

T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**MİKRODALGA KURUTMA SİSTEMİNDE PORTAKAL KURUTULMASI VE  
KURUTMA DAVRANIŞININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

**Mehmet ALTEKİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KİMYASAL TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
Doç. Dr. Hakan YOĞURTÇU**

**TUNCELİ 2024**

T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MİKRODALGA KURUTMA SİSTEMİNDE PORTAKAL KURUTULMASI VE  
KURUTMA DAVRANIŞININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Mehmet ALTEKİN  
(200160008)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KİMYASAL TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

DANIŞMAN  
Doç. Dr. Hakan YOĞURTÇU

TUNCELİ 2024

T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MİKRODALGA KURUTMA SİSTEMİNDE PORTAKAL KURUTULMASI VE  
KURUTMA DAVRANIŞININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Mehmet ALTEKİN  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KİMYASAL TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

Bu tez 03/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

İmza  
Prof. Dr. Mehmet  
KALENDER  
(Fırat Üniversitesi)  
BAŞKAN

İmza  
Doç. Dr. Hakan  
YOĞURTCU  
(Munzur Üniversitesi)  
DANIŞMAN

İmza  
Prof. Dr. Ragıp  
ADIGÜZEL  
(Munzur Üniversitesi)  
ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Kimyasal Teknolojiler Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Enstitü Müdürü  
Prof. Dr. Altuğ KAZAR

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"ndaki hükümlere tabidir.

03/06/2024

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Danışman

Mehmet ALTEKİN

Doç. Dr. Hakan YOĞURTÇU

## TEŞEKKÜR

Çalışmamın ilk anından itibaren tez konusunun belirlenmesi, tezin planlanması ile uygulamalar boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana her daim yardımcı olan, yol gösteren, çalıőmalarım sırasında bana her türlü desteği sağlayan, her zaman yardım eden saygıdeğer akıl hocam sayın Doç. Dr. Hakan YOğURTÇU' ya teőekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans sürecimde bana tüm olanakları sağlayan ve değerli fikirlerini benimle paylaőan Munzur Üniversitesi Kimyasal Teknolojiler Anabilim Dalındaki saygıdeğer hocalarıma teőekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalıőmalarım esnasında bana her daim yardımcı olan sevgili iç arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teőekkürlerimi sunuyorum.

**Mehmet ALTEKİN**

**TUNCELİ-2024**

## İÇİNDEKİLER

<b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....</b>	<b>I</b>
<b>TEŞEKKÜR.....</b>	<b>II</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>III</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ.....</b>	<b>V</b>
<b>TABLolar LİSTESİ.....</b>	<b>VI</b>
<b>RESİMLER LİSTESİ.....</b>	<b>VII</b>
<b>SEMBOLLER LİSTESİ.....</b>	<b>VIII</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ.....</b>	<b>X</b>
<b>ÖZET.....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XII</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURUTMA İŞLEMİNİN ESASLARI.....</b>	<b>3</b>
2.1. Tanımlar.....	3
2.2. Sorpsiyon İzotermi.....	9
2.3. Kurumanın Mekanizması.....	10
2.4. İnce Tabaka Kuruma Teorisi.....	14
2.5. Kurumada Matematiksel Modeller.....	16
2.5.1. Dağıtılmış eleman modeli.....	16
2.5.2. Toplu eleman modeli.....	17
2.5.3. Teorik model yaklaşımı.....	18
2.5.4. Yarı teorik model denklemleri.....	19
2.5.5. Deneysel model denklemleri.....	21
2.6. Kurutma Teknikleri ve Kurutucu Tipleri.....	22
2.6.1. Güneş enerjili kurutma.....	23
2.6.2. Yapay kurutma sistemleri.....	23
2.6.2.1. İletimle ısıtmalı kurutma sistemi.....	24
2.6.2.2. Taşınım ile ısıtmalı kurutma sistemleri.....	24
2.6.2.3. Işınım ile ısıtmalı kurutma sistemleri.....	25
2.6.2.4. Dondurarak kurutma.....	25
2.6.2.5. Ultrason kurutma.....	25
2.6.2.6. Ozmotik kurutma.....	26
2.6.2.7. Elektrohrodinamik kurutma.....	26
2.6.2.8. Akışkan yatak kurutma.....	27
2.6.2.9. Kırınım pencere li kurutma.....	27
2.7. Mikrodalga Teknolojisi ve Kurutma Tekniği.....	29
<b>3. CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ.....</b>	<b>32</b>
<b>4. PORTAKAL MEYVESİ.....</b>	<b>36</b>
<b>5. LİTERATÜR BİLGİSİ.....</b>	<b>37</b>
<b>6. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>41</b>
6.1. Materyal.....	41
6.2. Deney Düzenegi ve Kurutma Yöntemi.....	41
6.3. Veri Değerlendirme ve Deneysel Tasarım.....	42
6.3.1. Veri değerlendirme.....	42

6.3.2. Deneysel tasarım.....	44
<b>7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>47</b>
7.1. Kuruma Kinetiği.....	47
7.2. Matematiksel Model Uygulaması.....	54
7.2.1. Etkin difüzyon katsayının değişimi.....	54
7.2.2. Page model denkleminin uygulanması.....	56
7.3. Cevap Değişkenlerinin Değişimi.....	59
7.4. Cevap Yüzey Yöntemi Uygulanması.....	62
7.4.1. Toplam kuruma süresi analizi.....	64
7.4.2. Nihai nem içeriği analizi.....	67
7.4.3. Kuruma sabiti analizi.....	70
7.4.4. Tüketilen enerji miktarı analizi.....	73
7.4.5. Optimizasyon çalışması.....	75
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>78</b>
<b>9. KAYNAKLAR.....</b>	<b>80</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Gıdalarda bozulmaya neden olan reaksiyonların ve mikroorganizma faaliyetleri üzerine su aktivitesinin etkisi.....	8
Şekil 2.2. Gıda maddeleri için genel sorpsiyon izotermi.....	9
Şekil 2.3. Bir kuruma olayında zamanla sıcaklık, nem içeriği ve kuruma hızı parametrelerinin değişimi.....	12
Şekil 2.4. Tipik bir kuruma hızı eğrisi.....	13
Şekil 2.5. İnce tabaka kuruma yaklaşımının şematik görünümü.....	15
Şekil 2.6. Kurutma teknolojileri tarihsel sınıflandırması.....	28
Şekil 2.7. Elektromanyetik spektrum.....	29
Şekil 2.8. Magnetronun kesiti.....	31
Şekil 6.1. Mikrodalga kurutma deney düzeneği.....	41
Şekil 7.1. 100 W mikrodalga çıkış gücünde kurutulan portakal dilimlerinin nem içeriğinin zamanla değişimi.....	47
Şekil 7.2. 160 W mikrodalga çıkış gücünde kurutulan portakal dilimlerinin nem içeriğinin zamanla değişimi.....	48
Şekil 7.3. 160 W mikrodalga çıkış gücünde 15 ve 25 s çevrim süreleri için portakal örneklerinin kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimleri.....	49
Şekil 7.4. 220 W mikrodalga çıkış gücünde kurutulan portakal dilimlerinin nem içeriğinin zamanla değişimi.....	50
Şekil 7.5. 220 W mikrodalga çıkış gücünde portakal dilimlerinin kuruma hızlarının nem içeriğine göre değişimi.....	51
Şekil 7.6. 20 s çevrim süresi için farklı çalışma şartlarında portakal dilimlerinin kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimi.....	52
Şekil 7.7. 25 g başlangıç örnek kütlesi için farklı çalışma şartlarında portakal dilimlerinin kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimi.....	52
Şekil 7.8. 220 W mikrodalga çıkış gücü için boyutsuz nem oranının deneysel ve Page modeline göre değişim eğrileri.....	57
Şekil 7.9. İkinci dereceden ve doğrusal model denklemleri için deneysel ve tahmini değerler arasındaki artıkların dağılımı.....	65
Şekil 7.10. Toplam kuruma süresi için doğrusal modele ait yüzey eğrisi, SM=25 g.....	66
Şekil 7.11. Toplam kuruma süresi için doğrusal modele ait yüzey eğrisi, Ct=20 s.....	66
Şekil 7.12. Nihai nem içeriğinin değişimine ait yüzey eğrisi, SM=25 g.....	68
Şekil 7.13. Nihai nem içeriğinin değişimine ait eşyükselti eğrisi, SM=25 g.....	69
Şekil 7.14. Nihai nem içeriğinin değişimine ait yüzey eğrisi, P=160 W.....	69
Şekil 7.15. Kuruma sabiti için modeli yüzey eğrisi, SM=25 g.....	72
Şekil 7.16. Kuruma sabiti için modeli yüzey eğrisi, Ct=20 s.....	72
Şekil 7.17. Tüketilen enerji miktarı için doğrusal model yüzey eğrisi, SM=25 g.....	74
Şekil 7.18. Tüketilen enerji miktarı için doğrusal model yüzey eğrisi, Ct=20 s.....	74

## TABLolar LİSTESİ

<b>Tablo 2.1.</b> Ürün geometrisine göre geometrik sabitler.....	18
<b>Tablo 2.2.</b> Newton' un soğuma kanununa benzetilerek türetilen model denklemleri.....	19
<b>Tablo 2.3.</b> Fick'in II. Difüzyon kanunundan türetilen model denklemleri.....	20
<b>Tablo 2.4.</b> Deneysel model denklemleri.....	21
<b>Tablo 6.1.</b> Bağımsız değişkenleri Box-Behnken yaklaşımına göre tasarım noktalarının değerleri.....	45
<b>Tablo 6.2.</b> Box-Behnken dizayn yaklaşımına göre deneme deseni.....	46
<b>Tablo 7.1.</b> 220 W mikrodalga çıkış gücünde portakal dilimlerinin maruz kaldığı güç yoğunluğu değerleri.....	51
<b>Tablo 7.1.</b> Gerçekleştirilen deneylere ait $D_{eff}$ değerlerinin değişimi.....	54
<b>Tablo 7.2.</b> Deneysel verilere uygulanan Page modeline ait veriler.....	57
<b>Tablo 7.3.</b> Nihai nem içeriğinin değişimi.....	59
<b>Tablo 7.4.</b> Toplam kuruma süresinin değişimi.....	61
<b>Tablo 7.5.</b> Tüketilen enerji miktarının değişimi.....	62
<b>Tablo 7.6.</b> Box-Behnken tasarımına göre bağımsız ve bağımlı (cevap) değişken değerleri.....	63
<b>Tablo 7.7.</b> Deneysel tasarım özeti.....	63
<b>Tablo 7.8.</b> Toplam kuruma süresi analiz özeti.....	64
<b>Tablo 7.9.</b> Toplam kuruma süresi analizi için doğrusal modele ait ANOVA sonuçları....	65
<b>Tablo 7.10.</b> Nihai nem içeriği analiz özeti.....	67
<b>Tablo 7.11.</b> Olası model denklemlerine ait istatistiksel değerlendirme özeti.....	68
<b>Tablo 7.12.</b> Kuruma sabiti analiz özeti.....	71
<b>Tablo 7.13.</b> Kuruma sabiti için ikinci dereceden modele ait ANOVA sonuçları.....	71
<b>Tablo 7.14.</b> Tüketilen enerji miktarı analiz özeti.....	73
<b>Tablo 7.15.</b> Optimizasyon kısıtlamaları.....	75
<b>Tablo 7.16.</b> Optimizasyon çalışması önermeleri ve tahmini cevap değişkeni değerleri...76	76
<b>Tablo 7.17.</b> Optimizasyon önermesi ve doğrulama deneyi verileri.....	76

## RESİMLER LİSTESİ

**Resim 7.1.** Doğrulama deneyinden elde edilen kurutulmuş portakal örneği.....77



## SEMBOLLER LİSTESİ

$\varepsilon$	: Hata terimi
$\beta_0$	: Denklem sabiti
$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$	: Kısmi regresyon katsayıları
$A_1$ ve $A_2$	: Geometrik sabitleri
$C_t$ (s)	: Çevrim süresi
$D_{eff}$ ( $m^2/s$ )	: Etkin difüzyon katsayısı
$dt$ (s)	: Ardışık iki ölçüm arasında geçen süre
$J_0$	: Bessel fonksiyonu kökleri
$k$ ( $dk^{-n}$ )	: Kuruma sabiti
$L$ (m)	: Dilim yarı kalınlığı
$M$ (kg nem/kg kuru madde)	: Nem içeriği
$M_0$ (kg nem/kg kuru madde)	: Başlangıçtaki nem içeriği
$M_e$ (kg nem/kg kuru madde)	: Denge nem içeriği
$M_i$ (kg nem/kg kuru madde)	: Başlangıç nem içeriği
$m_{kh}$ (kg)	: Kuru hava kütlesi
$m_{km}$ (kg)	: Kuru madde kütlesini (kg)
$MR$	: Boyutsuz nem oranını
$m_{sb}$ (kg)	: Su baharı kütlesi
$M_t$ (kg nem/kg kuru madde)	: Herhangi bir t anındaki nem içeriği
$m_t$ (kg)	: Herhangi bir andaki örnek kütlesini
$M_{t+dt}$ (kg nem/kg kuru madde)	: $t+dt$ anlarına ait nem içeriği
$n$	: Model sabiti
$N$	: Veri çifti sayısı
$P$ (W)	: Mikrodalga çıkış gücü
$P_{dbs}$ (kPa)	: Su buharına doymuş havadaki su buharı kısmi basıncı
$P_{hava}$ (kPa)	: Nemli havanın basıncı
$P_{kh}$ (kPa)	: Kuru havanın kısmi basıncı
$p_o$ (kPa)	: Saf suyun buhar basıncı
$P_{sb}$ (kPa)	: Havada bulunan su buharının kısmi basıncı
$p_{sb}$ (kPa)	: Gıdadaki suyun buhar basıncı
$R^2$	: Belirleme katsayısı
$R_c$	: Sabit kuruma hızı
$S_a$	: Su aktivitesini
$S_i$	: Aralık adım büyüklüğü

*(Semboller devamı)*

<b>SM (g)</b>	: Başlangıç örnek kütlesi
<b>t (s)</b>	: Zamanı (s)
<b>T<sub>k</sub> (K)</b>	: Kuru termometre sıcaklığı
<b>T<sub>o</sub> (K)</b>	: Maddenin başlangıç sıcaklığı
<b>T<sub>y</sub> (K)</b>	: Yaş termometre sıcaklığı
<b>X (kg su/kg kuru hava)</b>	: Mutlak nem
<b>X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>k</sub></b>	: Kodlanmış bağımsız değişkenler
<b>X<sub>b</sub> (%)</b>	: Bağıl nem
<b>X<sub>d</sub> (kg su/kg kuru madde)</b>	: Denge nemi
<b>x<sub>i</sub></b>	: Çalışma aralığında değişkenin gerçek değeri
<b>x<sub>i0</sub></b>	: Çalışma aralığı merkez değeri
<b>X<sub>mak</sub> (kg su/kg kuru hava)</b>	: Maksimum nem
<b>X<sub>o</sub></b>	: Maddenin başlangıç nemi
<b>Y</b>	: Cevap değişkeni
<b>y</b>	: İlgili değişkeni
<b>y<sub>dsb</sub></b>	: Su buharına doymuş havadaki su buharı mol kesri
<b>y<sub>kh</sub></b>	: Kuru havanın mol kesri
<b>y<sub>sb</sub></b>	: Su buharı mol kesri
<b>α (m<sup>2</sup>/s)</b>	: Termal yayınlılık katsayısı

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>DBN</b>	: Denge bağıl nemi
<b>Eş.</b>	: Eşitlik
<b>RSM</b>	: Response surface methodology
<b>CYY</b>	: Cevap yüzey yöntemi
<b>NMC</b>	: Nihai nem içeriği
<b>TKS</b>	: Toplam kuruma süresi
<b>ET</b>	: Tüketilen enerji miktarı
<b>MR</b>	: Boyutsuz nem oranı
<b>KOKH</b>	: Kök ortalama kare hatası
<b>OBH</b>	: Ortalama bağıl hata
<b>GHz</b>	: Gigahertz
<b>MHz</b>	: Megahertz
<b>den ve tah</b>	: Sırasıyla deneysel ve tahmini (hesaplanan) değerleri

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, modifiye edilmiş bir mikrodalga fırın kullanılarak Washington Navel türü portakal dilimlerinin kurutulması ve elde edilen kurutma verilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. 5 mm sabit kalınlıklı portakal dilimlerinin kuruma davranışı üzerine mikrodalga çıkış gücü, çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesi gibi parametrelerin etkileri incelendi. Deneysel çalışma deseninin oluşturulması ve verilerin değerlendirilmesinde cevap yüzey yöntemi kullanılarak Box-Behnken deneysel tasarım yaklaşımından yararlanıldı. Oluşturulan bu deneme desenine göre kurutma deneyleri gerçekleştirildi. Elde edilen kurutma verileri Page ince tabaka kurutma model denklemi ile temsil edildi. Cevap değişkenlerinin bağımsız değişkenlere göre değişimi ve optimizasyon değerlendirmesi Design-Expert paket programı ile gerçekleştirildi.

Mikrodalga çıkış gücündeki artma ile kuruma süresinin kısaldığı görüldü. Kısa çevrim sürelerinde etkili bir ısı üretimi olmazken uzun çevrim sürelerinde aşırı ısınmaların olduğu tespit edildi. Bir başka parametre olan başlangıç örnek kütlelerinin de kurutmada önemli bir etkiye sahip olduğu görüldü.

Farklı kurutma koşullarında etkin difüzyon katsayısındaki değişim belirlendi ve kurutma verilerini temsil etmede Page model denkleminin başarılı olduğu görüldü

Cevap yüzey yöntemi ile mikrodalga çıkış gücü, çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesi değişkenlerinin değişimine bağlı olarak nihai nem içeriği, toplam kuruma süresi, kuruma sabiti ve tüketilen enerji miktarı cevaplarının değişimi değerlendirildi. Toplam kuruma süresinin ve tüketilen enerji miktarının doğrusal model eşitlikleri, nihai nem içeriği ve kuruma sabitinin ise ikinci dereceden model eşitlikleri ile temsil edilebildiği tespit edildi.

**Anahtar kelimeler:** Portakal kurutma, mikrodalga kurutma, cevap yüzey yöntemi

## ABSTRACT

### **Drying of Orange in Microwave Drying System and Mathematical Modeling of Drying Behavior**

In this thesis, it was aimed to dry the Washington Navel type orange slices using a modified microwave oven and to evaluate the drying data obtained. The effects of parameters such as microwave output power, cycle time and initial sample mass on the drying behavior of 5 mm constant thickness orange slices were investigated. Box-Behnken experimental design approach was utilized by using the response surface method in the creation of the experimental design and evaluation of the data. Drying experiments were carried out according to this experimental design. The drying data obtained were represented by the Page thin layer drying model equation. The variation of the response variables according to the independent variables and optimization evaluation were carried out with the Design-Expert package program.

It was observed that the drying time was shortened with the increase in microwave output power. While there was no effective heat generation at short cycle times, it was found that overheating occurred at long cycle times. Another parameter, initial sample mass, was also found to have a significant effect on drying.

The change in the effective diffusion coefficient under different drying conditions was determined and the Page model equation was found to be successful in representing the drying data.

With the response surface method, the change of response variables such as final moisture content, total drying time, drying constant and amount of energy consumed depending on the change of microwave output power, cycle time and initial sample mass variables were evaluated. It was determined that the total drying time and the amount of energy consumed can be represented by linear model equations, while the final moisture content and drying constant can be represented by quadratic model equations.

**Key words:** Orange drying, microwave drying, response surface methodology

## 1. GİRİŞ

Tarımsal gıda maddelerinin yetiştirilmesi kadar tüketiminin de sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi önemlidir. Sebze ve meyveler gibi yılın belli dönemlerinde yetişen tarımsal ürünlerin tamamının taze bir şekilde tüketimi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle taze tüketilebilen kısmın tüketilebilir nitelikte muhafaza edilmesi önem arz etmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde üretilen sezonluk yaş sebze ve meyve miktarının % 60-70' lik kısmı kullanılabilirken % 30-40' lık kısmının bozularak atıldığı bildirilmiştir (Karim ve Hawlader, 2005). Bu kayıpları azaltabilmek ve tarımsal gıda maddelerinin sonradan da tüketilebilmesini sağlamak için çeşitli gıda işleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında konserve şeklinde muhafaza etme, dondurarak saklama, bazı kimyasal maddeler kullanarak dayanımını artırma ve kurutma sayılabilir. Bu yöntemler arasında kurutma, ürünün bozulmasını engellemek, ürün bünyesindeki nemin sebep olacağı mikrobiyal ve kimyasal reaksiyonları azaltacak düzeyde nem miktarını düşürmek gibi yönlerden etkili bir yöntemdir (Evranuz, 1983).

En genel ifade ile kuruma nemli bir materyalin nem içeriğinin uygun şartlarda azalması şeklinde tanımlanabilir. Bu tanımlamaya göre “uygun şartlar” ifadesi kuruma olayı için en önemli faktördür diyebiliriz. Zira şartların uygun olmaması durumunda, kurumanın aksi bir olay olan nemlenme/nem alma diye ifade edebileceğimiz materyalin nem içeriğinin artması olasıdır. Dolayısıyla kuruma hadisesinin nasıl olduğunu aydınlatılmak için şartların uygun ve tanımlanabilir olması gerekmektedir. Herhangi bir materyalden suyun kontrollü bir şekilde uzaklaştırılması dehidrasyon olarak da adlandırılır.

Doğada kuruma güneş ısısı ve buna bağlı olarak hava hareketleri neticesi oluşan rüzgar etkisiyle gerçekleşmektedir. Ancak yeryüzünün her noktasında kuruma olayına imkan sağlayacak şartlar mevcut değildir. Dünya var olduğundan beri doğada kendi doğal akışı içinde gerçekleşen kuruma zamanla insanlığın faydasına olacak şekilde amaçlı ve kontrollü bir sürece dönüşmüştür. En basit faydadan barınma ihtiyacını karşılayacak materyalleri elde etmeye, gıdaları bozulmadan saklamaya, ileri teknoloji ürünlerini elde etmeye kadar birçok alanda kuruma olayının uygulama biçimi olan kurutma süreci günümüzde de etkin bir şekilde uygulanmaktadır. Doğal şartların imkan vermediği durumlarda kurumunun gerçekleşebilmesi için ilave enerji ve ekipman ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyacın karşılanması doğrultusunda verimli ve etkili bir kurutma için uygun yöntemlerin belirlenmesi de gelişim göstermiştir.

Her ne kadar bünyeden nemin uzaklaştırılması işlemi şeklinde ifade edilen bir kavram olmasına rağmen kurutma nemli materyal ile çevresi arasında gerçekleşen karmaşık bir ısı transferi ve beraberinde nemin uzaklaşması şeklinde yürüyen bir kütle transferi olayıdır (Midilli ve ark., 2002). Bu yönüyle bakıldığında kurutma çok amaçlı bir işlemdir. Öncelikle su aktivitesi düşürülerek mikroorganizma faaliyetlerinin ve enzim aktivitesinin yavaşlatılması asıl amaçtır. Diğer taraftan kuruma sayesinde gıda materyalinin kütle ve hacminin azalması ile depolama ve taşıma giderlerinin düşürülmesi amacı da yerine getirilmiş olur. Bu olumlu taraflarının yanı sıra gıda materyalinin beslenme değerlerinde olumsuz değişimlerin de engellenecek şekilde bir kurutma sürecinin yürütülmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla uygun kurutma yönteminin seçilmesi önemli bir husustur. Birçok kurutma yöntemi olmasına rağmen en genel haliyle kurutma yöntemlerini iki başlık halinde sınıflandırmak mümkündür. Bunlar detayları daha sonra verilecek olan “doğal kurutma” ve “yapay kurutma” başlıklarıdır. Kontrollü bir kurutma imkânı sunan yapay kurutma da kendi içinde sınıflara ayrılmaktadır.

Bu tez çalışması ile modifiye edilmiş bir ev tipi mikrodalga fırın kullanılarak portakal dilimlerinin kurutulması ve kuruma davranışının matematiksel modeller ile temsil edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel süreç cevap yüzey yöntemi ile tasarlanmış ve Box-Behnken dizayn yaklaşımı ile planlanarak optimize edilmiştir.

## 2. KURUTMA İŞLEMİNİN ESASLARI

Kurutma terimi esasen katı veya katı hale yakın formdaki maddelerden suyun uzaklaştırılması için kullanılan bir terim olmakla beraber benzen ve organik esaslı solventler gibi organik maddelerin uzaklaştırılması için de kullanılabilir. Ancak bu yönüyle bakıldığında evaporasyon işlemi ile karıştırılabilmekle beraber kesin sınırlar ile birbirinden ayıran bir tanım yapmak güçtür.

Kurutma genelde bağıl olarak az miktarda suyun katı materyalden uzaklaştırılması ile ilgilenirken evaporasyon sıvılardan oldukça büyük miktarlarda suyun uzaklaştırılması ile ilgilenir. Ayrıca evaporasyon işleminde su buhar olarak kaynama noktasında uzaklaştırılırken kurutmada suyun uzaklaştırılması genelde hava gibi taşıyıcı bir gaz ile su buharı halinde uzaklaştırılır. Santrifüjleme gibi mekanik yöntemler ile de suyun uzaklaştırılması mümkün olsa da kurutma içeriğinde ısı uygulamasını esas alan karmaşık ısı ve kütle transferi mekanizmalarını barındıran bir yöntemdir.

Kurutma sadece sahip olduğu mekanizmalar yönüyle değil aynı zamanda suyun uzaklaştırılması için uygulanan yöntem ve ekipmanlar yönü ile de diğer süreçlerden ayrılmaktadır. Yüksek fırınlara gönderilecek nemli havanın bir soğutma spirali üzerinden geçirilmesi sureti ile suyun uzaklaştırılması ile kuru hava elde edilir ki bu da bir kurutma işlemidir. Benzer şekilde organik sıvılar ve gazlar silikajel veya benzer niteliklerde adsorbentler üzerinden geçirilmek sureti ile bünyelerindeki suyun uzaklaştırılması ile bir nevi kurutma işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Ancak bu bahsedilen uygulamalar yukarıda vurgulamış olduğumuz esaslar ve uygulamada kullanılan yöntem ve ekipmanlar yönüyle tam olarak bir kurutma prosesi olarak nitelendirilemezler.

Bu bölümde kurutma terimine uyan mekanizma ve kurutmada kullanılan yöntem ve ekipmanlar üzerinde durularak kurutma işleminin esasları verilmeye çalışılacaktır.

### 2.1. Tanımlar

Kuruma olayı ve kurutma işlemi, nemli madde ile içinde bulunduğu ortam arasında ısı alışverişi ve nem aktarımının olduğu bir süreçtir. Dolayısıyla bu olaylar gerçekleşirken madde ve içinde bulunduğu ortam arasındaki etkileşimi anlamamıza yarayan ve özellikle gıda maddelerinde kurutmanın önemini anlamamıza yardımcı olan bazı tanımlamalara ihtiyaç vardır. Bunlar maksimum nem, mutlak nem, bağıl nem, kuru ve yaş termometre

sıcaklıkları, denge nemi, su aktivitesi, adsorpsiyon ve desorpsiyon kavramları olarak ifade edilebilir.

Kurutma olayında etkileşim nemli madde ve bulunduğu ortam olan genelde hava arasında gerçekleştiğinden havaya ve maddeye özgü özellikleri ayrı ayrı tanımlamak gerekir.

### **Maksimum Nem;**

Havada bulunan su buharı nem olarak adlandırılır ve belli bir sıcaklıkta havanın taşıyabileceği nem miktarı belirli ve sınırlıdır. Sabit ve belli bir sıcaklıkta 1 m<sup>3</sup> havanın taşıyabileceği en fazla su buharı miktarına maksimum nem adı verilir ve genelde g/m<sup>3</sup> olarak ifade edilir. Maksimum nem miktarı sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterir. Hava sıcaklığındaki artma ile havanın hacmi artacağı için taşıyabileceği nem miktarı da artar. Hava soğuyunca ise tersi olur. Bu nedenle maksimum nem sıcaklıkla doğru orantılıdır. Belli bir sıcaklıkta taşıyabileceği nem miktarına ulaşmış hava doyma noktasına varmıştır ve doymuş hava olarak adlandırılır.

Atmosferik tanımlamalarda g nem/m<sup>3</sup> hava ile ifade edilen maksimum nem kuruma/kurutma süreçlerinde kg kuru hava başına kg nem miktarı olarak ifade edilir, kg su/kg kuru hava.

### **Mutlak Nem;**

1 m<sup>3</sup> havanın bünyesinde bulunan nem miktarına mutlak nem denir. Mutlak nem de maksimum nem gibi sıcaklıkla doğru orantılıdır ve hava her zaman maksimum nem miktarında nem bulunduracak diye bir koşul geçerli değildir.

Mutlak nem de kg su/kg kuru hava şeklinde belirtilir ve bazen özgül nem şeklinde de ifade edilir.

Hava-su buharı karışımları tam olarak ideal gaz yasalarına uymamakla beraber 3 atm basınca kadar bu yasalara önemli ölçüde uyduğu kabul edilmektedir. Bu durumda nemli havanın basıncı bünyesinde bulunan kuru havanın ve su buharının kısmi basınçlarının toplamına eşittir. Gibbs-Dalton yasası olarak adlandırılan bu ifade aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{hava} = P_{kh} + P_{sb} \quad (2.1)$$

Burada;  $P_{hava}$ , nemli havanın basıncını (kPa),  $P_{kh}$ , kuru havanın kısmi basıncını (kPa) ve  $P_{sb}$ , havada bulunan su buharının kısmi basıncını (kPa) ifade etmektedir.

Bu yaklaşıma göre mutlak nemi ifade etmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir.

$$X = \frac{m_{sb}}{m_{kh}} \quad (2.2)$$

$$X = 0.622 \frac{y_{sb}}{y_{kh}} \quad (2.3)$$

$$X = 0.622 \frac{P_{sb}}{P_{kh}} \quad (2.4)$$

Burada; X, mutlak nemi (kg su/kg kuru hava);  $m_{sb}$  ve  $m_{kh}$ , sırasıyla su buharı ve kuru havanın kütlelerini (kg);  $y_{sb}$  ve  $y_{kh}$ , sırasıyla su buharı ve kuru havanın mol kesirlerini ifade etmektedir.

### **Bağıl Nem;**

Havanın taşıdığı nem miktarının o sıcaklıkta taşıyabileceği maksimum nem miktarına oranı olarak ifade edilen bağıl nem % olarak ifade edilir.

$$\text{Bağıl Nem} = \frac{\text{Mutlak Nem}}{\text{Maksimum Nem}} 100 \quad (2.5)$$

$$X_b = \frac{X}{X_{mak}} 100 \quad (2.6)$$

$$X_b = \frac{y_{sb}}{y_{dsb}} 100 \quad (2.7)$$

$$X_b = \frac{P_{sb}}{P_{dsb}} 100 \quad (2.8)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak bağıl nem değeri bulunabilir. Burada;  $X_b$ , bağıl nemi (%);  $X_{mak}$ , maksimum nemi (kg su/kg kuru hava);  $y_{dsb}$ , su buharına doymuş havadaki su buharı mol kesrini;  $P_{dsb}$ , su buharına doymuş havadaki su buharı kısmi basıncını (kPa) ifade etmektedir.

### **Kuru ve Yaş Termometre Sıcaklığı;**

Mühendislik sistemlerinde sıkça kullanılan mutlak nem ve bağıl nem büyüklüklerinin ölçülmesi kolay değildir. Dolayısıyla daha kolay ölçülebilir sıcaklık ve basınç gibi büyüklüklerle ilişkilendirmek sureti ile havanın mutlak ve bağıl nemi belirlenebilir. Bu amaçla kolay aynı zamanda da pratik bir yöntem uygulanarak bu

yapılabilmelidir. Kurutma sistemlerinde kullanılan hava tanımlanırken daima “kuru termometre sıcaklığı ( $T_k$ )” ve “yaş termometre sıcaklığı ( $T_y$ )” bilgileri ile ifade edilir.

