

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÖNMELİ AKIŞLI AKIŞKAN YATAKLI MİKRODALGA YEŞİL
ÇAY KURUTUCUNUN İMALATI VE KURUTMA
PERFORMANSININ DENEYSEL BELİRLENMESİ

Mert Köse

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK
II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ

JÜRİ ÜYELERİ
Doç. Dr. Uğur AKBULUT
Doç. Dr. Lütfü NAMLI

RİZE-2022
Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DÖNMELİ AKIŞLI AKIŞKAN YATAKLI MİKRODALGA YEŞİL ÇAY
KURUTUCUNUN İMALATI VE KURUTMA PERFORMANSININ DENEYSEL
BELİRLENMESİ

Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK danışmanlığında Mert KÖSE tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararı ile oluşturulan jüri tarafından 02/02/2022 tarihinde Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı Soyadı	İmza
Başkan	: Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK	
Üye	: Doç. Dr. Uğur AKBULUT	
Üye	: Doç. Dr. Lütfü NAMLI	

Doç. Dr. Ahmet YANIK
ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda bana, “Dönmeli Akışlı Akışkan Yataklı Mikrodalga Yeşil Çay Kurutucunun İmalatı ve Kurutma Performansının Deneysel Belirlenmesi” başlıklı tez konumu öneren, kendisine danışabilmem hususunda beni tereddütte bırakmayan değerli tez danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK' e, ve Sayın Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ' ye, çalışmamda bana gerek maddi gerekse manevi desteklerini esirgemeyen iş yerim Çaysan Doğu Karadeniz Çay Entegre Sanayi A. Ş' ye ve Elektrik Ustabaşı Sedat BALCI' ya ve onun nezdinde bana destek veren fabrikadaki teknik ekibime, destek ve yardımlarını esirgemeyen aileme, tez çalışmamda her zaman yanımda olan eşim Gülşah KÖSE' ye minnet, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mert KÖSE

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Dönmeli Akışlı Akışkan Yataklı Mikrodalga Yeşil Çay Kurutucunun İmalatı ve Kurutma Performansının Deneysel Belirlenmesi” başlıklı bu tezi, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 16/02/2022

İmza

Mert KÖSE

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

DÖNMELİ AKIŞLI AKIŞKAN YATAKLI MİKRODALGA YEŞİL ÇAY KURUTUCUNUN İMALATI VE KURUTMA PERFORMANSININ DENEYSEL BELİRLENMESİ

Mert KÖSE

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK
II. Danışman: Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ

Bu çalışmada, yeşil çayı kurutmak için dönmeli akışlı akışkan yataklı mikrodalga bir kurutucu geliştirilmiş olup, bu kurutucuda yeşil çayın kurutma performansı deneysel olarak incelendi. Farklı mikrodalga güçleri için (100 W, 300 W, 600 W ve 800 W) kütle kayıpları ve kuruma süreleri ölçüldü. Bu değerlerden yararlanılarak boyutsuz kütle oranı, nem içeriği, kütle büzülme oranı ve kurutma hızı hesaplandı. Yeşil çayın sabit yataklı ve dönmeli akışlı akışkan yataklı mikrodalgada kuruma davranışını belirlemek için Tablo 1’de verilen 23 adet ince tabaka kurutma modeli kullanılarak matematiksel modellemesi yapıp, 14 adet değerlendirme kriteri yardımıyla en iyi beş kurutma modeli belirlendi. Ayrıca kurutulan numunelerin nem, ham lif, toplam kül, kafein, polifenol ve su ekstraktı oranları belirlendi.

En iyi modeller sabit yatakta 100 W, 300 W, 600 W ve 800 W için sırasıyla: Wang and Singh, Modifiye Page II, Midilli-Kucuk, Aghbashlo et al.; akışkan yatak için sırasıyla: Wang and Singh, Wang and Singh, Balbay and Şahin ve Aghbashlo et al. olarak elde edildi. Bununla birlikte, en yüksek su ekstraktı oranı sabit yatak için 300 W güç değerinde % 35,44 ve dönmeli akışlı akışkan yatakta ise 800 W güç değerinde % 43,83 olarak tespit edildi. Sonuç olarak, kalite parametreleri açısından, yeşil çay için dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucunun, sabit yataklı olan kurutucuya göre daha ideal olduğu belirlendi.

2022, 73 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga, Dönmeli Akış, Akışkan Yatak, Yeşil Çay, Kurutma, Matematiksel Modelleme

ABSTRACT

MANUFACTURING AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DRYING PERFORMANCE OF SWIRLING FLOW FLUIDIZED BED MICROWAVE GREEN TEA DRYER

Mert KÖSE

**Recep Tayyip Erdoğan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Master Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK
II. Supervisor: Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ**

In this study, a swirling flow fluidized bed microwave dryer was developed to dry green tea, and the drying performance of green tea in this dryer was investigated experimentally. Mass losses and drying times were measured for different microwave powers (100 W, 300 W, 600 W and 800 W). Using these values, dimensionless mass ratio, moisture content, mass shrinkage ratio and drying rate were calculated. In order to determine the drying behavior of green tea in fixed bed and swirling flow fluidized bed microwaves, mathematical modeling was performed using 23 thin layer drying models given in Table 1, and the best five drying models were determined with the help of 14 evaluation criteria. In addition, moisture, crude fiber, total ash, caffeine, polyphenol and water extract ratios of the dried samples were determined.

Best models for 100 W, 300 W, 600 W and 800 W in fixed bed, respectively: Wang and Singh, Modified Page II, Midilli-Kucuk, Aghbashlo et al.; for the fluidized bed, respectively: Wang and Singh, Wang and Singh, Balbay and Şahin, and Aghbashlo et al. was obtained as However, the highest water extract value was determined as 35.44% at 300 W power for the fixed bed and 43.83% at 800 W power for the swirling flow fluidized bed. As a result, it was determined that the swirling flow fluidized bed dryer for green tea was more ideal than the fixed bed dryer in terms of quality parameters.

2022, 73 pages

Keywords: Microwave, Swirling Flow, Fluidized Bed, Green Tea, Drying, Mathematical Modeling

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ	IX
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi.....	3
1.3. Literatür Taraması	4
1.4. Kurutma	8
1.4.1. Kurutucu Seçimi ve Sınıflandırılması	10
1.4.2. Mikrodalga ve Dielektrik Kurutma	11
1.4.3. Elektromanyetik Dalgalar	11
1.4.4. Mikrodalga Isıtma.....	12
1.4.5. Mikrodalga Isıtma Mekanizması	12
1.4.5.1. Dipol Rotasyon	12
1.4.5.2. İyonik Polarizasyon	13
1.4.6. Mikrodalga Isıtmasına Tesir Eden Kriterler	13
1.4.6.1. Özgül Isı	13
1.4.6.2. İletkenlik.....	13
1.4.6.3. Gıdadaki Suyun İçeriği	13
1.4.6.4. Kurutulan Gıda Kütlesi.....	14
1.4.6.5. Mikrodalga Isıtma Hızı ve Çıkış Gücü.....	14
1.4.6.6. Frekans.....	15
1.5. Akışkan Yataklı Kurutma	15
1.5.1. Akışkanlaştırma	15
1.5.2. Minimum Akışkanlaşma Hızı.....	15
1.5.3. Akışkan Yataklı Kurutucular	16

1.5.4.	Akışkan Yataklı Kurutucuların Avantajları ve Dezavantajları.....	17
1.5.4.1.	Akışkan Yataklı Kurutucuların Avantajları.....	17
1.5.4.2.	Akışkan Yataklı Kurutucuların Dezavantajları	18
1.5.5.	Akışkan Yataklı Kurutucularda Isı ve Kütle Transferi.....	18
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	20
2.1.	Materyal.....	20
2.2.	Yöntem	20
2.2.1.	Deney Seti.....	20
2.2.2.	Çalışmada Kullanılan Ölçüm Aletleri	24
2.2.3.	Yeşil Çay Kurutma Yöntemi	26
2.3.	Matematiksel Modelleme	27
2.4.	Değerlendirme Kriteri.....	29
2.5.	Kalite Parametreleri	31
2.6.	Kurutma Formülleri	32
3.	BULGULAR	34
3.1.	Sabit Yatakta Yeşil Çay Kurutma	34
3.2.	Akışkan Yatakta Yeşil Çay Kurutma	42
4.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	57
4.1.	Sabit Yatakta Kurutma	57
4.2.	Akışkan Yatakta Kurutma	61
5.	ÖNERİLER	66
	KAYNAKLAR	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Deneylerde kullanılan yeşil çay örneği	20
Şekil 2. Deney düzeneğinin katı modelleme programında çizilmiş hali (a) Hava tesisatı (b) Girişteki havanın sıcaklık ve nem ölçüm kutusu, (c) Dönmeli akışı oluşturan hava delikli ve özel tasarımlı sabit bakır hava borusu.....	22
Şekil 3. Dönmeli akışı oluşturan hava delikli ve özel tasarımlı sabit bakır hava borusu	22
Şekil 4. Deney düzeneğinin katı modelleme programında çizilmiş bağlantı detayları ..	23
Şekil 5. Nem ve sıcaklık ölçerlerin bağlı olduğu elektrik panosu	23
Şekil 6. Deney düzeneğinin elemanları (a) Girişteki havanın sıcaklık ve nem ölçüm kutusu, (b) Çıkıştaki havanın sıcaklık ve nem ölçüm kutusu, (c) Ortam sıcaklığı ölçme multi fonksiyonlu ekranı, (d) Ortam sıcaklığı ölçme özel probu.....	24
Şekil 7 Girişteki hava hızını ölçmek için imal edilen, probun monte edildiği aparat.....	24
Şekil 8. Çalışmada kullanılan ölçüm cihazları (a), Mikrodalga fırın (b), Çok fonksiyonlu ölçüm cihazı (c), Terazı (d), Gösterge (e), Nem ve sıcaklık ölçüm cihazı	25
Şekil 9. Yeşil çay için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (100 W).....	36
Şekil 10. Yeşil çay için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (300 W).....	38
Şekil 11. Yeşil çay için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (600 W).....	40
Şekil 12. Yeşil çay için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (800 W).....	42
Şekil 13. Yeşil çay için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (100 W).....	45
Şekil 14. Yeşil çay için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (300 W).....	47
Şekil 15. Yeşil çay için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (600 W).....	49
Şekil 16. Yeşil çay için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (800 W).....	51
Şekil 17. Sabit yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki kurutma hızı zaman grafiği	52

Şekil 18. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki kurutma hızı zaman grafiği	53
Şekil 19. Sabit yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki nem içeriği zaman grafiği	54
Şekil 20. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki nem içeriği zaman grafiği	54
Şekil 21. Sabit yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki kütle büzülme oranı zaman grafiği	55
Şekil 22. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki kütle büzülme oranı zaman grafiği	55



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Matematiksel modellemede kullanılan model denklemleri.....	27
Tablo 2. Matematiksel modelleme kuruma eğrisi değerlendirme kriteri denklemleri....	30
Tablo 3. Yeşil ve Siyah Çayın Fiziksel, Kimyasal Özellikleri	32
Tablo 4. Yeşil çay için sabit yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (100 W)	35
Tablo 5. Yeşil çay için sabit yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (300 W)	37
Tablo 6. Yeşil çay için sabit yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (600 W)	39
Tablo 7. Yeşil çay için sabit yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (800 W)	41
Tablo 8. Yeşil çay için akışkan yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (100 W)	44
Tablo 9. Yeşil çay için akışkan yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (300 W)	46
Tablo 10. Yeşil çay için akışkan yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (600 W)	48
Tablo 11. Yeşil çay için akışkan yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (800 W)	50
Tablo 12. Sabit yatakta kurutulan çay numunelerinin zamana bağlı kuruma görselleri ve en iyi modelleri	58
Tablo 13. Sabit yatakta kurutulan çay numunelerinin analiz sonuçları	59
Tablo 14. Sabit yatakta kurutulan çay numunelerinin zamana bağlı kuruma görselleri ve en iyi modelleri	62
Tablo 15. Akışkan yatakta kurutulan çay numunelerinin analiz sonuçları	63

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a, b, c, g	Modellerdeki Ampirik Sabitler
c, g, h, k, k ₀ , k ₁ , k ₂	Kurutma Sabitleri (dakika ⁻¹)
DR	Kurutma Hızı (g su/dakika)
EF	Modelleme Verimliliği
I.T.U.	Uluslararası Haberleşme Birliği
K	Kayıp
MBE	Ortalama Sapma Hatası
MC	Nem İçeriği
M _e	Denge Nemi (g su/g kuru madde)
M _i	Ürünün İlk Kütlesi (g su/g kuru madde)
M _t	“t” Anındaki Kütle (g su/g kuru madde)
M _{t+dt}	t+dt Anındanki Kütle (g su/g kuru madde)
MR	Boyutsuz Kütle Oranı
m ₀	Başlangıçta alınan deney numunesi miktarı (g)
m ₁	Kurutulmuş çözünmeyen kısım miktarı (g)
n	Denklemdaki Sabitlerin Sayısı
P	Ortalama Görelî Yüzde Hata
r	Korelasyon Katsayısı
residuals	Atıklar
RMSE	Ortalama Karesel Hata
RSS	Kalanların Kareler Toplamı
RSSE	İndirgenmiş Kare Hata
$\bar{R}^2$	Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı
R ²	Belirleme Katsayısı
SEE	Tahmini Standart Hata
SSE	Tahmini Hataların Karesel Toplamı
SST	Toplam Kareler Toplamı
S _{mr}	Kütle Büzülme Oranı
w	Numunenin Kütlece Yüzde Olarak İfade Edildiği Kuru Madde İçeriği
χ^2	Azaltılmış Ki-Kare

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gıdaların muhafazası için insanoğlunun kullandığı geleneksel metotlardan olan kurutma işlemi, önemini günümüzde de korumaktadır. (Ünver Alçay vd., 2015). Yaşamın devamlılığı açısından gıdaların saklanabilmesi insanoğlu için çok önemli bir husus olmuştur. Zamanla, saklamanın yanında endüstrileşmenin imkânlarından yararlanılarak farklı teknolojiler de geliştirilmiştir (Midilli vd., 1999; Kucuk vd., 2014). Destekleyici bir rol üstlenen kurutma işlemi, konserve veya dondurma işlemlerindeki kaliteyi arttırıp bu işlemleri daha kolay bir hale getirir. Kurutma işlemi, tarım ürünlerinin bozulmadan korunmasını amaçlar ve bu işlemle birlikte ürünlerin içindeki su miktarı düşer. Buna bağlı olarak bozulma süreci yavaşlatılmış olur. Kurutma işleminde şartlar kontrollü veya kontrolsüz olabilir. Bu ayrım ürünlerin kalitesine direkt olarak tesir eder (Gürel vd., 2016). Kurutma işleminin en mühim gayesi ürün yapısından suyu kısmi olarak uzaklaştırmaktır. Bu işlem neticesinde mamullerin raf ömürleri daha uzun hale gelir ve erkenden bozulmaları engellenir (Moradi vd., 2020; Moradi vd., 2019). Yapısal olarak baktığımızda ise gıdaların hacmi ve ağırlıkları işlem süresince düşmeye devam eder, bu da gıda boyutlarında küçülmeye imkân verir. Bu küçülme, düşük ambalajlama ve depolama maliyeti anlamına gelir (Al-Hilphy vd., 2020; Llavata vd., 2020). Diğer taraftan kurutmaya oluşan fiziksel ve kimyasal değişiklikler nihai ürünün kalitesini doğrudan etkiler (Alaei vd., 2018). Gıdanın yapısındaki değişimler; kurumanın süresi, sıcaklığı ve sudaki aktivite gibi etmenlere kuvvetli bir biçimde bağlıdır (Alaei vd., 2018; Kudra ve Mujumdar, 2009). Kurutma işleminin uygun bir şekilde gerçekleştirilmemesi ve eksik olması gıdanın ve tarımsal ürünün kalitesinde istenen seviyenin sağlanmasına ve piyasa standartlarına uygun olmasına engel olur. Bu gibi istenmeyen durumlarda gıdaların renginde, kokusunda ve tadında bozulmaların olması muhtemeldir (Llavata vd., 2020).

Ticari amaçla kullanılmakta olan 50' den fazla endüstriyel kurutucu vardır. Bu türlerin arasında sıcak hava kurutucuları; gıda, tarım, kâğıt, tekstil ve kimya gibi endüstrilerde oldukça yaygın olarak kullanılan kurutucu çeşitlerindendir. Öte yandan bu kurutma sisteminde; enerji sarfiyatının yüksek olması, işlem süresinin uzun olması, verimin düşük olması gibi, gıdadaki kaliteyi olumsuz olarak etkileyen önemli eksiklikler vardır. Bu eksiklikler kurutulmuş gıdalara olan ilgiyi azaltabileceğinden sektörü olumsuz

etkileyebilir ve maddi kayıplara yol açabilir. Bundan dolayı, son zamanlarda değişik endüstrilerde bahsi geçen sorunları aşabilmek adına yeni teknolojilere ciddi bir ihtiyaç duyulmuştur (Singh vd., 2012). Önceki dönemlerde gıdaların kurutulması için tabii kaynaklar kullanılmaktaydı. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte değişik sistemler ortaya çıkmıştır.

Kurutulacak malzemeye göre kurutmanın hızı ve sıcaklığı değişkenlik gösterir (Kurtuluş, 2007). Kurutulmak istenen malzemelerin özellikleri göz önünde bulundurularak belli bir sıcaklığın üzerine çıkılmaması gerekir. Bundan dolayı kurutma işleminin zamanı, sıcaklıktan çok kurutma havasının hızına bağlıdır. Kurutma süresinin kısılması için kurutma havası, mamulün üstüne doğrudan etki etmelidir. Fakat sistem içerisindeki havayı ısıtmak, enerji maliyeti açısından en büyük sorunu teşkil etmektedir (Kurtuluş, 2007). Kurutma işleminde akışkan yataklı kurutma sistemleri son zamanlarda enerji ekonomisindeki değişikliklerden ötürü büyük önem kazanmıştır. Akışkan yataklı sistemler yakıt ateşleme sistemlerinden nükleer çalışmalara, tıbbi sistemlerden gıda kurutmasına kadar çok geniş bir alanda tercih edilmektedir. Günümüzde akışkan yataklı kurutma modellerinin tercih edildiğine sıklıkla rastlayabilmekteyiz (Kurtuluş, 2007).

Konvansiyonel kurutma metotlarında ısı; konveksiyonla, kodüksiyonla ya da radyasyonla ürünün yüzey kısmına gelir ve oradan da içeriye iletilir (Gölcü ve Şen, 2014). Bu metotlarla kurutma esnasında ürünün içi ve yüzey kısımları arasında bir sıcaklık farkı olduğundan, iç kısımlara doğru ısının iletimi kademeli bir şekilde gerçekleşir. Bu sebeple kuruma işlemi ürünün en dışında başlar. Ürünün büzülmesiyle beraber sertleşmiş bir katman oluşur. Bu durum ürünün iç kısmında bulunan suyun dış yüzeylere doğru ilerleyişini yavaşlatır, kimi durumlarda ise tamamen engeller (Soysal vd., 2009).

Konvansiyonel kurutmada mevcut olan problemlerin yok edilebilmesi, enerji tasarrufu yapılabilmesi, daha kaliteli ve daha kısa zamanda ürünlerin elde edilebilmesi amacıyla araştırmacılar daha farklı metotlara ilgi duymuşlardır. Bu metotlardan bir tanesi de mikrodalga ile kurutma işlemidir. Mikrodalga, gıda sektöründeki bir kısım gıda süreçlerine; vakit ve enerji tasarrufu, besin değerlerinin korunması, işlemin kolay bir biçimde kontrol altında tutulabilmesi gibi faydalar sağlar. (Thostenson ve Chou, 1999).

Teknolojideki ilerlemelerle beraber daha az bir zamanda elde edilebilen, kaliteli ürün arayışı sebebiyle mikrodalga sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Temperleme, kurutma, ön ısıtma, pastörizasyon, sterilizasyon, fırında pişirme gibi değişik ısıtma süreçlerinde mikrodalga fırınlardan faydalanılmaktadır. Mikrodalgayla kurutmada

ısınama hacimsel bir şekilde meydana gelir. Isının materyal içerisinde üretilmesinden ötürü konvansiyonel kurutmaya mukayese edildiğinde, kısa zamanda bir kuruma sağlanır (Vadivambal ve Jayas, 2007). Bununla beraber ısınma içten meydana geldiğinden sıcaklık ürünün içerisinde eşit şekilde dağılır ve ürünün yüzeyinde yüksek ısınma ortaya çıkmaz. Gıdanın büzülme durumu ve kayıplar görece azdır (Eren, 2005).

Bu çalışmanın motivasyonunu çay sektöründe kullanılan geleneksel kurutma yöntemlerine alternatif yöntemler belirlemek ve kurutmada karşılaşılan problemlerin giderilmesine katkı sağlamak oluşturmaktadır. Çalışmada kurutma zamanı, kütle kaybı temel parametre olarak alındı. Ayrıca, kurutmada etkin olan giriş havası sıcaklığı ve hızı bu çalışmada yaklaşık olarak sabit kabul edilerek her bir deney için kalite parametreleri incelendi.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Günümüzde gıdaları, besin değerlerini ve kalitelerini kaybetmeden koruma hususu oldukça fazla önem arz etmektedir. Bu bağlamda kurutma işlemi besin değerlerini kaybetmeden gıdaları korumada ön plana çıkmaktadır. Günümüzde birçok kurutma sistemi olduğu halde, kurutmada enerji tasarrufu ve gıda kalitesinin korunması konusu hâlâ araştırmaya ve geliştirmeye oldukça açık bir konudur. Kurutma işlemindeki enerji tüketiminin fazlalığından dolayı işlemin ekonomik ve hızlı olması adına mikrodalga ile kurutma teknolojisinden daha fazla yararlanılması gerekmektedir. Bu düşüncelerle yola çıkarak, bu çalışmanın amacı, ülkemizin en önemli tarım ürünlerinden ve Rize'nin temel geçim kaynağı olan yeşil çayın hem sabit yataklı hem de dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucuda mikrodalga yöntemiyle kurutma davranışının belirlenmesi, Tablo 1'deki 23 adet farklı matematiksel model ve Tablo 2'deki 14 adet değerlendirme kriteri kullanılarak matematiksel modellenmesi ve elde edilen ürünlerin kalite parametrelerinin belirlenmesidir.

Literatürde ilk kez yeşil çayın, dönmeli akışlı akışkan yataklı mikrodalga kurutucuda kuruma davranışının belirlenmiş olması, kurutma işleminin yeşil çayın kalite parametrelerine nasıl bir etkisi olduğunun ortaya konulmuş olması ve detaylı bir matematiksel modelin gerçekleştirilmesi bu çalışmanın önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, geliştirilen dönmeli akışlı akışkan yataklı mikrodalga teknolojisinin bu çalışmayla ilk kez çay sektöründe kullanılmış olması ve elde edilen verilerin çayla

ilgilenen işletmelere, üreticilere, politika geliştiricilerine, araştırmacılara ve sanayicilere kaynak oluşturacak olması çalışmanın sosyal, ekonomik, kültürel, çevresel ve bilimsel önemini ortaya koymaktadır.

1.3 Literatür Taraması

Literatürün taranmasıyla birlikte, mikrodalga kurutma sisteminin genelde başka bir kurutma sistemiyle bağlantılı olarak kullanılmış olduğu görülmüştür. Bu tezde olduğu gibi mikrodalga kurutma sistemi tek olarak genelde deneylerde ve ev kullanıcıları tarafından kullanılmaktadır.

Çınar (2006), yaptığı araştırmada kurutmanın önemine ayrı olarak değinmiştir. Kesin bir koruma yöntemi olarak gördüğü kurutmayı özellikle gıdaların içerisindeki su miktarının düşürülmesine bağlamıştır. Kurutma vasıtasıyla daha zengin besin değerlerinin ortaya çıktığına, dayanıklılık sağlandığına, başkaca kurutma sistemlerine göre teçhizata ve insan gücüne ihtiyacın daha az olduğuna kanaat getirmiştir.

Özkan vd. (2007), yaptığı araştırmada bazı ileri gelen ülkelerde tahılların kurutulmasının normalden daha kısa bir sürede yapılabilmesi için araştırmalar yapmışlardır. Ayrıca domatesin de aynı yöntemle kurutulması başlığını araştırmışlardır. Yapılan incelemeler neticesinde domatesin mikrodalga ile kurutmaya ziyadesiyle uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu kurutma sonucunda domateste herhangi bir renk, biçim, reha ve tat sorunu olmadığı saptanmıştır.

