

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÖNMELİ AKIŞLI AKIŞKAN YATAKLI KIZILÖTESİ IŞINIMLI
YEŞİL ÇAY KURUTMA İŞLEMİNİN MATEMATİKSEL
MODELENMESİ

Özge OKUR

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK

II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ

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

RİZE-2022
Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DÖNMELİ AKIŞLI AKIŞKAN YATAKLI KIZILÖTESİ İŞINIMLI YEŞİL
ÇAY KURUTMA İŞLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK ve Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ danışmanlığında, Özge OKUR tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararı ile oluşturulan jüri tarafından 01/02/2022 tarihinde Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

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

Doç. Dr. Ahmet YANIK
ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Dönmeli Akışlı Akışkan Yataklı Kızılötesi Işınımlı Yeşil Çay Kurutma İşleminin Matematiksel Modellenmesi başlıklı tez konumu öneren, bu çalışmanın hayata geçirilmesinde değerli bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren, çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK’e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Fikirleri ile çalışmamıza katkı sağlayan ikinci danışman hocam Sayın Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ’ye şükranlarımı sunarım.

Yeşil çay kalite analizlerini gerçekleştiren Atatürk Çay ve Bahçe Kùltürleri Araştırma Enstitüsüne ve Rize Çay Araştırma ve Uygulama Merkezi’ne teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, sahip olduğum için kendimi çok şanslı hissettiğim başta annem Uğur OKUR’a, babam Mehmet OKUR’a, ablam ve kardeşime, destek ve yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Özge OKUR

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Dönmeli Akışlı Akışkan Yataklı Kızılötesi Işınımlı Yeşil Çay Kurutma İşleminin Matematiksel Modellenmesi” 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. 15/02/2022

İmza

Özge OKUR

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 KIZILÖTESİ IŞINIMLI YEŞİL ÇAY KURUTMA İŞLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Özge OKUR

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

Bu çalışmada, yeşil çayın sabit yatak ve dönmeli akışlı-akışkan yataklı-kızılötesi ışınlı kurutucularda kurutma davranışları deneysel olarak incelendi ve matematiksel modellemesi gerçekleştirildi. Kurutma deneyleri 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W kızılötesi ışınlı güç değerlerinde yapıldı ve kuruma sürelerine bağlı olarak kütle kayıpları ölçüldü. Boyutsuz kütle oranı, nem içeriği, kütleli büzülme oranı ve kurutma hızı zamana ve kütle kaybına bağlı olarak hesaplandı. Yeşil çayın kızılötesi ışınlı sabit ve dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutuculardaki ince tabaka kurutma davranışını tahmin etmek için 22 adet model denklem kullanılarak matematiksel modelleme yapıldı. Modellerin karşılaştırılması için 14 farklı değerlendirme kriteri kullanıldı ve en iyi model belirlendi. Ayrıca, kurutulan yeşil çay numuneleri için su ekstraktı, toplam kül, toplam polifenol, kafein, ham selüloz ve rutubet tayini yapıldı.

Sonuç olarak, sabit ve dönmeli akışlı akışkan yatak için en uygun güç değerlerinin sırasıyla 750W ve 500W, en iyi kurutma modelinin ise Midilli-Kucuk ve Aghbashlo vd. olduğu belirlendi. Kalite parametrelerinden su ekstraktının en yüksek değeri ise sabit yatakta 750 W için % 36,06 ve dönmeli akışlı akışkan yatak 500 W için % 44,04 olarak elde edildi.

2022, 104 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yeşil Çay, Kızılötesi Işınım Kurutma, Akışkan Yatak, Matematiksel Modelleme, Gıda Kalitesi

ABSTRACT

MATHEMATICAL MODELING OF SWIRLING FLOW FLUIDIZED BED INFRARED GREEN TEA DRYING PROCESS

Özge OKUR

**Recep Tayyip Erdogan 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, the drying behavior of green tea in the stationary bed and swirling flow-fluidized bed-infrared driers were experimentally investigated and mathematical modeling was performed. Drying experiments were done for 100 W, 250 W, 500 W, 750 W and 1000 W infrared powers, mass losses were measured depending on drying time. Dimensionless mass ratio, moisture content, mass shrinkage rate, drying rate were calculated depending on mass loss and time. Mathematical modeling was performed by using 22 model equations to estimate the thin layer drying behavior of green tea in the stationary bed and swirling flow-fluidized bed-infrared driers. To compare the drying models 14 evaluation criteria were used and the best model was determined. In addition, water extract, total ash, total polyphenols, caffeine, raw cellulose and moisture were determined for dried green tea samples.

As a result, it was determined that the best suitable powers were 750 W and 500 W and the best drying models were Midilli-Kucuk and Aghbashlo et al. for stationary bed and swirling flow-fluidized bed, respectively. The highest value of water extract included quality parameters was obtained 36.06% at 750 W in stationary bed and 44.04% at 500 W swirling flow-fluidized bed.

2022, 104 pages

Keywords: Green Tea, Infrared Drying, Fluidized Bed, Mathematical Modeling, Food Quality

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
1.2. Literatür Özeti	2
1.3. Çayın Yapısı ve Bitkisel Özellikleri.....	11
1.3.1. Çayın Yapısı.....	11
1.3.2. Çayın Bitkisel Özellikleri.....	12
1.4. Kurutma	14
1.5. Kurutmanın Amacı	17
1.6. Kurutucu Türleri.....	18
1.7. Kurutma Yöntemleri.....	18
1.7.1. Doğal Kurutma	18
1.7.2. Yapay Kurutma	19
1.8. Kızılötesi Işınımlı Kurutma	19
1.8.1. Genel Bilgiler	19
1.8.2. Kurutma Mekanizması.....	22
1.8.3. Kızılötesi Işınımlı Kurutma Tekniğinin Diğer Konveksiyonel Kurutuculara Göre Avantajları.....	23
1.9. Akışkan Yataklı Kurutma	23
1.9.1. Akışkanlaştırmanın Tanımı	23
1.9.2. Minimum Akışkanlaşma Hızı	24
1.9.3. Akışkan Yataklı Kurutucu	25
1.9.3.1. Dönmeli Akışlı Akışkan Yataklı Kurutucular.....	26
1.9.4. Akışkan Yataklı Kurutucuların Sınıflandırılması.....	28
1.9.5. Akışkan Yataklı Kurutucuların Avantajları ve Dezavantajları	28

1.10. Kurutma Hızını Etkileyen Faktörler	30
1.10.1. Sıcaklık.....	30
1.10.2. Kurutma Havaının Hızı	31
1.10.3. Kurutulan Gıdanın Yüzey Alanı.....	31
1.10.4. Ortamın Nem İçeriği.....	31
1.11. Çalışmanın Önemi ve Amacı	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	34
2.1. Materyal	34
2.2. Yöntem.....	35
2.2.1. Deney Seti	35
2.2.2. Çalışmada Kullanılan Ölçüm Aletleri.....	39
2.2.3. Yeşil Çay Kurutma Yöntemi.....	41
2.3. Matematiksel Modelleme.....	41
2.4. Değerlendirme Kriteri.....	43
2.5. Kalite Parametreleri.....	45
2.6. Kurutma Formülleri.....	46
2.7. Hata ve Belirsizlik Analizi.....	47
3. BULGULAR	49
3.1. Sabit Yatakta Yeşil Çay Kurutma	49
3.2. Dönmeli Akışlı Akışkan Yatakta Yeşil Çay Kurutma.....	62
3.3. Sabit Yatak ve Dönmeli Akışlı Akışkan Yatak Kurutma Bulgularının Karşılaştırılması	76
4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR	81
5. ÖNERİLER.....	93
KAYNAKÇA.....	94
ÖZGEÇMİŞ	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Çay yaprakları.....	13
Şekil 2. Kızılötesi ışıının elektromanyetik spektrumdaki yeri	21
Şekil 3. Kızılötesi ışıının yansıtılması, absorblanması ve iletilmesi.....	21
Şekil 4. Akışkan yatakta akışkanlaşma evreleri.....	24
Şekil 5. Akışkan yataklı kurutucuların sınıflandırılması.....	28
Şekil 6. Çalışmada kullanılan yeşil çay örneği.....	34
Şekil 7. Deney düzeneğinin genel görünüşü	35
Şekil 8. Deney sırasında alınan görüntüler.....	36
Şekil 9. Sabit yatak kurutma sistemi şeması.....	37
Şekil 10. Dönmeli akışlı akışkan yatak kurutma sistemi şeması	38
Şekil 11. Çalışmada kullanılan ölçüm cihazları (a) Terazî (b) Sıcaklık-Nem ölçüm (c) Elektrik panosu (d) Kademeli adaptör (e) Ölçüm ayar cihazı (f) Akış hızı probu (g) Debi ölçer (h) Nem ayar cihazı	39
Şekil 12. Yeşil çay 100 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	51
Şekil 13. Yeşil çay 250 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	53
Şekil 14. Yeşil çay 500 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	55
Şekil 15. Yeşil çay 750 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	57
Şekil 16. Yeşil çay 1000 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	59
Şekil 17. Yeşil çay 100 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	64
Şekil 18. Yeşil çay 250 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	66
Şekil 19. Yeşil çay 500 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	68
Şekil 20. Yeşil çay 750 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	70
Şekil 21. Yeşil çay 1000 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiğı	72
Şekil 22. Sabit yatakta farklı kızılötesi güçlerde yeşil çayın kurutma hızı-zaman grafiğı	76
Şekil 23. Akışkan yatakta farklı kızılötesi güçlerde yeşil çayın kurutma hızı-zaman grafiğı	77
Şekil 24. Sabit yatakta farklı kızılötesi güçlerde nem içeriğı- zaman grafiğı.....	78
Şekil 25. Akışkan yatakta farklı kızılötesi güçlerde nem içeriğı- zaman grafiğı.....	78
Şekil 26. Sabit yatakta farklı kızılötesi güçlerde kütle büzölme oranı- zaman grafiğı ...	79

Şekil 27. Akışkan yatakta farklı kızılötesi güçlerde kütle büzülme oranı – zaman grafiği	
.....	80



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bir fincan yeşil ve siyah çayda bulunan bileşenlerin oranları	12
Tablo 2. Bazı besinlerin kurutma sıcaklıkları ve kurutma süreleri	15
Tablo 3. Bir konvektif kurutucuda tipik enerji tüketiminin dağılımı	16
Tablo 4. Değişik kurutucu tipleri için kurutma etkinlikleri	16
Tablo 5. Minimum akışkanlaşma hızı korelasyonları	25
Tablo 6. Matematiksel modellemede kullanılan model denklemleri	42
Tablo 7. Matematiksel modelleme kuruma eğrisi değerlendirme kriteri denklemleri ...	44
Tablo 8. 100 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	50
Tablo 9. 250 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	52
Tablo 10. 500 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	54
Tablo 11. 750 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	56
Tablo 12. 1000 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	58
Tablo 13. Sabit yatak kızılötesi ışınlı kurutma deneyleri için alınan görüntüler ve en iyi modeller	60
Tablo 14. Sabit yatakta kurutulan çay numunelerinin kalite analiz sonuçları	62
Tablo 15. 100 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	63
Tablo 16. 250 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	65
Tablo 17. 500 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	67
Tablo 18. 750 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	69
Tablo 19. 1000 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri	71
Tablo 20. Akışkan yatak kızılötesi ışınlı kurutma deneyleri için alınan görüntüler ve en iyi modeller	73
Tablo 21. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan çay numunelerinin kalite analiz sonuçları.....	75

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

R^{-2}	Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı
R^2	Belirleme Katsayısı
aw	Su Aktivitesi
Bi	Biot Sayısı
DR	Kurutma Hızı
EF	Modelleme Verimliliği
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
m	Ağırlık (kg, gr)
MID-IR	Orta Dalga Boyu Kızılötesi ışıınım
M_e	Kuru Kütle (kg)
MR	Boyutsuz Kütle Oranı
M_{ilk}	Ürünün İlk Kütlesi
M_t	“t” Anındaki Kütle (kg)
MW	Mikrodalga
NIR	Kısa Dalga Boyu Kızılötesi ışıınım
POTAS	Potasyum Karbonat
R	Korelasyon Katsayısı
residuals	Residuals
RMSE	Ortalama Karesel Hata
RSS	Kalanların Kareleri Top
RSSE	Azaltılmış Toplam Karesel Hata
S_{mr}	Kütle Büzülme Oranı
SEE	Standart Tahmini Hata
SMBS	Sodyum Metabisülfid
SST	Toplam Kareler Toplamı
T	Sıcaklık (°C)
T	Zaman (s, dak)
TBA	Tiyobarbitürik Asit
TPA	Tekstür Profil Analizi
V	Hız (m/s)

W_{ilk}	İlk Nem
W_R	Nem Oranı
W_r	Toplam Hata
W_s	Son Nem
W_t	“t” Anındaki Nem
y.y.	Yüz Yıl
χ^2	Azaltılmış ki Kare



1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gıdaların uzun vadede temiz ve güvenilir bir şekilde saklanması için kurutma işlemi, insanın var oluşundan günümüze dek kullanılan bir yöntemdir. Hızla büyüyen insan nüfusu, zorunlu göçler ve savaşlar gibi birçok farklı etmen kurutma yöntemlerinin gelişmesini sağlamıştır (Şimşek, 2018). Gıdaların muhafaza edilmesindeki temel amaç mikroorganizmaların kontrol altına alınması ve uzaklaştırılması, enzimatik reaksiyonların engellenmesi ve su aktivitesinin kontrol altına alınması olarak sıralanabilir (Arslan, 2012; Sakare vd., 2020).

Kurutma; bir ürün içerisinde bulunan suyun belli yöntemler kullanılarak uzaklaştırılması işlemidir (Ren vd., 2021). Kurutma işleminde madde içinde bulunan nem, farklı metotların kullanımı ile istenilen kuruluk değerine düşürülür. Geçen belli bir zamanda ürünün istenilen kuruma değerlerinin elde edilmesini sağlayan ve ısıtma, buharlaştırma, nem alma vb. birimlerin bütünü oluşturana sisteme kurutma sistemi denilmektedir. Kurutma, endüstriyel uygulamaların hemen hemen her yerinde var olmaktadır. Tekstil, deri ve kereste sanayi, kimya, seramik, kağıt, maden ve gıda gibi endüstri dallarındaki kullanımı yaygındır (Gürel vd., 2017).

Kurutma işleminde ürünün kalitesine bir zarar vermeden olabilecek optimum seviyede ısı ve kütle transferini gerçekleştirmek, maksimum derecede kurutma hızını elde etmek oldukça önemlidir (Delfiya vd., 2021). Sistemlerin çevreye olan etkisinin de en az seviyede tutulması önem arz eden bir başka faktördür (Doğan, 2020).

Günümüzde tepsili kurutucular, tünel kurutucular, spreyci kurutucular, vakumlu kurutucular, dondurmalı kurutucular, akışkan yataklı kurutucular, kızılötesi ışınlı kurutucular, mikrodalga kurutucular gibi çeşitli kurutucular gıdanın yapısına ve istenilen özelliklere göre kurutma amacıyla kullanılmaktadır.

Konveksiyonel çeşidi olan akışkan yataklı kurutucular kurutma işlemini, yüksek hız ve sıcaklıktaki kurutucu havayla teması ve ürünün geniş yüzey alanına nüfuz etmesi ile homojen bir şekilde gerçekleştirir. Kurutma sırasında ısının gıdadaki olumsuz etkilerini azaltarak yanmayı önlemesi gibi önemli bir avantaj içerir (Çınar, 2014; Bölek, 2020).

Gıdaların yüksek sıcaklıklarda kısa zamanda kurummasına olanak sağlayan bir başka yöntem kızılötesi ışınlı kurutmadır. Kızılötesi ışınlı, elektromanyetik spektrumda mikrodalga ile görünür ışık bölgelerinin arasında yer alan bir ışınlı çeşididir. Kızılötesi ışınlı yoluyla çevredeki havanın ısıtmadan direkt olarak ürüne aktarmasından dolayı hızlı bir ısı transferi sağlanır. Kızılötesi ışınlı kurutma, geleneksel yöntemlere göre hızlı kurutma süresi, ekonomik ve yüksek kalitedeki son ürün avantajlarına sahiptir (Albayrak vd., 2021).

1.2. Literatür Özeti

Polatçı (2008), yaptığı çalışmada reyhan bitkisini farklı kurutucu türlerinde ve farklı kurutma koşullarında kurutmuştur. Etüvde kurutma, gölgede kurutma, güneşte kurutma, doğrudan değmeli kurutucu ve mikrodalgada kurutma olmak üzere beş tane kurutma yöntemi kullanmıştır. Kurutma performansları, kalite özellikleri ve etken madde içeriklerinin karşılaştırılmasını amaçlamıştır. Yaptığı çalışma neticesinde kullandığı farklı kurutma yöntemlerinin etkilerini, kurutma yöntemlerinin birbirleri arasındaki üstünlüklerini ve olumsuzluklarını belirtmiştir. Kurutma denemelerindeki elde ettiği verilere göre renk analizi, matematiksel modelleme ve uçucu yağ analizini yapmıştır.

Arslan (2012), bir gıda ürünü olan mantıyı kızılötesi ışınlı kurutucuda kurutmuştur. Yaş mantı örneklerinin ilk nem içeriği %35'tir. Ve yaptığı kurutma işlemi denemelerinde nem seviyesini %12'ye kadar tutmuştur. Manti kurutma işlemi denemelerini 300 W, 400 W, 500 W ve 1000 W olan 4 farklı kızılötesi ışınlı gücü ve 2 farklı dalga boyu uygulanması şeklinde gerçekleştirmiştir. Kurutma işlemi denemelerini 1 m/s hava hızında 2 tekerrür olarak gerçekleştirmiştir. Kurutma denemelerinde en kısa kurutma süresini kısa dalga boyu kızılötesi ışınlı (NIR), 1000 W güç değerinde 40,5 dakika olarak elde etmiştir. En uzun kurutma süresini ise orta dalga boyu kızılötesi ışınlı (MID-IR), 300 W güç değerinde 162 dakika olarak elde etmiştir. Çalışmada ayrıca mantı örneklerinde su aktivitesi, hacim artışı, su absorpsiyonu, renk, protein tayini gibi kalite özelliklerini de incelemiştir.

Batman (2016), yaptığı bu çalışmada pastırmanın kurutma aşamalarının en uzun olanı terli kurutma aşamasında kızılötesi ışınlı kurutma metodunu kullanarak üretim süresinin daha kısa sürede tamamlanmasını amaçlamıştır. Ve akabinde, kızılötesi ışınlı

kurutma tekniğinin ürünün üzerindeki mikrobiyolojik, fizikokimyasal ve duyu kalitesinin etkilerini araştırmıştır. Yaptığı çalışmada üç farklı kurutma yöntemi ve iki farklı tür etten üretilen numunelerde; % protein, % yağ, % tuz, % nem, pH, su aktivitesi (a_w), nitrit, Tekstür Profil Analizi (TPA), renk ve Tiyobarbitürik Asit (TBA) parametrelerini incelemiştir. Çalışmada, kızılötesi ışınlı kurutma yöntemiyle üretilmiş olan pastırmayı renk, görünüm, lezzet gibi duyu özellikler açısından karşılaştırdığında diğer yöntemlerle üretilenlerden daha iyi sonuç almıştır. Diğer yöntemlere nazaran kızılötesi ışınlı kurutma metoduyla kurutulan pastırmanın daha hızlı kuruduğu sonucuna varmıştır.

Temel (2017), yapmış olduğu bu çalışmada akışkan yataklı bir sistemde kurutma işlemini gerçekleştirmiştir. Deneyde yeşil mercimeği kurutmuştur. Soğuk akışkan yatak ile yaptığı kurutma prosesinde yeşil mercimeğin akışkanlaşma hızını hesaplamıştır. Mercimeğin minimum akışkanlaşma hızını 0,82 m/s, akışkan yatak basınç düşümünü ise 530 Pa olarak belirlemiştir. Bir başka çalışmada Ekinci (2016), farklı bir akışkan yatak sistemi olan güneş enerjili havalı kolektörlü akışkan yataklı bir kurutucuyu tasarlamış ve deneysel olarak incelemiştir. Sistemi deneysel olarak incelemesinde materyal olarak kızılcık, muşmula ve karayemiş ürünlerinin kuruma parametrelerini incelemiştir.

Yaşar (2019); Öztürk Erdem (2018); Selçuk (2019); Özen (2016); Karaosman (2019), yaptıkları ayrı ayrı çalışmalarda; kurutma için farklı materyaller seçip, belirledikleri farklı kurutma yöntemleriyle örneklerini kurutmuşlardır. Kurutma denemelerini farklı sıcaklıklarda gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri verilere göre kurutma karakteristiklerini belirlemişlerdir. Elde ettikleri denemelere ait verilere farklı matematiksel modeller kullanıp istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Analiz sonucunda verilere göre modellerin uygunluğunu değerlendirmişlerdir.

Han (2019) bu çalışmada materyal olarak istiridye mantarı ve kültür mantarını kullanmıştır. Kültür ve istiridye mantarının kuruma özellikleri, kuruma süresi ve kalite parametreleri üzerine kızılötesi ısıtım gücünün ve hava hızının etkilerini araştırmıştır. İstiridye mantarı ve kültür mantarını kurutmasında 1 m/s, 1,5 m/s ve 2 m/s olan üç farklı hava hızı ve 300 W, 400 W ve 500 W olan üç farklı kızılötesi ısıtım gücünü belirlemiştir. Sürekli ve kesikli ısıtma moduyla mantarın kurutma denemelerini gerçekleştirmiştir. Kurutma deneylerinde elde ettiği en kısa kurutma süreleri, İstiridye mantarı için ısıtıcının devamlı olarak çalıştığı 500 W kızılötesi ısıtım gücü ve 1 m/s hava hızında olan 96 dakika

kültür mantarı için ise ısıtıcının devamlı olarak çalıştığı 500 W güç ve 2 m/s hava hızında 174 dakika olarak belirlemiştir.

Şahin (2019), materyal olarak seçtiği enginar örneklerine, belirlediği çeşitli ön işlemler ile üç farklı kurutma metodu uygulamıştır. Kuruttuğu enginar örneklerinin antioksidan aktivitelerini ve fizyolojik değişimlerini incelemiştir. Çalışmada taze enginar kalbinde titrasyon asitliği, pH, toplam kuru madde analizlerini yapmıştır. Kurutulmuş enginar kalbi örneklerinin kurutma karakteristiklerini 5 farklı matematiksel modelleme yöntemi ile belirlemiştir. Kurutma işlemi boyunca deneysel olarak belirlediği nem oranındaki azalmayı yaptığı matematiksel modellemeler sonucunda elde ettiği verilere göre tüm kurutma sıcaklıklarında Page ve Modifiye Page modellerinin en uygun olduğunu tespit etmiştir.

Altunkanat (2019), taze pırasalara (*Allium porrum* L.) suda haşlama ve tuzlu suda haşlama ön işlemlerini uygulamış ve iki farklı kurutma yöntemi ile kurutma işlemini gerçekleştirmiştir. Pırasa örneklerine su aktivitesi (aw), nem, rehidrasyon, toplam fenolik madde, askorbik asit, pH, titre edilebilir toplam asitlik ve duyu analizi uygulamıştır. Tepsili kurutucuda kuruttuğu örneklerin kontrol, suda haşlama ve tuzlu suda haşlama pırasa gruplarının rehidrasyon oranları sırasıyla 4,2, 5,6 ve 5,3 olduğunu, mikrodalga kurutucuda kuruttuğu bu grupların rehidrasyon oranlarının ise sırasıyla 4,7, 4,9 ve 4,7 olduğunu belirlemiştir. Nem oranı %5-10 aralığına, su aktivitesi 0,3-0,4 aralığına ulaştığında kurutma işlemini sonlandırmıştır.

Uz (2019), kurutacağı kıvılcık meyvesine ön işlem uygulayarak ve uygulanmadan kabin kurutucuda üç farklı sıcaklık olan 55°C, 65°C ve 75°C'deki kurutma havası sıcaklıklarında ve kıvılcık ışınlı kurutucuda 75 W, 88 W ve 104 W gücünde gerçekleştirdiği kurutma çalışmalarından elde ettiği verilerden yararlanarak kurutma işleminin kurutma kinetiğini belirlemeye çalışmıştır. Yaptığı çalışma boyunca meyvelerin başlangıç nem oranı olan %70,17'nin %10'a inmesini sağlamıştır. Kıvılcığın kurutma kinetiğini incelemiş, efektif difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjisi değerlerini hesaplamıştır. Kurutma işleminin azalan hız periyodunda gerçekleştiğini ve kurutma davranışını en iyi açıklayan modelin Midilli-Kucuk olduğunu belirlemiştir. En kısa kurutma süresinin, 75°C sıcaklıktaki Potas grubu kıvılcık örneklerinde 360 dakika olduğunu en uzun kurutma süresinin ise 55°C sıcaklıktaki Kontrol grubu kıvılcık örneklerinde 1320 dakika olduğunu saptamıştır.

İşsever (2019), materyal olarak zencefil seçmiştir. Zencefil dilimlerini kurutması için kızılötesi ışınlı kurutucu ve sıcak havalı kabin kurutucu olmak üzere iki farklı kurutucu kullanmıştır. Ön işlem uygulamadan ve farklı ön işlemler uygulayarak zencefilleri 50 W, 62 W, 74 W, 88 W ve 104 W beş farklı güç seviyesindeki kızılötesi ışınlı kurutucuda ve 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C olan dört farklı sıcaklıktaki bir kabin kurutucuda kurutmuştur. Uyguladığı ön işlemler: potas çözeltilisi, sitrik asit çözeltilisi ve haşlamadır. Zencefil dilimlerinin kurutma davranışlarını en iyi ifade eden model olarak Midilli-Kucuk modelini belirlemiştir. Efektif difüzyon katsayılarını $3,823 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ile $1,483 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında, aktivasyon enerjilerini ise 17,35-27,04 kJ/mol olarak hesaplamıştır.

Engür (2019), materyal olarak kültür mantarı dilimlerini kullanmıştır. Kültür mantarı dilimlerini sıcak hava üfleli kurutucu içerisinde üç farklı sıcaklık olan 45°C, 55°C, 65°C ve 75°C’de ve 2 m/s hava hızında kurutmuştur. Bunun haricinde mantar dilimlerini 62 W, 74 W, 88 W ve 104 W farklı kızılötesi ışınlı güçlerinde bir kızılötesi ışınlı kurutucuda kurutmuştur. Farklı matematiksel modeller kullanarak modelleme çalışmalarını gerçekleştirmiştir.. Sıcak hava üfleli kabin kurutucudaki kontrol grubu örneklerinin 45°C, 55°C, 65°C ve 75°C’de kuruma sürelerini sırası ile 705, 540, 420 ve 315 dakika olarak bulmuştur. Kızılötesi ışınlı kurutucudaki kontrol kodlu kurutma grubu örneklerinin 62 W, 74 W, 88 W ve 104 W güç seviyelerinde kuruma sürelerini sırası ile; 300, 240, 210 ve 195 dakika olarak bulmuştur.

Aksoy (2019), kıyma numunelerini farklı kurutma teknikleriyle kurutmuştur. Tüm ölçümleri üç tekrarlı olarak gerçekleştirmiştir. Kullandığı tüm kurutma metotları için kuruttuğu kıymaların rehidrasyon oranını, büzülme, renk, mikroyapısal özelliklerini, peroksit değerini ve uçucu bileşenlerini incelemiştir. Elde ettiği veriler sonucunda kurutma yöntemlerinin ve kurutma sıcaklığının, kıymanın kuruma süresinin ve kalite özelliklerinin üzerindeki önemli etkilerinin olduğunu saptamıştır.

Öztürk (2014), kivi ve muz meyvesini üç farklı mikrodalga gücü (MW) ve mikrodalga-kızılötesi ışınlı kombinasyonu ile kurutmuştur ve kurutma karakteristiklerini incelemiştir. Örneklere 180 W, 270 W ve 360 W olan üç farklı mikrodalga gücü ve 560 W mikrodalga gücü- 600 W üst halojen- 600 W alt halojen olan mikrodalga-kızılötesi ışınlı kombinasyonunu uygulamıştır. Nem değişimi değerlerini 2 tekerrürün ortalamasını alarak hesaplamıştır. Son nem içeriği kivi örnekleri için kuru

bazda 0,176 kg su/kg kuru madde ve muz örnekleri için kuru bazda 0,05 kg su/kg kuru madde olduğunda kurutma işlemini durdurmuştur.

Karaca (2019), yaptığı çalışmada kuru hünnap meyvesinden çeşitli kurutma koşulları altında pestil üretmiştir. Farklı kurutma ortamlarında ürettiği hünnap pestillerinin fizikokimyasal ve duyuşal özelliklerini araştırmıştır. Hünnap meyvesinde nem oranını %9,12 olarak saptamıştır. Pestil örneklerinde ise nem değerlerinin ortalama %8,44-9,10 olarak değiştiğini belirlemiştir. Pestil örneklerinde su aktivitesi değerlerini ortalama 0,408-0,561 olarak değiştiğini saptamıştır. Örneklerde renk değerlerini ortalama olarak 14,44-34,43 bulmuştur.

Taştekinoğlu (2019), materyal olarak çekirdeksiz üzüm kullanmıştır. Çekirdeksiz üzümler, Potasyum Karbonat (POTAS), Sodyum Metabisülfite (SMBS), ikisinin karışımı olan (POTAS+SMBS) ön işlemini uygulayarak ve ön işlemsiz uygulamalardan sonra 55°C, 60°C ve 70°C olan farklı sıcaklıklardaki kabin kurutucuda ve 62 W, 75 W, 88 W, 104 W ve 125 W olan farklı kızılötesi ışıyım güçlerindeki kızılötesi ışıyımlı kurutucuda kurutmuştur. Çekirdeksiz üzümlerin kurutma işlemlerine nem içeriği %20'ye düşünceye kadar devam etmiştir. Farklı kurutma modellerini kullanarak matematiksel modelleme çalışmalarını yapmıştır. Kurutma davranışını en iyi açıklayan modelin Midilli-Kucuk olduğunu tespit etmiştir.

Şimşek (2018), materyal olarak kivi, kayısı ve nane kullanmıştır. 100 W, 300 W, 450 W, 600 W, 700 W ve 800 W olan farklı mikrodalga güçlerinde örnekleri kurutarak oluşan kütle kayıplarını belirlemiş ve kuruma sürelerini ölçmüştür. Elde ettiği bu verilere dayanarak boyutsuz kütle oranını, nem oranını, kurutma hızını ve kütleşel büzölme oranını hesaplayıp renk değişimlerini gözlemlemiştir. Elde ettiği verilere göre kurutma hızı, nem kaybı ve kütleşel büzölme oranının en yüksek değerinin nanede ardından kivi ve sonrasında kayısıda olduğunu tespit etmiştir. Mikrodalga kurutma davranışını tahmin etmek için 23 adet model denklem kullanarak matematiksel modelleme yapmıştır. Modelleme sonucunda elde ettiği denklemleri kıyaslamak için 14 farklı değerlendirme kriterini kullanmıştır. Kayısı, nane ve kivi için en iyi beş kurutma modelini belirlemiştir.

Dağcı (2014), yaptığı bu araştırmada materyal olarak kivi meyvesini kullanmıştır. İlk olarak kivi örneklerini ozmotik yöntem ve akabinde tepsili kurutucu ile kısmen kurutmuştur. Ardından kivi örneklerini akışkan yataklı kurutucuda sıcak hava ile kurutma ve akışkan yatak+kızılötesi dalga kombinasyonunu uygulayarak kurutma işlemini

gerçekleştirmiştir. Sıcak hava ile kurutmadaki kurutma işlemini 10 m/s sabit hava hızında ve 50°C, 60°C ve 70°C olan 3 farklı sıcaklıkta gerçekleştirmiştir. Sıcak hava + kızılötesi dalga kombinasyonu ile kurutmada ise kurutma işlemini 50°C, 60°C ve 70°C olan üç farklı hava sıcaklık düzeyinde, 10 m/s sabit hava hızında ve 187 W sabit kızılötesi ışıyım gücünde gerçekleştirmiştir. 50°C, 60°C ve 70°C sıcak hava+kızılötesi dalga kombinasyonu ile kurutma işleminin kuruma sürelerini sadece sıcak hava ile kurutma işlemine göre sırasıyla %42,69, %44,21 ve %29,73 oranında kısalttığını görmüştür.

Doğan (2020), materyal olarak seçtiği buğday için yapmış olduğu bir akışkan yatak kurutma düzeneği kurmuştur. Kurutma işlemini 70°C sabit hava sıcaklığında yapmıştır. Buğday kurutmada kullandığı akışkan yatak kurutuma sisteminin akış hidrodinamiğini hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları ile incelemiştir. Laboratuvar tipi akışkan yatak kurutucu ile kuruttuğu haşlanmış buğdayın kuruma esnasında zamana göre nem değişimini en iyi tahmin edecek matematiksel modelin bulunmasını amaçlamıştır. Literatürde ince tabaka kurutma olarak bilinen ve en yaygın kullanılan 10 farklı matematiksel modeli seçmiştir. Elde ettiği verilere göre yüksekliğin 0,1 m ve hızın 1,88 m/s olduğu durumda en uygun modellerin Verma ve Diffusion Approach diğer tüm durumlarda en iyi temsil eden modelin Logarithmic olduğunu belirlemiştir.

Ersöz ve Doğan (2010), bir akışkan yataklı sürekli kurutucu tasarımı yapmışlardır. Materyal olarak göl tuzunu seçmişlerdir. Kullandıkları göl tuzuna, üç çeşit kurutma havası sıcaklığında 90 dakika süreyle kurutma işlemi uygulamışlardır. Elektrikli ısıtıcıda, 1. kademe 4920 W, 2. kademe 7380 W ve 3. kademe 10250 W olmak üzere üç kademe kullanmışlardır. Tüm kurutma süreçlerinde sabit tutulan kurutma havası hızı 4,5 m/s'dir.

