
	l	629,96	<0,0001
	$P-l$	10,34	0,0236
	P^2	189,25	<0,0001
	l^2	328,08	<0,0001
	Uyum eksikliği	0,25	0,8573
	R^2	0,9953	
t_{top}	Model	164,06	<0,0001
	P	502,97	<0,0001
	l	232,65	<0,0001
	$P-l$	49,50	0,0009
	P^2	25,91	0,0038
	l^2	2	0,2161
	Uyum eksikliği	18,02	0,0530
	R^2	0,9939	
ET	Model	34,84	0,0005
	P	43,22	0,0012
	l	78,46	0,0003
	$P-l$	5,27	0,0702
	P^2	57,32	0,0006
	l^2	0,62	0,4675
	Uyum eksikliği	42,70	0,0230
	R^2	0,9749	

*p<0,05: önemli

denklemlerinin analizi, elma dilimlerinin kuruması sürecinde nem transferi ve kuruma hızının esas olarak itici güç olan mikrodalga gücü ile değiştiğini göstermektedir. Kuru elmanın kalite özelliklerinden olan renk değişimi Eş. 13 ile temsil edilmiştir. Yüksek belirleme katsayısı

($R^2=0,9844$) ve önemsiz düzeyde uyum eksikliği bu model denklemini kullanışlı kılmaktadır (Tablo 5). Bunun yanı sıra Eş. 13'deki değişkenlerden sadece mikrodalga çıkış gücü ve dilim kalınlığının karşılıklı etkileşimlerinin önemsiz olduğu diğer terimlerin ise renk değişimi üzerinde önemli düzeyde



Şekil 2. Mikrodalga çıkış gücü ve elma dilim kalınlığının yanıt değişkenleri üzerine etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafikleri a) Etkin difüzyon katsayısı b) Kuruma hız sabiti c) Renk değişimi d) Hue açısı e) Toplam kuruma süresi f) Enerji tüketimi

(Three-dimensional response surface graphs showing the effect of microwave power and apple slice thickness on response variables (a) Effective diffusion coefficient (b) Drying rate constant (c) Color changes (d) Hue angle (e) Total drying time (f) Energy consumption)

etili oldukları görülmektedir (Tablo 6). Şekil 2c'de görülen yanıt yüzey eğrisinin parabolik değişimi değişkenlerin ikinci dereceden etkilerinin varlığını göstermektedir. Hem mikrodalga gücü hem de dilim kalınlığının değerleri bir noktaya kadar artarak renk değişimini artırırken bu noktadan sonra renk değişimi üzerinde azalan bir etkiye sahip oldukları söylenebilir. Düşük mikrodalga güçlerinde, uygulanan enerji yoğunluğu düşük olduğundan dilim yüzey sıcaklığı ile dilimin iç kısımlarındaki sıcaklık hemen hemen aynıdır. Bu şartlar renk değişimine neden olan bozulmalar için uygun bir ortam oluşturamamakla beraber kuruma süresi uzamaktadır. Mikrodalga gücündeki artma ile daha hızlı ve daha yoğun bir ısı üretimi gerçekleşirken sıcaklık daha da artmaktadır. Ancak, zamanla dilim yüzeyindeki su

yoğunluğu azalacağından yüzey sıcaklığı iç kısım sıcaklığından daha düşük olacaktır. Bu da renk değişimi için yeterli süre ve sıcaklık şartlarını oluşturmaktadır. Daha yüksek mikrodalga güçlerinde dilimin içindeki su yüzeye daha hızlı taşınmaktadır ve renk değişimi daha az olacak şekilde daha kısa sürede kuruma tamamlanmaktadır. Zira maksimum renk değişiminin olduğu koşulların yüzeyde enzimatik olmayan Maillard reaksiyonlarının gerçekleşmesi için uygun koşullar olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu sonucu tek başına mikrodalga gücü ve dilim kalınlığının etkileri ile açıklamak eksik bir değerlendirme olacaktır. Çünkü kuruma ile birlikte dilim yüzeyinde ve gözeneklerinde meydana gelen fiziksel değişimler nem transferini etkilemektedir.