Huang vd. (2007), mikrodalga ve fırınlı ısıtmanın ilkbahar ve sonbaharda toplanıp stoklanan çayın kalitesi üzerinde enzim değişikliklerine etkilerini incelemiştir. Bu incelemelerinin neticesinde mikrodalga ile kurutulan çayın fırınlı ısıtma sistemiyle kurutulana göre daha fazla C vitamini muhteviyatına haiz olduğunu ve stoklama sürecindeki kaybın fırınlı kurutma sistemine göre görece daha az olduğunu ortaya koymuştur. İlkbahar ve sonbaharda toplanıp mikrodalga sistemiyle kurutulan çayın klorofil içeriğinin yine fırınlı kurutulmuş çaya göre daha yüksek ve kararlı olduğunu ortaya koymuştur. Fakat çaydaki polifenol içeriğinde dikkate değer bir fark bulamamıştır. Çalışmasında vardığı sonuç; ilkbahar ve sonbahar aylarında toplanan çayın muhafaza özelliklerinin mikrodalga ile kurutmaya büyük ölçüde artmış olduğudur.

Polatçı (2008) reyhan bitkisinin değişik kurutma şartlarında ve cihazlarında kurutma işlemini gerçekleştirmiştir. Araştırmasında 5 değişik kurutma metodu

kullanmıştır. Bu metotlar; etüvde, gölgede, doğrudan değmeli, güneşte ve mikrodalgada kurutmadır. Çalışmanın neticesinde kurutmanın performansını, kalitesini ve etken madde içeriklerinde meydana getirdiği değişiklikleri karşılaştırmayı hedeflemiştir. Aynı zamanda kurutma metotlarını mukayese edip birbirlerine göre artılarını ve eksilerini ortaya koymuştur.

Bingöl ve Devres (2010) çalışmalarında Türkiye'nin yurtdışına en çok ihraç ettiği mamullerden olan üzüm meyvesinin kurutulması aşamasında kararmasına neden olan “polifenol oksidaz” adı verilen enzimin, çocuk ve ileri yaştakilerde astım, isilik ve mide rahatsızlıklarına sebebiyet verebilen sülfite kullanmadan inaktive edilebilmesi ve aynı zamanda kurumasının hızlandırılmasını hedeflemiştir. Mikrodalga destekli konvektif kurutma sistemi, konvansiyonel kurutma metoduna nazaran daha seri olmasından ve gıda maddelerinde bulunan dipolar su molekülleriyle etkileşmesinden ötürü tesirli bir kurutma sürecine imkân verdiğini belirtmiştir. Kurutmayı daha da hızlandırıp kaliteli bir son mamul elde etmek amacıyla üzümleri kurutma öncesinde bir çözelti içerisine atmıştır ve 3 dakika kadar bekletmiştir. Kullandığı bir diğer ön işleme ise üzümlerin 90°C buharla 2 dakika 20 saniye kadar haşlanması olmuştur. Bu iki farklı ön işlemleri uyguladıktan sonra 0,25 W/g mikrodalga güç oranı ve ortalama 1,8 m/s hızında havayla ve 60°C sıcaklıkta kurutulmuşlardır. Çalışmasının neticesinde 0,25 W/g mikrodalga güç oranı ve 60°C konvektif hava ile kurutulan yukarıda bahsettiğimiz çözelti içerisine daldırılan üzümlerde, kuruma hızı açısından kontrol numunelerine nazaran belirgin bir fark oluşmadığını görmüştür. Ancak 90°C buharla 2 dakika 20 saniye kadar haşlanan üzümlerde kontrol numunelerine nazaran kayda değer bir hızlı kurumayı gözlemlemiştir.

Dong vd. (2011), çalışmada bitki bilimi ve geleneksel Çin Tıbbında kendi ülkelerine özgü küçük bir ağaç tipi olan Ekomya ağacının içerdiği değerlerin mikrodalgayla kurutulması halinde ne gibi değişikliklere uğrayacağını incelemiştir. Bu incelemeyi yaparken mikrodalga çıkış gücünü ve tedavi süresini göz önüne almıştır. Araştırmaları sonucunda mikrodalga ile kurutma; tavada, fırında ve sıcak hava ile pişirmeye kıyasla çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Mikrodalga sisteminin fonksiyonel bileşenleri azami şekilde muhafaza edebildiğini ortaya koymuştur. Ekomya ağacının çiçeklerinin şeklinin ve renginin bozulmadığını ayrıca aromasının taze ve güçlü olduğunu görmüştür.

Durance ve Yaghmaee, (2011), diğer kurutma metotlarıyla birleştirilerek kullanılan mikrodalga ile kurutmayı, deneysel çalışmalarda ve sanayi tipi uygulamalarda en hızlı

dehidrasyon metotları arasında göstermiştir. Bunun dışında mikrodalga kurutma için gereken sıcaklığın azaltılmış hava basıncı ile birlikte kullanılmasının, besinlerdeki aroma ve biyolojik olarak aktif moleküllerin korunması konusunda diğer bazı teknolojilere göre eşit veya daha fazla faydalı olduğunu belirtmiştir. Fosil yakıt yerine elektrik enerjisine ihtiyaç duyması nedeniyle bu kurutma yönteminin işletme maliyetinin yüksek olduğunu diğer taraftan da ürün kalitesini arttırması açısından yine de enerji maliyeti düşük olan yerlerde tercih edilebilir olduğunu belirtmiştir. Mikrodalga sistemi ile kurutmanın hali hazırda çok yaygın olarak tercih edilmemesine karşın sanayinin ilgisini çekmesi hasebiyle önümüzdeki yıllarda daha yaygın hale gelebileceğini öngörmüştür.

Alibaş (2012), 50 gramlık asma yapraklarının nem oranlarını %75,35 (± 0.02)' ten %9,13 (± 0.12) olana kadar 650 W, 750 W ve 850 W güç değerlerinde kurutmuştur. Kurutmanın zamanı ise bu farklı güçlere göre ayarlanmış olup, 210 – 270 saniye kadar sürmüştür. Modelleme kısmında ise Midilli et al. denkleminde türetilmiş ve Alibas yaklaşımı olarak isimlendirilmiş kurutma yaklaşımları kullanılmıştır. Güç yoğunluklarının üçünde de Alibas modeli deneysel verilere en yakın sonuçları vermiştir. Çalışmanın sonucunda mikrodalga sistemiyle kurutulan asma yapraklarının renk ve aksorbik asit değerleri taze asma yapraklarının aynı değerleriyle mukayese edilmiştir. Bu mukayese neticesinde 750 W güç yoğunluğu kullanılarak yapılan kurutmada elde edilen renk ve aksorbik asit değerleri taze yaprağa en yakın değerler olarak ortaya çıkmıştır.

Yoğurtçu (2013), mikrodalga fırında limon kurutma kinetiğini incelemiştir. 8 mm kesilen limon dilimlerinin 90 W, 180 W, 360 W ve 600 W güç yoğunluklarında kurutulduğu zaman; çıkış gücüyle kuruma hızının doğru orantılı olduğunu ve kurutma süresinin ise ters orantılı olduğunu görmüştür. En uygun model olarak Page modeli en az uygun ise Henderson & Pabis modeli olduğunu tespit etmiştir.

Lechtanska vd. (2015), yeşil biberin mikrodalga destekli infrared kurutucuda kurutulmasının sonuçlarını ortaya koymuştur. Beş farklı programla yeşil biberi kurutmuştur. Referans alabilmek için önce konvansiyonel olarak yeşil biberi kurutmuştur. Çalışmasının asıl amacı ise, bu hibrit kurutmanın kurutma kinetiği, enerji harcaması ve ürünün kalitesi üzerindeki tesirini irdelemektir. Bu değerlendirmeleri yapabilmek için, C vitamini saklama, su hareketi, renkteki değişiklik ve suyun buharlaşma yeteneğini temel almıştır. Deneylerin neticesinde, bu hibrit kurutma tekniğinin oldukça verimli olduğu, kurutma süresinde ciddi bir azalma sağladığı, C vitaminini daha iyi koruyabildiği ve saf konvansiyonel kurutmaya nazaran enerji harcamasından tasarruf sağladığı kanıtlanmıştır.

Gür (2016) çalışmasında akışkan yataklı bir kurutucuda balkabağına ait kurutma karakteristiklerini araştırmıştır. Bu çalışma için hasat zamanında toplanan balkabağı, küpler halinde kesilerek 50, 60 ve 70 °C'deki değişik sıcaklıklarda hava ile akışkan yatak sistemli bir kurutucuda kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutmanın sonunda başlangıç nemi %95 olan balkabağının 2 saat sonra neminin %6 ve daha altına düştüğü gözlemlenmiştir. Akışkan yataklı kurutucu sabit olanlara nazaran daha hızlı bir kurutma sağlamıştır. Çalışmanın sonucunda kurutma işlemini matematiksel olarak modellemiştir.

Sivakumar vd. (2016), viskozitesi düşük ve yapışma yetenekleri yüksek olanlar hariç akışkan yataklı kurutucuların gıdaları kurutma kabiliyetlerinin yüksek olduğunu görmüştür. Geleneksel kurutmaya dair olumsuz yönleri aşabilmek adına akışkan yataklı kurutmanın en iyi alternatif olarak ön plana çıktığını ve fosil yakıtların kullanılmasının kalitede kayda değer bir şekilde kayıplara ve mamul kayıplarına yol açtığını gözlemlemiştir. Çalışmasında daha çok hibrit kurutma sistemleri ön plandadır. Hibrit kurutma tekniklerini kurutmanın geleceği olarak görmektedir.

Şimşek (2018), yaptığı çalışmada ürün olarak kivi, nane ve kayısının mikrodalga sisteminde kurutulmasındaki deneysel davranışları incelemiştir. 100 W, 300 W, 450 W, 600 W, 700 W ve 800 W mikrodalga güçlerini kullanmıştır. Farklı güçlerde yaptığı kurutma işlemlerinde kütleli kayıpları belirleyip, kurutmanın ne kadar sürdüğünü ölçmüştür. Zamana bağlı olarak kütleli değişimlerden elde ettiği değerlerden yararlanmıştır. Ulaştığı verilerden; boyutsuz kütle, nem ve kütleli büzülme oranının yanında kurutma hızını ve renk değişimlerini gözlemlemiştir. Üzerinde çalıştığı gıdaları göz önüne alarak mikrodalga sistemi ile kurutmada en uygun kurutma güçlerini ve modelini belirlemiştir. Nem kaybının ve kurutma hızının en yüksek nanede sonra kivi ve ardından kayısıda olduğunu görmüştür. Çalışması neticesinde bu kurutma tekniğinin evsel kullanımdan daha çok sanayi tipine uygun olduğunu ve başka bir kurutma tekniğiyle birleştirildiğinde kurutma avantajının artacağını görmüştür. Mikrodalga ile kurutmada dikkat edilmesi gereken hususlardan, sistemde oluşan buharın tahliyesinin nasıl yapılması gerektiğinden, ürün israfının önüne nasıl geçileceğinden, hijyenik bir kurutma ortamının yaratılması ve kurutulacak ürüne göre mikrodalga sisteminin endüstriyelendirilmesi gerekebileceğinden bahsetmiştir.

Polatçı ve Taşova (2020) ülkemizdeki portakal imalatının yıllık yaklaşık iki milyon ton ile turuncuğil meyveleri arasında birinci sırayı aldığını ve portakalın daha çok meyve suyu ve taze meyve olarak tercih edildiğini belirtmiştir. Çalışmasında özel olarak üretilen

sıcaklıkla kontrol edilebilen bir mikrodalga kurutucu kullanılmış olup, 55, 65 ve 75 °C kurutma sıcaklıklarında kurutulan portakal dilimlerinin bazı değerleri incelenmiştir. Kuruma performans değerleri, ideal ince tabakalı kuruma modeli ve kalite yönünden en uygun renk değerleri belirlenmiştir. Portakaldaki nem oranı %10 ile %13 seviyesine inene kadar kurutma işleminde devam edilmiştir. 55, 65 ve 75 °C kurutma sıcaklık değerleri için kuruma süreleri sırasıyla 390, 150 ve 65 dakika olarak tespit edilmiştir. Portakaldan birim zaman içerisinde uzaklaşan nem oranları ince tabakalı kurutma modellerinde kullanılarak kurutma eğrilerine en çok yaklaşan matematiksel model belirlenmiştir. Eğrilerin oluşturulması esnasında en çok kullanılan modellerden Page, Midilli-Kucuk, Yağcıoğlu ve Jane-Das modelleri tercih edilmiştir. Tüm modeller arasında en yüksek kararlılık katsayısı değeri Midilli-Kucuk modelinde olduğundan dolayı bu model kuruma eğrilerini en yakın tahmin eden ince tabakalı kuruma modeli olarak saptanmıştır. Üründeki son kalite değerleri yönünden en ideal renk değerleri 65 °C kurutma sıcaklık değerinde saptanmıştır.

Das ve Banik, (2021), mikrodalga kimyasının temel ilkelerini, çeşitli uygulamalarda mikrodalga radyasyonunun özelliklerini, avantajlarını ve önemini açıklamıştır. Temel olarak organik sentezde mikrodalga ısıtma sisteminin uygulanmasını, mikrodalga ısıtmanın ana prensibi ile birlikte ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Jiang vd. (2021) çilekler üzerinde yaptığı araştırmada dondurarak yapılan kurutma işlemiyle darbeli akışkan yataklı mikrodalga teknolojisini mukayese ederek, akışkan yataklı mikrodalga teknolojisini öne çıkarmıştır. Dondurma yöntemi ile kurutmaya nazaran kuruma süresini %45 azaltabilmiştir. Buna ilaveten bu iki kurutma yöntemini kombine bir şekilde kullanarak çileklerin dokusunun daha iyi olduğunu ve besin değerlerinin daha yüksek olduğunu görmüştür.

1.4. Kurutma

Gıdaların kalitesini arttırmada ve güvenliğinin sağlanmasındaki etkenlerden önemli bir tanesi de kurutmadır. Uygulama açısından bakıldığında kurutma işleminin oldukça çok çeşidi vardır. Bu çeşitlerin fazlalığına karşın günümüzde kurutma sistemleri enerji ve kalite anlamında hala iyileştirmelere ihtiyaç duymaktadır (Midilli vd., 1999; Kucuk vd., 2014). Bilhassa gıda kurutulması hususunda farklı şartlarda çalışma özelliğine sahip ve enerji sarfiyatını en aza indiren sistemlerin geliştirilmesi ve yapılan bu yeniliklerin teoride

kalmaması gerekmektedir. Mikrodalganın bahsettiğimiz bu süreçlere sağlamış olduğu yararlar göz önüne alındığında, kurutma anlamında sebze ve meyveler üzerindeki tesirinin etraflıca incelenmesi gerekmektedir (Midilli vd., 1999; Kucuk vd., 2014).

Önemli bir süreç olan kurutma işlemi, difüzyon vasıtasıyla sebze ve meyvelerin içerisindeki nemi yüzeyden buharlaştırıp, yaş ürünü daha kabul edilebilir orandaki nem yüzdesine indirgeyerek kurumasını sağlar. Günümüzde kurutma işlemi sektörel açıdan bakıldığında gayet yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Midilli vd., 1999; Kucuk vd., 2014).

Ürün kalitesini korumayı amaçlayan kurutma işlemi, birçok ürünün içerisinde bulunan nemi uzaklaştırmak suretiyle en masrafsız ve basit şekilde ürünlerin maruz bırakıldıkları uygun olmayan çevre şartlarından korunmasını sağlamaktadır. Bu koruma, üründe oluşması muhtemel reaksiyonları yavaşlatıp kalitenin de artmasını sağlar (Midilli vd.,1999).

Geleneksel yöntemlerle yapılan kurutma işlemi oldukça fazla zaman alabilmekte olup, maliyetler göz önünde bulundurulduğunda istenmeyen bir durum olarak göze çarpar. Kurutma işlemini kısa sürede ve ürün kalitesini koruyacak şekilde yapabilmek, ekonomik açıdan ve kalite açısından çok önemli bir husustur (Teymur,1999). Mikrodalgayı içerisinde barındıran veya doğrudan mikrodalga ile yapılacak kurutmalarda maliyet ve zamanın gayet düşük olduğu görülmüştür. Yapılan incelemelerde taze bir ürünün mikrodalga ile kurutulduktan sonra renginde çok göze çarpan bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir (Teymur,1999).

Ürünlerin doğal bir şekilde kuruması veya kurutulması esasında iki süreç oluşmaktadır. Bu süreçlerden ilki ürünlerdeki nemi buharlaştırmak için sisteme eklenmesi gereken ısı enerjisinin değişimi, ikincisi ise ürün içerisindeki buharlaştırılacak olan sıvı kütlelerinin sistemden uzaklaştırılmasıdır. Kurutma işlemi için gereken enerji kullanılırken bu enerjinin verimli şekilde kullanılmasına dikkat edilmelidir (Teymur,1999). Bu sebepten ısının hareketi ürünler açısından oldukça önemlidir. Isının geçişiyle ışıınım, taşınım ve iletim şeklinde ayrı ayrı olabileceği gibi üçü beraber de olabilir. Isı enerjisinin hareketi maddeye değdiği noktadan merkeze veya tüm yüzeylere doğru olmaktadır. Mikrodalgayla ürünün her alanında aynı ölçüde sıvı, molekül titreşmesiyle meydana gelir (Teymur,1999).

Kurutma pek çok amaçla uygulanabilir. Bunlar sıralanmak istenirse;

a) Ürünün bozulmasını engellemek ve tüketim tarihlerini uzatmak amacıyla nem ve

kimyasal reaksiyonları en aza indirmek,

b) Ürün içindeki sıvı miktarını azaltıp, aroma ve yüksek besin değeri gibi kriterlerin öne çıkarılıp korunmasını sağlamak,

c) Kurutulmuş ürünlerin içerisindeki sıvı miktarının azalmasıyla doğru orantılı olarak oluşacak olan hacim azalmasının birçok maliyeti düşürmesi,

d) Yüksek besin değeri elde edip, kaliteli ve yoğun aromalı ürün imalini sağlamak

(Dündar, 2010).

1.4.1. Kurutucu Seçimi ve Sınıflandırılması

Kurutucunun seçilmesi ve sınıflandırılması ürün kalitesindeki ihtiyacın ne ölçüde olduğuyla ilgilidir. Bu ihtiyaçtan dolayı kurutucu seçimi hususunda bazı sınırlamalar olabilmektedir (Menon ve Mujumdar, 1982).

Kurutma işleminin sınıflandırılması, iletim, taşınım, ısıtım ve dielektrik ısıtma şeklindeki metotları esas almaktadır.

Kurutma sistemleri ve kurutucular aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan kurutma sistemi olan dönmeli akışlı akışkan yataklı sistem ayrı bir başlık altında incelenecektir (Mujumdar ve Arus 2006).

- Dolaylı kurutucular
- Döner kurutucular
- Akışkan yataklı kurutucular
- Endüstriyel püskürtmeli kurutma sistemleri
- Dondurarak kurutma
- Güneşte kurutma
- Lüle yataklı kurutucu
- Pnömatik ve ani kurutma
- Konveyör kurutucular
- Kızılötesi kurutma
- Özel kurutma teknikleri ve yeni kurutucular
- Tamburlu kurutucular
- Kızgın buhar kurutma
- Darbeli kurutucular (Mujumdar ve Arus 2006).

1.4.2. Mikrodalga ve Dielektrik Kurutma

Dalga boyları 0,001 – 1,000 metre arasında değişen mikrodalgalar, elektromanyetik çeşitliliğin bir elementidir. Endüstri, tıp ve bilimsel kullanım için belirlenmiş mikrodalgaların frekans aralığı 1 cm – 1 m şeklindedir (Özkan vd., 2007). Mutfaklarda kullanılmakta olan ev tipi mikrodalga fırınlar 2450 MHz frekansları kullanılmaktadır. Bu değer su rezonans frekansı olması nedeniyle seçilmiştir. Mikrodalga kurutmada ve ısıtmada 915 ve 2450 MHz frekansları kullanılmaktadır

1.4.3. Elektromanyetik Dalgalar

Elektromanyetik dalgalar sürekli etrafımızdadır. Işıkla, X- ışınıyla, televizyon ve radyoyla, ultraviyoleyle, infrared ve mikrodalgayla örneklendirebiliriz. Elektromanyetik dalgaların yayılabilmesi için nesnelerin mutlak sıfır sıcaklığının üstünde olması yeterlidir. Elektromanyetik dalgaları karakterize ederken dalga, dalga boyu ve frekans kullanılmaktadır (Schiffmann, 2006).

Elektromanyetik dalgaları sınıflandırmak için dalgayı, dalga boyunu ve frekansı kullanabiliriz. Dalga boyunu çevrimin uzunluk değeri olarak ifade ederken; frekansı saniyedeki çevrim sayısı olarak tanımlayabiliriz. Frekans ve dalga boyu birbiriyle ters orantılıdır. Dalgaların enerjilerinden bahsedecek olursak, infrared, görünen ve mor ötesi dalgalar zayıf hidrojen bağlarını; gama ve X ışınları ise kimyasal bağları kırarak enerjilere sahiptirler. Mikrodalgaların boylarıysa bu bahsettiğimiz dalgalardan uzun olduğundan kimyasal bağları kırabilecek enerjileri yoktur. İyonizasyona neden olup kimyasal bir bağ kurma yetileri yoktur. Elektron iyon kutuplaşmasına iyonizasyon denir. Mikrodalgalar neticesinden uygulanan saha $2,45 \times 10^9$ defa titreşim yapar. Dipol moleküllerse bu seri mikrodalga hareketiyle birlikte senkron olmayı denerken bir sürtünme oluşturur ve ısınmaya başlar. Oluşan bu ısınma neticesinde kimyasal bağ kırılması olayı gerçekleşir. İşte bu bağ kırılması olayının nedeni direkt olarak mikrodalgaın kendisi olmayıp, ortaya çıkan ısıdır (Kartal, A. S., 2011).

1.4.4. Mikrodalga Isıtma

Geleneksel ısıtmadan farklı olarak mikrodalgada enerji mamulün her yerinden üretilmektedir. İçinden üretilme derken merkezden çevreye doğru yayılan herhangi bir ısı yoktur. Bu yanılgıya düşmemek gerekir. Mikrodalga sisteminde enerji ürünün her tarafında eşit şekilde üretilmektedir. Bu eşit sıcaklık sayesinde ürünlerdeki termal gerilmeler daha az olmaktadır (Afzal ve Abe, 2000; Toğrul ve Pehlivan, 2003).

Son zamanlarda teknolojinin gelişmesinden ötürü mikrodalga kullanımı hem evsel olarak hem de endüstriyel olarak artış göstermiştir (Konak vd., 2009). Bir ürünün mikrodalgayla ısıtılma işlemi uygulanmakta olan elektriksel alanın yoğunluğunun bir neticesi olarak iyonik bileşenlerin hareketleri veya molekülün polarizasyon ve depolarizasyon mekinazmasıyla meydana gelmektedir (Gwarek ve Celuch, 2004).

Mikrodalgayla ısıtma sistemlerinin en öne çıkan özelliği hacimsel ısıtma denen özelliktir. Mikrodalgaların madde içine penetre olmasıyla elde edilen erken başlama süresi ve iç ısınma performansı artış göstermekte ve ısıtma süreci daha kısa hale gelmektedir (Venkatesh ve Raghavan, 2004). Kayıp faktörü ise mikrodalga enerjisinin bir nesneyi aşmak için uğradığı enerji kaybıdır (Cemeroğlu, 2018). Daha çabuk ısınan ürünler kayıp faktörleri yüksek olan ürünlerdir (Giese, 1992). Kayıp faktör değerini değiştiren nedenler ise; dalga frekansı, nesne sıcaklığı, fiziki durum ve bileşimdir (Galema, 1997).