Herhangi bir değişiklik yapılmamış olağan bir termometre veya sıcaklık sensörü kullanılarak havanın doğrudan ölçülen sıcaklığı kuru termometre sıcaklığı olarak adlandırılır.

Mutlak veya bağıl nemi belirlemede kullanılan yöntemlerden biri *adyabatik doyma işlemidir*. Bu yöntem kolay bir yöntem olmasına rağmen pratik değildir. Bunun için pratik bir şekilde uygulanabilir bir yöntem olan yaş termometre sıcaklığının ölçülmesi tercih edilir. Bu ölçüm için, civalı bir termometrenin cıva haznesi bir tülbent veya pamuk ile sarılır ve sarılı bu hazne dıştan bir su haznesine daldırılmak sureti ile termometre haznesi etrafında adyabatik doyma işlemi sürekli hale getirilir. Şöyle ki, doymamış hava bu sarılı hazne üzerinden geçerken hazneyi saran suda bir miktar buharlaşma olur ve suyun sıcaklığı düşer. Bu durumda havadan suya ısı geçişine neden olacak bir sıcaklık farkı ortaya çıkar. Sudan buharlaşma nedeni ile kaybolan ısı miktarı, sıcaklık farkından dolayı havadan suya transfer olan ısı miktarına eşit hale gelir ve bu olay bir denge sıcaklığına erişmiş olur. Bu durumda varılan bu denge sıcaklığı termometreden okunur ve sıcaklık yaş hazne sıcaklığı olarak adlandırılır.

### **Denge Nemi;**

Herhangi bir nemli katı kendisini çevreleyen belirli bir ortama (hava) bırakıldığı zaman çevresi ile nem (su) alışverişinde bulunmaya başlar. Katı bünyesindeki suyun buhar basıncı çevreleyen havada bulunan suyun kısmi basıncından büyük ise katıdan hava ortamına nem geçişi olacaktır. Aksi durumda havadan katıya doğru su buharı geçişi olacaktır. Hangi yönde olursa olsun bu nem geçişi iki ortamdaki su buharının buhar basıncı eşit oluncaya kadar devam eder. Bu eşitlik denge durumunu ifade eder ve bu denge halinde katının bünyesinde bulunan nem miktarı “denge nemi” olarak adlandırılır. Denge halinde katıyı çevreleyen havanın sahip olduğu nem ise mevcut sıcaklıktaki “denge bağıl nemi” olarak adlandırılır.

Gıda maddeleri arasında tarımsal gıda ürünlerinin belirli bir sıcaklık ve bağıl neme sahip hava ortamında ulaşacağı denge neminin bilinmesi bu ürünün kurutulması ve depolanması sırasında sürecin kontrolü açısından önemlidir.

Havanın mutlak nemi sabit kalmak koşulu ile sıcaklık artırılacak olursa bağıl nem azalacağından ürün nem kaybederken sıcaklık düşürülecek olursa ürün nem almaya başlar.

Bu olay mevcut koşullarda bir süre sonra dengeye ulaşır. Bu denge kurulma süreci ve ürünün nem içeriği ürünün nem ile etkileşimi ve nem tutma mekanizmasına bağlıdır.

### **Su Aktivitesi;**

Gıda maddelerinin dayanıklılığı bünyelerinde bulunan su ile doğrudan ilişkidir. Ürünün bünyesindeki su ne kadar az ise o kadar dayanıklı olacaktır. Burada dayanıklıktan kasıt gıda bünyesinde biyolojik ve kimyasal faaliyetlerin en az seviyede olmasıdır. Ancak gıda maddesi içindeki her su bu faaliyetlerde görev almaz. Bu nedenle gıda maddeleri bünyesinde bulunan su bağlı su ve serbest su şeklinde tanımlanır.

Bağlı su, gıda maddelerinde bulunan diğer moleküllere bağlı olarak bulunur ve monomoleküler düzeyde bağlı olan bu suyun uzaklaştırılması zor hatta olanaksızdır. Bağlı su kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlarda ve mikroorganizma faaliyetlerinde rol almaz.

Hayvan ve bitki dokularında bağlı suyun dışında yığın halinde tutulan fazla miktardaki su serbest su olarak adlandırılır. Gıda maddelerinde bulunan serbest su, içerisinde çeşitli maddelerin çözülmüş olduğu bir çözücü niteliğindedir ve kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlarda ve mikroorganizma faaliyetlerinde rol alan sudur.

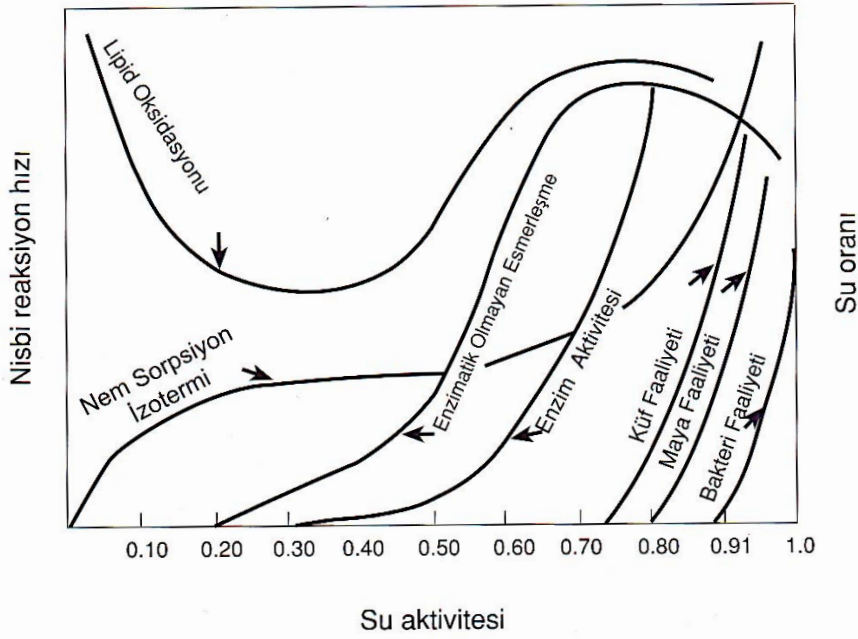
Gıda maddelerinde bulunan serbest su miktarının ölçüsü su aktivitesi kavramı ile ifade edilir ve özellikle mikrobiyolojik faaliyetlerde suyun kullanılabilme derecesini ifade eder. Bir gıda maddesinin su aktivitesi gıda bünyesindeki serbest suyun buhar basıncının aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına oranı olarak tanımlanır ve  $S_a$  ile gösterilir.

$$S_a = \frac{p_{sb}}{p_0} \quad (2.9)$$

Burada;  $S_a$ , su aktivitesini;  $p_{sb}$ , gıdadaki suyun buhar basıncını (kPa);  $p_0$ , aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncını (kPa) ifade etmektedir. Eşitlik 2.9 uyarınca hangi sıcaklıkta olursa olsun saf suyun su aktivitesinin 1 ( $S_a = 1$ ) olduğu görülmektedir ve gıda maddelerinin su aktivitesinin her zaman 1' den küçük bir değer alacağı anlaşılmaktadır.

Sabit sıcaklıkta ve sabit nem içeriğine sahip bir atmosferde gravimetrik yöntemle deneysel olarak denge nem içeriği belirlenen bir gıda maddesinin bu denge nem içeriğindeyken sahip olduğu su aktivitesi aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

$$S_a = \frac{DBN}{100} \quad (2.10)$$



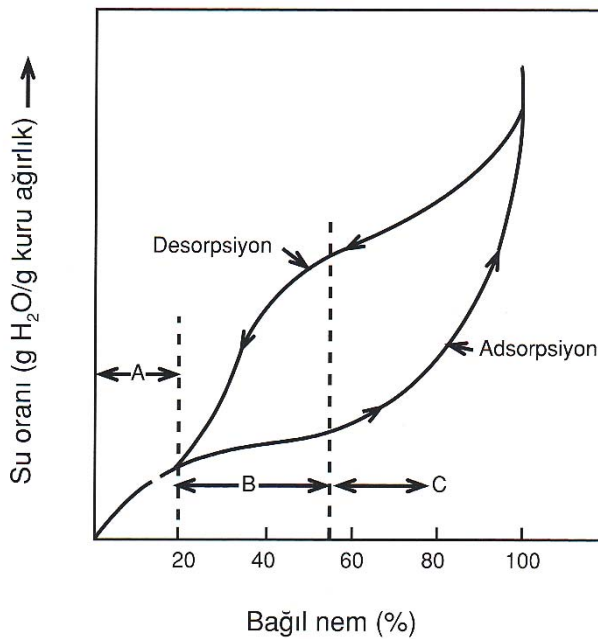
**Şekil 2.1.** Gıdalarda bozulmaya neden olan reaksiyonların ve mikroorganizma faaliyetleri üzerine su aktivitesinin etkisi.

Burada; DBN, gıda maddesinin içinde bulunduğu atmosferin denge bağıl nem değerini ifade etmektedir.

Gıdalarda meydana gelebilecek bozulma reaksiyon hızları su aktivitesine bağlı olarak değişmektedir. Gıdalarda olumsuz değişimlere neden olan reaksiyonların nisbi (relatif, oransal) hızları ile su aktivitesi arasındaki ilişki Şekil 2.1’de görülmektedir (Cemeroğlu, 2010). Şekil 2.1’den görüldüğü üzere su aktivitesinin 0.7’ nin altında olduğu şartlarda küf, maya ve bakteri faaliyetleri ortadan kalkmasına rağmen yaklaşık  $S_a=0.2-0.3$  düzeyine kadar devam eden enzimatik ve enzimatik olmayan reaksiyonlar durma noktasına gelirken lipid oksidasyonu reaksiyonları stabil kalmaktadır. Bu değer altındaki su aktivasyonu değerlerinde lipid oksidasyonu reaksiyonlarının hızlandığı görülmektedir. Bunun nedeni 0.2-0.3 su aktivitesi bölgesinde monomoleküler su filmi düzeyi korunurken daha düşük su aktivitesi değerlerinde gıda maddesini oksidasyonlardan bir nebze koruyan monomoleküler su örtü tabakasının yok olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Labuza, 1976).

## 2.2. Sorpsiyon İzotermi

İşlenmemiş ve/veya işlenmiş gıda ürünleri bünyesindeki su miktarı ürünü çevreleyen ortamın bağıl nemine göre değişecektir ve bu ortam ile dengededir. Dengeye ulaşmış gıda bünyesindeki nem miktarı ile bu gıdayı çevreleyen havanın bağıl nemi arasındaki ilişki nem sorpsiyon izotermi ile gösterilir. Bir başka ifade ile, sabit sıcaklıkta gıdanın içerdiği nem miktarının gıdanın su aktivitesine karşı grafiğe geçirilmesi ile elde edilen eğriye gıdanın sorpsiyon izotermi denir (Aykın ve ark., 2015). Sorpsiyon izotermi gıda maddesinin bulunduğu ortamdan nem alması veya bulunduğu ortama nem vermesine göre sırasıyla adsorpsiyon izotermi veya desorpsiyon izotermi olarak adlandırılır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi çoğunlukla aynı yolu izlemezler ve aralarında bir açıklık oluşur. Bu açıklıktan kaynaklanan farklı izoterm eğrilerinin durumu histerezis olarak adlandırılır. Şekil 2.2’de gıda maddelerinin genel sorpsiyon izotermi görülmektedir. Gıda maddesi bünyesinde bulunan su, A, B ve C ile gösterilen üç farklı bölge ile karakterize edilir. A bölgesindeki suyun katı yüzeyine sıkı bir şekilde ve tek tabaka halinde bağlanmış olduğu kabul edilir. Kuru madde miktarı bazında yaklaşık % 5-10 düzeyinde olan bu su polisakkaritlerin hidroksil gruplarına, proteinlerin karbonil ve amino gruplarına güçlü bir şekilde bağlanmıştır ve adeta grubun bir parçası gibidir. Bu monomoleküler su katmanının adsorpsiyon ısısı yüksek olduğundan gıda maddesine zarar vermeksizin bünyeden uzaklaştırılması neredeyse



Şekil 2.2. Gıda maddeleri için genel sorpsiyon izotermi.

imkansızdır. Gıda maddesinin oksidasyonlara karşı korunmasında önemli bir rolü olan bu suyun uzaklaştırılması zaten arzulanan bir şey değildir. B bölgesine karşılık gelen su A bölgesi ile gösterilen monomoleküler su katmanının üzerine çok katmanlı (multimoleküler) olarak bağlanmış suya karşılık gelmektedir. Daha düşük ve azalan bir adsorpsiyon gücü ile bağlı olduğundan monomoleküler tabakayı oluşturan suya göre daha zayıf bağlıdır. C bölgesini oluşturan su ise katının kapiler ve gözenekli yapısı içinde yoğunlaşmış, içinde çeşitli maddelerin çözülmüş halde olduğu serbest sudur. Serbest su kapiler boşluklarda bulunduğundan dolayı bu bölge kapiler kondenzasyon bölgesi olarak da adlandırılır ve bu bölgedeki su kurutma sırasında kolayca uzaklaştırılabilir. Bu üç bölgeyi kesin olarak birbirinden ayıran nem oranlarını vermek mümkün değildir zira her bir gıda ürünü için farklı sınırlar söz konusudur.

Yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı gıda maddeleri bünyesinde bulunan suyun “monomoleküler bağlı su”, “multimoleküler halde gevşek bağlı su” ve “kapiler su” olmak üzere üç şekilde bulunduğu söylenebilir.

### **2.3. Kurumanın Mekanizması**

Nemli bir gıda maddesinin üzerinden sıcak hava akarken gıda maddesinin bünyesinde bulunan su ihtiyaç duyduğu buharlaşma gizli ısını sıcak havadan karşılayarak buharlaşır. Gıda maddesinin etrafını saran hava filmine difüze olan su hava akımıyla birlikte taşınır. Bu olay sırasında nemli materyal yüzeyindeki su ve bunu çevreleyen hava birbiri ile temas halinde olan fazlar olup bunların temas yüzeyleri arayüzey olarak adlandırılır. Gıda maddesindeki suyun taşınması bu arayüzey üzerinde gerçekleşir. Şöyle ki, bu arayüzeye doğru ve bu arayüzeyden dışarıya doğru gerçekleşen taşınım hızı kuruma olayı esnasında uzaklaşan suyun transferini kontrol eder. Gıda maddesi yüzeyindeki suyun arayüzeye difüzyonu ile gıda maddesinin yüzeyinde iç kısımlara göre buhar basıncı daha düşük bir tabaka oluşur. Buhar basıncındaki bu farklılaşma su buharı basınç gradienti oluşturur ve bu da suyun sürekli olarak bünyeden uzaklaşmasını sağlayan itici güçtür.

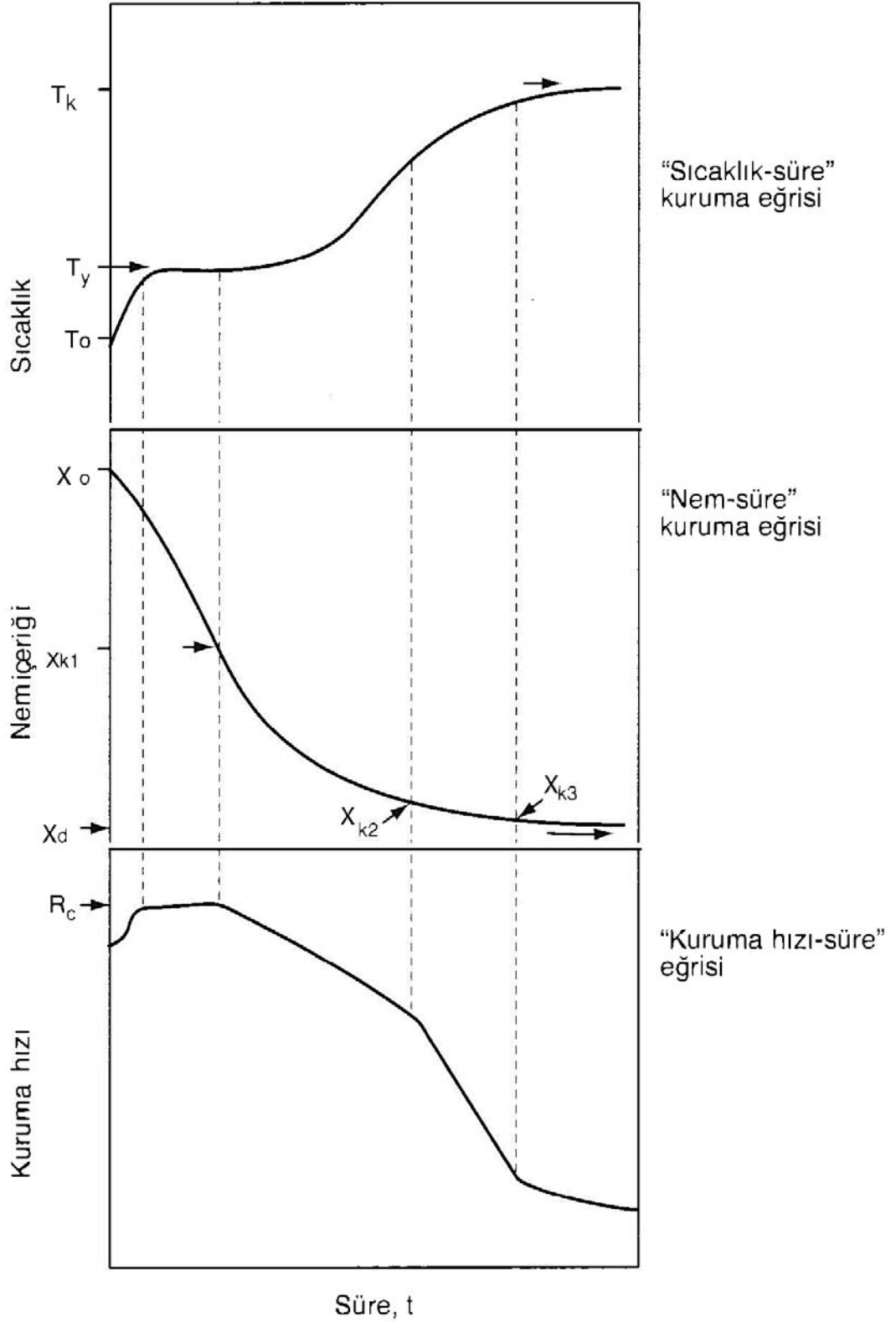
Kurumakta olan bir gıda maddesinin iç kısımlarındaki su gıda maddesinin yüzeyine çeşitli yollarla ulaşmaktadır. Bunlar başlıca kapiler kuvvetler etkisi ile “sıvı hareketi”, gıda maddesinin farklı bölgelerinde bulunan çözülmüş madde konsantrasyonu gradientinden kaynaklanan “sıvı difüzyonu” ve gıda maddesi içindeki buhar basıncı gradientinden

kaynaklanan iç boşluklardaki “su buharı difüzyonu” gibi mekanizmalardır (Cemeroğlu, 2010).

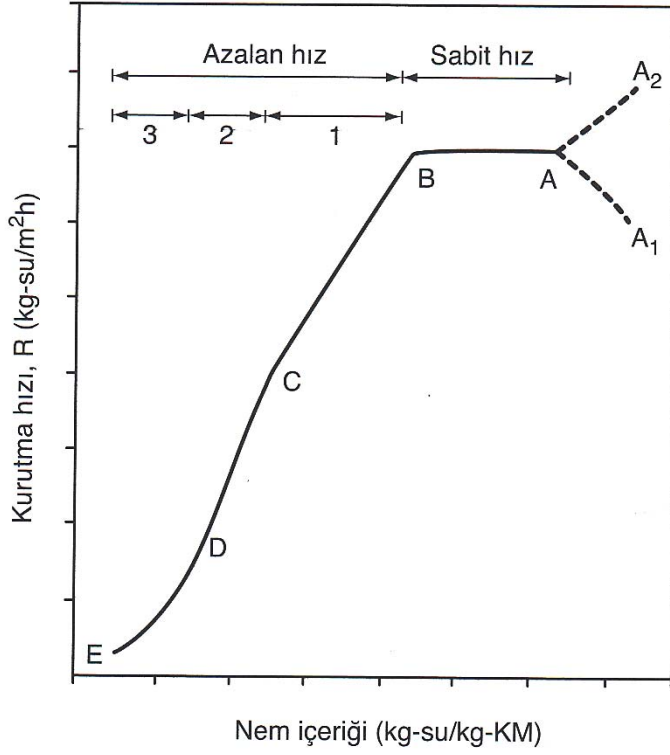
Kuruma sırasında kuruyan/kurutulan maddede zamana bağlı kütle azalması, sıcaklık değişmesi, kurutucu havanın kuru ve yaş termometre sıcaklıkları gibi faktörler ölçülmek sureti ile kuruma olayına ait deneysel veriler elde edilebilir. Elde edilen bu veriler doğrudan veya uygun matematiksel türetmeler ile elde edilen ikincil verilere dönüştürülerek grafikler halinde temsil edilebilir. Deneysel verilerden ve bu veriler kullanılarak türetilmiş verilerin grafiğe geçirilmesi ile elde edilmiş olan üç farklı kuruma eğrisi Şekil 2.3’de görülmektedir. Bu grafiklerde zamana bağlı olarak kurutulan maddenin ve kurutucu havanın sıcaklık değişimleri, kurutulan maddenin nem içeriğinin değişimi ve kuruma hızının değişimine ait eğriler görülmektedir. Bu eğriler eş zamanlı olarak değerlendirilecek olursa kuruma süresi arttıkça yani zamanla, maddenin başlangıç sıcaklığı havanın yaş hazne sıcaklığına varıncaya dek kuruma hızının da arttığı ve maddenin hızlı bir şekilde su kaybettiği görülür. Havanın yaş hazne sıcaklığına ulaşan kurutulan madde bir süre sabit bir hızda kuruma davranışını sürdürdükten sonra kuruma hızının azalmaya başladığı bir diğer evreye geçtiği görülmektedir ve bu evrede de maddenin nem içeriği düşmektedir. Nihayet madde sıcaklığının havanın kuru hazne sıcaklığına ulaşacağı noktaya doğru maddenin nem içeriği sabit kalacak şekilde kuruma olayı tamamlanmış olmaktadır.

Bu eğriler arasında kuruma davranışını anlamaya yarayan en önemli parametrelerin kuruma süresi, nem içeriği ve kuruma hızı oldukları net bir şekilde görülmekle beraber kurutma için kullanılacak hava akımı sıcaklık verilerinin değişimleri de kullanılarak psikometrik değerlendirmeler ile kuruma süreci analiz edilebilmektedir.

Kurutulan maddenin nem içeriğindeki değişime karşılık kuruma hızındaki değişim grafiğe geçirilecek olursa kuruma sürecini daha iyi anlayabileceğimiz kuruma hızı eğrisi elde edilebilir. Şekil 2.4’ de tipik bir kuruma hızı eğrisi görülmektedir. Nemli bir gıda maddesi, sıcak hava ortamına bırakılınca gıda maddesinin yüzeyi sıcak havanın yaş termometre sıcaklığına ulaşıncaya kadar kısa süreli bir dengelenme süreci yaşanır. Bu süreç Şekil 2.4’de A<sub>1</sub>-A bölgesine karşılık gelmektedir. Şayet gıda maddesinin sıcaklığı kurutucu havanın sıcaklığından daha yüksek ise dengelenme süreci A<sub>2</sub>-A bölgesinde gerçekleşecektir. Bu kısa süreli dengelenme süreci sonunda A noktasından itibaren kuruma başlar. Bu noktada su aktivitesi  $S_a=1.0$ ’ a çok yakın olup yüzeyde en zayıf şekilde bağlı olan su kolaylıkla buharlaşarak uzaklaşır. Yüzey kurudukça alt katmanlarda bulunan su yüzeye hareket eder.



**Şekil 2.3.** Bir kuruma olayında zamanla sıcaklık, nem içeriği ve kuruma hızı parametrelerinin değişimi.  $T_k$ : Kuru termometre sıcaklığı,  $T_y$ : Yaş termometre sıcaklığı,  $T_o$ : Maddenin başlangıç sıcaklığı,  $X_o$ : Maddenin başlangıç nemi,  $X_d$ : Denge nemi,  $X_k$ : Kritik nem,  $R_c$ : Sabit kuruma hızı



**Şekil 2.4.** Tipik bir kuruma hızı eğrisi

Yüzeydeki suyun buharlaşarak uzaklaşma hızı alt katmanlardaki suyun yüzeye ulaşma hızına eşit olduğu müddetçe kuruma hızı sabit kalacaktır. A-B bölgesine karşılık gelen bu süreç “sabit hızda kuruma evresi” olarak adlandırılır. Sabit hızda kuruma evresinin sonunda gıda maddesinin sahip olduğu nem “kritik nem” olarak adlandırılır ve bu noktadan sonra kuruma hızı sürekli düşer. B-E bölgesi “azalan hızda kuruma evresi” olarak adlandırılır. Azalan hızda kuruma evresi gıda maddesi denge nemine ulaşıncaya kadar devam eder. Higroskopik olmayan maddeler için B-E bölgesinde sadece bir tane azalan hızda kuruma evresi mevcut olurken higroskopik maddeler için birden fazla azalan hızda kuruma evresi görülür. Şekil 2.4’de B-C, C-D ve D-E bölgelerine karşılık gelen üç farklı azalan hızda kuruma evresi görülmektedir. Bunun nedeni, higroskopik gıda maddelerinde nem içeriğindeki değişmeye bağlı olarak su buhar basıncının da değişmesidir. Azalan hızda kuruma evresi kurumanın en uzun evresini oluşturmasına rağmen uzaklaşan su miktarı daha azdır. Sabit hızda kuruma evresi ve azalan hızda kuruma evresini kurutulan maddenin nitelikleri ve kurutma koşulları etkilemektedir.

## 2.4. İnce Tabaka Kuruma Teorisi

Kurutmada ana gaye nemli bir materyalin neminin istenilen bir düzeye düşürülmesi için bünyeden nemin uzaklaştırılmasıdır. Ancak bunu gerçekleştirirken elde edilecek kuru ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri yönü ile sağlıklı ve kaliteli olması da amaçlanır. Geometrik büyüklüğü ve şekli ne olursa olsun nemli bir gıda maddesinin atmosfere açık şartlarda bırakılması durumunda nem kaybetmesi kaçınılmaz olacaktır. Bu nem kaybetme sürecinin ne kadar süreceği değişken olmakla beraber bu zaman zarfında nem kaybetmenin yanı sıra bir takım bozulma olaylarının da olacağı muhakkaktır. Materyal büyüklüğündeki artma ile orantılı olarak kuruma süresi uzayacaktır ve olması gerekenden daha uzun süren bir kuruma olayında nem kaybetmeye enzimatik ve/veya enzimatik olmayan bozulma tepkimeleri eşlik edecektir. Bu olumsuzluklar nihai üründe kaliteyi düşüren ve tüketim imkanlarını ortadan kaldıran istenmeyen sonuçlar doğuracaktır. Bu olumsuzlukların ortadan kaldırılması için yapılması gereken, kısa süreli ve etkili bir kurutma sürecinin gerçekleştirilmesidir. Bunun yapılabilmesi için de kurutulacak materyalin, kuruma süresini kısaltacak nitelikte bir geometriye ve büyüklüğe sahip olması gerekir. Bu da ancak materyal büyüklüğünü küçültmek ve takip edilebilir bir geometriyi sağlamakla mümkün olacaktır.

İnce tabaka, kurutulan materyali çevreleyen hava özelliklerinin değişmeden kaldığının düşünülebilmesi için yeterince küçük kalınlığa sahip bir tabakayı ifade eder. Yeterince küçük kalınlığa sahip bu tabaka üzerindeki kurutma işlemi, tamamen kurutma havasına maruz kalan bireysel parçacıkların veya kurutulan materyal taneciklerinin kurutulması anlamına gelir. Bu kuruma süreci de sabit hız periyodu ve azalan hız periyodu olarak tanımlanan iki aşamada gerçekleşir (Ikrang, 2014).

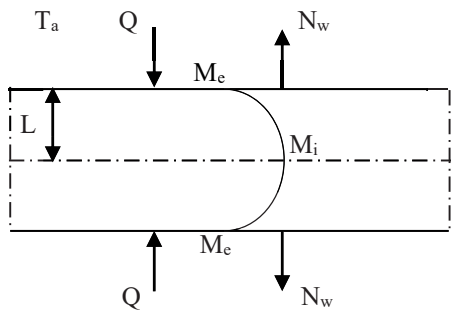
Sabit hızlı kuruma periyodunda kurutulan materyal o kadar çok su içerir ki adeta sıvı yüzeyler mevcut olur ve açık yüzlü bir su kütesinden suyun buharlaşması gibi düşünülebilecek şekilde kuruma gerçekleşir. Buna karşın gerçek uygulamalarda özellikle tarımsal ürünlerin kurutulmasında kuruma işlemi azalan hız periyodunda ve denge men içeriği ile sınırlı olacak şekilde gerçekleşir (Inyang ve ark., 2018). Azalan hız kuruma periyodunda nemin uzaklaşması, nemin bünyeden yüzeye hareketi ve yüzeydeki nemin uzaklaşması şeklinde iki aşamada gerçekleşir (Henderson ve ark., 1997). Aynı zamanda bu yaklaşımla ince tabaka kurutma, kurutma havasının ince bir malzeme tabakasının etrafından geçirilmesi ile gözenekli bir ortamdaki nemin denge nem içeriğine ulaşılincaya kadar

buharlaştırılarak uzaklaştırılması işlemi olarak da tanımlanabilir (Omid ve ark., 2006; Ronoh ve ark., 2010).

İnce tabaka kurutma yaklaşımı sadece yukarıda anlatılan niteliklerde bir kurutma sürecinin gerçekleştirilmesi için değil aynı zamanda kurutma olayının matematiksel olarak ifade edilebilmesinde de kolaylık sağlamaktadır.  $M$  nem içeriği,  $L$  tabaka yarı kalınlığı,  $t$  zaman ve  $x$  konum terimlerine karşılık gelmek üzere  $T_a$  ortam sıcaklığında bulunan bir cisim üzerinde ısı ve nem transferine için Şekil 2.5’de görülen şemaya göre ince tabaka kuruma yaklaşımı aşağıdaki kabuller kullanılarak matematiksel olarak ifade edilebilir.

Kabuller;

- i) Kurutulan materyal homojen ve izotropiktir
- ii) Materyal nitelikleri sabittir ve büzölmeler ihmal edilebilir
- iii) Basınç değişimleri ihmal edilebilir
- iv) Buharlaşma sadece yüzeylerde meydana gelir
- v) Başlangıçta nem dağılımı tekdüzedir ve kuruma süresince simetriktir
- vi) Yüzey difüzyonu sona erer ve böylece yüzeyde nem dengesi sağlanır
- vii) Sıcaklık dağılımı tekdüzedir ve kurutma hava sıcaklığına eşittir
- viii) Isı transferi materyalin dışında taşınım ile içinde ise iletim ile gerçekteşir
- ix) Kuruma boyunca nem içeriğindeki değişime karşılık etkin nem yayılımı sabittir



Şekil 2.5. İnce tabaka kuruma yaklaşımının şematik görünümü

## 2.5. Kurutmada Matematiksel Modeller

Kurutma olayının gerçekleştirilmesi kadar matematiksel olarak tanımlanması da önemli bir husustur. Zira kurutma esnasında kuruma sürecine dair kuruma süresi, kuruma hızı, difüzyon katsayısı, kuruma hız sabiti gibi bir takım büyüklüklerin belirlenmesi ve yorumlanması araştırmacı ve uygulamacılara büyük faydalar sağlamaktadır. Bu niteliklerin niceliksel olarak aydınlatılabilmesi için ilgili kuruma olayına ait deneysel verilerin matematiksel olarak tanımlanmış eşitlikler dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekir. Bu durumda, belirli kriterler ile tanımlanmış ve genelleştirilmiş eşitliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu eşitliklerin elde edilmesi temelde matematiksel modelleme yaklaşımı ile gerçekleştirilir. Kurutma süreçleri genellikle Dağıtılmış Eleman Modeli (Distributed Element Model) ve Toplu Eleman Modeli (Lumped Element Model) yaklaşımları kullanılarak modellenir (Inyang ve ark., 2018).