Kuru ürünün renginin renk uzayında konumunu belirleyen kriter olan Hue açısının değişimini veren yüzey eğrisi Şekil 2d'de görülmektedir. Yüzey eğrisinin izdüşümü olan kontur eğrileri ikinci dereceden değişimlerin etkili olduğunu göstermektedir. Tablo 6'da görülen her bir terime ait önem düzeylerinin kabul edilebilir ($p < 0,05$) olması ve model denkleminde ait belirleme katsayılarının 1'e oldukça yakın oluşu Eş.(14)'deki model önermesinin uygun olduğunun kanıtıdır. Ayrıca bu modelin uyum eksikliği önemsiz düzeydedir. Renk uzayında I. bölgede ($0 < \text{Hue} < 90$) düşük Hue açısı değerleri rengin kırmızılığa daha yakın olduğunu gösterirken yüksek Hue açıları sarılık oranının artması anlamına gelmektedir. Yüzey eğrisinin değişimine bakılacak olursa dilim kalınlığındaki artma ile azalan Hue açısı bir minimumdan geçtikten sonra tekrar artmaktadır. Benzer renk değişimi mikrodalga gücündeki değişimde de görülmektedir. Taze elmanın renk açısı $114,66^\circ$ olup sarı-yeşil renk konumuna denk gelmektedir. Dolayısıyla kuru ürünün Hue açısı değerlerinin büyük olacak şekilde kurumanın neticelenmesi arzulanan bir durumdur.

Kuruma sürecinde hedeflenen nihai nem oranına ulaşılması için geçen süreyi temsil etmek üzere önerilen Eş. 15'i oluşturan terimlerden dilim kalınlığının ikinci dereceden etkisi önemsiz düzeydedir. Buna rağmen mikrodalga gücü ve dilim kalınlığının karşılıklı etkileşimlerinin önemli düzeyde ve kuruma süresi üzerinde azaltıcı etkiye sahip olduğu görülmektedir. Şekil 2e'den de görüldüğü üzere mikrodalga gücündeki artma kuruma süresini kısaltmaktadır. Ancak dilim kalınlığındaki artma, düşük mikrodalga güçlerinde önemli ölçüde kuruma süresinin artmasına neden olurken yüksek mikrodalga güçlerinde ihmal edilebilecek ölçüde etkiye sahiptir.

Kurutma süreçlerinde enerji tüketimi önemli bir parametre olup kuru ürün maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir ve en az enerji tüketimi ile kuru ürün elde etmek arzulanan bir süreç yönetimidir. Mikrodalga ile elma kurutmada, mikrodalga gücü ve dilim kalınlığı ile enerji tüketiminin değişimi üç boyutlu olarak Şekil 2f'de görülmektedir. Mikrodalga gücündeki artma ile enerji tüketimi belli bir noktaya kadar sürekli artarken bu noktadan sonra azalmaktadır. Dilim kalınlığındaki artma ile enerji tüketiminin arttığı görülmektedir. Tablo 6'da görülen analiz

verilerine göre, dilim kalınlığının sadece doğrusal değişimi önemli bir etkiye sahip olurken mikrodalga gücünün hem doğrusal hem de ikinci dereceden değişimi enerji tüketimi üzerinde etkilidir. Dilim kalınlığındaki artma ile enerji tüketiminin atması elma dilimlerindeki suyun yüzeye taşınmasında difüzyon yolundaki artma ile ifade edilebilir. Ancak mikrodalga gücündeki artma ile enerji tüketiminin değişimini sadece üretilen enerji miktarındaki artma ile açıklamak eksik bir değerlendirme olacaktır. Hem toplam kuruma süresindeki değişimi hem de enerji üretmek üzere Tablo 3'de verilen magnetronun açık ve kapalı kalma sürelerini de dikkate almak gerekir. Düşük mikrodalga güçlerinde magnetron kısa bir süre enerji üretmek üzere açık konumda çalışırken uzun bir süre kapalı konumda beklemektedir. Bu da kuruma süresinin uzun olmasına rağmen mikrodalga gücünün düşük olmasından dolayı daha düşük enerji tüketimi anlamına gelmektedir. Yüksek mikrodalga güçlerinde ise magnetron daha uzun süre açık konumda çalışarak suyun buharlaşması için daha yoğun enerji üretmektedir. Bu sayede kuruma süresi kısaltmakta ve toplamda daha az enerji tüketimi ile kuruma süreci tamamlanmaktadır. Enerji tüketiminin en yüksek olduğu mikrodalga gücünde ise magnetronun güç üretmek üzere açık kalma ve sonrasında kapalı kalma sürelerinin birbirine yaklaştığı ve toplam kuruma süresinin aldığı değer ile suyun buharlaşması için enerji tüketiminin bir maksimum noktaya ulaştığı söylenebilir. Daha sağlıklı bir değerlendirme için magnetronun çalışma periyodunun 15 s'den farklı olduğu süreler için de kurutma deneylerinin yapılması uygun olacaktır. Bu denemeler farklı bir çalışmanın konusu olarak değerlendirilmelidir. Buna rağmen literatürde mikrodalga gücündeki artma ile enerji tüketiminin azaldığını gösteren çalışmalar mevcuttur [37, 38].