Parlak (2014); Gür (2016), yaptıkları ayrı ayrı çalışmalarda belirlemiş oldukları farklı materyalleri akışkan yataklı kurutucuda kurutmuşlardır. Elde ettikleri verilere göre kurutma karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneyleri seçtikleri farklı kurutma havasında gerçekleştirmişlerdir. Deneysel verileri literatürde var olan farklı modeller ile karşılaştırmış ve elde ettikleri sonuçlara göre verilerin hangi modele en uygun olduğunu belirlemişlerdir.

Demir (2019), bu çalışmada imalatını yaptığı kızılötesi ışıyımlı kurutma fırınında, nane bitkisini kurutmuştur. Optimum kurutma sıcaklığını belirlemiştir. Kurutma fırınında kurutma işlemine tabi tuttuğu nane yaprakları için 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C olan beş farklı kurutma sıcaklığı belirlemiştir. Kurutma sürelerini sırasıyla 185, 101, 90, 81,

76 dakika olarak belirlemiştir. Nane yapraklarının kurutma işlemleri başlangıç nem oranı olan 8,12 g su/g kuru maddeden 0,094545 g su/g kuru maddeye kadar düştüğünü görmüştür. Aktaş vd. (2013), aynı şekilde bir kızılötesi ışınlı kurutucuyu tasarlamış, imal etmiş bu kurutucuda ayvayı kurutmuşlardır. Dilimlenmiş ayvalar için 35°C ve 40°C kurutma hava sıcaklığı ve 1,22 m/s, 1,83 m/s ve 2,45 m/s kurutma havası hızlarını seçmişlerdir. Ayva dilimlerinin 3,89 g su/g kuru madde başlangıç nem miktarı vardır ve bu miktarı 0,16 g su / g kuru madde miktarına kadar kurutmuşlardır.

Albayrak vd. (2021), kızılötesi ısıtım teknolojisini kullanarak fasulye, bulgur, kahverengi ve beyaz pirinçten instant ürün üretmeyi ve fizikokimyasal özelliklerini araştırmayı amaçlamışlardır. Ürünleri pişirmişler ve 300 W, 400 W, 500 W olan farklı güçlerdeki orta dalga kızılötesi ısıtım ile kurutmuşlardır. Kızılötesi ısıtım gücünün artmasıyla kuruma sürelerinin azaldığını görmüşlerdir. Kuruma sonrası tüm örneklerin 0,29-0,49 arasındaki su aktivitelerine ulaşmışlardır.

Kalender ve Akosman (2015); Kalender (2017), yaptıkları ayrı ayrı çalışmalarda farklı materyalleri kızılötesi ışınlı kurutucuda kurutmuşlardır. Kuruma davranışını ve modellemesini incelemişlerdir. Kurutma deneylerini laboratuvar tipi bir kızılötesi ışınlı kurutucuda farklı sıcaklık değerlerinde yapmışlardır. Elde ettikleri verileri Newton, Modifiye Page ve Difüzyon olan 3 farklı ince tabaka kurutma modeline uyarlamışlardır. Sonuçlara göre en uygun modeli belirlemişlerdir.

Alkaç vd. (2019), dilimlenmiş limonu ısı pompalı kızılötesi ışınlı bir kurutucuda kurutmuşlardır. Dilimlenmiş limonları 6,6804 g su/g kuru madde başlangıç nem miktarından 60°C sabit sıcaklıkta ve 595 m³/h giriş hava debisi şartlarında 0,045 g su/g kuru madde miktarına kadar kurutmuşlardır. Kurutma işlemindeki kapalı çevrim sisteminde geçen süreyi 5 saat, taze hava girişli sistemde ise 6 saat olarak kaydetmiştir.

Keleş ve Saçılık (2018), kızılötesi ışınlı kurutucuda kabuklu fındık kurutmuşlardır. Kabuklu fındığa uyguladıkları kurutma havası 30°C, 35°C, 40°C, 45°C ve 50°C olan beş farklı kurutma sıcaklığıdır. Basınçlı kuru hava kullanmanın psikrometrik analizlerini yapıp, dış ortam havası ile karşılaştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kurutma sürelerinin 14-18 saat arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Ünlü vd. (2018), yaptıkları çalışmada kapalı çevrimli, ısı pompalı PLC kontrollü, kızılötesi ışınlı bir kurutucuda kabak çekirdeğinin kurutma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Deney düzeneğinde kurutma havası bağıl nemini %25 değerinde

tutmuşlardır. Kabak çekirdeklerinin başlangıç nemi olan 0,470 g su/g kuru madde miktarını 0,055 g su/g kuru madde son nem miktarına kadar 1,5 saatte düşürmüşlerdir.

Kocabıyık ve Demirtürk (2008), nane yapraklarını kızılötesi ışınlı kurutucu ile kurutmuşlardır. Nanein kuruma karakteristiklerini, kuruma hızını, kuruma süresini incelemiş, özgül enerji tüketimini hesaplamış ve kurutulmuş nane yapraklarının renk özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları denemeleri 1080 W/m² kızılötesi ışınlı yoğunluğunda ve 0,5, 1, 1,5 ve 2 m/s olan dört farklı hava hızında gerçekleştirmişlerdir. Tüm kuruma şartlarında kuruma süresini 64-180 dakika aralığında değiştiğini belirlemişlerdir.

Güleç ve Turhan Özdemir (2017), Giresun bölgesinde yetişmekte olan karayemiş meyvelerini geleneksel kurutma, mikrodalga kurutma ve kızılötesi ışınlı kuruma yöntemleriyle kurutmuşlardır. Minimum kurutma sürelerini mikrodalga için yaklaşık 20 dakika, kızılötesi ışınlı kurutucu için ise yaklaşık 90 dakika civarında bulmuşlardır. En yüksek kuruma hızını mikrodalga kurutucuda 700 W’da tespit etmişlerdir.

Güldemir vd. (2020), materyal olarak seçtiği Bayburt çevresinde yetişen yabani ekşi elma örneğini kızılötesi ışınlı, sıcak havada, dondurarak ve oda sıcaklığında kurutma yöntemlerini uygulayarak kurutmuştur. Elde ettikleri deneysel verilere göre, fenolik madde içeriği ve antioksidan bakımından yabani ekşi elma için en uygun kurutma yönteminin sıcak havada kurutma olduğunu belirlemişlerdir. Renk değerleri bakımından en iyi yöntemin dondurarak kurutma olduğunu belirlemişlerdir.

Özen ve Kar (2018), domatesi kızılötesi ışınlı kurutma, tepsili kurutucuda kurutma ve püskürtmeli kurutucu olmak üzere üç farklı kurutma tekniğiyle kurutmuşlardır. Kurutma işlemlerinde en iyi ince tabaka kurutma modelini tahmin etmek için 5 matematiksel modeli deneysel verilere uygulamışlardır. Elde ettikleri kurutma verilerine göre Modifiye Page modelinin en iyi model olduğunu saptamışlardır.

Bölek (2020), vakum ve akışkan yatak kurutucu kullanarak kurutulmuş avokadoların kalite karakteristiklerinin karşılaştırılmasını incelemiştir. Avokadoların başlangıç nem içeriği %72,04±0,9’dir. Ve avokadoları bu nem içeriği %13,02±1’e ulaşana kadar kurutmuştur. Akışkan yatak kurutucuda kurutma işlemini 50°C, 60°C ve 70°C olan dört farklı sıcaklıkta, 1,5 m/s hızla gerçekleştirmiştir. Bu sıcaklıklardaki kuruma süreleri sırasıyla 8, 7 ve 6 saattir.

Çınar (2014), konveksiyonel ve akışkan yataklı kurutma sistemlerini kullanarak pazı, ıspanak ve pırasanın 70°C'deki kuruma karakteristiklerini belirlemiştir. Bu deneysel verileri 6 farklı ince tabaka kurutma modeline uyarlamıştır. Akışkan yataklı kurutmada logaritmik modelin, konveksiyonel kurutmada ise Wang-Singh modelin deneysel verilere en uygun modeller olduğunu saptamıştır.

Doymaz (2013), 83 W, 125 W, 167 W ve 209 W olan dört farklı kızılötesi ısıtım güç seviyelerinde havuç posasını kurutmuştur. Güç seviyesinin, kurutma hızının ve kurutma süresinin üzerindeki etkisini gözlemlemiştir. Havuç posasının kurutma davranışını tahmin edebilmek için elde ettiği deneysel verileri 12 farklı matematiksel modele uygulayarak en iyi modeli belirlemiştir. Elde ettiği verilere göre, Aghbashlo vd. modelinin seçtiği örnek için kuruma davranışını en iyi açıklayan model olduğunu saptamıştır. Etketif nem difüzivitesinin kızılötesi ısıtım güç seviyesinden önemli şekilde etkilendiğini saptamıştır.

Küçük ve Doymaz (2019), kumkuat dilimlerini kızılötesi ısıtımli kurutucuda kurutmuşlardır. Kurutma parametresi olarak 50 W, 62 W, 74 W ve 88 W olan dört farklı kızılötesi ısıtım gücü kullanmışlardır. Kumkuat dilimlerinin kurutma karakteristiğı üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Doğrusal olmayan regresyon analizi kullanarak beş farklı matematiksel model kullanmışlardır. Regresyon analiz sonuçlarına göre Midilli-Kucuk modelinin en iyi model olduğunu belirlemişlerdir.

Banı (2014), kızılciğın kızılötesi ısıtımli kurutucuda kurutulmasıyla, örneklerin kuruma hızını ve kinetiğini, kuruma zamanını ve kütle transfer parametrelerini incelemiştir. Modelleme çalışmalarını kütle transfer mekanizmasının anlaşılması için kütle transferine karşı direncin ihmal edilip edilmediğı durumlarda incelemeyi yapmıştır. Hesaplamalarda 250 W, 300 W, 350 W, 400 W, 450 W, 500 W, 550 W ve 600 W kızılötesi ısıtım güçlerini kullanmıştır. Dış direncini ihmal ettiğı çalışmalarda etkin difüzivite değerlerinin kızılötesi ısıtım gücünün artması ile arttığını belirlemiştir. Deneysel sonuçları literatürde var olan 10 farklı modelle kıyaslayarak en uygun modelin Page modeline uyduğunu bulmuştur. Diğer yandan kütle transferine karşı dış direncini dahil ettiğı 2. durum için ise Biot sayısı kurutma katsayısı modelini kullanmıştır. Elde ettiğı Biot sayısı (Bi) değerlerine göre kızılciğın kızılötesi ısıtım ile kurutulmasında 250-400 W aralığında sadece dış direncin etkili olduğunu, 450-600 W aralığında ise dış direncin yanı sıra iç direncin de geçerli olduğunu sonucuna varmıştır.

Arkain (2021), yaptığı çalışmada materyal olarak seçtiği muşmula meyvesini 25°C’de gölgede, 40°C, 50°C, 60°C sıcaklıklarda konvektif, 200 W, 400 W ve 600 W’da mikrodalga ve 200 W-40°C, 200 W-50°C, 200 W-60°C, 400 W-40°C, 400 W-50°C, 400 W-60°C, 600 W-40°C, 600 W-50°C ve 600 W-60°C’de kombine mikrodalga-konvektif kurutma yöntemleriyle kurutmuştur. En uzun kurutma süresini 22500 dakika ile gölgede kurutma yönteminde ölçerken, en kısa kurutma süresini ise 17 dakika ile 600 W-60°C’de kombine mikrodalga-konvektif kurutma yönteminde belirlemiştir. Kurutma verilerini 22 farklı ince tabaka kurutma modeli ile modellemiştir. Gölgede kurutma için Page modelini, 40 ve 60 °C için Weibull modelini, 600 W, 400 W-40°C, 400 W-60°C ve 600 W-50°C için Jena Das modelini ve 600 W-60°C için Logistic modelini en uygun ince tabaka kurutma modelleri olarak belirlemiştir.

1.3. Çayın Yapısı ve Bitkisel Özellikleri

1.3.1. Çayın Yapısı

%23’ü kuru madde olan çay yapraklarının %77’si sudur (URL-2, 2021). Çayın yapısından dolayı en uygun şekilde yetişmesi için gereken koşullar; kireçsiz ve humuslu topraklar, 0-30°C sıcaklık skalası ve 1600-3000 mm yağış alan bölgeler olarak sıralanabilir (URL-2, 2021). Sıcaklığın 35°C’nin üzerine çıkması durumunda yanma ve kavrulma olaylarıyla karşılaşılabilir (Koday, 2000). Sağanak yağmurları sevmeyen çay bitkisinin, güneş ışığına direkt maruz kalması da istenmeyen bir durumdur (Koday, 2000).

Çay bitkisi kayda değer bir şekilde flavonoid içerir ve 4000’den fazla kimyasal bileşene sahip olduğu bilinmektedir (Chacko vd., 2010). Flavonoller, proantosiyanidinler, fenolik asitler ve flavonoidlerden kateşinler taze çay yapraklarında büyük oranda mevcuttur (Elmas ve Gezer, 2019).

Çaya renk ve aroma veren kateşinler, yeşil çayda siyah çaya nazaran daha fazla bulunmaktadır (Ferruzzi, 2010). Taze yeşil çay yapraklar kateşin, epikateşin, epikateşin 3-gallat, epigallokateşin ve epigallokateşin gallat olmak üzere beş temel kateşin maddesi içerir (Reto vd., 2007; Cabrera vd., 2013). Siyah çayda en fazla bulunan fenolik bileşik thearubiginler iken yeşil çayda ise en fazla bulunan epigallokateşin gallattır (Liang vd.,

2003; URL-5, 2021). Çayın tadını ve kokusunu uçucu yağlar sağlarken, uyarıcı etkisini ise kafein vermektedir (Aykaç vd., 2014).

Enzimler: Polifenol oksidas enzimi, peroksidaz enzimi, 5-dehidroshikimat redüktaz enzimi, fenilalanin amonyak liyas enzimi, peptidas enzimi, klorofilaz enzimi, alkol dehidrogenaz enzimi çayda bulunan bazı enzimlerdir (URL-3, 2021).

Polifenoller: Flavoneller, flavoneller ve flavanol glikozidler, flavonlar ve asitler ve depsitler tomurcukta ve genç çay yaprağında bulunan polifenolik bileşiklerdir (URL-3, 2021).

Kafein: Saf olarak çay yapraklarında kafein bulunur (URL-3, 2021). Kuru çayın %1-5 oranında kafein içerdiği bilinmektedir (Ferruzzi, 2010). Bir fincan (237 ml) yeşil çaydaki kafein miktarı yaklaşık 30 mg iken siyah çayda bu değer 50 mg'dır (Tablo 1).

Vitaminler: Çayda bulunan vitaminler vitamin C, vitamin B1 (tiyamin), vitamin B2 (riboflavin), vitamin PP (nikotinik asit), pantotenik asittir (URL-2, 2021).

Tablo 1. Bir fincan yeşil ve siyah çayda bulunan bileşenlerin oranları (Üstün ve Demirci,2013)

Bileşen	Yeşil çay (bir fincan)	Siyah çay (bir fincan)
Kateşinler	60-125 mg	30-60 mg
Theaflavinler	-	3.0-6.0 mg
Kafein	20-50 mg	30-60 mg
L-Theanine	20-40 mg	20-40 mg

1.3.2. Çayın Bitkisel Özellikleri

Tek gövde haline olabildiği gibi çok gövdeli halde de olabilen çay bitkisi, dağınık bir görünüme sahip olan yeşil bir bitkidir (URL-1, 2021). Yaklaşık yüz yıla kadar yaşayabildiği düşünülen çay bitkisi, çok yıllık bir bitkidir (Öncirak, 2019). Çay bitkisinin yetiştirilmesi için yıllık 1000-1250 mm'ye kadar yağış rejimi ve yeterli miktarda sıcaklık (10-30°C) olması gerekmektedir (URL-5, 2021).

Esmer renkteki gövdesiyle çay bitkisi, toprağın yüzeyine çok yakın bulunan saçak kökler ve oldukça derine inen güçlü bir ana köke sahiptir (URL-6, 2021). Genel kök ağırlığının %5'ini bitkiyi besleyen kökler oluşturur (URL-1, 2021).

Görünüşte elips şeklindeki çay yaprakları, kısa bir sapa sahiptir ve çeşidine göre 3-35 cm uzunluğunda olup yeşil görünümündedir (Şekil 1). Yaprakların rengi mat ya da parlak olabilir (URL-5, 2021). Yeşil olarak kesilen yapraklar siyahlaşmaya kadar nemli odalarda bekletilmesiyle yani bir başka deyişle oksidasyon işlemiyle, soğukta tutularak siyah çay elde edilir (Aykaç vd., 2014).



Şekil 1. Çay yaprakları

Hoş bir kokusu ve beyaz renkte olan çay bitkisinin çiçeği, erkek ve dişi organları bir arada bulundurur (URL-5, 2021). 5-7 adet çanak yaprak ve aynı oranda taç yaprağı bulunduran tam olarak yeşermiş bir çay bitkisi çiçeği, tomurcuklarının açmasının iki gün sonrasında taç yapraklarını döker (URL 1-5, 2021). Tomurcuklarda bulunan tüyler ortalama 340 mikron uzunluğunda ve 25 mikron genişliğindedir (Koday, 2000).

Olgunlaşmadan önce yeşil renge sahip olan çay bitkisi meyveleri, üç gözlü ve kalın cidara sahiptir (URL-1, 2021). Meyve içerisinde yaklaşık 3-6 adet arasında değişiklik gösteren tohumlar, meyve olgunlaşma safhasına geldiğinde kahve rengini alır ve dökülür (URL 1-5, 2021). Sert bir kabukla kaplı olan tohumlar genelde 1-2 cm çapında küre ve yarım küre şeklinde bulunurlar (URL-5, 2021).

1.4. Kurutma

Kurutma gıda ürünlerinin korunmasında ve gıdanın bozulmadan uzun süre dayanmasını sağlayan oldukça etkili bir yöntemdir (Özen, 2016). Kurutma, yaş ürünlerdeki su miktarını azaltarak üründe bozulmalara neden olabilecek mikroorganizmaların ve kimyasal bozulmaların önlenmesini, böylelikle ürünlerin uzun süre bozulmadan depolanmasını sağlar (İşsever, 2019; Midilli ve Kucuk, 2003). Ayrıca kurutma işlemlerinde kuruma süresinin önemli bir ölçüde azalması, enerji maliyetlerinin de düşmesine katkı sağlar (Şimşek vd., 2021). Yapılan bu işlemde sıvı veya buhar difüzyonu yoluyla su madde içerisinden yüzeye, sonrasında ise yüzeyden havaya bir geçiş hareketi söz konusudur (Altunkanat, 2019).

Nem miktarının düşürülmesi ile aynı zamanda ürünün koku, tat ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin korunması sağlanmaktadır (İşsever, 2019; Akpınar vd., 2003). Ürünün nem dengesinin kararlı hale gelmesiyle ürün ağırlığında ve hacminde kayda değer bir azalma ortaya çıkar, ürünlerin ambalajlama, depolama ve dağıtım maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlar (Erçetin ve Uralcan, 2009). Ayrıca nem ürününden ayrıldıkça su aktivitesi de azalma gösterir (Güney, 2007).

Kurutma havasının sahip olduğu sıcaklık, entalpi değeri ve bağıl nem miktarı kurutma hızını etkileyen faktörlerdir (Doğan, 2020). Kurutma sıcaklığının belirli limitlere göre değerlendirilmesi gerekir. Eğer sıcaklık olması gerekenden yüksek tutulursa kurutma süresi kısalsa da kurutulan ürünün dokusu, rengi ve aroması gibi özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olur (Doğan, 2020). Aynı zamanda yüksek sıcaklık, üründe kabuk oluşumuna neden olmasından dolayı ısı transferi olumsuz etkilenmektedir (Gökmen, 2017). Bazı besinlerin kurutma sıcaklıkları ve kurutma süreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Bazı besinlerin kurutma sıcaklıkları ve kurutma süreleri (Güngör, 2013)

Besinlerin Cinsi	Kurutma Sıcaklığı, °C	Kurutma Süresi, Saat
Meyveler	55-80	6-24
Üzüm	60-65	24
Elma	I.Kademe 70-88 II.Kademe 74	8
Şeftali, Armut	68	24-30
Kabuksuz Hindistan Cevizi	65-92	4-20
Sebzeler	50-65	2-18
Havuç	I.Kademe 70 II.Kademe 65	14-24
Mantar	I.Kademe 44 II.Kademe 65	
Soğan	I.Kademe 70-88 II.Kademe 55-60	10-15
Çay Yaprakları (Fanaj veya ilk kurutma)	38	4-8
Çay Yaprakları (Kurutma)	70-110	1-2

Kurutma işleminde mümkün olduğu kadar az enerji harcanarak ve işlemin verimliliği belli bir noktada tutularak muhtemel yüksek maliyet azaltılabilir (Akpınar vd., 2005). Kurutma yöntemleri içerisinde en ekonomik yöntem olarak bilinen doğal kurutma yöntemi olan güneşte kurutma, alanın kontrol edilmesinin zorluğu, kurutma için geniş alanların gerekmesi, ürünün çevresel kirlenmeden korunamaması, fermentasyon riski ve var olan iklimsel güçlüklerden dolayı yerini zamanla birçok farklı kurutma yöntemlerine bırakmıştır (Güleç ve Turhan Özdemir, 2017; Gökmen, 2017). Yapay kurutucuların ortaya çıkmasıyla da endüstriyel alanda bu kurutucular daha çok tercih edilmeye başlanmıştır (Karaca, 2019).

Endüstriyel alanda aktif bir şekilde var olan kurutma işlemi gıda, tekstil, kimya, kereste ve kağıt gibi endüstri dallarında kullanılmaktadır (Gürel vd., 2017). Kurutma işlemini uygulayan bu endüstrilerde, kurutucular toplam enerji tüketiminin büyük bir

kısmını harcar (Erçetin ve Uralcan, 2009). Bu oran gıda ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında %12, tekstilde %5, kimyada %6, kereste kurutmada %11 ve kağıt endüstrisinde %33 düzeylerindedir (Güngör, 2013).

Nemin uzaklaştırılabilmesi için yüksek enerji tüketimi var olan konvektif kurutucularda gerekli enerji, sistemin toplam enerji gereksiniminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Tablo 3).

Tablo 3. Bir konvektif kurutucuda tipik enerji tüketiminin dağılımı (Güngör, 2013)

Tüketim Noktaları	Enerji Gereksinimi (kJ/h - %)
Buharlaştırma	975400-55
Kurutucu Çıkış Havaşı	521200-30
Destek Donanımı	143900-8
Radasyon	47900-3
Sistemin Isıtılması	45800-3
Fan	13300-1

Kurutucu tipine göre kurutma etkinliği %20-90 arasında değişmektedir. Farklı kurutucu tipine göre kurutma etkinlikleri aşağıda verilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Değişik kurutucu tipleri için kurutma etkinlikleri (Gürel, 2015)

Kurutucu Tipi	Etkinlik (%)	Kurutucu Tipi	Etkinlik (%)
Direkt sürekli		Endirekt sürekli	
Konvektif	20-40	Silindirik	85
Flaş	50-75	Döner	75-90
Bantlı	40-60	Kesikli	
Döner	40-70	Karıştırıcı, tepsili	90
Püskürtmeli	50	Vakumlu döner	70
Tünel	35-40	Kızılötesi ışıyım	30-60
Akışkan yatak	40-80	Dielektrik	60
Kesikli raflı	85		

Kurutulacak ürünlerdeki suyun uzaklaştırılması için gerekli olan ısınn ürüne taşınmasıyla gerçekleştirilen kurutma yöntemlerine konveksiyon kurutma, radyasyon kurutma ve kontakt kurutma örnek verilebilir (Altunkanat, 2019).

Konveksiyonel kurutmada, kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi önemli olmakla beraber en önemli iki parametre ürünün nem içeriği ve kurutucu hava sıcaklığıdır. Konveksiyonel kurutmaya akışkan yataklı kurutucular örnek verilebilir.

Akışkan yataklı kurutucular, kurutma hızının yüksek olmasından dolayı ekonomik ve homojen bir prosestir (Çınar, 2014).

Radyasyon ile kurutmada mikrodalga dielektrik, kızılötesi ısıtım veya bu kurutma yöntemlerinin ikisi kullanılarak kombine bir kurutma sistemi oluşturulabilir (Altunkanat, 2019). Kızılötesi ısıtımli kurutmada, ışımların ürünün geniş yüzey alanına çarpması ve ısı enerjisine dönüşmesi ile ince tabaka halinde bir kurutma gerçekleşir (Kalender ve Akosman, 2015).

1.5. Kurutmanın Amacı

Kurutmanın amacı; belli bir ihtiyaç ve zorunluluktan kaynaklandığı söylenebilir. Bir nevi kurutmanın doğuşunu uzun süren deniz seyahatleri, keşif zamanları, savaşlar gibi etkenler ortaya çıkarmıştır (Özen, 2016). Ürünün kapladığı alanı azaltmak, bozulmadan depolamak, besin değerlerindeki kaybı önlemek ve hijyenik yapısını korumak amaçlanmıştır (Yalçın, 2012; Midilli, 2001).

Amaçlarından biri de ürünün bozulmasına engel olunması ile daha uzun muhafaza edilmesini ve böylece raf ömrünü uzatmayı sağlamaktır. Bunu sağlamak için ürünün nem içeriğini belli bir seviyeye düşürmek gereklidir (Uz, 2019). Böylelikle su bakımından mikroorganizmalar için elverişsiz bir ortam oluşur ve mikroorganizmaların aktiviteleri yavaşlamasıyla ürünlerin bozulması önlenerek istenilen amaca ulaşılır (Heybeli, 2017). Mikroorganizmaların aktivitelerinin yavaşlamasıyla da dört mevsim tüketilebilen gıdalar elde edilir (Alkaç, 2019).

Gıda endüstrisinde kurutma işlemi, ürünün mukavemetini arttırmak, maliyeti düşürmek gibi amaçlarının yanında çeşitli proseslerde çözelti halindeki ara üründen son ürün elde etmeyi de amaçlamaktadır (Karaca, 2019). Ticari kurutma işlemindeki asıl amaç ise uygulanan işlem için ihtiyaç olan ısıyı verimli bir şekilde karşılamaktır. Isı transferi ise iletim, ısıtım, taşınım veya üçünün birleşimi halinde meydana gelir (Aktar, 2019).

1.6. Kurutucu Türleri

Genel kurutucu türleri, özel kurutma teknikleri aşağıda başlıklar halinde verilmiştir (Şimşek, 2018).

- Tepsili Kurutucular
- Akışkan Yataklı Kurutucular
- Tünel Kurutucular
- Konveyör (Bantlı) Kurutucular
- Püskürtmeli Kurutucular
- Valsli Kurutucular
- Güneş Enerjili Kurutucular
- Kızılötesi Kurutucular
- Darbeli Kurutucular
- Isı Pompalı Kurutucular
- Dolaylı Kurutucular
- Tamburlu Kurutucular
- Kızgın Buhar Kurutma
- Lüle Yataklı Kurutucu
- Pnömatik ve Ani Kurutma

1.7. Kurutma Yöntemleri

Kuru gıda endüstrisinde, kurutma işlemi yapılacak ürün türüne göre çeşitli kurutma yöntemleri kullanılmaktadır. Kurutucular, kurutma parametreleri ve kurutulacak ürüne göre farklı işlevler barındırmaktadır (Ekinci, 2016). Kurutma yöntemleri doğal kurutma ve yapay kurutma olarak iki başlıkta toplanır.

1.7.1. Doğal Kurutma

Gıdaları kurutmak için güneş, kullanılan en eski kaynaktır (Heybeli, 2017). Doğal kurutma, güneş ısısının direkt veya dolaylı yoldan ürüne gelmesi ve ürün içerisindeki su

miktarının düşürülmesi ile gerçekleşir (Tekgül, 2019). Üründeki su oranı genellikle %15'in altına düşmez (Ayşegül, 2014). Sıcaklık, doğal kurutmadaki en önemli parametredir (Özen, 2016).

Doğal kurutmada gıdaların kurutulması için geniş alanlara ihtiyaç vardır ve kurutma süresi işlemin oldukça yavaş gerçekleştiğinden dolayı uzundur (Delfiya vd., 2021). Ayrıca ürünün çevredeki zararlı canlılardan korunamaması, küflenme, ürünün tozlanması, uzun süre güneş ışınlarına maruz kalınmasından dolayı renk kayıplarının yaşanması ve hava koşullarının elverişsiz olması gibi çeşitli olumsuz durumlar mevcuttur (Parlak, 2014; Midilli, 2001). Bu yöntemle kurutulan ürünlerin verimi düşüktür (Aksoy, 2019). Bütün gıdalar doğal yöntemlerle kurutulamaz, olumsuz yönlerinden dolayı birçok gıdanın bu yöntemle kurutması uygun değildir (Öztürk, 2014).

1.7.2. Yapay Kurutma

Doğal kurutmaya göre ürün kalitesinin daha yüksek olduğu yapay kurutmada kontrollü, ürünün dış etkenlerden korunan ve daha verimli bir kurutma gerçekleşir (Heybeli, 2017). Üründeki suyun tamamı veya tamamına yakın bir kısmı uzaklaştırılır, ürün özelliklerinde kayda değer bir değişiklik olmaz (Öztürk, 2014).

Yapay kurutucularla ürünün kuruma süresini kısalır, daha kaliteli ve daha uzun raf ömrüne sahip ürünler elde edilir (Banı, 2014). Aynı zamanda su miktarının istenilen ölçüde azaltılması ve vitamin kayıplarının daha az olması avantajları arasındadır (Özen, 2016). Yapay kurutma yöntemlerinin olumsuz yönü ise maliyetinin oldukça fazla olmasıdır. Yapay kurutucular, ısının kullanım şekline göre; konvektif, kondüksiyon ve radyasyonlu kurutma yöntemleri olarak üç ana başlıkta toplanır (Riadh vd., 2014).

1.8. Kızılötesi Işınımli Kurutma

1.8.1. Genel Bilgiler

Kızılötesi ışınlım bilimsel olarak 18. y.y.'da Sir Frederic William Herschel tarafından keşfedilmiştir (Onin, 2012; Banı, 2014). Kızılötesi ışınlım, gıda ve tarım

ürünlerinin işlenmesi için 1950-1970 yılları arasında Rusya, Amerika ve Doğu Avrupa ülkelerinde kullanılmaya başlanmış sonrasında Japonya, İsveç ve Tayvan'da yaygınlaşmaya başlanmıştır (Yılmaz Tuncel ve Tuncel, 2016).

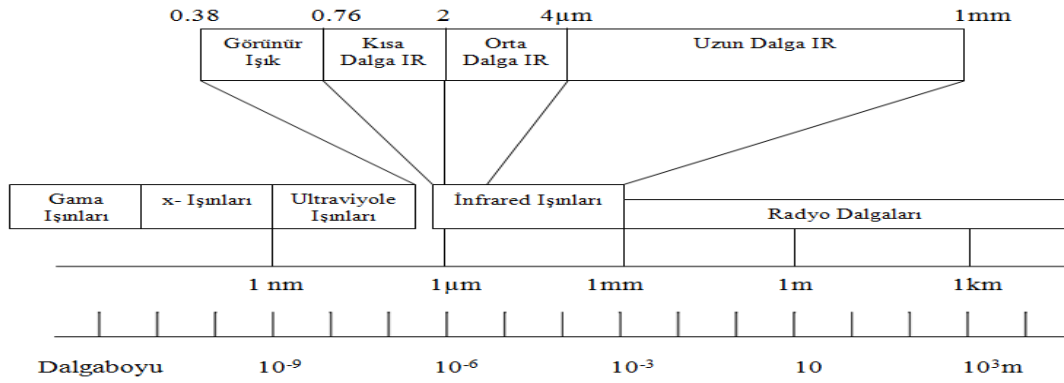
Kızılötesi ısıtım, kurutma alanlarında 1950'lerde, plastik ve kağıt gibi endüstri alanlarında 1960'lı yıllarda uygulanmasına yönelik çalışmaları sürdürülmüştür. Sanayi alanında yaygın kullanımı ise 1980 yılından sonra başlamıştır (Bani, 2014; Onin, 2012).

Kızılötesi ısıtım tıpta kullanımı uzun yıllara, gıda endüstrisinde kullanımı ise yakın zamana dayanmaktadır (Onin, 2012; Bani, 2014). Günümüzde Kızılötesi ısıtım, gıda endüstrisinin pişirme, kurutma, pastörizasyon ve sterilizasyon gibi ısıtım işlemlerinde kullanılmaktadır (Bani, 2014). Ayrıca bu alanların dışında otomotiv sanayisinde araba boyalarının kurutulmasında da kızılötesi ışınlardan yararlanılmaktadır (Yılmaz Tuncel ve Tuncel, 2016).

Günümüzde kızılötesi ısıtım, ısınma amaçlı proseslerde aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Isıtılması güç olan alanların ekonomik ve verimi yüksek olacak şekilde ısıtılması kızılötesi ısıtımın yaygınlaşmasını sağlamıştır (Onin, 2012).