### 2.5.1. Dağıtılmış eleman modeli

Bu model yaklaşımında kurutulan materyal için hem iç hem de dış taraftaki ısı ve kütle transferi eşzamanlı olarak dikkate alınarak materyaldeki sıcaklık ve nem değişimi tahmin edilmeye çalışılır. Bu yaklaşım sonucu ortaya çıkan modeller Fick' in II. Difüzyon yasasından ve onun türevlerinden yola çıkarak elde edilen Luikov denklemine dayanmaktadır (Luikov, 1975). Bu denklemler aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P \quad (2.13)$$

Burada  $K_{11}$ ,  $K_{22}$  ve  $K_{33}$  parametreleri fenomenolojik katsayılar  $K_{12}$ ,  $K_{13}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{23}$ ,  $K_{31}$  ve  $K_{32}$  ise bağlantı katsayıları olarak adlandırılır (Brooker ve ark., 1974). Birçok proses için basınç teriminin etkisi nem içeriği ve sıcaklık terimleri yanında ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir. Bu nedenle 2.11 ve 2.12 eşitliklerinden oluşan aşağıdaki 2.14 ve 2.15 eşitlikleri yazılabilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} T \quad (2.15)$$

Elde edilen bu modifiye Luikov eşitlikleri analitik olarak çözülemeyecek düzeyde zor ve kompleks eşitlikler olup ancak sonlu elemanlar metodu gibi uygun sayısal çözümleme yaklaşımları ile çözülebilir (Özilgen ve Özdemir, 2001).

### 2.5.2. Toplu eleman modeli

Toplu eleman model yaklaşımına göre kurutulan materyal içindeki sıcaklık eğilimi (gradienti) dikkate alınmaz ve kurutucu hava sıcaklığına eşit olacak şekilde tekdüze olduğu kabul edilir. Bu durumda Luikov eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{22} T \quad (2.17)$$

Bu son iki eşitlikteki fenomolojik katsayılar  $K_{11}$  ve  $K_{22}$  sırasıyla etkin difüzyon katsayısı ( $D_{eff}$ ) ve termal yayınlılık ( $\alpha$ ) olarak bilinirler. Sabit  $D_{eff}$  ve  $\alpha$  için bir boyutlu kararsız hal eşitlikleri şeklinde düzenlenecek olursa aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial M}{\partial x} \right] \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (2.19)$$

Bu son eşitlikler için  $a_1$ , düzlem, silindirik ve küresel geometriler için sırasıyla 0, 1 ve 2 değerlerini alacaktır.

Bu model yaklaşımında yapılan tekdüze sıcaklık dağılımı kabulü elbette hatalara neden olacaktır ve ortaya çıkacak bu hata kurutulan materyal kalınlığı düşürülerek azaltılabilir. Bu da ince tabaka kuruma yaklaşımının önemini tekrar ortaya koymaktadır. Zira tek tabakalı parçacıklar veya ince dilimler halinde kurutulan gıda maddeleri için kabul edilen tekdüze sıcaklık dağılımı ile 2.19 eşitliğinin çözülmesine gerek kalmamaktadır ve sadece 2.18 eşitliğinin çözümü ile nem içeriğinin değişimini ortaya koyarak kütle transferini matematiksel olarak ifade eden denklemler elde edilebilmektedir (Young, 1969).

İnce tabaka kurutma yaklaşımında elde edilen matematiksel denklemler teorik, yarı teorik ve deneysel denklemler olarak sınıflandırılmaktadır. Aşağıda üç başlık altında bu denklemlere yer verilecektir.

### 2.5.3. Teorik model yaklaşımı

Şekil 2.5' deki şematik gösterime ve yukarıda verilen kabullere göre izotermal şartlar altında aşağıdaki başlangıç ve sınır koşulları dikkate alınarak 2.18 eşitliği bir boyutlu olarak analitik yöntemle çözülebilir:

$$t = 0, \quad -L \leq x \leq L, \quad M = M_i \quad (2.20)$$

$$t > 0, \quad x = 0, \quad dM/dx \quad (2.21)$$

$$t > 0, \quad x = L, \quad M = M_e \quad (2.22)$$

$$t > 0, \quad -L \leq x \leq L, \quad T = T_a \quad (2.23)$$

Bu başlangıç ve sınır koşulları ile 2.18 eşitliğinin çözümünden sonsuz düzlem veya küre için 2.24 ve sonsuz silindir için 2.25 eşitlikleri elde edilir (Crank, 1975).

$$MR = A_1 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} \exp \left[ -\frac{(2i-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{A_2} \right] \quad (2.24)$$

$$MR = A_1 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{J_0^2} \exp \left[ -\frac{J_0^2 D_{eff} t}{A_2} \right] \quad (2.25)$$

Burada,  $D_{eff}$  etkin difüzyon katsayısını ( $m^2/s$ ),  $t$  zamanı (s),  $MR$  boyutsuz nem oranını,  $J_0$  Bessel fonksiyonu köklerini ve  $A_1$  ve  $A_2$  ise geometrik sabitleri ifade etmektedir. Bu geometrik sabitler Tablo 1' de görülmektedir.

**Tablo 2.1.** Ürün geometrisine göre geometrik sabitler (Erbay ve İçier, 2009)

Geometri	$A_1$	$A_2^*$
Sonsuz düzlem	$8/\pi^2$	$4L^2$
Küre	$6/\pi^2$	$4r^2$
3-boyutlu sonlu düzlem	$(8/\pi^2)^3$	$1/(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2)$

\* L her iki yüzeyde kuruma için yarı dilim kalınlığı veya tek yüzeyde kuruma için dilim kalınlığı

Boyutsuz nem oranı, MR, 2.26 eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2.26)$$

Burada,  $M_i$  başlangıç nem içeriği,  $M_t$  herhangi bir  $t$  anındaki nem içeriği,  $M_e$  denge nem içeriğidir. Şayet kurutma havasının bağıl nemi sürekli dalgalanıyor ise denge nem içeriği sürekli değişecektir. Bu durumda MR, 2.27 eşitliği ile ifade edilebilir (Diamente ve Munro, 1993).

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (2.27)$$

#### 2.5.4. Yarı teorik model denklemleri

Yarı teorik model denklemleri Newton' un soğuma kanununu ve Fick'in ikinci difüzyon kanununu esas alarak türetilen denklemler olarak iki grupta değerlendirilmektedir. Aşağıda Tablo 2.2 ve Tablo 2.3' de ilgili eşitlikler sunulmuştur.

**Tablo 2.2.** Newton' un soğuma kanununa benzetilerek türetilen model denklemleri

Model Adı	Model Eşitliği	Açıklama
Lewis (Newton)	$MR = \exp(-k t)$	Lewis (1921) tarafından önerilmiştir k, kuruma sabiti ( $s^{-1}$ )
Page	$MR = \exp(-k t^n)$	Page (1949) tarafından önerilmiştir
Modifiye Page-I	$MR = \exp[(-k t)^n]$	Overhults ve ark. (1973) tarafından önerilmiştir
Modifiye Page-II	$MR = \exp[-(k t)^n]$	White ve ark. (1978) tarafından önerilmiştir
Modifiye Page-III	$MR = \exp[-(-k t)^n]$	Patates dilimlerinin kurutulmasında en iyi model olarak tespit edilmiştir
Modifiye Page-IV	$MR = a \exp[-(k t)^n]$	İncir kurutmada uygulanmıştır
Modifiye Page-V	$MR = \exp[-k(t/L^2)^n]$	Diamente ve Munro (1993) tarafından önerilmiştir. $L$ dilim kalınlığına karşılık gelen deneysel bir sabittir
Otsura ve ark.	$MR = 1 - \exp[-(k t)^n]$	Otsura ve ark. (1975) tarafından önerilmiştir

**Tablo 2.3.** Fick'in II. Difüzyon kanunundan türetilen model denklemleri

Model Adı	Model Eşitliği	Açıklama
Basitleştirilmiş Fick	$MR = k \exp[-c (t/L^2)]$	Uzun kuruma süreleri için önerilen Fick' in difüzyon denkleminin basitleştirilmiş çözümüdür
Henderson ve Pabis (Tek Terimli)	$MR = a \exp(-k t)$	Henderson ve Pabis (1961) tarafından geliştirilmiştir
Logaritmik (Asimptotik)	$MR = a \exp(-k t) + c$	Henderson ve Pabis modelinin logaritmik formu olarak Chandra ve Singh (1995) tarafından önerilmiştir
Midilli	$MR = a \exp(-k t) + b^* t$	Midilli ve ark. (2002) tarafından önerilen ilave deneysel terim içeren bir model denklemdir
Modifiye Midilli	$MR = \exp(-k t) + b^* t$	Ghazanfari ve ark. (2006) tarafından önerilmiş Midilli modelinin modifiye halidir
Demir ve ark.	$MR = a \exp[(-k t)]^n + b$	Demir ve ark. (2007) tarafından önerilmiştir
Two-Term	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$	Henderson (1974) tarafından önerilmiştir
Two-Term Eksponansiyel	$MR = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	Two-Term modelinin Sharaf-Elden ve ark. (1980) tarafından modifiye edilmesi ile önerilen model denklemdir
Modifiye Two-Term Eksponansiyel	$MR = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$	Verma ve ark. (1985) önerilmiştir
Modifiye Henderson ve Pabis (Üç Terimli Eksponansiyel)	$MR = a \exp(-k t) + b \exp(-g t) + c \exp(-h t)$	Henderson ve Pabis modeli ve Two-Term modeline üçüncü bir terimin ilavesi ile Karathanos (1999) tarafından önerilmiştir

### 2.5.5. Deneysel model denklemleri

Deneysel kurutma model denklemleri genellikle kuruma davranışını tahmin etmek için en iyi sonuçları verirler. Bu denklemler türetildikleri deneysel koşullar (sıcaklık, bağıl nem, hava akış hızı) sınırlarında güvenli bir şekilde kullanılabilirler (Brooker ve ark., 1974). Deneysel model denklemleri ortalama nem içeriği ile kuruma süresi arasında doğrudan bir ilişki kurarlar. Literatürde çok sayıda deneysel kuruma model denklemi mevcut olup bunlardan bazıları aşağıda Tablo 2.4’ de verilmiştir.

**Tablo 2.4.** Deneysel model denklemleri

Model Adı	Model Eşitliği	Açıklama
Thompson ve ark.	$t = a \ln(MR) + b [\ln(MR)]^2$	Thompson ve ark. (1968) tarafından önerilen model eşitliği kabuklu mısırın 60-158 °C sıcaklık aralığında kurutulmasında kullanılmıştır.
Wang ve Singh	$MR = 1 + b*t + a*t^2$	Wang ve Singh (1978) tarafından ham pirincin kesikli kurutulması için önerilmiştir
Kaleemullah	$MR = \exp[-(a T + b) t^{(c T+d)}]$	Kaleemullah (2002) tarafından önerilen model eşitliği kırmızı biberin kuruma verilerine uygulanmıştır

## 2.6. Kurutma Teknikleri ve Kurutucu Tipleri

Kurutma sürecine dair teorik esaslar her ne kadar genel bir bakış açısına sahip olsa da kurutulacak materyalin niteliklerine göre kurutma tekniği değişkenlik göstermektedir. Kurutulacak materyalin öz nitelikleri ve kurutma sonrasında elde edilecek olan üründe aranan nitelikler, kurutmada harcanan enerji verimliliği gibi hususlar uygun bir kurutma yönteminin seçilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle endüstriyel anlamda uygun kurutma yönteminin ve kurutucu tipinin seçilmesi oldukça önemlidir.

Gelişen teknoloji ve piyasa ihtiyaçları doğrultusunda kurutucu sistem ve ekipmanları çeşitlilik oluşturmuştur. Literatürde kurutma tekniği ve kurutucu tiplerine dair farklı sınıflandırmalar mevcuttur. Bu sınıflandırmaların esasını kurutmanın kesikli veya sürekli mi olacağı, kurutma sisteminde enerji ihtiyacının nasıl karşılanacağı ve kurutulacak materyale nasıl aktarılacağı, kurutulacak materyalin katı, sıvı, blok veya tanecikli formda oluşu, yatırım maliyeti gibi kriterler oluşturmaktadır.

Özellikle gıda işleme endüstrisinde tahıl ürünlerinin, sebze ve meyvelerin kurutulması son ürünün tüketim ve kalite özellikleri dikkate alındığında uygun kurutma yönteminin seçilmesi önemli bir konudur. İnsanlık tarihi kadar eski olan güneşte kurutmadan mikrodalga gibi ileri teknoloji kurutma yöntemine kadar birçok endüstriyel kurutma yöntemi halihazırda kullanılmaktadır. Bu sistemleri kullanmadaki ana gaye düşük maliyetli ve yüksek kaliteli ürünleri elde etmektir (Darvishi ve ark., 2014).

Kurutma yöntemleri genel olarak doğal ve yapay kurutma yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal kurutma yöntemi, gıda ürünlerinden nemi uzaklaştırmak için güneş enerjisini kullanır. Bu yöntem hava koşullarının değişkenliğine bağlı olduğundan oldukça güvenilmezdir. Öte yandan yapay kurutma yöntemi, daha hızlı kuruma hızı ve üründen büyük miktarda nemin uzaklaştırılmasında verimlilik ve etkinlik ölçüsüyle daha kaliteli kurutulmuş ürünler elde edilmesine imkân sağlayabildiğinden doğal kurutma yöntemine göre daha çok tercih edilmektedir (Toshniwal ve Karale, 2013). Ayrıca sıcaklık, kurutma havası akışı ve kurutma süresi gibi kurutma işlemine dahil olan çeşitli faktörler daha iyi kontrol edilir. Yapay kurutmada, kurutma işleminin etkinliği ve verimliliği, fanlar gibi mekanik veya elektrikli ekipmanların kullanılmasıyla artırılabilir. Bu tez kapsamında bu kriterlerin detaylarına girmeden endüstride kullanılan kurutma yöntem ve kurutucu tipleri başlıklar halinde özetlenecektir.

### 2.6.1. Güneş enerjili kurutma

Evrenin varoluşundan bu yana dünya üzerindeki canlılığın kaynağı olan güneş sağladığı enerji ile insanlığın başlangıcından beri tarımsal ürünlerin kurutulmasında kullanılmaktadır. Güneş enerjisini kullanarak gerçekleşen kuruma süreçleri hem doğal hem de yapay kurutma sistemleri arasında sayılabilir. Bu yönüyle güneş enerjisinden faydalanma şekline göre aşağıdaki sınıflandırma yapılabilir;

- Doğal kurutma: Sebze, meyve, tahıl, tütün, et, balık gibi tarımsal ve hayvansal ürünlerin doğrudan güneş altında kurutulmasında kullanılan en eski kurutma şeklidir.
- Pasif kurutma: Doğrudan güneş altında olmasa da güneş kaynaklı ısı ve hava hareketinin neden olduğu atmosferik koşullarda materyalin kendiliğinden kuruması.
- Aktif kurutma: Uygun ekipmanlar kullanmak sureti ile faydalı ve kontrol edilebilir bir kurutma sisteminin enerji kaynağı olarak güneş enerjisinin kullanımına dayanan sistemle güneş enerjili aktif kurutma sistemleri olarak nitelendirilebilir.

Doğal ve pasif kurutma yakıtın az ve pahalı olduğu gelişmekte olan ülkelerde basit ve ucuz olması nedeni ile yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak bununla beraber böcek saldırısı, toz vs. ile kirlenme nedeni ile ürün kalitesinin düşük olması, uzun kuruma süresi, düzensiz güneş ışığına maruz kalma ve buharlaşan nemin yoğunlaşması nedeniyle zayıf ısı iletim hızı gibi nedenler bu yöntemin en büyük eksik tarafını oluşturmaktadır (Sontakke ve Salve, 2015). Güneş enerjisinden faydalanırken bu olumsuz tarafları da ortadan kaldırmak amacıyla tasarlanan oda tipi, baca tipi ve rüzgarla havalandırılmalı kurutucu tipleri aktif kurutma sistemleri için örnek verilebilir ((Toshniwal ve Karale, 2013).

### 2.6.2. Yapay kurutma sistemleri

Yapay kurutma sistemleri, genel olarak kurutma için kullanılacak ısı kaynağının kullanım şekline ve kurutulacak materyalin sisteme beslenme şekline göre sınıflandırılabilir. Isı enerjisinin aktarım şekline göre iletimle ısı transferi, taşınım ile ısı transferi ve ışınım ile ısı transferi tekniğini kullanan kurutucu tipleri mevcuttur. Kurutulacak materyalin kurutucuya

beslenme ve ürünün alınma şekline göre kesikli veya sürekli beslemeli kurutucular mevcuttur. Bu kesimde yapay kurutma sistemleri hakkında bilgi verilecektir.

### **2.6.2.1. İletimle ısıtılmalı kurutma sistemleri**

Isı kaynağı ile kurutma ortamının birbirinden iletken bir bölme ile ayrılması ve kuruma için gerekli ısının bu bölme üzerinden iletim yoluyla kurutulacak materyale aktarıldığı sistemlerdir. Bu aktarım mekanizmasından dolayı bu tür kurutma sistemleri dolaylı kurutucular olarak da adlandırılır. Materyal bünyesindeki nemi buharlaştırmak için gereken gizli ısı ayırıcı duvar üzerinden aktarılırken buharlaşan nem çevredeki hava tarafından taşınır.

Bu tür kurutma sistemleri, kurutma odasında ürünün etrafından akan hava miktarı düşük olduğundan farmasötik ürünler ve yanıcı malzemeler gibi hassas materyallerin kurutulmasında kullanılırlar. Bu sayede kirlenme ve kontaminasyon riskleri de en aza indirgenebilir. Ayrıca nispeten düşük üretim hacimlerinin toplu kurutulmasında kullanılırlar.

### **2.6.2.2. Taşınım ile ısıtılmalı kurutma sistemleri**

Bu tür kurutma sistemlerinde kurutma için gerekli ısı enerjisi taşınım (konveksiyon) yoluyla malzemeye aktarılır. Kurutulacak materyal ısı transfer ortamı ile doğrudan temasa zorlandığından bu tür sistemler doğrudan kurutucular olarak da adlandırılırlar. Gerekli olan ısıyı taşıyan sıcak hava veya inert gaz materyalin etrafından veya içinden üflenerek ısı transfer ortamı olarak görev yapar. Bu sıcak hava veya gaz ısının gıda ürünlerine aktarılmasının yanı sıra ve gıda ürünlerinden nemi etkili bir şekilde uzaklaştırmak için de kullanılır (Brennan ve Grandison, 2015).

Isı transfer verimlilikleri dolaylı kurutuculara göre daha yüksek olup sürekli beslemeli tipleri endüstride yaygın olarak kullanılırlar. Ancak bu tür sistemlerin işletme maliyetleri yüksek olup enerji kayıpları önemli problemlerindendir.

### **2.6.2.3. Işınımla ısıtmalı kurutma sistemleri**

Radyant kurutucular olarak da adlandırılan bu tip kurutma sistemlerinde kurutulan materyale doğrudan elektromanyetik dalgalar gönderilir. Bu sayede ısının transferi veya materyalin içinde üretimi sağlanmış olur. Materyalin derinliklerinde emilen veya materyalin içinde oluşturulan ısı bünyedeki nemin buharlaşmasına ve ortama aktarılmasına neden olurken daha az enerji kayıpları ortaya çıkmaktadır. Gıda ürünlerinin mikrodalga ısıtma kullanılarak kurutulmasının, gıda ürünlerinden nemin uzaklaştırılması için daha az zaman ve sıcaklık gerektiren daha kaliteli kurutulmuş ürünler ürettiği bulunmuştur (Kahyaoğlu ve ark., 2012). Bu tür kurutma sistemleri özellikle mikrodalga ve infrared ışınlarını kullanarak ısı enerjisi elde edilmesini amaçlamaktadır. Bunlardan mikrodalga tekniği ayrı bir başlık olarak verilecektir.

### **2.6.2.4. Dondurarak kurutma**

Gıda teknolojisi uzmanları enstitüsüne göre dondurarak kurutma, çözücünün (genellikle su) veya süspansiyon ortamının düşük sıcaklıkta kristalize edildiği ve süblimasyon yoluyla uzaklaştırıldığı işlemdir. Bu nedenle bir gıda ürününün dondurulması ve bu gıda bünyesindeki suyun doğrudan süblimasyon yoluyla uzaklaştırılması yoluyla kurutulması dondurarak kurutma olarak tanımlanır (Rey ve May, 2016). Düşük basınçta dondurmanın ardından düşük sıcaklıkta dehidrasyon neticesinde buzun süblimasyonu gerçekleştiğinden dondurarak kurutmaya liyofilizasyon veya kriyodesikasyon da denilmektedir (Prosapio ve ark., 2017).

Diğer kurutma yöntemlerine kıyasla düşük sıcaklık şartlarında mikroorganizma faaliyetlerinin durması nedeni ile oldukça kaliteli ürünler elde etme imkânı sunmasına rağmen dondurarak kurutma maliyetli bir yöntemdir (Fellows, 2017). Ayrıca dondurma süresinin uzun olması nedeni ile üründe çökme, aroma kaybı ve düşük rehidrasyon kapasitesi ile karakterize edilen sert ürün oluşumu gibi olumsuz tarafları da vardır (Rey ve May, 2016).

### **2.6.2.5. Ultrason kurutma**

Ultrason tekniği doğrudan tek başına bir kurutma tekniği olamamakla beraber gıda teknolojisinde kullanılan bir ön işlemdir. Yüksek frekanslı ve düşük enerjili ultrason ve düşük

frekanslı ve yüksek enerjili (güçlü ultrason) ultrason şeklinde iki uygulama şekli vardır (Baysal ve İçier, 2012). Gıda materyali içinde mikroskobik kanallar açarak kurutma sırasında iç direnci azaltarak suyun uzaklaşmasını kolaylaştıran bu teknik son yıllarda sıklıkla kullanılan ısı olmayan teknolojilerden biridir (Sunil ve ark., 2017). Ultrason enerji tek başına veya sıcak hava gibi diğer enerji araçları ile birlikte kullanılabilir.

#### **2.6.2.6. Ozmotik kurutma**

Ozmotik kurutma yarı geçirgen bir membran kullanılarak ve membranın her iki tarafında denge sağlanıncaya dek düşük konsantrasyonlu çözünmüş madde bulunduran ortamdaki suyun daha yüksek konsantrasyonlu ortama taşınması işlemidir (Tiwari, 2005). Rostogi ve ark. (2005) tarafından ozmotik kurutmanın ısı işlemeye karşı direnci artırdığı, enzimatik esmerleşmeyi önleyebildiği ve polifenol oksidazın aktivitesini inhibe ettiği bildirilmiştir. Ancak, ozmotik çözeltinin sıcaklığı ve konsantrasyonu, kullanılan ozmotik ajanın türü, işlem süresi, gıda materyalinin geometrisi gibi parametrelere bağlı olarak ozmotik kurutmanın ekonomikliği değişkenlik göstermektedir (Kamiloğlu ve ark., 2021).

#### **2.6.2.7. Elektrohiddrodinamik kurutma**

Elektrohiddrodinamik kurutma, özellikle tarım ürünlerinin kurutulmasında potansiyel olarak geniş uygulamaları nedeniyle son zamanlarda dikkat çeken yeni bir teknolojidir (Polat ve Izli, 2022). Düşük enerji tüketimine ek olarak, daha düşük büzülme, korunmuş renk ve besin içeriği ve daha yüksek bir rehidrasyon oranı gibi kurutulmuş ürünün kalitesi açısından çeşitli avantajlara sahip bir yöntemdir (Eseghbeygi ve Basiry, 2011; Alemrajabi ve ark., 2012; Kudra ve Martynenko, 2015)

Elektrohiddrodinamik kurutmanın çalışma prensibi öncelikle iyonik deşarj olgusuna dayanmaktadır. Kurulum için aralarında yüksek potansiyel farkı uygulanan iki elektrot gereklidir. Üretilen iyonlar daha sonra elektrik kuvvetinin etkisiyle toplama elektroduna taşınır. İyonlar elektrik alanı boyunca diğer elektroda doğru hareket ettikçe iyonlar diğer hava molekülleriyle çarpışarak iyonik rüzgar adı verilen bir hava akışı oluşturur. İyonik rüzgar, hedef nesnelere etrafındaki doymuş sınır katmanını bozar ve su moleküllerinin hedef nesnelere buharlaşmasına neden olur (Chen ve ark., 1994).

### 2.6.2.8. Akışkan yatak kurutma

Akışkan yataklı kurutucular granül haldeki gıda materyallerinin kurutulmasında kullanılırlar. Bu kurutma sisteminde, nemli materyal bir vidalı besleyici aracılığıyla bir kaba beslenir. Parçacıkları asılı veya akışkan halde tutmak için kabın tabanından önceden ısıtılmış bir hava akışı sağlanır. Bu akış, malzemenin ilerleme yönüne dik olarak gerçekleşir. Parçacıkların taşınmasına yardımcı olmak için yatay bir hava akımı da kullanılabilir. Parçacıkların ve havanın yoğun teması, daha hızlı bir kuruma işlemine neden olur. Nem taşıyan hava, kabın üst kısmından çıkar. Çıkan bu nemli hava akımının taşıdığı parçacıklar siklon ayırıcı veya torba filtre ile ayrılır. Kurutulan ürünler malzeme girişinden daha alçak bir noktada toplanır. Titreşimli akışkan yataklı kurutucularda, büyük boyutlu parçacıkların ve yapışkan ve yavaş beslemelerin akışkanlaştırılmasını arttırmak için titreşim düzeneği eklenir. Akışkan yataklı kurutucular özellikle tahıl ve hububat gibi toz ve taneli ürünlerde kullanılır. Bazı akışkan yataklı kurutucular toplu kurutmayı sağlayacak şekilde tasarlanmış ve yapılandırılmıştır.

### 2.6.2.9. Kırınım pencereli kurutma

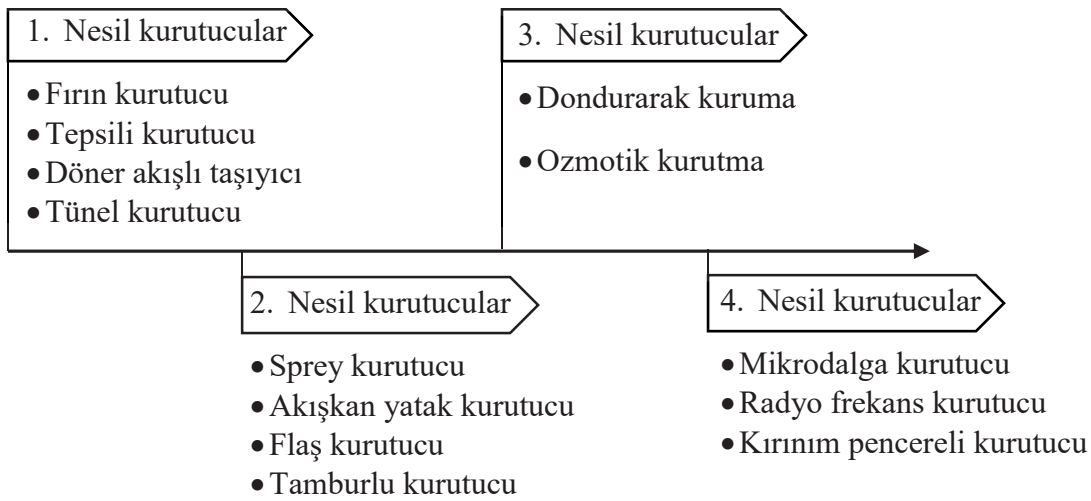
Kırınım pencereli kurutma olarak Türkçeleştirilen Refractance Window Drying orijinal isimli kurutma tekniği, taze bütün gıdaların sıvı, yarı sıvı ve dilim formlarının kurutulmasında kullanılan ve ilk olarak MCD Technologies Inc. (Tacoma, Washington, ABD) tarafından geliştirilmiş etkili ve gelişen bir kurutma teknolojisidir (Topuz ve ark., 2009). Son zamanlarda kırınım pencereli kurutma tekniği, mevcut kurutma tekniklerinin olumsuz yönleriyle karşılaştırıldığında kurutma parametreleri ve ürün özellikleri açısından ileri bir yöntem olarak görülmektedir. Tipik bir kırınım pencereli kurutma sisteminin ana bileşenleri arasında paslanmaz çelik başlık, plastik taşıma bandı, su buharı çıkışı, sıcak su pompası, su deposu ve ısıtma ünitesi bulunur. Bu kurutucu, üzerinde ince bir ürün tabakasının (0.2-1 mm kalınlığında) yer aldığı, Mylar gibi şeffaf polyesterden imal edilmiş, (95-98 °C sıcaklıkta sıcak su içeren sığ oluğun üzerine konumlandırılmış) bir taşıma bandından oluşmaktadır (Kudra ve Mujumdar, 2009).

Kırınım pencereli kurutma sisteminde kurutma sırasında iletim, konveksiyon ve radyasyon olmak üzere üç farklı ısı transferi meydana gelir. Sistemde genel olarak iletimle ısı transferi baskındır ancak ısı transferinin her şekli kurutma sisteminin farklı kısımlarında

mevcuttur. Sıcak su-film ara yüzünde iletim, konveksiyon ve radyasyon, film boyunca iletim ve radyasyon ve hava-film ara yüzünde konveksiyon mekanizmaları ile ısı aktarımı görülür.

Bant malzemesinin ara yüzündeki kırılmanın azalması nedeniyle ince tabaka halinde serili kurutulacak materyal, taşıma bandının yüzeyinde konumlandığından, malzemedeki nem, kızılötesi ışınımı hareket ettirmek için bir bölme oluşturur. Ürünün nemi azaldığında kızılötesi pencere yavaş yavaş kapanır ve kızılötesi ışınım, malzemenin kırılma indeksi nedeniyle kırılır ve iletim, ısı transferi için geçerli mekanizma haline gelir (Karadbhajne ve ark., 2019). Plastik düşük bir ısı iletkeni olduğundan, neredeyse kurumuş malzemelere küçük miktarlarda ısı aktarılır ve ince kurutma işlemlerine göre aşırı ısınma olasılığı önemli ölçüde azalır. Kurutucu malzeme üzerindeki ortamda hava akışıyla sağlanan konvektif soğutma nedeniyle, ürün sıcaklığı nispeten düşüktür ve nemli hava, kurutucudan dışarı atılır. Kurutma işleminin sonunda ürün sıcaklığını düşürmek için taşıyıcı bant soğuk su bölümü üzerinde hareket eder ve kazıyıcı bir bıçak bant üzerindeki ürününü ayırır.

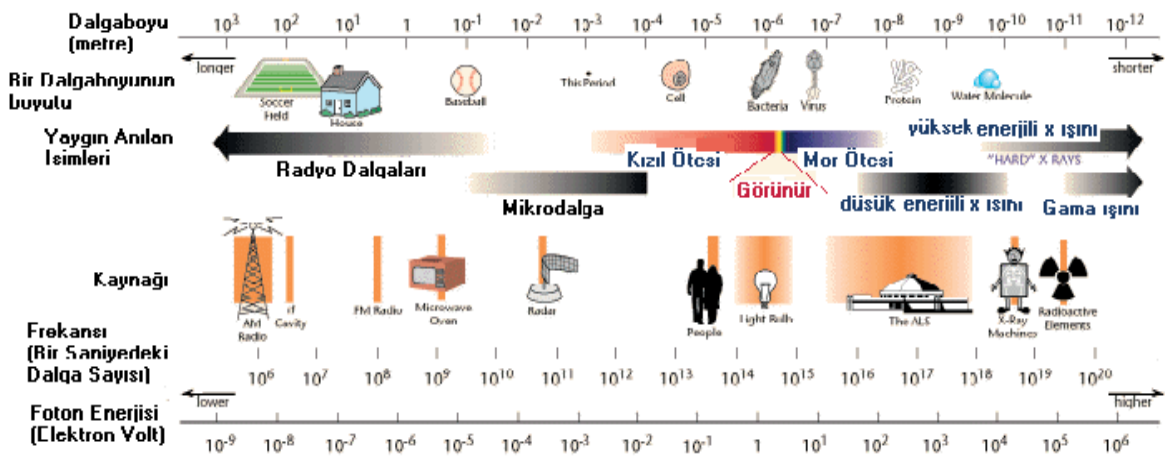
Kurutma teknolojileri birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü nesil olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma Şekil 2.6'da görülmektedir (Vega-Mercado ve ark., 2001). Bu kesimde farklı kurutma teknolojilerinden bazıları tanıtılmaya çalışıldı. Bu tez çalışmasında kullanılan kurutma tekniği olması nedeniyle mikrodalga teknolojisi ile kurutma yöntemi üzerinde detaylı bir şekilde durulacaktır.