1.4.5. Mikrodalga Isıtma Mekaniği

1.4.5.1. Dipol Rotasyon

Gıdaların birçoğu polar moleküller ihtiva etmektedirler. Bu gıdaların başında su gelmektedir. Gıdaların içerisinde gelişi güzel bir biçimde bulunan bu moleküllere elektriksel alan uygulaması yapıldığında frekansa bağlı şekilde polaritesi değişen elektriksel alan nedeniyle dönme eğilimi yani dipol rotasyon gösterirler (Uslu ve Certel, 2006). 2000 Mhz'de çalışmakta olan evsel kullanımlı bir mikrodalgaın elektriksel alandaki yön değiştirmesi saniyede 2 milyar kez gerçekleşmektedir. Bu hızlı alan değişiminde bulunan polariteye adapte olmak için diğer moleküllerle ve birbiriyle sürtünen polar moleküller ortaya bir ısı çıkarır (Uslu ve Certel, 2006).

1.4.5.2. İyonik Polarizasyon

Gıdaların içerisinde çözünmüş vaziyetteki tuzun iyonik bileşeni, üzerlerindeki elektriksel yükler sebebiyle uygulanmakta olan elektriksel alanın polaritelerine zıt yönde ivmelenerek harekete başlarlar. İyon çarpışımı harekette olan iyonlardaki kinetik enerjilerinin termal enerjiye dönmesine sebebiyet vermektedir (Uslu ve Certel, 2006).

1.4.6. Mikrodalgaın Isıtmasına Tesir Eden Kriterler

1.4.6.1. Spesifik Isı

Mikrodalga sisteminde ısıtmada genellikle ihmale uğrayan spesifik ısı parametresi, ısıtmanın uzunca bir zaman alması durumunda göz önünde bulundurulması gerekmektedir olan bir etkidir. Mikrodalga alanındaki ısıtma olayında daha az dielektrik azalması yaşayan maddelerin ısıtılması işleminde etkin bir görev almaktadır (Yurdagel vd., 1994).

1.4.6.2. İletkenlik

Genellikle mikrodalga sistemindeki ısı oluşumunda etkili mekanizma dipolar dönmedir. Gıdaların ısınması işleminde asıl rolü daha çok iyonik kondüksiyon oynamaktadır. Tuz eklemesi yapılması gıdaların ısıtılması işleminde etkin bir durum olmakla beraber ısıtma oranının artmasına neden olmaktadır. Bu tip değişiklikler gıdaların içeriğinde özellikle mikrodalga sisteminin kullanımı durumunda titizlikle yapılmalıdır. Bu ekleme işlemi penetrasyonun derinliği durumuna direkt olarak tesir etmekte olup yüzeysel noktalarda fazlaca ısınmaya sebebiyet verebilmektedir (Yurdagel vd., 1994).

1.4.6.3. Gıdadaki Suyun İçeriği

Mikrodalga enerjisinin absorbe edilmesinde önemli bir madde olarak suyu gösterebiliriz. Gıdalardaki fazla su, yüksek dielektrik kayıp faktörü ve daha iyi ısınma demektir. Spesifik ısı azalması neticesinde su oranı düşük gıda maddeleri de mikrodalga sisteminde işlenmektedir. Nem oranı yüksek kısımların mikrodalgaın enerjisini absorbe

etmesinin zor olmamasının nedeni bu ısıtma esnasında maddenin kurumasıdır. Kurutma sürecinde bu durum kayda değer bir artıdır. Genellemenin yapmak gerekirse bir gıda ürününün nem muhteviyatıyla dielektrik sabiti doğru orantılıdır. Dielektrik kayıp faktörü, nem muhtevası %20 civarına kadar artabilir ve bazen nem içeriği azalım gösterebilir. Karışımdaki dielektrik sabiti bu karışımı meydana getiren bileşenlerdeki sabitlerin arasında olmaktadır (Yurdagel vd., 1994).

1.4.6.4. Kurutulan Gıda Kütlesi

Genelleme yapmak gerekirse maddenin kütlesi arttıkça, bu maddeyi ısıtma işlemi için gereken zaman da artış göstermektedir. Bu nedenle, ısıtma tesiri de kütle artışına bağlıdır. Isıtılmak istenen kütleyi göz önünde bulundurursak, ısıtma işlemini gerçekleştirebilmek için aralarında doğrudan bir ilişki kurulması gerekmektedir (Decareau, 1992; Yurdagel vd., 1994).

1.4.6.5. Mikrodalganın Isıtma Hızı ve Çıkış Gücü

Endüstriyel tipteki mikrodalgaların birçoğu 5-100 kW aralığında değişmekte olan çıkış güçlerinde çalışmaktadırlar. Bu güç şiddeti ayarlanırken kütle göz önünde bulundurulmalıdır. Kütleye göre verilen fazla güç oranı sıcaklığın hızlı artışına sebebiyet verir. Fırınlama ve pişirme gibi gıdalara uygulanan diğer bazı işlemler için başlangıçta sıcaklığı yükseltir. Yükselen bu sıcaklık bazı reaksiyonların hızlanmasına sebebiyet verir ve birçok karmaşık fizikokimyasal reaksiyonları tetikleyebilmektedir (Yurdagel vd., 1994). Bu reaksiyonlar, ısıtılmak istenen gıdalarda tat değişimine, tadın kötüleşmesine ve ürün kalitesinde düşmeye sebebiyet verir. Yüksek hızda ısıtmadan kaynaklanabilen bir diğer sorun ise homojen olmayan sıcaklığın dağılım sorunudur. Buna sebebiyet veren olay ise görece hızlı ısınmakta olan kısımların, daha ağır ısınan bölgelere gerçekleştirdiği ısı geçişinin daha yavaş bir hızla meydana gelmesi, kısmi olarak da ısıtılmış olan maddenin biçiminden kaynaklanmaktadır (Yurdagel vd., 1994).

1.4.6.6. Frekans

Farklı biçimlerde, oldukça büyük bir spektrumda elde edilmiş olan mikrodalgalarda tercih edilen frekans ve dalga boyları endüstride, bilim ve tıpta limitli hale getirilmiştir. Gıda endüstrisi işlemenin ve pişirmenin Uluslararası Haberleşme Birliği (I.T.U.) aracılığıyla düzenlenmiş olan mikrodalgaların kullanımına dair frekanslar, 2450 ± 50 MHz ve 915 ± 15 MHz olarak tahmin edilmektedirler (Yurdagel vd., 1994). Mikrodalgadaki enerji frekansı ve bu frekansa göre değişmekte olan dalganın boyu kurutulmak istenen gıda işleme derinliğine doğrudan etki etmektedir. Gıda içerisinde bulunan suların güçsel derinlikleri 2450 MHz frekans için 2-3 cm ve 915 MHz frekans için 20 cm'dir. Bundan dolayı kurutulmak istenen gıdaya göre seçilecek olan frekans değeri de önem teşkil etmektedir. Mikrodalganın genelde geniş gıdalarda -örnek olarak dondurulma işlemi uygulanmış balıklarda- eritilme işleminde 915 MHz frekanslarında çalışması yeterli olacaktır. Boyutu daha ufak olan sosis gibi gıdaların pişirilme işleminde ise 2450 MHz frekansı kâfi olacaktır (Yurdagel vd., 1994).

1.5. Akışkan Yataklı Kurutma

1.5.1. Akışkanlaştırma

Bir fanla daha basınçlı hale getirilen havanın veya basınçlı hale getirilmiş sıvı veya gaz halinde bir akışkan maddenin, mamule tesir eden yer çekimini baskılamaya yetecek kadar olan yüksek bir hızla, akışkan hale getirilmek istenen katı parçaların arasından geçirilerek parçaların askı halinde tutulmasına akışkanlaştırma adı verilir (Kurtuluş, 2007; Bozkurt vd., 2020). Eğer akışkanın geçmesi esnasında tanecik hareketi gerçekleşmez de sabit bir şekilde kalması durumunda bu yatağa da sabit yatak denir (Temel, 2017).

1.5.2. Minimum Akışkanlaşma Hızı

Akışkanlaşma hızı akışkan yatak sürecinin en önemli parametresidir (Bozkurt vd., 2020). Yatağı oluşturan parçacıkların akışkanlık niceliğini gösterdiği anki gaz hızına minimum akışkanlaşma hızı denir. Bu hız değerinin altında kalan yatak sabit yatak tavrı,

üzerine çıkan ve akışkanlaşan yataklar değişik tür yatak tavırları sergiler (Bozkurt vd., 2020).

1.5.3. Akışkan Yataklı Kurutucular

Akışkan yataklı kurutucular çoğunlukla akışkanlaşabilme özelliğine sahip yaş partiküler ve granüler materyalleri kurutmak için tercih edilmektedirler. Çoğunlukla kimyasal maddelerde, karbonhidratlarda, gıdalarda, biyomateryallerde, içeceklerde, seramiklerde, toz ya da kapsül biçimli ilaçlarda, tıbbi ürünlerde, pestisitlerde ve tarım kimyasallarında, boya maddelerinde ve pigmentlerde, deterjanlarda ve yüzey aktif maddelerde, gübrede, polimer ve reçinelerde, taninlerde, yanma-tutuşma-külleştirme ürünlerinde, atık yönetme süreçlerinde ve çevre koruma işlerinde kullanılmaktadırlar (Mujumdar, A.S., 2006). Akışkan yataklı kurutma, güzel bir katı karışımı oluşturması, yüksek hızda ısı-kütle transferi ve maddelerin kolay taşınmasını sağlaması gibi kritik birtakım avantajlar sağlamaktadır. Kurutma işleminin haricinde, toz uzaklaştırma, granülasyon, kaplama, yığma, soğutma, külleştirme, yakma ve gazlaştırma gibi değişik endüstriyel sahalarda akışkan yataklı kurutucular tercih edilmektedir (Mujumdar, A.S., 2006).

Bir kolonda yığılmış biçimde durmakta olan parçacıkların bulunduğu yatağa alt kısımdan düşük hızlarla hava üflenmeye başlandığında ilk başlarda hava, taneciklere yüksek bir kuvvet uygulayamaz ve bulduğu boşluklardan yukarıya doğru ilerler (Erbaş, O., 2007). Akışın hızı artınca hava, taneciklere daha yüksek bir kuvvet uygulayacağı için tanecikler arasındaki yer çekimi kuvvetini azaltmaya başlar. Hız arttıkça kaldırma kuvveti yer çekimini dengeye alır, havanın yukarı doğru akmasıyla tanecikler asılı vaziyette kalır. Partiküllerin üzerindeki kuvvetler toplamı vektörel olarak sıfır olur (Erbaş, O., 2007). Yatak bölgesinde hacimsel olarak bir değişiklik olmadan hız daha da arttırılırsa, yatağın içinde hava kabarcıkları oluşur. Akış hızı arttıkça kabarcıklar şişer ve yatağın içinde geniş boşluklar meydana getirir. Bu tip yataklara türbülanslı akışkan yatak denir.

Akışkan yataklı kurutucuda parçacıkların çok iyi bir şekilde karışması gerekmektedir. Bu yüzden sistemden yüksek verim alabilmek için kurutulmak istenen parçacıkların karakteristiklerine ve özelliklerine hâkim olmak gerekir (Doğan ve Ersöz, 2009).

Tipik bir akışkan yataklı kurutma sistemi silo, kurutma ve soğutma etaplarından

meydana gelen akışkan yatak, sürekli kurutucu, kurutma havasını emecek olan fan, ısı üretici, sistemin kontrol panosu, egzoz ve taşıyıcı sistemden oluşmaktadır. Enerji tasarrufu olması yönünden tahliye edilen sıcak havanın bir kısmı taze havayla karıştırılarak kurutucuya tekrar geri gönderilir (Doğan ve Ersöz, 2009).

Akışkan yataklı kurutucuda kurutulmak istenen maddelerin genel karakteristikleri şunlardır:

1. Ortalama parçacık büyüklüğü 20µm-10 mm arasında olmalıdır. Bunun amacı herhangi bir birikmenin ve kanallaşmanın önüne geçmektir. 20µm ‘den küçük parçacıkların yüzey alanlarının geniş olmasından ötürü birikme problemine sebebiyet vermektedir.
2. Parçacıkların akışkanlaşması için hava uygulanacağından kendi aralarındaki boyut dağılımları sınırlı olmalıdır.
3. Boyutları büyük olan partikülleri de akışkanlaştırmak için şekillerinin küresel olması gerekmektedir.
4. Akışkan hale getirilmek istenen maddeler içinde topaklanmış vaziyette olanlar varsa öncelikle bu maddelerin parçalanıp akışkanlaştırılmaya hazır hale getirilmesi gerekmektedir (Kurtuluş, 2007).
5. Karışımda yatağın içerisinde oluşacak olan karışıma dayanacak güçte parçacıkların olması gerekmektedir.
6. Yatağın içerisinden çıkacak olan mamulün yapışacak bir vaziyette bulunmaması gerekmektedir (Kurtuluş, 2007).

1.5.4. Akışkan Yataklı Kurutucuların Avantajları ve Dezavantajları

1.5.4.1. Akışkan Yataklı Kurutucuların Avantajları

- Yatak içerisinde eşit dağılımlı olmasından ötürü akışın devamlılığını ve kontrolünü sağlamanın kolay olması,
- Nem giderilmesinin hızlı olması,
- Termal verimin fazla olması,
- Kısa kurutma süresi,

- Çıkış mamulünün homojen olması,
- Bakım masraflarının düşük maliyetle olması şeklinde sıralanabilir (Mujumdar and Devahastin, 2003; Kurtuluş, 2007; Çalhan vd., 2012).

1.5.4.2. Akışkan Yataklı Kurutucuların Dezavantajları

- Basınç düşüşünün fazlalığı,
- Enerji tüketiminin fazla olması,
- Bir kısım parçacıklı mamûllerde akışkanlaşmanın kalitesinin düşüklüğü,
- Bazı donanımlarda korozyona sebebiyet vermesi,
- Küçük parçacıkları karıştırmanın zor oluşu,
- Partiküllerin sürüklenmesinin ve püskürtülmesinin zor oluşu,
- Küçük parçacıkların birikmesi şeklinde sıralanabilir (Mujumdar and Devahastin, 2003; Kurtuluş, 2007; Çalhan vd., 2012).

1.5.5. Akışkan Yataklı Kurutucularda Isı ve Kütle Transferi

Akışkan yataklı kurutma sistemleri, ısı transfer hızlarının yüksek oluşu nedeniyle çokça kullanılan kurutucu çeşitlerinden biridir. Yatağın içerisindeki hareketin sürekli oluşu sebebiyle diğer sistemlere nazaran daha yüksek ısı transferi katsayılarına sahiptirler. Akışkan yataklı kurutmadaki uygulamaların birçoğunda ısı transferi, kurutulmak istenen ürünün sıcak bir yüzeyle teması ya da kurutulmak istenen ürün içinden yüksek sıcaklıkta gaz geçirilmesiyle veya bu iki durumun beraber kullanımıyla oluşturulabilmektedir. Isıtılmak istenen yüzeyler konumlandırılırken yatay düşünülebileceği gibi düşey olarak da düşünülebilir. Gazla akışkanlaştırma özelliği kazanan bir yatağın içinde bulunan karışımdan ötürü sıcaklık homojendir (Yang, W.C. 2003).

Hızın sabit olduğu kurutma süreci süresince, parçacıkların kontrol direnci ve sıcaklığı belirlenmiş olduğundan akışkanlaştırıcı gazdan parçacıklara ısı aktarma işleminin oluşabilmesi önem arz etmektedir. Kurutma sürecinden doğru ölçülerde ısı eşanjörleri tercih edilmişse ısıнын transfer yönünün doğru olup olmadığının iyi anlaşılması gerekir. Isı transferi yüzeylerden mi yoksa yüzeylere doğru mu olduğu tespit edilmelidir (Milota ve Wilson, 1989).

Dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucularda ise partiküle dönme hareketi veren bu

kurutma sistemleri değişik dizaynlarda tercih edilebilmekte olup daha ileriki zamanlarda yaygın bir kullanım alanına sahip olması beklenmektedir (Yudin vd., 2011). Akışkan yatağın içerisinde partiküllerin yaptığı girdap hareketi dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucuları diğer geleneksel kurutuculardan ayırmaktadır. (Venkiteswaran vd., 2013). Bu kurutma sistemleri önemli yükseklik-çap oranına sahip bir oda, dairesel yatak ve açılı bir gaz enjeksiyonuna sahiptir. Gaz belirli bir açıyla dağıtıcıdan geçer ve bileşenlerine ayrılır. Bu bileşenlerden düşey olanı kaldırma etkisi gösterir ve akışkanlaştırmanın başlamasını sağlar. Yatay olanı ise yatak partikülleri üzerinde dönen bir hareket etkisi oluşturur. Katı partiküller limitli bir dairesel dönme hareketine sahiptir (Jun vd., 2012). Bu kurutucular geleneksel kurutma türlerinden daha az bir nem oranına sahiptirler (Zulkarnain vd., 2019).

Dikkate alınması gerekli olan kritik bir parametre de yatak yüküdür. Dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucuların orta kısmındaki açıl momentumun sıfır olmasından ötürü ortaya çıkması muhtemel bir ölü alanı engellemek adına merkezi bir gövdeye ihtiyaç duyulmaktadır (Batcha vd., 2012).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Materyal

Kurutma deneylerinde yeşil çay kullanılmıştır (Şekil 1). Kullanılacak olan yeşil çay yaprakları Eylül ayında Rize'nin Merkez ilçesine bağlı yaklaşık 510 m rakımlı Ambarlık Köyü'nden toplanmıştır. Dönmeli akışlı akışkan yataklı bir kurutma işlemi olacağından yeşil çayların sap kısımları yapraklarından ayrılmıştır. Bunun amacı sistemdeki olası takılmaların ve tıkanıklıkları önüne geçmektir. Yeşil çay yaprakları toplandıktan gün Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü İDEA-L İnovasyon laboratuvarına getirilmiş ve kurutma işlemine alınmıştır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılmış olan yeşil çay örneği

2.2. Yöntem

2.2.1. Deney Seti

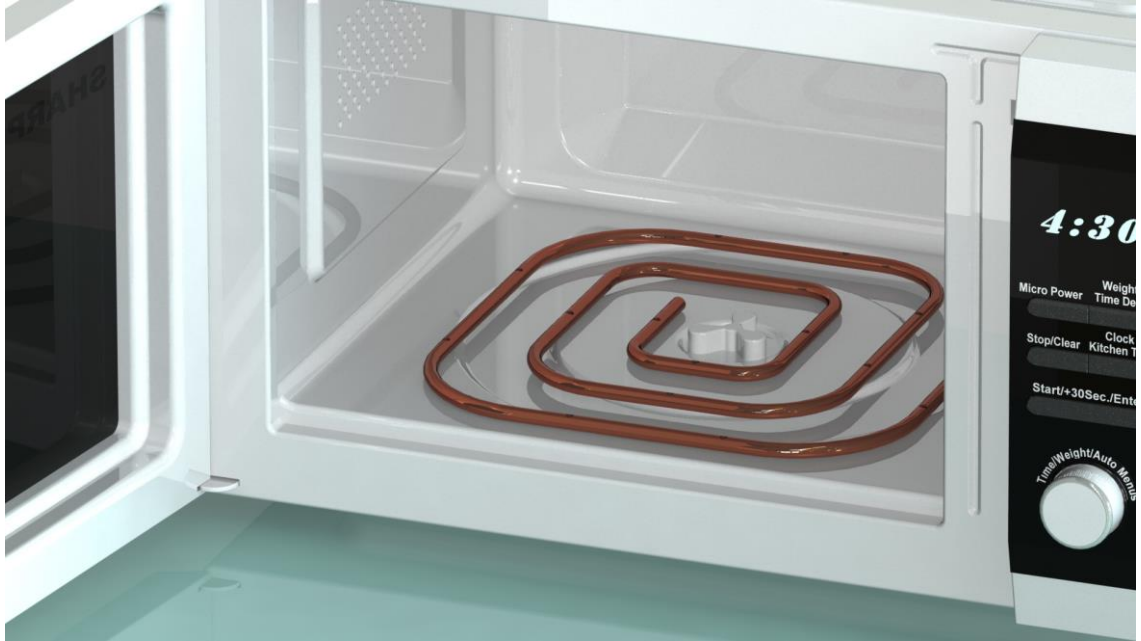
Sabit yatak ve dönmeli yatak için yapılan deneyler Şekil 3, 4 ve 5'te çizilmiş olan katı modellerde gösterilmiştir. Şekil 2, 3 ve 4'te deney düzeneğinin katı modelleme programı ile çizilen görselleri, Şekil 6'da ise deney düzeneğinin gerçek fotoğrafı verilmiştir. Düzenek için önce düzgün ölçüm alınabilecek mikrodalga fırınlar araştırılmıştır. Düzgün ölçüm alabilmek için analog kumanda üzerinde pişirme

fonksiyonları değil güç değerleri bulunan Samsung ME711K modeli tercih edilmiştir. Fırın içerisinde dönmeli bir akış oluşturabilmek için iç kısma özel bir hava tertibatı yerleştirilmiştir (Şekil 3). Fırın içerisinde bir tahribata uğramaması adına hava tesisatında bakır boru kullanılmıştır. Bakır boruya şekil verilip spiral bir geometri oluşturulmuştur. Bu spiral bakır borunun üzerine akış oluşturabilmek için açılı şekilde hava delikleri açılmıştır. Spiralın iç noktası ise hava çıkışının bakır boru üzerinden sağlanabilmesi adına hava çıkışına kapatılmıştır. Bakır borunun hava beslemesi için mikrodalga'nın arka kısmı bakır borunun bir miktar dışarı çıkabilmesi için delinmiştir. Bakır boru ile hava besleme hortumu bağlantısında bir metal aparat kullanılmıştır (Şekil 7). Havanın sıcaklık ve nem ölçümü, hava sisteme girerken bir T bağlantı aparatı kullanılarak ölçülmüştür. Bu değerleri ölçebilmek için ayrı bir ölçüm kutusu kullanılmış olup, prob ölçüm kutusunun içerisine yerleştirilmiştir. Sisteme girecek olan hava T bağlantısı sayesinde bu kutudan da geçmektedir. Havanın sisteme giriş anındaki hızını ölçebilmek için ayrı bir prob da özel olarak imal edilen bir aparatın içerisine yerleştirilmiştir. Hava bu probdan geçerek mikrodalga fırının arkasındaki bakır boruya gelmektedir. Oradan sistemin içerisine girmektedir. Bir prob da mikrodalga fırının dışında bulunan sıcak hava çıkış kısmına yerleştirilmiştir. Bu prob ise çıkan havanın nem ve sıcaklık değerlerini ölçmek için kullanılmıştır.

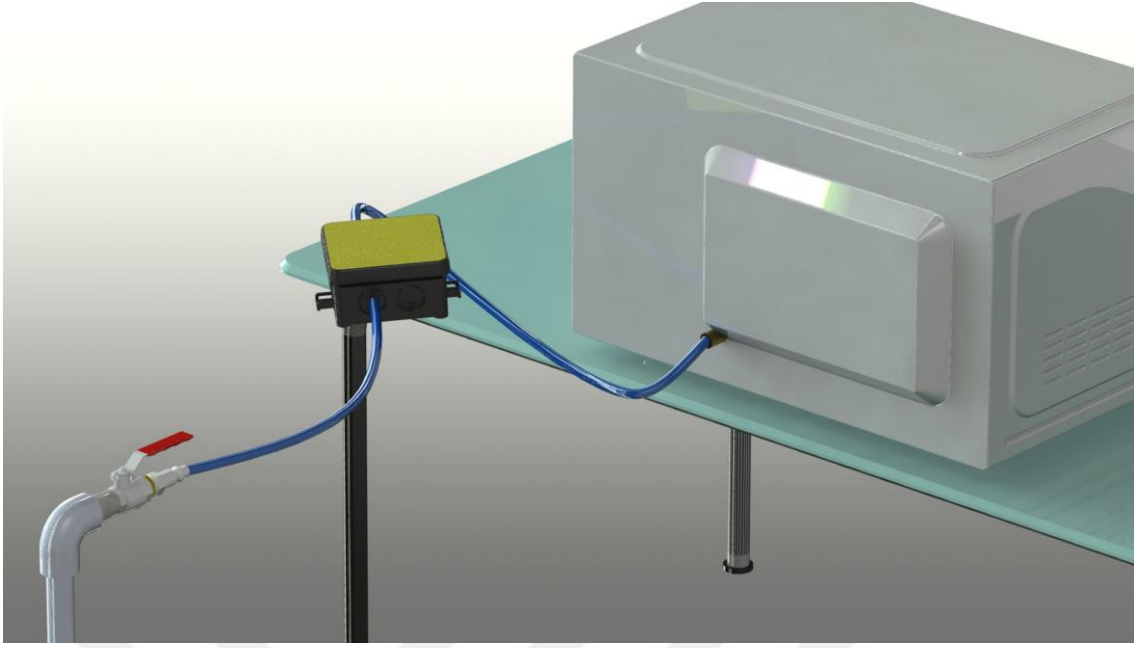
Elektrik tesisatındaki giriş çıkış kısımlarında bulunan sinyal uçları klemensler üzerinden dağıtım yapılmıştır. Otomatik bir sigortayla giriş voltaj koruması sağlanmıştır. Rezistansın kontrolü bir güç kontaktörüyle sağlanarak pano içerisinde bir düzenek kurulmuştur. Pano bağlantıları girişleri de kablo rakorlarıyla rakorlanmıştır.