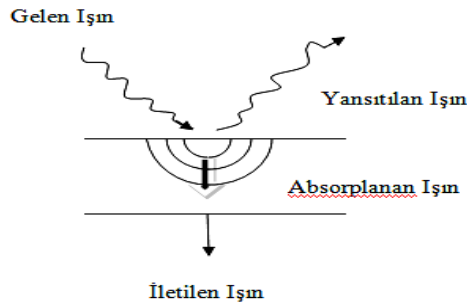
Kızılötesi ısıtım, elektromanyetik spektrumdaki ışımalardan bir tanesidir (Heybeli, 2017). Atomun özelliğine göre değişiklik gösteren fotonun bir dalga boyu ve ısıtım enerjisi mevcuttur, ısıtımın kızılötesi ışıını temsil etmesi için dalga boyunun 0,76-400 μm aralığına sahip olması gerekir (Heybeli, 2017). 0,76-400 μm dalga uzunluğuna sahip kızılötesi ısıtım, elektromanyetik spektrumda görünür ışık ile mikrodalga arasında yer almaktadır (Tekgül, 2019).

Kızılötesi ısıtımın elektromanyetik spektrumdaki yeri dalga boyuna göre kısa, orta ve uzak olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır (Şekil 2). Işın dalga boyu 0,76-2 μm arasında olanlar yakın, 2-4 μm aralığında olanlar orta ve 4-1000 μm aralığında olanlar ise uzak kızılötesi ısıtımını temsil eder (Huang vd., 2021). Kızılötesi ısıtımın dalga boyu ise kaynağın sıcaklığına bağlıdır ve yüksek sıcaklıklarda kısa dalga boyları üretilir (URL- 7; Fevzioğlu, 2008).



Şekil 2. Kızılötesi ışınımın elektromanyetik spektrumdaki yeri (Fevzioğlu, 2008)

Kızılötesi ışınım dalgaları Şekil 3’de gösterildiği gibi ürüne çarparak yansıtılır, absorbe edilir ve iletilir (Delfiya vd., 2021). Absorbe olan radyasyon enerjisi ısıya dönüşür (URL-7, 2021). Kızılötesi ışınım radyasyonunun ürün içerisine nüfuz etme derinliğinin derecesi, ürünün kimyasal bileşimine, fiziksel özelliklerine ve fizikokimyasal özelliklerine bağlıdır (Arslan, 2012). Kızılötesi ışınım radyasyonunun ısı transfer özelliği, ürüne direkt nüfuz etme, homojen bir şekilde gerçekleşen sıcaklık dağılımı ve hızlı proses kontrolü gibi özellikleri ile ideal bir enerji kaynağıdır (Aktaş vd., 2013; Liu vd., 2013).



Şekil 3. Kızılötesi ışınımın yansıtılması, absorblanması ve iletilmesi (Fevzioğlu, 2008)

Kızılötesi ışınlar kendi içerisinde dalga boyu ve emisyon sıcaklıklarına göre 3 bölüme ayrılmaktadır; Kısa dalga kızılötesi ışınım bölgesi (0,72-2 µm, 3870-1180°C), orta dalga kızılötesi ışınım bölgesi (2-4 µm, 1180-450°C) ve uzun dalga kızılötesi ışınım bölgesi (4-1000 µm, <450°C) (Han, 2019).

Dalga boyları farklılık gösteren kızılötesi ışınım kaynakları mevcuttur. Bunlar; kısa dalga boyunda halojen tüp ısıtıcı, orta ve kısa dalga boyunda Quartz tüp ısıtıcı ve uzun

dalga boyunda silindirik ve düz metalik ısıtıcılar, seramik ısıtıcılar şeklinde sınıflandırılabilir (Öztürk Erdem, 2018). Kısa dalga kızılötesi ışıınım kaynakları 2000°C'nin üzerinde, orta dalga kızılötesi ışıınım kaynakları 100-1150°C aralığında ve uzun dalga kızılötesi ışıınım kaynakları 800°C'nin altındaki sıcaklıklarda çalışmaktadırlar (Yılmaz Tuncel ve Tuncel, 2016).

Gaz ile çalışan kızılötesi ışıınım kaynakları elektrik ile çalışan kızılötesi ışıınım kaynaklarına göre daha düşük sıcaklıklarda çalışabilmektedirler. Gaz ile çalışan elektrikli kızılötesi ışıınım kaynaklarının verimliliği %30-50 arasında iken elektrikli kızılötesi ışıınım kaynaklarında bu oran %40-70 arasındadır (Yılmaz Tuncel ve Tuncel, 2016). Kızılötesi ışıınım çözündürme, pastörizasyon ve sterilizasyon gibi işlemlerde kullanılmaktadır. Bu yöntemle küf, bakteri, maya ve sporlar eylemsizleştirilir. Mikroorganizmaların DNA, RNA, hücre zarı ve proteini yıkıma uğrar (Banı, 2014).

1.8.2. Kurutma Mekanizması

Kızılötesi ışıınım, ısıtma sistemlerinde gaz ve elektrik enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Kızılötesi ışıınım enerjisi kullanılan kurutma işlemi uygulamalarında elektromanyetik dalgalar ışıın kaynağından ürün yüzeyine doğrudan aktarılır (Öztürk Erdem, 2018). Böylece ürün ortam havasını ısıtmadan direkt olarak gelen enerjiyi absorbe eder. Absorbe olan radyasyon enerjisi ısıya dönüşür (Arslan, 2012). Kızılötesi ışıınım ile ürünün yüzey sıcaklığı yükseldikçe ısı, iletim yolu ile merkeze doğru yayılır (Yalçın, 2012). Bunun sonucunda da yüksek oranda ısı ve kütle transferi meydana gelir (Guo vd., 2020). Gerçekleşen ısı ve kütle transferi ile kurutma işlemi meydana gelir (Alkaç, 2019).

Kısa bir zaman içerisinde sıcaklığın hızla yükselmesi, kurutma süresi boyunca enerji tüketiminde kayda değer bir tasarruf sağlar (Huang vd., 2021; Sorour ve El-Mesery, 2014). Isıtma için gerekli olan süre kısalmır (Arslan, 2012). Kızılötesi ışıınım, ortam havası ısıtılmaya gerek olmaksızın her hava sıcaklığında gerçekleşebilmektedir (Yılmaz Tuncel ve Tuncel, 2016). Ayrıca sıcaklık ürün içerisine homojen bir şekilde dağılır (Öztürk Erdem, 2018). Kızılötesi ışıının ince levha yapısında olan ürünlerde tercih edilmesinin nedeni ürünün yüzeyine yakın kısımların ısınmasıdır (Taştekinoglu, 2019).

1.8.3. Kızılötesi Işınımli Kurutma Tekniğinin Diğer Konveksiyonel Kurutuculara Göre Avantajları

Kızılötesi ışınlı kurutmanın diğer konveksiyonel kurutuculara göre avantajları aşağıda sıralanmıştır (Öztürk Erdem, 2018; Özkoç, 2010; Arslan, 2012; Tezer Or, 2010; Aktaş vd., 2013; Sorour ve El- Mesery, 2014).

- İlk kurulum ve işletme maliyetinin düşük olması
- Kullanımında mevsim değişikliklerinden etkilenmemesi
- Isıtma ve kurutmada yüksek hız
- Daha yüksek enerji etkinliği
- Kısa kurutma süresi
- Homojen sıcaklık dağılımı
- Basit donanım ihtiyacı
- Daha iyi ürün kalitesi
- Yer tasarrufu sağlaması
- Alternatif enerji kaynağı

1.9. Akışkan Yataklı Kurutma

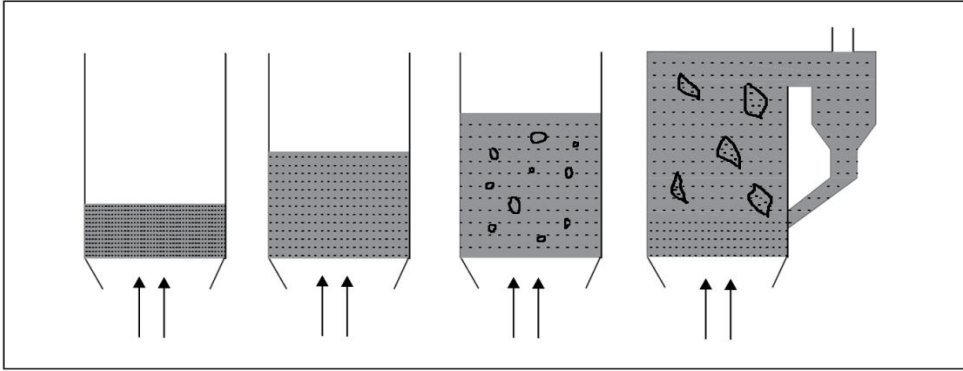
1.9.1. Akışkanlaştırmanın Tanımı

Akışkanlaştırma işlemi, fan yardımıyla basınçlandırılan havanın ya da basınçlandırılmış sıvı veya gaz olan bir akışkanın, ürüne etki eden yer çekimi kuvvetini yenecek kadar yüksek hızla, akışkanlaştırılmak istenen katı parçacıklar arasından geçirilerek parçacıkların askıda tutulması olarak tanımlanmaktadır (Kurtuluş, 2007; Bozkurt vd., 2020). Ancak akışkan geçerken taneciklerde hareket olmaz, sabit kalırsa bu yatağa “sabit yatak (fixed bed)” denir (Temel, 2017).

Taban kısmında delikli bir plaka var olan ve katı parçacıklar içeren yatağın alt kısmından ilk olarak hava, düşük hızla verilmeye başlanır. Havanın parçacıklar üzerinde etkili bir kuvveti olmaz ve hava parçacıklar arasında bulunan boşluklardan yukarıya doğru hareket eder. Hava, akış hızının artmasıyla parçacıklara etki eden kuvvetini artırır.

Hız arttıkça kapta var olan hacim oranı artarak yatağın yükselmesine neden olur. Böylece tanecikler birbirinden ayrılıp yavaş yavaş titreşmeye başlar Bu tip yatağa “genleşmiş yatak (expanded bed)” adı verilir (Temel, 2017; Bozkurt vd., 2020).

Akışkan hızı daha da fazla arttırıldığında katı parçacıklar aşağıdan yukarıya doğru akan havanın içerisinde asılı olarak kalır (Temel, 2017). Parçacıklar üzerindeki kaldırma kuvvetiyle yer çekimi dengelenmiş durumdadır (Bozkurt vd., 2020; Tawfik vd., 2019). Bu duruma “minimum akışkanlaşma” adı verilir. Parçacıkların akışkan gibi davranışta bulunmaya başladığı hıza ise “minimum akışkanlaştırma hızı” denir (Syahrul vd., 2002). Katı patiküller, hava hızının minimum akışkanlaşma hızından daha düşük olması koşulunda akışkanlaşma gerçekleşmez (Güney, 2007). Akışkanın bu hızdan sonraki hızlarında, parçacıkların hareket etme olayına “akışkanlaşma olayı” adı verilir (Temel, 2017). Böyle bir yatak ise “akışkan yatak (fluidized bed)” adını alır (Deniz, 2010).



Şekil 4. Akışkan yatakta akışkanlaşma evreleri (Çalhan vd., 2012)

Yatak bölgesinde hacmin sabit olduğu durumda hava akış hızı daha da fazla arttırılırsa, yatak içerisinde hava kabarcıkları oluşur. Hava akış hızının daha da artmasıyla kabarcıklar daha da büyür. Katı parçacıkların yatakta yaptıkları titreşim daha da artar. Ve yatağın tamamına yayılması ile yatak içerisinde daha da büyük boşluklar oluşur (Çalhan vd., 2012; Doğan, 2020) Akışkan yataktaki meydana gelen akışkanlaşma evreleri Şekil 4’de verilmiştir.

1.9.2. Minimum Akışkanlaşma Hızı

Akışkan yatak prosesinde en önemli parametre minimum akışkanlaşma hızıdır (Bozkurt vd., 2020). Minimum akışkanlaşma hızı, yatağı oluşturan parçacıkların akışkan

özelliği göstermeye başladığı andaki gaz hızıdır (Shahbaz vd., 2016). Bu hız değerinin altında kalınması durumunda yatak, sabit yatak davranışı sergiler iken bu değer üzerinde ise akışkanlaşır ve farklı türde yatak davranışları gösterir (Bozkurt vd., 2020). Literatürde birçok araştırma yapılmış ve bu araştırmalar ışığında minimum akışkanlaşma hızı ile ilgili çeşitli korelasyonlar ortaya koyulmuştur. Aşağıda bu korelasyonların en çok kullanılmakta olanları verilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Minimum akışkanlaşma hızı korelasyonları (Kurtuluş, 2007)

Araştırmacılar	Korelasyonlar
Wen & Yu	$U_m = B[1135,7 + 0,0408Ar - 33,7]^{1/2}$
Davies & Richardson	$U_m = B_1 (7,8 \times 10^{-4})$
Chyang & Huang	$U_m = B[(33,3^2 + 0,033Ar)^{1/2} - 33,3]$
Broadhurst & Becker	$U_m = B[(25,28^2 + 0,0571Ar)^{1/2} - 25,28]$
Babu	$U_m = B[(25,25^2 + 0,0651Ar)^{1/2} - 25,25]$
Richardson & Da St. Jeromino	$U_m = B[(25,7^2 + 0,0365Ar)^{1/2} - 25,7]$
Doichev & Akhmanov	$U_m = B(1,08 \times 10^{-3} Ar^{0,947})$
Thonglimp	$U_m = B[(31,6^2 + 0,0425Ar)^{1/2} - 31,6]$

1.9.3. Akışkan Yataklı Kurutucu

Bir konveksiyonel kurutma çeşidi olan akışkan yataklı kurutma, yüksek hız ve sıcaklıktaki kurutucu hava ürünle temas ederek suyun uzaklaştırmasını sağlar. Ürünün yüzey alanının geniş olması suyun hızla uzaklaştırılmasına olanak sağlar (Çınar, 2014). Yatak içinde iyi bir seviyede tanecik karışımının olmasından dolayı kurutma işlemi homojendir (Ersöz ve Doğan, 2010). Akışkan yataklı kurutucuda nemi uzaklaştırılacak olan ürünün, sıcak hava ile buluşturulduğu sırada yüksek ısı ve kütle transfer katsayılarına varılması ile kurutulma işlemi gerçekleştirilir (Güney, 2007). Akışkan yataklı kurutucuların geleneksel kurutucularla karşılaştırıldığı zaman 28 kat daha verimli bir ısı transferi gerçekleştirdiği belirtilmiştir (Aktar, 2019).

Akışkan yataklı kurutucular genel olarak; çekiş fanları, brülör, siklon ve akışkan yataktan oluşur (Onin, 2012). Yatay ve düşey olmak üzere iki çeşidi olan akışkan yataklı kurutucular, kurutma işlemini sürekli veya süreksiz olarak gerçekleştirebilir (Deniz, 2010).

Isıtılmış olan hava, tabanında geçirgen bir levha bulunan kurutma odasının altından verilerek ıslak ürünün arasından yukarıya doğru ilerler ve nem oranı istenilen seviyeye geldiğinde hava akımı kesilerek ürün kurutucudan dışarıya alınır. Sürekli kurutmada ise ıslak ürün sürekli şekilde kurutucuya girer, nem oranı istenilen seviyeye ulaştığında kuru madde sürekli olarak kurutucudan dışarıya alınır. Akışkan yataklı kurutucu sürekli olarak çalıştırılır (Deniz, 2010).

Akışkan yataklarda yoğun faz ve dağınık faz olarak iki tip faz oluşmaktadır. Akışkan yatağın alt kısmındaki yoğun faz bölgesinin üzerinde, katı taneciklerin ağırlığının ve yoğunluğunun seyrekleştiği dağınık faz bölgesi mevcuttur (Gürel, 2015).

Akışkan yataklı kurutucuda kurutulacak olan ürün, küresel ve silindirik tanecik yapısında olabilmesi için elekten geçirilir ardından kurutucuya alınır. Ayrıca ürün taneciklerinin şeklinin değişime ve mekanik zarara uğrama riski, taneciklerin toplanıp akışkanlığını zayıflatması akışkan yatak için istenmeyen bir durumdur. Nemin uzaklaştırılması için gereken kurutma gazı genellikle hava olup, gaz hızının dikkatlice ayarlanması gerekir (Ekinci, 2016).

Akışkan yataklı kurutucular, arzu edilen sıcaklık derecelerinde kısa bir sürede kurutma işlemi gerçekleştiğinden birçok çeşit ürünün kurutulmasında kullanılmaktadır (Aktar, 2019). Akışkan yataklı kurutucularda kurutulan malzemelere; kömür, kireç taşı, çimento, plastik, tıbbi malzeme örnek olarak verilebilir (Ersöz ve Doğan, 2010).

Akışkan yatak sistemleri gıda endüstrisinde soğutma, dondurma, kurutma haşlama, pişirme ve sterilizasyon gibi işlemlerde kullanılır. Ayrıca akışkan yatak sistemi besin takviye maddeleri olarak kullanılmakta olan besinsel maddelerin enkapsüle edilmesinde kullanılmaktadır (Bozkurt vd., 2020).

1.9.3.1. Dönmeli Akışlı Akışkan Yataklı Kurutucular

Parçacığa dönme hareketi sağlayan dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucular, birçok farklı tasarımda kullanılabilmekte olup gelecekte daha da kullanımının yaygınlaşması beklenmekte olan bir kurutma yöntemidir (Yudin ve Raghavan, 2011).

Ayrıca geleneksel akışkan yatak ile ilgili yaygın sorunların giderilmesini sağlamak için kullanılan gelişmiş yöntemlerden biridir (Francis vd., 2015). Spiral distribütörün dönmeli akışlı akışkan yatakta bir girdap meydana getirmesinden dolayı oluşan parçacık hareketi, dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucuların geleneksel akışkan yataklı kurutuculardan farklı olmasının temel sebebidir (Venkiteswaran vd., 2013).

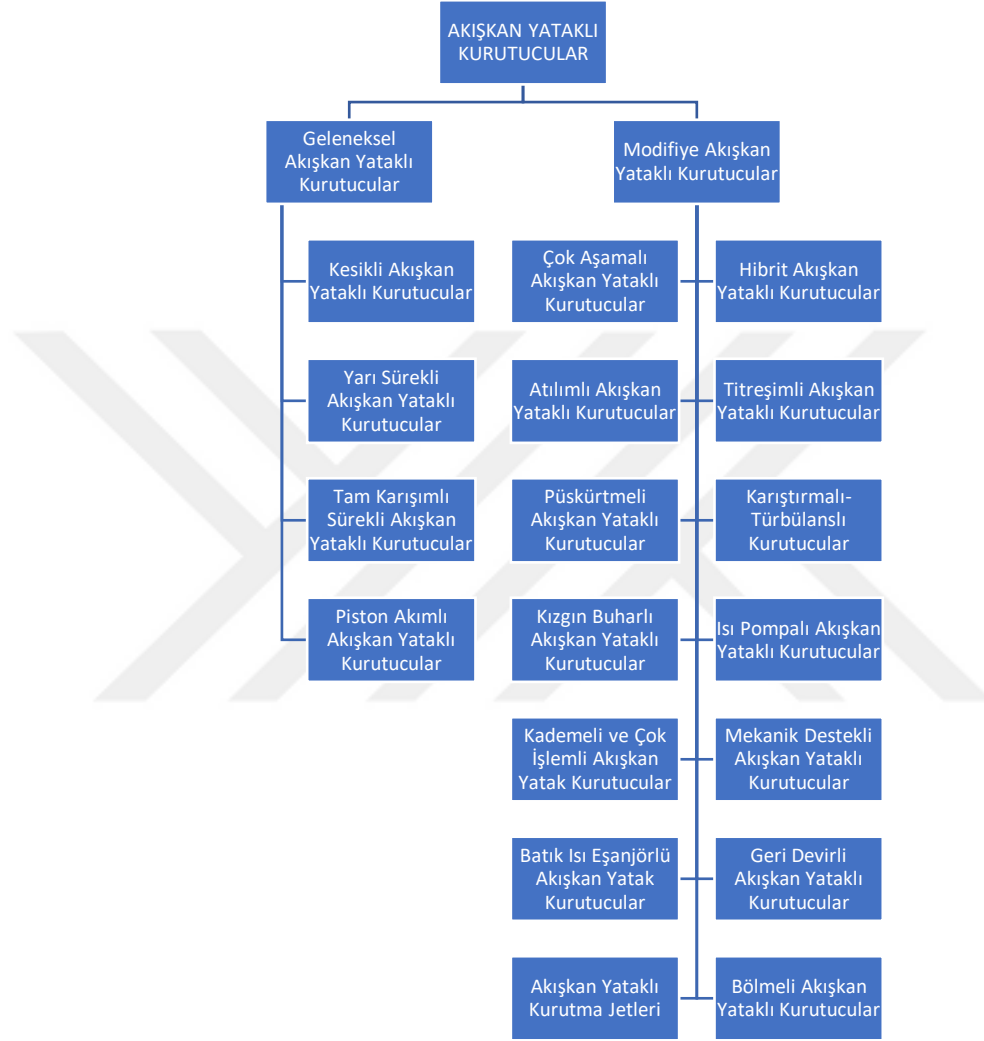
Dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucular, önemli bir yükseklik-çap oranına sahip bir oda, dairesel bir yatak ve eğimli bir gaz enjeksiyonuna sahiptir (Tawfik vd., 2019). Gaz, belli bir eğimle distribütörden geçer. Bunun sonucu olarak yatağa giren gaz yatay ve dikey olarak iki bileşene ayrılır (Kuprianov vd., 2009). Dikey bileşen parçacıklara kaldırma kuvveti uygular ve bu kaldırma kuvveti akışkanlaştırmayı başlatan ana faktördür. Yatay bileşen ise yatak parçacıkları üzerinde dönen bir hareket kuvveti meydana getirir. Katı parçacıkların sınırlı dairesel bir dönme hareketi mevcuttur (Jun vd., 2012).

Bu tip kurutucularda yatak yükü dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Ayrıca yatağın orta kısmında açıl momentum sıfır olduğundan dolayı, meydana gelebilecek ölü bölgeyi engellemek için bir merkez gövde gereklidir (Mohideen Batcha vd., 2012).

Dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutucuların nihai nem oranının, geleneksel kurutma yöntemlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir (Zulkarnain vd., 2019).

1.9.4. Akışkan Yataklı Kurutucuların Sınıflandırılması

Akışkan yataklı kurutucular aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Şekil 5).



Şekil 5. Akışkan yataklı kurutucuların sınıflandırılması

1.9.5. Akışkan Yataklı Kurutucuların Avantajları ve Dezavantajları

Mühendislik uygulamalarında akışkan yataklı kurutucuların önemi oldukça fazladır. Akışkan yataklı kurutmanın faydaları aşağıda sıralanmıştır (Güney, 2007; Temel, 2017; Gürel vd., 2017; Bozkurt vd., 2020; Kaplan, 2012; Kurtuluş, 2007; URL-8, 2021).

- Türbülansın oldukça fazla olması sebebiyle yatak içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı olması
- Ürünün kolayca beslenmesi ve çıkarılması
- Kurutma süresinin kısa olması
- Isı ve kütle transferi verimlerinin yüksek olması
- Otomatik bir şekilde yükleme ve boşaltma imkanı olması
- Yatak sıcaklığının kararlı olması
- Büyük kapasiteli sistemler için kullanışlı olması
- Bakım masraflarının düşük olması
- Isıya duyarlı parçacıkların aşırı ısıtılmasının önlenmesi
- Katı partiküllerin yüksek akıcılık özelliğine sahip olması
- İyi reaktör performansı
- Sıcaklık ve nem kontrolünün kolaylıkla sağlanması
- Düşük son nem içeriğine sahip ürün eldesi

Akışkan yataklı kurutucuların zorlukları aşağıda verilmiştir (Kurtuluş, 2007; Gürel vd., 2017; Bozkurt vd., 2020; Temel, 2017).

- Katı taneciklerin çarpışmasından kaynaklı yatak çeperinde aşınma
- Yüksek basınç düşümü
- Yüksek elektrik enerjisi tüketimi
- Partiküllerin bazılarında görülen iyi olmayan akışkanlaşma kalitesi
- Uzun süre gerektiren deneysel çalışma
- Boru ve kanalların erozyonu
- Sistemi etkileyen birçok parametrenin mevcut olması
- İnce parçacıkların aşınması
- Hızlı karışımlarda katı partiküllerin homojen olmayan şekilleri nedeniyle akışkan yatak performansının düşmesi

1.10. Kurutma Hızını Etkileyen Faktörler

Suyun üründen uzaklaştırılması amaçlanan kurutma işlemi, birçok faktörden etkilenmektedir. Kurutma işleminin hızlı gerçekleşmesi bir nevi ısı ve kütle transfer hızının arttırılmasına bağlıdır (Aksoy, 2019). Isı transferi kurutulacak olan ürünün ısıtılması ile ürünün içerisindeki suyun buharlaşması, kütle transferi ise buharlaşan suyun kurutulacak ürünün yüzeyini terk etmesidir (Uz, 2019). Hem sıvı hem de katı halde bulunabilen nem, üründen uzaklaştırılması için farklı proses koşulları gerektirmektedir (Yokuş, 2014).

Kuruma hızına etki eden en önemli faktörler; sıcaklık, kurutma havasının hızı, kurutulan gıdanın yüzey alanı, ortamın nem içeriği, uygulanan ön işlemler ve ürünün kimyasal bileşimi gibi faktörler sınıflandırılabilir.

1.10.1. Sıcaklık

Kurumanın gerçekleştiği ilk safhalarında, sıcaklık en önemli etkenlerden biridir. Kullanılan sıcak havanın kuru ve yaş termometre sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanır (Banı, 2014). Kullanılan sıcak havanın tek başına kuru termometre derecesi önem taşımaz. Yalnız ıslak ve kuru termometre dereceleri arasında bir fark olmayan havanın da kurutma üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Islak ve kuru termometre derecesi ile kurutma hızı arasında doğru orantılı bir etki vardır (Yokuş, 2014). Ancak bu etki kurutma ilerledikçe aynı şekilde görülmez ve etkisini yitirmeye başlar.

Sıcaklık arttıkça difüzyon hızı artar ve kuruma hızı yükselerek kurutma süresi kısalır. Sıcaklığın yüksek olması ile havanın nem tutma oranı yükselmiş olur (Özen, 2016). Öte yandan sıcaklık düşük ve kurutma sıcaklığı yüksek olur ise ısı transfer hızı o derece etkili olmaktadır (İşsever, 2019).

Aşırı miktarda uygulanan sıcaklık; üründe renk değişimi, çatlama, içe çökme ve yüzeyde deformasyon gibi istenmeyen durumlar oluşturur (Şahin, 2019). Sıcaklığın olması gerekenden düşük tutulması ise kurutma süresini arttıracığından uygun olan yüksek bir sıcaklığın seçilmesi oldukça önemlidir.

1.10.2. Kurutma Havaının Hızı

Gıdaların kuruma hızını etkileyen bir başka etmen de kurutma havaının hızıdır. Kurutucudaki hava, gıdanın yüzeyine nüfuz etmiş olan buhar tabakasını gıda yüzeyinden uzaklaştırarak, bulunan nemin daha kısa bir sürede ayrılmasını sağlar. Kurutucu içerisindeki hava hızı ile ürünün kuruma hızı arasındaki ilişki doğru orantılıdır (Şahin, 2019).

Kurutma sırasında kurutucu havanın bağıl nemi sürekli artış gösterir ancak havanın maksimum nem noktasına yaklaşmasıyla bu artış önemini yitirir (Uz, 2019).

1.10.3. Kurutulan Gıdanın Yüzey Alanı

Kuruma hızını etkileyen en önemli faktörlerden biri kurutulan gıdanın yüzey alanıdır. Kurutulacak gıdanın yüzey alanı, ısı ve kütle transferine etki eden bir değişkendir. Isı transferini daha geniş bir yüzeyde gerçekleştirmek için ürünün yüzey alanının büyütülmesi gerekir (Özen, 2016).

Kuruma hızı; ürünün yüzey alanı ile doğru orantılı iken kalınlıkları ile ters orantılıdır. Kurutulacak ürün boyutu ne kadar küçükse, yüzey alanı o kadar fazla ve kalınlığı da o kadar az olacağından kurutma daha hızlı gerçekleşir (İşsever, 2019). Bu nedenle ürün küçük parçalara ayrılmalı ya da ince dilimlenmelidir.

Ürünün parçacıklar haline getirilmesi her zaman olası değildir. Bazı ürünlerin kullanım alanı ve yapısı ürünün bütün halde kurutulmasını gerektirir (İşsever, 2019). Aynı zamanda ürünün çok ince dilimler haline getirilmesi ile gıdanın yanması mümkün olabileceğinden, optimum dilim kalınlığının iyi belirlenmesi gerekir (Engür, 2019).

1.10.4. Ortamın Nem İçeriği

Ortamda bulunmakta olan su buharı miktarına göre kurutulacak olan ürünün içerisindeki nem miktarı değişim göstermektedir (Aksoy, 2019). Maddedeki nem değişimi, ortamın neminin azaltılması ve artırılmasında farklı karakteristik özellikler kazanır (Yokuş, 2014). Ürünün nem alması adsorpsiyon, nemini kaybetmesi ise desorpsiyon olarak adlandırılır (Özen, 2016).

Sabit sıcaklıkta, kurutma işlemi yapılacak olan ürünün içerisinde bulunduğu havanın nem miktarının değiştirilmesi ile ürünün içerdiği nem miktarının değişikliğini ifade eden eğrilere “sorpsiyon izotermi” adı verilir (Aksoy, 2019).

Desorpsiyonun, adsorpsiyonla aynı yolu izlemeyip, başka bir yoldan giderek bombe yapması histeriks olayı olarak adlandırılır. Desorbsiyon histeriksi; genel olarak monomoleküllü su katmanının başlangıcında son bulur (Özen, 2016).

A bölgesinde su, ürünün yüzeyinde tek bir molekül suyu sıkıca hapseder. Bu bölgedeki su sıvı halde bulunmamaktadır ve uzaklaştırılması güçtür. B bölgesindeki su molekülleri, A bölgesine göre daha serbest haldedir. C bölgesinde bulunan su ise serbest su özelliğine sahip olup kurutma esnasında basitçe ayrılabilir (Özen, 2016; Aksoy, 2019).

1.11. Çalışmanın Önemi ve Amacı

Kurutma işlemi, kaliteli ve sağlık açısından güvenilir gıda ürünlerinin temin edilmesi için geliştirilen en eski muhafaza yöntemi olarak bilinir. Günümüzde var olan birçok çeşitli kurutma sistemi mevcuttur. Kurutma sistemlerinin geliştirilmesinde yapılan çalışmaların amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kurutma süresinin kısılması
- Enerji tüketiminin düşmesi
- Yüksek ürün kalitesinin elde edilmesi
- Kurutma proseslerinin teorisinin geliştirilmesi
- Yeni hibrit kurutma teknolojilerinin hayata geçilmesi

Bu kapsamda, kurutma teknolojisi için yeni bir yöntem olan dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi ışınlı kurutma işleminin ilk defa yeşil çayın kurutulması, kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi, yeşil çayın kalite parametrelerine etkisinin ortaya konması ve matematiksel modellemesinin yapılması tezin önemini ortaya koymaktadır.

Bu düşünceler doğrultusunda bu çalışmanın amacı, ürünlerin kurutulmasında zaman kaybı, enerji tüketimi ve gıda kalitesi bakımından olumsuzluklar meydana gelmesi, bu olumsuzlukların tespit edilmesi, ortadan kaldırılması için kızılötesi ışınlı kurutma yöntemi ile yeşil çayın 22 farklı matematiksel model ve 14 farklı değerlendirme kriteri kullanılarak modelleme yapmaktır. Ayrıca Rize ilinin çok önemli bir gıda ürünü

olan yeşil çayın 5 farklı kıızılötesi ışıının gücü ile kurutma koşulları, kurutma performansı ve gıda kalite analizi neticesinde en iyi kurutma modeli belirlenerek, yeşil çayın kıızılötesi ışıınımlı kurutma davranışının deneysel olarak incelenerek ve literatürde ince tabaka kurutma için verilen kurutma davranışı modelleri dikkate alınarak modellenmesidir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Ülkemizin bilhassa Rize ilinin oldukça önemli bir gıda ürünü olan yeşil çayın farklı kurutma enerjilerindeki etkileri, kurutma esnasında oluşan zaman kaybı, harcanan enerji ve ürün kalitesi açısından oluşabilecek olumsuzlukların belirlenmesi için teorik, yapılacak deneysel çalışmalar ve deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler kullanılarak 22 farklı matematiksel model ile analiz edilerek kurutma performansı belirlenecektir.