Şekil 2.6 Kurutma teknolojileri tarihsel sınıflandırması

## 2.7. Mikrodalga Teknolojisi ve Kurutma Tekniği

Fizikte, elektrik yükü olan parçacıkların çevrelerinde oluşturdukları ve yüklü diğer parçacıklar üzerinde itme, çekme gibi kuvvet etkileri görülen alan elektromanyetik alan olarak tanımlanmaktadır. Bu alan içinde elektromanyetik ışıltı şeklinde yayılan dalgaların oluşturduğu enerji elektromanyetik radyasyon, dalga boyu ve frekans şeklinde tanımlanan özellikleri dikkate alınarak farklı ışımların yerlerini gösteren ölçeğe ise elektromanyetik spektrum denilmektedir. Elektromanyetik spektrum Şekil 2.7’de görülmektedir. Elektromanyetik spektrumu oluşturan elektromanyetik ışımlar, atom altı Gama ışınları ile kilometrelerce uzunlukta dalga boyuna sahip radyo dalgaları arasında yer almaktadır. Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumda dalga boyları 1 mm’ den 1 m’ ye kadar değişen ve frekansları 300 GHz ile 300 MHz aralığına karşılık gelen dalgalardır. Elektromanyetik spektrumun bu aralığını oluşturan mikrodalgalar, cep telefonu, radar, uydu iletişimi gibi cihazların çalıştığı frekans bölgesinde aynı zamanda ısı üretme veya ısıtma şeklinde tanımlayacağımız enerji oluşturmada da kullanılmaktadır. Farklı frekanslardaki mikrodalgaların kullanımından doğacak girişimlerin önlenmesi için Kuzey Amerika’ da Federal İletişim Komisyonu tarafından endüstriyel, bilimsel ve medikal amaçlı ekipmanlarda kullanılabilcek mikrodalgalar belirlenmiştir. Evsel kullanımda 2.45 GHz frekanslı cihazlara izin verilirken endüstriyel uygulamalarda 0.915 GHz, 2.45 GHz, 5.8 GHz ve 2.124 GHz frekanslarında çalışmaya izin verilmektedir (Mushtağ ve ark., 2014).



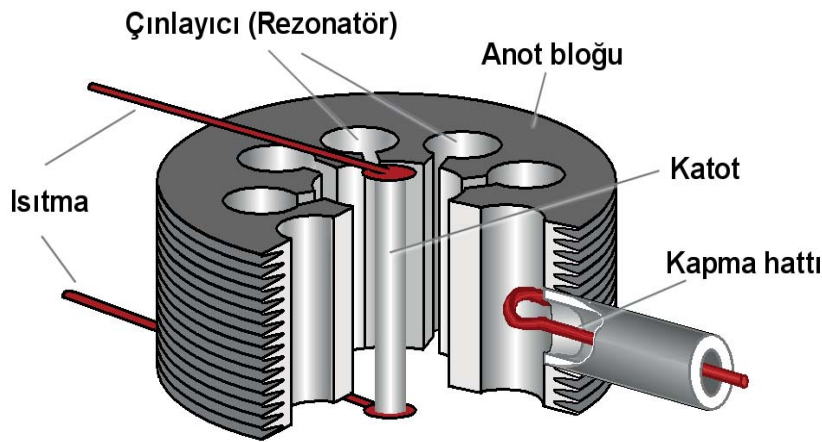
Şekil 2.7. Elektromanyetik spektrum (Erdem, 2007)

Mikrodalgaların ısıtma amaçlı kullanılabilirliği İkinci Dünya Savaşı döneminde radar cihazlarında kullanılan mikrodalgalar üzerinde yapılan çalışmaların genişletilmesi ile ortaya çıkmış olup ilk mikrodalga fırın Percy Spencer tarafından 1947 yılında icat edilmiştir. Zamanla evsel kullanıma uygun ilk mikrodalga fırın 1967 yılında Amana adlı bir şirket tarafından üretildi.

Geleneksel ısıtma süreçlerinde, ısı enerjisi malzeme yüzeylerinden taşınım, iletim ve ışınım yoluyla malzemeye aktarılır. Buna karşılık mikrodalga enerjisi, elektromanyetik alanla moleküler etkileşim yoluyla doğrudan malzemeye aktarılır. Isı transferinde enerji, ortaya çıkan termal gradyanlar yoluyla aktarılır, ancak mikrodalga ısıtmada, ısı transferinden ziyade elektromanyetik enerjinin termal enerjiye dönüşümü gerçekleşir. Enerjinin iletilme şeklindeki bu farklılık, malzemelerin işlenmesinde mikrodalga kullanmanın birçok avantajlarını ortaya çıkarmıştır. Mikrodalgalar malzemelere nüfuz edebildiğinden ve enerji biriktirebildiğinden, malzemenin hacmi boyunca ısı üretilebilir. Enerjinin aktarımı ısının yüzeylerden yayılmasına bağlı değildir ve bu nedenle kalın malzemelerin de hızlı ve eşit bir şekilde ısıtılmasını sağlamak mümkündür. Ayrıca, hacimsel ısıtmaya ek olarak, moleküler düzeyde enerji aktarımı mikrodalgalar vasıtasıyla malzemelerin seçici olarak ısıtılmasına imkan sağlar. Moleküler yapı, mikrodalgaların malzemelerle etkileşime girme ve enerji aktarma yeteneğini etkiler (Thostenson ve Chou, 1999). Mikrodalgaların bir materyale tesir ederek onu ısıtması o materyalin dielektrik (yalıtkanlık) özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Su gibi dielektrik kayıpları yüksek olan materyaller mikrodalgalardan çok daha fazla etkilenirler. Yüksek frekanslı mikrodalgalar su molekülleri ile temas ettikleri anda onların çok hızlı bir şekilde titreşmelerine neden olurlar. Su moleküllerinin bu titreşimleri ile ortaya çıkan sürtünme enerjisi suyun ısınmasına ve sıcaklığının yükselmesine neden olur. Bu sayede mikrodalga fırın içinde bulunan yiyecek sıcaklığındaki artma ile pişecek, ısıtılmak istenen malzeme ısınacaktır veya nemli bir materyalden nem uzaklaşacaktır.

Mikrodalga ısıtma için gereken yüksek güç ve frekansları elde etmek için kullanılan çoğu mikrodalga kaynağı vakum tüpleridir. Mikrodalga ısıtma için kullanılan bazı vakum tüpleri, magnetronları, yürüyen dalga tüplerini ve klistronları içerir. Ev tipi mikrodalga fırınlarda kullanılan magnetron tüpler verimli ve güvenilirdir (Kitagawa ve Kanuma, 1986). Magnetron tüpleri, elektromanyetik alanı oluşturmak için rezonans yapıları kullanılırlar ve bu nedenle yalnızca sabit frekanslı bir elektromanyetik alan oluşturma kapasitesine sahiptir. Değişken frekanslı mikrodalgada, elektromanyetik alanı oluşturmak için yürüyen dalga tüpleri kullanılır. Bir yönüyle magnetronlara mikrodalga fırınların beyni de diyebiliriz.

Ancak mikrodalga üretmek için tek başına magnetron yeterli değildir bu magnetronun çalışabilmesi için bir transformatöre, oluşan dalganın uygulama bölgesine ulaşması için bir dağıtıcıya ve bunların istenilen şartlarda çalışması için bir kontrol ünitesine ihtiyaç vardır. Şekil 2.8’de bir magnetronun kesiti görülmektedir. Magnetron tüplerinde anot, katoda göre çok yüksek bir potansiyele sahiptir (4000-6000 V). Bu potansiyel fark güçlü bir elektrik alanı üretir ve katot, gevşek bağlı değerlik elektronlarını uzaklaştırmak için ısıtılır. Elektronlar katottan çıkarıldıktan sonra elektrik alanı tarafından anoda doğru hızlandırılırlar. Bir magnetronda elektrik alanına dik bir manyetik alan oluşturmak için harici bir mıknatıs kullanılır ve uygulanan manyetik alan, anoda doğru hızlanırken elektron üzerinde çevresel bir kuvvet oluşturur. Kuvvet, elektronun spiral yönde hareket etmesine neden olur ve bu da dönen bir elektron bulutu yaratır. Elektronlar rezonans boşluklarından geçerken boşluklar elektron bulutunda salınımlar oluşturur ve salınımların frekansı boşlukların boyutuna bağlıdır. Elektromanyetik enerji, rezonans boşluklarının birinden, koaksiyel bir hat veya dalga kılavuzu fırlatıcı aracılığıyla iletim hatlarına bağlanır. Magnetron tüplerinin ortalama güç çıkışını kontrol etmek için yaygın olarak iki yöntem kullanılır. Magnetronun çıkış gücü, çalışma periyodu ayarlayarak veya katot akımı veya manyetik alan gücü ayarlayarak kontrol edilebilir. Ev tipi mikrodalga fırınlarda magnetron tam güçte çalıştırılır. Belirli bir süre boyunca, akım açılıp kapatılır ve ortalama güç azalır. Bu açma/kapama tipi kontrole genellikle görev döngüsü kontrolü denir. Sürekli mikrodalga gücüne ihtiyaç duyulursa, magnetron tüpünün çıkış gücü, katodun akım genliği değiştirilerek veya manyetik alanın yoğunluğu değiştirilerek ayarlanabilir.



Şekil 2.8. Magnetronun kesiti (URL-1)

### 3. CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ

Orijinal şekliyle Response Surface Methodology (RSM) olan yanıt yüzey yöntemi, cevap yüzey yöntemi veya metodolojisi gibi farklı isimlerle Türkçe ifade edilmiş şekilleri bulunan bu yaklaşım, temelleri Box ve Wilson (1951) tarafından atılan, süreçleri ve ürün tasarımlarını optimize etmek (en iyi hale getirmek) için kullanılan istatistiksel tasarım ve sayısal optimizasyon tekniklerinin bir bütünüdür. Ayrıca, bu yaklaşım ve sonrasındaki gelişmeler uzun yıllar boyunca ve hatta günümüzde de tam bir araştırma alanı haline gelen bir şeyi tanımladığı için değil, aynı zamanda mühendislerin, bilim adamlarının ve istatistikçilerin endüstriyel deneylere yaklaşımlarını dramatik bir şekilde değiştirdiği için de önemlidir. Kimyasal bir tepkime üzerindeki çalışmaları esas alan bir makalede, tarama, bölge arama, süreç/ürün karakterizasyonu ve süreç/ürün optimizasyonuna yönelik deneyleri kapsayan sıralı bir deney felsefesinin ana hatları çizilmek sureti ile bu yaklaşım uygulanmıştır (Myers ve ark., 2004).

Bundan sonrası için bu çalışmada yaklaşım, cevap yüzey yöntemi (CYY) olarak ifade edilecektir. CYY süreç ve ürün yönetimini optimize etmeyi amaçladığına göre bu sürece etki eden ve bu sürecin etkilenen değişkenleri olmalıdır. Bu sürecin etki eden bağımsız değişkenleri girdi değişkenleri ve etkilenen bağımlı değişkenleri cevap değişkenleri olarak adlandırılmaktadır. Bu değişkenleri dikkate alarak, CYY çok sayıda girdi değişkeni ile bir veya daha fazla cevap değişkeni arasındaki ilişkiyi inceleyen ve cevap değişkeni için en iyi (optimum) koşulları elde etmeyi hedefleyen yaklaşım yöntemlerini kapsamaktadır diyebiliriz.

DeneySEL çalışmalarda klasik yaklaşımla, bağımsız değişken sayısı (bu faktör olarak nitelenmektedir) ve her bir bağımsız değişkenin alacağı değerlerin sayısı (bu düzey olarak nitelenmektedir) ve tekrarlanacak deney sayısı da dikkate alınarak ilgili çalışmanın nasıl bir deneme desenine sahip olacağı ve ne kadar deneme yapılacağı ortaya koyulabilir. Tek faktörlü deneySEL çalışmalardan elde edilen veriler varyans analizleri ve regresyon yaklaşımları ile değerlendirilebilirler. Ayrıca tek faktörlü deneylere ait verilerin değerlendirilmesi kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Ancak iki veya daha fazla faktörlü ve her bir faktörün aynı sayıda düzeylerinden oluşan denemeler söz konusu olunca hem deneySEL çalışma hem de verilerin değerlendirilmesi daha da güçleşmektedir. Örneğin kurutma ile ilgili olarak, kuruma süresi ve kurutma sıcaklığı faktörlerinin kurutma sonunda kalan katı madde miktarı (cevap) üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışma yapılacaktır

olsun. Bu çalışmada faktör düzeyleri deneysel çalışmada kullanılan gerçek değerler olacaktır. Bu deneysel çalışma iki faktörlü deneysel bir tasarım olarak adlandırılır. Burada amaç sadece her bir faktörün yanıt değişkeni üzerindeki etkisini belirlemek değil aynı zamanda bu iki faktör arasında anlamlı bir etkileşim olup olmadığını da belirlemektir. Faktör sayısı  $k$  ile gösterilecek şekilde iki faktörlü iki düzeyli bir çalışmada  $2^k = 2^2 = 4$  adet deneysel verinin etkileşimli değerlendirilmesi söz konusu iken faktör ve düzey sayısının artması ile yapılacak değerlendirmenin hacmi ve karmaşıklığı artacaktır. Faktöriyel deneysel tasarım sürecinin kolaylaştırılması yani daha az deney yaparak zamandan ve maliyetten tasarruf ederek çok daha fazla değerlendirme yapmaya imkân sağlanması için geliştirilen yöntemler deneysel tasarım ve cevap yüzey yöntemi altında değerlendirilmektedir. Cevap yüzey yöntemi sayesinde basit deneysel modeller oluşturularak sistemin cevabını etkileyen değişkenler eş zamanlı olarak incelenebilmekte ve sistemin girdi değişkenlerinin değişimlerine karşı verdiği cevap en iyi şekilde tanımlanabilmektedir (Koç ve Kaymak-Ertekin, 2010).

Deneysel bir çalışmanın amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Montgomery, 2013);

1. Cevap değişkeni üzerinde en fazla etkisi olan girdi değişkenlerini belirlemek
2. Cevap değişkeninin neredeyse her zaman istenen nominal değere yakın olmasını sağlayacak girdi değişkenleri değerlerini belirlemek
3. Cevap değişkenlerindeki değişkenliğin en az olmasını sağlayacak girdi değişkenlerinin değerlerini belirlemek
4. Kontrol edilemeyen değişkenlerin etkilerinin en az düzeye indirilmesi için girdi değişkenlerinin değerlerini belirlemek

Bu amaçları yerine getirmek için araştırmacının bir yaklaşım ortaya koyması gerekmektedir. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini her bir değişken değerini dikkate alarak gözlemlemek klasik deneysel yaklaşım olup “tam faktöriyel tasarım” olarak adlandırılır. Şöyle ki 2 bağımsız değişkenin (faktör) 2 değeri (düzey) için ortaya çıkacak olan deney sayısı  $2^2 = 4$  adet olacaktır. Faktör ve düzey sayısındaki artışa bağlı olarak yapılacak deney sayısı daha da artacaktır. Çok sayıda faktör ve düzey nedeni ile oluşacak çok sayıda deneme yükünü hafifletmek için tam faktöriyel tasarımın yalnızca bir alt kümesinin kullanılması mümkün olup bu yaklaşım ise “kesirli faktöriyel tasarım” olarak ifade edilmektedir. Faktörler ve bu faktörlerin düzeyleri ile cevap değişkenleri arasında

makul bir deneysel tasarım ile ilişkileri ortaya koymak bir takım istatistiksel yaklaşımları gerektirdiği için ancak bilgisayar ve yazılım destekli olarak yapılması işleri kolaylaştırmaktadır. Bu amaçla kullanılan paket yazılımlar standart dizayn, tam veya kesirli faktöriyel dizayn, Plackett-Burman, merkezi kompozit, Box-Behnken dizayn yaklaşımlarını uygulayabilme imkânı sunmaktadır.

CYY,  $k$  adet bağımsız değişkenin cevap değişkeni üzerindeki etkisini incelemek üzere genel olarak Eş. 3.1' de görülen çoklu regresyon denklemi ile ifade edilebilir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (3.1)$$

Burada  $Y$  cevap değişkenini,  $X_1, X_2, \dots, X_k$  kodlanmış bağımsız değişkenleri,  $\beta_0$  denklem sabitini,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  kısmi regresyon katsayılarını,  $\varepsilon$  ise hata terimini ifade etmektedir. Eş. 3.1 denklemi çoklu doğrusal regresyon denklemi olup iki bağımsız değişkenli bir sitemde bağımsız değişkenlerin birbirleri ile interaksiyonunu içeren Eş. 3.2' deki birinci dereceden model denklemi de yazılabilir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (3.2)$$

Bu çoklu regresyon denkleminde bağımsız değişkenlerin ikinci derecen (kuadratik) ve/veya üçüncü dereceden (kübik) terimleri yazılarak daha karmaşık polinom şeklinde bir model denklemi de yazılabilir. Eş. 3.3' de ikinci dereceden terimleri ve interaksiyonları içeren en genel model denklemi görülmektedir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3.3)$$

Bu eşitliklerde görülen  $X'$  ler kodlanmış değerler olup değişkenlerin gerçek değerlerinden aşağıdaki eşitlik ile belirlenmektedir.

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{S_i} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte,  $x_i$  çalışma aralığında değişkenin gerçek değerini,  $x_{i0}$  çalışma aralığı merkez değeri,  $S_i$  ise aralık adım büyüklüğünü ifade emektedir.

CYY' de yukarıda belirtildiği üzere farklı dizayn yaklaşımları bulunmakla beraber bu tez çalışmasında Box-Behnken dizayn yaklaşımı kullanıldığı için kısaca bu yaklaşımdan bahsedilecektir. Box-Behnken deneysel dizayn yaklaşımı tam veya kesirli faktöriyel tasarıma dayanmayan karesel bir dizayn yaklaşımıdır. Her bir bağımsız değişken (faktör) için en az üç düzeye ihtiyaç duymaktadır ve merkezi kompozit dizayn yaklaşımına göre daha az deneme sayısı içerir. Ancak deneysel bölgede köşe noktalarının belirlenmemesi elde edilecek modelin yeterliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. İlk faktörlerin incelenmesi sırasında diğer faktörlerin sabit bir değerde tutulması durumunda dizayn üzerinde her bir faktörün etkisinin sıralı olarak incelenmesine imkân sunmaktadır.

CYY' de uygulana tasarıma göre bağımsız değişkenlerin cevap değişkeni üzerindeki etkileri grafikler kullanılarak değerlendirilebilmektedir. Bu amaçla yüzey (surface) eğrileri ve kontur (contour) grafikleri ile iki değişken dikkate alınırken varsa diğer değişkenler sabit tutularak cevap değişkeninin aldığı değerler görselleştirilebilmektedir. Model denkleminin doğrusal veya ikinci/üçüncü dereceden olmasına göre yüzey grafikleri düzlem veya eğrisel olabilirken kontur grafiği de doğrusal veya eğri şeklinde olabilmektedir.

Tespit edilmiş bağımsız değişken değerlerine göre önerilen model denkleminde deneysel veriler ile uyumlu model katsayıları en küçük kareler yaklaşımı ile belirlenebilmektedir. Her bir değişkenin bağımsız olarak ve/veya interaksiyon halinde cevap değişkeni üzerindeki etkileri varyans analizi (ANOVA) testleri ile istatistiksel olarak anlaşılmaktadır.

#### 4. PORTAKAL MEYVESİ

Ülkemizde birçok kişinin severek tükettiği ve kış aylarının hem lezzet hem de besleyici özellikleri yönüyle en çok tercih edilen meyvesi olan portakal için turunçgiller ailesinin en önemli bireyidir diyebiliriz. Esas itibarı ile turunçgil türlerinin anavatanını ve gen merkezini Himalaya'ların güneydoğu etekleri, Assam'ın doğu bölgesi, Myanmar'ın kuzeyi ve Çin'in Yunnan eyaletinin batısını kapsayan bölgeler oluşturmaktadır diyebiliriz. Tarihsel olarak çeşitli dönemlerde gerçekleşen savaşlar ve ticaret yollarının teşekkülü ile portakal meyvesi Asya ve Avrupa ülkelerine yayılmıştır ve tanınırlığı zamana bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Bu ticaret süreçleri ile birlikte Türkiye' ye portakal meyvesi Portekiz (Portugal) üzerinden gelmiştir ve bu nedenle de dünya dillerinde farklı isimler alırken Türkiye' de Portekiz' den gelen meyve anlamına gelen portakal olarak adlandırılmıştır (URL-2). Tüm dünyada üretilen turunçgil miktarının içinde portakal üretimi % 49.46' dır ve portakal meyvesinin ana vatanı olmamakla beraber 2019 yılı itibari ile Türkiye' de portakal üretimi dünya portakal üretiminin yaklaşık % 2.28' ine karşılık gelmektedir (FAO, 2020). 2023 yılı verilerine göre Türkiye' de portakal üretimi yaklaşık 2.3 milyon ton ile toplam meyve üretimi içinde % 8.4 paya sahiptir (URL-3).

Türkiye' de üretilen portakalların % 77' sini Washington Navel portakal çeşidi, % 17' sini Valencia late ve diğer çeşitler, % 4.3' ünü Yafa portakal çeşidi oluşturmaktadır. Bu türler arasında az miktarda da olsa Taracco, Moro (Kan Portakalı), Hamlin, Alanya dilimli, Finike Yerli (sofralık ve usarelik bir çeşittir) portakal türleri üretilmektedir. En fazla üretim oranına sahip olan Washington Navel hem iç pazarda hem de dış pazarda en çok aranan ve tercih edilen portakal çeşidi olup dünyadaki en iyi Washington Navel portakalları ülkemizde Mersin bölgesinde üretilmektedir.

Göbekli portakal olarak da anılan Washington Navel portakalının en önemli özelliği C vitamini açısından çok zengin ve taşımaya ve depolamaya elverişli olmasıdır. Hem bu özellikleri hem de ülkemizde en çok üretilen portakal türü olması nedeniyle bu tez çalışmasında Washington Navel portakalı tercih edilmiştir.

## 5. LİTERATÜR BİLGİSİ

Yiyecekleri uzun süreli muhafaza etme yöntemleri arasında en eskisi olan kurutma yöntemine dair literatürde oldukça çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar hem işledikleri materyal (meyve, sebze, tahıl ürünleri, et vs.) hem de kurutma tekniği (güneşte, iletim-taşınım esaslı ısıtma, mikrodalga, elektrohidrokinamik vs.) yönleri ile farklılıkları olan çalışmalardır. Bu başlık altında özellikle mikrodalga tekniği ile kurutma ve portakal kurutmaya dair yapılmış çalışmalardan özetle bahsedilecektir.

Pırasa, kırmızı biber, yeşil biber, patlıcan, soğan ve patates gibi çeşitli sebzelerin mikrodalga tekniği ile kurutulmasına dair Tunçer (1990) tarafından yapılan çalışmada uygun güç kademesinin seçilmesi ile kalite kaybı olmaksızın çok kısa sürede kurutmanın mümkün olduğu bildirilmiştir.

Sıcak hava ve mikrodalga ile kurutma yönteminin kombine edilerek kullanıldığı bir sistemde sultani çekirdeksiz üzümleri kurutulmuş ve kuruma hızı üzerine kimyasal ön uygulamanın etkisi araştırılmıştır (Tulasidas ve ark., 1993).

2.45 GHz frekanslı farklı mikrodalga güç seviyelerinde ince tabakalar halindeki soya fasulyelerinin kuruma davranışlarının incelendiği bir çalışmada 0.76, 0.57 ve 0.36 W/g absorpsiyon hızlarında çalışılmıştır (Adu ve ark., 1994). Soya fasulyelerinin kuruma hızının absorpsiyon gücündeki azalma ile azaldığı bildirilmiştir.

İşlenmiş pirinç ve diğer tahıl ürünlerinin mikrodalga fırında kurutulmasına yönelik çalışmada 420 W mikrodalga gücünde yaklaşık 15 dakikalık bir kurutma süresinin kabuklu pirinç için yeterli olduğu ifade edilmiştir (Chen ve Tsao, 1995).

Funebo ve Ohlsson (1998) tarafından elma ve mantarın mikrodalga tekniği ile kurutulması düşük mikrodalga güçlerinde incelenmiştir. Sıcak havalı kurutma ile mikrodalga destekli sıcak hava kurutma tekniklerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada hava akış hızı, mikrodalga çıkış gücü ve hava sıcaklığı bağımsız değişkenler olarak dikkate alınmıştır. Kalite parametreleri olarak tekrar sus tutma kapasitesi, hacim yoğunluğu ve renk değişimi bağımlı değişkenler olarak belirlenmiştir. Düşük hava hızlarının ürün renginde kahverengileşmeye sebep olduğu ve minimum hava hızının 1 m/s olması gerektiği belirtilmiştir.

2.45 GHz frekanslı farklı güç seviyelerinde mikrodalga etkisi altında yeşil biberin kuruma karakteristiği belirlenmeye çalışılmıştır (Yaşar, 1999). 140, 280, 420, 560 ve 700 W mikrodalga güç seviyeleri uygulanarak kuruma sürelerinin 9-22 dakika arasında değiştiği

tespit edilmiştir. Sıcak hava ile kurutmanın yapıldığı şartlarda 70 °C ve 105 °C kurutma sıcaklıkları için kuruma sürelerinin sırasıyla 720 ve 360 dakika olduğu belirtilmiştir. Ayrıca mikrodalga ile kurutmanın yeşil birerde daha aza C vitamini kaybına yol açtığı gözlemlenmiştir.

Mikrodalga, sıcak hava ve mikrodalga ile son kurutma evrelerini takip eden kurutma düzeneği ile farklı kalınlıklardaki muz örneklerinin kuruma davranışı Maskan (2000) tarafından incelenmiştir. 4.3, 7.4 ve 14 mm kalınlıklardaki muz örnekleri 1.45 m/s hava hızı ve 60 °C sıcaklığa ayarlı kurutucuda kurutulmuştur. Mikrodalga ile kurutmada ise 4.3 mm kalınlıktaki muz örnekleri 350, 490 ve 700 W mikrodalga çıkış güçlerinde ve sabit 490 W mikrodalga çıkış gücünde 4.3, 7.4 ve 14 mm kalınlıklarda kurutulmuştur. Son olarak ise sıcak hava ile kurutulan muz örnekleri mikrodalga ile kurutulmuştur. 4.3 mm kalınlıktaki muz örnekleri 60 °C sıcaklıkta ve 1.45 m/s akış hızında hava ile 1.25 kg su/kg kuru madde nem içeriğine kadar kurutulduktan sonra 350 W çıkış gücünde mikrodalga ile kurutulmuştur. Sıcak hava ile kurutma sürecinde başlangıçta kuruma hızı yüksek iken nem içeriği azaldıkça sıcak hava ile kurutmanın avantajlı olmadığı ancak sonraki aşamada mikrodalga çıkış gücü ile orantılı olarak kuruma hızının dikkate değer oranda arttığı belirtilmiştir.

Raghavan ve Silveira (2001) mikrodalga ve konveksiyonla ısıtılmalı kurutma sistemlerinin kombine edildiği bir sistemde ön işleme tabi tutulan çileklerin osmotik olarak kurutulmasını incelemişlerdir. Kuruma sürecinde ortaya çıkan büzülme oranının nem oranıyla lineer bir ilişkiye sahip olduğu buna karşın çileklerin eşdeğer çapının nem oranıyla ters logaritmik bir ilişkiye sahip olduğu ifade edilmiştir.

Kemahlıoğlu ve Baysal (2002) tarafından mikrodalğanın ilk ticari kurutma uygulaması patates çipslerinin son kurutma işleminde kullanılmıştır. Çips üretiminde iyi bir renk elde edilmesi için kızartma uygulamasını takiben mikrodalga-sıcak hava kurutması uygulanmıştır. Bu yolla çipslerde kuruma oranındaki homojenlik ve artışa bağlı olarak yağ oranı %5 azaltılması da başarılmıştır. Ancak patates çeşitlerine göre farklı koşullarda uygulamalar gerektiğinden, teknik yetersizlikler nedeniyle geniş çaplı kullanılmamıştır.

Sarımsak dişlerinin mikrodalga ile kurutulmasının incelendiği bir çalışmada, ayarlanmış mikrodalga gücü, hava sıcaklığı ve hava hızının sağlandığı bir laboratuvar tipi mikrodalga- konveksiyon kurutucu geliştirilmiştir (Sharma ve Prasad, 2006). Hava sıcaklıkları 40, 50, 60, 70 °C, hava hızları 1.0 ve 2.0 m/s ve mikrodalga güç seviyeleri 10, 20, 30 ve 40 W olarak uygulanan kurutma denemelerinde aynı büyüklükte sarımsak dişleri kullanılmıştır. Mikrodalga-konveksiyon kurutma, 1.85 kg su /kg kuru madde olan başlangıç

nem içeriğinden 0.06 kg su/kg kuru madde olan güvenilir seviyeye kadar azaltılarak tamamlanmıştır. Taze ve kurutulmuş sarımsak dişlerinin kalite özellikleri, renk ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  değerleri), tat etki derecesi ve C vitaminine göre değerlendirilmiştir. Yeniden su alma oranı kurutulmuş sarımsak dişlerine göre belirlenmiştir. Mikrodalga gücünün 40 W, hava sıcaklığının 70 °C ve hava hızının 1.0 m/s olduğu durumlarda iyi kalitede kurutulmuş sarımsak dişlerinin elde edildiği ve kurutma işleminde düşük enerji tüketim değerlerine ulaşıldığı vurgulanmıştır.

Nane yapraklarının, nem içeriği, nem oranı, kuruma hızı, kuruma süresi ve etkin nem yayılma gücü (difüzyon) üzerine mikrodalga kurutma tekniğinin etkilerinin araştırıldığı çalışmada, mikrodalga çıkış gücünün (180-900W) artması ile kuruma süresinin 12.50'den 3.0 dakikaya azaldığı ve örnek miktarının (25–100 g) artmasıyla kuruma süresinin 6.60'dan 16 dakikaya arttığı belirtilmiştir (Özbek ve Dadalı, 2007). Kinetik parametreleri belirlemek için, kuruma süresine karşın, başlangıç ve son nem içerikleri ve denge nem içeriği arasındaki oranın farklılıklarına dayalı çeşitli modeller uygulanmıştır. Uygulanan bu modeller arasında, yarı teorik Midilli modeli tüm kurutma koşullarında en uygun model olarak belirlenmiştir.

Portakal meyvesinin yenilebilir kısmı, kabuğu ve çekirdeği ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcut olup aşağıda bu çalışmalardan bazılarına yer verilecektir.

Garau ve ark. (2006) tarafından portakal kabuklarının kuruma kinetiği ve fonksiyonel özellikleri üzerine yapılan çalışmada laboratuvar ölçekli bir sıcak hava ile kurutma düzeneği kullanılmıştır. Farklı hava sıcaklıkları ve hava akış hızı koşullarında nem içeriğindeki azalma ile etkin difüzyon katsayısının azaldığı uygun matematiksel model önerisi ile gösterilmiştir.