3.3. Optimum Kuruma Şartlarının Belirlenmesi (Determination of Optimum Drying Conditions)

Bu çalışmada yanıt değişkenlerinin arzu edilen değerlerini sağlayan mikrodalga gücü ve dilim kalınlığının belirlenmesi için Design-Expert paket programı kullanılarak optimizasyon değerlendirmesi yapıldı. Yanıt değişkenlerinin arzu edilen değerleri Tablo 7'de görülmektedir. Mikrodalga gücü ve dilim kalınlığı değerleri çalışılan aralıkta olmak üzere renk değişimi, kuruma süresi ve enerji tüketimi

Tablo 7. Optimizasyon değerlendirmesi ölçütleri ve sonuçları (Optimization study and results)

Bağımsız değişkenler ve yanıt değişkenleri	Arzulanan Nokta	Değişkenlerin değer aralığı		Optimum nokta değerleri *
		Alt limit	Üst Limit	
$P (W)$	aralıkta	77,6	162,4	162,4
$l (mm)$	aralıkta	2,6	5,4	5,4
$D_{eff} \times 10^{10} (m^2 \cdot s^{-1})$	aralıkta	0,68	21,88	19,84
$k (dk^{-n})$	aralıkta	0,00067	0,09977	0,05133
$\Delta E (\%)$	en düşük	12,0	25,1	12,0
$Hue (^\circ)$	en yüksek	77,4	88,3	87,0
$t_{top} (dk)$	en düşük	20	612	156
$ET (kWh/g)$	en düşük	0,00630	0,10642	0,04435

*Arzu edilebilirlik = 0,805

değerlerinin en düşük ve renk açısının en yüksek olduğu koşullar belirlenmeye çalışıldı. Etkin difüzyon katsayısı ve kuruma hız sabiti değerlerinin kuruma sürecinin doğası gereğince ölçülen veri aralığında alacağı değer belirlendi. Bütün değişkenlerin önem düzeyleri üçüncü derece olarak dikkate alındı. Optimum nokta değerlendirmesi için paket program tarafından farklı arzu edilebilirlik (desirability) seviyelerindeki 8 önermeden en yüksek arzu edilebilirlik seviyesi olan 0,805 düzeyine karşılık gelen koşullar Tablo 7'de görülmektedir. Önerilen optimum nokta koşullarında tekrarlanan doğrulama deneylerinden elde edilen değerler ve önerme sonuçlarına kıyasla mutlak hata değerleri Tablo 8'de sunulmuştur. Doğrulama deneyleri sonuçlarına göre bütün yanıt değişkenleri için elde edilen deney sonuçları ile önerme değerleri arasındaki mutlak hata değerleri %10'un altında olup kabul edilebilir düzeydedir.

Tablo 8. Optimum noktada doğrulama deney sonuçları (Results of verification experiments at optimum points)

Bağımsız değişkenler ve yanıt değişkenleri	Optimum nokta değerleri	Doğrulama deneyi sonuçları	Mutlak Hata (%)
P (W)	162,4	162,4	-
l (mm)	5,4	5,4	-
$D_{eff} \times 10^{10} (m^2 \cdot s^{-1})$	19,84	20,8	4,84
k (dk ⁻ⁿ)	0,05133	0,04812	6,25
ΔE (%)	12,0	13	8,33
Hue (°)	87,0	83,9	3,56
t_{top} (dk)	156	142	8,97
ET (kWh/g)	0,04435	0,04012	9,54