2.1. Materyal

Kurutma deneylerinde yeşil çay (*Camellia sinensis*) materyal olarak kullanılmıştır (Şekil 6). Kurutma denemelerinde kullanılacak olan yeşil çay yaprakları, eylül ayında Rize ilinden temin edilmiş olup kurutma denemelerinde kullanılıncaya kadar sapları ayıklanarak + 4°C sıcaklıkta buzdolabı koşullarında muhafaza edilmiştir. Tedariği edilen yeşil çay yaprakları Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü İDEA-L Dizayn İnovasyon laboratuvarına getirilmiş ve kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Çalışmada kullanılan yeşil çay örneği

2.2.Yöntem

2.2.1. Deney Seti

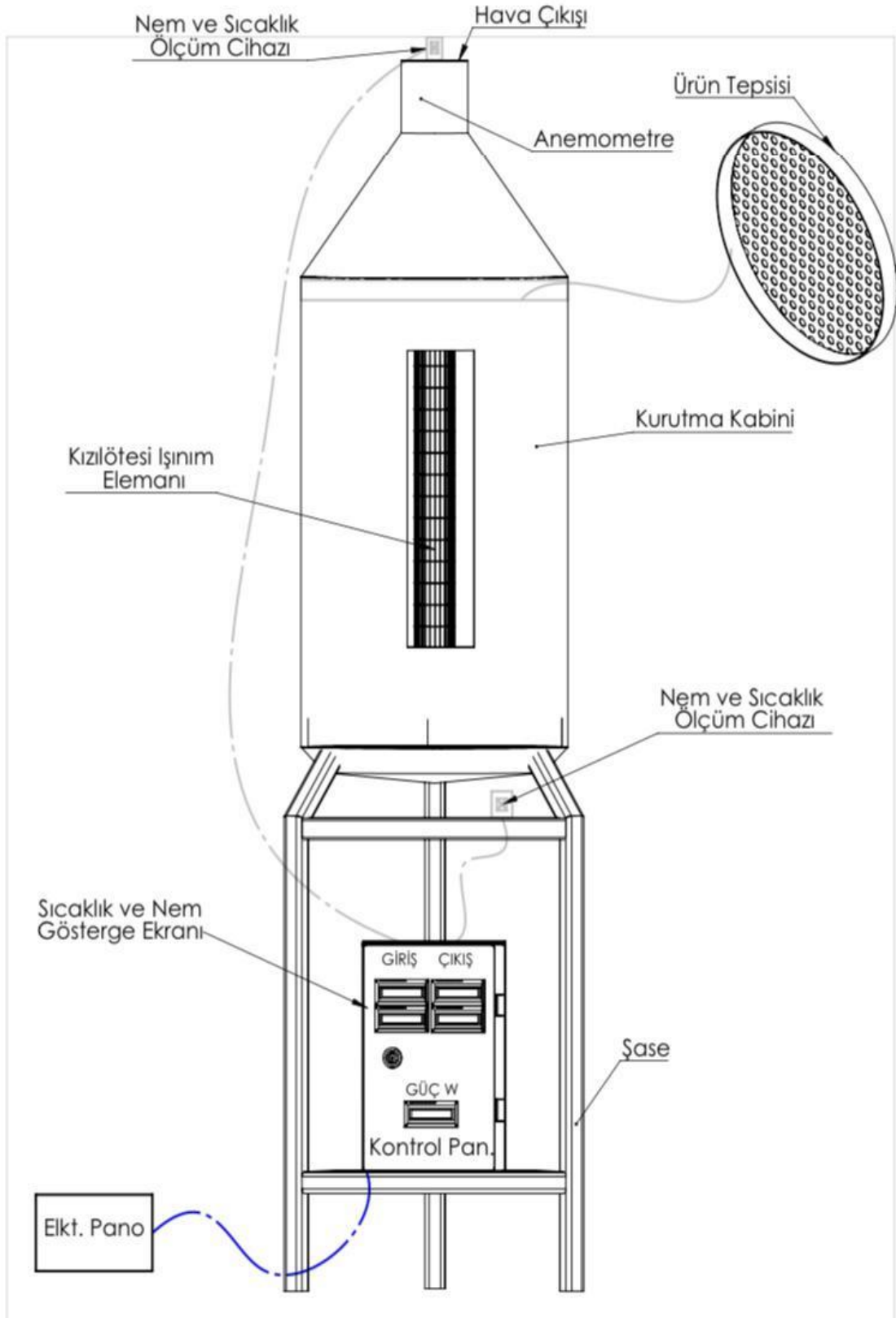
Sabit yatak ve dönmeli akışlı akışkan yatak deneylerinin gerçekleştirildiği, tasarlanıp imal edilmiş olan deney düzeneğinin genel görünüşü Şekil 7’de, deneyler sırasında alınan görüntüler Şekil 8’de verilmiştir. Her iki deney düzeneği için şematik görünüş Şekil 9 ve 10’da verilmiştir.



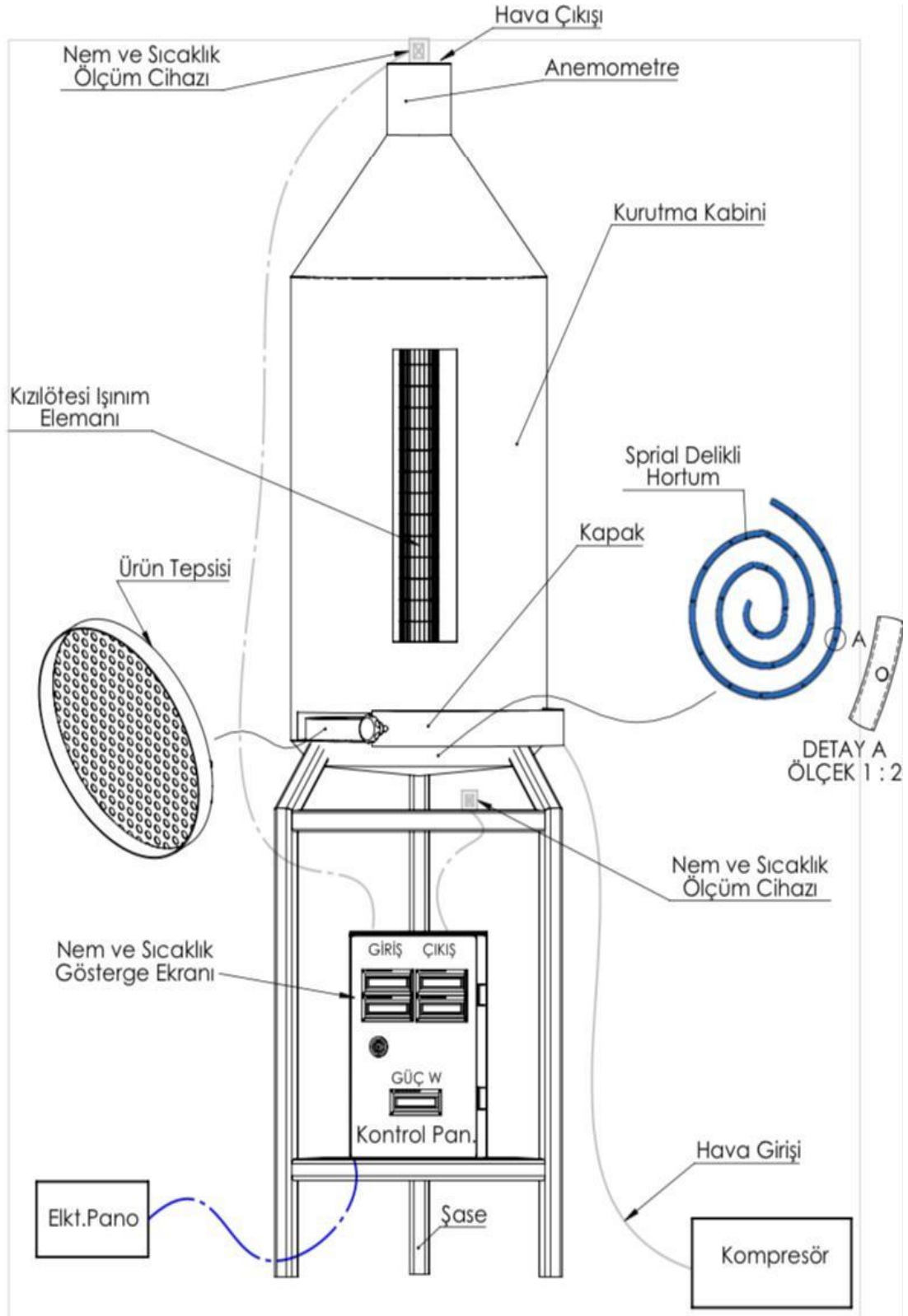
Şekil 7. Deney düzeneğinin genel görünüşü



Şekil 8. Deney sırasında alınan görüntüler



Şekil 9. Sabit yatak kurutma sistemi şeması



Şekil 10. Dönmeli akışlı akışkan yatak kurutma sistemi şeması

2.2.2. Çalışmada Kullanılan Ölçüm Aletleri

Kızılötesi ısıtım ile kurutma denemeleri, 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W güç seviyelerinde, özel olarak tasarlanıp imal edilen prototip kurutma makinesinde gerçekleştirildi. Ağırlık ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için 1 g hassasiyetinde TEM marka ETEKOTER+LCD/00/00 plastik çukur kefe tartım terazi kullanıldı (Şekil-11a). Ortam sıcaklık ve nem ölçümünde kullanılan EMKO Pronem Mini PMI-P Sıcaklık ölçüm aralığı $-20/80^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,1$) , Nem ölçüm aralığı $\%0-\%100$ ($\pm \%2$) kullanılmıştır (Şekil-11b). Nem ve sıcaklık ölçüm değerlerini okumak için Çetinkaya Abs Opak Ip65 300X400X165mm Çp 5003 Elektrik panosuna EMKO marka ESM-3723 76X34,5X71mm boyutlarındaki ve -40°C ile $+85^{\circ}\text{C}$ / 0°C ile $+50^{\circ}\text{C}$ depolama ve çalışma sıcaklığındaki Dijital Sıcaklık + Nem Kontrol Cihazı montaj edildi (Şekil-11c). Kademeli adaptör sayesinde istenilen kızılötesi ısıtım güç seviyesine getirildi (Şekil-11d). WellHise marka PM-004+ LCD arayüzü sayesinde gözlemlenmek istenilen ölçüm değeri ayarlandı (Şekil-11e). 60 mm çapında, maksimum 910 mm teleskopik tutucuya sahip $0/60^{\circ}\text{C}$ çalışma sıcaklığı ve $0.25/20$ m/sn ($\pm(0.1$ m/sn +1.5%) ölçüm aralığı olan Testo 435 akış hızı probu kullanılmıştır (Şekil-11f). 220X74X46 mm boyutlarında, çalışma sıcaklığı $-20/+50^{\circ}\text{C}$ ve saklama sıcaklığı $-30/+70^{\circ}\text{C}$ olan Testo 435 ölçüm cihazı ile hava hızı değeri alınmıştır (Şekil-11g). Alrra marka K101/Y tip cihaz ile nem ayarı yapıldı (Şekil-11h).



(a)



(b)

Şekil 11. Çalışmada Kullanılan Ölçüm Cihazları (a) Terazi (b) Sıcaklık-Nem ölçüm (c) Elektrik panosu (d) Kademeli adaptör (e) Ölçüm ayar cihazı (f) Akış hızı probu (g) Anemometre (h) Nem ayar cihazı



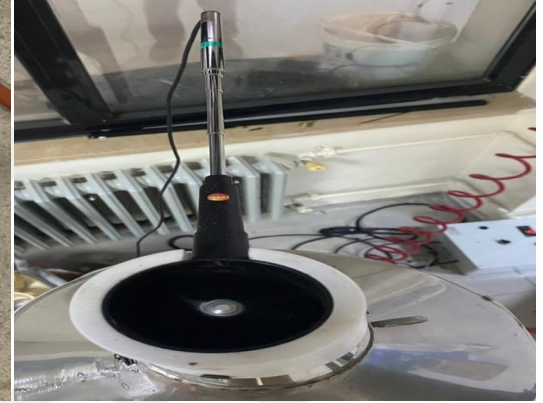
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 11 (devamı). Çalışmada Kullanılan Ölçüm Cihazları (a) Terazî (b) Sıcaklık-Nem ölçüm (c) Elektrik panosu (d) Kademeli adaptör (e) Ölçüm ayar cihazı (f) Akış hızı probu (g) Anemometre (h) Nem ayar cihazı

2.2.3. Yeşil Çay Kurutma Yöntemi

Çay tarlasından toplanmış taze yeşil çay yaprakları kurutulmak üzere 50 ± 1 gr olacak şekilde numuneler seçildi. İmal edilmiş olan ürün tepsisine her tarafına eşit gelecek şekilde yeşil çay yaprakları yerleştirildi. Herhangi bir akışkan hareketi olmaksızın doğal taşınım ile gerçekleştirilen sabit yatak kurutma deneylerinde ürün tepsisi, gövdenin tam ortasında bulunan ısıtıcıdan gelen sıcak havanın yukarıya doğru hareket etmesi nedeniyle yeşil çay yapraklarına daha kısa sürede nüfuz etmesi ve deney süresinin daha kısa sürede tamamlanması için üst kapak ve gövde arasında yerleştirilmiştir. Kompresör yardımıyla akışkan hareketi sağlanan, zorlanmış taşınım ile gerçekleştirilen dönmeli akışlı akışkan yatak deneylerinde ise ürün tepsisi, alt kapak ve gövde arasına yerleştirilmiştir. Dönmeli akışlı akışkan yatak deneylerinde, deney başlangıcında hava hızı ortalama 5 m/s'de tutulurken bu değer deney ortalarında 4,5 m/s ve deney sonunda ise bu değer 4 m/s'ye düşürülmüştür. Numunelerin ağırlıklarında çok fazla bir değişimin gözlenmediği ana kadar denemelere devam edilmiştir.

Yapılan her iki deney türünde de 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W kısıllötesi güçlerinde gerçekleştirilen denemeler boyunca belirlenen düzenli zaman aralıklarında yeşil çay yaprakları hassas terazi ile tartımları yapılmış ve ağırlıklarında meydana gelen değişimler kaydedilmiş olup, Statistica programı kullanılarak 22 farklı matematiksel kurutma modeline tabi tutularak seçilen en iyi 5 model için MR-Zaman grafikleri çizilmiştir.

2.3. Matematiksel Modelleme

Mühendislik uygulamalarındaki yeri oldukça önemli olan matematiksel modelleme, nem içeren ürünün kuruması esnasında gereken süreyi tespit etme ve kuruma sürecini analiz etme için kullanılmaktadır (Kucuk vd., 2014). Modelleme ürün içerisindeki sıcaklık ve nem dağılımlarını gösteren ifadeleri doğru olarak oluşturmaktadır. Matematiksel modellerin içerisinde var olan, ürünün kurutma süresini tahmin etmesini ve kurutma eğrilerine ulaşılmasını sağlayan ince tabaka kuruma modeli, diğer karmaşık teorik modellerdeki verilere gerek duymaması ve kolay kullanımı gereğiyle oldukça geniş bir kullanıma sahiptir (Çakmak vd., 2016).

Farklı ince tabaka modellerinin deneysel kuruma eğrileriyle uyumları incelenmiş olup, farklı kızılötesi güçlerle kurutulan yeşil çay örneklerinin kurutma hızı katsayıları hesaplanmıştır. Yaptığımız bu çalışmada kurutma işlemi esnasında alınan zamana bağlı nem oranı değerlerini en iyi tanımlayan matematiksel modeli belirlemek için literatürde var olan 22 farklı teorik ince tabaka denklemi incelenmiştir. Kullanılmış olan 22 adet matematiksel modelleme denklemleri Tablo 6’da gösterilmiştir (Kucuk vd., 2014; Şimşek vd., 2021).

Tablo 6. Matematiksel modellemede kullanılan model denklemleri

No	Model Adı	Model Denklemi	Denklem Sabiti	Denklem Numarası
1	Newton Lewis	$MR=\exp(-kt)$	k	(1)
2	Page	$MR=\exp(-kt^n)$	k, n	(2)
3	Modifiye Page	$MR=\exp(-(kt)^n)$	k, n	(3)
4	Modifiye Page - I	$MR=\exp((-kt)^n)$	k, n	(4)
5	Modifiye Page - II	$MR=\exp\left(-c\left(\frac{t}{L^2}\right)^2\right)$	c, L, n	(5)
6	Henderson ve Pabis	$MR=a \exp(-kt)$	a,k	(6)
7	Logaritmik	$MR=a \exp(-kt) + c$	a,k,c	(7)
8	Midilli-Kucuk	$MR=a \exp(-kt^n) + bt$	a,k,n,b	(8)
9	Demir vd.	$MR=a \exp(-kt)^n + b$	a,k,n,b	(9)
10	İki Terimli	$MR= a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	a,k ₀ ,b,k ₁	(10)
11	İki Terimli Eksponansiyel	$MR= a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kat)$	a,k	(11)
12	Verma vd.	$MR= a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-gt)$	a,k,g	(12)
13	Difüzyon Yaklaşımı	$MR=a \exp(-kt)+(1 - a)\exp(-kbt)$	a,k,b	(13)
14	Modifiye Henderson ve Pabis	$MR=a \exp(-kt) + b \exp(-gt)+c \exp(-ht)$	a,k,b,g,c, h	(14)
15	Wang ve Singh	$MR=1+at+bt^2$	a,b	(15)

Tablo 6 (devamı). Matematiksel modellemede kullanılan model denklemleri

No	Model Adı	Model Denklemleri	Denklem Sabiti	Denklem Numarası
16	Hii vd.	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$	a,k,n,c,g	(16)
17	Basitleştirilmiş Fick Difüzyon (SFFD)	$MR = a \exp\left(-c \left(\frac{t}{L^2}\right)\right)$	a,c,L	(17)
18	Weibull	$MR = \exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right)$	a,b	(18)
19	Aghbashlo vd.	$MR = \exp\left(-\frac{k_1 t}{1+k_2 t}\right)$	k ₁ ,k ₂	(19)
20	Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	a,b,c	(20)
21	Balbay ve Şahin	$MR = (1 - a) \exp(-kt^n) + b$	a,k,n,b	(21)
22	Alibas (Modifiye MidilliKucuk)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt + g$	a,k,n,b,g	(22)

2.4. Değerlendirme Kriteri

Deneysel verilerin değerlendirilmesi yapılırken modellemede elde edilen belirleme katsayısı (R^2) değerinin en yüksek olması, azaltılmış ki kare (χ^2), standart tahmini hata (SSE) ve ortalama karesel hata (RMSE) değerlerinin en düşük olması ürünün kuruma karakteristiğini tanımlayan en iyi model olacaktır. Ürünlerin kurutma eğrilerinin tanımlanmasında seçilen en iyi modelin regresyon katsayısının yüksek olması ana kriter olarak kabul edilir. Bu katsayının sayısal değerinin olabildiğince “1,00”e yakın olması gerekmektedir (Arkain, 2021).

Yapılan çalışma neticesinde Hii vd., Aghbashlo vd., Midilli-Kucuk, Modifiye Midilli-Kucuk, Balbay ve Şahin, Parabolic ve Wang ve Singh modellerinin dikkate alınan kriterlerle yeşil çay örneklerinin kurutma kinetiği davranışını en iyi temsil ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Literatürde var olan 14 adet ince tabakalı kuruma eğrisi denklemlerinin değerlendirme kriterleri Tablo 7’de gösterilmiştir (Kucuk vd., 2014; Şimşek vd., 2021).

Tablo 7. Matematiksel modelleme kuruma eğrisi değerlendirme kriteri denklemleri

No	Değerlendir-me Parametreleri	Denklem	Dnk. No
1	Korelasyon Sayısı	$r = \frac{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})(MR_{exp,i}) - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})}{\sqrt{N \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})^2 \right)}}$	(23)
2	Toplam Kareler Toplamı	$SST = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{avg})^2$	(24)
3	Standart Tahmini Hata	$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$	(25)
4	Kalanların Kareleri Toplamı	$RSS = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$	(26)
5	Belirleme Katsayısı	$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$	(27)
6	Düzeltilmiş R^2	$R^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N-1}{N-k-1}$	(28)
7	Azaltılmış Ki-Kare	$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-n}$	(29)
8	Ortalama Karasel Hata	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}}$	(30)
9	Residuals	$residuals = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})$	(31)
10	Modelleme Verimliliği	$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,ave})^2 - \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,ave})^2}$	(32)
11	Tahmini Standart Hata	$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{cal,i})^2}{N - n_p}}$	(33)
12	İndirgenmiş Kare Hata	$RSSE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{cal,i})^2}{N}$	(34)
13	Ortalama Sapma Hata	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})}{N}$	(35)
14	Ortalama Göreli Yüzde Hata	$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ MR_{exp,i} - MR_{pre,i} }{MR_{exp,i}}$	(36)

2.5. Kalite Parametreleri

Su Ekstrakt Analizi: Suda çözünür madde miktarı olarak tanımlanan su ekstraktı değeri, çay yaprağının ve bu yapraktan üretilen yeşil ya da siyah çayın kalitesiyle doğru orantılıdır. Yani çay yaprağındaki su ekstraktı değeri ne kadar yüksekse çay yaprağının kalitesi de o oranla yüksektir. Çay standartlarına göre; siyah çaydaki su ekstrakt değerinin en az %29 olması gerekirken, bu değer yeşil çay da ise en az %32'dir (Turan vd., 2016). Çaydaki su ekstraktı analizi denklem 37 ile gösterilmiştir (URL-9, 2021).

$$\% \text{ Ekstrakt} = \frac{(m_0 w)(m_1 100)}{(m_0 w)} * 100 \quad (37)$$

Burada;

m_0 : Başlangıçta alınan numune miktarı, g

m_1 : Kurutulmuş çözünmeyen kısım, kalıntı, g

w: Numunenin kütlece yüzde olarak ifade edildiği kuru madde içeriği

Toplam Kül Miktarı: Belli bir miktar numunenin yakılıp küllendirildikten sonra geriye kalan yanmayan kısım miktarıdır. Toplam kül miktarı, yeşil ve siyah çayda %4-8 arasında olması beklenir (Turan vd., 2016). Toplam kül miktarı denklem 38'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (URL-9, 2021).

$$\% \text{ Total kül} = \frac{100 * \text{Külün ağırlığı}}{\text{Kuru Madde}} \quad (38)$$

Burada;

Külün Ağırlığı : (Kroze darası+numune) - Kroze darası

Kuru Madde: (Başlangıç numunesinin ağırlığı)x (% Kuru madde)

% Kuru Madde: 100- Rutubet

Polifenol: Çaya aroma katan bileşiklerin en önemlisi olan polifenollerin, çaydaki içeriğinin yüksek olması istenir. Klondan yetiştirilen çay bitkisinin yaşlı yaprağında bulunan toplam polifenol miktarı, tohumdan üretilen çay yaprağında bulunan toplam

polifenol miktarından daha yüksektir (Turan vd.,2016). Yeşil çaydaki toplam polifenol içeriği %21-33 arasında değişmektedir (Yashin vd., 2015).

Kafein: Çaya aranan bir içecek olma özelliğini veren madde kafeindir. Yaprığın siyah çaya dönüşmesi aşamasında kafein miktarında artış gözlemlenir (Turan vd., 2016). Kaliteli bir çay yaprağındaki kafein miktarının yüksek olması beklenir.

Ham Lif İçeriği(Selüloz) Tayini: Yaşlı çay yapraklarındaki selüloz miktarı, genç yapraklardaki selüloz miktarından fazladır (Turan vd., 2016). Kaliteli bir çay yaprağındaki selüloz miktarının düşük olması beklenir.

Rutubet Tayini: Rutubet tayini hesaplaması denklem 39'da verilmiştir (URL-9, 2021).

$$K = (m_0 - m_1) * \frac{100}{m_0} \quad (39)$$

Burada;

K: Kayıp %

m_0 : Deney numunesi, g

m_1 : Kurutulmuş deney numunesi, g

2.6. Kurutma Formülleri

Yapılmış olan çalışmanın önemli birer parametresi olan boyutsuz kütle oranı, nem içeriği, kütle büzülme oranı ve kurutma hızı aşağıda tanımlanmıştır (Midilli vd., 1999; Kucuk vd., 2014; Şimşek vd., 2021).

Boyutsuz Kütle Oranı

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (40)$$

MR: Boyutsuz kütle oranı

M_t : "t" anındaki kütle (kg)

M_e : Kuru kütle (kg)

M_i : Ürünün ilk kütlesi (kg)

Nem İçeriği

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

M_t : t anındaki kütle (kg)

M_i : t=0 anındaki kütle (kg)

Kütle Büzülme Oranı

$$S_{mr} = \frac{M_t}{M_i} \quad (42)$$

Kurutma Hızı

$$DR = -\frac{dM}{dt} = -\frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (43)$$

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

d_t : zaman aralığı

2.7. Hata ve Belirsizlik Analizi

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen deneysel veriler için ölçülen değerlerin doğruluğu oldukça önem arz etmektedir. Doğruluğu etkileyen en önemli etken ise, deneyin yapılması sırasında çeşitli nedenlerden dolayı oluşabilecek hatalardır. Yapılan deneysel çalışmada hatalar parametrelerin ölçümü, imalattan kaynaklı ve gözlemden dolayı olabilir.

Tespit edilmesi gereken büyüklük R, bu büyüklüğe etki eden n tane bağımsız değişkenler (ölçülen parametre) $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ olmak üzere, fonksiyon $R = R(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ şeklinde yazılabilir. Deneylerde etki eden her bir bağımsız değişkene ait hataları; $\pm W_{x1}$,

$\pm W_{X_2} \pm W_{X_3}, \dots, \pm W_{X_n}$ ise R büyüklüğünün toplam belirsizliği $\pm W_R$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Midilli vd., 1999; Doğru vd., 2002; Şimşek vd., 2021).

$$W_R = \pm \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} W_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (44)$$

(a1) Deneyler sırasında kütle, güç ve zaman ölçümlerinden dolayı hata = $\pm 1,5$ g, $\pm 0,5$ W, ± 0.001 dak.

(a2) Kütle, güç ve zaman değerlerinin okunmasından dolayı hata = ± 0.01 g, ± 0.005 W, ± 0.00001 dak.

$$WR = [(a1)^2 + (a2)^2 + \dots]^{1/2} = \% 2,001 \quad (45)$$

olarak belirlendi.

3. BULGULAR

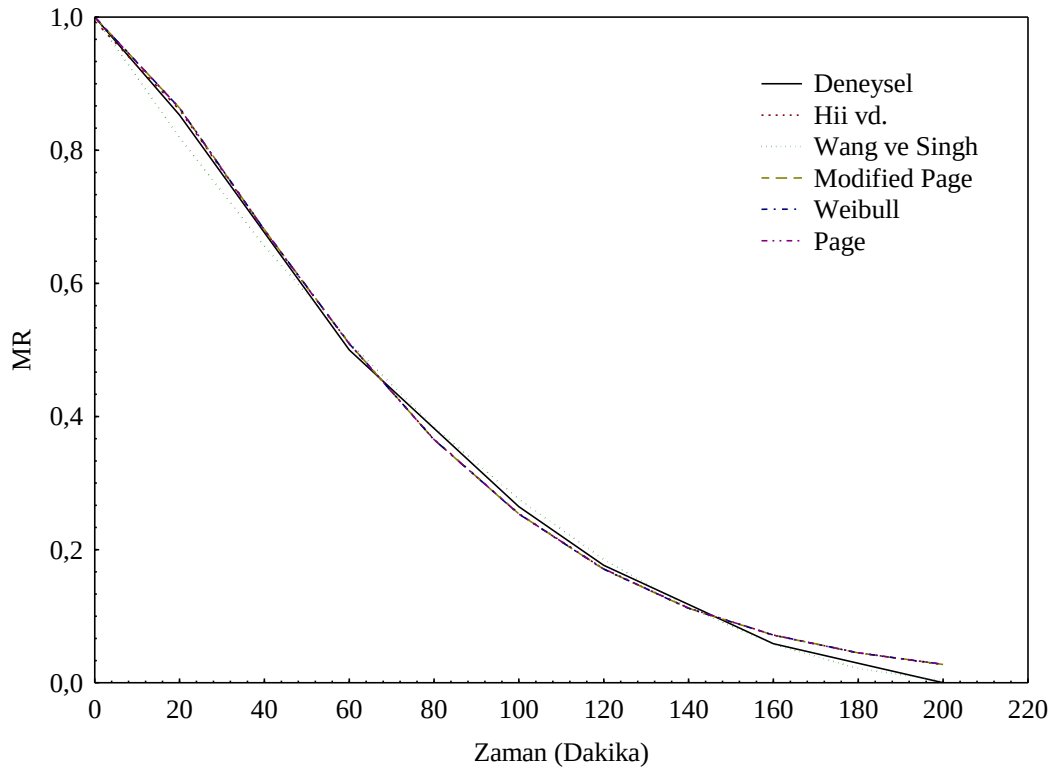
3.1. Sabit Yatakta Yeşil Çay Kurutma

Yapılan sabit yatakta yeşil çay kurutma deneyleri için gerçekleştirilen tüm hesaplar, veriler ve matematiksel modelleme neticesinde 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W değerlendirme kriterleri tablolarında verilmiştir. Tablolarda elde edilen sonuçlara göre değerlendirme kriterleri ile seçilen en iyi 5 model için MR–Zaman grafikleri çizilmiştir ve en iyi kurutma modeli belirlenerek model katsayılarıyla formülize edilmiştir.



Tablo 8. 100 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	R ²	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,99324	0,03511	15,84689	0,99778	0,00351	0,99754	0,05649	-0,04038	0,00351	0,00319	0,00367	1,17554
Page	0,99931	0,00358	15,84689	0,99977	0,00040	0,99972	0,01805	-0,04164	0,00040	0,00033	0,00379	0,26528
Modified Page	0,99931	0,00356	15,84689	0,99978	0,00040	0,99972	0,01800	-0,04141	0,00040	0,00032	0,00376	0,26744
Modified Page-I	-	-	15,84689	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99931	0,00357	15,84689	0,99977	0,00045	0,99968	0,01801	-0,04144	0,00045	0,00032	0,00377	0,26744
Henderson ve Pabis	0,99098	0,04412	15,84689	0,99722	0,00490	0,99652	0,06333	-0,13551	0,00490	0,00401	0,01232	1,08406
Logarithmic	-	-	15,84689	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Midilli-Kucuk	0,99989	0,00026	15,84689	0,99998	0,00004	0,99997	0,00484	-0,00124	0,00004	0,00002	0,00011	0,08901
Demir vd.	0,99829	0,00412	15,84689	0,99974	0,00059	0,99957	0,01935	0,00000	0,00059	0,00037	0,00000	0,40281
Two-Term	0,99104	0,04469	15,84689	0,99718	0,00638	0,99530	0,06374	-0,13761	0,00638	0,00406	0,01251	1,08546
Two-Term	0,99316	0,03577	15,84689	0,99774	0,00397	0,99718	0,05703	-0,04220	0,00397	0,00325	0,00384	1,18491
Exponential												
Verma vd.	0,99902	0,00547	15,84689	0,99965	0,00068	0,99951	0,02230	-0,05192	0,00068	0,00050	0,00472	0,29406
Approximation of Diffusion	0,99903	0,00557	15,84689	0,99965	0,00070	0,99950	0,02249	-0,05290	0,00070	0,00051	0,00481	0,29330
Modified Henderson ve Pabis	0,99100	0,04414	15,84689	0,99721	0,00883	0,99304	0,06335	-0,13560	0,00883	0,00401	0,01233	1,08468
Wang ve Singh	0,99933	0,00288	15,84689	0,99982	0,00032	0,99977	0,01617	0,02977	0,00032	0,00026	0,00271	0,23481
Hii vd.	0,99935	0,00285	15,84689	0,99982	0,00048	0,99964	0,01610	-0,03262	0,00048	0,00026	0,00297	0,26875
Simplified Fick's diffusion	-	-	15,84689	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weibull	0,99931	0,00357	15,84689	0,99977	0,00040	0,99972	0,01801	-0,04145	0,00040	0,00032	0,00377	0,26744
Aghbashlo vd.	0,99613	0,01992	15,84689	0,99874	0,00221	0,99843	0,04256	0,03556	0,00221	0,00181	0,00323	0,85141
Parabolic	0,99939	0,00148	15,84689	0,99991	0,00018	0,99987	0,01159	0,00000	0,00018	0,00013	0,00000	0,24366
Balbay ve Şahin	0,99989	0,00026	15,84689	0,99998	0,00004	0,99997	0,00489	0,00045	0,00004	0,00002	0,00004	0,09391
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99989	0,00026	15,84689	0,99998	0,00004	0,99997	0,00485	-0,00163	0,00004	0,00002	0,00015	0,08856