Laboratuvar tipi bir tünel kurutucu kullanarak farklı kalınlıklarda portakal dilimlerinin farklı hava sıcaklığı ve hava akış hızı koşullarında kuruma davranışı Rafiee ve ark. (2010) tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmada sıcaklıktaki artış ve hava akış hızındaki artmanın etkin difüzyon katsayısı üzerinde pozitif yönlü bir etkisi olurken portakal dilim kalınlığının önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Karaaslan ve Erdem (2014) portakal dilimlerinin kuruma süresi ve nem oranı üzerine ayrı ayrı mikrodalga ve sıcak hava ve her ikisinin birlikte kombinasyonunun kullanıldığı kurutma koşullarının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, kurutma verileri üzerine dokuz farklı matematiksel model denklemini uygulamak suretiyle Midilli-Küçük modelinin verileri en iyi oranda temsil eden model olduğu belirtilmiştir.

Benzer şekilde sıcak hava ile kurutma yöntemi ile zorlanmış konveksiyon koşullarında farklı hava sıcaklığı ve hava akış hızlarının soyulmuş portakalların kuruma

davranışı üzerine etkileri Rewatkar ve ark. (2019) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmayı benzerlerinden farklı kılan tarafı eşdeğer büyüklükteki portakalların dilimlenmeden bütün halde kurutulmuş olmasıdır. Ancak bu çalışmada dilim halde kurutma ile bütün halde kurutma arasında mukayeseye yer verilmemiştir.

Mikrodalga ve konvektif kurutma şartlarında sabit kalınlıktaki portakal dilimlerinin kuruma kinetiği ve termal özellikleri kurutmanın bazı fitokimyasal parametreler üzerine etkileri Alibas ve Yilmaz (2022) tarafından incelenmiştir. Konvektif kurutmada 50, 75, 100 ve 125 °C sıcaklıklarda ve mikrodalga kurutmada ise 90-1000 W aralığında sekiz mikrodalga çıkış gücünde deneyler yürütülmüştür. Elde edilen veriler ve değerlendirmeler ile yüksek ve düşük mikrodalga çıkış güçlerinde enerji tüketiminin oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. Hem kurutma şartları hem de renk değişimi, kahverengileşme ve C vitamini içeriği gibi parametreler göz önüne alındığında en uygun kurutma metodunun 350-500 W orta güç seviyelerinde mikrodalga ile kurutma olduğu sonucuna varılmıştır.

Özkan-Karabacak ve ark. (2023) tarafından yapılan güncel bir çalışmada 60, 70 ve 80 °C sıcaklıklarda hava ile kurutma işleminden önce 30 dakika süre ile 90 W çıkış gücünde mikrodalga ile ön işlem uygulamak sureti ile portakal dilimlerinin kurutulması incelenmiştir. Bu çalışmada dairesel geometriye sahip portakal dilimleri kabukları soyulmadan kurutulmuş ve taze meyve ile kuru portakal ürünü fenolik madde, antioksidan kapasitesi, askorbik asit içeriği ve renk değişimi gibi kalite özellikleri yönüyle kıyaslanmış ve elde edilen kuruma kinetiği verileri farklı matematiksel model denklemleri ile temsil edilmiştir. Fenolik madde, antioksidan kapasitesi ve askorbik asit içeriği yönüyle kuru ürünün içeriğinin taze ürüne kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Mikrodalga ön işlemi sonrasında kurutma ile elde edilen ürünlerin toplam ve bireysel fenolik madde içeriği ve antioksidan kapasitesi sadece sıcak hava ile kurutma ile elde edilen ürünlere kıyasla daha yüksek olurken askorbik asit içeriğinin daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Mikrodalga ön işlemlili sıcak hava ile kurutma yönteminin verimli bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

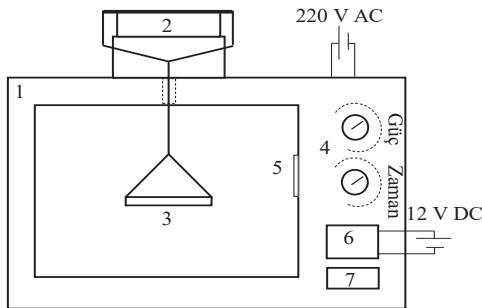
## 6. MATERYAL ve YÖNTEM

### 6.1. Materyal

Bu çalışmada kurutulacak materyal olarak Washington Navel (*Citrus sinensis* [L.] Obs.) türü portakal meyvesi kullanılmıştır. Dünyada en iyi Washington Navel ekolojisinin ülkemizde Mersin ilinde olması ve bu türün çokça ve rahatlıkla bulunabilir ve dayanıklı bir olması tercih edilmesinde en önemli nedenlerdir. Elazığ ilinde yerel bir marketten temin edilen portakallarda mümkün mertebe aynı boyutlarda ve dış görünüş olarak aynı canlılıkta görüneneler tercih edilmiştir. Portakal meyveleri planlanan deneysel çalışma düzenine göre kullanılmak üzere +4 °C bu dolabında saklandı. Portakal meyvelerinin başlangıç nem içeriği tayini 105 °C sıcaklıkta nem tayin cihazı (AND MX-50, Japan) ile yapıldı. Taze portakal örneklerinin başlangıç nem içeriği 4.55 kg nem/kg kuru madde olarak belirlendi. Kurutmak üzere kullanılan portakal örnekleri sap-çiçek eksenine dik olacak şekilde meyve dilimleyicisi kullanılarak 5 mm kalınlıkta dairesel dilimler halinde kesildi. Elde edilen dilimler sadece yenilebilir kısmının kurutulması amacıyla kabukları meyve kısmından ayrıldıktan sonra kurutma işlemine tabi tutuldu.

### 6.2. Deney Düzenegi ve Kurutma Yöntemi

Portakal dilimlerinin kurutulması için Şekil 6.1'de görülen modifiye edilmiş ev tipi bir mikrodalga fırın (SIEMENS HF12G240 220V 50Hz, Almanya) kullanıldı. Bu mikrodalga fırın 2.45 GHz frekansta maksimum mikrodalga çıkış gücü 800 W olan bir fırın



(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 6.1. Mikrodalga kurutma deney düzenegi

olup fabrika ayarlarına göre belli mikrodalga çıkış güçlerinde çalışmaya imkân sunmaktadır. Deneysel çalışmada istenilen mikrodalga çıkış gücünü elde edebilmek için fırın kontrol kartı ile uyumlu çalışacak şekilde Şekil 6.1’ de 6 numara ile gösterilen harici, kontrol edilebilir zaman kontrol devresi kullanıldı. Bu kontrol kartı ile istenilen süreler boyunca mikrodalga fırının güç üretmesi veya devre dışı kalması sağlandı. Ev tipi konvansiyonel mikrodalga fırınlar maksimum çıkış gücünün belli süreler için içindeki materyale tesir etmesi ile kısmi güç kullanılarak pişirme işlevini yerine getirmektedir. Tasarımları itibari ile mikrodalga fırınlarda 30 saniyelik bir zaman diliminin belli bir kısmında magnetron tam güçte çalışabilirken geriye kalan kısmında ise sıfır güç düzeyinde kalmaktadır ve bu çevrim istenilen süre kadar (5, 10, 30 dk vb.) tekrarlanabilmektedir. Bu çalışmada hem mikrodalga gücünün zaman kontrollü olarak istenilen değere ayarlanması hem de 30 saniyeden farklı çevrim sürelerinin elde edilebilmesi sağlandı. Portakal dilimlerinin kuruması sırasında kütle değişimlerini takip edebilmek üzere fırının üst kısmına 0.01 g hassasiyetli bir elektronik terazi (SHIMADZU BL-3200H, Japonya) yerleştirildi ve fırın içindeki malzemeyi tartabilmek için teraziyle bağlantılı bir sarkaç terazinin alt kısmına doğru uzatıldı. Kurutulacak portakal dilimlerini üzerine yerleştirmek üzere torna tezgâhında 120 mm çaplı ve 5 mm derinlikli teflon (PTFE) bir tabak hazırlandı. Hazırlanan bu tabak üç noktadan misina ile bağlanarak bir kefe şeklinde elektronik terazi üzerin yerleştirilmiş taşıyıcının sarkacına asıldı. Bu sayede fırının içinde bulunan teflon tabak fırına temas etmeden teraziye bağlandı. İstenilen mikrodalga gücü, kurutma çevrim süresi ve örnek kütlesi şartlarında kurutuma deneyleri gerçekleştirildi. Örneklerin kütle değişimleri 2 dakikalık periyotlarla kaydedildi. Ardışık iki ölçüm için, portakal örneğinin nem içerikleri arasındaki fark 0.02 kg su/kg kuru madde değerinin altında düşünceye kadar kurutmaya devam edildi.

### 6.3. Veri Değerlendirme ve Deneysel Tasarım

#### 6.3.1. Veri değerlendirme

Elde edilen deneysel verilerden yararlanarak aşağıdaki eşitlikler kullanılarak portakal örneklerinin kuruma davranışını yansıtan bulgular elde edildi.

$$M = \frac{m_t - m_{km}}{m_{km}} \quad (6.1)$$

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6.2)$$

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (6.3)$$

Bu eşitliklerde  $m_t$  ve  $m_{km}$  sırasıyla herhangi bir andaki örnek kütlelerini ve kuru madde kütlelerini (kg) ifade etmektedir.  $M$  nem içeriğini (kg nem/kg kuru madde),  $M_t$ ,  $M_0$  ve  $M_e$  ise sırasıyla herhangi bir andaki, başlangıçtaki ve denge durumundaki nem içerikleridir.  $MR$  ise boyutsuz nem oranını ifade etmektedir. 6.2 eşitliğinde bulunan  $M_e$  (denge nem içeriği) sıfır kabul edilmek sureti ile 6.3 eşitliği elde edildi (Alibas ve Yilmaz, 2022).

Portakal örneklerinin kuruma hızını (nem kaybetme hızını) elde etmek için 6.4 eşitliği kullanıldı;

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (6.4)$$

6.4 eşitliğinde  $M_t$  ve  $M_{t+dt}$  sırasıyla  $t$  ve  $t+dt$  anlarına ait nem içeriklerini,  $t$  (s) süreyi,  $dt$  (s) ise ardışık iki ölçüm arasında geçen süreyi ifade etmektedir.

Etkin difüzyon katsayısını ve aktivasyon enerjisini belirlemek üzere Eş. 6.5' de verilen Fick' in difüzyon denklemi deneysel verilere uygulandı (Yoğurtçu, 2019).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left(-\frac{(2i+1)^2 D_{eff} \pi^2}{4 L^2} t\right) \quad (6.5)$$

Uzun kurutma süreleri için Eş. 6.5' deki Taylor serisini sadece ilk terimi dikkate alınarak 6.6 eşitliği ve bununda logaritmik şekli olan 6.7 eşitliği yazılabilir.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4 L^2} t\right) \quad (6.6)$$

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4 L^2} t\right) \quad (6.7)$$

Bu eşitliklerde  $D_{eff}$  ( $m^2/s$ ) etkin difüzyon katsayısını,  $L$  (m) dilim yarı kalınlığını,  $t$  (s) süreyi ifade etmektedir. 6.7 eşitliği bir doğru denklemi olup  $t'$  ye karşılık  $\ln MR$  değerlerinin grafiğe aktarılması sonucu elde edilen doğrunun eğiminden faydalanarak  $D_{eff}$  değeri bulunabilmektedir.

Kuruma hız sabitinin bulunması için Tablo 2.2' de görülen Page model denklemi kullanıldı.

$$MR = \exp(-k t^n) \quad (6.8)$$

Eş. 6.8' deki  $k$  ( $dk^{-n}$ ) kuruma sabiti ve  $n$  model sabitidir.  $k$  ve  $n$  değerleri STATISTICA (Ver. 12) veri analiz paket programı kullanılarak lineer olmayan regresyon tekniği ile belirlendi.

Portakal dilimlerinin kurutulması sırasında mikrodalga fırının güç üretmek üzere açık kaldığı süre ve toplam kuruma süresi dikkate alınarak uzaklaştırılan su kütlesine bağlı olarak tüketilen enerji miktarı (ET) Eş. 6.9 ile hesaplandı.

$$ET = \frac{\text{Harcanan Enerji Miktarı (kWh)}}{\text{Uzaklaştırılan su miktarı (g)}} \quad (6.9)$$

Deneysel veriler ile model uygulaması sonrasında elde edilen tahmini veriler arasında uyumluluğu ölçmek belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ile birlikte temel istatistiksel hata büyüklükleri kullanıldı. Bunlar herhangi bir değişken ( $y$ ) için Kök Ortalama Kare Hatası (KOKH) ve Yüzde Ortalama Bağıl Hata (%OBH) olup sırasıyla Eş. 6.10 ve Eş. 6.11' de verilmiştir.

$$KOKH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{den_i} - y_{tah_i})^2}{N}} \quad (6.10)$$

$$\%OBH = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_{den_i} - y_{tah_i}|}{y_{den_i}} \quad (6.11)$$

Burada  $y$  ilgili değişkeni,  $den$  ve  $tah$  indisleri sırasıyla deneysel ve tahmini (hesaplanan) değerleri  $N$  ise veri çifti sayısını ifade etmektedir.

### 6.3.2. Deneysel tasarım

Deneysel tasarım ve optimizasyon yaklaşımı cevap yüzey yöntemi (CYY) Box-Behnken yaklaşımı kullanılarak belirlendi. Dizayn yaklaşımında Design-Expert (Ver. 10)

**Tablo 6.1.** Bağımsız değişkenleri Box-Behnken yaklaşımına göre tasarım noktalarının değerleri

Bağımsız değişkenler	Tasarım noktaları değerleri		
	- 1	0	+ 1
Mikrodalga çıkış gücü, P (W)	100	160	220
Çevrim süresi, Ct (s)	15	20	25
Başlangıç örnek kütlesi, SM (g)	15	25	35

paket programı kullanıldı. Portakal dilimlerinin kurutulmasında mikrodalga çıkış gücü, çevrim süresi, başlangıç örnek kütlesi bağımsız değişkenleri dikkate alınarak bunların son nem içeriği, toplam kuruma süresi ve enerji tüketim miktarı cevap değişkenleri üzerindeki etkileri incelendi. Deney tasarımında Box-Behnken tasarım yaklaşımı kullanıldı. Bu tasarım yaklaşımına göre üç faktörün her biri için üç düzeye ihtiyaç duyulmaktadır ve yapılan ön denemeler sonucunda bu bağımsız değişkenler için belirlenen tasarım noktası değerleri Tablo 6.1’ de görülmektedir. Bağımsız değişkenlerin değerlerine göre deneme deseni Tablo 6.2’de verilmiştir. Cevap değişkenlerini tanımlarken toplam kuruma süresi için KS, son nem içeriği için MC, kuruma hız sabiti için k ve enerji tüketimi için ET kısaltmaları kullanıldı. Her bir cevap değişkeni için ikinci dereceden (kuadratik) polinom fonksiyonu ile model denklemleri oluşturuldu. Cevap değişkenleri için dikkate alınan model denklemi Eş. 6.12’ da görülmektedir.

$$\begin{aligned} Cevap = & \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 Ct + \beta_3 SM + \beta_{12} P Ct + \beta_{13} P SM + \beta_{23} Ct SM \\ & + \beta_{11} P^2 + \beta_{22} Ct^2 + \beta_{33} SM^2 \end{aligned} \quad (6.12)$$

Deneme deseninde görülen değerler dikkate alınarak kurutma deneyleri yapıldı. Cevap değişkenlerinin değerleri kullanılarak her bir cevap değişkeni için analizler gerçekleştirildi ve model denklemleri elde edildi. Optimum nokta değerlendirmesi için en kısa kuruma süresini, 0.11 kg nem/kg kuru madde nem içeriğini, en yüksek kuruma hız sabitini ve en düşük enerji tüketimini sağlayacak deneysel çalışma koşulları arandı. Bu koşullar için en düşük mikrodalga çıkış gücü ile en fazla miktarda örneğin kurutulabilmesi hedeflendi. Çevrim süresi için herhangi bir kısıtlama uygulanmadı ve çalışma aralığında yazılımın önereceği değer dikkate alındı.

**Tablo 6.2.** Box-Behnken dizayn yaklaşımına göre deneme deseni

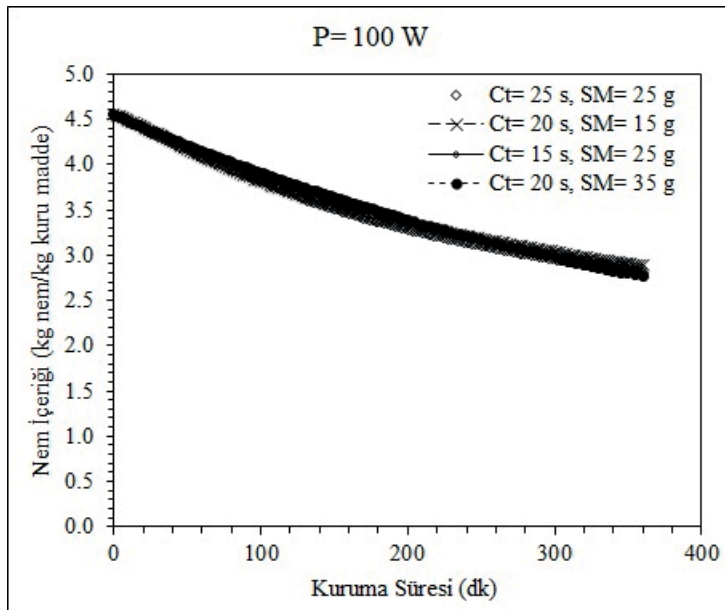
Deneme No	Bağımsız değişken gerçek değeri			Bağımsız değişken kodlanmış değeri		
	P (W)	Ct (s)	SM (g)	P	Ct	SM
1	220	25	25	1	1	0
2	160	20	25	0	0	0
3	220	20	15	1	0	-1
4	160	20	25	0	0	0
5	100	20	15	-1	0	-1
6	160	15	15	0	-1	-1
7	160	15	35	0	-1	1
8	160	20	25	0	0	0
9	160	20	25	0	0	0
10	100	25	25	-1	1	0
11	160	20	25	0	0	0
12	160	25	15	0	1	-1
13	160	25	35	0	1	1
14	220	20	35	1	0	1
15	100	15	25	-1	-1	0
16	220	15	25	1	-1	0
17	100	20	35	-1	0	1

## 7. BULGULAR ve TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen veriler aşağıda verilmiş olan kuruma kinetiği, matematiksel model uygulaması ve cevap yüzey yöntemi uygulaması başlıkları altında değerlendirildi. Deneme deseni CYY esas alınarak oluşturulduğu için kuruma kinetiği ve matematiksel model uygulaması değerlendirmeleri bu deneme desenine uyularak gerçekleştirildi.

### 7.1. Kuruma Kinetiği

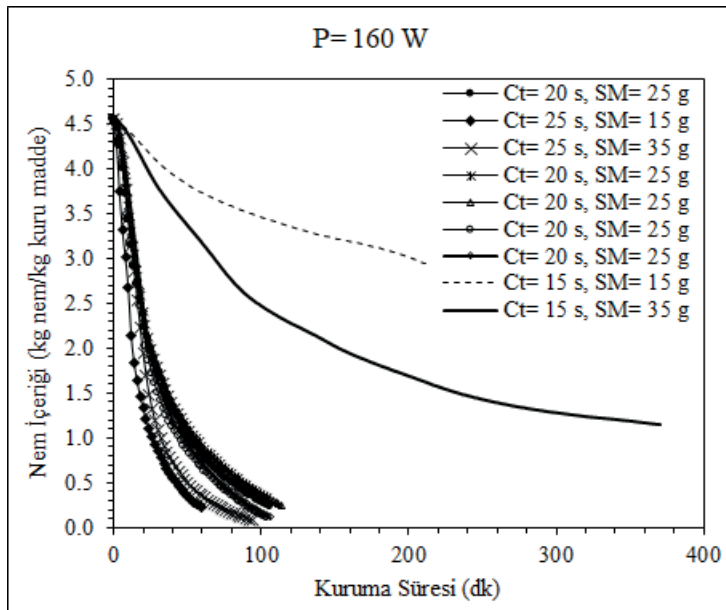
Başlangıç nem içeriği 4.55 kg su/kg kuru madde olarak tayin edilen portakal dilimleri ardışık son nem içeriği değerleri arasındaki fark 0.02 kg su/kg kuru madde değerinin altına düşüncüye dek kurutuldu. Kuruma sürecinde örneklerin toplam kütle değerlerinin zamanla değişimi takip edildi ve elde edilen verilerden nem içeriğinin, boyutsuz nem oranının ve kuruma hızını zamanla değişimleri belirlendi. Tablo 6.2’ de görülen denem desenine göre farklı mikrodalga çıkış gücü değerleri (P), farklı çevrim süreleri (Ct) ve farklı başlangıç örnek kütleleri (SM) dikkate alınarak kuruma verileri değerlendirildi. Şekil 7.1 ve 7.2’de sırasıyla 100 ve 160 W mikrodalga çıkış güçleri için portakal örneklerinin nem içeriğinin zamanla değişimleri görülmektedir. 100 W mikrodalga çıkış gücünde farklı çevrim süreleri



Şekil 7.1. 100 W mikrodalga çıkış gücünde kurutulmuş portakal dilimlerinin nem içeriğinin zamanla değişimi

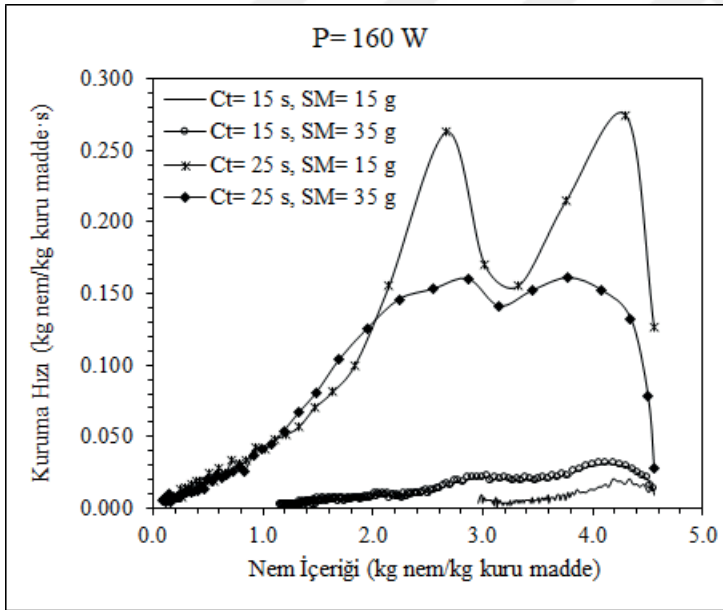
ve farklı örnek kütleleri için kuruma zamanla nem içeriğinin değişimleri hemen hemen aynı olup yaklaşık 2.8 kg su/kg kuru madde nem içeriğine kadar kurutmanın devam ettiği ve bu son değere ulaşmak için yaklaşık 360 dakika süre geçtiği görülmektedir. Bu kuruma davranışı göstermektedir ki 100 W mikrodalga çıkış gücünde dikkate alınan hem çevrim sürelerinin hem de başlangıç örnek kütlelerinin kuruma üzerinde etkisi yok denecek kadar azdır.

160 W mikrodalga çıkış gücünde portakal dilimlerinin farklı farklı çevrim süreleri ve farklı başlangıç örnek kütleleri için nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi Şekil 7.2’de görülmektedir. Çevrim süresinin 15 s olarak ayarlandığı şartlarda başlangıç örnek kütlesi 15 g iken kuruma yaklaşık 210 dakikada tamamlanırken başlangıç örnek kütlesi 35 g olduğu şartlarda kuruma yaklaşık 370 dakika sürmüştür. Ayrıca son nem içeriklerinin 15 g başlangıç kütlesi için yaklaşık 2.94 kg su/kg kuru madde ve 35 g için yaklaşık 1.15 kg su/kg kuru madde olduğu belirlenmiştir. Bu bulgulara göre başlangıç örnek kütlelerinin artması ile örneğin bünyesinde bulunan su miktarının artmasına bağlı olarak mikrodalgalara maruz kalan su miktarının fazla olması nedeni ile daha etkili bir şekilde suyun uzaklaştığı söylenebilir. Mikrodalga ile kurutulan bamyaların kuruma davranışı üzerine başlangıç örnek kütlelerinin etkisi Dadalı ve ark. (2007) tarafından incelenmiş olup örnek kütlelerinin artması ile kuruma süresinin arttığı belirtilmiştir. Ancak kuruma eğrilerinin değişimi bu tez çalışmasında 15 s çevrim süresi için elde edilen eğrilerden farklı davranış göstermektedir.

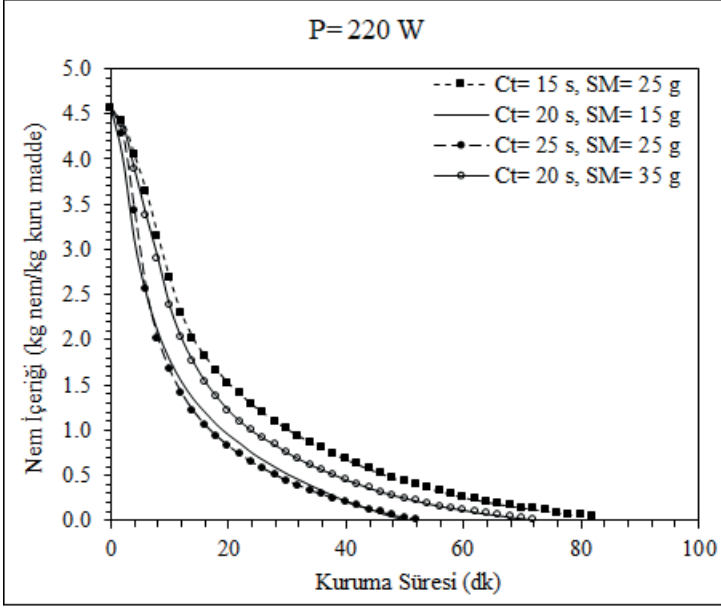


Şekil 7.2. 160 W mikrodalga çıkış gücünde kurutulan portakal dilimlerinin nem içeriğinin zamanla değişimi

Bu farklılıkla beraber Şekil 7.2’de çevrim süresinin 25 s olarak ayarlandığı şartlarda başlangıç örnek kütleindeki değişime bağlı olarak nem içeriği değişim eğrileri Dadalı ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışma ile uyumludur. 160 W mikrodalga çıkış gücünde daha iyi bir mukayese için 15 ve 25 s çevrim sürelerinde farklı başlangıç örnek kütlelerine göre nem içeriğine bağlı olarak kuruma hızlarının değişimleri Şekil 7.3’ de görülmektedir. 15 s çevrim süresi için tüm kurutma süresince 35 g başlangıç örnek kütleindeki kuruma hızının 15 g başlangıç örnek kütleindeki kuruma hızından daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak 25 s çevrim süresinde başlangıç ve sabit hızda kuruma evrelerinde örnek kütleindeki artma ile kuruma hızının azaldığı azalan hız evresinde ise kuruma hızı davranışlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Kısa çevrim süresinde başlangıç örnek kütlesi daha az iken mikrodalgalara maruz kalan su miktarının az oluşu kuruma hızının da düşük olmasına neden olmaktadır. Daha uzun çevrim süresinde ise örnekteki su miktarından ziyade su moleküllerine tesir eden mikrodalga yoğunluğunun daha etkili olduğu böylelikle sabit hızda kuruma evresinde daha fazla örneğin daha yavaş kuruduğu söylenebilir.



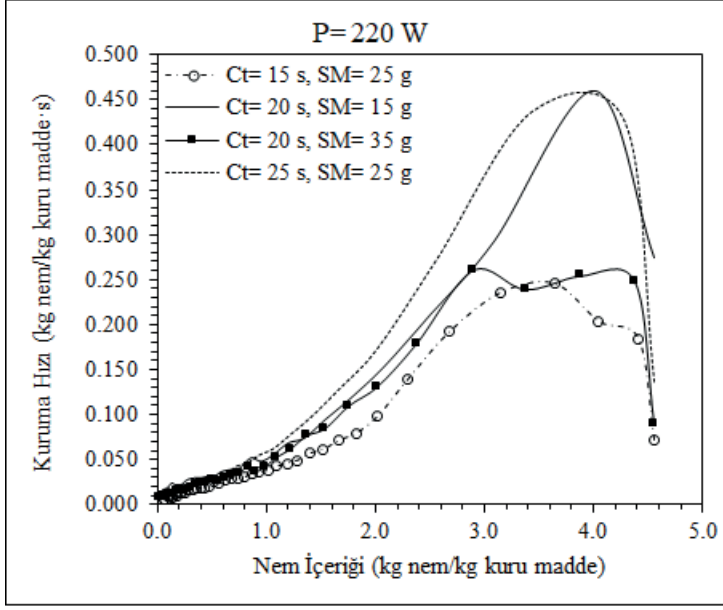
**Şekil 7.3.** 160 W mikrodalga çıkış gücünde 15 ve 25 s çevrim süreleri için portakal örneklerinin kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimleri



**Şekil 7.4.** 220 W mikrodalga çıkış gücünde kurutulmuş portakal dilimlerinin nem içeriğinin zamanla değişimi

Şekil 7.4’de 220 W mikrodalga çıkış gücünde 15, 20 ve 25 s çevrim süreleri için farklı başlangıç örnek kütlelerinde örneklerin nem içeriğinin zamanla değişimleri görülmektedir. 25 g başlangıç örnek kütlesi için 15 ve 25 s çevrim sürelerinde kuruma süreleri sırasıyla 82 ve 52 dk olurken çevrim süresinin 20 s olduğu şartlarda 15 ve 35 g başlangıç örnek kütleleri için kuruma süreleri sırasıyla 50 ve 72 dk olduğu görülmektedir.

Şekil 7.5’de 220 W mikrodalga çıkış gücünde farklı şartlarda portakal dilimlerinin kuruma hızının nem içeriği ile değişimleri görülmektedir. Kuruma sürecinin bütün evrelerinde aynı çevrim süresinde (20 s) başlangıç örnek kütlelerindeki artma ile kuruma hızı azalırken aynı başlangıç örnek kütlelerinde (25 g) çevrim süresindeki artma ile kuruma hızının arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar doğrudan uzaklaştırılan su miktarına bağlı olarak uygulanan mikrodalga gücü ile alakalıdır. Tablo 7.1’de 220 W mikrodalga çıkış gücü için portakal örneklerinin birim kütleleri başına maruz kaldığı güç değerleri verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere sabit çevrim süresinde artan başlangıç örnek kütlesi ile güç yoğunluğu azalmaktadır bu da kuruma hızının azalmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde sabit başlangıç örnek kütlelerinde çevrim süresinin artması ile güç yoğunluğu artmaktadır bu da kuruma hızının artmasına neden olmaktadır. Güç yoğunluğundaki bu artma 20 ve 25 s çevrim süreleri için 15 ve 25 g başlangıç örnek kütlelerinde sabit hızda kuruma evresinin neredeyse görülmemesi şeklinde kendisini göstermektedir.