Şekil 2. Deney düzeneğinin katı modelleme programında çizilmiş hali (a) Hava tesisatı, (b) Girişteki havanın sıcaklık ve nem ölçüm kutusu, (c) Dönmeli akışı oluşturan hava delikli ve özel tasarımlı bakır hava borusu



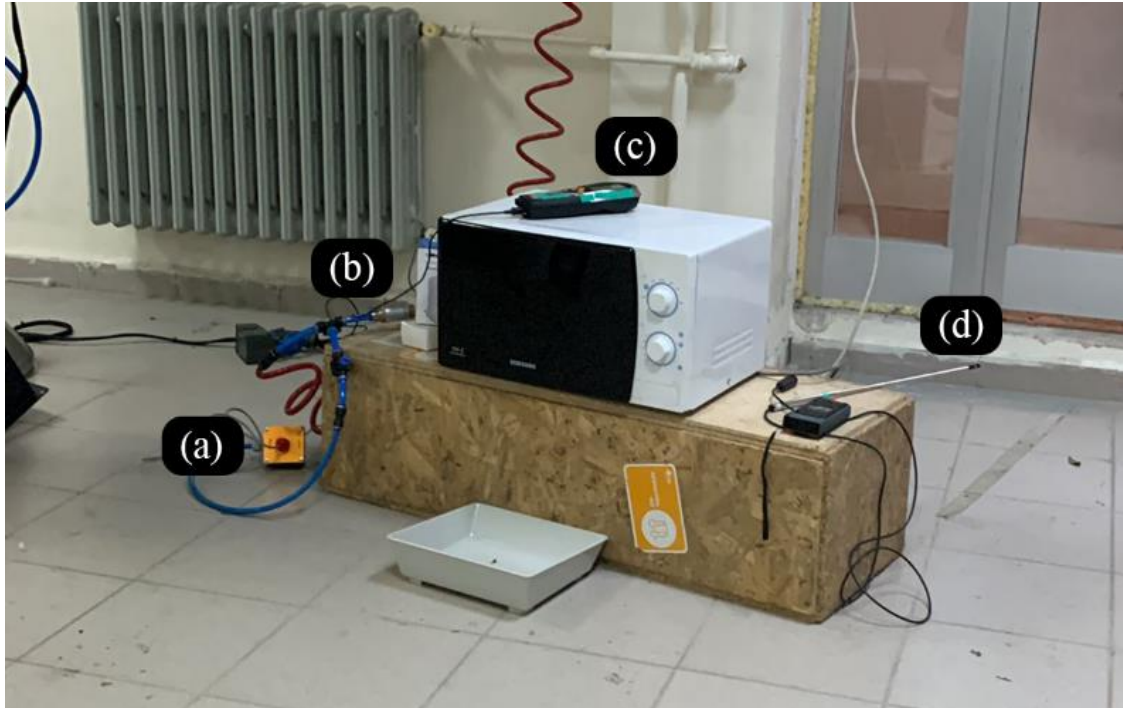
Şekil 3. Dönmeli akışı oluşturan hava delikli ve özel tasarımlı sabit bakır hava borusu



Şekil 4. Deney düzeneğinin katı modelleme programında çizilmiş bağlantı detayları



Şekil 5. Nem ve sıcaklık ölçerlerin bağlı olduğu elektrik panosu



2.2.2. Çalışmada Kullanılan Ölçüm Aletleri

Dönmeli akışlı akışkan yataklı mikrodalga kurutucuda kurutma denemeleri, 100 W, 300 W, 600 W, 800 W güç seviyelerinde yapılmıştır. Bu ölçümde Samsung'un modeli

ME 711 K olan bir mikrodalga fırını kullanılmıştır (Şekil-8a). Tartımlar TEM marka 6 kg kapasiteli 1 gram hassasiyetli plastik kefeli terazide yapılmıştır(Şekil-8c). Ortamın sıcaklığını ve ortamdaki havanın giriş debisini ölçmek için Testo marka 435-4 model çok fonksiyonlu ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil-8b). Sistemin nem ve sıcaklığını ölçmek içinse EMKO marka göstergeye (Şekil-8d) bağlı Pronem marka ESM-3723 - 40°C ile +85°C / 0°C ile +50°C depolama ve çalışma sıcaklığındaki dijital sıcaklık ve nem kontrol cihazı kullanılmıştır (Şekil-8e).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 8. Deneylerde kullanılmış ölçüm cihazları (a), Mikrodalga fırın (b), Çok fonksiyonlu ölçüm cihazı (c), Terazı (d), Gösterge (e), Nem ve sıcaklık ölçüm cihazı

2.2.3. Yeşil Çay Kurutma Yöntemi

Taze toplanmış çay yaprağı numuneleri 50 ± 1 gr olacak şekilde tartılıp ayarlanmıştır. Sabit yatakta yapılan deneylerde çaylar mikrodalga fırının içerisine koyularak, uygulanan gücün şiddetine göre belirlenen zaman aralıklarında çıkartılıp tartım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dönmeli akışlı akışkan yatak deneyleri için mikrodalga fırının içerisine bakır borunun spiral şekilde bükülüp, açılı bir şekilde delinmesiyle oluşturulan hava üfleme düzeneği yerleştirilmiştir.



2.3. Matematiksel Modelleme

Tablo 1. Matematiksel modellemede kullanılan model denklemleri

No	Değerlendirme Parametreleri	Denklem	Referans	Denklem Sabitleri	Denklem No
1	Newton (Lewis, Eksponansiyel, Tek Terimli Eks.)	$MR = \exp(-kt)$	Toğrul ve Pehlivan, 2004	k	(1)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Toğrul ve Pehlivan, 2004	k, n	(2)
3	Modifiye Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Toğrul ve Pehlivan, 2004	k, n	(3)
4	Modifiye Page I	$MR = \exp((-kt)^n)$	Ait vd., 2005	k, n	(4)
5	Modifiye Page II	$MR = \exp\left(-c\left(\frac{t}{L^2}\right)^n\right)$	Toğrul, 2005	c, L, n	(5)
6	Henderson ve Pabis (Tek Terimli)	$MR = a \exp(-kt)$	Toğrul ve Pehlivan, 2004	a, k	(6)
7	Logaritmik (Asimtotik)	$MR = a \exp(-kt) + c$	Toğrul ve Pehlivan, 2004	a, k, c	(7)
8	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli vd)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Toğrul, 2005	a, k, n, b	(8)
9	Demir vd.	$MR = a \exp(-kt)^n + b$	Aghbasglo vd., 2009	a, k, n, b	(9)
10	İki Terimli	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Akpınar vd., 2005	a, k_0, b, k_1	(10)
11	İki Terimli-Eksponansiyel	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Soares vd., 2007	a, k	(11)
12	Verma vd. (Modifiye İki Terimli Eksponnsiyel)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Toğrul ve Pehlivan, 2004	a, k, g	(12)
13	Difüzyon Yaklaşımı	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Toğrul ve Pehlivan, 2004	a, k, b	(13)

Tablo 1.(devamı) Matematiksel modellemede kullanılan model denklemleri

No	Değerlendirme Parametreleri	Denklem	Referans	Denklem Sabitleri	Denklem No
14	Modifiye Henderson ve Pabis (Üç Terimli Ekspansiyel)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Toğrul ve Pehlivan, 2004	a, k, b, g, c, h	(14)
15	Thompson	$t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2$	Akpınar vd., 2004	a, b	(15)
16	Wang Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Günhan vd., 2005	a, b	(16)
17	Hii vd.	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$	Kaletta vd., 2013	a, k, n, c, g	(17)
18	Basitleştirilmiş Fick Difüzyon (SFFD)	$MR = a \exp\left(-c \left(\frac{t}{L^2}\right)\right)$	Toğrul, 2005	a, c, L	(18)
19	Weibull	$MR = \exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right)$	Aghbasglo vd., 2009	a, b	(19)
20	Aghbashlo vd.	$MR = \exp\left(-\frac{k_1 t}{1 + k_2 t}\right)$	Aghbasglo vd., 2009	k_1, k_2	(20)
21	Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	Doymaz, 2011	a, b, c	(21)
22	Balbay ve Şahin	$MR = (1 - a) \exp(-kt^n) + b$	Balbay ve Şahin, 2012	a, k, n, b	(22)
23	Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt + g$	Alibaş, 2012	a, k, n, b, g	(23)

2.4. Değerlendirme Kriteri

Literatüre baktığımızda ince tabakalı ve tek tabaka olarak değerlendirilen kurutma modelleri için Tablo 2’de verilen ve en fazla tercih edilen değerlendirme kriterleri, belirleme katsayısı, azaltılmış ki-kare, ortalama karekök hata, ortalama görelî yüzde hatası, tahmini standart hatası, ortalama yanılğı hatası ve azaltılmış toplam karesel hatadır. Tercih edilecek modeli belirlemeden, bu deneylerin doğru bir biçimde yürütülmesi, kurutulacak madde miktarlarının ve parametrelerin dikkatli ve düzgün bir biçimde ölçülmeleri önemlidir.



Tablo 2. Matematiksel modelleme kuruma eğrisi değerlendirme kriteri denklemleri (Kucuk vd., 2014; Şimşek vd., 2021)

No	Değerlendirme Parametreleri	Denklem	Denklem No
1	Korelasyon Katsayısı	$r = \frac{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})(MR_{exp,i}) - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})}{\sqrt{N \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})^2 \right)}}$	(24)
2	Toplam Kareler Toplamı	$SST = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{avg})^2$	(25)
3	Standart Tahmini Hata	$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$	(26)
4	Kalanların Kareleri Toplamı	$RSS = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$	(27)
5	Belirleme Katsayısı	$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$	(28)
6	Düzeltilmiş R ²	$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N - 1}{N - k - 1}$	(29)
7	Azaltılmış Ki-Kare	$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n}$	(30)
8	Ortalama Karesel Hata	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}}$	(31)
9	Residuals	$residuals = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})$	(32)
10	Modelleme Verimliliği	$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,ave})^2 - \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,ave})^2}$	(33)
11	Tahmini Standart Hata	$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{cal,i})^2}{N - n_p}}$	(34)
12	İndirgenmiş Kare Hata	$RSSE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{cal,i})^2}{N}$	(35)
13	Ortalama Sapma Hata	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})}{N}$	(36)
14	Ortalama GörelîYüzde Hata	$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ MR_{exp,i} - MR_{pre,i} }{MR_{exp,i}}$	(37)

2.5. Kalite Parametreleri

Tablo 3'te Türk gıda kodeksindeki yeşil ve siyah çayın fiziksel ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir.

Nem oranı, aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

$$K = (m_0 - m_1) \times \frac{100}{m_0} \quad (38)$$

Burada;

K : Kayıp, (%)

m_0 : Başlangıçta alınan deney numunesi miktarı, g

m_1 : Kurutulmuş çözünmeyen kısım miktarı, g

Su ekstraktı oranı, aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Su Ekstraktı} = \frac{(m_0 w)(m_1 100)}{(m_0 w)} \times 100 \quad (39)$$

w : Numunenin kütlege yüzde olarak ifade edildiği kuru madde içeriği

Ham lif içeriği oranı (selüloz tayini), aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

Toplam kül oranı, aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

$$(\%) \text{ Toplam Kül} = \frac{100 \times \text{Külün Ağırlığı}}{\text{Kuru Madde}} \quad (40)$$

Kafein: Kafein oranı yüksek olan çay kaliteli olarak kabul edilmektedir.

Polifenol: Çaya aroma katan bileşiklerin en önemlisi olan polifenollerin, çaydaki içeriğinin yüksek olması istenir.

Tablo 3. Yeşil ve Siyah Çayın Fiziksel, Kimyasal Özellikleri (Türk Gıda Kodeksi, 2015)

ÖZELLİKLER	DEĞERLER			
	Siyah Çay	Siyah Çay (Süzen Poşet)	Yeşil Çay	Yeşil Çay (Süzen Poşet)
Toplam Toz Çay Miktarı (g/g)(%) (Tanecik Boyutu $\leq 355\mu$)	En çok 14	En çok 35	En çok 14	En çok 35
Okside Olmamış Parça (g/g)(%)	En çok 8	En çok 8	-	-
Toplam Kül (Kuru Maddede) (g/g) (%)	En az 4 – En çok 8	En az 4 – En çok 8	En az 4 – En çok 8	En az 4 – En çok 8
Su Ekstraktı (Kuru Maddede) (g/g) (%)	En az 29	En az 32	En az 32	En az 32
Ham Selülöz (Kuru Maddede) (g/g) (%)	En çok 16,5	En çok 15	En çok 16,5	En çok 15
Suda Çözünen Külde Alkalilik (KOH Cinsinden) (Kuru Maddede) (g/g) (%)	En az 1- En çok 3	En az 1-En çok 3	En az 1- En çok 3	En az 1-En çok 3
%10'luk Hidroklorik Asitte Çözünmeyen Kül (Kuru Maddede) (g/g) (%)	En çok 1	En çok 1	En çok 1	En çok 1
Kafein (Kuru Maddede) (g/g) (%)	En az 1,6	En az 1,6	En az 1,6	En az 1,6
Suda Çözünen Kül (Toplam Küle Göre) (g/g) (%)	En az 45	En az 45	En az 45	En az 45
Nem Oranı (g/g) (%)	En çok 7	En çok 7	En çok 7	En çok 7
Toplam Polifenol (Kuru Maddede) (g/g) (%)	-	-	En az 11	En az 11
Toplam Kateşin (Kuru Maddede) (g/g) (%)	-	-	En az 7	En az 7

2.6. Kurutma Formülleri

Aşağıda boyutsuz kütle oranı (MR), nem içeriği (MC), kütle büzülme oranı (S_{mr}) ve kurutma hızı (DR) formülleri verilmiştir (Midilli vd., 2002; Midilli ve Kucuk, 2003; Kucuk vd., 2014; Şimşek vd., 2021).

Boyutsuz Kütle Oranı

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (41)$$

MR : Boyutsuz Kütle Oranı

M_t : ‘t’ anındaki kütle (kg)

M_e : Denge Nemi (kg)

M_i : Ürünün ilk kütlesi (kg)

Nem İçeriği

$$MC(\%) = \frac{M_t - M_e}{M_i} \quad (42)$$

M_t : t anındaki kütle (kg)

M_i : t=0 anındaki kütle (kg)

Kütle Büzülme Oranı

$$S_{mr} = \frac{M_t}{M_i} \quad (43)$$

Kurutma Hızı

$$DR = -\frac{dM}{dt} = -\frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (44)$$

M_{t+dt} : $t + dt$ anındaki kütle (kg)

d_t : Zaman aralığı

3. BULGULAR

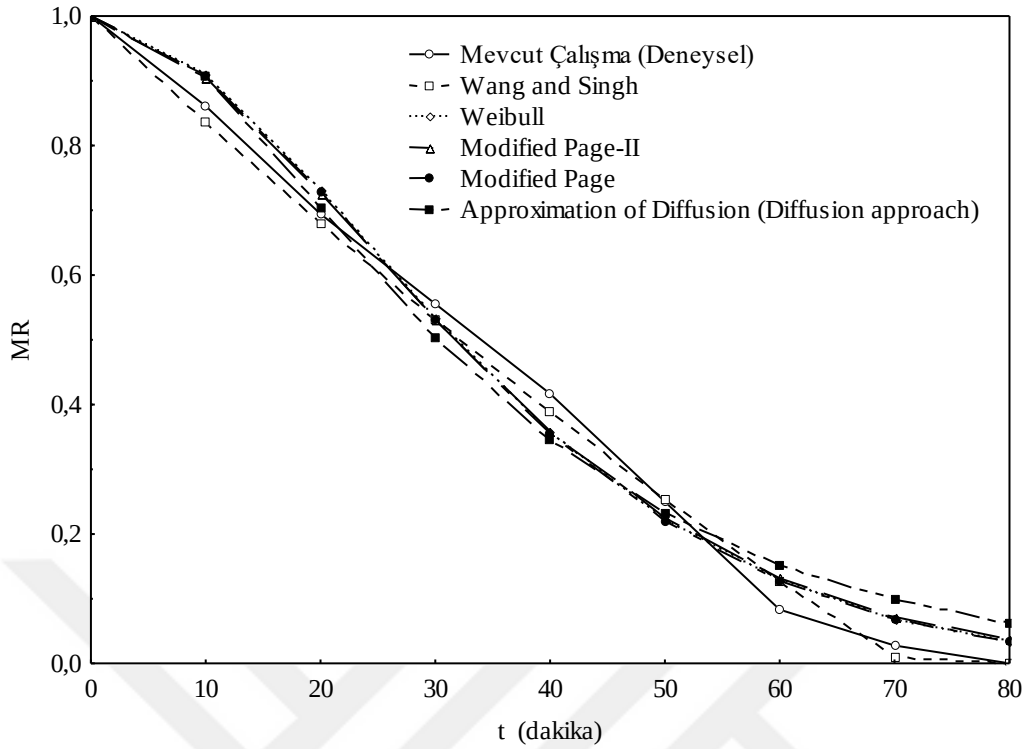
3.1. Sabit Yatakta Yeşil Çay Kurutma

Sabit yatakta yapılan deneylerin sonucunda yeşil çay kurutma işleminde gerçekleştirilen bütün hesaplamalar, verilerle matematiksel modellemelerin neticesi ve 100 W, 300 W, 600 W ve 800 W için değerlendirme kriterleri tablolarda mevcuttur. Değerlendirme kriterleri göz önünde bulundurularak seçilen en iyi 5 model için MR – Zaman grafikleri çizilip en iyi kurutma modeli seçilmiştir. Seçilen modeller katsayılarla formül haline getirilmiştir.



Tablo 4. Yeşil çay için sabit yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (100 W)

Model Adı	r	RSS=SSE	SST	$R^2 = EF$	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,977	0,082	2,194	0,963	0,010	0,958	0,095	-0,032	0,010	0,009	0,004	2,168
Page	0,988	0,037	2,194	0,983	0,005	0,978	0,064	0,001	0,005	0,004	0,000	1,428
Modifiye Page	0,994	0,013	2,194	0,991	0,002	0,992	0,038	-0,084	0,002	0,002	0,009	0,896
Modifiye Page-I	-	-	2,194	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modifiye Page-II	0,995	0,013	2,194	0,991	0,002	0,990	0,038	-0,100	0,002	0,002	0,011	0,895
Henderson and Pabis	0,971	0,069	2,194	0,969	0,010	0,958	0,088	-0,140	0,010	0,008	0,016	2,080
Logarithmic	0,991	0,023	2,188	0,989	0,004	0,983	0,051	0,065	0,004	0,003	0,007	0,941
Midilli-Kucuk	0,990	0,022	2,194	0,990	0,004	0,980	0,050	0,006	0,004	0,003	0,001	1,189
Demir et al.	0,993	0,014	2,194	0,992	0,003	0,987	0,040	-0,003	0,003	0,002	0,000	0,896
Two-Term	0,972	0,069	2,194	0,969	0,014	0,937	0,088	-0,155	0,014	0,008	0,017	2,080
Two-Term Exponential	0,973	0,093	2,194	0,958	0,013	0,943	0,102	0,003	0,013	0,010	0,000	2,325
Verma et al.	0,990	0,027	2,194	0,988	0,004	0,981	0,054	-0,142	0,004	0,003	0,016	1,150
Approximation of Diffusion	0,990	0,024	2,194	0,991	0,004	0,982	0,052	-0,119	0,004	0,003	0,013	1,144
Modifiye Henderson and Pabis	0,972	0,069	2,194	0,969	0,023	0,874	0,088	-0,154	0,023	0,008	0,017	2,081
Wang and Singh	0,995	0,015	2,194	0,993	0,002	0,991	0,041	0,168	0,002	0,002	0,019	0,758
Hii et al.	0,988	0,030	2,194	0,986	0,008	0,964	0,058	-0,102	0,008	0,003	0,011	1,291
Simplified Fick's diffusion	-	-	2,194	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weibull	0,995	0,013	2,194	0,992	0,002	0,992	0,038	-0,105	0,002	0,002	0,012	0,890
Aghbashlo et al.	-	-	2,194	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Parabolic	0,930	0,148	2,194	0,933	0,025	0,892	0,128	0,004	0,025	0,016	0,001	2,824
Balbay and Şahin	0,992	0,017	2,194	0,992	0,003	0,985	0,043	-0,004	0,003	0,002	0,001	0,924
Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	0,993	0,016	2,194	0,992	0,004	0,981	0,042	-0,001	0,004	0,002	0,000	0,663



Şekil 9. Yeşil çay için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (100 W)

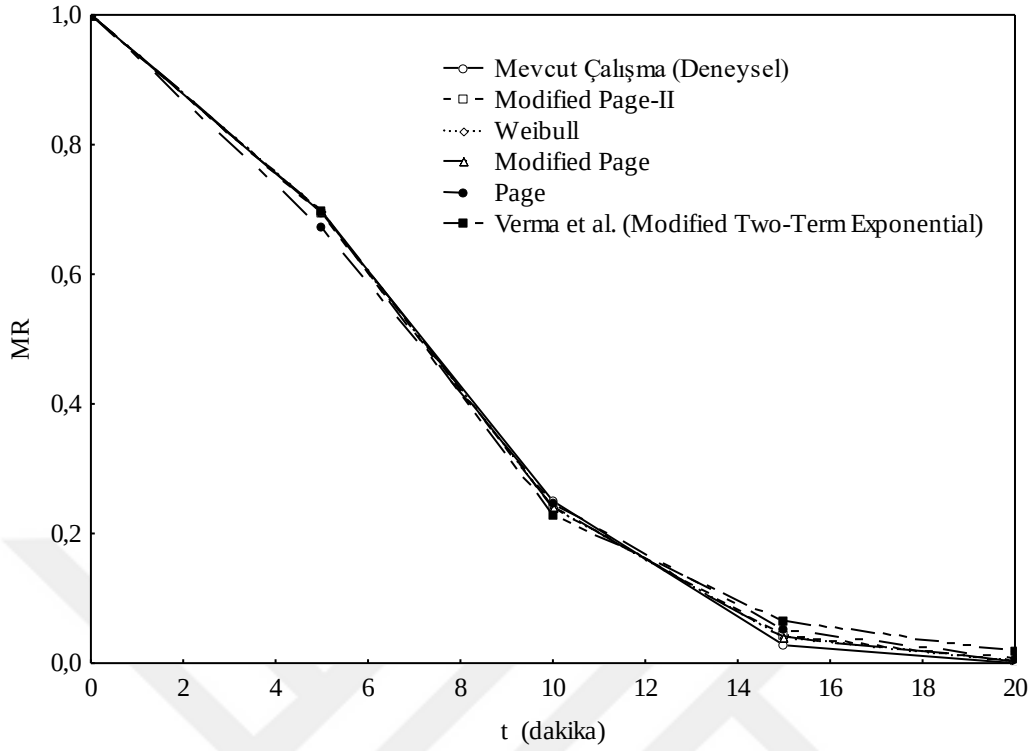
Tablo 4’ te 100 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Wang and Singh modeli olmuştur. Şekil 9 ’da ise yeşil çayın 100 W mikrodalga gücü için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi grafiği verilmiştir. Bu formül denklem (45)’ ten elde edilmiştir.