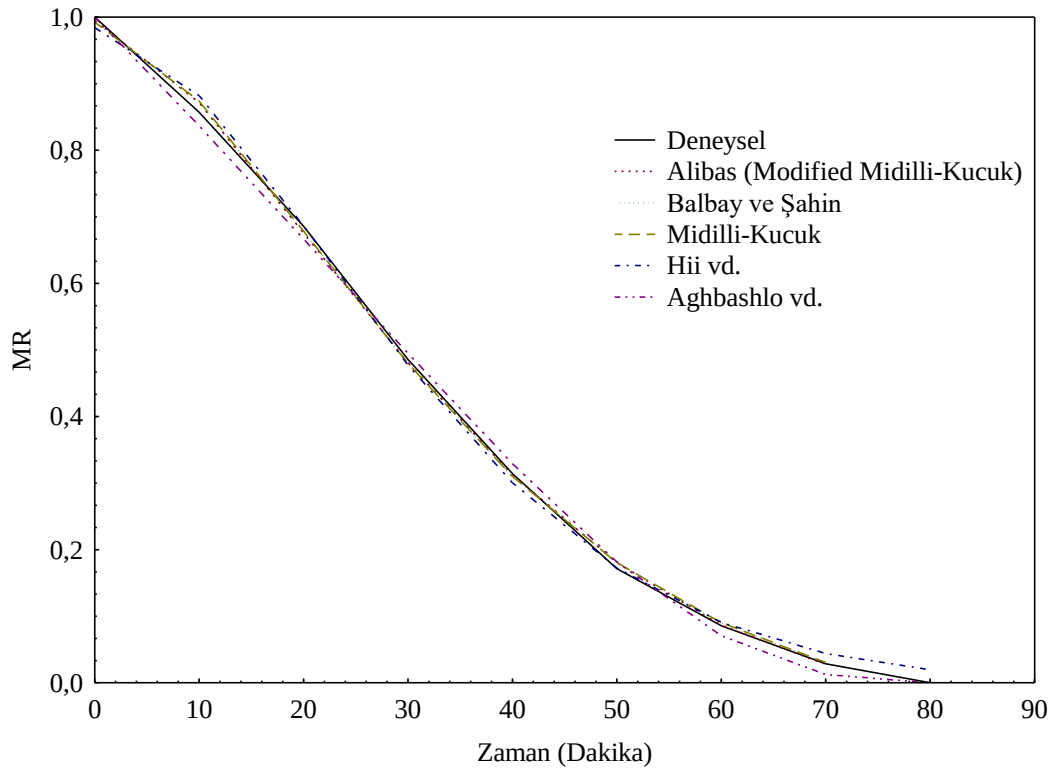


Şekil 12. Yeşil çay 100 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 8’de 100 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Hii vd. modeli olmuştur. Şekil 12’de ise yeşil çay için 100 W kızılötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Tablo 9. 250 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	R ²	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,98355	0,06494	12,43945	0,99478	0,00812	0,99403	0,08495	-0,02523	0,00812	0,00722	0,00280	2,01410
Page	0,99917	0,00462	12,43945	0,99963	0,00066	0,99950	0,02266	-0,04992	0,00066	0,00051	0,00555	0,32520
Modified Page	0,99918	0,00480	12,43945	0,99961	0,00069	0,99949	0,02309	-0,05168	0,00069	0,00053	0,00574	0,32226
Modified Page-I	-	-	12,43945	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99918	0,00476	12,43945	0,99962	0,00079	0,99939	0,02299	-0,05125	0,00079	0,00053	0,00569	0,32469
Henderson ve Pabis	0,97956	0,07528	12,43945	0,99395	0,01075	0,99193	0,09146	-0,15241	0,01075	0,00836	0,01693	1,95384
Logarithmic	0,99495	0,01123	12,43945	0,99910	0,00187	0,99856	0,03532	-0,00002	0,00187	0,00125	0,00000	0,86910
Midilli-Kucuk	0,99973	0,00061	12,43945	0,99995	0,00012	0,99990	0,00821	-0,00098	0,00012	0,00007	0,00011	0,19923
Demir vd.	0,99495	0,01123	12,43945	0,99910	0,00225	0,99819	0,03532	0,00000	0,00225	0,00125	0,00000	0,86909
Two-Term	0,97956	0,07528	12,43945	0,99395	0,01506	0,98790	0,09146	-0,15241	0,01506	0,00836	0,01693	1,95384
Two-Term Exponential	0,98343	0,06558	12,43945	0,99473	0,00937	0,99297	0,08536	-0,02662	0,00937	0,00729	0,00296	2,02172
Verma vd.	0,98355	0,06494	12,43945	0,99478	0,01082	0,99165	0,08495	-0,02523	0,01082	0,00722	0,00280	2,01410
Approximation of Diffusion	0,99737	0,01389	12,43945	0,99888	0,00231	0,99821	0,03928	-0,08226	0,00231	0,00154	0,00914	0,69101
Modified Henderson ve Pabis	0,97956	0,07528	12,43945	0,99395	0,02509	0,97579	0,09146	-0,15242	0,02509	0,00836	0,01694	1,95384
Wang ve Singh	0,99638	0,01434	12,43945	0,99885	0,00205	0,99846	0,03992	0,06553	0,00205	0,00159	0,00728	0,75197
Hii vd.	0,99929	0,00264	12,43945	0,99979	0,00066	0,99943	0,01712	-0,02896	0,00066	0,00029	0,00322	0,32232
Simplified Fick's diffusion	-	-	12,43945	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weibull	0,99918	0,00480	12,43945	0,99961	0,00069	0,99949	0,02309	-0,05168	0,00069	0,00053	0,00574	0,32226
Aghbashlo vd.	0,99932	0,00296	12,43945	0,99976	0,00042	0,99968	0,01814	0,03575	0,00042	0,00033	0,00397	0,32252
Parabolic	0,99676	0,00721	12,43945	0,99942	0,00120	0,99907	0,02831	0,00000	0,00120	0,00080	0,00000	0,68022
Balbay ve Şahin	0,99974	0,00058	12,43945	0,99995	0,00012	0,99991	0,00801	0,00026	0,00012	0,00006	0,00003	0,19179
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99980	0,00046	12,43945	0,99996	0,00011	0,99990	0,00712	-0,00134	0,00011	0,00005	0,00015	0,14816

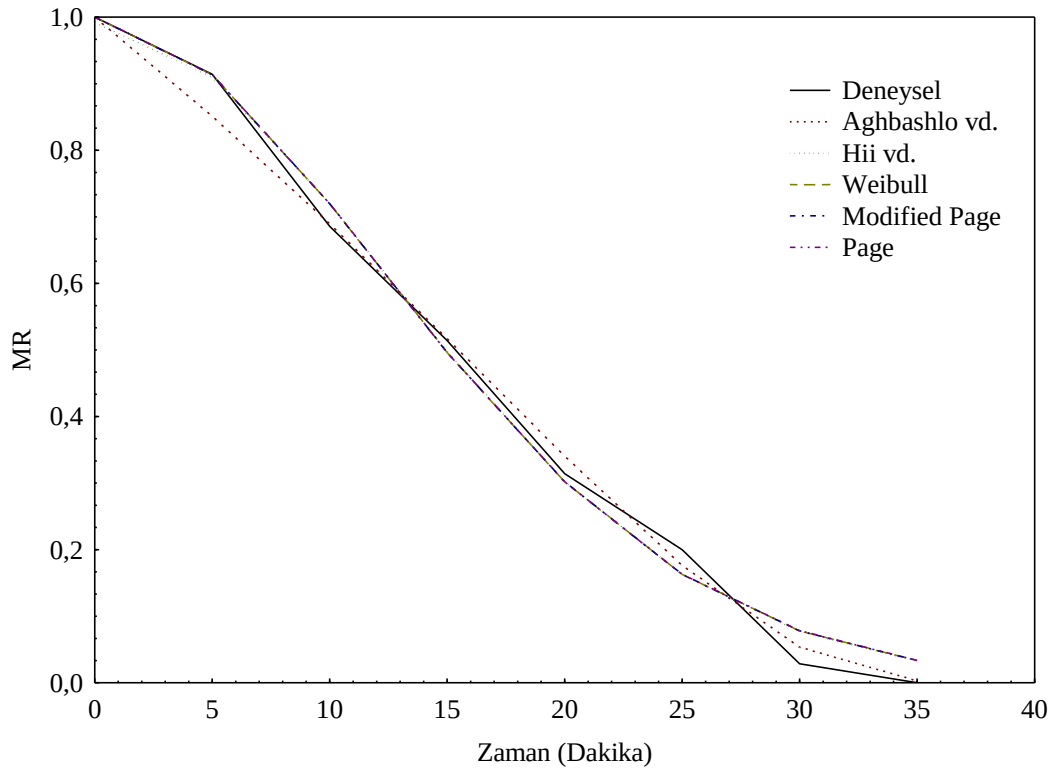


Şekil 13. Yeşil çay 250 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 9'da 250 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Alibas (Modified Midilli-Kucuk) modeli olmuştur. Şekil 13'de ise yeşil çay için 250 W kızılötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Tablo 10. 500 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,97352	0,09247	12,31500	0,99249	0,01321	0,99124	0,10751	0,02126	0,01321	0,01156	0,00266	2,42213
Page	0,99705	0,00897	12,31500	0,99927	0,00150	0,99898	0,03349	-0,04891	0,00150	0,00112	0,00611	0,63270
Modified Page	0,99705	0,00897	12,31500	0,99927	0,00149	0,99898	0,03348	-0,04888	0,00149	0,00112	0,00611	0,63246
Modified Page-I	-	-	12,31500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99705	0,00897	12,31500	0,99927	0,00179	0,99873	0,03348	-0,04888	0,00179	0,00112	0,00611	0,63246
Henderson ve Pabis	0,96763	0,09361	12,31500	0,99240	0,01560	0,98936	0,10817	-0,14031	0,01560	0,01170	0,01754	2,34389
Logarithmic	0,99415	0,01212	12,31500	0,99902	0,00242	0,99828	0,03892	-0,00003	0,00242	0,00151	0,00000	0,92382
Midilli-Kucuk	0,99850	0,00311	12,31500	0,99975	0,00078	0,99941	0,01971	-0,00011	0,00078	0,00039	0,00001	0,46924
Demir vd.	0,99415	0,01212	12,31500	0,99902	0,00303	0,99770	0,03892	0,00000	0,00303	0,00151	0,00000	0,92376
Two-Term	0,96763	0,09361	12,31500	0,99240	0,02340	0,98226	0,10817	-0,14031	0,02340	0,01170	0,01754	2,34389
Two-Term	0,97340	0,09301	12,31500	0,99245	0,01550	0,98943	0,10783	0,01748	0,01550	0,01163	0,00218	2,43394
Exponential												
Verma vd.	0,97352	0,09247	12,31500	0,99249	0,01849	0,98686	0,10751	0,02126	0,01849	0,01156	0,00266	2,42213
Approximation of Diffusion	0,99432	0,02024	12,31500	0,99836	0,00405	0,99712	0,05030	-0,08152	0,00405	0,00253	0,01019	0,88987
Modified Henderson ve Pabis	0,96763	0,09361	12,31500	0,99240	0,04680	0,94679	0,10817	-0,14031	0,04680	0,01170	0,01754	2,34389
Wang ve Singh	0,99390	0,01984	12,31500	0,99839	0,00331	0,99774	0,04980	0,07059	0,00331	0,00248	0,00882	0,92842
Hii vd.	0,99710	0,00790	12,31500	0,99936	0,00263	0,99775	0,03143	-0,03747	0,00263	0,00099	0,00468	0,66126
Simplified Fick's diffusion	0,96761	0,09397	12,31500	0,99237	0,01879	0,98665	0,10838	-0,14158	0,01879	0,01175	0,01770	2,34373
Weibull	0,99705	0,00897	12,31500	0,99927	0,00149	0,99898	0,03348	-0,04888	0,00149	0,00112	0,00611	0,63246
Aghbashlo vd.	0,99771	0,00655	12,31500	0,99947	0,00109	0,99926	0,02861	0,02596	0,00109	0,00082	0,00324	0,50372
Parabolic	0,99453	0,01133	12,31500	0,99908	0,00227	0,99839	0,03764	0,00000	0,00227	0,00142	0,00000	0,88821
Balbay ve Şahin	0,99853	0,00304	12,31500	0,99975	0,00076	0,99942	0,01950	0,00007	0,00076	0,00038	0,00001	0,46437
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99874	0,00262	12,31500	0,99979	0,00087	0,99925	0,01811	-0,00055	0,00087	0,00033	0,00007	0,41778

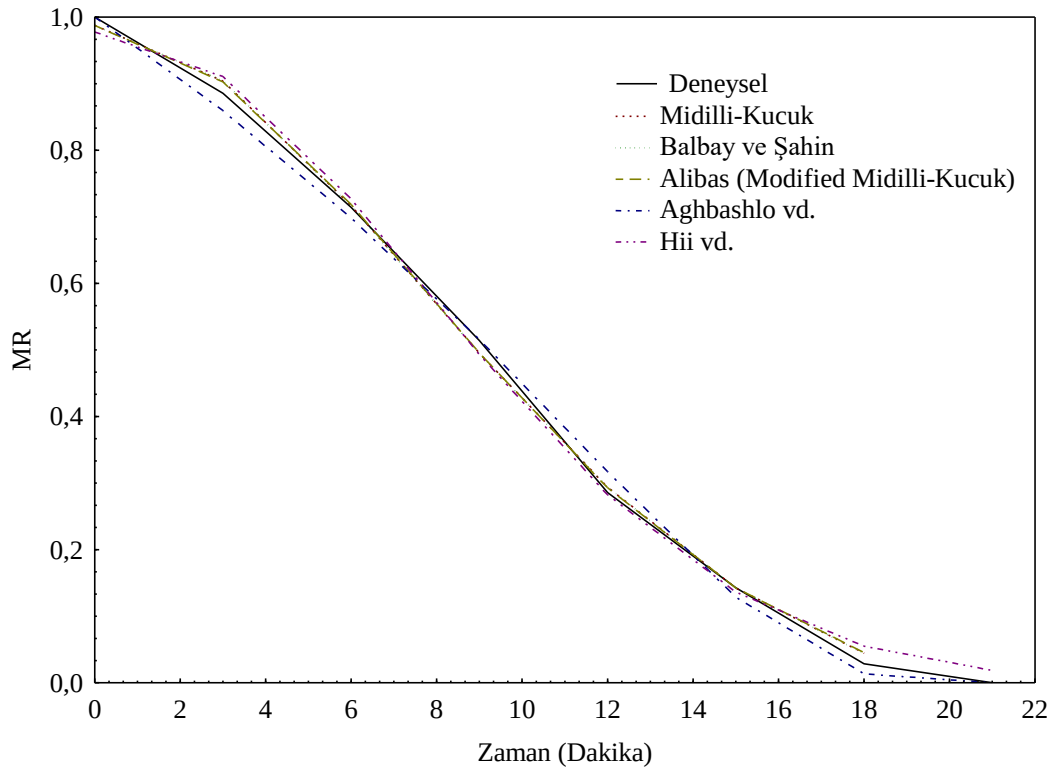


Şekil 14. Yeşil çay 500 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 10’da 500 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Aghbashlo vd. modeli olmuştur. Şekil 14’de ise yeşil çay için 500 W kızılötesi güçte boyutsuz MR-zaman grafiği verilmiştir.

Tablo 11. 750 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	R ²	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,97113	0,09983	11,80375	0,99154	0,01426	0,99013	0,11171	0,00646	0,01426	0,01248	0,00081	2,73729
Page	0,99858	0,00753	11,80375	0,99936	0,00126	0,99911	0,03068	-0,06328	0,00126	0,00094	0,00791	0,46685
Modified Page	0,99858	0,00753	11,80375	0,99936	0,00126	0,99911	0,03069	-0,06331	0,00126	0,00094	0,00791	0,46701
Modified Page-I	-	-	11,80375	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99858	0,00753	11,80375	0,99936	0,00151	0,99888	0,03069	-0,06331	0,00151	0,00094	0,00791	0,46701
Henderson ve Pabis	0,96515	0,10569	11,80375	0,99105	0,01761	0,98746	0,11494	-0,15355	0,01761	0,01321	0,01919	2,66911
Logarithmic	0,99215	0,01670	11,80375	0,99858	0,00334	0,99752	0,04569	-0,00001	0,00334	0,00209	0,00000	1,24375
Midilli-Kucuk	0,99937	0,00134	11,80375	0,99989	0,00033	0,99974	0,01292	0,00001	0,00033	0,00017	0,00000	0,31282
Demir vd.	0,99215	0,01670	11,80375	0,99858	0,00418	0,99670	0,04569	0,00000	0,00418	0,00209	0,00000	1,24373
Two-Term	0,96515	0,10569	11,80375	0,99105	0,02642	0,97911	0,11494	-0,15355	0,02642	0,01321	0,01919	2,66911
Two-Term Exponential	0,97105	0,10049	11,80375	0,99149	0,01675	0,98808	0,11208	0,00110	0,01675	0,01256	0,00014	2,75007
Verma vd.	0,97113	0,09983	11,80375	0,99154	0,01997	0,98520	0,11171	0,00646	0,01997	0,01248	0,00081	2,73729
Approximation of Diffusion	0,99384	0,02625	11,80375	0,99778	0,00525	0,99611	0,05728	-0,10293	0,00525	0,00328	0,01287	1,03292
Modified Henderson ve Pabis	0,96515	0,10569	11,80375	0,99105	0,05284	0,93732	0,11494	-0,15355	0,05284	0,01321	0,01919	2,66911
Wang ve Singh	0,99213	0,02505	11,80375	0,99788	0,00418	0,99703	0,05596	0,07563	0,00418	0,00313	0,00945	1,24174
Hii vd.	0,99879	0,00380	11,80375	0,99968	0,00127	0,99887	0,02181	-0,03035	0,00127	0,00048	0,00379	0,47989
Simplified Fick's diffusion	0,96515	0,10586	11,80375	0,99103	0,02117	0,98431	0,11503	-0,15410	0,02117	0,01323	0,01926	2,66921
Weibull	0,99858	0,00753	11,80375	0,99936	0,00126	0,99911	0,03069	-0,06331	0,00126	0,00094	0,00791	0,46701
Aghbashlo vd.	0,99901	0,00380	11,80375	0,99968	0,00063	0,99955	0,02181	0,03822	0,00063	0,00048	0,00478	0,36392
Parabolic	0,99282	0,01528	11,80375	0,99871	0,00306	0,99773	0,04371	0,00000	0,00306	0,00191	0,00000	1,19762
Balbay ve Şahin	0,99937	0,00135	11,80375	0,99989	0,00034	0,99973	0,01298	-0,00001	0,00034	0,00017	0,00000	0,31159
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99938	0,00132	11,80375	0,99989	0,00044	0,99961	0,01287	-0,00031	0,00044	0,00017	0,00004	0,31643

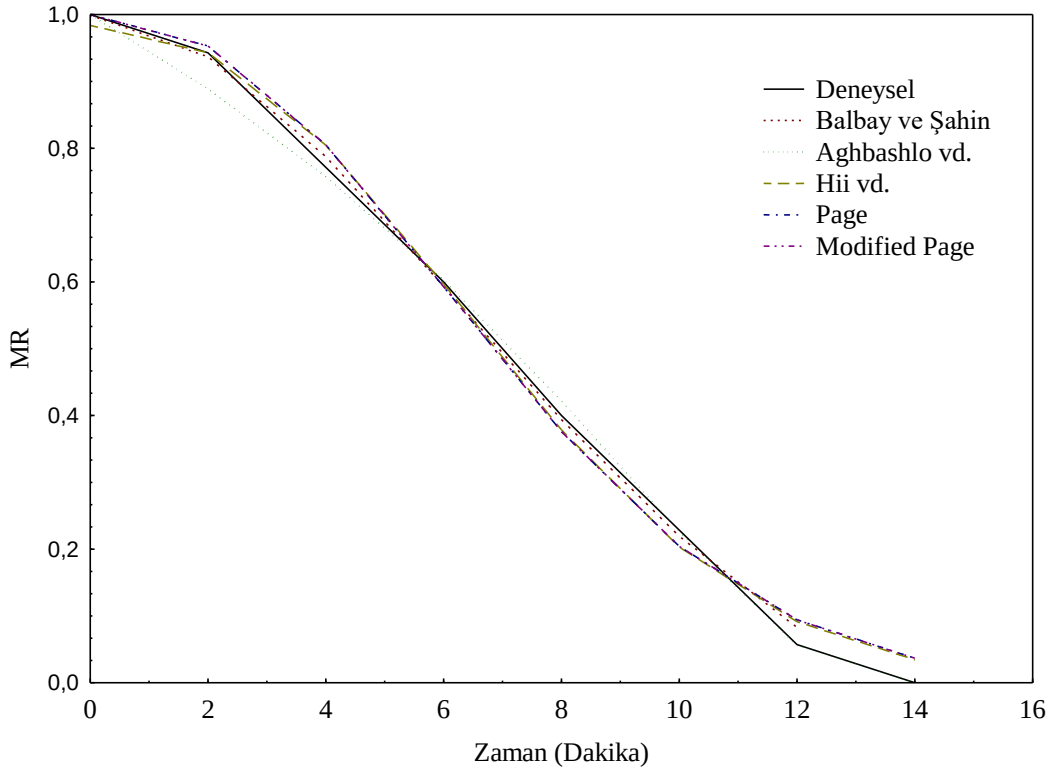


Şekil 15. Yeşil çay 750 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 11’de 750 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Midilli-Kucuk modeli olmuştur. Şekil 15’de ise yeşil çay için 750 W kızılötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Tablo 12. 1000 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,96163	0,13672	14,59250	0,99063	0,01953	0,98907	0,13073	0,06555	0,01953	0,01709	0,00819	2,76218
Page	0,99780	0,00903	14,59250	0,99938	0,00151	0,99913	0,03360	-0,06190	0,00151	0,00113	0,00774	0,54307
Modified Page	0,99780	0,00904	14,59250	0,99938	0,00151	0,99913	0,03361	-0,06195	0,00151	0,00113	0,00774	0,54304
Modified Page-I	-	-	14,59250	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99780	0,00904	14,59250	0,99938	0,00181	0,99892	0,03361	-0,06195	0,00181	0,00113	0,00774	0,54304
Henderson ve Pabis	0,95343	0,12579	14,59250	0,99138	0,02096	0,98793	0,12539	-0,14207	0,02096	0,01572	0,01776	2,65591
Logarithmic	0,99361	0,01350	14,59250	0,99907	0,00270	0,99838	0,04108	-0,00178	0,00270	0,00169	0,00022	0,97860
Midilli-Kucuk	0,99586	0,00905	14,59250	0,99938	0,00226	0,99855	0,03363	-0,00372	0,00226	0,00113	0,00047	0,72066
Demir vd.	0,99363	0,01345	14,59250	0,99908	0,00336	0,99785	0,04100	0,00000	0,00336	0,00168	0,00000	0,97789
Two-Term	0,95343	0,12580	14,59250	0,99138	0,03145	0,97989	0,12540	-0,14211	0,03145	0,01572	0,01776	2,65589
Two-Term Exponential	0,96163	0,13672	14,59250	0,99063	0,02279	0,98688	0,13073	0,06555	0,02279	0,01709	0,00819	2,76218
Verma vd.	0,96163	0,13672	14,59250	0,99063	0,02734	0,98360	0,13073	0,06555	0,02734	0,01709	0,00819	2,76218
Approximation of Diffusion	0,99350	0,04024	14,59250	0,99724	0,00805	0,99517	0,07092	0,13347	0,00805	0,00503	0,01668	1,05678
Modified Henderson ve Pabis	0,95343	0,12579	14,59250	0,99138	0,06289	0,93966	0,12539	-0,14207	0,06289	0,01572	0,01776	2,65591
Wang ve Singh	0,99281	0,02279	14,59250	0,99844	0,00380	0,99781	0,05338	0,07395	0,00380	0,00285	0,00924	1,01641
Hii vd.	0,99795	0,00611	14,59250	0,99958	0,00204	0,99854	0,02763	-0,03588	0,00204	0,00076	0,00449	0,52526
Simplified Fick's diffusion	0,95343	0,12579	14,59250	0,99138	0,02516	0,98491	0,12539	-0,14209	0,02516	0,01572	0,01776	2,65590
Weibull	0,99780	0,00905	14,59250	0,99938	0,00151	0,99913	0,03364	-0,06206	0,00151	0,00113	0,00776	0,54296
Aghbashlo vd.	0,99871	0,00577	14,59250	0,99960	0,00096	0,99945	0,02685	0,04610	0,00096	0,00072	0,00576	0,30146
Parabolic	0,99363	0,01345	14,59250	0,99908	0,00269	0,99839	0,04100	0,00000	0,00269	0,00168	0,00000	0,97789
Balbay ve Şahin	0,99939	0,00129	14,59250	0,99991	0,00032	0,99979	0,01268	0,00000	0,00032	0,00016	0,00000	0,25948
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99586	0,00916	14,59250	0,99937	0,00305	0,99780	0,03384	0,01891	0,00305	0,00115	0,00236	0,66468



Şekil 16. Yeşil çay 1000 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 12’de 1000 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Balbay ve Şahin modeli olmuştur. Şekil 16’da ise yeşil çay için 1000 W kızılötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Sabit yatakta kurutma deneylerinde, tüm kızılötesi ışıyım güçleri için ayrı ayrı seçilen en iyi model ve model denklemi, kuruma öncesi, kuruma safhalarında ve kurumuş ürünün örnek fotoğrafları Tablo 13’de gösterilmiştir. Ayrıca sabit yatakta kurutulan çay numunelerinin kalite analiz sonuçları Tablo 14’de verilmiştir.

Tablo 13. Sabit yatak kızılötesi ışınlı kurutma deneyleri için alınan görüntüler ve en iyi modeller

Güç (W)	Zaman (dakika)	En iyi model / Model denklemi	Dnk. No	Görüntü
0	0	Hii vd.	(46)	
	100	$MR=0,107582\exp(-0,002175t^{1,395931})+0,886427\exp(-0,002206t^{1,395931})$		
	200			
100	0	Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	(47)	
	40	$MR=1,818866\exp(-0,004791t^{1,372408})+0,007076t+(-0,823595)$		
	250			
250	0	Aghbashlo vd.	(48)	
	20	$MR=\exp\left(-\frac{0,028398t}{1+(-0,023635)t}\right)$		
	35			

Tablo 13 (devamı). Sabit yatak kızılötesi ışınlı kurutma deneyleri için alınan görüntüler ve en iyi modeller

Güç (W)	Zaman (dakika)	En iyi model / Model denklemi	Dnk. No	Görüntü
750	0	Midilli-Kucuk $MR=0,987813\exp(-0,010031t^{1,896194})+(-0,002483)t$	(49)	
	9			
	21			
1000	0	Balbay ve Şahin $MR=(1-(-0,147891))\exp(-0,015243t^{1,872940})+(-0,148543)$	(50)	
	6			
	10			

Tablo 14. Sabit yatakta kurutulan çay numunelerinin kalite analiz sonuçları

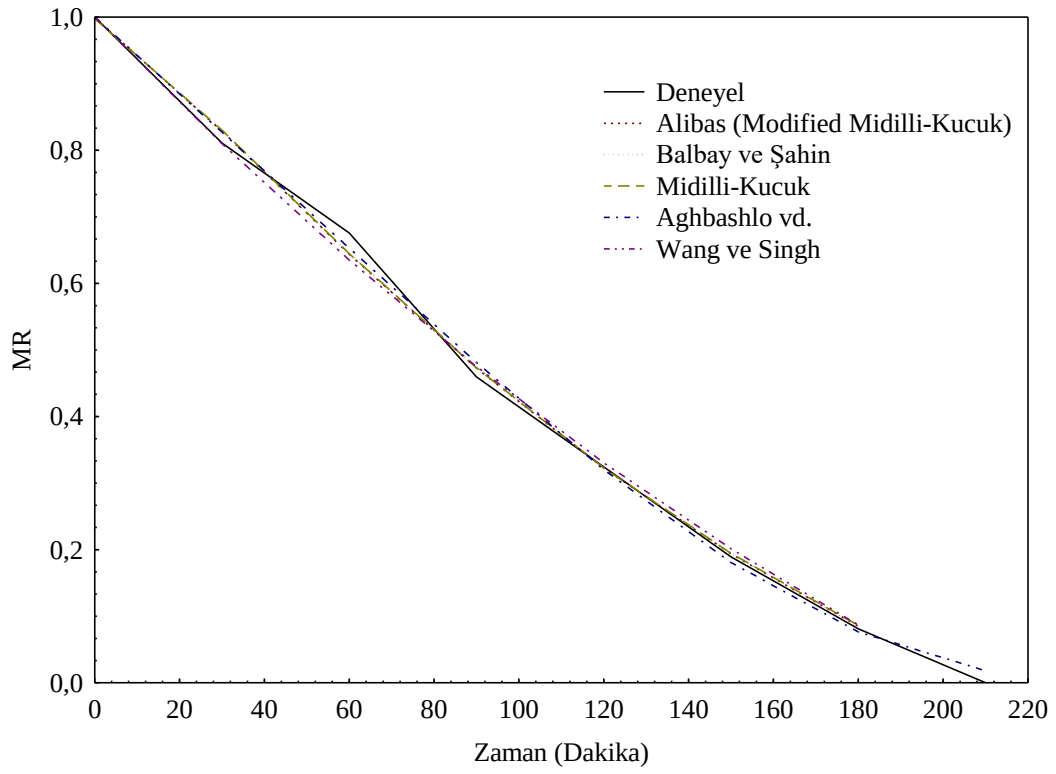
Analiz Sonuçları	Analiz Yöntemi	Numunenin Cinsi	Sonuç %
Rutubet Tayini(g/g)(%)	TS 1562/1990	100 W	11,54
		250 W	20,04
		500 W	15,91
		750 W	12,89
Su Ekstrakt Analizi (Kuru Maddede) (g/g)(%)	TS ISO 9768/T1 Kasım 2003	100 W	33,03
		250 W	28,68
		500 W	29,84
		750 W	36,06
Ham Selüloz (Lif) Tayini(Kuru Maddede) (g/g)(%)	TS ISO 15598/Mart 2003	100 W	18,77
		250 W	18,92
		500 W	18,66
		750 W	18,79
Toplam Kül(Kuru Maddede) (g/g)(%)	TS 1564/Mart 1990	100 W	4,50
		250 W	5,42
		500 W	5,01
		750 W	4,98
Kafein(Kuru Maddede) (g/g)(%)	TS ISO 10727	100 W	2,38
		250 W	2,41
		500 W	2,19
		750 W	2,24
Polifenol (Kuru Maddede) (g/g)(%)	ISO 14502-2/2005	100 W	8,49
		250 W	6,42
		500 W	9,28
		750 W	8,18

3.2. Dönmeli Akışlı Akışkan Yatakta Yeşil ay Kurutma

Yapılan akışkan yatakta yeşil çay kurutma deneyleri için gerçekleştirilen tüm hesaplar, veriler ve matematiksel modelleme neticesinde 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W değeriendirme kriterleri tablolarda verilmiştir. Tablolarda elde edilen sonuçlara göre değeriendirme kriterleri ile seçilen en iyi 5 model için MR–Zaman grafikleri çizilmiştir ve en iyi kurutma modeli belirlenerek model katsayılarıyla formülize edilmiştir.