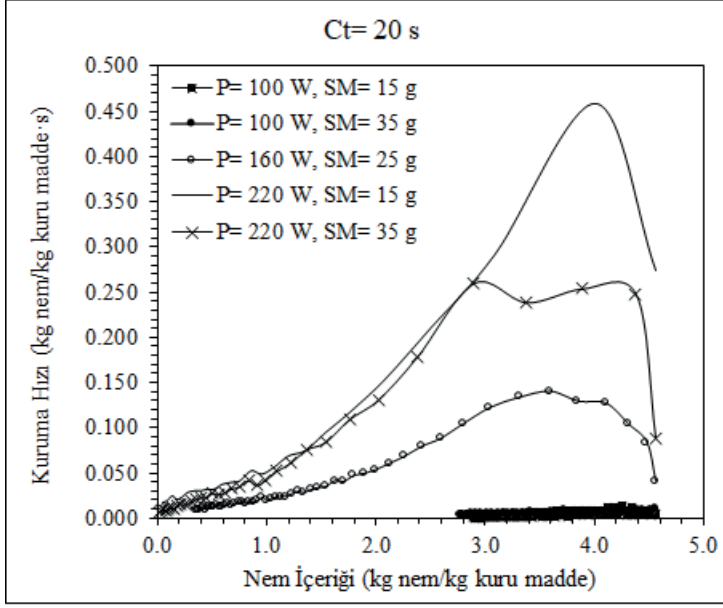


Şekil 7.5. 220 W mikrodalga çıkış gücünde portakal dilimlerinin kuruma hızlarının nem içeriğine göre değişimi

Tablo 7.1. 220 W mikrodalga çıkış gücünde portakal dilimlerinin maruz kaldığı güç yoğunluğu değerleri

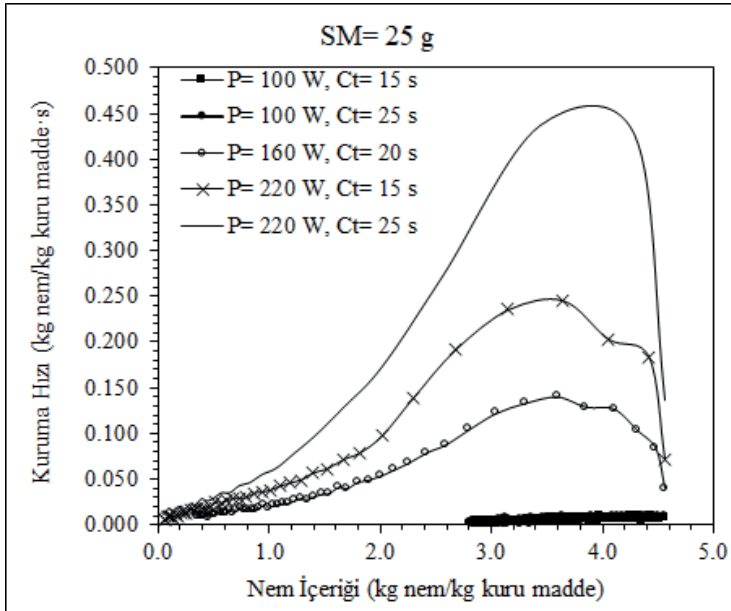
Güç yoğunluğu		Başlangıç örnek kütlesi, SM (g)		
		15	25	35
Çevrim süresi Ct (s)	15	-	0.1626	-
	20	0.3589	-	0.1535
	25	-	0.2683	-

Çevrim süresinin 20 s olduğu şartlarda farklı mikrodalga çıkış gücü ve farklı başlangıç örnek kütleleri için nem içeriğindeki değişime bağlı olarak portakal örneklerinin kuruma hızlarının değişimleri Şekil 7.6'da görülmektedir. 100 W mikrodalga çıkış gücünde çok yavaş bir şekilde sabit kuruma hızı evresinde seyreden kuruma süreci 220 W mikrodalga çıkış gücünde 15 g başlangıç örnek kütlesi için azalan kuruma hızı evresine geçmektedir. 220 W mikrodalga çıkış gücünde başlangıç örnek kütlesi 35 g iken ortaya çıkan kuruma eğrisi, sabit hızda kuruma evresinin bir süre oluştuğu ve ardından azalan hızda kuruma evresinin görüldüğü tipik bir kuruma davranışını göstermektedir. 160 W mikrodalga çıkış gücünde kuruma hızı nispeten yavaş olmakla beraber daha kısa süren bir sabit hızda kuruma evresinin gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 7.6. 20 s çevrim süresi için farklı çalışma şartlarında portakal dilimlerinin kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimi

Şekil 2.7’de 25 g başlangıç örnek kütlesi için farklı mikrodalga çıkış güçleri ve çevrim sürelerinde kuruma hız eğrileri verilmiştir. Örnek kütlelerinin sabit olması durumunda yüksek mikrodalga çıkış gücünde çevrim süresindeki artma ile kuruma hızının belirgin bir şekilde arttığı ve sabit hızda kuruma evresinden ortadan kalktığı görülmektedir.



Şekil 7.7. 25 g başlangıç örnek kütlesi için farklı çalışma şartlarında portakal dilimlerinin kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimi

Sıcak hava kullanılarak gerçekleştirilen konveksiyonla kurutma süreci için kurutulacak materyale olan ısı transferi ve materyalden nemin uzaklaşması etkin bir şekilde materyalin yüzeyinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle kuruma eğrilerindeki davranış daha önce verilmiş olan Şekil 2.4'deki gibi görülmektedir. Şekil 2.4'deki A-B bölgesinde nem içeriği zamanla neredeyse doğrusal bir değişim gösterir ve bu aşamada doymuş yüzey alanı azalır. Katı içindeki nemin hareketi yüzeyde doymuş durumu koruyacak kadar hızlıdır ve kuruma hızı, ısının buharlaşan yüzeye aktarılma hızı tarafından kontrol edilir (Dinçer ve Zamfirescu, 2016). Yüzeydeki doymuş nem tamamen ortadan kalktığında yüzeyde buharlaşma olmaz, bunun yerine katı içindeki nemin difüzyonu ve ardından katı yüzeyinde konvektif bir kütle transferi gerçekleşir. Bu süreç B noktası ile başlar ve buradan itibaren yüzey sıcaklığı yükselmeye başlar kuruma azalan hızda devam eder. Kuruma kinetiğine ait evreler kurutulan materyalin nem içeriği, fizikokimyasal özellikleri ile beraber sıcaklık değişimleri ve havanın hızı ve nem içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Mikrodalga ile ısıtma işleminde yukarıda bahsedilen ısıtma şekllinden farklı olarak materyal dış yüzeyden içe doğru ısınmaz. Mikrodalgaların etki ettiği her bir su molekülü ısınmaya başladığı için materyalin her noktasında ısınma söz konusudur. Ayrıca etkin bir hava sirkülasyonu olmadığı için konvektif ısıtmaya göre daha farklı ısı ve nem transfer süreçleri olasıdır. Özellikle kullanılan mikrodalga çıkış gücü ve çevrim süresine bağlı olarak materyalin ısınması bünyesindeki nemin difüzyonu ve yüzeyden transferi farklılıklar gösterecektir. Bu çalışmada elde edilen kuruma hızı eğrilerinde olası farklı davranışlar net bir şekilde görülmektedir. Artan mikrodalga çıkış gücü, uzun çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlelerinin az olduğu şartlarda sabit hızda kuruma evresi neredeyse yaşanmadan azalan hızda kuruma evresine geçiş gerçekleşmiştir. Materyal bünyesinde hızlı ısınmayla beraber nemin hızlı bir şekilde difüzyonu ile yüzeyden etkili bir şekilde nem uzaklaşması gerçekleşmektedir. Bu durumda sabit hızda kuruma evresi ya çok kısa sürmekte ya da hiç gerçekleşmemektedir. Bilaloğlu (2019) tarafından ayva dilimlerinin mikrodalga tekniği ile kurutulması konulu çalışmada benzer şekilde yüksek mikrodalga çıkış güçlerinde sabit hızda kuruma evresinin gerçekleşmediği bildirilmiştir. Benzer kuruma davranışı Freire ve ark. (2001) ve Therdthai ve Zhou (2009) tarafından da raporlanmıştır. Düşük mikrodalga çıkış gücü, kısa çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlelerinin fazla olduğu şartlarda ise sabit hızda kuruma evresini görmek mümkün olmakla beraber ilgili değişkenlerin alacağı değerlere göre kuruma hız evrelerinin süreleri ve toplam kuruma süresi değişkenlik göstermektedir.

## 7.2. Matematiksel Model Uygulaması

### 7.2.1. Etkin difüzyon katsayının değişimi

Daha önce düzenlenmiş hali ile Eş. 6.7' de verilmiş olan Fick' in difüzyon eşitliğinden faydalanarak kuruma süresi  $t(s)$ ' ye karşılık  $\ln MR$  değerleri grafiğe geçirilmek sureti ile elde edilen doğrunun denkleminin eğiminden etkin difüzyon katsayıları,  $D_{eff} (m^2/s)$ , elde edildi. CYY için oluşturulan deneme desenine göre her bir kurutma çalışması için elde edilen etkin difüzyon katsayısı değerleri ve istatistiki veriler Tablo 7.1'de görülmektedir.

**Tablo 7.1.** Gerçekleştirilen deneylere ait  $D_{eff}$  değerlerinin değişimi

Deneme No	Bağımsız değişken gerçek değeri			$D_{eff}$ ve istatistiki veriler			
	P (W)	Ct (s)	SM (g)	$D_{eff} (m^2/s)$ $\times 10^{11}$	$R^2$	KOKH	%OBH
1	220	25	25	329.29	0.9672	0.0701	19.78
2	160	20	25	101.32	0.9919	0.0633	7.03
3	220	20	15	329.29	0.9212	0.0608	36.78
4	160	20	25	126.65	0.9921	0.0883	14.39
5	100	20	15	2.28	0.9792	0.0747	6.24
6	160	15	15	2.53	0.9555	0.0695	6.33
7	160	15	35	15.20	0.9579	0.0578	6.89
8	160	20	25	101.32	0.9914	0.0685	7.63
9	160	20	25	126.65	0.9913	0.0747	10.54
10	100	25	25	2.53	0.9831	0.0750	6.52
11	160	20	25	101.32	0.9967	0.0616	9.38
12	160	25	15	202.64	0.9917	0.0671	6.57
13	160	25	35	177.31	0.9930	0.0986	15.92
14	220	20	35	253.30	0.9278	0.0755	49.37
15	100	15	25	2.28	0.9904	0.0803	7.11
16	220	15	25	202.64	0.9866	0.0722	17.69
17	100	20	35	1.77	0.9985	0.0922	8.98

Tablo 7.1'deki farklı deney şartlarını dikkate alarak etkin difüzyon katsayısının değişimini sınırlı da olsa irdeleyebilmek mümkün. 220 W mikrodalga çıkış gücünde 20 s çevrim süresi için başlangıç örnek kütlelerinin 15 g ve 35 olduğu şartlarda etkin difüzyon katsayısının değerleri sırasıyla  $329.29 \cdot 10^{-11}$  ve  $253.3 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s olarak belirlenmiştir. Artan kütle ile etkin difüzyon katsayısının değerinin düştüğü görülmektedir. Bunun da aynı mikrodalga yüküne maruz kalan farklı kütlelerdeki örneklerin aynı ölçüde ısınmamalarından kaynaklandığı söylenebilir. Yine 220 W mikrodalga çıkış gücünde başlangıç örnek kütlesi 25 g sabit kalacak şekilde 15 s ve 25 s çevrim süreleri için etkin difüzyon katsayısının değerleri sırasıyla  $202.64 \cdot 10^{-11}$  ve  $329.29 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s olarak hesaplanmıştır. Çevrim süresindeki artma ile mikrodalgalara daha fazla maruz kalma sonucu artan örnek sıcaklığına bağlı olarak etkin difüzyon katsayısının arttığını söylemek mümkündür.

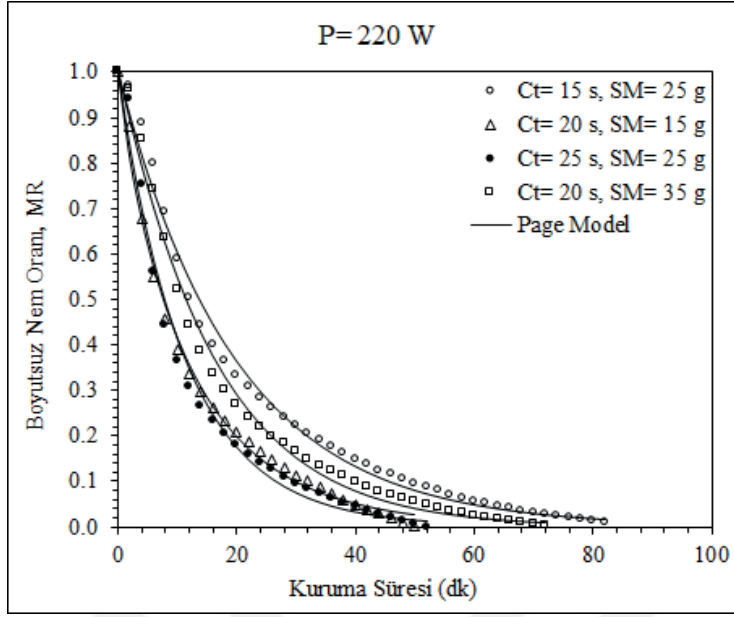
Benzer değerlendirmeyi 160 W mikrodalga çıkış gücünde 15 s ve 25 s çevrim sürelerinde farklı başlangıç örnek kütleleri için de yapmak mümkün. Çevrim süresi 15 s olarak sabit iken başlangıç örnek kütlelerinin 15 g ve 35 g olduğu şartlarda etkin difüzyon katsayısının sırasıyla  $2.53 \cdot 10^{-11}$  ve  $15.2 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s değerler aldığı görülmektedir. Yani artan başlangıç örnek kütlesi ile etkin difüzyon katsayısı artmıştır. Ancak çevrim süresi 25 s olarak sabit tutulduğu zaman başlangıç örnek kütlelerinin 15 g ve 25 g değerleri için etkin difüzyon katsayısı değerleri sırasıyla  $202.64 \cdot 10^{-11}$  ve  $177.31 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s olmuştur ve artan kütle ile azalmıştır. 15 s ve 25 s çevrim sürelerinde değişim birbiri ile zıt yönde olmakla beraber 220 W için 20 s çevrim süresindeki değişim 160 W için 25 s çevrim süresindeki değişim ile benzerlik göstermektedir. 160 W mikrodalga çıkış gücünde 15 g ve 35 g başlangıç örnek kütleleri için farklı çevrim sürelerini dikkate alarak kıyaslama yapılabilir. 15 g başlangıç örnek kütlesi dikkate alınarak çevrim süresinin 15 s ve 25 s olduğu şartlarda etkin difüzyon katsayısı sırasıyla  $2.53 \cdot 10^{-11}$  ve  $202.64 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s olurken başlangıç örnek kütlelerinin 35 g olduğu şartlarda 15 s ve 25 s çevrim sürelerinde sırasıyla  $15.2 \cdot 10^{-11}$  ve  $177.31 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s olarak hesaplanmıştır. Her iki grupta da artan çevrim süresi ile etkin difüzyon katsayısının değerinin de belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu bulgular çerçevesinde örneklerden suyun difüzyonunda çevrim süresinin oldukça önemli olduğu söylenebilir. Zira uzun çevrim sürelerinde mikrodalga üretim periyodunun da uzun olması nedeni ile örnekler etkili bir şekilde ısınmakta olup bu da artan sıcaklıkla daha hızlı bir nem difüzyonuna neden olmaktadır. 15 s gibi kısa çevrim süresi örnek kütlelerine bağlı olarak mikrodalgaların ısıtma performansı üzerinde anlamlı olmayan bir etkiye sahiptir diyebiliriz.

100 W mikrodalga çıkış gücü için 5 ve 17 nolu denemeleri dikkate alacak olursak 20 s sabit çevrim süresinde 15 g ve 35 g başlangıç örnek kütleleri için etkin difüzyon katsayısının değerleri sırasıyla  $2.28 \cdot 10^{-11}$  ve  $1.77 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s değerlerini almıştır. Başlangıç örnek kütlelerinin 25 g olarak sabit tutulduğu 10 ve 15 nolu denemelerde çevrim süresinin 15 s' den 25 s' ye çıkarılması ile etkin difüzyon katsayısı da  $2.28 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s' den  $2.53 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s değerine yükselmiştir. 100 W mikrodalga çıkış gücünde elde edilen etkin difüzyon katsayısı değerlerinin 160 ve 220 W şartlarına kıyasla oldukça düşük değerler aldığı aşikardır. Bu bulgular mikrodalga çıkış gücünün artması ile nem difüzyonunun da belirgin bir şekilde hızlandığını göstermektedir.

Tablo 7.1'de görülen belirleme katsayısı ( $R^2$ ), kök ortalama kare hatası (KOKH) ve yüzde ortalama bağıl hata (%OBH) nicelikleri Fick'in ikinci difüzyon kanununa ait denklemin genel olarak deneysel verileri temsil etmede başarılı olduğunu göstermektedir. 3 ve 14 nolu denemelere ait belirleme katsayılarının diğerlerine kıyasla daha düşük ve aynı şekilde kök ortalama kare hatası değerlerinin ise daha yüksek oluşu bu denemelere ait koşullara ait verilerin iyi temsil edilemediğini veya deneysel bazı hatalara bağlı olarak verilerden kaynaklanan bir uyumsuzluk olabileceğini göstermektedir.

### **7.2.2. Page model denkleminin uygulanması**

Yarı teorik model denklemleri arasında Newton' un soğuma kanununa benzetilerek elde edilen model denklemlerinden biri olan Page model denklemini deneysel kurutma verilerinin temsil edilmesi için en yaygın bir şekilde kullanılan model denklemlerinden biridir. Bu çalışmada elde edilen deneysel verilere model denkleminin uygulanması lineer olmayan regresyon analizi yaklaşımı ile gerçekleştirildi. Bu analiz sonucunda model sabitleri ve model denklemini her bir kurutma deneyi koşulu için elde edildi. Şekil 7.8' de 220 W mikrodalga çıkış gücü için farklı çevrim süreleri ve başlangıç örnek kütleleri için deneysel kurutma verileri ve bunlara ait Page model denkleminde elde edilen tahmini verilerin değişimleri görülmektedir. Kuruma süresine karşı deneysel yöntemle elde edilen boyutsuz nem oranlarının değişimini ile aynı deneysel koşullarda model denkleminde elde edilen boyutsuz nem oranlarının değişimi oldukça uyumlu görülmektedir. Benzer eğriler 100 ve 160 W mikrodalga çıkış güçleri için de elde edilmesine rağmen veri noktalarındaki girişimlerin eğrileri görmeye imkan vermemesi nedeni ile burada sunulmamıştır. Bunun yerine Tablo 7.2'de her bir deneysel koşul için Page modeline ait veriler sunulmuştur.



Şekil 7.8. 220 W mikrodalga çıkış gücü için boyutsuz nem oranının deneysel ve Page modeline göre değişim eğrileri

Tablo 7.2. Deneysel verilere uygulanan Page modeline ait veriler

Deneme	Bağımsız değişken gerçek değeri			Model sabitleri ve istatistiki veriler					
	P (W)	Ct (s)	SM (g)	k (dk <sup>-n</sup> )	n	R <sup>2</sup>	KOKH	%OBH	
5	100	20	15	0.0047	0.785	0.9942	0.0080	1.16	
10	100	25	25	0.0044	0.808	0.9953	0.0076	0.87	
15	100	15	25	0.003	0.868	0.9967	0.0063	0.72	
17	100	20	35	0.0022	0.928	0.9998	0.0014	0.15	
2	160	20	25	0.0382	0.921	0.9908	0.0247	7.56	
4	160	20	25	0.0232	1.084	0.9900	0.0281	11.06	
6	160	15	15	0.0122	0.668	0.9894	0.0097	0.95	
7	160	15	35	0.0156	0.781	0.9895	0.0208	3.66	
8	160	20	25	0.0347	0.942	0.9908	0.0250	7.42	
9	160	20	25	0.0299	1.034	0.9917	0.0250	10.09	
11	160	20	25	0.0349	0.956	0.9956	0.0175	5.28	
12	160	25	15	0.0607	0.979	0.9925	0.0235	11.04	
13	160	25	35	0.0191	1.238	0.9903	0.0237	29.07	
1	220	25	25	0.0924	0.983	0.9873	0.0314	19.15	
3	220	20	15	0.116	0.880	0.9940	0.0202	45.49	
14	220	20	35	0.0553	1.038	0.9926	0.0237	38.75	
16	220	15	25	0.0512	0.997	0.9915	0.0250	11.78	

100 W mikrodalga çıkış gücünde yapılan deneylerden elde edilen verileri temsil etme kabiliyeti yönüyle en yüksek  $R^2$  (0.9998), en düşük KOHK (0.0014) ve en düşük %OBH (0.15) değerleri çevrim süresinin 20 s ve başlangıç örnek kütlesinin 35 g olduğu şartlarda elde edilmiştir. Bu değerler sadece 100 W mikrodalga çıkış gücü için değil aynı zamanda bütün mikrodalga çıkış gücü değerleri içinde en iyi koşulları vermekle beraber Şekil 7.1 ile birlikte değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Zira istatistiki veriler 100 W için modelin temsil kabiliyetini en iyi olarak göstermiş olsa da 100 W mikrodalga çıkış gücündeki kuruma davranışı varılan nihai nem içeriği yönüyle çok da verimli bir süreç olmadığını göstermektedir.

Daha iyi kuruma davranışının gözlemlendiği 160 W mikrodalga çıkış gücündeki deneyler için elde edilen verilere arasında çevrim süresinin 15 s ve başlangıç örnek kütlesinin 15 g olduğu şartlar için elde edilen verilerin Page modeli tarafından daha iyi temsil edildiği söylenebilir. Ancak Şekil 7.2'deki kuruma eğrilerine bakıldığı zaman 15 s çevrim süresi ve 15 g başlangıç örnek kütlesi şartlarında elde edilen kuruma eğrisi 100 W mikrodalga çıkış gücü koşullarındakine benzer bir davranış göstermektedir. Her ne kadar Page modeli tarafından temsil edilebilir olsa da bu kurutma şartlarının varılan nihai nem içeriği yönüyle arzu edilen bir nem içeriği sunmadığı söylenebilir. 160 W mikrodalga çıkış gücü koşullarında 15 s çevrim süresinin uygulandığı çalışmaların dışındaki kurutma koşullarına bakarak bir mukayese yapmak daha sağlıklı olacaktır. Bu seçimli kurutma koşulları arasında en yüksek  $R^2$  (0.9956), en düşük KOHK (0.0175) ve en düşük %OBH (5.28) değerleri çevrim süresinin 20 s ve başlangıç örnek kütlesinin 25 g olduğu şartlarda elde edilmiştir. Bu kurutma koşulları için elde edilen veriler Page modeli tarafından gayet başarılı bir şekilde temsil edilebilmektedir.

220 W mikrodalga çıkış gücünde yapılan kurutma deneyleri için de Page modelinin deneysel verileri iyi bir şekilde temsil ettiği görülmektedir. Ancak mukayese yapılacak olursa çevrim süresindeki artma ile modelin verileri temsil yeteneğinin azaldığını söylemek mümkündür. Bunun yanında başlangıç örnek kütlesindeki artma ile modelin temsil kabiliyetinde %OBH yönüyle bir iyileşme olduğu görülmektedir.

### 7.3. Cevap Değişkenlerinin Değişimi

Bu başlık altında cevap yüzey yöntemi uygulamasında dikkate alınan cevap değişkenlerinden nihai nem içeriği, toplam kuruma süresi ve enerji tüketim değeri büyüklüklerinin değişimi irdelenecektir. Bur irdelenmede herhangi bir optimizasyon yaklaşımı dikkate alınmadan değerlendirme yapılacak olup optimizasyon yaklaşımı bir sonraki başlık altında sunulmuştur.

Kurutma proseslerinin tasarımında nihai nem içeriği, toplam kuruma süresi ve tüketilen enerji miktarı gibi parametreler hem verimli bir kurutma sağlamak hem de ekonomik iyileştirmeler için önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında uygulanan kurutma koşullarında elde edilen nihai nem içeriği (NMC, kg nem/kg kuru madde), toplam kuruma süresi (TKS, dk) ve tüketilen enerji miktarı (ET, kWh/g) parametrelerinin değişimleri sırasıyla Tablo 7.3, Tablo 7.4 ve Tablo 7.5’de görülmektedir.

**Tablo 7.3.** Nihai nem içeriğinin değişimi

Deneme No	Bağımsız değişken gerçek değeri			Nihai nem içeriği, NMC (kg nem/kg kuru madde)
	P (W)	Ct (s)	SM (g)	
1	220	25	25	0
14	220	20	35	0.005
3	220	20	15	0.015
16	220	15	25	0.044
13	160	25	35	0.078
9	160	20	25	0.104
4	160	20	25	0.116
12	160	25	15	0.22
11	160	20	25	0.236
2	160	20	25	0.244
8	160	20	25	0.338
7	160	15	35	1.152
17	100	20	35	2.759
10	100	25	25	2.804
15	100	15	25	2.849
5	100	20	15	2.881
6	160	15	15	2.944

Tablo 7.3'den mikrodalga çıkış gücündeki artma ile nihai nem içeriğinin azaldığı çok net bir şekilde görülmektedir. Bir başka ifade ile düşük nihai nem içeriğine ulaşmak için yüksek mikrodalga çıkış güçlerinde çalışmak gerekmektedir. Mikrodalga gücündeki artma ile kurutulan materyal içinde üretilen ısı miktarının artmasına bağlı olarak daha etkili bir nem transferi gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak da daha düşük nem içeriklerine ulaşılması tabiidir. Ancak 6 nolu denemeden de görüleceği üzere en yüksek nihai nem içeriği 160 W mikrodalga çıkış gücünde ortaya çıkmıştır. Bu da genel değişim eğilimine aykırı görünmektedir. Bu da göstermektedir ki değerlendirmeyi sadece mikrodalga çıkış gücü ile sınırlandırmak yanılgı oluşturabilmektedir. Zira mikrodalga çıkış gücünün yanı sıra çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesi de kuruma süreci üzerinde etkilidir. 5 ve 6 nolu denemeleri kıyaslayacak olursak daha düşük mikrodalga gücünde (100 W) daha uzun bir çevrim süresi (20 s) ile daha düşük nem içeriğinde ürün elde edilmesi mümkün olmaktadır. Sabit mikrodalga çıkış gücü ve sabit başlangıç örnek kütlelerinde daha uzun çevrim süreleri ile çalışılması durumunda daha düşük nem içeriğine ulaşılacağı 1-16, 7-13 ve 10-15 nolu deneme çiftlerinin mukayesesinden anlaşılmaktadır.

Tablo 7.3'den görülen bir başka önemli sonuç da başlangıç örnek kütlesi ne kadar çok olursa nihai nem içeriğinin o kadar küçük olduğudur. Örnek miktarının az olmasına bağlı olarak başlangıç nem miktarının da az oluşu ile uygulanan mikrodalga gücü portakal örnekleri içinde daha yoğun bir enerji üretilmesine ve daha yüksek bir buhar basıncı etkisi ile daha hızlı bir nem transferine imkan sunmaktadır. Difüzyon hızındaki artışa rağmen yüzeyden nemin uzaklaşmasının daha yavaş oluşuna bağlı olarak oluşan bariyer daha fazla nem uzaklaşmasını engellemektedir şeklinde yorumlanabilir. Bu da daha yüksek nihai nem içeriğine sahip ürünlerin elde edilmesine neden olmaktadır. Tablo 7.1'deki etkin difüzyon katsayısı değişimleri ile birlikte değerlendirildiği zaman elde edilen bulguların Dadalı ve ark. (2007) ve Yoğurtçu (2016) tarafından elde edilen bulgularla uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 7.4'de görülen toplam kuruma süresi değerlerinin değişimi mikrodalga çıkış gücündeki azalma ile kuruma süresinin uzadığı yönünde olup kısa çevrim sürelerinin de topla kuruma süresinin uzamasına neden olduğunu göstermektedir. 1-16 ve 7-13 nolu deneme çiftleri bunu net bir şekilde göstermektedir. Başlangıç örnek kütlelerindeki artma ile toplam kuruma süresinin de arttığı görülmektedir. Bu da uzaklaştırılacak nem miktarının fazla oluşu nedeni ile daha fazla kurutma süresinin gerekli olacağı gerçeğini göstermektedir.

**Tablo 7.4.** Toplam kuruma süresinin değişimi

Deneme No	Bağımsız değişken gerçek değeri			Toplam kuruma süresi
	P (W)	Ct (s)	SM (g)	TKS (dk)
3	220	20	15	50
1	220	25	25	52
12	160	25	15	60
14	220	20	35	72
16	220	15	25	82
13	160	25	35	94
9	160	20	25	104
8	160	20	25	104
4	160	20	25	106
11	160	20	25	106
2	160	20	25	114
6	160	15	15	212
17	100	20	35	360
10	100	25	25	360
15	100	15	25	360
5	100	20	15	360
7	160	15	35	370

Tablo 7.5’de görüldüğü üzere daha düşük mikrodalga çıkış güçlerinde daha fazla miktarda enerji harcadığı görülmektedir. 220 W gibi daha yüksek mikrodalga çıkış güçlerinde daha az enerji harcanmakla beraber 14, 16, 1 ve 3 nolu denemelere ait sıralama bu genellemeyi değiştirmektedir. Bu da mikrodalga çıkış gücünden ziyade bu gücün ne kadar süre ile uygulandığı yani çevrim süresinin ne kadar olduğuna bağlı olarak tüketilen enerji miktarının değiştiği görülmektedir. Düşük mikrodalga çıkış güçlerinde istenilen nem içeriğine ulaşmak için daha uzun süre kurutma ihtiyacına bağlı olarak harcanan enerji miktarının daha fazla olacağı bir gerçek olarak ifade edilebilir. Bu gerçeklik yüksek mikrodalga güçlerinde daha kısa çevrim sürelerinde de görülmektedir. Alibas ve Yilmaz (2022) çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesi gibi parametreler olmaksızın sadece mikrodalga çıkış gücü değişimine bağlı olarak portakal dilimlerinin kurutulmasına dair yaptıkları çalışmada düşük ve yüksek mikrodalga çıkış güçlerinde tüketilen enerji miktarının daha az olduğunu belirtmişlerdir. İlgili çalışmada orta mikrodalga çıkış güçlerinde (650 W gibi) tüketilen enerji miktarının daha fazla olduğu ifade edilmiştir. Bu tez çalışmasında kurgulanan deneme deseni için herhangi bir istatistiki değerlendirme ve optimizasyon tekniği kullanılmadan farklı mikrodalga çıkış gücü, çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesi şartlarının enerji tüketimi üzerindeki etkisini tam olarak değerlendirmek oldukça güç

**Tablo 7.5.** Tüketilen enerji miktarının değişimi

Deneme No	Bağımsız değişken gerçek değeri			Tüketilen enerji miktarı, ET
	P (W)	Ct (s)	SM (g)	(kWh/g)
14	220	20	35	0.18417
13	160	25	35	0.22214
16	220	15	25	0.22217
1	220	25	25	0.23252
9	160	20	25	0.27692
4	160	20	25	0.28295
11	160	20	25	0.29081
8	160	20	25	0.29224
3	220	20	15	0.29908
2	160	20	25	0.31340
12	160	25	15	0.34217
7	160	15	35	0.69030
17	100	20	35	1.06007
15	100	15	25	1.17188
10	100	25	25	1.90355
6	160	15	15	1.94943
5	100	20	15	2.65487

olmaktadır. Bu nedenle bir sonraki başlık altında değerlendirilecek olan cevap yüzey yöntemi yaklaşımı ile bağımsız değişkenlerin anlamlılığı/önemi de dikkate alınarak değerlendirme yapmanın işleri daha da kolaylaştırabileceğini söylemek yanlış olmayacaktır.

#### 7.4. Cevap Yüzey Yöntemi Uygulaması

Box-Behnken deneysel tasarım yaklaşımına göre ikinci dereceden terimleri içerecek şekilde model dikkate alınarak oluşturulan deneme deseni daha önce Tablo 6.2’de verilmişti. Bu deneme desenine göre gerçekleştirilen kurutma deneyleri sonucunda istatistiksel analizler için dikkate alınacak olan cevap değişkenleri doğrudan deneysel verilerden veya birtakım hesaplamalar sonucu elde edildi. Toplam kuruma süresi (TKS), nihai nem içeriği (NMC), kuruma sabiti (k) ve tüketilen enerji miktarı (ET) cevaplarına ait değerler Tablo 7.6’da görülmektedir. Ayrıca, bağımsız değişkenler ve cevap değişkenlerine ait basit istatistiksel verileri içeren Design-Exper paket programına ait tasarım özeti Tablo 7.7’de görülmektedir.