Grafiği incelediğimizde Modifiye Page ve Modifiye Page II’nin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Belirleme katsayılarına bakarak 1’e en yakın sonuç veren modellerden ilk 5’i seçilmiştir. Bu modeller seçilirken deneysel boyutsuz kütle değerleri 1’in üzerinde çıkan denklemler değerlendirmeye tabi tutulmamıştır. Boyutsuz kütle değişkenindeki büyük azalma deneyin ilk yarısında gerçekleşmiştir. Deneyin ikinci yarısında boyutsuz kütle değişkenindeki azalma yavaşlamıştır. Ürünlerdeki nem miktarının azalmasıyla boyutsuz kütle değişkeni lineerden eksponansiyele doğru bir davranış izlemektedir.

$$MR = 1 - 0,016775t + 0,000037t^2 \quad (45)$$

Tablo 5. Yeşil çay için sabit yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (300 W)

Model Adı	r	RSS=SSE	SST	$R^2 = EF$	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,976	0,049	0,989	0,951	0,012	0,934	0,099	-0,053	0,012	0,010	0,011	3,949
Page	1,000	0,001	0,989	0,999	0,000	0,997	0,016	-0,008	0,000	0,000	0,002	0,601
Modifiye Page	1,000	0,000	0,989	1,000	0,000	0,999	0,008	-0,013	0,000	0,000	0,003	0,307
Modifiye Page-I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modifiye Page-II	1,000	0,000	0,989	1,000	0,000	0,999	0,008	-0,013	0,000	0,000	0,003	0,290
Henderson and Pabis	0,973	0,046	0,989	0,954	0,015	0,908	0,096	-0,107	0,015	0,009	0,021	4,250
Logarithmic	0,987	0,020	0,989	0,980	0,010	0,920	0,063	-0,002	0,010	0,004	0,000	2,936
Midilli-Kucuk	0,997	0,004	0,989	0,996	0,004	-	0,029	0,009	0,004	0,001	0,002	1,377
Demir et al.	0,987	0,020	0,989	0,980	0,020	-	0,063	-0,003	0,020	0,004	0,001	2,943
Two-Term	0,974	0,046	0,989	0,954	0,046	-	0,096	-0,110	0,046	0,009	0,022	4,262
Two-Term Exponential	0,972	0,054	0,989	0,946	0,018	0,891	0,104	-0,045	0,018	0,011	0,009	4,108
Verma et al.	0,999	0,002	0,989	0,998	0,001	0,991	0,022	-0,038	0,001	0,001	0,008	0,832
Approximation of Diffusion	0,987	0,021	0,989	0,979	0,010	0,916	0,064	0,042	0,010	0,004	0,008	2,726
Modifiye Henderson and Pabis	0,974	0,046	0,989	0,954	-0,046	1,093	0,096	-0,109	-0,046	0,009	0,022	4,259
Wang and Singh	0,991	0,015	0,989	0,984	0,005	0,969	0,056	0,018	0,005	0,003	0,004	2,413
Hii et al.	0,999	0,001	0,989	0,997	-	1,006	0,017	-0,023	-	0,000	0,005	0,720
Simplified Fick's diffusion	0,974	0,046	0,989	0,954	0,023	0,815	0,096	-0,109	0,023	0,009	0,022	4,257
Weibull	1,000	0,000	0,989	1,000	0,000	0,999	0,008	-0,013	0,000	0,000	0,003	0,308
Aghbashlo et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Parabolic	0,943	0,086	0,989	0,913	0,043	0,654	0,131	0,001	0,043	0,017	0,000	6,015
Balbay and Şahin	0,999	0,002	0,989	0,997	0,002	-	0,018	0,002	0,002	0,000	0,000	0,815
Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	0,996	0,006	0,989	0,994	-	1,024	0,034	-0,002	-	0,001	0,000	1,538



Şekil 10. Yeşil çay için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (300 W)

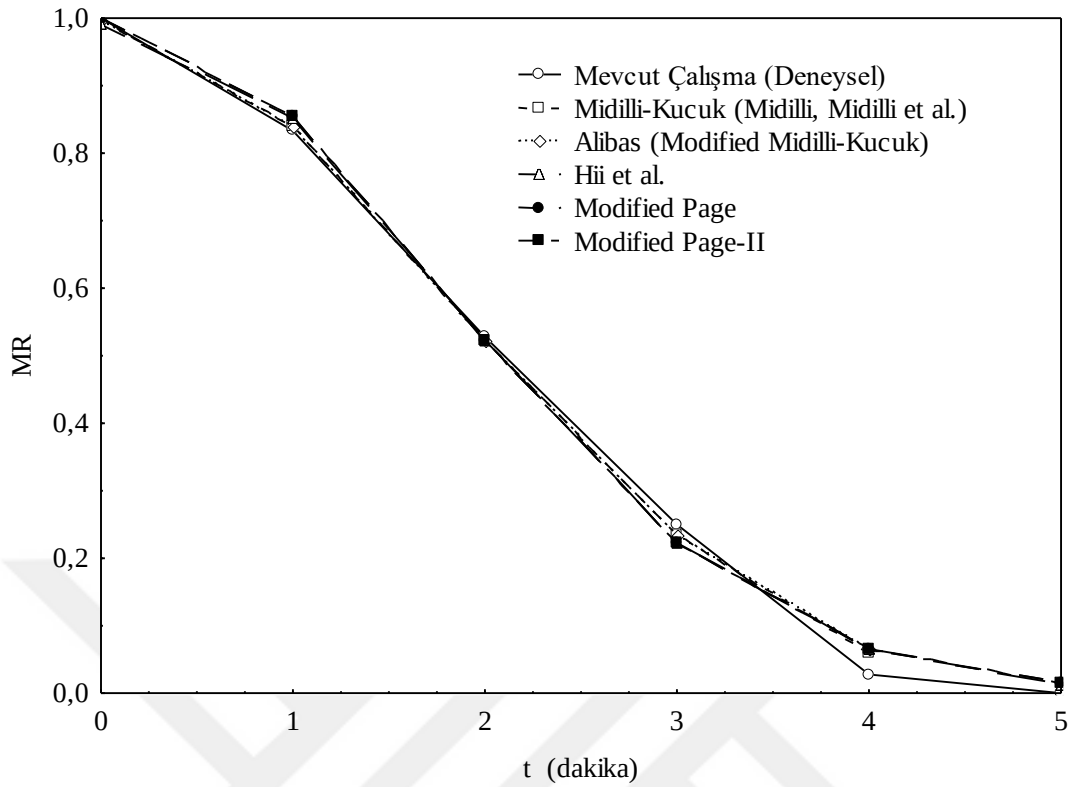
Tablo 5’te 300 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Modifiye Page II modeli olmuştur. Şekil 10 ’da ise yeşil çayın 300 W mikrodalga gücü için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi grafiği verilmiştir. Bu formül denklem (46) ’dan elde edilmiştir.

Grafiği incelediğimizde modellerin tamamının çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Boyutsuz kütle değişkenindeki büyük azalma deneyin ilk yarısında gerçekleşmiştir ve ilk 10 dakikada %75 oranında düşmüştür. Deneyin ikinci yarısında boyutsuz kütle değişkenindeki azalma yavaşlamıştır. Son 5 dakikada neredeyse yatay seyretmiştir.

$$MR = \exp \left(-0,045196 \left(\frac{t}{-1,31880^2} \right)^{1,970443} \right) \quad (46)$$

Tablo 6. Yeşil çay için sabit yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (600 W)

Model Adı	r	RSS=SSE	SST	$R^2 = EF$	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,968	0,081	1,414	0,942	0,016	0,928	0,117	-0,017	0,016	0,014	0,003	3,678
Page	0,998	0,003	1,414	0,998	0,001	0,997	0,022	-0,041	0,001	0,001	0,007	0,680
Modifiye Page	0,998	0,003	1,414	0,998	0,001	0,997	0,022	-0,043	0,001	0,001	0,007	0,675
Modifiye Page-I	-	2,759	1,414	-	0,690	-	0,678	-	0,690	0,460	0,560	-
Modifiye Page-II	0,998	0,003	1,414	0,998	0,001	0,995	0,022	-0,043	0,001	0,001	0,007	0,675
Henderson and Pabis	0,963	0,072	1,414	0,949	0,018	0,916	0,109	-0,129	0,018	0,012	0,022	3,835
Logarithmic	0,988	0,021	1,414	0,985	0,007	0,962	0,060	-0,003	0,007	0,004	0,001	2,082
Midilli-Kucuk	0,999	0,002	1,414	0,999	0,001	0,994	0,017	0,000	0,001	0,000	0,000	0,509
Demir et al.	0,988	0,021	1,414	0,985	0,010	0,927	0,059	-0,003	0,010	0,004	0,000	2,069
Two-Term	0,963	0,072	1,414	0,949	0,036	0,747	0,109	-0,131	0,036	0,012	0,022	3,836
Two-Term Exponential	0,963	0,090	1,414	0,937	0,022	0,894	0,122	-0,006	0,022	0,015	0,001	3,847
Verma et al.	0,988	0,023	1,414	0,984	0,008	0,959	0,062	0,064	0,008	0,004	0,011	1,978
Approximation of Diffusion	0,995	0,011	1,414	0,992	0,004	0,980	0,043	-0,074	0,004	0,002	0,012	1,374
Modifiye Henderson and Pabis	0,963	0,072	1,414	0,949	-	1,253	0,109	-0,130	0,000	0,012	0,022	3,835
Wang and Singh	0,988	0,022	1,414	0,984	0,006	0,974	0,061	0,019	0,006	0,004	0,003	1,888
Hii et al.	0,998	0,003	1,414	0,998	0,003	-	0,022	-0,029	0,003	0,001	0,005	0,700
Simplified Fick's diffusion	0,963	0,072	1,414	0,949	0,024	0,874	0,109	-0,128	0,024	0,012	0,021	3,834
Weibull	0,998	0,003	1,414	0,998	0,001	0,997	0,022	-0,043	0,001	0,001	0,007	0,676
Aghbashlo et al.	1,524	0,002	1,414	0,998	0,000	0,998	0,017	0,018	0,000	0,000	0,003	0,375
Parabolic	0,989	0,020	1,414	0,986	0,007	0,964	0,058	0,003	0,007	0,003	0,000	1,904
Balbay and Şahin	0,998	0,002	1,414	0,998	0,001	0,994	0,017	0,003	0,001	0,000	0,001	0,496
Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	0,998	0,002	1,414	0,998	0,002	-	0,019	0,001	0,002	0,000	0,000	0,547



Şekil 11. Yeşil çay için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (600 W)

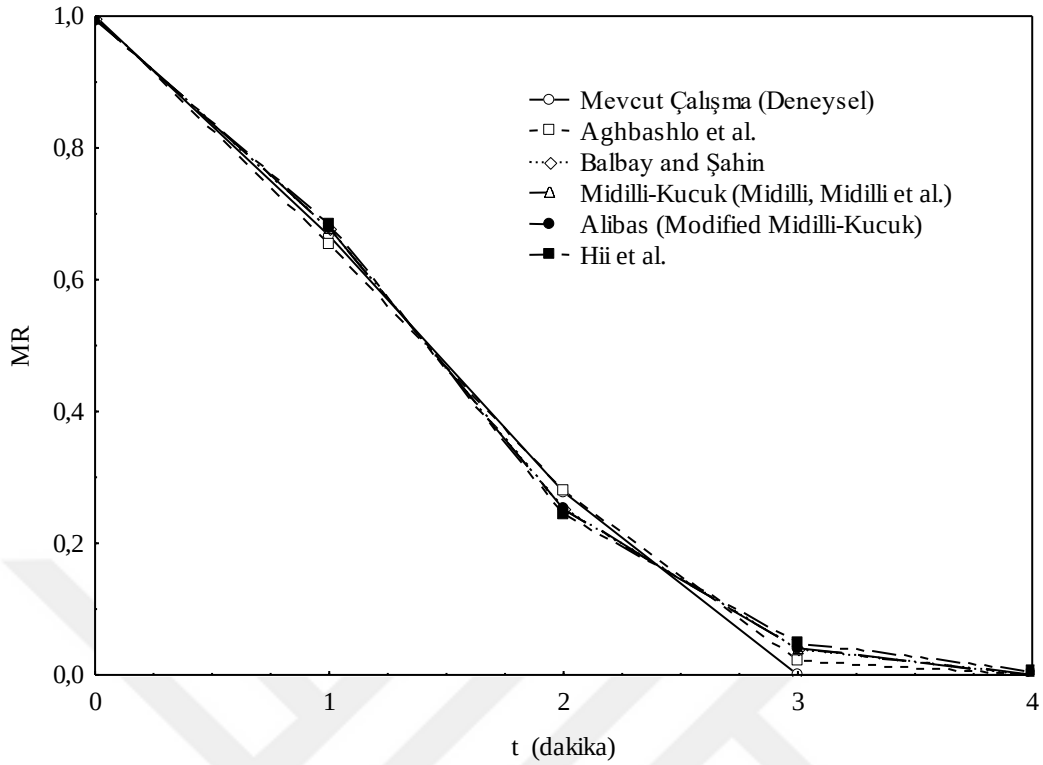
Tablo 6’ da 600 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Midilli-Kucuk modeli olmuştur. Şekil 11 ’de ise yeşil çayın 600 W mikrodalga gücü için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi grafiği verilmiştir. Bu formül denklem (47)’ den elde edilmiştir.

Grafiği incelediğimizde tüm modellerin birbirilerine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Boyutsuz kütle değişkenindeki büyük azalma deneyin ilk yarısında gerçekleşmiştir. Deneyin ikinci yarısında boyutsuz kütle değişkenindeki azalma yavaşlamıştır. İlk 3 dakikada boyutsuz kütle değişkeninde %75 oranında ciddi bir düşüş görülmektedir. 4. ve 5. dakikalar arasındaysa daha yatay seyretmiştir.

$$MR = 0,998423 \exp(-0,161088t^{1,928717}) - 0,009057t \quad (47)$$

Tablo 7. Yeşil çay için sabit yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (800 W)

Model Adı	r	RSS=SSE	SST	$R^2 = EF$	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,977	0,047	0,974	0,952	0,012	0,936	0,097	-0,059	0,012	0,009	0,012	3,785
Page	0,998	0,004	0,974	0,996	0,001	0,992	0,027	-0,037	0,001	0,001	0,007	1,068
Modifiye Page	0,998	0,004	0,974	0,996	0,001	0,992	0,027	-0,037	0,001	0,001	0,008	1,068
Modifiye Page-I	-	2,633	0,974	-	0,878	--	0,726	-	0,878	0,527	0,611	-
Modifiye Page-II	0,998	0,004	0,974	0,996	0,002	0,985	0,027	-0,037	0,002	0,001	0,007	1,067
Henderson and Pabis	0,975	0,044	0,974	0,955	0,015	0,909	0,094	-0,112	0,015	0,009	0,022	4,085
Logarithmic	0,989	0,017	0,974	0,982	0,009	0,929	0,059	-0,002	0,009	0,003	0,000	2,645
Midilli-Kucuk	0,998	0,003	0,974	0,997	0,003	-	0,024	-0,002	0,003	0,001	0,000	1,059
Demir et al.	0,989	0,017	0,974	0,982	0,017	-	0,059	-0,002	0,017	0,003	0,000	2,650
Two-Term	0,975	0,044	0,974	0,955	0,044	-	0,094	-0,112	0,044	0,009	0,022	4,084
Two-Term Exponential	0,996	0,008	0,974	0,992	0,003	0,983	0,040	-0,054	0,003	0,002	0,011	1,545
Verma et al.	0,996	0,007	0,974	0,993	0,004	0,971	0,038	-0,050	0,004	0,001	0,010	1,442
Approximation of Diffusion	0,977	0,047	0,974	0,952	0,023	0,808	0,097	-0,059	0,023	0,009	0,012	3,784
Modifiye Henderson and Pabis	0,975	0,044	0,974	0,955	- 0,044	1,091	0,094	-0,112	-0,044	0,009	0,022	4,084
Wang and Singh	0,993	0,012	0,974	0,987	0,004	0,975	0,050	0,040	0,004	0,003	0,008	1,889
Hii et al.	0,998	0,004	0,974	0,996	-	1,015	0,027	-0,030	-	0,001	0,006	1,112
Simplified Fick's diffusion	0,975	0,044	0,974	0,955	0,022	0,819	0,094	-0,111	0,022	0,009	0,022	4,083
Weibull	0,998	0,004	0,974	0,996	0,001	0,992	0,027	-0,037	0,001	0,001	0,007	1,068
Aghbashlo et al.	1,000	0,001	0,974	0,999	0,000	0,999	0,012	-0,014	0,000	0,000	0,003	0,386
Parabolic	0,992	0,012	0,974	0,988	0,006	0,952	0,049	0,003	0,006	0,002	0,001	2,160
Balbay and Şahin	0,998	0,003	0,974	0,997	0,003	-	0,024	0,001	0,003	0,001	0,000	1,034
Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	0,998	0,003	0,974	0,997	-	1,012	0,024	-0,001	-	0,001	0,000	1,053



Şekil 12. Yeşil çay için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi (800 W)

Tablo 7’de 800 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Aghbashlo et al. modeli olmuştur. Şekil 12 ’de ise yeşil çayın 800 W mikrodalga gücü için sabit yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi grafiği verilmiştir. Bu formül denklem (48)’den elde edilmiştir.

Grafiği incelediğimizde tüm modellerin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Boyutsuz kütle değişkenininde deneyin ilk çeyreğinde yaklaşık %35 civarında azalma gerçekleşmiştir. Deneyin özellikle son çeyreğinde boyutsuz kütle değişkenindeki azalma yavaşlamıştır. İlk 2 dakikada boyutsuz kütle değişkeninde %75 oranında ciddi bir düşüş görülmektedir. 3. ve 4. dakikalar arasındaysa daha yatay seyretmiştir.

$$MR = \exp\left(-\frac{0,317938t}{1 - 0,249625}\right) \quad (48)$$

3.2. Akışkan Yatakta Yeşil Çay Kurutma

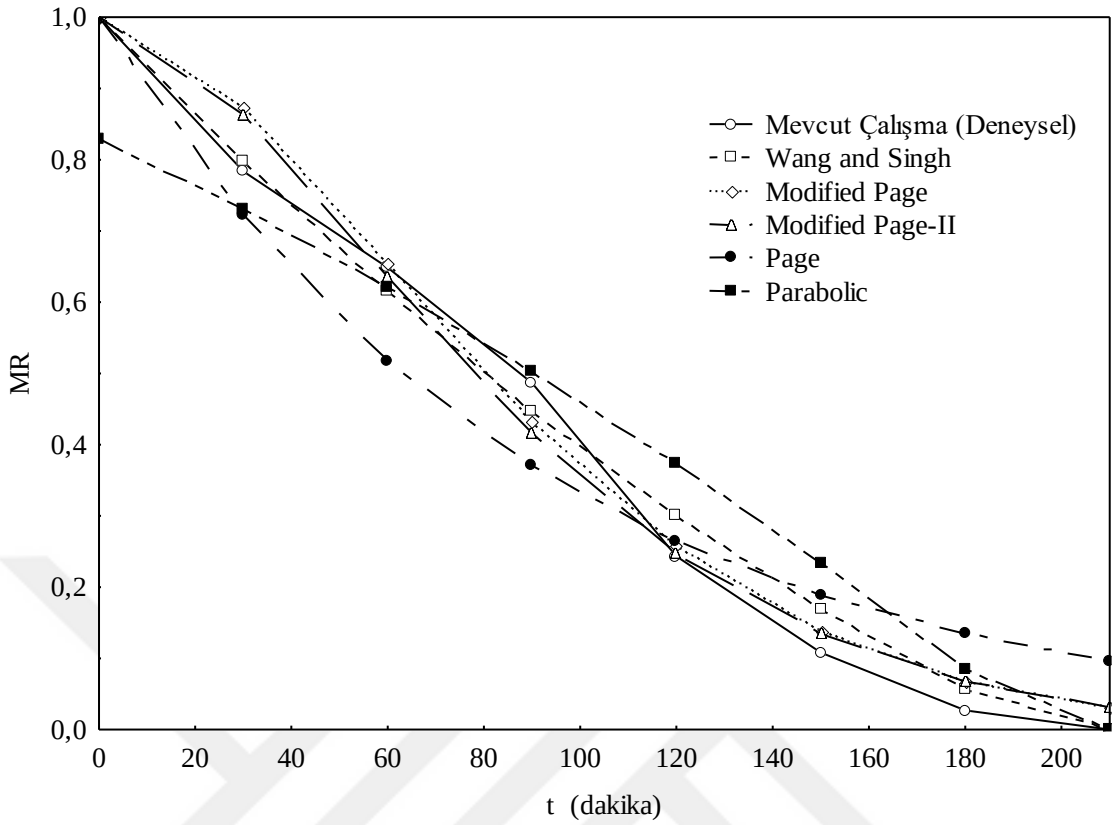
Akışkan yatakta yapılan deneylerin sonucunda yeşil çay kurutmada yapılan tüm hesaplamalar, verilerin ve matematiksel modellemelerin sonucu 100 W, 300 W, 600 W

ve 800 W için değerlendirme kriterleri tablolarda mevcuttur. Değerlendirme kriterleri göz önünde bulundurularak seçilen en iyi 5 model için MR – Zaman grafikleri çizilip en iyi kurutma modeli seçilmiştir. Seçilen modeller katsayılarla formül haline getirilmiştir.



Tablo 8. Yeşil çay için akışkan yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (100 W)

Model Adı	r	RSS=SSE	SST	$R^2 = EF$	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Page	0,977	0,062	1,794	0,966	0,010	0,952	0,088	0,003	0,010	0,008	0,000	2,315
Modifiye Page	0,994	0,015	1,794	0,992	0,003	0,988	0,044	-0,161	0,003	0,002	0,020	1,020
Modifiye Page-I	-	-	1,794	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modifiye Page-II	0,993	0,015	1,794	0,992	0,003	0,986	0,043	-0,098	0,003	0,002	0,012	1,002
Henderson and Pabis	-	-	1,794	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Logarithmic	-	-	1,785	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Midilli-Kucuk	0,982	0,037	1,794	0,979	0,009	0,952	0,068	-0,066	0,009	0,005	0,008	1,845
Demir et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Two-Term	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Two-Term Exponential	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verma et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Approximation of Diffusion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modifiye Henderson and Pabis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wang and Singh	0,994	0,012	1,794	0,993	0,002	0,991	0,039	-0,048	0,002	0,002	0,006	1,033
Hii et al.	0,972	0,058	1,794	0,958	0,019	0,887	0,085	-0,110	0,019	0,007	0,014	2,352
Simplified Fick's diffusion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weibull	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aghbashlo et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Parabolic	0,969	0,074	1,794	0,959	0,015	0,927	0,096	0,000	0,015	0,009	0,000	2,481
Balbay and Şahin	0,988	0,023	1,794	0,957	0,006	0,970	0,054	-0,003	0,006	0,003	0,000	1,373
Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	0,990	0,019	1,794	0,959	0,006	0,963	0,049	0,002	0,006	0,002	0,000	1,265



Şekil 13. Yeşil çay için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi(100W)

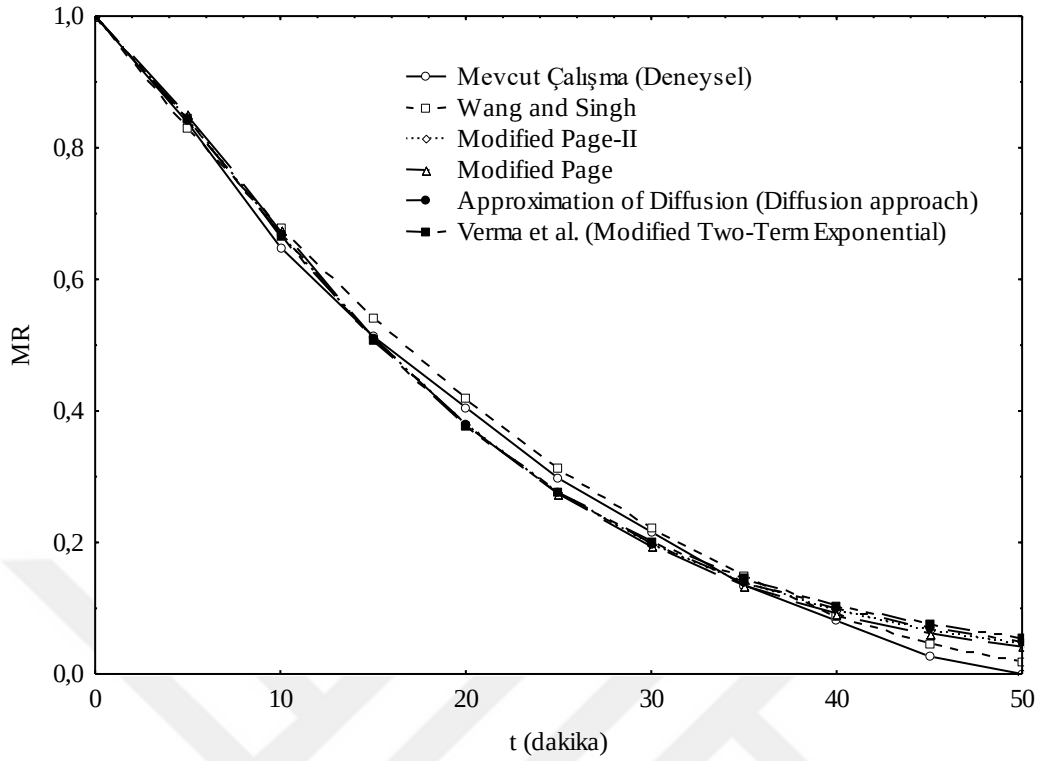
Tablo 8’de 100 W mikrodalga gücünde akışkan yatakta yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucunda en iyi model Wang and Singh modeli olmuştur. Şekil 13’te ise yeşil çayın 100 W mikrodalga gücü için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi grafiği verilmiştir. Bu formül denklem (49)’ dan elde edilmiştir.