Tablo 15. 100 W Yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	R ²	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,98294	0,04743	11,49053	0,99587	0,00678	0,99518	0,07699	-0,01537	0,00678	0,00593	0,00192	1,78355
Page	0,99597	0,01268	11,49053	0,99890	0,00211	0,99845	0,03982	-0,06870	0,00211	0,00159	0,00859	0,69678
Modified Page	0,99598	0,01252	11,49053	0,99891	0,00209	0,99848	0,03955	-0,06831	0,00209	0,00156	0,00854	0,67966
Modified Page-I	-	-	11,49053	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99598	0,01252	11,49053	0,99891	0,00250	0,99809	0,03956	-0,06836	0,00250	0,00157	0,00854	0,67958
Henderson ve Pabis	0,97980	0,05219	11,49053	0,99546	0,00870	0,99364	0,08077	-0,10700	0,00870	0,00652	0,01337	1,76187
Logarithmic	0,99857	0,00259	11,49053	0,99977	0,00052	0,99961	0,01798	-0,00005	0,00052	0,00032	0,00001	0,39920
Midilli-Kucuk	0,99911	0,00163	11,49053	0,99986	0,00041	0,99967	0,01426	-0,00290	0,00041	0,00020	0,00036	0,29468
Demir vd.	0,99857	0,00259	11,49053	0,99977	0,00065	0,99947	0,01798	0,00000	0,00065	0,00032	0,00000	0,39996
Two-Term	0,97988	0,05238	11,49053	0,99544	0,01310	0,98936	0,08092	-0,10788	0,01310	0,00655	0,01348	1,76073
Two-Term	0,98278	0,04766	11,49053	0,99585	0,00794	0,99419	0,07718	-0,01231	0,00794	0,00596	0,00154	1,79147
Exponential												
Verma vd.	0,99423	0,01665	11,49053	0,99855	0,00333	0,99746	0,04562	-0,07179	0,00333	0,00208	0,00897	0,86154
Approximation of Diffusion	0,99428	0,01691	11,49053	0,99853	0,00338	0,99742	0,04598	-0,07373	0,00338	0,00211	0,00922	0,85687
Modified Henderson ve Pabis	0,97987	0,05244	11,49053	0,99544	0,02622	0,96805	0,08097	-0,10816	0,02622	0,00656	0,01352	1,76068
Wang ve Singh	0,99880	0,00248	11,49053	0,99978	0,00041	0,99970	0,01759	0,01431	0,00041	0,00031	0,00179	0,32956
Hii vd.	0,99630	0,00940	11,49053	0,99918	0,00313	0,99714	0,03429	-0,04518	0,00313	0,00118	0,00565	0,71601
Simplified Fick's diffusion	-	-	11,49053	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weibull	0,99598	0,01252	11,49053	0,99891	0,00209	0,99847	0,03956	-0,06836	0,00209	0,00157	0,00854	0,67958
Aghbashlo vd.	0,99907	0,00196	11,49053	0,99983	0,00033	0,99976	0,01564	-0,01579	0,00033	0,00024	0,00197	0,34107
Parabolic	0,99883	0,00213	11,49053	0,99981	0,00043	0,99968	0,01630	0,00000	0,00043	0,00027	0,00000	0,34760
Balbay ve Şahin	0,99912	0,00160	11,49053	0,99986	0,00040	0,99968	0,01414	-0,00237	0,00040	0,00020	0,00030	0,28675
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99912	0,00159	11,49053	0,99986	0,00053	0,99952	0,01410	-0,00073	0,00053	0,00020	0,00009	0,28158

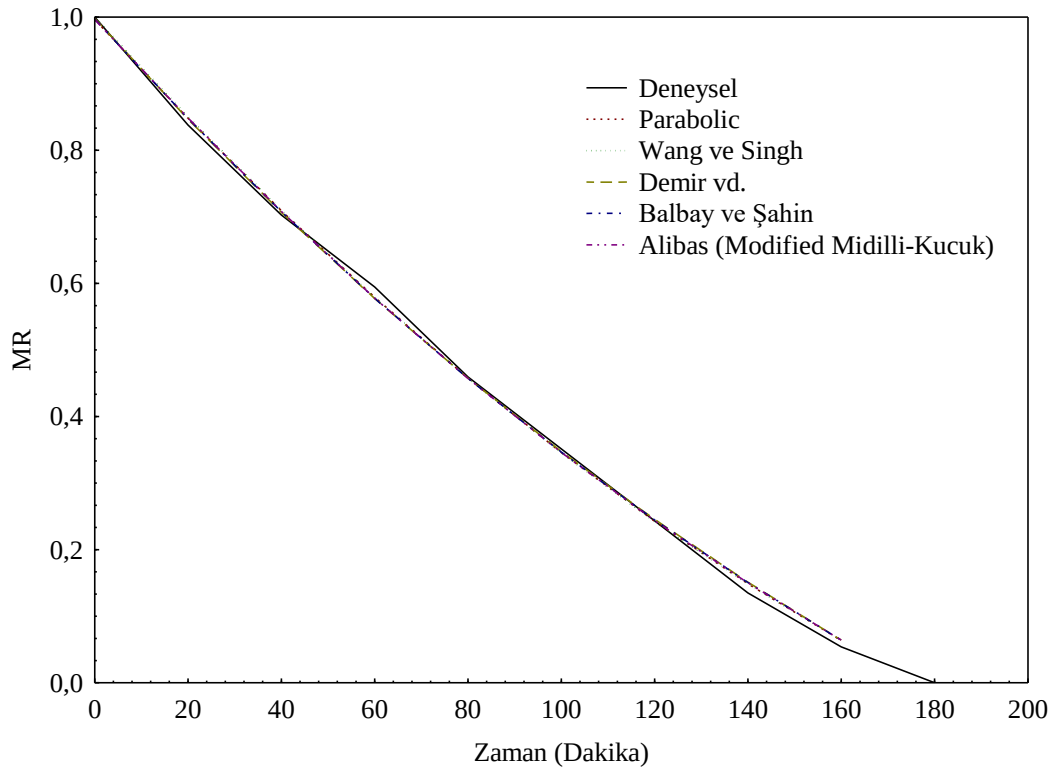


Şekil 17. Yeşil çay 100 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 15’de 100 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Alibas (Modified Midilli-Kucuk) modeli olmuştur. Şekil 17’de ise yeşil çay için 100 W kızıllötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Tablo 16. 250 W Yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	R ²	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,98367	0,05224	17,92887	0,99709	0,00580	0,99672	0,07228	-0,02464	0,00580	0,00522	0,00246	1,38098
Page	0,99376	0,02412	17,92887	0,99865	0,00302	0,99827	0,04912	-0,10047	0,00302	0,00241	0,01005	0,74379
Modified Page	0,99380	0,02466	17,92887	0,99862	0,00308	0,99823	0,04966	-0,10315	0,00308	0,00247	0,01031	0,74103
Modified Page-I	-	-	17,92887	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99370	0,02352	17,92887	0,99869	0,00336	0,99803	0,04850	-0,09689	0,00336	0,00235	0,00969	0,74903
Henderson ve Pabis	0,98065	0,05983	17,92887	0,99666	0,00748	0,99571	0,07735	-0,12187	0,00748	0,00598	0,01219	1,30268
Logarithmic	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Midilli-Kucuk	0,99947	0,00111	17,92887	0,99994	0,00018	0,99989	0,01052	-0,00064	0,00018	0,00011	0,00006	0,20274
Demir vd.	0,99950	0,00104	17,92887	0,99994	0,00017	0,99990	0,01021	0,00000	0,00017	0,00010	0,00000	0,18753
Two-Term	0,98065	0,05983	17,92887	0,99666	0,00997	0,99399	0,07735	-0,12187	0,00997	0,00598	0,01219	1,30269
Two-Term	0,98363	0,05289	17,92887	0,99705	0,00661	0,99621	0,07272	-0,02757	0,00661	0,00529	0,00276	1,38824
Exponential												
Verma vd.	0,99238	0,02692	17,92887	0,99850	0,00385	0,99775	0,05188	-0,09787	0,00385	0,00269	0,00979	0,82059
Approximation of Diffusion	0,99241	0,02724	17,92887	0,99848	0,00389	0,99772	0,05219	-0,09957	0,00389	0,00272	0,00996	0,81952
Modified Henderson ve Pabis	0,98065	0,05984	17,92887	0,99666	0,01496	0,98999	0,07735	-0,12188	0,01496	0,00598	0,01219	1,30268
Wang ve Singh	0,99958	0,00093	17,92887	0,99995	0,00012	0,99993	0,00966	-0,00636	0,00012	0,00009	0,00064	0,18081
Hii vd.	0,99951	0,00104	17,92887	0,99994	0,00021	0,99987	0,01018	-0,00056	0,00021	0,00010	0,00006	0,19566
Simplified Fick's diffusion	-	-	17,92887	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weibull	0,99380	0,02466	17,92887	0,99862	0,00308	0,99823	0,04966	-0,10316	0,00308	0,00247	0,01032	0,74103
Aghbashlo vd.	0,99891	0,00286	17,92887	0,99984	0,00036	0,99979	0,01692	-0,02001	0,00036	0,00029	0,00200	0,29696
Parabolic	0,99959	0,00087	17,92887	0,99995	0,00012	0,99993	0,00932	0,00000	0,00012	0,00009	0,00000	0,18107
Balbay ve Şahin	0,99951	0,00103	17,92887	0,99994	0,00017	0,99990	0,01014	0,00038	0,00017	0,00010	0,00004	0,19146
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99951	0,00103	17,92887	0,99994	0,00021	0,99987	0,01016	0,00117	0,00021	0,00010	0,00012	0,19478

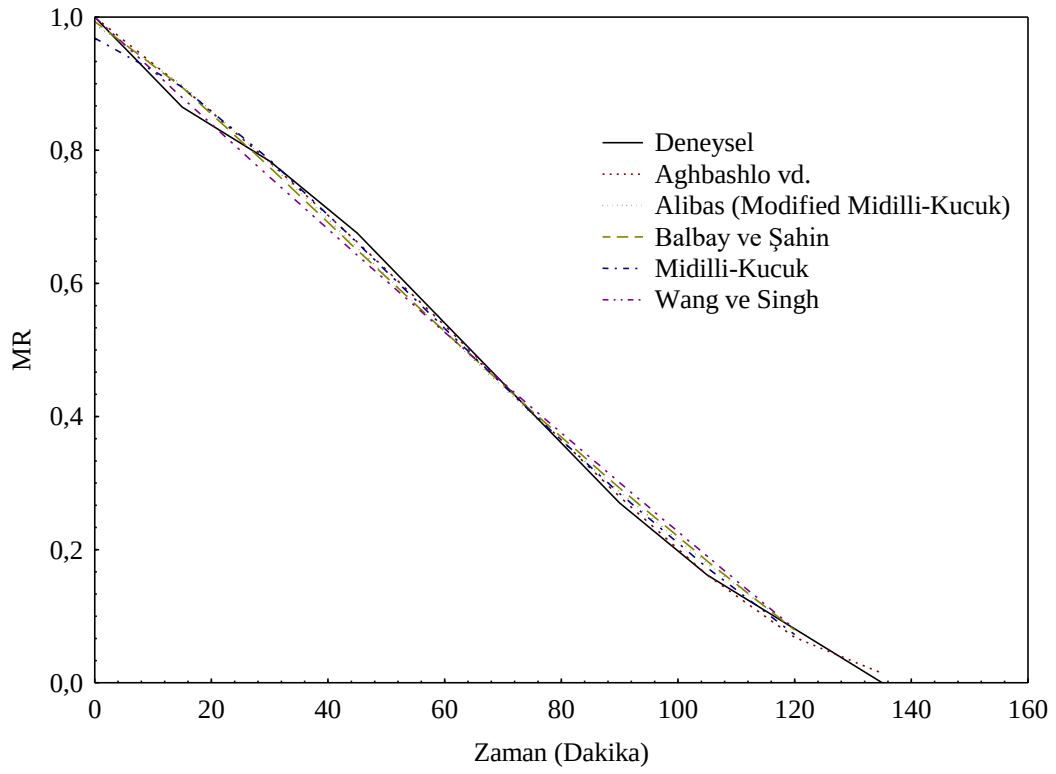


Şekil 18. Yeşil çay 250 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 16’da 250 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Parabolic modeli olmuştur. Şekil 18’de ise yeşil çay için 250 W kızılötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Tablo 17. 500 W Yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	R ²	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,97259	0,09121	21,27537	0,99571	0,01013	0,99518	0,09551	0,01967	0,01013	0,00912	0,00197	1,70789
Page	0,99371	0,02419	21,27537	0,99886	0,00302	0,99854	0,04918	-0,09758	0,00302	0,00242	0,00976	0,65177
Modified Page	0,99432	0,02944	21,27537	0,99862	0,00368	0,99822	0,05425	-0,12390	0,00368	0,00294	0,01239	0,60790
Modified Page-I	-	-	21,27537	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99432	0,02944	21,27537	0,99862	0,00421	0,99792	0,05426	-0,12392	0,00421	0,00294	0,01239	0,60789
Henderson ve Pabis	0,96744	0,09448	21,27537	0,99556	0,01181	0,99429	0,09720	-0,13354	0,01181	0,00945	0,01335	1,61943
Logarithmic	-	-	21,27537	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Midilli-Kucuk	0,99871	0,00341	21,27537	0,99984	0,00057	0,99971	0,01845	0,02311	0,00057	0,00034	0,00231	0,28792
Demir vd.	0,99800	0,00437	21,27537	0,99979	0,00073	0,99963	0,02090	0,00000	0,00073	0,00044	0,00000	0,38320
Two-Term	0,96747	0,09429	21,27537	0,99557	0,01571	0,99202	0,09710	-0,13280	0,01571	0,00943	0,01328	1,61882
Two-Term	0,97251	0,09178	21,27537	0,99569	0,01147	0,99445	0,09580	0,01816	0,01147	0,00918	0,00182	1,71479
Exponential												
Verma vd.	0,98922	0,04022	21,27537	0,99811	0,00575	0,99716	0,06342	-0,12090	0,00575	0,00402	0,01209	0,86283
Approximation of Diffusion	0,98928	0,04071	21,27537	0,99809	0,00582	0,99713	0,06381	-0,12301	0,00582	0,00407	0,01230	0,86108
Modified Henderson ve Pabis	0,96750	0,09475	21,27537	0,99555	0,02369	0,98664	0,09734	-0,13453	0,02369	0,00948	0,01345	1,61895
Wang ve Singh	0,99799	0,00473	21,27537	0,99978	0,00059	0,99971	0,02175	0,01590	0,00059	0,00047	0,00159	0,36944
Hii vd.	0,99522	0,01921	21,27537	0,99910	0,00384	0,99797	0,04383	-0,08526	0,00384	0,00192	0,00853	0,61574
Simplified Fick's diffusion	-	-	21,27537	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weibull	0,52613	1,04652	21,27537	0,95081	0,13082	0,93676	0,32350	0,48020	0,13082	0,10465	0,04802	4,99481
Aghbashlo vd.	0,99933	0,00209	21,27537	0,99990	0,00026	0,99987	0,01446	-0,02333	0,00026	0,00021	0,00233	0,18179
Parabolic	0,99802	0,00432	21,27537	0,99980	0,00062	0,99970	0,02079	0,00000	0,00062	0,00043	0,00000	0,38213
Balbay ve Şahin	0,99860	0,00305	21,27537	0,99986	0,00051	0,99974	0,01748	-0,00148	0,00051	0,00031	0,00015	0,30927
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99883	0,00258	21,27537	0,99988	0,00052	0,99973	0,01607	-0,00434	0,00052	0,00026	0,00043	0,26904

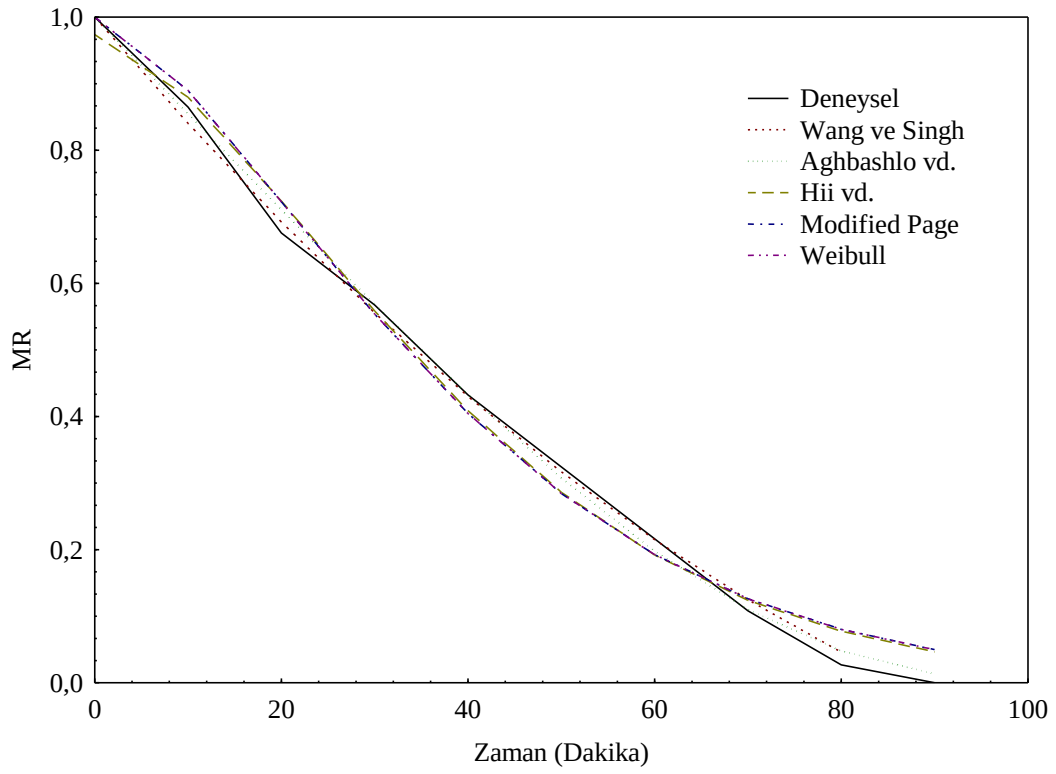


Şekil 19. Yeşil çay 500 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 17’de 500 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Aghbashlo vd. modeli olmuştur. Şekil 19’de ise yeşil çay için 500 W kızılötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Tablo 18. 750 W Yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	R ²	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,98549	0,05357	16,73014	0,99680	0,00595	0,99640	0,07319	-0,02446	0,00595	0,00536	0,00245	1,48335
Page	0,99507	0,01936	16,73014	0,99884	0,00242	0,99851	0,04400	-0,08784	0,00242	0,00194	0,00878	0,70960
Modified Page	0,99507	0,01935	16,73014	0,99884	0,00242	0,99851	0,04399	-0,08777	0,00242	0,00193	0,00878	0,70955
Modified Page-I	-	-	16,73014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99507	0,01935	16,73014	0,99884	0,00276	0,99827	0,04399	-0,08777	0,00276	0,00193	0,00878	0,70955
Henderson ve Pabis	0,98218	0,06218	16,73014	0,99628	0,00777	0,99522	0,07885	-0,13383	0,00777	0,00622	0,01338	1,40481
Logarithmic	0,99883	0,00258	16,73014	0,99985	0,00037	0,99977	0,01606	-0,00009	0,00037	0,00026	0,00001	0,33113
Midilli-Kucuk	0,99905	0,00208	16,73014	0,99988	0,00035	0,99978	0,01442	-0,00008	0,00035	0,00021	0,00001	0,29219
Demir vd.	0,99883	0,00258	16,73014	0,99985	0,00043	0,99972	0,01606	0,00000	0,00043	0,00026	0,00000	0,33094
Two-Term	0,98220	0,06202	16,73014	0,99629	0,01034	0,99333	0,07875	-0,13323	0,01034	0,00620	0,01332	1,40522
Two-Term	0,98235	0,06547	16,73014	0,99609	0,00818	0,99497	0,08091	0,00025	0,00818	0,00655	0,00002	1,65256
Exponential												
Verma vd.	0,99384	0,02321	16,73014	0,99861	0,00332	0,99792	0,04818	-0,09050	0,00332	0,00232	0,00905	0,79969
Approximation of Diffusion	0,99385	0,02334	16,73014	0,99861	0,00333	0,99791	0,04831	-0,09122	0,00333	0,00233	0,00912	0,79911
Modified Henderson ve Pabis	0,98220	0,06236	16,73014	0,99627	0,01559	0,98882	0,07897	-0,13449	0,01559	0,00624	0,01345	1,40461
Wang ve Singh	0,99906	0,00242	16,73014	0,99986	0,00030	0,99981	0,01555	0,01590	0,00030	0,00024	0,00159	0,28511
Hii vd.	0,99543	0,01376	16,73014	0,99918	0,00275	0,99815	0,03709	-0,05413	0,00275	0,00138	0,00541	0,70363
Simplified Fick's diffusion	-	-	16,73014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Weibull	0,99507	0,01935	16,73014	0,99884	0,00242	0,99851	0,04399	-0,08778	0,00242	0,00194	0,00878	0,70955
Aghbashlo vd.	0,99888	0,00331	16,73014	0,99980	0,00041	0,99975	0,01820	-0,02780	0,00041	0,00033	0,00278	0,27797
Parabolic	0,99909	0,00201	16,73014	0,99988	0,00029	0,99982	0,01418	0,00000	0,00029	0,00020	0,00000	0,30225
Balbay ve Şahin	0,99909	0,00200	16,73014	0,99988	0,00033	0,99978	0,01416	0,00027	0,00033	0,00020	0,00003	0,28782
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99914	0,00190	16,73014	0,99989	0,00038	0,99974	0,01380	-0,00149	0,00038	0,00019	0,00015	0,28037

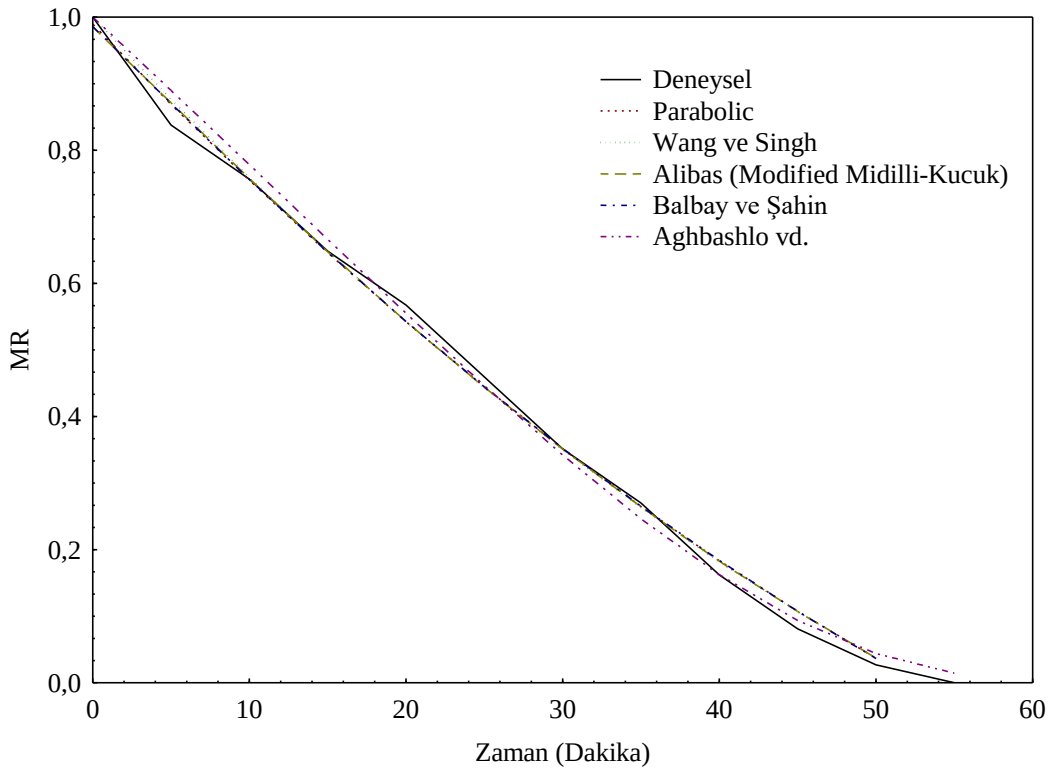


Şekil 20. Yeşil çay 750 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 18’de 750 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Wang ve Singh modeli olmuştur. Şekil 20’de ise yeşil çay için 750 W kızılötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Tablo 19. 1000 W Yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri

Model Name	r	RSS=SSE	SST	R ² =EF	χ^2	$\bar{R}^2$	RMSE	residuals	SEE	RSSE	MBE	P
Newton Lewis	0,97981	0,07406	25,29795	0,99707	0,00673	0,99678	0,07856	-0,04465	0,00673	0,00617	0,00372	1,24921
Page	0,99140	0,04866	25,29795	0,99808	0,00487	0,99765	0,06368	-0,15886	0,00487	0,00406	0,01324	0,73822
Modified Page	0,99140	0,04863	25,29795	0,99808	0,00486	0,99765	0,06366	-0,15876	0,00486	0,00405	0,01323	0,73821
Modified Page-I	-	-	25,29795	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modified Page-II	0,99140	0,04863	25,29795	0,99808	0,00540	0,99736	0,06366	-0,15876	0,00540	0,00405	0,01323	0,73821
Henderson ve Pabis	0,97648	0,08872	25,29795	0,99649	0,00887	0,99571	0,08598	-0,15646	0,00887	0,00739	0,01304	1,27403
Logarithmic	0,99822	0,00439	25,29795	0,99983	0,00049	0,99976	0,01913	-0,00007	0,00049	0,00037	0,00001	0,30012
Midilli-Kucuk	0,99817	0,00453	25,29795	0,99982	0,00057	0,99972	0,01943	-0,00005	0,00057	0,00038	0,00000	0,30096
Demir vd.	0,99822	0,00439	25,29795	0,99983	0,00055	0,99973	0,01913	0,00000	0,00055	0,00037	0,00000	0,30012
Two-Term	0,97648	0,08872	25,29795	0,99649	0,01109	0,99449	0,08598	-0,15646	0,01109	0,00739	0,01304	1,27403
Two-Term Exponential	0,97980	0,07492	25,29795	0,99704	0,00749	0,99638	0,07901	-0,04729	0,00749	0,00624	0,00394	1,25447
Verma vd.	0,98933	0,05041	25,29795	0,99801	0,00560	0,99726	0,06482	-0,14763	0,00560	0,00420	0,01230	0,80816
Approximation of Diffusion	0,98935	0,05069	25,29795	0,99800	0,00563	0,99724	0,06499	-0,14858	0,00563	0,00422	0,01238	0,80784
Modified Henderson ve Pabis	0,97648	0,08871	25,29795	0,99649	0,01479	0,99229	0,08598	-0,15645	0,01479	0,00739	0,01304	1,27404
Wang ve Singh	0,99834	0,00462	25,29795	0,99982	0,00046	0,99978	0,01963	-0,01942	0,00046	0,00039	0,00162	0,27903
Hii vd.	0,99325	0,02175	25,29795	0,99914	0,00311	0,99842	0,04257	-0,06397	0,00311	0,00181	0,00533	0,67436
Simplified Fick's diffusion	0,97649	0,08834	25,29795	0,99651	0,00982	0,99520	0,08580	-0,15525	0,00982	0,00736	0,01294	1,27394
Weibull	0,99140	0,04863	25,29795	0,99808	0,00486	0,99765	0,06366	-0,15876	0,00486	0,00405	0,01323	0,73821
Aghbashlo vd.	0,99826	0,01111	25,29795	0,99956	0,00111	0,99946	0,03043	-0,07710	0,00111	0,00093	0,00643	0,31484
Parabolic	0,99837	0,00404	25,29795	0,99984	0,00045	0,99978	0,01835	0,00000	0,00045	0,00034	0,00000	0,28791
Balbay ve Şahin	0,99824	0,00435	25,29795	0,99983	0,00054	0,99973	0,01905	-0,00001	0,00054	0,00036	0,00000	0,29615
Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	0,99830	0,00421	25,29795	0,99983	0,00060	0,99970	0,01872	-0,00146	0,00060	0,00035	0,00012	0,29189



Şekil 21. Yeşil çay 1000 W boyutsuz kütle oranı (MR) – zaman grafiği

Tablo 19’da 1000 W yeşil çay kurutma değerlendirme kriteri sonucu en iyi model Parabolic modeli olmuştur. Şekil 21’de ise yeşil çay için 1000 W kızılötesi güçte MR-zaman grafiği verilmiştir.

Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutma deneylerinde, tüm kızılötesi ısıtım güçleri için ayrı ayrı seçilen en iyi model ve model denklemi, kuruma öncesi, kuruma safhalarında ve kurumuş ürünün örnek fotoğrafları Tablo 20’de gösterilmiştir. Ayrıca dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan çay numunelerinin kalite analiz sonuçları Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 20. Akışkan yatak kızılötesi ışınlı kurutma deneyleri için alınan görüntüler ve en iyi modeller

Güç (W)	Zaman (dakika)	En iyi model / Model denklemi	Dnk. No	Görüntü
100	0	Alibas (Modified Midilli-Kucuk)	(51)	
	90	MR= 1,472169exp(-0,002357t 1,174439) + 0,000241t+(-0,473536)		
	210			
	0	Parabolic	(52)	
	80	MR= 0,996069+ (-0,007629)t+ 0,000011t²		
	180			
	0	Aghbashlo vd.	(53)	
	60	MR= exp(-0,006761t / (1+(-0,005811)t))		
	135			

Tablo 20 (devamı). Akışkan yatak kızılötesi ışınlı kurutma deneyleri için alınan görüntüler ve en iyi modeller

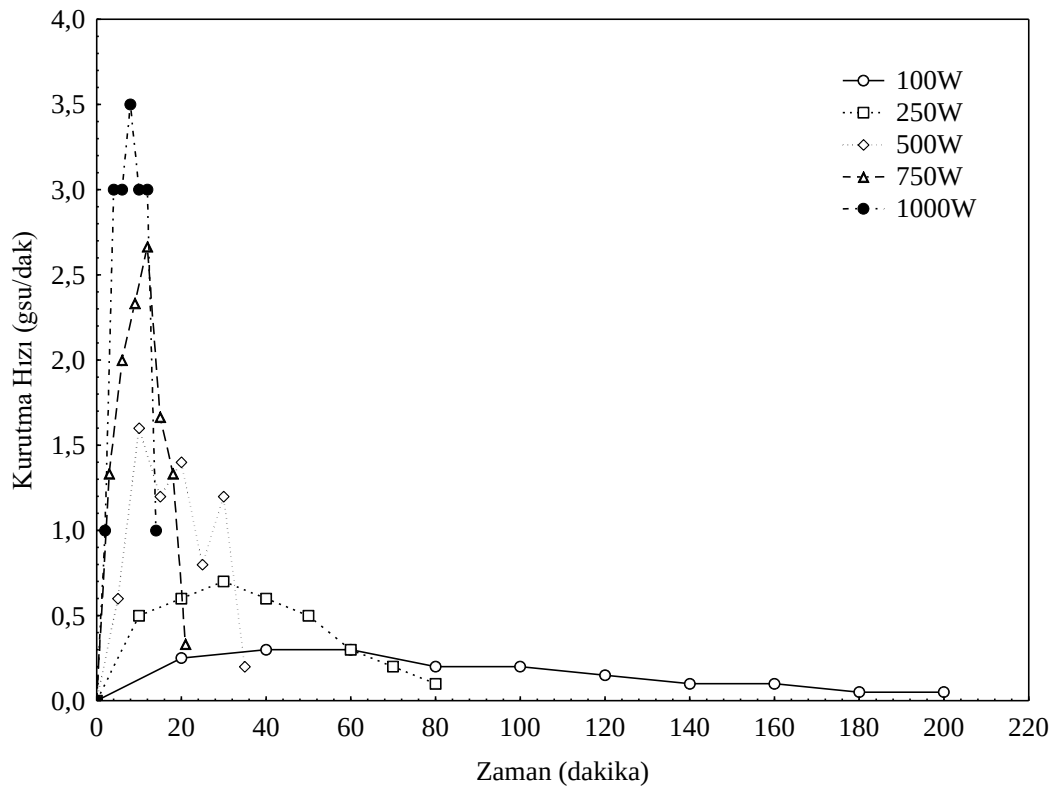
Güç (W)	Zaman (dakika)	En iyi model / Model denklemi	Dnk. No	Görüntü
750	0	Wang ve Singh $MR = 1 + (-0,016550)t + 0,000058t^2$	(54)	
	40			
	90			
1000	0	Parabolic $MR = 0,989382 + (-0,024547)t + 0,000110t^2$	(55)	
	25			
	55			

Tablo 21. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kurutulan çay numunelerinin kalite analiz sonuçları

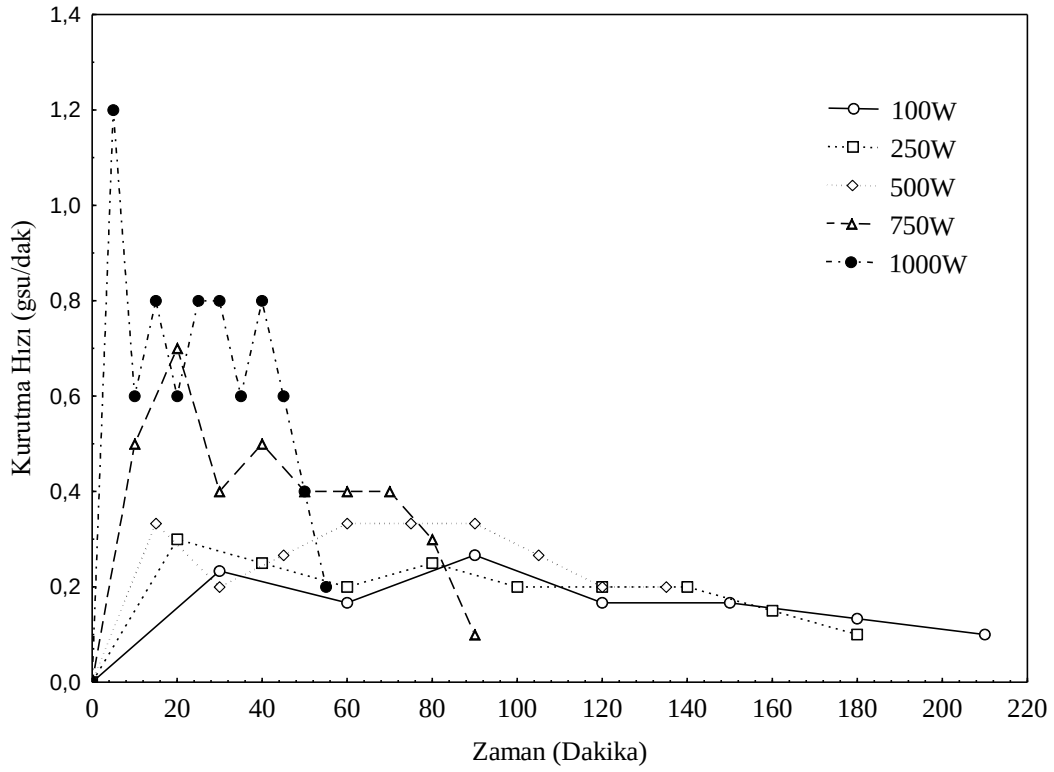
Analiz Sonuçları	Analiz Yöntemi	Numunenin Cinsi	Sonuç %
Rutubet Tayini (g/g)%	TS 1562	100 W	2,20
		250 W	5,96
		500 W	7,08
		750 W	15,52
		1000 W	17,45
Su Ekstrakt Analizi (Kuru Maddede) (g/g)%	TS ISO 9768/T1 Kasım 2003	100 W	41,02
		250 W	30,70
		500 W	44,04
		750 W	23,89
		1000 W	24,89
Ham Selüloz(Lif) Tayini (Kuru Maddede) (g/g)%	İşletme İçi Methot(Cihaz aplikasyonu ve TS ISO 15598'den modifiye edilmiştir)	100 W	-
		250 W	15,73
		500 W	16,26
		750 W	17,70
		1000 W	17,63
Toplam Kül Tayini (Kuru Maddede) (g/g)%	TS 1564	100 W	5,62
		250 W	5,87
		500 W	4,48
		750 W	5,47
		1000 W	5,32
Kafein Tayini (Kuru Maddede) (g/g)%	TS ISO 10727	100 W	0,81
		250 W	1,38
		500 W	0,94
		750 W	1,91
		1000 W	1,76
Toplam Polifenol Tayini (Kuru Maddede) (g/g)%	ISO 14502-2	100 W	-
		250 W	2,44
		500 W	0,32
		750 W	4,05
		1000 W	4,30

3.3. Sabit Yatak ve Dönmeli Akışlı Akışkan Yatak Kurutma Bulgularının Karşılaştırılması

Sabit yatak kurutmanın Şekil 22, 24 ve 26’da sırasıyla kuruma hızı, nem oranı ve kütleli büzölme oranı – zaman grafikleri verilmiştir. Dönmeli akışlı akışkan yatak kurutmanın Şekil 23, 25 ve 27’de sırasıyla kuruma hızı, nem oranı ve kütleli büzölme oranı – zaman grafikleri verilmiştir.