**Tablo 7.6.** Box-Behnken tasarımına göre bağımsız ve bağımlı (cevap) değişken değerleri

Deneme No	Bağımsız değişkenler				Cevap değişkenleri		
	P (W)	Ct (s)	SM (g)	TKS (dk)	NMC (kg nem/kg kuru madde)	k (dk <sup>-n</sup> )	ET (kWh/g)
1	220	25	25	57	0	0.0924	0.233
2	160	20	25	104	0.244	0.0382	0.313
3	220	20	15	54	0.015	0.1160	0.299
4	160	20	25	106	0.116	0.0232	0.283
5	100	20	15	360	2.881	0.0047	2.655
6	160	15	15	212	2.944	0.0122	1.949
7	160	15	35	370	1.152	0.0156	0.690
8	160	20	25	104	0.338	0.0347	0.292
9	160	20	25	114	0.104	0.0299	0.277
10	100	25	25	360	2.804	0.0044	1.904
11	160	20	25	106	0.236	0.0349	0.291
12	160	25	15	60	0.22	0.0607	0.342
13	160	25	35	94	0.078	0.0191	0.222
14	220	20	35	78	0.005	0.0553	0.184
15	100	15	25	360	2.849	0.0030	1.172
16	220	15	25	82	0.044	0.0512	0.222
17	100	20	35	360	2.759	0.0022	1.060

**Tablo 7.7.** Deneysel tasarım özeti

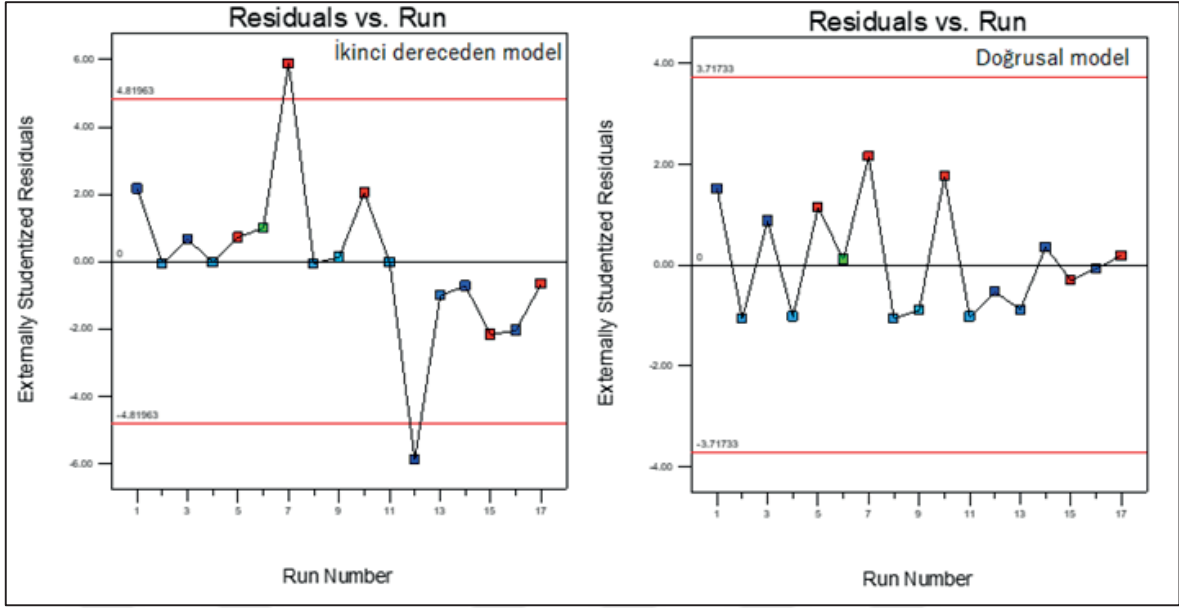
File Version	10.0.4.0									
Study Type	Response Surface	Subtype	Randomized							
Design Type	Box-Behnken	Runs	17							
Design Model	Quadratic	Blocks	No Blocks							
Factor	Name	Units	Type	Subtype	Minimum	Maximum	Coded Values		Mean	Std. Dev.
A	P		Numeric	Continuous	100	220	-1=100	1=220	160	42.4264
B	Ct		Numeric	Continuous	15	25	-1=15	1=25	20	3.53553
C	SM		Numeric	Continuous	15	35	-1=15	1=35	25	7.07107
Response	Name	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio	Trans
R1	TKS		17.00000	Polynomial	54	370	175.353	128.944	6.85185	None
R2	NMC		17.00000	Polynomial	0	2.944	0.987588	1.26529	N/A	None
R3	k		17.00000	Polynomial	4.80E-05	0.00316	0.000701	0.000767	65.8333	None
R4	ET		17.00000	Polynomial	0.184165	2.65487	0.728744	0.759755	14.4157	None

#### 7.4.1. Toplam kuruma süresi analizi

Mikrodalga çıkış gücü, çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesinin toplam kuruma süresi üzerine olan etkisini belirlemek üzere yapılan analiz özeti Tablo 7.8’de görülmektedir. Design-Expert paket programı tarafından uygulanan ön analize göre bağımsız değişkenlerin toplam kuruma süresi üzerine olan etkisini bir model ile ifade etmek istersek doğrusal (Linear) bir model denkleminin daha makul olacağı önerilmektedir. Her ne kadar tasarıma başlarken ikinci dereceden bir polinom (Quadratic) ile matematiksel tanımlama öngörülmuş olsa da tasarım ön analiz özeti tahmini belirleme katsayısı yönüyle bu yaklaşımı önermemiştir. Ayrıca düzeltilmiş belirleme katsayısı yönüyle üçüncü dereceden (Cubic) model uygun görünse de kararlı bir değerlendirme yapmaya elverişli olmadığı görülmektedir. Üçüncü dereceden bu model önermesi, model denkleminin geliştirilebilmesi için daha fazla verinin dikkate alınması için kullanılabilir niteliktedir. Bu nedenle model tasarımı için öngörülen ikinci dereceden model yaklaşımı ile önerilen doğrusal modeli dikkate alarak bir kıyas yapmak üzere her biri için deneysel ve tahmini verilere ait artıkların dağılımı Şekil 7.9’da sunulmuştur. Doğrusal model denkleminde elde edilen artıkların ikinci dereceden model denkleminde elde edilene göre daha dar bir aralıkta olduğu söylenebilir. Bu da doğrusal model denklemini daha anlamlı kılmaktadır. Tablo 7.8’de görülen “p-value” değerleri 0.05 anlamlılık ölçüsünü esas alarak bu değerden daha düşük değerler için önermeyi anlamlı kabul etmektedir. “Sequential p-value” değerinin 0.05 den küçük olduğu önermeler modelin sıralı terimlerinin yanıtta eğilimden ziyade “gürültü” diye adlandırılan istenmeyen düzeydeki hataları modellemede anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Bu yönüyle ikinci dereceden model denkleminin verileri temsil etmede daha kabul edilebilir olmakla beraber uyum eksikliğini ifade eden “Lack of fit” anlamlılığı bütün model önermeleri için istenmeyen bir düzeyde görülmektedir. Ne var ki burada bütün parametreleri birlikte değerlendirmek sureti ile yazılımın önerdiği model dikkate alınmıştır.

**Tablo 7.8.** Toplam kuruma süresi analiz özeti

Source	Sequential Lack of Fit p-value	Adjusted p-value	Predicted R-Squared	Adjusted R-Squared	
Linear	0.0003	< 0.0001	0.7052	0.5840	Suggested
2FI	0.8721	< 0.0001	0.6417	0.2045	
Quadratic	0.0789	< 0.0001	0.7946	-0.4340	
Cubic	< 0.0001		0.9990		Aliased

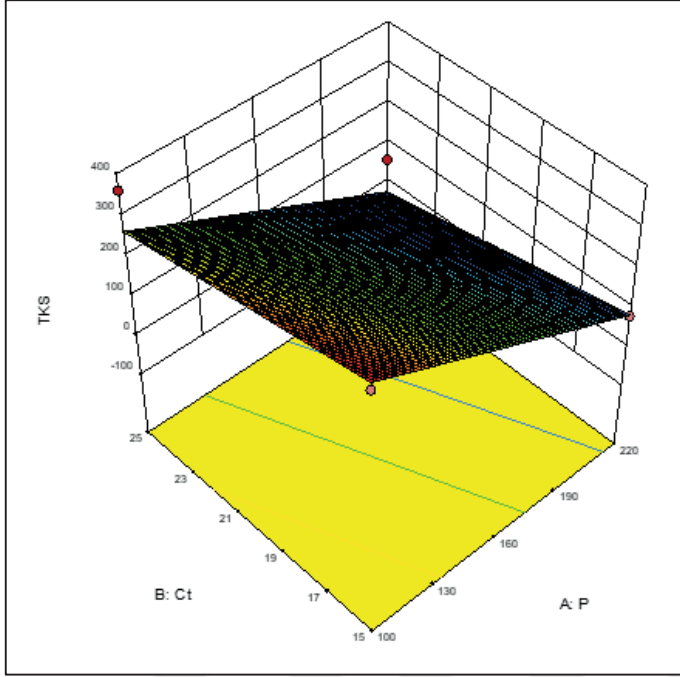


Şekil 7.9. İkinci dereceden ve doğrusal model denklemleri için deneysel ve tahmini değerler arasındaki artıkların dağılımı

Tablo 7.9’da toplam kuruma süresi için doğrusal modele göre yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları görülmektedir. Doğrusal model ve mikrodalga çıkış gücü ve çevrim süresi değişkenleri için p-value < 0.05 olduğu için anlamlı olarak değerlendirilebilirken başlangıç örnek kütlesi için bu anlamlılıktan kabul edilebilir düzeyde söz etmek mümkün değildir. Bu durumda başlangıç örnek kütlesi modelin doğrusal davranışını etkilememektedir diyebiliriz. Toplam kuruma süresinin mikrodalga çıkış gücü ve çevrim süresi değişkenine göre değişimini gösteren yüzey eğrisi Şekil 7.10’da görülmektedir.

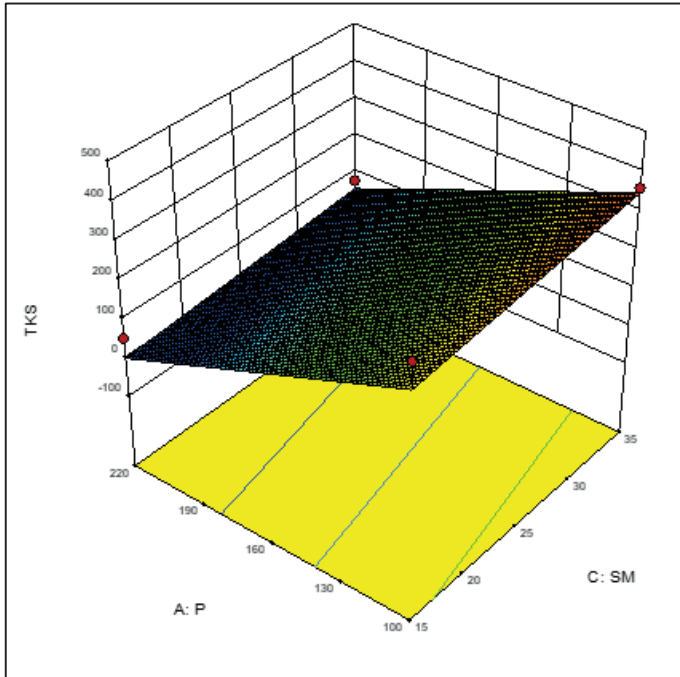
Tablo 7.9. Toplam kuruma süresi analizi için doğrusal modele ait ANOVA sonuçları

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	2.02E+05	3	67434.42	13.76	0.0003	significant
A-P	1.71E+05	1	1.71E+05	34.85	< 0.0001	
B-Ct	25651.1	1	25651.12	5.23	0.0396	
C-SM	5832	1	5832	1.19	0.2952	
Residual	63722.63	13	4901.74			
Lack of Fit	63653.8	9	7072.65	411.2	< 0.0001	significant
Pure Error	68.8	4	17.2			



**Şekil 7.10.** Toplam kuruma süresi için doğrusal modele ait yüzey eğrisi, SM=25 g

Yüzey eğrisi ve yüzey eğrisinin izdüşümü olan eşyüksekti (contour) eğrisi toplam kuruma süresi için değişimin doğrusal olduğunu göstermektedir. Şöyle ki, mikrodalga çıkış gücü ve çevrim süresi arttıkça toplam kuruma süresi doğrusal olarak azalmaktadır. Yani kurutma daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Benzer şekilde Şekil 7.11 de görülen yüzey eğrisi ve



**Şekil 7.11.** Toplam kuruma süresi için doğrusal modele ait yüzey eğrisi, Ct=20 s

eşyükselti eğrisi mikrodalga çıkış gücü ve başlangıç örnek kütlesi değişimine göre toplam kuruma süresi değişimini göstermektedir. Bu eğrilere göre de bütün mikrodalga çıkış güçlerinde başlangıç örnek kütlesi artarken toplam kuruma süresi de doğrusal olarak artmaktadır.

Toplam kuruma süresi için mikrodalga çıkış gücü, çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesi değişkenlerinin gerçek değerleri üzerinden önerilen doğrusal model denklemini aşağıdaki gibidir.

$$TKS = 724.02 - 2.435 \cdot P - 11.325 \cdot Ct + 2.7 \cdot SM \quad (7.1)$$

Bu doğrusal model denklemini için belirleme katsayısı,  $R^2$ , 0.7605 ve düzeltilmiş belirleme katsayısı, Adj.  $R^2$ , 0.7052 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler düşük olmakla beraber çok değişkenli regresyon analizinin getirdiği güçlüklerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca belirleme katsayısının 1' e eşit oluşu mükemmel yakın bir modeli tanımlamasına rağmen modelin her zaman iyi kestirim yapacağı anlamına gelmez (Walpole ve ark., 2012).

#### 7.4.2. Nihai nem içeriği analizi

Tablo 7.10'da nihai nem içeriği için yapılan analiz özeti görülmektedir. Analiz sonucu, göre doğrusal ve ikinci dereceden model denklemlerinin nihai nem içeriği üzerine bağımsız değişkenlerin etkisini temsil etmede uygun modeller olduğunu göstermektedir. Model önermelerinden hangisinin uygun olduğu sıralı kareler toplamına ait p testinin anlamlılık düzeyi ile karşılaştırılmaktadır. Tablo 7.10'da bu kıyaslamaya göre p-değeri 0.05 den küçük olan doğrusal (p-değeri=0.0008) ve ikinci dereceden (P-değeri=0.0376) modeller uygunluk arz etmektedir. Tablo 7.11'de modellerin istatistiksel değerlendirme özeti görülmektedir. Bu model önermeleri arasından belirleme katsayısı daha yüksek olan ikinci

**Tablo 7.10.** Nihai nem içeriği analiz özeti

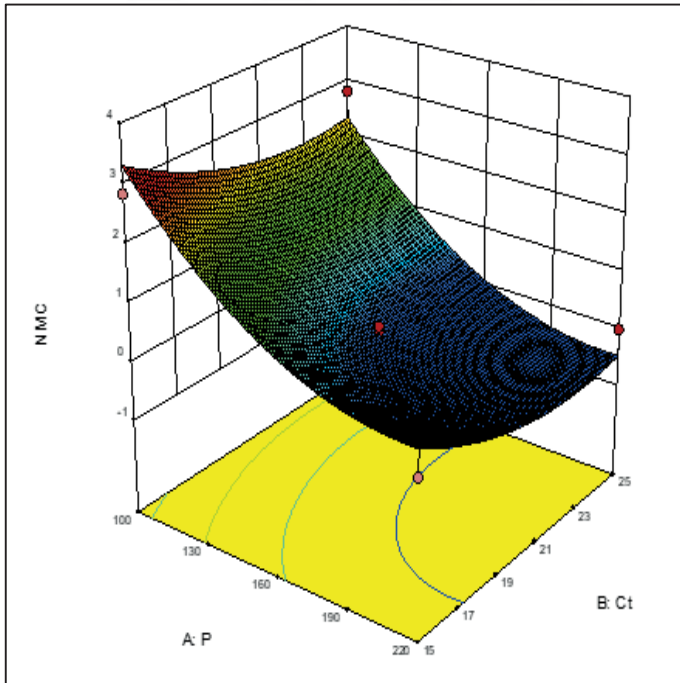
Source	Sequential Lack of Fit p-value	Adjusted p-value	Predicted R-Squared	R-Squared	
Linear	0.0008	0.0003	0.6429	0.5086	Suggested
2FI	0.7986	0.0002	0.5785	0.1285	
Quadratic	0.0376	0.0006	0.8069	-0.33	Suggested
Cubic	0.0006		0.994		Aliased

**Tablo 7.11.** Olası model denklemlerine ait istatistiksel değerlendirme özeti

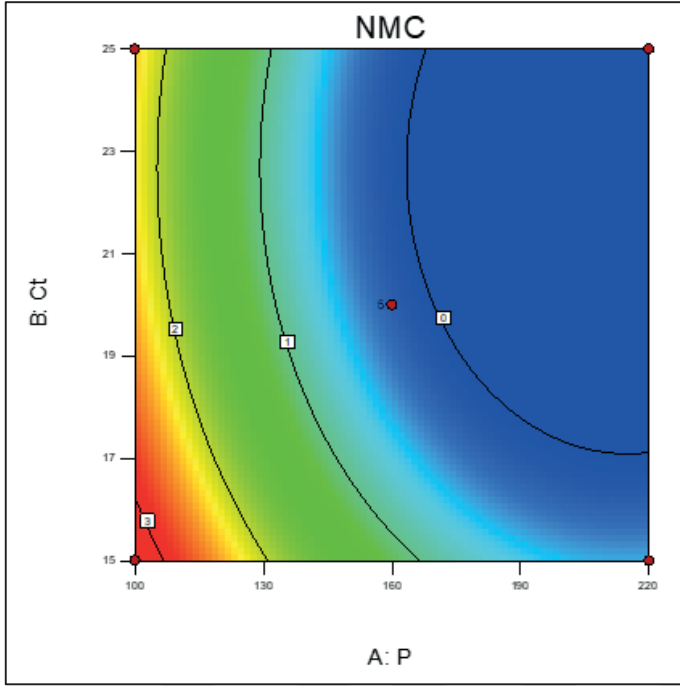
Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0.76	0.7099	0.6429	0.5086	12.59	Suggested
2FI	0.82	0.7366	0.5785	0.1285	22.32	
Quadratic	0.56	0.9155	0.8069	-0.33	34.07	Suggested
Cubic	0.098	0.9985	0.994		+	Aliased

dereceden model tercih edilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

Nihai nem içeriği üzerine bağımsız değişkenlerin etkilerini temsil etmek üzere ikinci dereceden terimleri de içere model denkleminde ait yüzey eğrisi ve eşyükselti eğrisi sırasıyla Şekil 7.12 ve Şekil 7.13’de görülmektedir. Artan mikrodalga çıkış gücü ile nihai nem içeriği ikinci dereceden bir değişimle azaldığı görülmektedir. Aynı yüzey eğrisi kısa ve uzun çevrim sürelerinde nihai nem içeriğinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yani daha düşük nem içeriğine sahip bir ürün elde edebilmek için orta uzunlukta çevrim süresini dikkate almak gerektiği söylenebilir. Kısa ve uzun çevrim sürelerinde mikrodalgalar tarafından yetersiz ısı üretimi ile daha az nem uzaklaştırılırken aşırı ısı üretiminde ise portakal örneklerinin yüzeyinde oluşan kabuklaşma nem aktarımını engellemektedir.

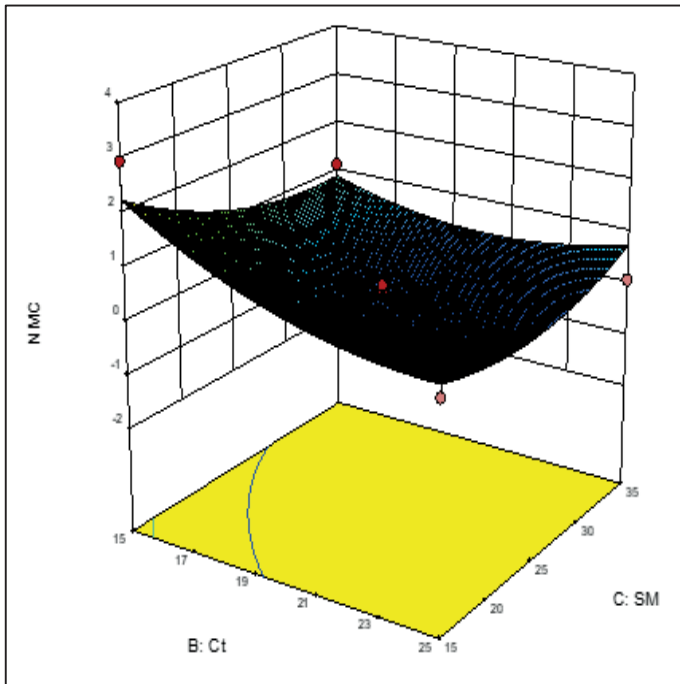


**Şekil 7.12.** Nihai nem içeriğinin değişimine ait yüzey eğrisi, SM=25 g



Şekil 7.13. Nihai nem içeriğinin değişimine ait eşyüksele eğrisi, SM=25 g

160 W mikrodalga çıkış gücü için çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesi değişimine göre nihai nem içeriğindeki değişim Şekil 7.14'deki yüzey eğrisinden görülmektedir. En düşük nem içeriğine sahip ürünlerin orta miktarda başlangıç örnek kütlesi kullanılarak elde edilebileceği görülmektedir.



Şekil 7.14. Nihai nem içeriğinin değişimine ait yüzey eğrisi, P=160 W

Nihai nem içeriği için mikrodalga çıkış gücü, çevrim süresi ve başlangıç örnek kütlesi değişkenlerinin gerçek değerleri üzerinden dikkate alınan ikinci dereceden model denklemini aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} NMC = & 26.262 - 0.023 \cdot P - 1.024 \cdot Ct - 0.419 \cdot SM + 8.333 \cdot 10^{-7} \cdot P \cdot C + \\ & 4.667 \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot SM + 8.25 \cdot 10^{-3} \cdot Ct \cdot SM + 2.129 \cdot 10^{-4} \cdot P^2 + \\ & 0.018 \cdot Ct^2 + 4.408 \cdot 10^{-3} \cdot SM^2 \end{aligned} \quad (7.2)$$

İkinci dereceden ve etkileşimli terimleri içeren bu model denkleminin belirleme katsayısı,  $R^2$ , 0.9155 olmakla beraber yüksek bir uyum eksikliği katsayısına (Lack of fit = 74.07) sahiptir ve bu da arzu edilmeyen bir değerdir.

#### 7.4.3. Kuruma sabiti analizi

İnce tabaka kurutma model denklemleri kontrol mekanizmasından bağımsız olarak kuruma olayının birleşik tanımına yönelik çabayı ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu model denklemlerinde bulunan kurutma sabiti, k, tasarım, optimizasyon ve çok sayıda yinelemeli model hesaplamasının gerekli olduğu herhangi bir analiz için en uygun değeri yansıtır. Şöyle ki, kurutma sabiti, çeşitli taşınım olaylarının fenomenolojik özelliğini temsil ettiğinden malzemenin nem içeriğinin, sıcaklığının ve boyutunun yanı sıra havanın nemi, sıcaklığı ve hızının da bir fonksiyonudur (Krokida ve ark., 2004).

Kurutma verilerini temsil etmekte kullanılan model eşitliklerinden biri olan Page modeli kullanılarak elde edilen kuruma sabiti değerlerinin cevap değişkeni olarak dikkate alınması durumunda analiz sonucunda ikinci dereceden ve etkileşimli terimleri içeren model denklemlerinin makul olduğu görülmüştür. Analiz özetine ait veriler Tablo 7.12'de görülmektedir. Bu model denkleminin ardışık (sequential) kareler toplamına ait p-değeri 0.0367 olup kabul edilebilir bir değerdir. Uyum eksikliği yönüyle bakıldığında doğrusal ve 2FI modellerine kıyasla önemsiz bir düzeydedir. Ayrıca belirleme katsayısı ( $R^2=0.9803$ ) yönüyle oldukça başarılı bir model olduğu söylenebilir. Bu parametreler birlikte dikkate alındığında ikinci dereceden model yaklaşımı en uygun yaklaşım olarak önerilmektedir ve bu yaklaşım dikkate alınarak kuruma sabitinin değişimi değerlendirilmiştir. Tablo 7.13 ikinci dereceden model yaklaşımına göre kuruma sabitine ait ANOVA sonuçlarını göstermektedir.

**Tablo 7.12.** Kuruma sabiti analiz özeti

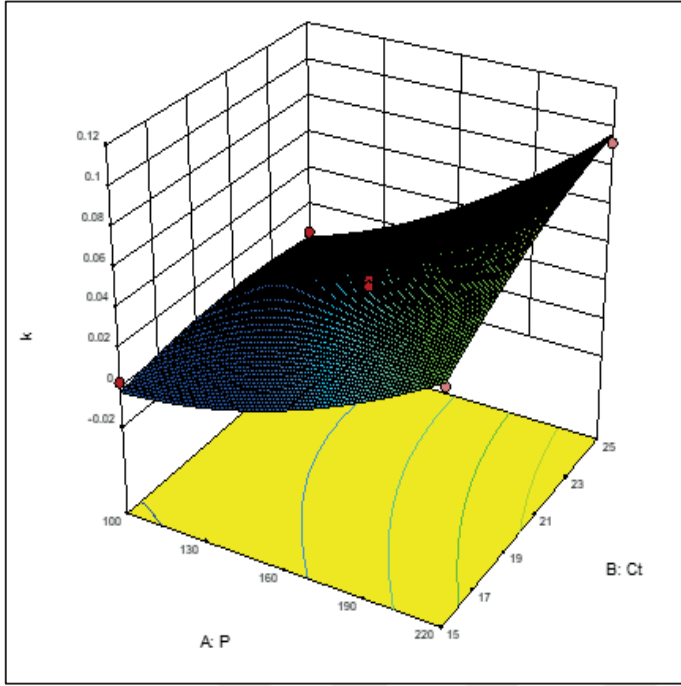
Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	< 0.0001	0.0266	0.7931	0.6587	
2FI	0.0153	0.0886	0.9010	0.7258	
Quadratic	<u>0.0367</u>	<u>0.2785</u>	<u>0.9550</u>	<u>0.8039</u>	Suggested
Cubic	0.2785		0.9670		Aliased

**Tablo 7.13.** Kuruma sabiti için ikinci dereceden modele ait ANOVA sonuçları

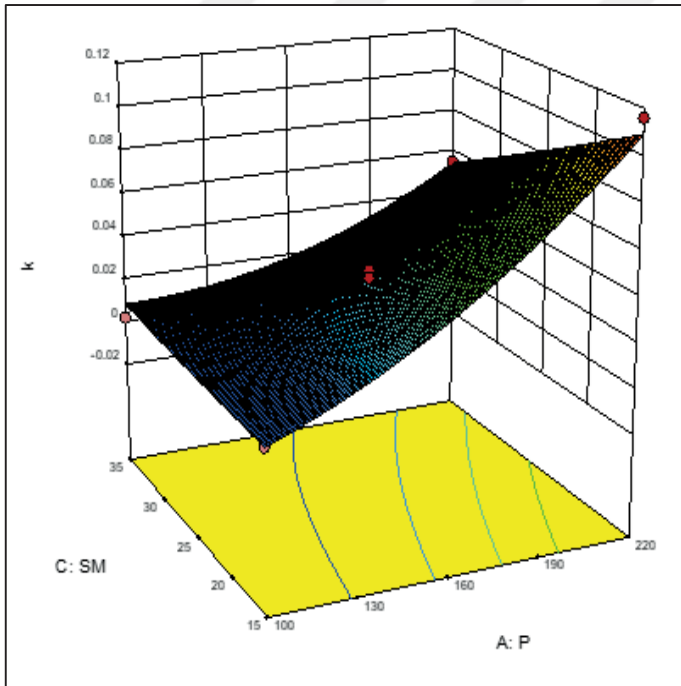
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0.016	9	1.794E-003	38.69	< 0.0001	significant
A-P	0.011	1	0.011	243.72	< 0.0001	
B-Ct	1.118E-003	1	1.118E-003	24.12	0.0017	
C-SM	1.284E-003	1	1.284E-003	27.69	0.0012	
AB	3.963E-004	1	3.963E-004	8.55	0.0222	
AC	8.457E-004	1	8.457E-004	18.24	0.0037	
BC	5.067E-004	1	5.067E-004	10.93	0.0130	
A <sup>2</sup>	5.661E-004	1	5.661E-004	12.21	0.0101	
B <sup>2</sup>	1.532E-004	1	1.532E-004	3.30	0.1119	
C <sup>2</sup>	2.404E-006	1	2.404E-006	0.052	0.8264	
Residual	3.245E-004	7	4.636E-005			
Lack of Fit	1.886E-004	3	6.288E-005	1.85	0.2785	not
Pure Error	1.359E-004	4	3.398E-005			
Cor Total	0.016	16				

Tablo 7.13'e göre varyans analizi modelin geneli için anlamlılık göstermektedir ve uyum eksikliğinin anlamsız/önemsiz oluşu da bu model denkleminin kullanılabilirliğini desteklemektedir.

Şekil 7.15'de kuruma sabiti üzerine mikrodalga çıkış gücü ve çevrim süresi değişkenlerinin etkisini gösteren yüzey eğrisi görülmektedir. Mikrodalga çıkış gücündeki artma ile kuruma sabitinin değeri doğrusal olmayan bir artış göstermektedir. Yüzey eğrisinin değişimine baktığımız zaman yüksek mikrodalga çıkış gücünde (220 W) çevrim süresindeki artma ile kuruma sabitinin değeri belirgin bir şekilde artarken düşük mikrodalga çıkış gücünde (100 W) çevrim süresinin artması ile kuruma sabitinin değeri neredeyse değişmemektedir. Benzer değişim mikrodalga çıkış gücü ve başlangıç örnek kütlelerinin etkileşimini yansıtan Şekil 7.16'da da görülmektedir. 100 W mikrodalga çıkış gücünde başlangıç örnek kütlelerinin değişimi kuruma hız sabiti üzerinde etkili olmazken mikrodalga çıkış gücündeki artma ile başlangıç örnek kütlesi ne kadar az olursa kuruma hız sabiti de o kadar büyük olmaktadır.



Şekil 7.15. Kuruma sabiti için modeli yüzey eğrisi, SM=25 g



Şekil 7.16. Kuruma sabiti için modeli yüzey eğrisi, Ct=20 s

Kuruma sabitinin değişimini temsil eden ikinci dereceden model denklemi Eş. 7.3' de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
k = & -0.196 - 4.621 \cdot 10^{-4} \cdot P + 0.012 \cdot Ct + 6.735 \cdot 10^{-3} \cdot SM + \\
& 3.318 \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot C - 2.423 \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot SM - 2.251 \cdot 10^{-4} \cdot Ct \cdot SM + \\
& 3.221 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - 2.413 \cdot 10^{-4} \cdot Ct^2 + 7.556 \cdot 10^{-6} \cdot SM^2
\end{aligned} \tag{7.3}$$

#### 7.4.4. Tüketilen enerji miktarı analizi

Kurutma sonunda iyi niteliklere sahip kaliteli ürün elde etme çabasının yanı sıra bu ürünü düşük maliyetli bir şekilde elde edebilmek de önemlidir. Kurutma sistemlerinin tasarımı ve işletilmesi sürecinde hangi koşullarda ne kadar enerji harcanacağını bilmek tasarımcı ve işletmecilere büyük fayda sağlamaktadır. Kalite ve uygun maliyet optimum noktasını belirlemek mühendislik yaklaşımının önemli çıktılarından biridir.