Grafiği incelediğimizde sabit yatak 100 W değerinde yapılan deneylerdeki yakın modeller akışkan yatakta görülmemiştir. Yine belirleme katsayılarına bakarak 1’e en yakın sonuç veren modellerden ilk 5’ i seçilmiştir. Bu modeller seçilirken (MRD) deneysel boyutsuz kütle değerleri 1’ in üzerinde çıkan denklemler değerlendirmeye tabi tutulmamıştır. Boyutsuz kütle değişkenindeki büyük azalma deneyin ilk yarısında gerçekleşmiştir.

$$MR = 1 - 0,007021t + 0,000010t^2 \quad (49)$$

Tablo 9. Yeşil çay için akışkan yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (300 W)

Model Adı	r	RSS=SSE	SST	$R^2 = EF$	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,994	0,026	2,241	0,988	0,003	0,987	0,048	-0,055	0,003	0,002	0,005	0,987
Page	-	-	2,241	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modifiye Page	0,998	0,006	2,241	0,997	0,001	0,997	0,023	-0,052	0,001	0,001	0,005	0,438
Modifiye Page-I	-	-	2,241	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modifiye Page-II	0,998	0,006	2,241	0,997	0,001	0,996	0,023	-0,060	0,001	0,001	0,005	0,441
Henderson and Pabis	0,992	0,021	2,241	0,990	0,002	0,988	0,044	-0,124	0,002	0,002	0,011	0,929
Logarithmic	0,999	0,003	2,241	0,998	0,000	0,998	0,016	-0,003	0,000	0,000	0,000	0,332
Midilli-Kucuk	0,988	0,027	2,241	0,988	0,004	0,980	0,049	0,005	0,004	0,002	0,000	0,964
Demir et al.	0,999	0,001	2,241	0,998	0,000	0,999	0,011	-0,005	0,000	0,000	0,000	0,214
Two-Term	0,992	0,021	2,241	0,990	0,003	0,984	0,044	-0,119	0,003	0,002	0,011	0,934
Two-Term Exponential	0,994	0,026	2,241	0,988	0,003	0,986	0,048	-0,039	0,003	0,002	0,004	0,990
Verma et al.	0,997	0,008	2,241	0,997	0,001	0,995	0,027	-0,087	0,001	0,001	0,008	0,505
Approximation of Diffusion	0,998	0,006	2,241	0,997	0,001	0,996	0,024	-0,073	0,001	0,001	0,007	0,454
Modifiye Henderson and Pabis	0,992	0,021	2,241	0,990	0,004	0,976	0,044	-0,119	0,004	0,002	0,011	0,935
Wang and Singh	1,000	0,003	2,241	0,999	0,000	0,998	0,017	-0,144	0,000	0,000	0,013	0,345
Hii et al.	0,995	0,012	2,241	0,995	0,002	0,989	0,033	-0,072	0,002	0,001	0,007	0,682
Simplified Fick's diffusion	0,992	0,021	2,241	0,990	0,003	0,986	0,044	-0,121	0,003	0,002	0,011	0,933
Weibull	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aghbashlo et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Parabolic	0,942	0,129	2,241	0,942	0,016	0,918	0,108	0,004	0,016	0,012	0,000	2,219
Balbay and Şahin	0,998	0,001	2,241	0,998	0,000	0,999	0,010	-0,004	0,000	0,000	0,000	0,190
Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	0,995	0,012	2,241	0,995	0,002	0,989	0,033	-0,002	0,002	0,001	0,000	0,539



Şekil 14. Yeşil çay için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi(300W)

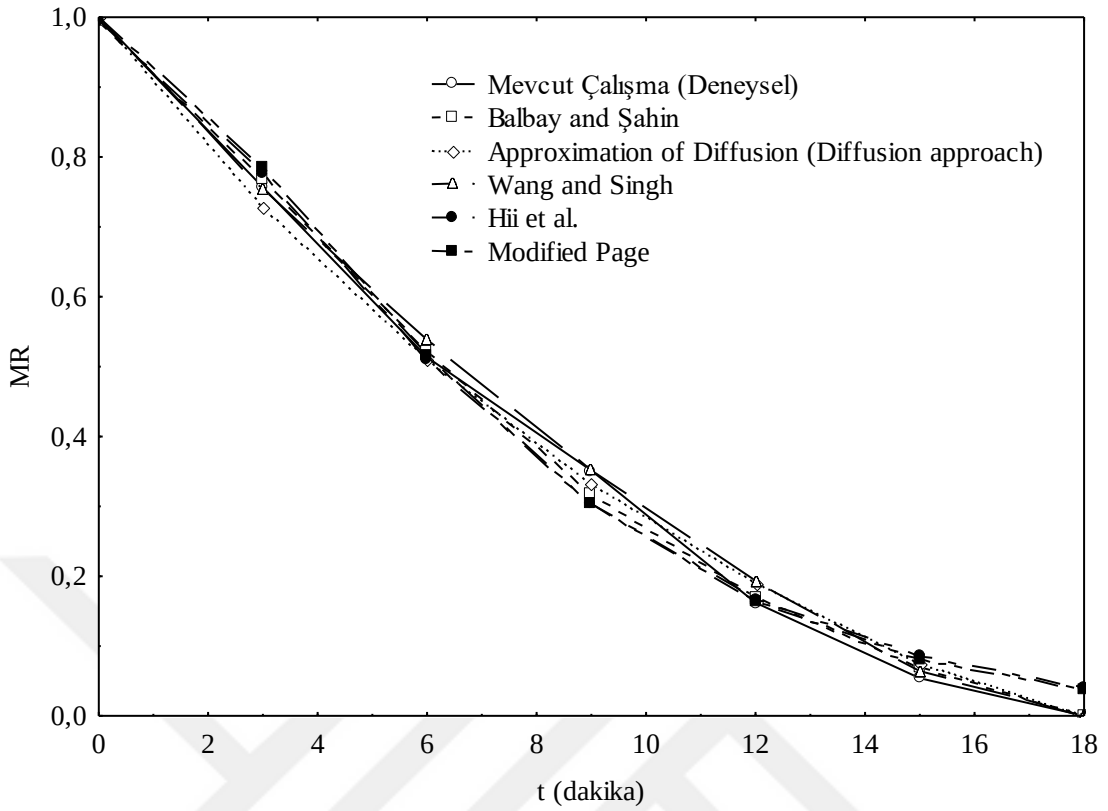
Tablo 9’da 300 W mikrodalga gücünde akışkan yatakta yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Wang and Singh modeli olmuştur. Şekil 14 ’te ise yeşil çayın 300 W mikrodalga gücü için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi grafiği verilmiştir. Bu formül denklem (50)’den elde edilmiştir.

Aynı şekilde bu grafiği incelediğimizde modellerin tamamının çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu grafiğe baktığımızda neredeyse tüm modeller çok yakın neticeler ortaya koymuştur. Belirleme katsayılarının çoğu 1’e çok yakın şekilde çıkmıştır. Bu grafik en yakın 5 modeli göstermektedir.

$$MR = 1 - 0,035366t + 0,000315t^2 \quad (50)$$

Tablo 10. Yeşil çay için akışkan yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (600 W)

Model Adı	r	RSS=SSE	SST	$R^2 = EF$	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,988	0,030	1,461	0,979	0,005	0,975	0,066	-0,039	0,005	0,004	0,006	2,063
Page	0,997	0,006	1,461	0,996	0,001	0,994	0,028	-0,042	0,001	0,001	0,006	0,753
Modifiye Page	0,997	0,005	1,461	0,996	0,001	0,995	0,028	-0,053	0,001	0,001	0,008	0,743
Modifiye Page-I	-	-	1,461	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modifiye Page-II	0,997	0,005	1,461	0,996	0,001	0,993	0,028	-0,049	0,001	0,001	0,007	0,733
Henderson and Pabis	0,986	0,027	1,461	0,982	0,005	0,972	0,062	-0,098	0,005	0,004	0,014	2,112
Logarithmic	0,998	0,003	1,461	0,998	0,001	0,995	0,022	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,717
Midilli-Kucuk	0,996	0,006	1,461	0,996	0,002	0,988	0,029	0,003	0,002	0,001	0,000	0,865
Demir et al.	0,998	0,003	1,461	0,998	0,001	0,994	0,020	-0,003	0,001	0,000	0,000	0,665
Two-Term	0,986	0,027	1,461	0,982	0,009	0,945	0,062	-0,101	0,009	0,004	0,014	2,107
Two-Term Exponential	0,985	0,037	1,461	0,975	0,007	0,962	0,073	-0,028	0,007	0,005	0,004	2,257
Verma et al.	0,996	0,008	1,461	0,995	0,002	0,989	0,033	-0,063	0,002	0,001	0,009	0,937
Approximation of Diffusion	0,999	0,003	1,461	0,998	0,001	0,996	0,019	0,023	0,001	0,000	0,003	0,587
Modifiye Henderson and Pabis	0,986	0,027	1,461	0,982	0,027	-	0,062	-0,102	0,027	0,004	0,015	2,109
Wang and Singh	0,998	0,003	1,461	0,998	0,001	0,996	0,021	-0,028	0,001	0,000	0,004	0,526
Hii et al.	0,997	0,005	1,461	0,996	0,003	0,978	0,028	-0,041	0,003	0,001	0,006	0,758
Simplified Fick's diffusion	0,986	0,027	1,461	0,982	0,007	0,963	0,062	-0,101	0,007	0,004	0,014	2,109
Weibull	0,997	0,005	1,461	0,996	0,001	0,995	0,028	-0,051	0,001	0,001	0,007	0,738
Aghbashlo et al.	0,998	0,001	1,461	0,999	0,000	0,996	0,013	-0,012	0,000	0,000	0,002	0,347
Parabolic	0,941	0,097	1,461	0,934	0,024	0,867	0,118	0,003	0,024	0,014	0,000	3,626
Balbay and Şahin	0,999	0,002	1,461	0,999	0,001	0,997	0,015	-0,003	0,001	0,000	0,000	0,407
Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



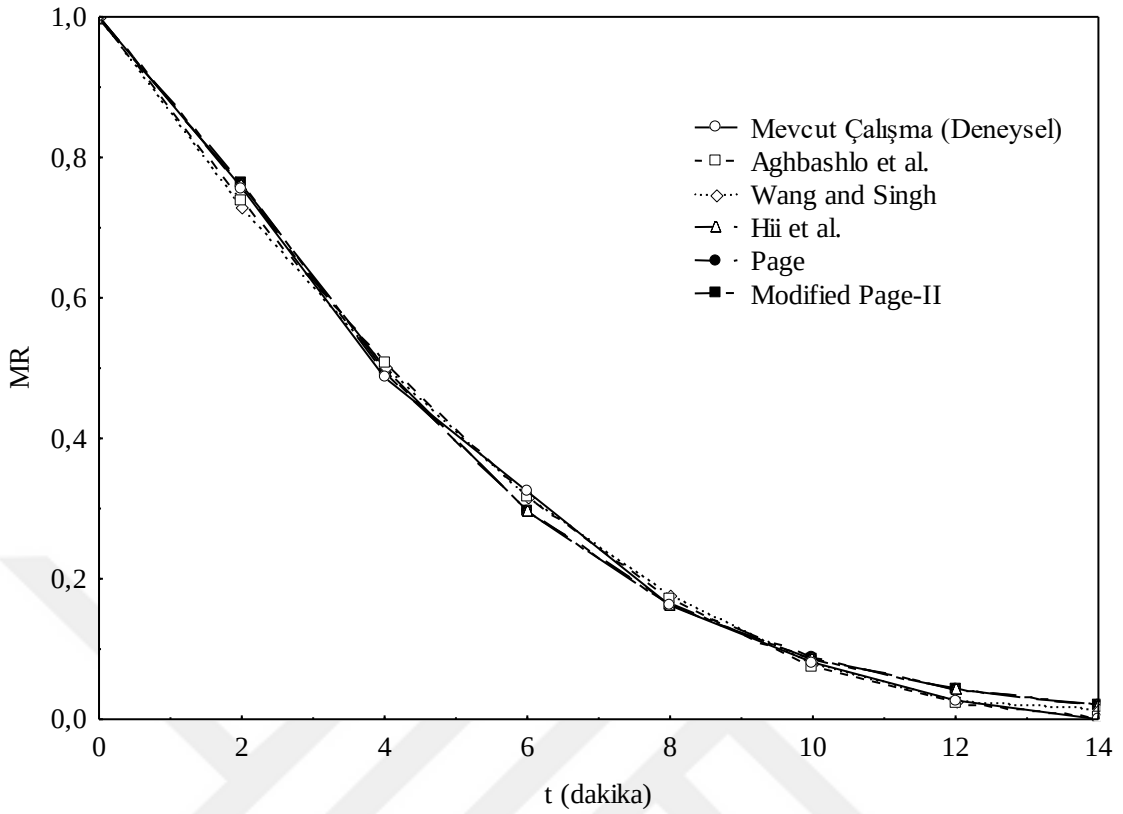
Şekil 15. Yeşil çay için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi(600W)

Tablo 10’da 600 W mikrodalga gücünde akışkan yatakta yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Balbay and Şahin modeli olmuştur. Şekil 15’te ise yeşil çayın 600 W mikrodalga gücü için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi grafiği verilmiştir. Bu formül denklem (51)’den elde edilmiştir.

$$MR = (1 + 0,100125) \exp(-0,054750t^{1,298125}) - 0,106875 \quad (51)$$

Tablo 11. Yeşil çay için akışkan yatakta kurutma değerlendirme kriterleri (800 W)

Model Adı	r	RSS=SSE	SST	$R^2 = EF$	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,993	0,022	1,492	0,986	0,003	0,983	0,052	-0,055	0,003	0,003	0,007	1,609
Page	0,998	0,002	1,492	0,999	0,000	0,998	0,015	-0,029	0,000	0,000	0,004	0,384
Modifiye Page	0,998	0,002	1,492	0,999	0,000	0,998	0,014	-0,030	0,000	0,000	0,004	0,386
Modifiye Page-I	-	-	1,492	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modifiye Page-II	0,998	0,002	1,492	0,999	0,000	0,998	0,014	-0,031	0,000	0,000	0,004	0,390
Henderson and Pabis	0,992	0,019	1,492	0,988	0,003	0,983	0,048	-0,108	0,003	0,002	0,013	1,632
Logarithmic	0,998	0,004	1,492	0,997	0,001	0,995	0,023	-0,003	0,001	0,001	0,000	0,678
Midilli-Kucuk	0,998	0,001	1,492	0,999	0,000	0,998	0,013	0,007	0,000	0,000	0,001	0,419
Demir et al.	0,998	0,004	1,492	0,997	0,001	0,994	0,023	-0,004	0,001	0,001	0,000	0,655
Two-Term	0,990	0,021	1,456	0,986	0,005	0,966	0,051	-0,094	0,005	0,003	0,012	1,664
Two-Term Exponential	0,991	0,024	1,456	0,984	0,004	0,977	0,055	-0,041	0,004	0,003	0,005	1,608
Verma et al.	0,998	0,003	1,492	0,998	0,001	0,997	0,018	-0,018	0,001	0,000	0,002	0,370
Approximation of Diffusion	0,998	0,003	1,456	0,998	0,001	0,996	0,020	0,030	0,001	0,000	0,004	0,459
Modifiye Henderson and Pabis	0,992	0,019	1,492	0,988	0,009	0,913	0,048	-0,108	0,009	0,002	0,013	1,633
Wang and Singh	0,998	0,001	1,492	0,999	0,000	0,998	0,014	0,013	0,000	0,000	0,002	0,300
Hii et al.	0,998	0,002	1,492	0,999	0,001	0,996	0,014	-0,026	0,001	0,000	0,003	0,387
Simplified Fick's diffusion	0,990	0,021	1,456	0,986	0,004	0,975	0,051	-0,097	0,004	0,003	0,012	1,662
Weibull	0,998	0,002	1,456	0,998	0,000	0,998	0,017	-0,033	0,000	0,000	0,004	0,454
Aghbashlo et al.	0,999	0,001	1,492	0,999	0,000	0,999	0,011	0,005	0,000	0,000	0,001	0,314
Parabolic	0,998	0,002	1,492	0,999	0,000	0,998	0,014	0,018	0,000	0,000	0,002	0,354
Balbay and Şahin	0,998	0,001	1,492	0,999	0,000	0,998	0,011	-0,005	0,000	0,000	0,001	0,323
Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk)	0,999	0,004	1,492	0,998	0,001	0,992	0,021	-0,044	0,001	0,000	0,005	0,394



Şekil 16. Yeşil çay için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi(800W)

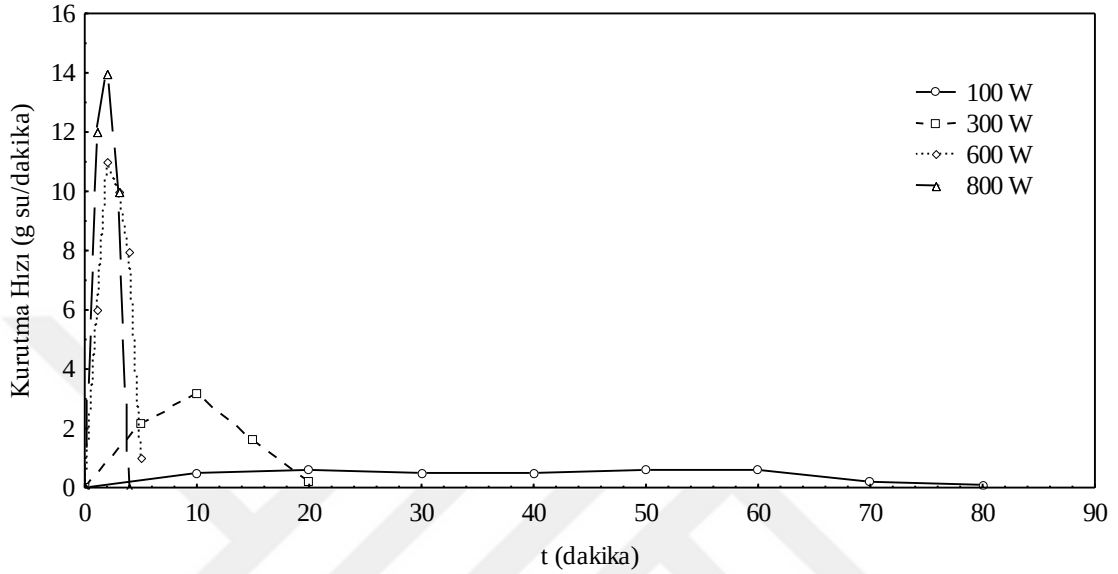
Tablo 11’de 800 W mikrodalga gücünde akışkan yatakta yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Aghbashlo et al. modeli olmuştur. Şekil 16 ’da ise yeşil çayın 800 W mikrodalga gücü için akışkan yatakta boyutsuz kütle oranının zamanla değişimi grafiği verilmiştir. Bu formül denklem (52)’den elde edilmiştir.

MR-t grafiğini incelediğimizde modellerin tamamının birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Deneyin 10 ile 14. dakikası arasında boyutsuz kütle değişkenindeki azalma yavaşlamıştır. Belirleme katsayılarının çoğu 1’e yakın şekilde çıkmıştır. Bu grafik en yakın 5 modeli göstermektedir.

$$MR = \exp\left(-\frac{0,137908t}{1 - 0,046869}\right) \quad (51)$$

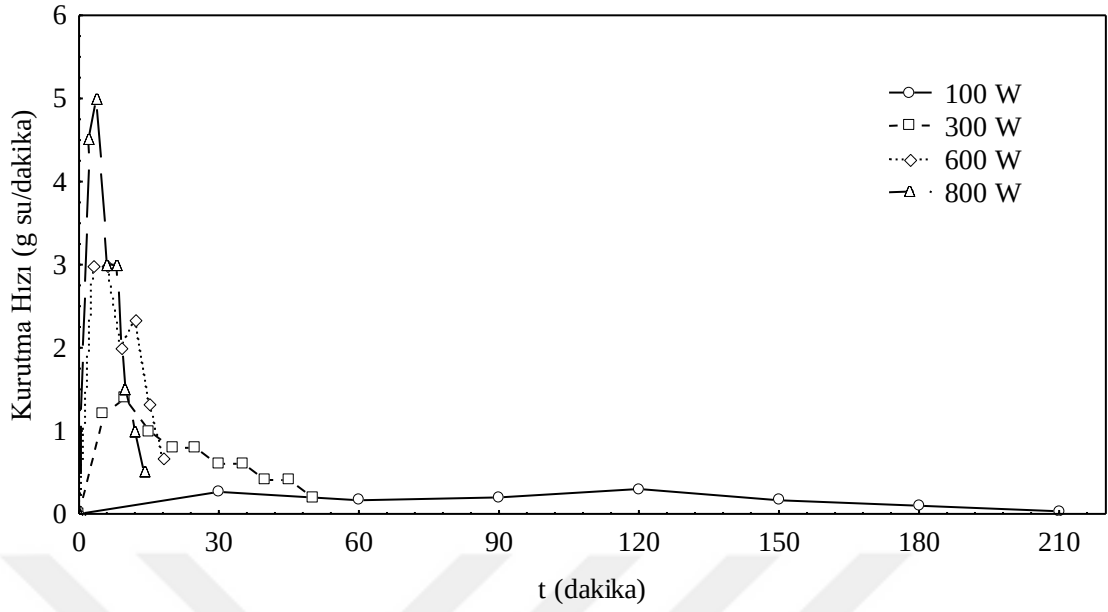
Genel olarak sabit ve akışkan yatakta yapılan deneylere bakacak olursak, sabit yataktaki boyutsuz kütle değişkeninin alt değerlere düşmesi akışkan yatağa göre oldukça kısa olmuştur. 100 W için bakacak olursak MR değeri sabit yatakta 60 dakikada 0,083 değerine düşerken, akışkan yatakta 60 dakikada 0,648 değerine düşmüştür. 300 W için bakacak olursak MR değeri sabit yatakta 15 dakikada 0,027 değerine düşerken, akışkan

yatakta 15 dakikada 0,513 değerine düşmüştür. 600 W için bakacak olursak MR değeri sabit yatakta 3 dakikada 0,250 değerine düşerken, akışkan yatakta 3 dakikada 0,513 değerine düşmüştür. 800 W için bakacak olursak MR değeri sabit yatakta 2 dakikada 0,277 değerine düşerken, akışkan yatakta 2 dakikada 0,763 değerine düşmüştür.