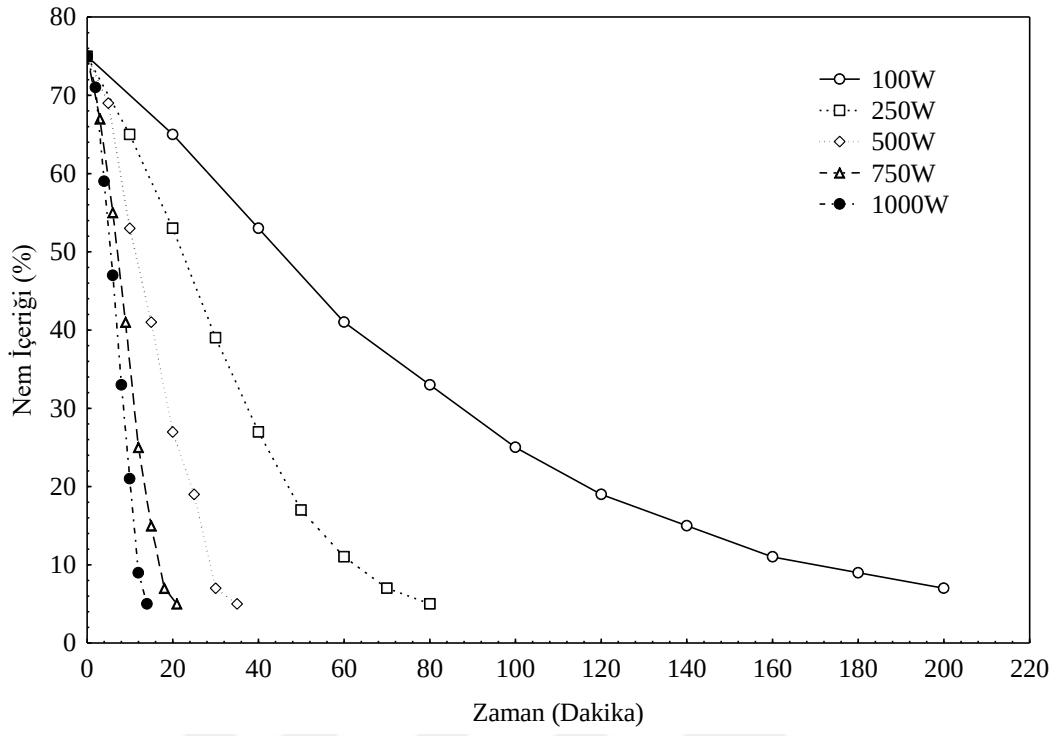
Şekil 22. Sabit yatakta farklı kızıllötesi güçlerde yeşil çayın kurutma hızı-zaman grafiği



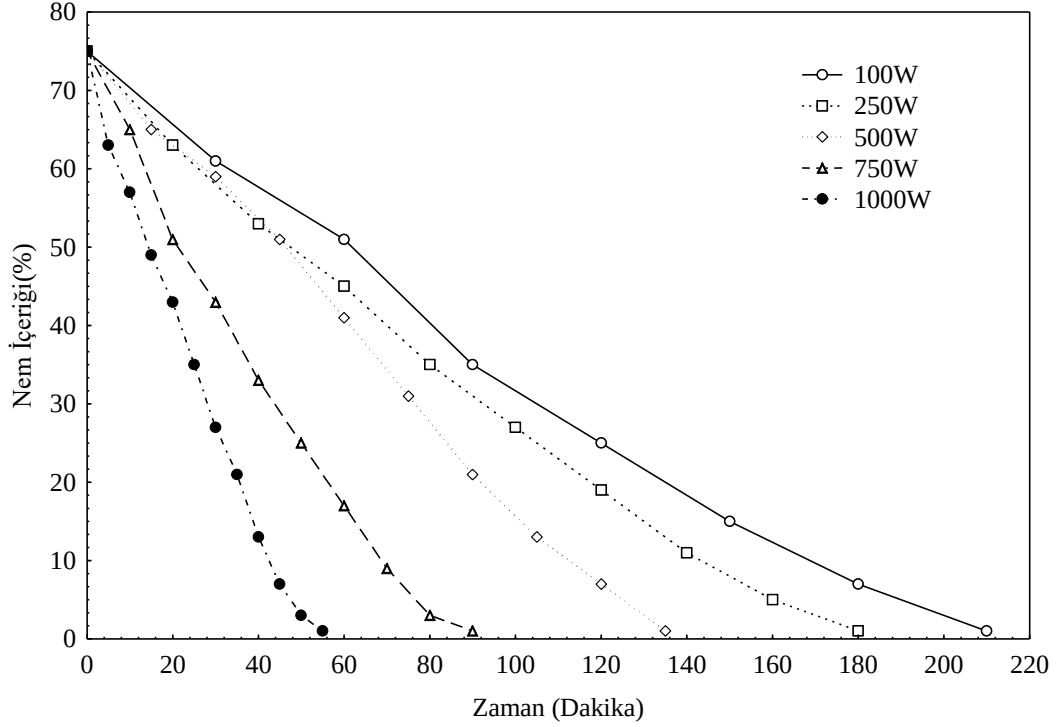
Şekil 23. Akışkan yatakta farklı kızılötesi güçlerde yeşil çayın kurutma hızı-zaman grafiği

Şekil 22’de sabit yatakta yeşil çay için farklı kızılötesi güçlerdeki kurutma hızının zamanla değişimi gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere kızılötesi gücü arttıkça kurutma hızı da artmaktadır. Yeşil çayın en yüksek olduğu kuruma hızları 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W güç değerleri için sırasıyla; 40. dakikada 0,3 gsu/ dak., 30. dakikada 0,7 gsu/ dak., 10. dakikada 1,6 gsu/dak., 12. dakikada 2,66 gsu/ dak. ve 8. dakikada 3,5 gsu/dak. şeklinde olmuştur. Aynı güç değerleri için kuruma süreleri sırasıyla 200, 80, 35, 21 ve 14 dakika şeklindedir (Şimşek vd., 2021).

Şekil 23’de dönmeli akışlı akışkan yatakta yeşil çay için farklı kızılötesi güçlerdeki kurutma hızının zamanla değişimi gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere kızılötesi gücü arttıkça kurutma hızı da artmaktadır. Yeşil çayın en yüksek olduğu kuruma hızları 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W güç değerleri için sırasıyla; 90. dakikada 0,26 gsu/ dak., 20. dakikada 0,3 gsu/ dak., 75. dakikada 0,33 gsu/dak., 20. dakikada 0,7 gsu/ dak. ve 5. dakikada 1,2 gsu/dak. şeklinde olmuştur. Aynı güç değerleri için kuruma süreleri sırasıyla 210, 180, 135, 90 ve 55 dakika şeklindedir.



Şekil 24. Sabit yatakta farklı kızılötesi güçlerde nem içeriği- zaman grafiği

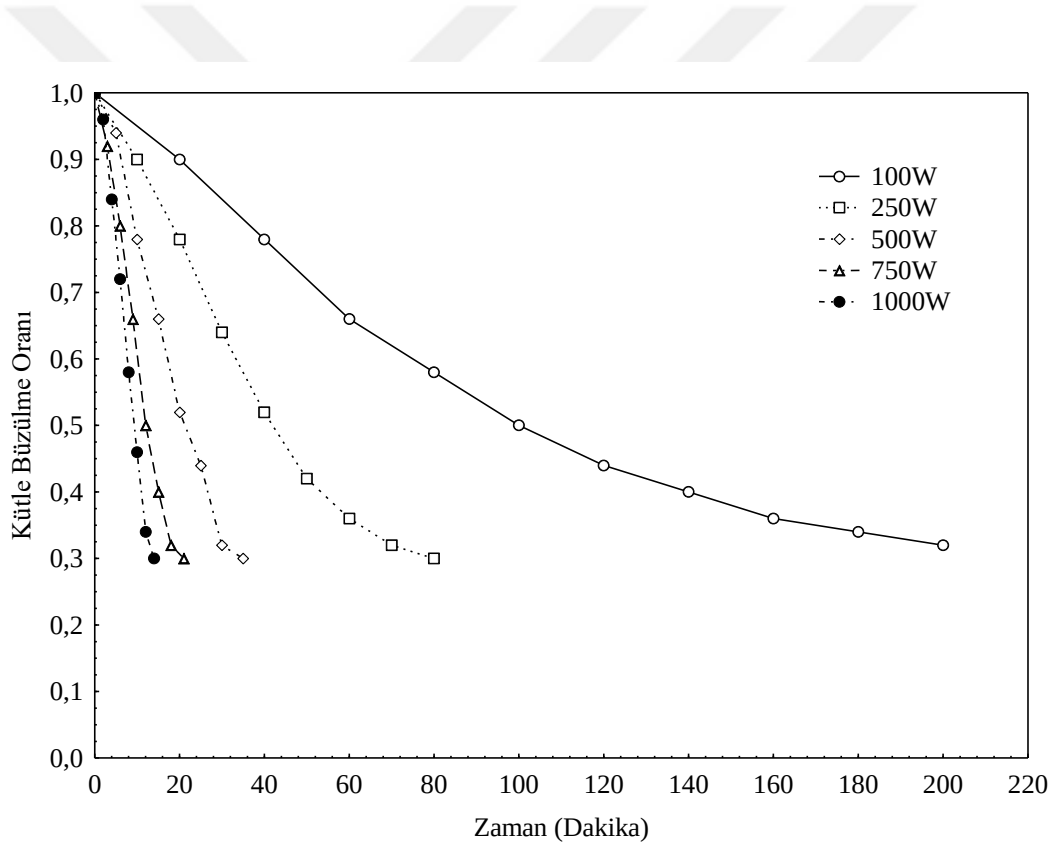


Şekil 25. Akışkan yatakta farklı kızılötesi güçlerde nem içeriği- zaman grafiği

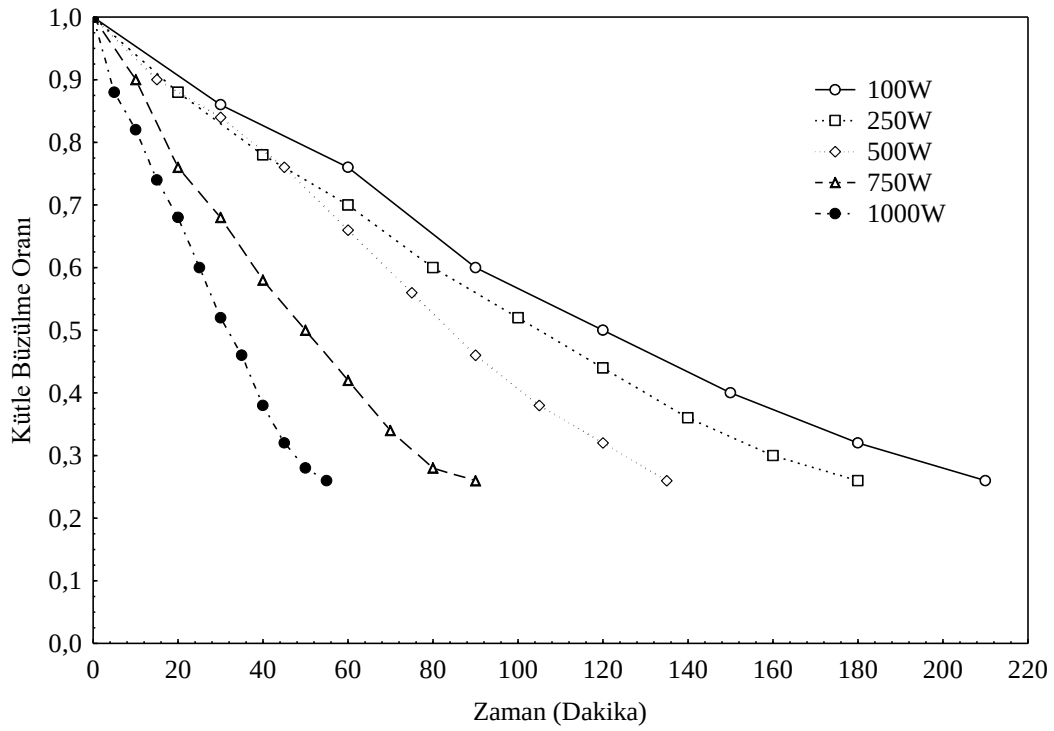
Şekil 24’de sabit yatak, Şekil 25’de dönmeli akışlı akışkan yatak deneyleri için yeşil çayın nem içeriğinin zamana bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Her iki grafikte de görüldüğü gibi yeşil çayda var olan nem içeriği zamanın artmasıyla düşmektedir. Kızılötesi gücün artırılmasıyla yeşil çaydaki nem içeriğinin transfer süresinin kayda değer bir şekilde azaldığı görülmektedir.

Nem içeriği yeşil çay için başlangıçta %75 iken bu değer sabit yatak deneylerinde %5’e, dönmeli akışlı akışkan yataklı deneylerde % 1’e düşürülmüştür.

Nem içeriklerinin azalma süreleri sabit yatakta 100 W, 250 W, 500 W, 750 W ve 1000 W için sırasıyla 200, 80, 35, 21 ve 14 dakika olup dönmeli akışlı akışkan yatak deneylerinde ise 210, 180, 135, 90 ve 55 dakika şeklindedir (Şimşek vd., 2021).



Şekil 26. Sabit yatakta farklı kızılötesi güçlerde kütle büzülme oranı- zaman grafiği



Şekil 27. Akışkan yatakta farklı kızılötesi güçlerde kütle büzülme oranı – zaman grafiği

Şekil 26’da sabit yatak, Şekil 27’de dönmeli akışlı akışkan yatak deneyleri için yeşil çayın kütle büzülme oranının zamana bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere yeşil çay için kütle büzülme oranı zamanın artmasıyla doğrusal bir şekilde azalmaktadır. Kızılötesi güç arttırıldıkça kütle büzülme oranı zamanı oldukça azalmaktadır (Şimşek vd., 2021).

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Sabit Yatakta Yeşil Çay Kurutma

Sabit yatak deneylerinde giriş sıcaklığı 19°C ile 20°C arasında değişmiştir. Bağıl nem değeri ise % 70,2 ile %75,8 arasında değişim göstermiştir.

100 W ve 50 g yeşil çay ile kurutma deneyi başlatıldı. Üründeki ağırlık değişimleri yirmişer dakika aralıklarla hassas terazi ile ölçülüp kaydedildi. 20'nci dakikanın sonunda ağırlık kaybı (su kaybı) 5 g olarak ölçüldü ve ürünün dış yüzeyinde hafiften bir şekil değişimi başladı. 40'ıncı ve 60'ıncı dakikaların sonunda ağırlık kayıpları 6 g olarak ölçüldü. 40'ınci dakikanın sonunda üründeki şekil değişiminin devam ettiği ve büzüşme gözlemlenirken 60'ınci dakikanın sonunda ise üründe belirgin bir renk ve şekil değişiminin meydana geldiği görüldü. 80'inci dakika 4 g'lık bir ağırlık kaybı, üründe sararmalar, büzüşme ve şekil değişimi gözlemlendi. 180'inci dakikaya kadar bu büzüşme, renk ve şekil değişimleri artarak devam etti. Üründeki ağırlık kaybının çok fazla bir değişim göstermeme nedeniyle 200'inci dakikada deney sonlandırıldı. 100 W'lık kuruma sonunda toplam ölçülen ağırlık kaybı 34 g olarak ölçüldü. Deney boyunca üründe herhangi bir yanma oluşumu gözlemlenmedi. Sabit yataktaki gerçekleştirilen en uzun deney 100 W değerinde 200 dakika ile kaydedildi.

250 W ve 50 g yeşil çay ile kurutma deneyi başlatıldı. Üründeki ağırlık değişimleri onar dakika aralıklarla hassas terazi ile ölçülüp kaydedildi. 10'uncu dakikanın sonunda ağırlık kaybı 5 g olarak ölçüldü ve üründe çok hafif bir şekil değişimi gözlemlendi. Ağırlık kaybı 20'nci dakikanın sonunda 6 g iken 30'uncu dakikanın sonunda 7 g ve 40'ınci dakikanın sonunda ise 4 g olarak ölçüldü. 40'ınci dakikanın sonunda büzüşmeyle beraber renk ve şekil değişiminin daha fazla olduğu gözlemlendi. 70'inci dakikanın sonunda ağırlık kaybı 2 g olarak ölçüldü. 80'inci dakikada 1 g'lık bir ağırlık kaybı meydana gelirken, üründe oldukça fazla bir büzüşme meydana geldiği gözlemlendi. Ürünün ağırlık kaybında fazla bir değişim olmamasıyla 80'inci dakikada deney sonlandırıldı. 250 W'lık kuruma sonunda toplam ölçülen ağırlık kaybı 35 g olarak kaydedildi. Deney boyunca üründe herhangi bir yanma oluşumu gözlemlenmedi.

500 W ve 50 g yeşil çay ile kurutma deneyi başlatıldı. Üründeki ağırlık değişimleri beşer dakika aralıklarla hassas terazi ile ölçülüp kaydedildi. 5'inci dakikanın sonunda 3

g'lık bir ağırlık kaybı ve üründe çok hafif bir şekil değişimi gözlemlendi. 10'uncu dakikada ağırlık kaybı 8 g olarak ölçülürken üründe renk değişimi meydana geldi ve şekil değişiminin artmaya başladığı görüldü. Ağırlık değişimi 25'inci dakikanın sonunda 4 g ve 30'uncu dakikanın sonunda 6 g olarak ölçüldü, üründeki renk ve şekil değişimi belirgin bir şekilde artış gösterdi. 25'inci dakikanın sonunda yeşil çay yapraklarının bazılarında yanma oluşumu gözlemlenirken 30'uncu dakikanın sonunda ise yanma durumu artış gösterdi. 500 W'lık kuruma sonunda toplam ölçülen ağırlık kaybı 35 g olarak kaydedildi. Ürünün kısa sürede kurummasına karşın istenilmeyen yanmanın meydana gelmesiyle ürün kalitesinde olumsuz derecede etki etmesi gözlemlendi.

750 W ve 50 g yeşil çay ile kurutma deneyi başlatıldı. Üründeki ağırlık değişimleri üçer dakika aralıklarla hassas terazi ile ölçülüp kaydedildi. 3'üncü dakikanın sonunda 4g'lık bir ağırlık kaybı ve üründe çok hafif bir şekil değişimi başladı. 6'ıncı dakikanın sonunda 6 g'lık bir ağırlık kaybı ölçülürken üründe şekil değişimiyle beraber hafif bir renk değişimi gözlemlendi. Ağırlık değişimleri 9'uncu dakikanın sonunda 7 g, 12'inci dakikanın sonunda 8 g ve 15'inci dakikanın sonunda 5 g olarak kaydedildi. 9'uncu dakikanın sonunda renk ve şekil değişiminin artması dışında yeşil çay yapraklarının bazılarında yanma oluşumu gözlemlendi. 12'inci dakikada yanma durumu devam ederken 15'inci dakikada bu durum artış gösterdi. 21'inci dakikada 1 g'lık bir ağırlık kaybı meydana gelirken, daha fazla üründe yanma durumunun olduğu gözlemlendi. 750 W'lık kuruma sonunda toplam ölçülen ağırlık kaybı 35 g olarak kaydedildi. Ürünün kısa sürede kurummasına karşın istenilmeyen yanmanın meydana gelmesiyle ürün kalitesinde olumsuz derecede etki etmesi gözlemlendi.

1000 W ve 50 g yeşil çay ile kurutma deneyi başlatıldı. Üründeki ağırlık değişimleri ikişer dakika aralıklarla hassas terazi ile ölçülüp kaydedildi. 2'inci dakikanın sonunda 2 g'lık bir ağırlık kaybı ve üründe çok hafif bir şekil değişimi başladı. 4'üncü ve 6'ncı dakikalarının sonunda 6 g'lık bir ağırlık kaybı ölçüldü. 4'üncü dakikanın sonunda renk ve şekil değişimi meydana gelirken, 6'ıncı dakikanın sonunda ise üründe yanma oluşumu gözlemlendi. 8'inci dakikanın sonunda yanma olayı devam ederken 10'uncu dakikanın sonunda yanma olayı artış gösterdi. 12'inci dakikanın sonunda ürünün çoğunda yanma oluştuğundan dolayı ve tamamen yanma eğiliminin gösterilmesi nedeniyle kuruma işlemi sonlandırıldı. Sabit yataktaki gerçekleştirilen en kısa deney 1000 W değerinde kaydedildi. Ürünün kısa sürede kurummasına karşın istenilmeyen yanmanın meydana gelmesiyle ürün

kalitesinde olumsuz derecede etki etmesi gözlemlendi. Kuruma deneylerinde kızılötesi güç değeri arttıkça yeşil çay yapraklarının kuruma süresinin azaldığı ve kuruma hızının arttığı belirlenmiştir. Tüm kızılötesi ısıtım güçleri için kuruma öncesi, kuruma safhalarında ve kurumuş ürünün örnek fotoğrafları Tablo 13’de gösterilmektedir.

Tablo 14’de verilen kurutulmuş yeşil çay numunelerine yapılan kalite analiz sonuçlarına göre ilk olarak su ekstraktı değeri ele alındığında, bu değerin yüksek olması çayın kalite açısından iyi olduğunu gösterir. Çay standartlarında su ekstrakt değerinin siyah çayda en az % 29, yeşil çayda ise en az % 32 olması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan analiz neticesinde su ekstraktı değerinin % 28,68 ile % 36,06 arasında değiştiği belirlenmiştir. Su ekstraktı değerinin en fazla % 36,06 ile 750 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 100 W (% 33,03), 500 W (% 29,84) ve 250 W (% 28,68) değerleri takip etmiştir.

Toplam kül miktarı, yeşil ve siyah çayda % 4-8 arasında olması beklenir. Yapılan analiz neticesinde toplam kül miktarı değerinin % 4,50 ile % 5,42 arasında değiştiği belirlenmiştir. Toplam kül miktarı değerinin en fazla % 5,42 ile 250 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 500 W (% 5,01), 750 W (% 4,98) ve 100 W (% 4,50) değerleri takip etmiştir.

Polifenollerin, çaydaki içeriğinin yüksek olması istenir. Yapılan analiz neticesinde polifenol değerinin % 6,42 ile % 9,28 arasında değiştiği belirlenmiştir. Polifenol değerinin en fazla % 9,28 ile 500 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 100 W (% 8,49), 750 W (% 8,18) ve 250 W (% 6,42) değerleri takip etmiştir.

Kaliteli bir çay yaprağındaki kafein miktarının yüksek olması beklenir. Yapılan analiz neticesinde kafein miktarı değerinin % 2,19 ile % 2,41 arasında değiştiği belirlenmiştir. Kafein miktarının değerinin en fazla % 2,41 ile 250 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 100 W (% 2,38), 750 W (% 2,24) ve 500 W (% 2,19) değerleri takip etmiştir.

Kaliteli bir çay yaprağındaki selüloz miktarının düşük olması beklenir. Yapılan analiz neticesinde selüloz miktarı değerinin % 18,66 ile % 18,92 arasında değiştiği belirlenmiştir. Selüloz miktarının değerinin en az % 18,66 ile 500 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 100 W (% 18,77), 750 W (% 18,79) ve 250 W (% 18,92) değerleri takip etmiştir.

Yapılan analiz neticesinde rutubet tayini değeri ise % 11,54 ile % 20,04 arasında değiştiği belirlenmiştir. Rutubet tayini değerinin en az % 11,54 ile 100 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 750 W (% 12,89), 500 W (% 15,91) ve 250 W (% 20,04) değerleri takip etmiştir.

Matematiksel modelleme sonuçlarını ele alırsak, belirleme katsayısının 1'e yakın, standart tahmini hata, azaltılmış ki kare ve ortalama karesel hata değerlerinin sıfıra yakın olması uygulanan modelin en uygun olduğunun bir ölçüsüdür. Bu durum dikkate alınarak en iyi beş model seçilmiştir. Tablo 8'deki verilere göre 100 W kızılötesi gücü için Hii vd., Wang ve Singh, Modified Page, Weibull ve Page modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99982, 0,99982, 0,99978, 0,99977 ve 0,99977 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00285, 0,00288, 0,00356, 0,00357 ve 0,00358'dir. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00048, 0,00032, 0,00040, 0,00040 ve 0,00040'tır. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,01610, 0,01617, 0,01800, 0,01801 ve 0,01805 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 12'deki eğriler, Hii vd. modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Şekil 12'de görüldüğü gibi 0-20 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeni zamana bağlı olarak azalmıştır. Bu azalma 40. dakikaya kadar devam etmiş, 80-160 dakika aralığında lineer bir artış göstermiştir. 180-200 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim yaşanmamıştır. Ürünlerdeki nem miktarının azalmasıyla boyutsuz kütle değişkeni lineerden eksponansiyel doğru bir davranış sergilemektedir.

Tablo 9'daki verilere göre 250 W kızılötesi gücü için Alibas (Modified Midilli-Kucuk), Balbay ve Şahin, Midilli-Kucuk, Hii vd. ve Aghbashlo vd. modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99996, 0,99995, 0,99995, 0,99979 ve 0,99976 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00046, 0,00058, 0,00061, 0,00264 ve 0,00296'dır. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00011, 0,00012, 0,00012, 0,00066 ve 0,00042'dir. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,00712, 0,00801, 0,00821, 0,01712 ve 0,01814 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 13'teki eğriler, Alibas (Modified Midilli-Kucuk) modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

0-10 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeni zamana bağlı olarak yavaşça azalmıştır. Bu azalma 10-20 dakika arasında devam etmiş, 20-50 dakika aralığında lineer

bir artış göstermiştir. 60-80 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 13).

Tablo 10'daki verilere göre 500 W kızılötesi gücü için Aghbashlo vd., Hii vd., Weibull, Modified Page ve Page modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99947, 0,99936, 0,99927, 0,99927 ve 0,99927 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00655, 0,00790, 0,00897, 0,00897 ve 0,00897'dir. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00109, 0,00263, 0,00149, 0,00149 ve 0,00150'dir. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,02861, 0,03143, 0,01971, 0,03348 ve 0,03349 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 14'deki eğriler, Aghbashlo vd. modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

0-5 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeni zaman bağlı olarak yavaşça azalmıştır. Bu azalma 5-10 dakika aralığında artarak devam ederken, 10-20 dakika aralığında lineer bir artış görülmüştür. 30-35 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 14).

Tablo 11'deki verilere göre 750 W kızılötesi gücü için Midilli-Kucuk, Balbay ve Şahin, Alibas (Modified Midilli- Kucuk), Aghbashlo vd. ve Hii vd. modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99989, 0,99989, 0,99989, 0,99968 ve 0,99968 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00134, 0,00135, 0,00132, 0,00380 ve 0,00380'dir. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00033, 0,00034, 0,00044, 0,00063 ve 0,00127'dir. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,01292, 0,01298, 0,01287, 0,02181 ve 0,02181 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 15'deki eğriler, Midilli-Kucuk modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

0-3 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeni zamana bağlı olarak azalmıştır. Bu azalma 6. dakikaya kadar devam etmiş, 6-12 dakika aralığında lineer bir artış göstermiştir. 18-21 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 15).

Tablo 12'deki verilere göre 1000 W kızılötesi gücü için Balbay ve Şahin, Aghbashlo vd., Hii vd., Page ve Modified Page modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99991, 0,99960, 0,99958, 0,99938 ve 0,99938 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00129, 0,00577, 0,00611, 0,00903 ve 0,00904'dür. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00032, 0,00096, 0,00204, 0,00151 ve 0,00151'dir. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,01268, 0,02685, 0,02763, 0,03360 ve 0,03361 olduğu görülmektedir. Bu

veriler ve Şekil 16'daki eğriler, Balbay ve Şahin modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

0-2 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeni zamana bağlı olarak azalmıştır. Bu azalma 4. dakikaya kadar devam etmiş, 6-10 dakika aralığında lineer bir artış göstermiştir. 12-14 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim yaşanmamıştır (Şekil 16).

750 W kuruma hızının kısa olması ve elde edilen verilere göre 50 g yeşil çay için en iyi ince tabaka kızılötesi ışınlı kurutma davranışını gösteren model Midilli-Kucuk modeli iken kurutma denklemi denklem(49)'de verilmiştir.

$$MR=0,987813\exp(-0,010031t^{1,896194})+(-0,002483)t \quad (49)$$

Dönmeli Akışlı Akışkan Yatakta Yeşil Çay Kurutma

Dönmeli akışlı akışkan yataklı deneylerde giriş sıcaklığı 19°C ile 21,4°C arasında değişmiştir. Bağlı nem değeri ise % 14 ile % 17,1 arasında değişim göstermiştir. Çevre sıcaklığı 20°C ile 22,2°C arasındadır. Deney başlangıcında hava hızı ortalama 5 m/s'de tutulmuş, bu değer deney ortalarında 4,5 m/s ve deney sonunda ise 4 m/s'ye ulaşmıştır.

100 W kızılötesi güç ile 50g yeşil çay numuneleri ürün tepsisine her tarafına eşit gelecek şekilde yerleştirildi. Otuz dakikalık periyotlarla başlatılan kuruma deneylerinde ürünlerdeki ağırlık değişimleri hassas terazi ile ölçüldü. 30'uncu dakikanın sonunda 7 g'lık bir ağırlık kaybı ve çok az da olsa şekil değişimi meydana geldi. 60'ıncı dakikanın sonunda 5 g'lık bir ağırlık kaybı oluştu, hafiften şekil ve renk değişimi gözlemlendi. 90'ıncı dakikanın sonunda 8 g ile en çok ağırlık kaybının olduğu kaydedildi. Ve üründe renk ve şekil değişiminde artış gözlemlendi. 120'nci dakikanın sonunda 5 g'lık bir ağırlık kaybı oluştu. Üründe renk ve şekil değişimiyle beraber yeşil çay yapraklarının gözle görülür bir şekilde ufaldığı gözlemlendi. 180'inci ve 210'uncu dakikaların sonunda su kaybı azalırken yapraklardaki ufalmaların artması ile birlikte üründe tozlaşmalar meydana geldi. Dönmeli akışlı akışkan yatakta kuruma deneylerinin 210 dakika ile en uzun süren safhası tamamlandı. Bu aşamada kaydedilen toplam su kaybı 37 g olarak deney sonlandı.

250 W kızılötesi güç ile 50 g yeşil çay numuneleri ürün tepsisine her tarafına eşit gelecek şekilde yerleştirildi. Yirmi dakikalık periyotlarla başlatılan kuruma deneylerinde ürünlerdeki ağırlık değişimleri hassas terazi ile ölçüldü. 20'inci dakikanın sonunda 6 g'lık bir ağırlık kaybı ve çok az da olsa şekil değişimi meydana geldi. 40'ıncı dakikanın sonunda 5 g'lık bir ağırlık kaybı oluştu, hafiften şekil ve renk değişimi gözlemlendi. 60'ıncı dakikanın sonunda 4 g'lık ağırlık kaybıyla beraber renk ve şekil değişiminde artışın olduğu görüldü. 80'inci dakikanın sonunda 5 g, 100'üncü dakikanın sonunda ise 4 g'lık bir su kaybı oluştu. 120'inci dakikanın sonunda 4 g'lık su kaybı oluşurken, ürünlerdeki renk ve şekil değişiminin yanında ürünün ufalmaya başladığı gözlemlendi. 160'ıncı ve 180'inci dakikaların sonunda ürünlerdeki su kaybında bir artış olmazken, yapraklardaki ufalmanın daha da fazla olduğu ve tozlaşmanın meydana geldiği kaydedildi. Bu aşamada kaydedilen toplam su kaybı 37 g olarak deney sonlandı.

500 W kızılötesi güç ile 50 g yeşil çay numuneleri ürün tepsisine her tarafına eşit gelecek şekilde yerleştirildi. On beş dakikalık periyotlarla başlatılan kuruma deneylerinde ürünlerdeki ağırlık değişimleri hassas terazi ile ölçüldü. 15'inci dakikanın sonunda 5 g'lık bir ağırlık kaybı ve çok hafif şekil değişimi meydana geldi. 30'uncü dakikanın sonunda 3 g'lık bir su kaybı oluşurken şekil değişiminin stabil olduğu gözlemlendi. 45'inci dakikanın sonunda 4 g'lık bir ağırlık kaybı ve şekil değişimiyle beraber renk değişimi de meydana geldi. 60., 75. ve 90'ıncı dakikaların sonunda ağırlık kaybının 5 g olduğu görülürken renk ve şekil değişiminde artışın meydana geldiği gözlemlendi. 120'inci ve 135'inci dakikaların sonunda 3 g'lık bir ağırlık kaybı oluştu. Ve renk ve şekil değişiminin yanı sıra yeşil çay yapraklarında gözle görülür bir ufalmayla beraber tozlaşmanın olduğu görüldü. Bu aşamada kaydedilen toplam su kaybı 37 g olarak deney sonlandı.

750 W kızılötesi güç ile 50 g yeşil çay numuneleri ürün tepsisine her tarafına eşit gelecek şekilde yerleştirildi. On dakikalık periyotlarla başlatılan kuruma deneylerinde ürünlerdeki ağırlık değişimleri hassas terazi ile ölçüldü. 10'uncü dakikanın sonunda 5 g'lık bir ağırlık kaybı ve çok hafif şekil değişimi meydana geldi. 20'inci dakikanın sonunda ağırlık kaybında bir artış gözlemlenerek bu değerinin 7 g olduğu kaydedildi. Şekil değişiminin yanında renk değişiminin de başladığı görüldü. 30'uncü dakikanın sonunda 4 g'lık bir su kaybı oluşurken, renk ve şekil değişiminin artış gösterdiği gözlemlendi. 50., 60. ve 70'inci dakikaların sonunda 4 g'lık bir su kaybı oluştu. Renk ve şekil değişimiyle beraber yeşil çay yapraklarında ufalma, tozlaşma olayı meydana geldi. 90'ıncı dakikanın

sonunda ise su kaybında bir artış görülmedi ve yeşil çay yapraklarında ufalma, tozlaşma olayının daha fazla olduğu görüldü. Bu aşamada kaydedilen toplam su kaybı 37 g olarak deney sonlandı.