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Mikrodalga ile elma kurutmada YYM kullanılarak CCRD yaklaşımı ile mikrodalga çıkış gücü ve elma dilim kalınlığı değişkenlerine bağlı olarak yanıt değişkenlerinin değerleri belirlendi. Yanıt değişkenlerini temsil etmek üzere Design-Expert paket programı tarafından önerilen model denklemlerinin deneysel verileri temsil etmede oldukça başarılı olduğu görüldü. ANOVA sonuçları ve yanıt yüzey eğrilerinden etkin difüzyon katsayısı, kuruma hız sabiti, toplam renk değişimi, Hue renk açısı, toplam kuruma süresi ve enerji tüketimi yanıtları üzerinde mikrodalga çıkış gücü ve dilim kalınlığının önemli düzeyde etkili oldukları tespit edildi. Optimizasyon değerlendirmesi ile yanıt değişkenleri için uygun sonuçları verecek optimum deney koşulları belirlendi bu koşullarda doğrulama deneyleri gerçekleştirildi. Optimum deney koşullarında yapılan doğrulama deneylerinin en fazla %9,54 mutlak hata ile tekrarlanabildiği görüldü.

Granny Smith çeşidi elmanın kurutulmasında YYM yaklaşımı ve CCRD deney tasarımının başarılı bir şekilde uygulanabileceği sonucuna varıldı. Ayrıca elde edilen sonuçların hem literatüre hem de uygulayıcılara katkı sunacağı bu sayede daha sonra yapılacak araştırmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Liu R. H., Liu J., Chen B., Apples Prevent Mammary Tumors in Rats, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (6), 2341-2343, 2005.
2. Nöthlings U., Murphy S. P., Wilkens L. R., Henderson B. E., Kolonel L. N., Flavonols and Pancreatic Cancer Risk: The Multiethnic Cohort Study, *American Journal of Epidemiology*, 166 (8), 924-931, 2007.
3. He X., Liu R. H., Triterpenoids Isolated from Apple Peels Have Potent Antiproliferative Activity and May Be Partially Responsible for Apple's Anticancer Activity, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (11), 4366-4370, 2007.
4. Jedrychowski W., Maugeri U., Popiela T., Kulig J., Sochacka-Tatara E., Pac A., Sowa A., Musial A., Case-control study on beneficial effect of regular consumption of apples on colorectal cancer risk in a population with relatively low intake of fruits and vegetables, *European Journal of Cancer Prevention*, 19 (1), 42-47, 2010.
5. Remington R., Chan A., Lepore A., Kotlya E., Shea T. B., Apple Juice Improved Behavioral But Not Cognitive Symptoms in Moderate-to-Late Stage Alzheimer's Disease in an Open-Label Pilot Study, *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias*, 25 (4), 367-371, 2010.
6. Heo H. J., Kim D. O., Choi S. J., Shin D. H., Lee C. Y., Apple Phenolics Protect in Vitro Oxidative Stress-induced Neuronal Cell Death, *Journal of Food Science*, 69 (9), S357-S360, 2004.
7. Woodcock A., Moulds and asthma: time for indoor climate change?, *Thorax*, 62 (9), 745-746, 2007.
8. Woods R. K., Walters E. H., Raven J. M., Wolfe R., Ireland P. D., Thien F. C. K., Abramson M. J., Food and nutrient intakes and asthma risk in young adults, *The American Journal of Clinical Nutrition*, 78 (3), 414-421, 2003.
9. Butler L. M., Koh W. P., Lee H. P., Yu M. C., London S. J., Dietary fiber and reduced cough with phlegm: a cohort study in Singapore, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 170 (3), 279-287, 2004.
10. Hyson D., Studebaker-Hallman D., Davis P. A., Gershwin M. E., Apple juice consumption reduces plasma low-density lipoprotein oxidation in healthy men and women, *Journal of Medicinal Food*, 3 (4), 159-166, 2000.
11. Lairon D., Arnault N., Bertrais S., Planells R., Clero E., Hercberg S., Boutron-Ruault M. C., Dietary fiber intake and risk factors for cardiovascular disease in French adults, *The American Journal of Clinical Nutrition*, 82 (6), 1185-1194, 2005.
12. Joesting J. J., Lavin D. N., Blevins N. A., McNeil L. K., Tisza B. L., Freund G. G., A soluble fiber diet induces immunomodulation in the liver, *Brain, Behavior, and Immunity*, 24 (1), S44, 2010.
13. Lewicki P. P., Design of hot air drying for better foods, *Trends in Food Science & Technology*, 17 (4), 153-163, 2006.