Şekil 17. Sabit yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki kurutma hızı zaman grafiği

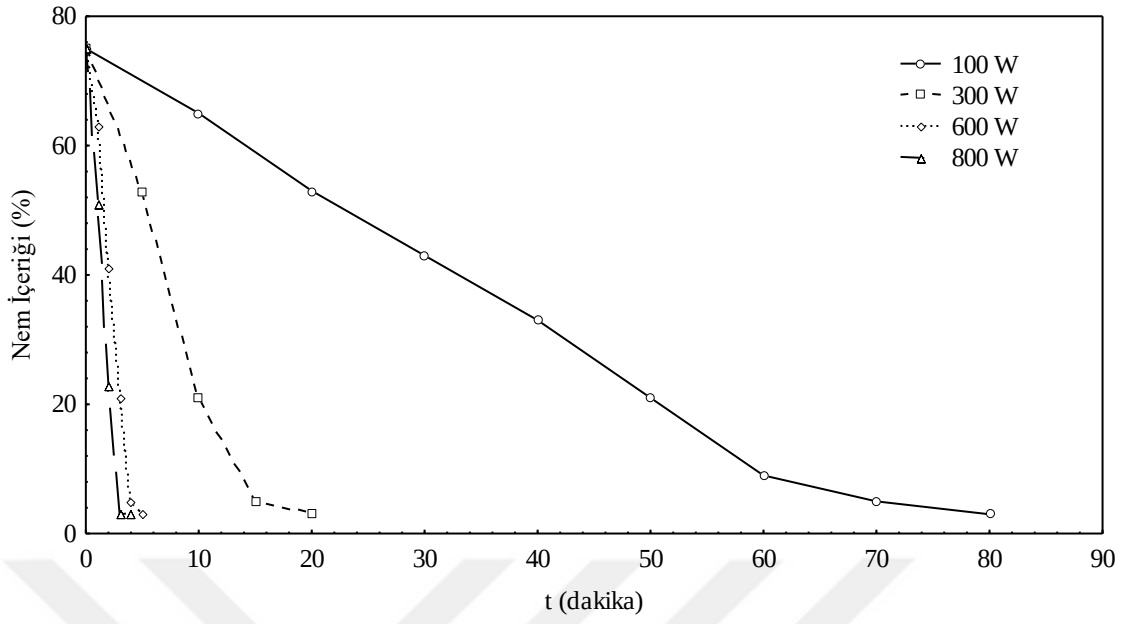
Şekil 17 sabit yatakta yeşil çay için farklı mikrodalga güçlerinde kurutma hızının zaman içindeki değişimini göstermektedir. Grafikte kurutma hızının mikrodalga gücüyle doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Yeşil çayın en yüksek kuruma hızları 100 W, 300 W, 600 W ve 800 W güç değerleri için sırasıyla; 20. dakikada 0,6 gram su/dk., 10. dakikada 3,2 gram su/dk., 2. dakikada 11 gram su/dk., 2. dakikada 14 gram su/dk. şeklinde olmuştur. Aynı güç değerleri için kuruma süreleri sırasıyla 80 dakika, 20 dakika, 5 dakika ve 3 dakika şeklindedir.



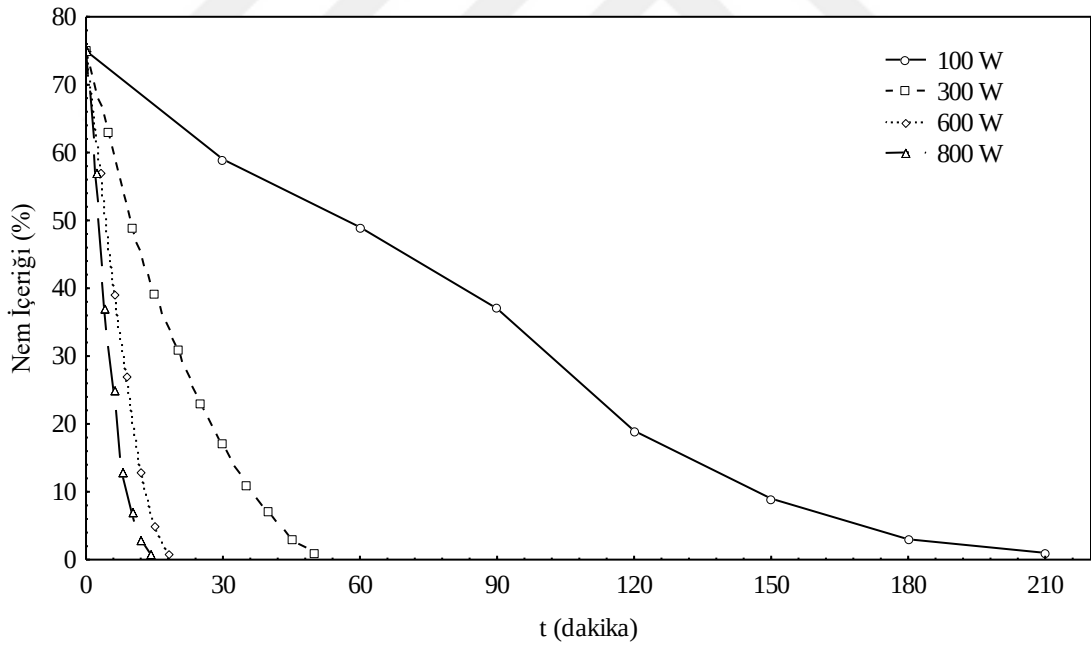
Şekil 18. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki kurutma hızı zaman grafiği

Şekil 18 dönmeli akışlı akışkan yatakta yeşil çay için farklı mikrodalga güçlerinde kurutma hızının zaman içindeki değişimini göstermektedir. Grafikte kurutma hızının mikrodalga gücüyle doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Yeşil çayın en yüksek kuruma hızları 100 W, 300 W, 600 W ve 800 W güç değerleri için sırasıyla; 120. dakikada 0,3 gram su/dk., 20. dakikada 0,8 gram su/dk., 12. dakikada 2,3 gram su/dk., 6. dakikada 3 gram su/dk. şeklinde olmuştur. Aynı güç değerleri için kuruma süreleri sırasıyla 210 dakika, 50 dakika, 18 dakika ve 14 dakika şeklindedir.

Görüldüğü üzere sabit yataktaki kurutma hızı dönmeli akışlı akışkan yatağa göre daha yüksek ve kuruma süresi daha düşüktür.



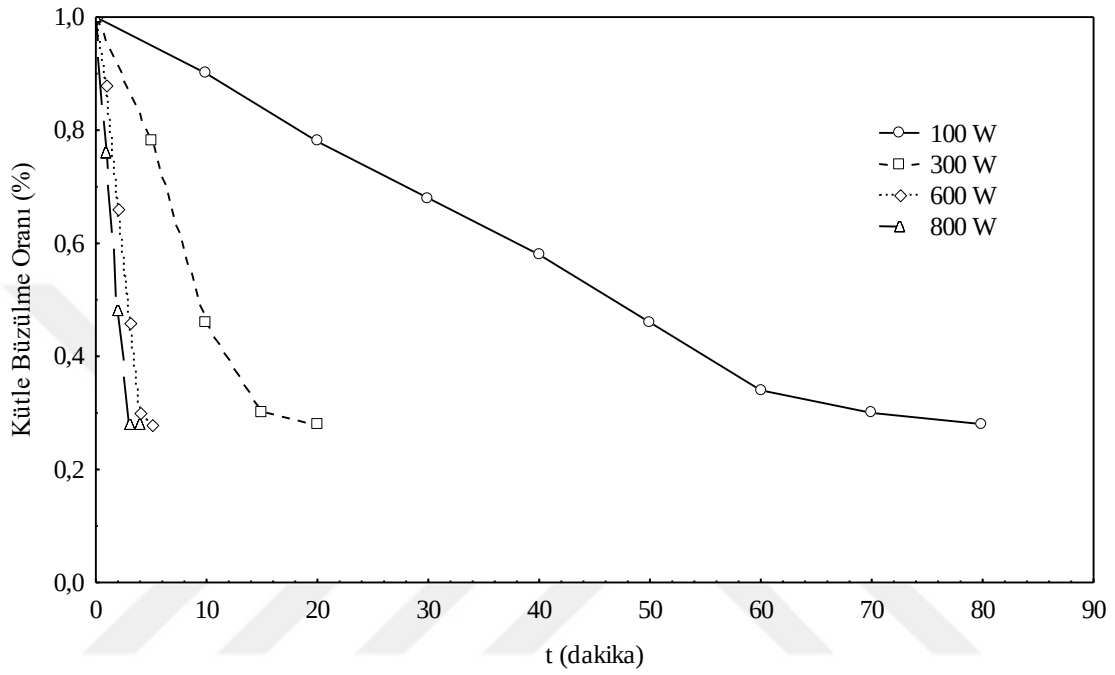
Şekil 19. Sabit yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki nem içeriği zaman grafiği



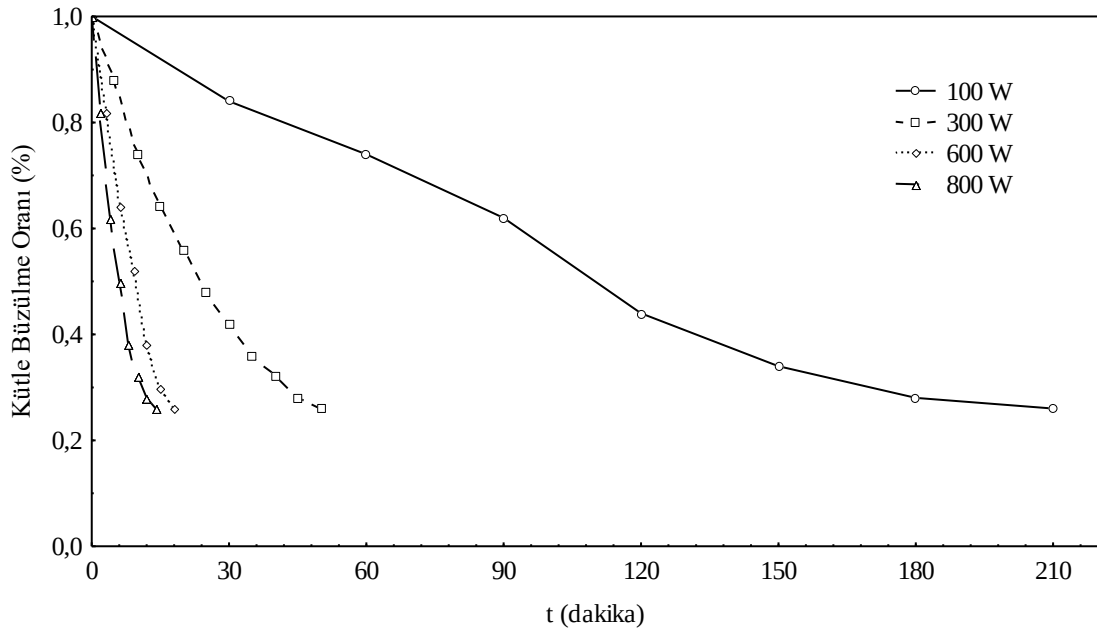
Şekil 20. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki nem içeriği zaman grafiği

Şekil 19 ve 20 sırasıyla sabit ve dönmeli akışlı akışkan yatakta yeşil çay için zamana bağlı olarak nem içeriğinin değişimini göstermektedir. Yeşil çay için başlangıç nem içeriği %75 olarak belirlenmiştir. Nem içeriği, yeşil çay için zamanın artmasıyla azalır. Ayrıca, mikrodalga gücü arttığında, yeşil çay için nem transfer süresinin oldukça azaldığı

gözlemlenmiştir. Nem içeriklerinin azalış sürelerini mukayese edecek olursak sabit yatakta 100 W, 300 W, 600 W ve 800 W için sırasıyla 80 dakika, 20 dakika, 5 dakika ve 3 dakika şeklindeyken dönmeli akışlı akışkan yatakta sırasıyla 210 dakika, 50 dakika, 18 dakika, 14 dakika şeklindedir.



Şekil 21. Sabit yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki kütle büzülme oranı zaman grafiği



Şekil 22. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan yeşil çayın farklı mikrodalga güçlerindeki kütle büzülme oranı zaman grafiği

Şekil 21 ve 22 yeşil çay için zaman içinde kütle büzülme oranının değişimini göstermektedir. Kütle büzülme oranı yeşil çay için zamanın artmasıyla neredeyse lineer olarak azalır. Ayrıca yeşil çay için mikrodalga gücü arttığında kütle büzülme oranı süresinin oldukça azaldığı gözlemlenmiştir. Buna ilaveten sabit yatakta kütle büzülme oranının hızı dönmeli akışlı akışkan yatağa göre oldukça yüksek çıkmıştır.



4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Dönmeli akışlı akışkan yataklı mikrodalga kurutma deneylerinde hem sabit yatak hem de akışkan yatakta zamana bağlı olarak kütle kayıpları ölçüldü. Her bir deney için giriş kurutma havası hızı ve sıcaklığı yaklaşık olarak sabit tutuldu ve kalite parametreleri belirlendi.

4.1. Sabit Yatakta Kurutma

Deneylerin ilki 100 W mikrodalga gücünde ve 50 ± 1 gram yeşil çay ile başlatıldı. Ağırlık değişimleri 10'ar dakika arayla 1 gram hassasiyetinde teraziyle ölçülüp kaydedildi. 10 dakikanın sonunda ağırlık 45 gram olarak ölçüldü ve çayların renklerinde hafif bir solma şekillerinde de bir miktar büzülme gözlemlendi. Bu şekilde 10' ar dakikalık periyotlarla ölçümlere 80 dakika kadar devam edildi. Ağırlık değişimleri 39, 34, 29, 23, 17, 15, 14 gram şeklinde gerçekleşti. 80 dakika sonunda çayların görüntüsü Tablo 12' de gösterilmiştir.

2. deney 300 W mikrodalga gücünde ve 50 ± 1 gram yeşil çay ile başlatıldı. Giriş hava sıcaklığı $18,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve hızı 2,20 m/s olarak ayarlandı. Ağırlık değişimleri 5' er dakika arayla 1 gram hassasiyetinde teraziyle ölçülüp kaydedildi. 5 dakikanın sonunda ağırlık 39 gram olarak ölçüldü. Çayların renklerinde 100 W' a göre daha hafif bir solma ve şekillerinde de bir miktar büzülme gözlemlendi. Bu şekilde 5' er dakikalık periyotlarla ölçümlere 20 dakika kadar devam edildi. Ağırlık değişimleri 39, 23, 15, 14 gram şeklinde gerçekleşti. 20 dakika sonunda çayların görüntüsü Tablo 12' de gösterilmiştir.

3. deney 600 W mikrodalga gücünde ve 50 ± 1 gram yeşil çay ile başlatıldı. Giriş hava sıcaklığı $18,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve hızı 2,20 m/s olarak ayarlandı. Ağırlık değişimleri 1' er dakika arayla 1 gram hassasiyetinde teraziyle ölçülüp kaydedildi. 1 dakikanın sonunda ağırlık 44 gram olarak ölçüldü. Çayların renklerinde çok hafif bir solma ve şekillerinde de bir miktar büzülme gözlemlendi. Bu şekilde 1' er dakikalık periyotlarla ölçümlere 5 dakika kadar devam edildi. Ağırlık değişimleri 44, 33, 23,15, 14 gram şeklinde gerçekleşti. 5 dakika sonunda çayların görüntüsü Tablo 12' de gösterilmiştir.

4. deney 800 W mikrodalga gücünde ve 50 ± 1 gram yeşil çay ile başlatıldı. Giriş hava sıcaklığı $18,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve hızı 2,20 m/s olarak ayarlandı. Ağırlık değişimleri 1' er dakika arayla 1 gram hassasiyetinde teraziyle ölçülüp kaydedildi. 1 dakikanın sonunda ağırlık

38 gram olarak ölçüldü. Çayların renklerinde çok hafif bir solma ve şekillerinde de bir miktar büzülme gözlemlendi. Bu şekilde 1' er dakikalık periyotlarla ölçümlere 42 dakika kadar devam edildi. Ağırlık değişimleri 38, 24, 14, 14 gram şeklinde gerçekleşti. 4 dakika sonunda çayların görüntüsü Tablo 12' de gösterilmiştir.

Tablo 12. Sabit yatakta kurutulan çay numunelerinin zamana bağlı kuruma görselleri ve en iyi modelleri

Güç	Zaman(dk)	En iyi model ve denklemi	Görsel
100 W	0	Wang and Singh	
	80	$MR = 1 - 0,016775t + 0,000037t^2$ (2)	
300 W	0	Modifiye Page II	
	20	$MR = \exp\left(-0,045196\left(\frac{t}{-1,31880^2}\right)^{1,970443}\right)$	
600 W	0	Midilli-Kucuk	
	5	$MR = 0,998423 \exp(-0,161088t^{1,928717}) - 0,009057t$	
800 W	0	Aghbashlo et al.	
	4	$MR = \exp\left(-\frac{0,317938t}{1 - 0,249625}\right)$	

Tablo 13. Sabit yatakta kurutulmuş çay numunelerinin analiz sonuçları

Analiz Sonuçları	Analiz Yöntemi	Güç Değerleri	Sonuç %
Nem (g/g) (%)	TS 1562/1990	100 W	9,20
		300 W	4,50
		600 W	6,70
		800 W	5,28
Su Ekstraktı (Kuru Maddede) (g/g) (%)	TS ISO 9768/T1 Kasım 2003	100 W	27,66
		300 W	35,44
		600 W	28,07
		800 W	29,07
Ham Lif İçeriği (Kuru Maddede) (g/g) (%)	TS ISO 15598/ Mart 2003	100 W	20,79
		300 W	17,79
		600 W	20,43
		800 W	20,82
Toplam Kül (Kuru Maddede) (g/g) (%)	TS 1564/ Mart 1990	100 W	6,35
		300 W	6,00
		600 W	5,99
		800 W	5,95
Kafein (Kuru Maddede) (g/g) (%)	TS ISO 10727	100 W	1,91
		300 W	1,85
		600 W	1,85
		800 W	1,93
Polifenol (Kuru Maddede) (g/g) (%)	ISO 14502-2/ 2005	100 W	8,16
		300 W	11,20
		600 W	11,00
		800 W	10,50

Yapılan analiz sonuçlarını irdelediğimizde en yüksek su ekstraktı oranı %35,44 ile 300 W gücünde yapılan kurutma işleminden alınan numunelerde tespit edilmiştir. Bu oranı sırasıyla %29,07, %28,07, %27,66 ile 800 W, 600 W, 100 W güç değerleri izlemektedir.

Kül miktarlarına baktığımızda kül miktarı oranının %5,95 ile %6,35 arasında değişmekte olduğunu görmekteyiz. Kül miktarları en yüksek %6,35 ile 100 W gücünde yapılan kurutma işleminden alınan numunelerde tespit edilmiştir. Bu oranı sırasıyla %6, %5,99, %5,95 ile 300 W, 600 W, 800 W güç değerleri izlemektedir.

Polifenol oranının %11,20 ile en yüksek çıktığı numuneler 300 W gücünde yapılan kurutmadan elde edilen numunelerdir. Bu oranı sırasıyla %11, %10,5, %8,16 ile 600 W, 800 W, 100 W güç değerleri izlemektedir.

Kafein oranının %1,93 ile en yüksek çıktığı numuneler 800 W gücünde yapılan kurutmadan elde edilen numunelerdir. Bu oranı sırasıyla %1,91, %1,85, %1,85 ile 100 W, 300 W, 600 W güç değerleri izlemektedir.

Ham lif içeriği oranının %17,79 ile en düşük çıktığı numuneler 300 W gücünde yapılan kurutmadan elde edilen numunelerdir. Bu oranı sırasıyla %20,43, %20,79, %20,82 ile 600 W, 100 W, 800 W güç değerleri izlemektedir.

Nem oranının %4,5 ile en düşük çıktığı numuneler 300 W gücünde yapılan kurutmadan elde edilen numunelerdir. Bu oranı sırasıyla %5,28, %6,7, %9,2 ile 800 W, 600 W, 100 W güç değerleri izlemektedir.

Tablo 4 verilerine göre 100 W mikrodalga gücü için Wang and Singh, Weibull, Modifiye Page II, Modifiye Page, Approximation of Diffusion modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,993, 0,992, 0,991, 0,991 ve 0,991 olduğu görülmektedir. Bu modellerin standart tahmini hata (SSE) değerleri sırasıyla 0,015, 0,01322, 0,0132, 0,0131 ve 0,024' tür. Modellerin x^2 değerleri ise sırasıyla: 0,0022, 0,00212, 0,00211, 0,0021 ve 0,004' tür. RMSE şeklinde ifade edilen kök ortalama kare hatası (Root Mean Squared Error) değerleri ise sırasıyla; 0,041, 0,038, 0,038, 0,038 ve 0,052'dir. Bu veriler ve Şekil 9' daki eğriler, Wang and Singh modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Tablo 5 verilerine göre 300 W mikrodalga gücü için Modifiye Page II, Weibull, Modifiye Page, Page, Verma et al. modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99989, 0,99970, 0,99970, 0,99871 ve 0,99767 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00030, 0,00029, 0,00029, 0,00127 ve 0,00230' dir. Modellerin x^2 değerleri ise sırasıyla: 0,00015, 0,00009, 0,00009, 0,00042 ve 0,00115' tir. RMSE değerleri ise sırasıyla; 0,00779, 0,00766, 0,00766, 0,01595 ve 0,02146' dır. Bu veriler ve Şekil 10' daki eğriler, Modifiye Page II modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Tablo 6 verilerine göre 600 W mikrodalga gücü için Midilli-Kucuk, Alibas (Modifiye Midilli-Kucuk), Hii et al., Modifiye Page, Modifiye Page, II. modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99878, 0,99846, 0,99803, 0,99793 ve 0,99793 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00171, 0,00217, 0,00278, 0,00292 ve 0,00292' dir. Modellerin x^2 değerleri ise sırasıyla: 0,00085, 0,00217, 0,00278, 0,00073 ve 0,00097' dir. RMSE değerleri ise sırasıyla; 0,01693, 0,01902, 0,02153, 0,02207 ve 0,02207' dir. Bu veriler ve Şekil 11' daki eğriler, Midilli-Kucuk modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Tablo 7 verilerine göre 800 W mikrodalga gücü için Aghbashlo et al., Balbay and Şahin, Midilli-Kucuk, Alibas (modifiye Midilli-Kucuk), Hii et al., modellerinde R^2

değerlerinin sırasıyla 0,99932, 0,99714, 0,99700, 0,99699 ve 0,99619 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00065, 0,00278, 0,00291, 0,00292 ve 0,00370' tir. Modellerin x^2 değerleri ise sırasıyla: 0,00021, 0,00278, 0,00291' dir. Alibas (modifiye Midilli-Kucuk) ve Hi et al. için program değer üretmemiştir. RMSE değerleri ise sırasıyla; 0, 01146, 0, 02358, 0, 02414, 0, 02420 ve 0, 02720' dir. Bu veriler ve Şekil 12' deki eğriler, Aghbashlo et al. modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

4.2. Akışkan Yatakta Kurutma

Deneylerin ilki 100 W mikrodalga gücünde ve 50 ± 1 gram yeşil çay ile başlatıldı. Giriş hava sıcaklığı $18,9^\circ\text{C} - 19,5^\circ\text{C}$ aralığında ve hızı 2,20 m/s olarak ayarlandı. Ağırlık değişimleri 30' ar dakika arayla 1 gram hassasiyetinde teraziyle ölçülüp kaydedildi. 30 dakikanın sonunda ağırlık 42 gram olarak ölçüldü ve çayların renklerinde çok hafif bir solma, şekillerinde de çok az bir buruşma gözlemlendi. Bu şekilde 30' ar dakikalık periyotlarla ölçümlere 210 dakika kadar devam edildi. Ağırlık değişimleri 37, 31, 22, 17, 14, 13 gram şeklinde gerçekleşti.

2. deney 300 W mikrodalga gücünde ve 50 ± 1 gram yeşil çay ile başlatıldı. Giriş hava sıcaklığı $19,6^\circ\text{C} - 19,9^\circ\text{C}$ aralığında ve hızı 2,20 m/s olarak ayarlandı. Ağırlık değişimleri 5' er dakika arayla 1 gram hassasiyetinde teraziyle ölçülüp kaydedildi. 5 dakikanın sonunda ağırlık 44 gram olarak ölçüldü. Çayların renkleri ve şekilleri hemen hemen 100 W ile aynıydı. Bu şekilde 5' er dakikalık periyotlarla ölçümlere 50 dakika kadar devam edildi. Ağırlık değişimleri 37, 32, 28, 24, 21, 18, 16, 14, 13 gram şeklinde gerçekleşti.

3. deney 600 W mikrodalga gücünde ve 50 ± 1 gram yeşil çay ile başlatıldı. Giriş hava sıcaklığı $20,0^\circ\text{C}$ ve hızı 2,20 m/s olarak ayarlandı. Ağırlık değişimleri 3'er dakika arayla 1 gram hassasiyetinde teraziyle ölçülüp kaydedildi. 3 dakikanın sonunda ağırlık 41 gram olarak ölçüldü. Çayların renkleri ve şekilleri hemen hemen 100 W ve 300 W ile aynıydı. Bu şekilde 3' er dakikalık periyotlarla ölçümlere 18 dakika kadar devam edildi. Ağırlık değişimleri 32, 26, 19, 15, 13 gram şeklinde gerçekleşti.