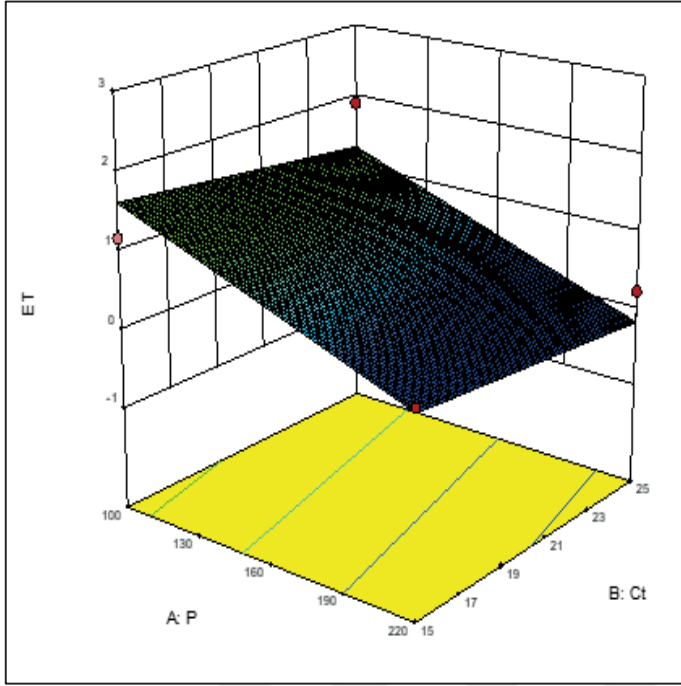
Eldeki kuruma verilerinin değerlendirilmesi ile ortaya çıkan tüketilen enerji miktarı (ET) değerlerini yansıtmak üzere olası model denklemlerine ait analiz özeti Tablo 7.14’de görülmektedir. Her ne kadar düşük bir belirleme katsayısına ( $R^2=0.6168$ ) sahip olsa da doğrusal model önermesi diğer model önermelerine göre daha uygun görülmektedir.

Şekil 7.17’de mikrodalga çıkış gücü ve çevrim süresine bağlı olarak tüketilen enerji miktarının değişimi görülmektedir. 25 g başlangıç örnek kütlesi için mikrodalga çıkış gücündeki artma ile tüketilen enerji miktarının azaldığı görülmektedir. Bu da düşük mikrodalga güçlerinde kuruma süresinin oldukça uzamasına bağlı olarak uzaklaştırılan birim su başına çok daha fazla enerji harcanmasından kaynaklanmaktadır. Harcanan enerji suyu uzaklaştırmaktan daha çok faydasız enerji olarak üretilmektedir. Çevrim süresinin etkisinin ise önemsenmeyecek düzeyde az olduğu söylenebilir.

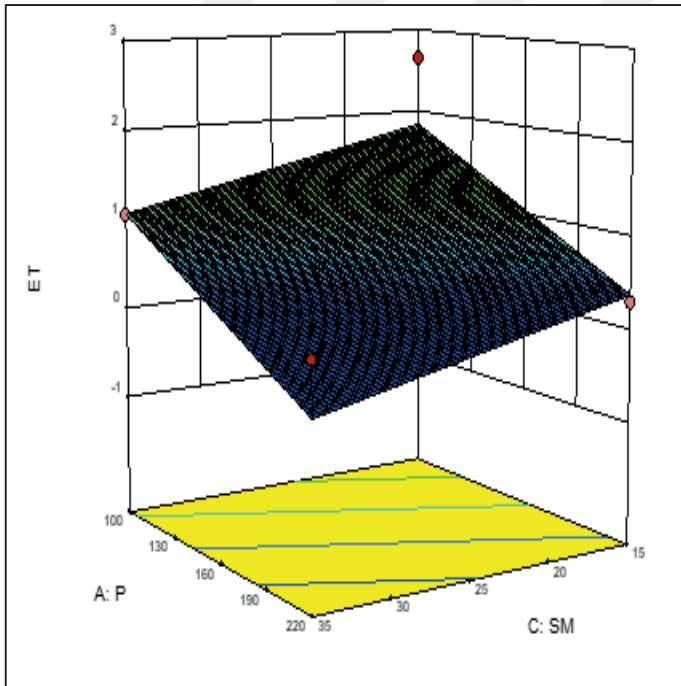
Başlangıç örnek kütlesinin tüketilen enerji miktarı üzerine olan etkisini görmek için Şekil 7.18 yardımcı olacaktır. Bütün mikrodalga çıkış güçlerinde başlangıç örnek kütlesi arttıkça tüketilen enerji miktarının azaldığı görülmektedir. Bu davranış daha önce 7.3 başlığı altında detaylı olarak değerlendirildiği için burada tekrar edilmeyecektir.

**Tablo 7.14.** Tüketilen enerji miktarı analiz özeti

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	0.0049	< 0.0001	0.5283	0.2978	Suggested
2FI	0.3229	< 0.0001	0.5604	0.0041	
Quadratic	0.0882	< 0.0001	0.7393	-0.8236	
Cubic	< 0.0001		0.9997		Aliased



Şekil 7.17. Tüketilen enerji miktarı için doğrusal model yüzey eğrisi, SM=25 g



Şekil 7.18. Tüketilen enerji miktarı için doğrusal model yüzey eğrisi, Ct=20 s

Tüketilen enerji miktarının değişimini temsil eden doğrusal model denklemi Eş. 7.4' de verilmiştir

$$ET = 4.312 - 0.012 \cdot P - 0.033 \cdot Ct - 0.039 \cdot SM \quad (7.4)$$

#### 7.4.5. Optimizasyon çalışması

Bireysel olarak her bir cevap değişkeni üzerine bağımsız değişkenlerin etkilerini analiz etmekle ancak sınırlı bir değerlendirme yapılabilmektedir. Bunun yanı sıra bütün cevap değişkenleri için en iyi (istenen) değerleri sağlayacak deneysel çalışma şartlarını belirlemek istersek bunun için bir optimizasyon değerlendirmesi yapmak gerekir. Bu çalışmada dikkate alınan cevap değişkenleri için en iyileme sonuçlarını sağlayacak kısıtlamalarla optimum koşullar Design-Exper paket programı ile tespit edilmiştir. Elbette ki bu değerlendirme mutlak manada en iyi koşullar anlamına gelmemektedir. Deneme desenine göre gerçekleştirilen deneysel veriler üzerinden paket programın dikkate aldığı bir dizi optimum nokta tayin yaklaşımları sonucunda önerdiği çalışma koşullarıdır. Bu optimizasyon çalışmasında yaklaşık % 90 kuru madde içeriğine sahip ürün (nem içeriği 0.11 kg nem/kg kuru madde) elde etmek üzere en yüksek kuruma sabiti değerini ve en az enerji tüketimini sağlayacak çalışma koşulları tespit edilmeye çalışıldı. Toplam kuruma süresi için herhangi bir kısıtlama uygulanmadı. Bu sayede uygun çevrim süresi önermesi elde edilmeye çalışıldı. Cevap değişkenlerinin istenen değerleri için bağımsız değişkenlerin alacağı değerler optimizasyon yaklaşımı sonucu ortaya koyuldu. Tablo 7.15’de bu kısıtlamalar ve değişkenlere ait alt ve üst limitler görülmektedir.

Dikkate alınan kısıtlamalar için paket program tarafından 77 adet optimum çalışma koşulu tespit edilmiş olup bunlar arasında arzu edilirlilik değeri en yüksek olan önerme dikkate alınmıştır. Bu önermeler ve bu önermelere göre elde edilmesi gereken cevap değişkeni değerlerine ait ilk beş önerme Tablo 7.16’da görülmektedir.

**Tablo 7.15.** Optimizasyon kısıtlamaları

Değişken	Hedef	Alt Sınır	Üst Sınır
P	aralık içinde	100	220
Ct	aralık içinde	15	25
SM	aralık içinde	15	35
TKS	aralık içinde	54	370
NMC	hedef = 0.11	0	2.944
k	en büyük	0.002157	0.115963
ET	en az	0.184165	2.65487

**Tablo 7.16.** Optimizasyon çalışması önermeleri ve tahmini cevap değişkeni değerleri

No	Bağımsız değişkenler			Cevap değişkenleri				Arzu edilirlilik
	P (W)	Ct (s)	SM (g)	TKS (dk)	NMC (kg nem/kg kuru madde)	k (dk <sup>-n</sup> )	ET (kWh/g)	
1	219.9	17.3	22.6	54	0.11	0.073	0.184	0.852
2	219.7	17.3	22.5	54	0.11	0.073	0.189	0.852
3	219.4	17.3	22.4	54	0.11	0.073	0.197	0.852
4	219.0	17.4	22.2	54	0.11	0.073	0.205	0.852
5	218.8	17.4	22.1	54	0.11	0.073	0.210	0.852

En yüksek arzu edilirlilik oranına sahip olan bir nolu önerme dikkate alınarak ~220 W mikrodalga çıkış gücünde, ~17 s çevrim süresi ile ~23 g başlangıç kütleli portakal dilimleri tekrar kurutuldu. Nihai nem içeriği 0.11 kg nem/kg kuru madde oluncaya dek kurutma sürdürüldü. Bu kurutma deneyi ile optimum nokta önermesi için doğruya yapılmaya çalışıldı.

Cevap değişkenleri için 1 nolu optimizasyon önermesi değerleri, doğrulama deneylerinden elde edilen değerleri ve bu ikisi arasında bağıl hata değerleri Tablo 7.17’de sunulmuştur. Doğrulama deneyi sonucunda istenen nem içeriğine ulaşmak için önermeye göre % 7.41 daha uzun bir sürede (60 dk) kurutma gerçekleşmiştir. Önermeye göre elde edilmesi gereken kuruma sabiti değerinden % 3.7 daha düşük bir kuruma sabiti değeri deneysel verilerden elde edilmiştir. Optimizasyon önermesi ile belirlenen deneysel çalışma şartlarında tüketilen enerji miktarının 0.184 kWh/g olması gerekirken deneysel çalışma sonunda çok daha düşük bir enerji tüketimi ile kurutma deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre optimizasyon yaklaşımı başarılı bir sonuç vermiş olup doğrulama deneyleri ile bu önerme başarılı bir şekilde test edilmiştir.

**Tablo 7.17.** Optimizasyon önermesi ve doğrulama deneyi verileri

Mikrodalga çıkış gücü, P (W)	: 219.9		
Çevrim süresi, Ct (s)	: 17.3		
Başlangıç örnek kütlesi, SM (g)	: 22.6		
Cevap Değişkeni	Optimizasyon önermesi	Doğrulama deneyi	Bağıl hata (%) *
TKS (dk)	54	60	+ 7.41
NMC	0.11	0.111	+ 0.91
k (dk <sup>-n</sup> )	0.073	0.0703	- 3.7
ET (kWh/g)	0.184	0.0208	- 88.7

\* + / - işaretleri önerme değerlerine kıyasla artma/azalma durumunu ifade etmektedir

Bu optimizasyon değerlendirmesi ve doğrulama deneyleri ile ~220 W mikrodalga çıkış gücünde, ~17 s çevrim süresi ile ~23 g portakal diliminin kurutulması ile istenen nem içeriğine ~60 dk sonunda ulaşılabilmektedir. Ayrıca bu kurutma süreci sonunda en az enerji tüketimi ile en yüksek kuruma sabiti değeri elde edilebilmektedir.

Aşağıda Resim 7.1’de doğrulama deneyi sonunda elde edilen kurutulmuş portakal ürünü görülmektedir. Grsel olarak nemini kaybetmiş ancak canlılığını muhafaza eden bir ürün elde edildiği görülmektedir. Bazı dilimlerde görülen yanık ve kararmalar kurutma tabağındaki ilgili dilimin dalga kılavuzuna yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Mikrodalga fırının içine yönlendirilen mikrodalgaların il çıkış noktası doğrudan ve sürekli bir dilime tesir edince aşırı ısınmadan kaynaklı kararmalar oluşabilmektedir. Bu çalışmada kurutulan materyal fırın içinde sabit durduğu için bir eksiklik olarak değerlendirilebilir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için fırın içinde kurutulan materyalin sabit bir hızda döndürülmesi gerekmektedir. Nitekim mikrodalga fırınların tasarımında bu husus uygulanmaktadır. Ancak bu çalışmada sürekli ve düzenli olarak tartım yapabilmek için mikrodalga fırın modifiye edilmiştir. Hem belirli periyotlarla sürekli tartım yapmak hem de materyalin içinde olduğu tabağı döndürebilmek mevcut sistemde mümkün değildir. Bu teknik sorunun aşılması ile homojen bir enerji maruziyeti ile kurutulmuş ürün elde etmek mümkün olabilecektir.



**Resim 7.1.** Doğrulama deneyinden elde edilen kurutulmuş portakal rneği (orijinal)

## 8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Modifiye edilmiş ev tipi bir mikrodalga fırın kullanılarak portakal dilimlerinin kurutulması üzerine yapılan bu çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Portakal dilimlerinin kurutulmasında etkin olan mikrodalga çıkış gücü, mikrodalga üretim çevrim süresi, başlangıç örnek kütlesi parametreleri dikkate alındı. Bu bağımsız değişkenlerin dışında kalan diğer olası değişkenlerin değişmediği kabul edilerek ve uygun şartlar sağlanarak kurutma deneyleri gerçekleştirildi. Bu noktada, mikrodalga çıkış gücünün kontrol edilebilmesi, çevrim süresinin ayarlanabilmesi ve sürekli ve düzenli olarak tartım yapılabilmesi yönüyle kullanılan mikrodalga fırının modifikasyonunun başarılı olduğu görüldü. Ancak, kurutulan materyalin içine koyulduğu kurutma tabağının asılı olarak sabit durması (fırın içinde döndürülmemesi) bir eksiklik olarak görülmektedir. Bu eksikliğin giderilebilmesi için kurutma tabağının sabit bir hızda fırın içinde dönerken kütle takibinin de yapılabilirdiği bir iyileştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır.
2. Deneysel tasarım yaklaşımında Box-Benhenken tasarımı dikkate alınarak deneme deseni oluşturuldu. Daha öncesinde, bu deneme deseninin oluşturulabilmesi için ön denemelerle bağımsız değişkenlerin alt ve üst sınırları belirlendi. Deneysel tasarım, verilerin değerlendirilmesi ve optimum nokta çalışmasında Design-Expert paket programı kullanıldı. Cevap yüzey yöntemi yaklaşımının uygulanmasında başka deneysel tasarım yaklaşımları da (merkezi kompozit tasarım gibi) kullanılarak farklı materyallerin ve kurutma koşullarının değerlendirilmesi yapılabilir.
3. Bu tez çalışmasında portakal dilimlerinin kuruma kinetiğine ait veriler elde edilerek değerlendirmeler yapıldı. Portakal örneklerinin taze ve kurutulmuş ürünlerinin vitamin, mineral ve besin öğeleri ve duyu özellikleri yönüyle bir değerlendirilmesi yapılmadı. Bu çıktıları hedefleyen başka çalışmalar yapılarak literatüre daha fazla katkı sunulması mümkündür.
4. Mikrodalga çıkış gücündeki artma ile kuruma süresinin kısaldığı, daha düşük nem içeriğine sahip ürünlerin elde edilebildiği görüldü. Düşük mikrodalga çıkış güçlerinde kuruma süresinin uzaması gibi istenmeyen bir durumla karşılaşıldı.

5. Mikrodalgaların ısı üretebilmesi için uygulama süresinin önemini tespit etmek üzere dikkate alınan çevrim süresi değişkeninin önemli bir etkisi olduğu görüldü. Kısa çevrim sürelerinde etkili bir ısı üretimi olmazken uzun çevrim sürelerinde aşırı ısınmaların oluştuğu tespit edildi.
6. Hem mikrodalga çıkış gücü hem de çevrim süresinin etkinliğinde bir başka parametre olan başlangıç örnek kütlelerinin de etkin bir değişken olduğu tespit edildi. Az veya fazla miktarda portakal kullanmanın kuruma verileri üzerinde etkili olduğu tespit edildi.
7. Cevap yüzey yöntemi ile mikrodalga çıkış gücü, çevrim süresi ve başlangıç örnek kütleleri değişkenlerinin değişimine bağlı olarak nihai nem içeriği, toplam kuruma süresi, kuruma sabiti ve tüketilen enerji miktarı cevaplarının değişimi değerlendirildi. Toplam kuruma süresinin ve tüketilen enerji miktarının doğrusal model eşitlikleri, nihai nem içeriği ve kuruma sabitinin ise ikinci dereceden model eşitlikleri ile temsil edilebildiği tespit edildi. İlgili model yaklaşımlarına ait analizler gerçekleştirildi.
8. Box-Behnken dizayn yaklaşımına göre tasarlanan deneme desenine göre yapılan deneylerden elde edilen veriler için optimum nokta arması belirli kısıtlar ile gerçekleştirildi. Optimizasyon önermeleri arasından en uygun olanına ait deneysel koşullar dikkate alınarak doğrulama deneyi gerçekleştirildi. Optimizasyon önermesi ile doğrulama deneyi sonuçları arasında arzu edilen düzeyde uyumluluk olduğu görüldü.
9. Daha sonradan yapılacak çalışmalar için yön gösterici olacak bulgular elde edilerek literatüre katkı sunacak bir usulde sonuçlar raporlanarak yazıldı.
10. Bu çalışma ile elde edilen tecrübe, deneysel veriler daha sonradan yapılacak çalışmalar için yol gösterici niteliktedir. Özellikle mikrodalga fırında kurutma tabağının döndürülebilir hale getirilmesi, kurutulacak materyaller için besin öğelerinin değişimini dikkate alarak yeni çalışmalar ile literatüre daha fazla katkı sunulması mümkündür.

## 9. KAYNAKLAR

- Adu, B., Otten, L., Brown, R. B.,** 1994. Modelling Thin Layer Microwave Drying of Soybeans. *Canadian Agricultural Engineering*. 36(3), 135-141.
- Alemrajabi, A. A., Rezaee, F., Mirhosseini, M., Esehaghbeygi, A.,** 2012. Comparative evaluation of the effects of electrohydrodynamic, oven, and ambient air on carrot cylindrical slices during drying process. *Drying Technology*. 30(1), 88–96.
- Alibas, I., Yilmaz, A.,** 2022. Microwave and convective drying kinetics and thermal properties of orange slices and effect of drying on some phytochemical parameters. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 147, 8301-8321.
- Aykın, E., Arslan, S., Durak, A.N., Erbaş, M.,** 2015. Gıdalarda bulunan suyun fizikokimyasal durumu ve sorpsiyon izotermi. *Gıda*, 40(2), 109-116.
- Baysal, T., İçier, F.,** 2012. Gıda mühendisliğinde ısı olmayan teknolojiler. (İçier Filiz, Ed.). Bornova, İzmir: Nobel yayıncılık.
- Bilaloğlu, F.,** 2019. Farklı kurutma yöntemlerinin Pamukova ayvasının kuruma davranışı üzerine etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya. 79 s.
- Box, G. E. P., Wilson, K. B.,** 1951. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*. 13(1), 1-45.
- Brennan, J.G., Grandison, A.S.,** 2015. Evaporation and Dehydration. Food Processing Handbook. Wiley VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim, Germany. 71: 124.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W.,** 1974. Drying Cereal Grains. The AVI Publishing Company Inc., Westport, Connecticut.
- Cemeroğlu, B.,** 2010. Gıda mühendisliğinde temel işlemler. Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları No: 29, Ankara, 586 s.
- Chandra, P.K., Singh, R.P.,** 1995. Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers. pp. 163–167. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Chen, C.C., Tsao C.,** 1995. Moisture Determination of Rough Rice Chine and Other Grains by A Microwave Oven. *Journal Of Agricultural Research of China*. 44(4) 499-514.
- Chen, Y., Barthakur, N. N., Arnold, N. P.,** 1994. Electrohydrodynamic (EHD) drying of potato slabs. *Journal of Food Engineering*. 23(1), 107–119.
- Crank, J.,** 1975. The Mathematics of Diffusion. 2nd Edition, Oxford University Press, England.

- Dadali, G., Apar, D. K., Özbek, B.,** 2007. Estimation of Effective Moisture Diffusivity of Okra for Microwave Drying. *Drying Technology*. 25(9), 1445-1450.
- Dadali, G., Apar, D. K., Özbek, B.,** 2007. Microwave Drying Kinetics of Okra. *Drying Technology*. 25, 917-924.
- Darvishi, H., Zarein, M., Minaei, S., Khafajeh, H.,** 2014. Exergy and energy analysis, drying kinetics and mathematical modeling of white mulberry drying process. *International Journal of Food Engineering*. 10(2), 269-280.
- Demir, V., Gunhan, T., Yagcioglu, A.K.,** 2007. Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems Engineering*. 98, 47–53.
- Diamante, L.M., Munro, P.A.,** 1993. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*. 51, 271–276.
- Dinçer, İ., Zamfirescu, C.,** 2016. Drying Phenomena: Theory and Applications. John Wiley & Sons, Inc., UK, 511 s.
- Erbay, Z., İçier, F.,** 2009. A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 50, 441-464.
- Erdem, T.,** 2007. Ozonlu Su İle Yıkanan Kırmızı Pul Biberin Mikrodalga Enerjisi İle Kurutulması. *Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*. 80 s.
- Esehaghbeygi, A., Basiry, M.,** 2011. Electrohydrodynamic (EHD) drying of tomato slices (*Lycopersicon esculentum*). *Journal of Food Engineering*. 104(4), 628–631.
- Evranoz, Ö., Çataltaş, İ.,** 1983. Gıda İşleme Mühendisliği. İnkılap Kitabevi, İstanbul, 436s.
- FAO,** 2020. Citrus Fruit Fresh and Processed Statistical Bulletin 2020
- Fellows, P.,** 2017. Freeze Drying and Freeze Concentration. Food Processing Technology: Principles and Practice (4th ed). Kent: Woodhead Publishing/Elsevier Science. pp. 929- 940.
- Freire, F., Figueiredo, A., Ferrao, P.,** 2001. Modelling high temperature, thin layer drying kinetics of olive bagasse. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 78, 397-406.
- Funebo, T., Ohlsson, T.,** 1998. Microwave-Assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom. *Journal of Food Engineering*. 38, 353-367.
- Garau, M.C., Simal, S., Femenia, A., Rossello', C.,** 2006. Drying of orange skin: drying kinetics modelling and functional properties. *Journal of Food Engineering*. 75, 288-295.

- Ghazanfari, A., Emami, S., Tabil, L.G., Panigrahi, S.,** 2006. Thin-layer drying of flax fiber: II. Modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. *Drying Technology*. 24, 1637–1642.
- Henderson, S. M., Perry, R. L., Young, J. H.,** 1997. Principles of Process Engineering. *American Society of Agricultural Engineers*, 4th edition. 353 pgs.
- Henderson, S.M.,** 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans. ASAE*. 17, 1167–1172.
- Henderson, S.M., Pabis, S.,** 1961. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6, 169–174.
- Ikrang, E. G.,** 2014. Development of a model for thin layer solar drying of salted fish fillets. PhD Thesis, Department of Agricultural and Bioresources Engineering, University of Nigeria, Nsukka
- Inyang, U. E., Oboh, I. O., Etuk, B. R.,** 2018. Kinetic models for drying techniques—food materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8, 27-48.
- Kaleemullah, S.,** 2002. Studies on engineering properties and drying kinetics of chillies. Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Processing, Tamil Nadu Agricultural University: Coimbatore, India.
- Karaaslan, S., Erdem, T.,** 2014. Mathematical Modelling of Orange Slices during Microwave, Convection, Combined Microwave and Convection Drying. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*. 1(2), 143-149.
- Karadbhajne, S. V., Thakare, V. M., Kardile, N. B., Thakre, S. M.,** 2019. Refractance window drying: an innovative drying technique for heat sensitive product. *Int. J. Recent Technol. Eng*. 8, 1765-1771.
- Karathanos, V.T.,** 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*. 39, 337–344.
- Karim, M. A., Hawlader, M.N.A.,** 2005. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 4914-4925.
- Kemahloğlu, K., Baysal, T.,** 2002. Hububat Ürünlerinin İşlenmesinde Mikrodalga Uygulamaları. *Hububat 2002 Hububat Ürünleri Teknolojisi Kongre ve Sergisi*, Gaziantep, Türkiye, 3-4 Ekim 2002.
- Kamiloğlu, A., Kantar, N. K., Elbir, T.,** 2021. Etilerde osmotik dehidrasyon uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 21, 534-542.
- Kitagawa K., Kanuma Y.,** 1986. The reliability of magnetrons for microwave ovens. *Journal of Microwave Power*. 21(13), 149–158.

- Koç, B., Kaymak-Ertekin, F.,** 2010. Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşlemlerinde Uygulamaları. *Gıda Dergisi*. 35(1), 1–8.
- Krokida, M. K., Foundoukidis, E., Maroulis, Z.,** 2004. Drying constant: literature data compilation for foodstuffs. *Journal of Food Engineering*. 61, 321-330.
- Kudra, T., Martynenko, A.,** 2015. Energy aspects in electrohydrodynamic drying, *Drying Technology*, 33(13), 1534–1540.
- Kudra, T., Mujumdar, A. S.,** 2009. Advanced drying technologies. CRC press, 343-346.
- Labuza, T. P.,** 1976. Drying Food: Technology improves on the sun. *Food Technology*, 30(6), 37.
- Lewis, W.K.,** 1921. The rate of drying of solid materials. I&EC-Symposium of Drying, 3(5), 42.
- Luikov, A.V.,** 1975. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 18, 1–14.
- Maskan, M.,** 2000. Microwave /Air and Microwave Finish Drying of Banana. *Journal of Food Engineering*. (44): 71-78.
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z.,** 2002. A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20 (7), 1503-1513.
- Montgomery, D. C.,** 2013. Design and Analysis of Experiments (8th Edition). John Wiley & Sons, Inc., Arizona, 757 s.
- Mushtaq, F., Mat, R., Ani, F. N.,** 2014. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 39, 555-574.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., Vining, G. G., Borror, C. M., Kowalski, S. M.,** 2004. Response Surface Methodology: A Retrospective and Literature Survey. *Journal of Quality Technology*. 36(1), 53-75.
- Omid, M., Yadollahinia, A. R., Rafiee, S.,** 2006. A thin layer drying model for paddy dryer. Proceedings of the International Conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies, Pathumthani, 12-14 December 2006, 202-211.
- Otsura, K., Murata, S., Chuma, Y.,** 1975. An empirical equation for thin layer drying of rough rice with heated air. *Journal of Japanese Agricultural Machinery*. 37, 331-338.
- Overhults, D.G., White, G.M., Hamilton, H.E., Ross, I.J.,** 1973. Drying soybeans with heated air. *Trans. ASAE*. 16, 112–113.
- Özbek, B., Dadalı, G.,** 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*. 83(4), 541-549.

- Özilgen, M., Özdemir, M.,** 2001. A review on grain and nut deterioration and design of the dryers for safe storage with special reference to Turkish hazelnuts. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 41, 95–132.
- Özkan-Karabacak, A., Acoğlu-Çelik, B., Özdal, T., Yolci-Ömeroğlu, P., Çopur, Ö. U., Baştuğ-Koç, A., Pandiselvam, R.,** 2023. Microwave-Assisted Hot Air Drying of Orange Snacks: Drying Kinetics, Thin Layer Modeling, Quality Attributes, and Phenolic Profiles. *Journal of Food Biochemistry*, 2023, 1-19. <https://doi.org/10.1155/2023/6531838>
- Page, G.E.,** 1949. Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers. M.S.Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Polat, A., Izli, N.,** 2022. Drying of garlic slices by electrohydrodynamic-hot air method. *Journal of Food Process Engineering*, 45(3), 1-13.
- Prosapio, V., Norton, I., D. Marco, I.,** 2017. Optimization of freeze-drying using a Life Cycle Assessment approach: Strawberries' case study. *Journal of Cleaner Production*. 168, 1171-1179.
- Rafiee, S., Sharifi, M., Keyhani, A., Omid, M., Jafari, A., Mohtasebi, S.S., Mobli, H.,** 2010. Modeling Effective Moisture Diffusivity of Orange Slice (Thompson Cv.). *International Journal of Food Properties*. 13(1), 32-40.
- Raghavan, G.S.V., Silveira, A.M.,** 2001. Shrinkage Characteristics of Strawberries Osmotically Dehydration in Combination with Microwave Drying. *Drying Technology*. 19(2), 405-414.
- Rewatkar, P. M., Basvaraj, M., Huddar, V.B.,** 2019. The Experimental Research of Drying Kinetics of Nagpur Orange Fruit (Citrus Sinesis- L) by Hot Air Electrical Dryer. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 8(6S4), 1131-1134.
- Rey, L., May, J.,** 2016. Freeze-Drying/Lyophilization of Pharmaceutical and Biological Products (Third ed.). Informa healthcare.
- Ronoh, E. K, Kanali, C. L., Mailutha, J. T., Shitanda, D.,** 2010. Thin layer drying kinetics of amaranth (*amaranthus cruentus*) grains in a natural convection solar tent dryer. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 10, 2218-2233.
- Rastogi, N., Raghavarao, K., Niranjana, K.,** 2005. Developments in osmotic dehydration. Emerging technologies for food processing (pp. 221-249): Elsevier
- Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J.L., Hamdy, M.Y.,** 1980. A model for ear corn drying. *Transaction of the ASAE*. 23, 1261–1271.
- Sharma, G.P., Prasad S.,** 2006. Optimization of Process Parameters for Microwave Drying of Garlic Cloves. *Journal of Food Engineering*. 75(4), 441-446.

- Sontakke, M.S., Salve, P.,** 2015. Solar drying technologies: A review. *International Journal of Engineering Science*. 4, 29-35.
- Sunil C. K, Kamalapreetha B., Sharathchandra J., Aravind K.S., Rawson A.,** 2017. Effect of ultrasound pre-treatment on microwave drying of okra. *Journal of Applied Horticulture*, 19(1), 58–62.
- Therdthai, N., Zhou, W.,** 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*. 91, 482-489.
- Thompson, T.L., Peart, P.M., Foster, G.H.,** 1968. Mathematical simulation of corn drying: A new model. *Trans. ASAE*. 11, 582–586.
- Thostenson, E. T., Chou, T.-W.,** 1999. Microwave processing: Fundamentals and applications. *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 30, 1055-1071.
- Tiwari R. B.,** 2005. Application of osmo-air dehydration for processing of tropical fruits in rural areas. *Indian Food Ind.* 24(6), 62–69.
- Topuz, A., Feng, H., Kushad, M.,** 2009. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. *LWT-Food Science and Technology*, 42(10), 1667- 1673.
- Toshniwal, U., Karale, S.R.,** 2013. A review paper on solar dryer. *International Journal of Engeneering*. 3, 896-902.
- Tulasidas, T. N., Raghavan, G. S. V., Norris, E. R.,** 1993. Microwave and convective drying of grapes. *Transactions of the ASAE*, 36(6), 1861-1865.
- Tunçer, İ.K.,** 1990. Characterization And Drying of Vegetables By Hot Air and Microwave Energy. In Proceedings of the 4th International Congress On Mechanization and Energy in Agriculture, Adana, Turkey (In Turkish).1-4 October 1990, 472-480.
- URL-1,** 2023. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Magnetron>. Magnetron/ Erişim Tarihi: 01.12.2023
- URL-2.** 2024 <https://thisisantalya.com/oranges/> Erişim Tarihi: 16.02.2024
- URL-3.** 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2023-49535> Erişim Tarihi: 16.02.2024
- Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M.M., Barbosa-Canovas, G.V.,** 2001. Advances in dehydration of foods. *J. Food Eng.* 49(4), 271-289.
- Verma, L.R., Bucklin, R.A, Ednan, J.B., Wratten, F.T.,** 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transaction of the ASAE*. 28, 296–301.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. Ye, K. E.,** 2012. Probability and Statistics for Engineers and Scientists 9th Ed. Prentice Hall, USA, 812 s.

- Wang, C.Y., and Singh, R.P.,** 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper No. 3001.
- White, G.M., Bridges, T.C., Loewer, O.J., Ross, I.J.,** 1978. Seed coat damage in thin layer drying of soybeans as affected by drying conditions. ASAE paper no. 3052.
- Yaşar, B. S.,** 1999. Drying Kinetics and Quality Evaluation for Microwave Drying of Green Peppers (*Capsicum Annuum*). *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ, Ankara, 102 s.
- Yoğurtçu, H.,** 2016. Determination of Drying Kinetics of Tunceli Garlic with Microwave Drying Technique. *Journal of Agricultural Sciences*. 22, 237-248.
- Yoğurtçu, H.,** 2019. Yanıt yüzey metodu kullanarak mikrodalga ile elma kurutmanın optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 34(3), 1365-1376.
- Young, J. H.,** 1969. Simultaneous heat and mass transfer in a porous solid hygroscopic solids. *Trans. ASAE*. 11, 720–725.