14. Walde S. G., Balaswamy K., Velu V., Rao D. G., Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*), *Journal of Food Engineering*, 55 (3), 271-276, 2002.
15. Sumnu G., Turabi E., Oztop M., Drying of carrots in microwave and halogen lamp–microwave combination ovens, *LWT-Food Science and Technology*, 38 (5), 549-553, 2005.
16. Wang J., Sheng K., Far-infrared and microwave drying of peach, *LWT-Food Science and Technology*, 39 (3), 247-255, 2006.
17. Ozkan I. A., Akbudak B., Akbudak N., Microwave drying characteristics of spinach, *Journal of Food Engineering*, 78 (2), 577-583, 2007.
18. Dadalı G., Apar D. K., Özbek B., Estimation of effective moisture diffusivity of okra for microwave drying, *Drying Technology*, 25 (9), 1445-1450, 2007.
19. Wang Z., Sun J., Chen F., Liao X., Hu X., Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying, *Journal of Food Engineering*, 80 (2), 536-544, 2007.
20. Arslan D., Özcan M. M., Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices, *LWT-Food Science and Technology*, 43 (7), 1121-1127, 2010.
21. Dong J., Ma X., Fu Z., Guo Y., Effects of microwave drying on the contents of functional constituents of *Eucommia ulmoides* flower tea, *Industrial Crops and Products*, 34 (1), 1102-1110, 2011.
22. Yoğurtçu H., Determination of Drying Kinetics of Tunceli Garlic with Microwave Drying Technique, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 22 (2), 237-248, 2016.
23. Yoğurtçu H., Experimental Study and Mathematical Modeling on Thin Layer Microwave Drying of Zucchini (*C. pepo*) Slices, *CBU Journal of Science*, 12 (3), 347-353, 2016.
24. Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M., *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons, USA, 2016.
25. Erbay Z., Icier F., Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology, *Journal of Food Engineering*, 91 (4), 533-541, 2009.
26. Diamante L. M., Yamaguchi Y., Response surface methodology for optimisation of hot air drying of blackcurrant concentrate infused apple cubes, *International Food Research Journal*, 19 (1), 353-362, 2012.
27. Chin S. K., Law C. L., Optimization of convective hot air drying of *Ganoderma lucidum* slices using response surface methodology, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2 (5), 1-11, 2012.
28. Hashemi S. M., Ziiaifar A. M., Kashaninejad S. M., Ghorbani M., Optimization of pre-fry microwave drying of French fries using response surface methodology and genetic algorithms, *Journal of food processing and preservation*, 38 (1), 535-550, 2014.
29. Aghilinategh N., Rafiee S., Hosseinpour S., Omid M., Mohtasebi S. S., Optimization of intermittent microwave–convective drying using response surface methodology, *Food Science & Nutrition*, 3 (4), 331-341, 2015.
30. Omolola A. O., Jideani A. I. O., Kapila P. F., Jideani V. A., Optimization of microwave drying conditions of two banana varieties using response surface methodology, *Food Science and Technology (Campinas)*, 35 (3), 438-444, 2015.
31. Baltacıoğlu C., Uslu N., Özcan M. M., Optimization of Microwave and Air Drying Conditions of Quince (*Cydonia Oblonga*, Miller) Using Response Surface Methodology, *Italian Journal of Food Science*, 27 (1), 1-7, 2015.
32. Ren G., Chen F., Drying of American ginseng (*Panax quinquefolium* roots by microwave-hot air combination, *Journal of Food Engineering*, 35 (4), 433-443, 1998.
33. Yaldiz O., Ertekin C., Thin layer solar drying of some vegetables, *Drying Technology*, 19 (3-4), 583-597, 2001.
34. Crank J., *The mathematics of diffusion*, 2 nd ed, Clarendon Press, Oxford, 1975.
35. Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M., *Response Surface Methodology*, 3 ed, John Wiley & Sons, USA, 2009.
36. Rai A., Mohanty B., Bhargava R., Supercritical extraction of sunflower oil: a central composite design for extraction variables, *Food chemistry*, 192, 647-659, 2016.
37. Tulasidas T. N., Raghavan G. S. V., Norris E. R., Microwave and convective drying of grapes, *Transactions of the ASAE*, 36 (6), 1861-1865, 1993.
38. Sharma G. P., Prasad S., Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves, *Energy*, 31 (12), 1921-1926, 2006.