4. deney 800 W mikrodalga gücünde ve 50 ± 1 gram yeşil çay ile başlatıldı. Giriş hava sıcaklığı $20,1^\circ\text{C} - 20,2^\circ\text{C}$ aralığında ve hızı 2,20 m/s olarak ayarlandı. Ağırlık değişimleri 2' şer dakika arayla 1 gram hassasiyetinde teraziyle ölçülüp kaydedildi.

2. dakikanın sonunda ağırlık 41 gram olarak ölçüldü. Çayların renkleri ve şekilleri diğer dönmeli akışlı akışkan yatakta yapılan deneylerle aynıydı. Bu şekilde 2' şer dakikalık periyotlarla ölçümlere 14 dakika kadar devam edildi. Ağırlık değişimleri 31, 25, 19, 16, 14, 13 gram şeklinde gerçekleşti.

Tablo 14. Sabit yatakta kurutulan çay numunelerinin zamana bağlı kuruma görselleri ve en iyi modelleri

Güç	Zaman (dk)	En iyi model ve denklemi	Görsel
100 W	0	Wang and Singh	
	210	$MR = 1 - 0,007021t + 0,000010t^2$	
300 W	0	Wang and Singh	
	50	$MR = 1 - 0,035366t + 0,000315t^2$	
600 W	0	Balbay and Şahin	
	18	$MR = (1 + 0,100125) \exp(-0,054750t^{1,298125}) - 0,106875$	
800 W	0	Aghbashlo et al.	
	14	$MR = \exp(-\frac{0,137908t}{1 - 0,046869})$	

Tablo 15. Akışkan yatakta kurutulan çay numunelerinin analiz sonuçları

Analiz Sonuçları	Analiz Yöntemi	Güç Değerleri	Sonuç %
		100 W	15,80
Nem (g/g) (%)	TS 1562/ 1990	300 W	12,43
		600 W	16,93
		800 W	14,63
		100 W	41,11
Su Ekstraktı (Kuru Maddede) (g/g) (%)	TS ISO 9768/T1 Kasım 2003	300 W	42,82
		600 W	42,77
		800 W	43,83
		100 W	11,84
Ham Lif İçeriği (Kuru Maddede) (g/g) (%)	TS ISO 15598/ Mart 2003	300 W	11,81
		600 W	12,98
		800 W	12,19
		100 W	6,52
Toplam Kül (Kuru Maddede) (g/g) (%)	TS 1564/ Mart 1990	300 W	6,51
		600 W	6,45
		800 W	5,94
		100 W	1,93
Kafein (Kuru Maddede) (g/g) (%)	TS ISO 10727	300 W	1,83
		600 W	2,00
		800 W	2,20
		100 W	-
Polifenol (Kuru Maddede) (g/g) (%)	ISO 14502-2/ 2005	300 W	-
		600 W	-
		800 W	-
		100 W	-

Yapılan analiz sonuçlarını irdelediğimizde en yüksek su ekstraktı oranı % 43, 83 ile 800 W gücünde yapılan kurutma işleminden alınan numunelerde tespit edilmiştir. Bu oranı sırasıyla % 42,82, % 42,77, % 41,11 ile 300 W, 600 W, 100 W güç değerleri izlemektedir.

Kül miktarlarına baktığımızda kül miktarı oranının % 5,94 ile % 6,52 arasında değişmekte olduğunu görmekteyiz. Kül miktarları en yüksek % 6,52 ile 100 W gücünde yapılan kurutma işleminden alınan numunelerde tespit edilmiştir. Bu oranı sırasıyla % 6,51, % 6,45, % 5,94 ile 300 W, 600 W, 800 W güç değerleri izlemektedir.

Kafein oranının % 2,20 ile en yüksek çıktığı numuneler 800 W gücünde yapılan kurutmadan elde edilen numunelerdir. Bu oranı sırasıyla %2, % 1,93, % 1,83 ile 600 W, 100 W, 300 W güç değerleri izlemektedir.

Ham lif içeriği oranının % 11,81 ile en düşük çıktığı numuneler 300 W gücünde yapılan kurutmadan elde edilen numunelerdir. Bu oranı sırasıyla % 11,84, % 12,19, %

12,98 ile 100 W, 800 W, 600 W güç değerleri izlemektedir.

Rutubet tayini oranının % 12,43 ile en düşük çıktığı numuneler 300 W gücünde yapılan kurutmadan elde edilen numunelerdir. Bu oranı sırasıyla %14,63, %15,8, %16,93 ile 800 W, 100 W, 600 W güç değerleri izlemektedir.

Tablo 8 verilerine göre 100 W mikrodalga gücü için Wang and Singh, Modifiye Page, Modifiye Page II, Page, Parabolic modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99325, 0, 99151, 0,99182, 0,96571 ve 0,95853 olduğu görülmektedir. Bu modellerin standart tahmini hata (SSE) değerleri sırasıyla 0,01209, 0,01521, 0,01467, 0,06151 ve 0,07439'dur. Modellerin x^2 değerleri ise sırasıyla: 0,00201, 0,00253, 0,00293, 0,010251 ve 0,01487'dir. RMSE şeklinde ifade edilen kök ortalama kare hatası (Root Mean Squared Error) değerleri ise sırasıyla; 0,03888, 0,04361, 0,04282, 0,08768 ve 0,09643'tür. Bu veriler ve Şekil 13' teki eğriler, Wang and Singh modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Tablo 9 verilerine göre 300 W mikrodalga gücü için Wang and Singh, Modifiye Page II, Modifiye Page, Approximation of Diffusion, Verma et al. modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99863, 0,99749, 0,99747, 0,99716 ve 0,99655 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00305, 0,00580, 0,00566, 0,00635 ve 0,00772'dir. Modellerin x^2 değerleri ise sırasıyla: 0,00033, 0,00072, 0,00062, 0,00079 ve 0,00096'dır. RMSE değerleri ise sırasıyla; 0,01667, 0,02298, 0,02268, 0,02404 ve 0,02650'dir. Bu veriler ve Şekil 14' te gösterilen eğriler, Wang and Singh modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Tablo 10 verilerine göre 600 W mikrodalga gücü için Balbay and Şahin, Approximation of Diffusion, Wang and Singh, Hi et al., Modifiye Page modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99894, 0,99819, 0,99794, 0,99634 ve 0,99631 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00154, 0,00263, 0,00300, 0,00537 ve 0,00534'tür. Modellerin x^2 değerleri ise sırasıyla: 0,00051, 0,00065, 0,00060, 0,00268 ve 0,00106'dır. RMSE değerleri ise sırasıyla; 0,01485, 0,01938, 0,02072, 0,02772 ve 0,02762'dir. Bu veriler ve Şekil 15' te gösterilen eğriler, Balbay and Şahin modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Tablo 11 verilerine göre 800 W mikrodalga gücü için Aghbashlo et al., Wang and Singh, Hi et al., Page, Modifiye Page II modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0, 99932, 0,99899, 0,99890, 0,99885 ve 0,99881 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00101, 0,00149, 0,00162, 0,00171 ve 0,00166'dır. Modellerin x^2

değerleri ise sırasıyla: 0,00016, 0,00024, 0,00054, 0,00028, 0,00033' tür. RMSE değerleri ise sırasıyla; 0,01125, 0,01365, 0,01426, 0,01462 ve 0,01442' dir. Bu veriler ve Şekil 16' daki eğriler, Aghbashlo et al. modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Genel olarak baktığımızda ve tüm değerleri göz önünde bulundurduğumuzda su ekstraktı ve kafein oranı en yüksek, toplam kül oranı en düşük olan numune 800 W gücünde ve dönmeli akışlı akışkan yataklı sistemde kurutulan yeşil çaylardan alınmıştır.

En düşük rutubet oranı sabit yatak ve 300 W gücünde kurutulan numunede tespit edilmiştir.

Ham lif içerikleri oranına baktığımızda en düşük oran 300 W gücünde dönmeli akışlı akışkan yataklı sistemde kurutulan numunelerde tespit edilmiştir.

Laboratuvarda sadece sabit yatakta kurutulan yeşil çayların polifenol oranları incelenebilmiştir. En yüksek polifenol oranı 300 W gücünde kurutulan numunelerden tespit edilmiştir.

Dönmeli akışta yapılan kurutma işlemlerinin tamamının su ekstraktı oranları sabit yatağa göre yüksek çıkmış olması dönmeli akışlı akışkan yataklı sistemin çay kurutmak için uygun bir yöntem olabileceğine ışık tutmaktadır.

İki kurutma sistemini karşılaştırdığımızda dönmeli akışlı akışkan yataklı sistemde kurutulan yeşil çayların tamamının su ekstraktı oranı sabit yatakta kurutulan çaylardan yüksek çıkmıştır. Toplam kül oranı sıralamaları iki kurutma sisteminde de değişmemiştir. Dönmeli akışlı akışkan yataklı sistemde kurutulan yeşil çaylardaki ham lif oranlarına baktığımızda bütün değerlerin sabit yatakta kurutulan çaylardan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca nem oranlarını da inceleyecek olursak dönmeli akışlı akışkan yataklı sistemde kurutulan yeşil çayların tamamının nem oranlarının sabit yatakta kurutulan çaylardan yüksek olduğunu görmüş oluruz.

Yüksek güçlerde yapılan kurutma işlemlerinin tamamında kurutma süresinin kısalığından dolayı çay yapraklarının renginde daha az bir solma görülmüştür. Bu nedenle kurutma işlemi ne kadar kısa sürede gerçekleşirse çay bitkisi rengini o kadar canlı şekilde muhafaza etmektedir.

5. ÖNERİLER

- a) Daha iyi sonuçlar için daha sık aralıklarla ölçümler yapılabilir.
- b) Çay sektöründe daha yaygın olarak mikrodalga kurutmaya fırsat verilebilir.
- c) İleride kontrollü ve otomatik ölçümlü mikrodalga kurutucular geliştirilerek deneyler gerçekleştirilebilir.
- d) Akışı kolaylaştıracak özel tasarımlar geliştirilerek daha etkin sonuçlar elde edilebilir.



KAYNAKLAR

- Afzal, T.M., Abe, T., (2000). Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26 (2), 137–145.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Khani, S., Ghasemi, M., (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *International Agrophysics*, 23(4), 313–317.
- Ait, Mohamed L., Kouhila, M., Jamali, A., Lahsasni, S., Kechaou, N., Mahrouz, M., (2005). Single layer solar drying behavior of citrus aurantium leaves under forced convection. *Energy Conversion and Management*, 46(9–10), 1473–1483.
- Alaei, B., Dibagar, N., Chayjan, R. A., Kaveh, M., Taghinezhad, E. (2018). The effect of short and medium infrared radiation on some drying and quality characteristics of quince slices under vacuum condition. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 10(4), 371–381.
- Al-Hilphy, A. R., Gavahian, M., Barba, F. J., Lorenzo, J. M., Al-Shalah, Z. M., Verma, D. K. (2020). Drying of sliced tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) by a novel halogen dryer: Effects of drying temperature on physical properties, drying kinetics, and energy consumption. *Journal of Food Process Engineering*, Article e13624.
- Alibaş, İ., (2012). Asma yaprağının mikrodalga enerjisiyle kurutulması ve bazı parametrelerin belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi* 18, 43-53
- Batcha, M. F. M., Sulaiman, S. A., Raghavan, V. R. (2012). Hydrodynamics of oil palm frond in a swirling fluidized bed dryer. *Applied Mechanics and Materials*, 117–119, 1829–1833. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1829>
- Bingöl, G., Devres, Y. O., (2010). Üzümlerin mikrodalga kurutma eğrilerinin ve sıcaklık değişiminin matematiksel modellenmesi, *İTÜ Dergisi*, Cilt:9, Sayı:4, 63-71.
- Bozkurt, S., Altay, Ö., Koç, M., Kaymak Ertekin, F.(2020). Toz gıda proseslerinde akışkan yatak uygulamaları, *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, 8(4), 818-825, <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i4.818-825.2861>
- Cemeroğlu, B., (2018). Gıda Mühendisliğinde Temel İşlemler Kitabı, Başkent Kışematbaacılık, no:1, 4. Baskı, ISBN: 9786056341991, 442 s., 278-281.
- Çalhan, R., Kaya, D., Tulger, G., Eyidoğan, M. (2012). Organik gübre kurutma teknolojileri: Akışkan yataklı kurutucular, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt 53, sayı 634, s. 22-33
- Çınar, İ., (2006). Meyve ve sebzelerin kurutulması. *Akademik Gıda Dergisi*, 4(3), 32-34.
- Das, A., Banik, B. K. (2021). Foundational principles of microwave chemistry. In *Microwaves in Chemistry Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822895-1.00005-9>

- Decareau, V.R., (1992). Encyclopaedia of Food Science and Technology. Wiley, NewYork, USA 3, 1772-1778.
- Doğan, H., Ersöz, M. A. (2009). Akışkan Yatak Sürekli Kurutucuda Tuz Kurutulmasının Deneysel İncelenmesi, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13- 15 Mayıs, Karabük.
- Dong, J., Ma, X., Fu, Z., Guo, Y. (2011). Effects of microwave drying on the contents of functional constituents of *Eucommia ulmoides* flower tea. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 1102–1110. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.026>
- Doymaz, I., (2011). Drying of thyme and selection of a suitable thin-layer drying model. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(4), 458–465.
- Durance, T., Yaghmaee, P. (2011). Microwave Dehydration of Food and Food Ingredients. In *Comprehensive Biotechnology, Second Edition* (Second Edition, Vol. 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00306-8>
- Dündar, H., (2010). Bir vakumlu gıda kurutma sisteminin tasarımı ve imalatı, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, Türkiye, 76 s.
- Erbaş, O. (2007). Dolaşımli akışkan yatakta ısı transferi mekanizması ve bu mekanizmanın kuramsal ve deneysel analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 159 s.
- Eren, Ö. (2005). Mikrodalga kurutucuda maydanozun kurutulmasına yönelik bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 62s.
- Galema, S.A., (1997). Microwave chemistry. *Chem Society Reviews*, 26, 233-238.
- Giese, J., (1992). Advances in microwave food processing. *Food Technol*, 46 (9),118-123.
- Gölcü, M., Şen, F. (2014). Mikrodalga ile ıslak viyolin kurutulabilirliğinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 11-115.
- Günhan, T., Demir, V., Hancıoğlu, E., Hepbaşlı, A., (2005). Mathematical modeling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11–12), 1667–1679.
- Gür, M. (2016). Experimental and theoretical investigation of pumpkin drying in fluidized bed dryer. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(2), 145. <https://doi.org/10.17482/uujfe.84114>
- Gürel, A. E., Ceylan, İ., Aktaş, M. (2016). Meyve ve sebzelerin kurutma parametrelerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C Tasarım ve Teknoloji*, 4(4), 267–273.
- Gwarek, W.K. and Celuch-Marcysiak, M., (2004). A review of microwave powerapplications in industry and research. 15. *International Conference*, Poland,

22 November, 843-848.

- Huang, Y., Sheng, J., Yang, F., & Hu, Q. H. (2007). Effect of enzyme inactivation by microwave and oven heating on preservation quality of green tea. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 687–692. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.007>
- Jiang, J., Zhang, M., Devahastin, S., & Yu, D. (2021). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries. *Lwt*, 145(December 2020), 111300. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111300>
- Jun, G. J., Raghavan, V. R., & Sing, C. Y. (2012). Experimental study on the hydrodynamics of swirling fluidized bed. *Applied Mechanics and Materials*, 229–231, 756–760. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.756>
- Kaleta, A., Gornicki, K., Winiczenko, R., Chojnacka, A., (2013). Evaluation of drying models of apple dried in a fluidized bed dryer. *Energy Conversion and Management*, 67, 179–185.
- Kartal, A. S., (2011). Mikrodalga ve kuru hava yardımıyla kurutma yöntemlerinin meyve pestillerinin kuruma sürelerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 91 s.
- Kavak Akpınar, E., Midilli, A., Bicer, Y. (2005). Thermodynamic analysis of the apple drying process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E-Journal of Process Mechanical Engineering*, 219,1-14. <https://doi.org/10.1243/095440805x6991>
- Kavak Akpınar, E., Sarsılmaz, C., Yıldız, C., (2004). Mathematical modelling of a thin layer drying of apricots in a solar energized rotary dryer. *International Journal of Energy Research*, 28(8), 739–752.
- Kavak Akpınar, E., Midilli, A., Bicer, Y. (2005). Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer, *Energy Conversion and Management*, 46, 2530–2552. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.008>
- Kavak Akpınar, E. , Bicer, Y., Midilli, A. (2003). Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 26(6), 515–541.
- Konak, Ü.İ., Certel M. and Helhel, S., (2009). Gıda sanayisinde mikrodalga uygulamaları, *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4 (3), 20-31
- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., Dincer, İ., (2014). A review on thin-layer drying-curve equations, *Drying technology: An International Journal*, 32 (7), 757-773.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced Drying Technologies*. CRC press.456s.
- Kurtuluş, O. (2007). Akışkan yatakta kurutma prosesinin incelenmesi. Yüksek Lisans. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 54 s.

- Lechtanska, J.M., Szadzinska, J., Kowalski S.J. (2015), Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations, *Chemical Engineering and Processing* 98, 155–164.
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., C'arcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20–26.
- Menon, A. S., Mujumdar, A. S., (1989), Energy saving in the drying of solids, *Indian Chem. Eng.*, 14(2), 8–13.
- Midilli A., Olgun H., Ayhan T., (1999). Experimental studies on mushroom and pollendrying. *International Journal of Energy Research*, 23, 1143-1152.
- Midilli, A. , Kucuk, H. (2003), Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversation and Management*, 44(7), 1111-1122. [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(02\)00099-7](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(02)00099-7)
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying, *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513. <https://doi.org/10.1081/drt-120005864>
- Midilli, A., Kucuk, H., Kılıç, A., Dinçer, I. (2014). A review on thin-layer drying curve equations. *Drying Technology*. 32(7), 757-773.
- Milota, M. R., Wilson J. B. (1989). Engineering study on the drying of wood particles in a fluidized bed, A Thesis Submitted to Oregon State University, Corvallis, USA.
- Moradi, M., Azizi, S., Niakousari, M., Kamgar, S., Khaneghah, A. M. (2020). Drying of green bell pepper slices using an IR-assisted Spouted Bed Dryer: An assessment of drying kinetics and energy consumption. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102280. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102280>
- Moradi, M., Fallahi, M. A., Mousavi Khaneghah, A. (2020). Kinetics and mathematical modeling of thin layer drying of mint leaves by a hot water recirculating solar dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 43(1), Article e13181.
- Moradi, M., Niakousari, M., Mousavi Khaneghah, A. (2019). Kinetics and mathematical modeling of thin layer drying of osmo-treated Aloe vera (*Aloe barbadensis*) gel slices. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6), Article e13180.
- Mujumdar, A.S., Devahastin, S. (2000). Fluidized Bed Drying Technology, in Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying, Devahastin, S., Ed., Exergex Corporation, Montreal, chap. 5.
- Mujumdar, A.S. and Devahastin, S. (2003). Applications for fluidized bed drying, in *Handbook of Fluidization and Fluid Systems*, Yang, W.C., Ed., Marcel Dekker, New York, USA, Chap. 18.
- Mujumdar, A.S, Arun S., (2006). Handbook of industrial drying, *Crc Press 3. Edition*, 4-80.

- Özkan, İ., Akbudak, A. and Akbudak, N., 2007. Microwave Drying Characteristics of Spinach, *Journal of Food Engineering*, 78(2), 577–583. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.10.026.
- Polatçı, H. (2008). Farklı kurutma yöntemlerinin reyhan (*Ocimum basilicum*) bitkisinin kuruma süresine ve kalitesine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye, 49 s.
- Polatçı, H., Taşova, M. (2020). Sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu geliştirilmesine portakal kurutma performansının belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 131–138. <https://doi.org/10.21923/jesd.502465>
- Schiffmann, R. F., (2006). Handbook of industrial drying, *Crc Press 3. Edition*, 286-304.
- Singh, A., Orsat, V., Raghavan, V. (2012). A comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food and bioprocessing. *Drying Technology*, 30(16), 1812–1820.
- Sivakumar, R., Saravanan, R., Elaya Perumal, A., & Iniyan, S. (2016). Fluidized bed drying of some agro products - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 280–301. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.014>
- Soares, R.D., Chaves, M.A., Bonomo, R.C.F., Da Silva, N.J., Babic, M., (2007). The selection criteria of the best matemathics model for basil (*Ocimum Basilicum*, L.). *Drying technology: An International Journal*, 11(4), 161–165.
- Soysal, Y., Ayhan, Z., Eştürk, O. (2009). Mikrodalga ile Meyve ve Sebze Kurutmada Enerji Kullanım Verimliliği ve Ürün Kalitesinin Arttırılmasında İleri Kurutma Tekniklerinin Uygulanması Üzerine Araştırmalar. TÜBİTAK Proje No:105 O 547, s.136, Antakya, HATAY.
- Şimşek, M. (2018). Bazı sebze ve meyvelerin mikrodalga kurutma davranışının deneysel araştırılması ve matematiksel modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 99 s.
- Şimşek, M., Kucuk, H., Midilli, A. (2021). Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Microwave Thin Layer Drying Behaviour of Apricot, Kiwi and Mint Leaves, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 2(2), 13-35. Doi: 10.53501/rteufemud.969314
- T.C. Resmi Gazete, (2015). Sayı : 29389. Türk Gıda Kodeksi Çay Tebliği (Tebliğ No: 2015/30) Ek-1 Fiziksel ve Kimyasal Özellikler
- Temel, S. (2017). Soğuk akışkan yatak ile yapılan kurutma proseslerinde ısı ve kütle transferinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 42 s.
- Teymur, N., (1999). Maydanoz ve Dereotunun Kurutulması ve Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 74 s.

- Thostenson, E.T. and Chou, T.W. (1999). Microwave Processing: Fundamentals and Applications. *Composites: Part A*, Vol.30; 1055–1071,
- Toğrul, İ .T., Pehlivan, D., (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 413–425.
- Uslu, M.K. ve Certel, M., (2006). Dielektrik ısıtma ve gıda işlemede kullanımı, *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3, 1-69.
- Ünver Alçay, A, Yalçın, S, Bostan, K, Dinçel, E. (2015). Orta Asya'dan Anadolu'ya kurutulmuş gıdalar. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 40, 83-93
- Üstün, Ç., Demirci, Ç., (2013). Çay bitkisinin (*Camellia Sinensis* L.) tarihsel gelişimi ve tıbbi açıdan değerlendirilmesi. *Lokman Hekim Journal*, 3(3), 5-12.
- Vadivambal, R. and Jayas, D.S. (2007). Changes in Quality of Microwave-treated agricultural products-a review. *Biosystems Engineering*, Vol.98; pp. 1-6.
- Venkatesh, M.S. and Raghavan, G.S.V., (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosyst Engineering*, 88 (1), 1-18.
- Venkateswaran, V. K., Sulaiman, S. A., Raghavan, V. R. (2013). Comparative study of the hydrodynamic performance of shorter and longer blades in a swirling fluidized bed. *Advanced Materials Research*, 772, 560–565.
- Yağcıoğlu, A., (1999). Tarım ürünleri kurutma tekniği, *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, I. Basım, No. 536, 348 s., 152-250.
- Yang, W.C. (2003). Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, Marcel Dekker, 878 s.
- Yoğurtçu, H., (2013). Mikrodalga fırında limon kurutma: Kinetiği ve modellenmesi, *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi Fırat Univ. Journal of Engineering* 26 (1), 27-33.
- Yudin, A. S. M., Raghavan, V. R., Narahari, M. (2011). A mathematical model for residence time distribution analysis in swirling fluidized bed. *2011 National Postgraduate Conference - Energy and Sustainability: Exploring the Innovative Minds, NPC 2011*, (Figure 2), 1–5. <https://doi.org/10.1109/NatPC.2011.6136392>
- Yurdagel, Ü., Baysal, T. ve Hepçimen, A.Z., (1994). Gıda işlemede mikrodalga enerji, II. *Gıda Mühendisliği Kongresi*, Gaziantep, 21-23 Eylül, 294.
- Zulkarnain, M. A., Shahrman, M. K., Yudin, A. S. M. (2020). Experimental study of drying characteristics of cocoa bean in a swirling fluidized bed dryer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012048>