1000 W kızılötesi güç ile 50 g yeşil çay numuneleri ürün tepsisine her tarafına eşit gelecek şekilde yerleştirildi. Beş dakikalık periyotlarla başlatılan kuruma deneylerinde ürünlerdeki ağırlık değişimleri hassas terazi ile ölçüldü. 5'inci dakikanın sonunda 6 g'lık bir ağırlık kaybı oluşurken hafif bir renk ve şekil değişimi meydana geldi. 10'uncu dakikanın sonunda 3 g'lık az bir ağırlık kaybı oluştu, renk ve şekil değişimlerinde artış görüldü. 25'inci ve 30'uncu dakikaların sonunda 4 g'lık su kaybı, renk ve şekil değişimindeki artışın devam ettiği gözlemlendi. Ayrıca 30'uncu dakikanın sonunda bazı yeşil çay yapraklarında yanma oluşumu başladı. 35'inci dakikanın sonunda 3 g'lık bir ağırlık kaybı meydana gelirken bazı yeşil çay yapraklarında oluşan yanma olayı artış gösterdi. 50'nci ve 55'inci dakikaların sonunda meydana gelen ağırlık kaybı azalırken, yapraklardaki yanma olayı giderek artış gösterdi ve yaprakların boyutundaki gözle görülür bir küçülmenin olduğu gözlemlendi. Ürünün kuruma süresi kısalsa da meydana gelen yanma olayı ile ürün kalitesi üzerinde olumsuz bir etki bıraktığı görülmektedir. Ürün kurumaya devam edildiğinde tamamen yanma eğiliminde olduğundan dolayı 35 g'lık kuruma ile deney sonlandı. Tüm kızılötesi ısıtım güçleri için kuruma öncesi, kuruma safhalarında ve kurumuş ürünün örnek fotoğrafları Tablo 20'de gösterilmektedir.

Tablo 21'de verilen kurutulmuş yeşil çay numunelerine yapılan kalite analiz sonuçlarına göre ilk olarak su ekstraktı değeri ele alındığında, bu değerlerin yüksek olması çayın kalite açısından iyi olduğunu gösterir. Çay standartlarında su ekstraktı değerinin siyah çayda en az % 29, yeşil çayda ise en az % 32 olması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan analiz neticesinde su ekstraktı değerinin % 23,89 ile % 44,04 arasında değiştiği belirlenmiştir. Su ekstraktı değerinin en fazla % 44,04 ile 500 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 100 W (% 41,02), 250 W (% 30,70), 1000 W (% 24,89) ve 750 W (% 23,89) değerleri takip etmiştir.

Toplam kül miktarı, yeşil ve siyah çayda % 4-8 arasında olması beklenir. Yapılan analiz neticesinde toplam kül miktarı değerinin % 4,48 ile % 5,87 arasında değiştiği belirlenmiştir. Toplam kül miktarı değerinin en fazla % 5,87 ile 250 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 100 W (% 5,62), 750 W (% 5,47), 1000 W (% 5,32) ve 500 W (% 4,48) değerleri takip etmiştir.

Polifenollerin, çaydaki içeriğinin yüksek olması istenir. Yapılan analiz neticesinde polifenol değerinin % 0,32 ile % 4,30 arasında değiştiği belirlenmiştir. Polifenol değerinin en fazla % 4,30 ile 1000 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 750 W (% 4,05), 250 W (% 2,44) ve 500 W (% 0,32) değerleri takip etmiştir. 100 W için numune yetersizliğinden dolayı bir veri alınamamıştır.

Kaliteli bir çay yaprağındaki kafein miktarının yüksek olması beklenir. Yapılan analiz neticesinde kafein miktarı değerinin % 0,81 ile % 1,91 arasında değiştiği belirlenmiştir. Kafein miktarının değerinin en fazla % 1,91 ile 750 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 1000 W (% 1,76), 250 W (% 1,38), 500 W (% 0,94) ve 100 W (% 0,81) değerleri takip etmiştir.

Kaliteli bir çay yaprağındaki selüloz miktarının düşük olması beklenir. Yapılan analiz neticesinde selüloz miktarı değerinin % 15,73 ile % 17,70 arasında değiştiği belirlenmiştir. Selüloz miktarının değerinin en az % 15,73 ile 250 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 500 W (% 16,26), 1000 W (% 17,63) ve 750 W (% 17,70) değerleri takip etmiştir. 100 W için numune yetersizliğinden dolayı bir veri alınamamıştır.

Yapılan analiz neticesinde rutubet tayini değeri ise % 2,20 ile % 17,45 arasında değiştiği belirlenmiştir. Rutubet tayini değerinin en az % 2,20 ile 100 W deneyinden alınan yeşil çay yaprağı örneklerinde saptanmış ve bunu sırasıyla 250 W (% 5,96), 500 W (% 7,08), 750 W (% 15,52) ve 1000 W (% 17,45) değerleri takip etmiştir.

Matematiksel modelleme sonuçlarını ele alırsak, belirleme katsayısının 1'e yakın, standart tahmini hata, azaltılmış ki kare ve ortalama karesel hata değerlerinin sıfıra yakın olması uygulanan modelin en uygun olduğunun bir ölçüsüdür. Bu durum dikkate alınarak en iyi beş model seçilmiştir. Tablo 15'deki verilere göre 100 W kızılötesi gücü için Alibas (Modified Midilli-Kucuk), Balbay ve Şahin, Midilli-Kucuk, Aghbashlo vd. ve Wang ve Singh modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99986, 0,99986, 0,99986, 0,99983 ve 0,99978 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00159, 0,00160, 0,00163, 0,00196 ve 0,00248'dir. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00053, 0,00040, 0,00041, 0,00033 ve 0,00041'dir. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,01410, 0,01414, 0,01426, 0,01564 ve 0,01759 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 17'deki eğriler, Alibas (Modified Midilli-Kucuk) modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

Şekil 17’de görüldüğü gibi 0-30 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde zamana bağlı olarak belirgin bir azalma meydana gelmemiştir. Bu azalma 60. dakikaya kadar artarak devam etmiş, 90-180 dakika aralığında lineer bir artış göstermiştir. 200-220 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim yaşanmamıştır.

Tablo 16’deki verilere göre 250 W kızılötesi gücü için Parabolic, Wang ve Singh ve Demir vd., Balbay ve Şahin ve Alibas (Modified Midilli-Kucuk) modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99995, 0,99995, 0,99994, 0,99994 ve 0,99994 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00087, 0,00093 0,00104, 0,00103 ve 0,00103’dür. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00012, 0,00012, 0,00017, 0,00017 ve 0,00021’dir. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,00932, 0,00966, 0,01021, 0,01014 ve 0,01016 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 18’deki eğriler, Parabolic modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

0-20 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeni zamana bağlı olarak azalmıştır. Bu azalma 60-120 dakika aralığında lineer bir artış göstermiştir. 180-200 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim görülmemiştir (Şekil 18).

Tablo 17’deki verilere göre 500 W kızılötesi gücü için Aghbashlo vd., Alibas (Modified Midilli-Kucuk), Balbay ve Şahin, Midilli-Kucuk ve Wang ve Singh modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99990, 0,99988, 0,99986, 0,99984 ve 0,99978 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00209, 0,00258, 0,00305, 0,00341 ve 0,00473’dür. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00026, 0,00052, 0,00051, 0,00057 ve 0,00059’dur. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,01446, 0,01607, 0,01748, 0,01845 ve 0,02175 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 19’deki eğriler, Aghbashlo vd. modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

0-15 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde zamana bağlı olarak belirgin bir azalma meydana gelmemiştir. Bu azalma 40. dakikaya kadar artarak devam etmiş, 60-90 dakika aralığında lineer bir artış göstermiştir. 120-140 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim yaşanmamıştır (Şekil 19).

Tablo 18’deki verilere göre 750 W kızılötesi gücü için Wang ve Singh, Aghbashlo vd., Hii vd., Modified Page ve Weibull modellerinde R^2 değerlerinin sırasıyla 0,99986, 0,99980, 0,99918, 0,99884 ve 0,99884 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00242, 0,00331, 0,00331, 0,01935 ve 0,01935’dir. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00030, 0,00041, 0,00275, 0,00242 ve 0,00242’dir. RMSE değerleri ise

sırasıyla 0,01555, 0,01820, 0,03709, 0,04399 ve 0,04399 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 20'deki eğriler, Wang ve Singh modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

0-10 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde zamana bağlı olarak belirgin bir azalma meydana gelmemiştir. Bu azalma 50-70 dakika aralığında lineer bir artış göstermiştir. 80-90 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim yaşanmamıştır (Şekil 20).

Tablo 19'daki verilere göre 1000 W kızılötesi gücü için Parabolic, Wang ve Singh, Alibas (Modified Midilli-Kucuk), Balbay ve Şahin ve Aghbashlo vd. modellerinde R² değerlerinin sırasıyla 0,99984, 0,99982, 0,99983, 0,99983 ve 0,99956 olduğu görülmektedir. Bu modellerin SSE değerleri sırasıyla 0,00404, 0,00462, 0,00421, 0,00435 ve 0,01111'dir. χ^2 değerleri sırasıyla 0,00045, 0,00046, 0,00060, 0,00054 ve 0,00111'dir. RMSE değerleri ise sırasıyla 0,01835, 0,01963, 0,01872, 0,01905 ve 0,03043 olduğu görülmektedir. Bu veriler ve Şekil 21'deki eğriler, Parabolic modelinin uygulanan modeller arasında en uygun model olduğunu göstermektedir.

0-5 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde zamana bağlı olarak belirgin bir azalma meydana gelmemiştir. Bu azalma 10. dakikaya kadar artarak devam etmiş, 15-35 dakika aralığında lineer bir artış göstermiştir. 45-55 dakika aralığında boyutsuz kütle değişkeninde çok belirgin bir değişim yaşanmamıştır (Şekil 21).

500 W kuruma hızının kısa olması ve elde edilen verilere göre 50 g yeşil çay için en iyi ince tabaka kızılötesi ışınlı kurutma davranışını gösteren model Aghbashlo vd. modeli iken kurutma denklemi denklem(53)'de verilmiştir.

$$MR = \exp\left(-\frac{0,006761t}{1+(-0,005811)t}\right) \quad (53)$$

Yapılan sabit yatak ve dönmeli akışlı akışkan yatak deneylerini karşılaştırdığımızda;

- Dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutma ile kurutulan yeşil çay yapraklarının su ekstraktı değerinin sabit yatakta kurutulan numuneye göre daha yüksek çıkması, dönmeli akışlı akışkan yataklı kurutma sisteminden daha uygun ve verimli bir sonuç alınacağını göstermektedir.

- Dönmeli akışlı akışkan yataklı sistemde kurutulan yeşil çay örneklerinin su ekstraktı değerleri sabit yatakta kurutulan yeşil çay örneklerinden yüksek çıkmıştır. Dönmeli akışlı akışkan yataklı sistemde kurutulan yeşil çay örneklerindeki ham lif oranı, polifenol ve rutubet tayini değerleri ise sabit yatakta kurutulan yeşil çay örneklerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kül tayini değerleri iki kurutma sistemi için yaklaşık değerlerde olduğu görülmüştür.
- Sabit yatak ve dönmeli akışlı akışkan yataklı deneylerinde kızılötesi güç arttıkça kurutma hızının arttığı görülmüştür. Nem içeriğinin ve kütle büzülme oranının zaman arttıkça azaldığı, kızılötesi güç arttırıldıkça sürenin daha da kısaldığı görülmüştür.
- Kızılötesi gücü arttırıldıkça özellikle sabit yatak deneylerinde meydana gelen ürünlerdeki yanma olayı kurutma için istenmeyen bir durum olsa da güç değerinin arttırıldıkça kurutma zamanının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Sabit yatak ve dönmeli akışlı akışkan yatak deneylerinde ise ince tabaka kurutulması ve matematiksel modellemesinde önemli olan sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- İnce tabaka sabit yatak kızılötesi yeşil çay kurutma davranışını gösteren en iyi model Midilli- Kucuk modeli olduğu belirlendi.
- İnce tabaka sabit yatak kızılötesi yeşil çay kurutma için en uygun kızılötesi kurutma gücü 750W olarak bulundu.
- İnce tabaka dönmeli akışlı akışkan yatak yeşil çay kurutma davranışını gösteren en iyi model Aghbashlo vd. modeli olduğu belirlendi.
- İnce tabaka dönmeli akışlı akışkan yatak yeşil çay kurutma için en uygun kızılötesi kurutma gücü olarak bulundu 500W olarak bulundu
- Kızılötesi gücün arttıkça kurutma zamanının büyük ölçüde azaldı belirlendi.
- Nem içeriğinin ve kütle büzülme oranının zaman arttıkça azaldığı, kızılötesi güç arttırıldıkça sürenin daha da kısaldığı görülmüştür.

5. ÖNERİLER

- Endüstriyel bir kurutma yöntemi olan kızılötesi ışınının farklı kurutma yöntemleriyle birlikte kullanılmasının kurutma performansına etkisinin araştırılması kurutma literatürüne katkı yapacağı düşünülmektedir.
- Deney düzeneğinde tüm ölçümlerin zamana bağlı ölçülüp kayıt yapıldığı tam kontrollü bir deney seti geliştirilebilir.
- Ürünün renk değişimi, iç yapısı ve ayrıntılı ve kapsamlı gıda kalite analizlerinin yapılması literatüre daha fazla katkı sağlayacaktır.
- Dönmeli akışlı akışkan yataklı kızılötesi kurutma sisteminde farklı ürünlerin kurutulması bu yöntemin kurutma teknolojisine katacağı faydanın daha fazla anlaşılmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Akpınar, E. K., Midilli, A. and Bicer, Y. (2003a). Experimental investigation of drying behaviour and conditions of pumpkin slices via a cyclone-type dryer. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(14), 1480–1486. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1565>
- Akpınar, E., Midilli, A. and Bicer, Y. (2003b). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44(10), 1689–1705. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00171-1)
- Akpınar, E.K., Midilli, A. and Biçer, Y. (2005). Thermodynamic analysis of the apple drying process. *Proc. IMechE Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 219(1), 1–14.
- Aksoy, A. (2019). Farklı kurutma yöntemlerinin kıymanın kurutma kinetiği, mikroyapısı, rengi ve rehidrasyon oranı üzerine etkisi. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 99 s.
- Aktar, C. (2019). Karides işleme artıklarından astaksantin ekstraksiyonu: farklı kurutma yöntemlerinin astaksantin verim ve kalitesine etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, Türkiye, 56 s.
- Aktaş, M., İlbaş, M., Yalçın, A. and Şahin, M. (2013). Kızılötesi ışınlı bir kurutucuda kuruma davranışlarının deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4), 767-775.
- Albayrak, B. B., Tuncel, N. B. and Kocabıyık, H. (2021). Bazı instant gıdaların üretiminde kızılötesi kurutmanın etkisi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 7(1), 100-113. <https://doi.org/10.28979/jarnas.890536>
- Alkaç, S. P. (2019). Isı pompalı infrared kurutucuda dilimlenmiş limonun kurutulmasının performans analizi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 97 s.
- Altunkanat, H. (2019). Farklı kurutma ön işlemleri ve yöntemlerinin pırasanın (allium porrum l.) fizikokimyasal ve duyuşal özellikleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye, 95 s.
- Arkain, B. (2021). Gölgede, mikrodalga, konvektif ve kombine mikrodalgakonvektif kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulmuş muşmula meyvesinin kurutma kinetiği ve kalite parametreleri açısından incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 99 s.

- Arslan, N. (2012). İnfrared kurutma yönteminin kurutulmuş mantı kalitesi üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye, 51 s.
- Aykaç, G., Barlas Uzun, M., and Özçelikay, G. (2014). Sosyal yönüyle çay “Camellia Sinensis” . *Lokman Hekim Dergisi*, 4(1), 1–5.
- Banı, A. (2014). Kızılciğin infrared ısısı ile kurutulmasında kütle transfer katsayılarının ve vitamin kayıplarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 90 s.
- Batcha, M. F. M., Sulaiman, S. A. and 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>
- Batman, S. G. (2016). Pastırma üretiminde infrared kurutma yönteminin kullanımı. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 88 s.
- Bozkurt, S., Altay, Ö., Koç, M. and Kaymak Ertekin, F. (2020). Fluidized bed applications in powder food processes. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(4), 818-825. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i4.818-825.2861>
- Bölek, S. (2020). Vakum kurutucu ve akışkan yatak kurutucu kullanılarak kurutulmuş avokadoların kuruma kinetikleri ve kalite karakteristiklerinin kıyaslanması. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 7(4), 814–822. <https://doi.org/10.30910/turkjans.686733>
- Cabrera, C., Artacho, R. and Giménez, R. (2006). Beneficial effects of green tea—A review. *Journal of the American College of Nutrition*, 25(2), 79–99. <https://doi.org/10.1080/07315724.2006.10719518>
- Chacko, S. M., Thambi, P. T., Kuttan, R. and Nishigaki, I. (2010). Beneficial effects of green tea:A literature review. *Chinese Medicine*, 5, 1–9. <https://doi.org/10.1186/1749-8546-5-13>
- Çakmak, H., Bozdoğan, N., Turkut, G. M., Kumcuoğlu, S. and Tavman, Ş. (2016). Dağ çileğinin (arbutus unedo l.) kurutma kinetiğinin incelenmesi ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Gıda / the Journal of Food*, 41(4), 227–234. <https://doi.org/10.15237/gida.gd16011>
- Çalhan, R., Kaya, D., Tulger, G. and Eyidoğan, M. (2012). Organik gübre kurutma teknolojileri: akışkan yataklı kurutucular. *Tmmob Mmo Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(634), 22-33.

- Çınar, İ. (2014). Konveksiyonel ve akışkan yataklı sistemlerde bazı sebzelerin kuruma karakteristiklerinin belirlenmesi. *Gıda / the Journal of Food*, 39, 171–177. <https://doi.org/10.5505/gida.80299>
- Dağcı, G. (2014). Ozmotik ön kurutma yapılmış kivi meyvesinin kızılötesi dalga destekli akışkan yatak kurutucu ile kurutulması. Yüksek Lisans Tezi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Türkiye, 159 s.
- Delfiya, D. S. A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P. and Pandiselvam, R. (2021). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, e13810, 1–19. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13810>
- Demir, Ö. (2019). Kızılötesi kurutucuda nane bitkisinin optimum kurutma sıcaklığının belirlenmesi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 1094–1100.
- Deniz, Z. (2010). Akışkan yataklı kurutucu modellemesi ve analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 46 s.
- Dogru, M., Midilli, A. and Howarth, C. R. (2002). Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis. *Fuel Processing Technology*, 75(1), 55–82. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00234-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00234-X)
- Doğan, A. (2020). Akışkan yatak kurutma sisteminde hesaplamalı akış dinamiği analizleri. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 137 s.
- Doymaz, I. (2013). Determination of infrared drying characteristics and modelling of drying behaviour of carrot pomace. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 19(1), 44–53.
- Ekinci, U. (2016). Akışkan yataklı bir kurutucunun kurutma parametrelerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 66 s.
- Elmas, C. and Gezer, C. (2019). Çay bitkisinin (*camellia sinensis*) bileşimi ve sağlık etkileri. *Akademik Gıda*, 17(3), 417–428. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.647733>
- Engür, B. (2019). Mantarın kurutulmasında kurutma yönteminin etkisinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 69 s.
- Erçetin, Ü. and Uralcan, İ. Y. (2009). Kaynatılmış buğdayın akışkan yatakta kurutulmasının deneysel araştırılması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3), 89-99.

- Ersöz, M. A. and Doğan, H. (2010). Akışkan yataklı sürekli bir kurutucuda göl tuzu kurutulmasının deneysel incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 155–163.
- Ferruzzi, M. G. (2010). The influence of beverage composition on delivery of phenolic compounds from coffee and tea. *Physiology and Behavior*, 100(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2010.01.035>
- Fevzioğlu, M. (2008). İnfrared uygulamasının pirinç ve arpa ana bileşenleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 134 s.
- Francis, N. K., Viswanadhan, K. G. and Paulose, M. M. (2015). Swirling abrasive fluidized bed machining: Effect of process parameters on machining performance. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(7), 852–857. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.973580>
- Gökmen, S. (2017). Manti üretiminde geleneksel yöntem alternatif olarak infrared, ultraviyole-c ve vakum uygulamaları. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 153 s.
- Guo, Y., Wu, B., Guo, X., Ding, F., Pan, Z. and Ma, H. (2020). Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characterizations. *Lwt - Food Science and Technology*, 126, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109312>
- Güldemir, K., Çakır, Ö. and Çakıroğlu, K. (2020). Yabani-ekşi elmanın (malus sylvestris miller) antioksidan aktivite ve fenolik madde içeriği üzerine farklı kurutma yöntemlerinin etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(1), 279–285. <https://doi.org/10.35234/fumbd.670865>
- Güleç, F. and Turhan Özdemir, G. D. (2017). Karayemiş (laurocerasus officinalis roemer) meyvesinin kuruma karakteristiğinin incelenmesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 6(1), 73–80.
- Güney, M. Ş. (2007). Akışkan yatakta fındık kavurma işleminin deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 167 s.
- Güngör, A. (2013). Sebze ve meyve kurutmada kullanılan kurutucular ve kurutma teknolojileri. *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 17-20 Nisan, 43-63.
- Gür, M. (2016). Balkabağının akışkan yataklı kurutucuda kurutulmasının deneysel ve teorik incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 145. <https://doi.org/10.17482/uujfe.84114>

- Gürel, A. E. (2015). Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı akışkan yataklı bir kurutucunun tasarımı, imalatı ve deneysel analizi. Doktora Tezi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 120 s.
- Gürel, A. E., Ceylan, İ. and Uz, D. (2017). Gıda kurutulmasında akışkan yataklı kurutma sistemlerinin kullanımı: Bir inceleme. *1. Uluslararası Enerji Sistemleri Mühendisliği Konferansı*, Karabük, 2-5 Kasım, 83–90.
- Han, M. B. (2019). Mantar kurutmada infrared kurutma tekniğinin kullanılması. Yüksek Lisans Tezi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye, 39 s.
- Heybeli, N. (2017). Farklı kurutma sistemlerinin birlikte kullanımı ile stanley erik çeşidinin kurutulması üzerine bir araştırma. Doktora Tezi. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, Türkiye, 112 s.
- Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L. and Sunden, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science and Technology*, 110, 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>
- İşsever, M. (2019). Farklı kurutma yöntemleri ile zencefilin kurutulması ve bazı kalite özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 82 s.
- Sorour, H. and El-Mesery, H. (2014). Effect of microwave and infrared radiation on drying of onion slices. *Natural and Social Sciences*, 2(5), 119–130.
- Jun, G. J., Raghavan, V. R. and 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>
- Kalender, M. and Akosman, C. (2015). Infrared kurutucuda ayçiçeği tohumlarının kuruma davranışı ve kuruma modellerine uyum analizi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 51–56.
- Karaca, E. (2019). Farklı kurutma yöntemlerinin hünnap (zizyphus jujuba mill.) pestilinin fizikokimyasal ve duyu özellikleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt, Türkiye, 117 s.
- Karaosman, N. (2019). Yeşil çay üretiminde farklı kurutma yöntemlerinin çayın kuruma performansı ve renk değişimi üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, Türkiye, 37 s.
- Kaplan, Ö. (2012). Helezon konveyör tipi kurutucuda odun parçacıklarının kurutulmasının deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 54 s.

- Keleş, C. Ö. and Saçılık, K. (2019). Basınçlı hava kullanılan infrared ısıtıcılı kurutucuda kabuklu fındık kurutulması. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 34, 65–72. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.434531>
- Kocabıyık, H. and Demirtürk, B. S. (2008). Nane yapraklarının infrared radyasyonla kurutulması. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 5(3), 239–246.
- Koday, S. (2000). Türkiye çay tarım alanlarının dağılışı ve çay üretimimizdeki gelişmeler. *Türk Coğrafya Dergisi*, 35, 321–346.
- Kucuk, İ. and Doymaz, İ. (2019). Experimental and modeling investigation of mass transfer during infrared drying of kumquat slices. *Adıyaman University Journal of Science*, 9(1), 48–65.
- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A. and Dincer, I. (2014). A review on thin-layer drying-curve equations. *Drying Technology: An International Journal*, 32(7), 757–773. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.873047>
- Kuprianov, V. I., Kaewklum, R., Sirisomboon, K., Arromdee, P. and Chakritthakul, S. (2010). Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk. *Applied Energy*, 87(9), 2899–2906. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.009>
- Kurtuluş, O. (2007). Akışkan yatakta kurutma prosesinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 64 s.
- Liang, Y., Lu, J., Zhang, L., Wu, S. and Wu, Y. (2005). Estimation of tea quality by infusion colour difference analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(2), 286–292. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1953>
- Liu, Y., Zhu, W., Luo, L., Li, X. and Yu, H. (2014). A mathematical model for vacuum far-infrared drying of potato slices. *Drying Technology*, 32(2), 180–189. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.811687>
- Midilli, A., Olgun, H. and Ayhan, T. (1999). Experimental studies on mushroom and pollen drying. *International Journal of Energy Research*, 23(13), 1143–1152.
- Midilli, A. (2001). Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research*, 25(8), 715–725. <https://doi.org/10.1002/er.715>
- Midilli, A. and Kucuk, H. (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion 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. and Kucuk, H. (2015). Assessment of exergetic sustainability indicators for a single layer solar drying system. *International Journal of Exergy*, 16(3), 278–292. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2015.068227>

- Onin, M. (2012). Bazı meyve ve sebzelerin infrared kurutucuda kurutulmasının deneysel ve teorik incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 92 s.
- Önçırak, M. (2019). Çay sektörü ve türkiye ekonomisi. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 113 s.
- Özen, E. (2016). Farklı kurutma teknikleri ile domatesin kurutulması. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 68 s.
- Özen, E. and Kar, F. (2018). Farklı teknikler kullanılarak domatesin kurutulması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 47–57.
- Özkoç, S.Ö. (2010). Kızılötesi ve kızılötesi-kombinasyon ısıtma teknolojilerinin gıda işleme uygulamalarında kullanımı. *Gıda/The Journal of Food*, 35(3), 211-218.
- Öztürk Erdem, B. (2018). Hicaz narı (*punica granatum* l.) tanelerinin kızılötesi, mikrodalga ve konvektif kurutma yöntemleriyle kurutulması. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 75 s.
- Öztürk, S. (2014). Muz ve kivi'nin dielektrik özelliklerinin mikrodalga ve kızılötesi-mikrodalga kombinasyonu ile kurutma karakteristikleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 131 s.
- Parlak, N. (2014). Akışkan yataklı kurutucuda zencefilin kuruma kinetiğinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 261-269.
- Pekdoğan Göztok, S. and İçier, F. (2017). Karbon fiber destekli kabin kurutucuda farklı sıcaklıklarda elma dilimlerinin kurutulmasının incelenmesi: kurutma karakteristikleri ve performans değerlendirmesi. *Akademik Gıda*, 15(4), 355–367. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.370103>
- Polatçı, H. (2008). Farklı kurutma yöntemlerinin reyhan (*ocimum basilicum*) bitkisinin kuruma süresine ve kalitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, Türkiye, 57 s.
- Ren, Z., Yu, X., Yagoub, A. E. G. A., Fakayode, O. A., Ma, H., Sun, Y. and Zhou, C. (2021). combinative effect of cutting orientation and drying techniques (hot air, vacuum, freeze and catalytic infrared drying) on the physicochemical properties of ginger (*zingiber officinale* roscoe). *Food Science and Technology*, 144, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111238>
- Reto, M., Figueira, M. E., Filipe, H. M. and Almeida, C. M. M. (2007). Chemical composition of green tea (*Camellia sinensis*) infusions commercialized in Portugal. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(4), 139–144. <https://doi.org/10.1007/s11130-007-0054-8>

- Riadh, M. H., Ahmad, S. A. B., Marhaban, M. H. and Soh, A. C. (2015). Infrared heating in food drying: an overview. *Drying Technology*, 33(3), 322–335. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.951124>
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R. and Sharma, S. C. (2020). Infrared drying of food materials: recent advances. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 381–398. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09237-w>
- Selçuk, M. (2019). Farklı kurutma sıcaklıklarının cevizin kuruma süresi ve kalitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, Türkiye, 84 s.
- Shahbaz, M., Yusup, S., Naz, M. Y., Sulaiman, S. A., Inayat, A. and Partama, A. (2017). Fluidization of palm kernel shell, palm oil fronds, and empty fruit bunches in a swirling fluidized bed gasifier. *Particulate Science and Technology*, 35(2), 150–157. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1139021>
- Syahrul, S., Hamdullahpur, F. and Dincer, I. (2002). Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Exergy, an International Journal*, 22(15), 87-98. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00079-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00079-0)
- Şahin, K. G. (2019). Farklı yöntemlerle kurutulan enginarların (cynara cardunculus l. var. scolymus) fizikokimyasal özelliklerinin araştırılması ve kurutma karakteristiklerinin matematiksel modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 58 s.
- 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., Küçük, H. and Midilli, A. (2021). Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Microwave Thin Layer Drying Behaviour of Apricot, Kiwi and Mint Leaves. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2(2), 13–35. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.969314>
- Taştekinoglu, D. (2019). Sıcak hava ve infrared kurutma yöntemleri ile ön işlemlerin üzümün kurutma karakteristikleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 110 s.
- Tawfik, M. H. M., Diab, M. R. and Abdelmotalib, H. M. (2020). Heat transfer and hydrodynamics of particles mixture in swirling fluidized bed. *International Journal of Thermal Sciences*, 147, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106134>
- Tekgöl, Y. (2019). Limon kabuğunun farklı kurutma yöntemleriyle optimum kurutma koşullarının belirlenmesi ve kurutma yöntemlerinin bazı kalite özellikleri ile uçucu bileşenler üzerine etkileri. Doktora Tezi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 138 s.

- 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.
- Tezer Or, D. (2010). Infrared enerji ve infrared enerji – sıcak hava kombinasyonu ile domatesin kurutulması. Yüksek Lisans Tezi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye, 38 s.
- Turan, M. A., Balcı, M., Taşkın, M. B., Kalcıoğlu, Z., Soba, M. R., Müezzinoğlu, N., Kaya, E. C., Özer, P., Kabaoglu, A. and Taban, S. (2016). Doğu karadeniz bölgesi'nde yetiştirilen çay bitkisi (*camellia sinensis* l.) yaşlı yapraklarının su ekstraktı , toplam kül , toplam polifenol , kafein ve ham selüloz içerikleri. *Toprak Su Dergisi*, 5(2), 52–58.
- URL-1, (2021). <http://biriz.biz/cay/cayinbitkiselozellikleri.pdf> (20 Nisan 2021)
- URL-2, (2021). <https://forum.gidagundemi.com/cayin-yapisi-ve-cayda-bulunan-kimyasal-ve-biyokimyasal-maddeler-t25434.html> (27 Nisan 2021)
- URL-3, (2021). <http://biriz.biz/cay/caydabulunancesitlikimyasallar.pdf> (10 Mayıs 2021)
- URL-4, (2021). https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/169374/mod_resource/content/0/%C3%A7ay%209.pdf (20 Mayıs 2021)
- URL-5, (2021). <https://www.mavirize.com/cayin-bitkisel-ozellikleri/> (18 Haziran 2021)
- URL-6, (2021). <http://rizeziraatodasi.com/cay-bitkisinin-ozellikleri/> (8 Temmuz 2021)
- URL-7, (2021). <https://www.foodelphi.com/kizilotesi-infrared-isinlarin-gida-endustrisinde-kullanimi/> (2 Ağustos 2021)
- URL-8, (2021). <http://www.dryerturk.com/Default.asp?L=TR&mid=261> (16 Ekim 2021)
- URL-9, (2021). <http://biriz.biz/cay/cayanaliz.htm#st4> (23 Kasım 2021)
- Uz, S. (2019). Farklı kurutma koşullarının kızılciğin kuruma süresine ve kalitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 105 s.
- Ünlü, G., Boran, K., Aktaş, M. and Khanları, A. (2018). İnfrared enerjili-ısı pompalı plc kontrollü bir kurutucuda kabak çekirdeği kurutulması. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 519–525. <https://doi.org/10.2339/politeknik.417746>
- Üstün, Ç. and Demirci, N. (2013). Çay bitkisinin (*camellia sinensis* l.) tarihsel gelişimi ve tıbbi açıdan değerlendirilmesi. *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi*, 3(3), 5–12.

- Venkiteswaran, V. K., Sulaiman, S. A. and 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.772.560>
- Yalçın, A. (2012). Kızılötesi ışınlı bir kurutucuda kuruma davranışlarının deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 66 s.
- Yashin, A. Y., Nemzer, B. V., Combet, E. and Yashin, Y. I. (2015). Determination of the Chemical Composition of Tea by Chromatographic Methods: A Review. *Journal of Food Research*, 4(3), 56. <https://doi.org/10.5539/jfr.v4n3p56>
- Yaşar, A. (2019). Altın çilekte (*physalis peruviana* L.) farklı kurutma koşullarının kuruma özellikleri ve ürün kalitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, Türkiye, 55 s.
- Yılmaz Tuncel, N. and Tuncel, N. B. (2016). Kızılötesi teknolojisi ve gıda işlemedeki kullanımı. *Akademik Gıda*, 14(2), 196-203.
- Yokuş, B. (2014). Farklı ön işlemlerin ve uygulanan farklı kurutma yöntemlerinin elmada toplam fenol miktarı ve antioksidan aktivite üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, Türkiye, 134 s.
- Yudin, A. S. M., Raghavan, V. R. and Narahari, M. (2011). A mathematical model for residence time distribution analysis in swirling fluidized bed. *National Postgraduate Conference - Energy and Sustainability: Exploring the Innovative Minds*, Malezya, 19-20 Eylül, 1–5. <https://doi.org/10.1109/NatPC.2011.6136392>
- Zulkarnain, M. A., Shahrman, M. K. and Yudin, A. S. M. (2020). Experimental study of drying characteristics of cocoa bean in a swirling fluidized bed dryer. *Symposium on Energy Systems*, Malezya, 1-2 Ekim, 1-9.