



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**VAKUMLU MİKRODALGA KURUTUCU İLE
PORTAKALIN KURUTULMASI VE OPTİMİZASYONU**

**NESLİHAN KEÇELİ
DOKTORA TEZİ**



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**VAKUMLU MİKRODALGA KURUTUCU İLE
PORTAKALIN KURUTULMASI VE OPTİMİZASYONU**

**NESLİHAN KEÇELİ
DOKTORA TEZİ**

**DANIŞMAN
PROF. DR. OSMAN KOLA**

**II. DANIŞMAN
DOÇ. DR. HAMZA BOZKIR**

ADANA, 2025

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Bu tezin özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışa uygun olarak elde edilerek sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, tez kapsamında bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde bu çalışmaya özgün olmayan tüm veri ve bilgiler için bilimsel etik ve gelenek çerçevesinde kaynak gösterdiğimi; bu kaynakları da kaynakçada belirttiğimi beyan ederim. Çalışmam ile ilgili yaptığım beyana aykırı bir durum saptanması halinde tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

30/05/2025

[İmza]

Neslihan KEÇELİ

ÖZET

VAKUMLU MİKRODALGA KURUTUCU İLE PORTAKALIN KURUTULMASI VE OPTİMİZASYONU

Neslihan KEÇELİ

Doktora, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Osman KOLA

II. Danışman: Doç. Dr. Hamza BOZKIR

Mayıs 2025, 230 sayfa

Bu tez çalışmasında, Washington Navel ve Valencia portakal çeşitlerinin, vakumlu mikrodalga (VMD) ve konvansiyonel kurutma yöntemleriyle kurutulması incelenmiştir; optimum kurutma koşulları Yanıt Yüzey Metodu (RSM) kullanılarak belirlenen optimum koşullarda üretim yapılmış ve elde edilen ürünlerde çeşitli kalite parametreleri ile biyoaktif bileşenlerde meydana gelen değişiklikler araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, her iki portakal çeşidinde kurutma performansını ve ürün kalitesini karşılaştırmalı olarak analiz etmek, optimum kurutma koşullarını belirleyerek VMD yönteminin geleneksel kurutma yöntemine göre farklılıklarını ortaya koymaktır.

Kurutulan örneklerde rehidrasyon kapasitesi, renk parametreleri (özellikle b^* değeri), nem, su aktivitesi, pH, toplam asitlik, toplam fenolik madde, toplam karotenoid madde, antioksidan aktivite (DPPH), HMF, karotenoid ve fenolik bileşik profili, şeker ve organik asit profili gibi birçok fiziksel ve kimyasal kalite analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kurutma kinetiği modellenmiş, kurutma sistemlerine ve portakal çeşitlerine göre uygun modeller belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, vakumlu mikrodalga kurutmanın, konvansiyonel (tepsili) kurutmaya göre kuruma süresini önemli ölçüde kısalttığını ve daha yüksek rehidrasyon kapasitesi, daha az renk kaybı ve daha iyi biyoaktif bileşen korunumu sağladığını göstermiştir. Özellikle VMD yöntemiyle kurutulan portakal örneklerinde toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, portakal çeşidine bağlı olarak biyoaktif bileşiklerin korunma düzeylerinde farklılıklar gözlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, portakal dilimlerinin kurutulmasında vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin hem işlem verimliliği hem de ürün kalitesi açısından üstün bir alternatif olduğunu ortaya koymakta; optimize edilmiş kurutma koşullarının, portakalın besinsel ve fonksiyonel özelliklerinin korunmasında etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Vakumlu mikrodalga kurutma, Washington Navel, Valencia, optimizasyon, fenolik bileşikler, antioksidan aktivite, kurutma kinetiği.



ABSTRACT

DRYING AND OPTIMIZATION OF ORANGE WITH A VACUUM MICROWAVE DRYER

Neslihan KEÇELİ

PhD, Department of Food Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Osman KOLA

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hamza BOZKIR

May 2025, 230 pages

In this thesis, the drying of Washington Navel and Valencia orange varieties using vacuum microwave drying (VMD) and conventional drying methods was investigated. Optimum drying conditions were determined using the Response Surface Methodology (RSM), and drying was conducted under these optimized conditions. Changes in various quality parameters and bioactive components of the resulting products were then examined. The main objective of the study was to comparatively analyze the drying performance and product quality of both orange varieties and to identify optimal processing conditions and to highlight the differences of the VMD method over conventional drying.

A wide range of physical and chemical quality parameters were assessed in the dried samples, including rehydration capacity, color parameters (particularly the b^* value), moisture content, water activity, pH, total acidity, total phenolic content, total carotenoid content, antioxidant activity (DPPH assay), hydroxymethylfurfural (HMF), as well as detailed carotenoid and phenolic compound profiles, and sugar and organic acid contents. Additionally, drying kinetics were modeled, and appropriate mathematical models were selected based on the drying method and orange variety.

The results demonstrated that VMD significantly reduced drying time compared to conventional tray drying, while providing higher rehydration capacity, less color degradation, and better retention of bioactive compounds. Notably, orange samples dried using the VMD

method exhibited higher total phenolic content and antioxidant activity. Moreover, differences in the retention of bioactive compounds were observed depending on the orange variety.

In conclusion, this study demonstrates that vacuum microwave drying is a superior alternative in terms of both process efficiency and product quality for drying orange slices. It also confirms that optimizing drying conditions is crucial for preserving the nutritional and functional properties of the product.

Keywords: Vacuum microwave drying, Washington Navel, Valencia, optimization, phenolic compounds, antioxidant activity, drying kinetics.



İthaf

Bu tez çalışmamı, beni her koşulda destekleyen kıymetli aileme ithaf ediyorum.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın mümkün olmasını sağlayan, çalışmam boyunca gösterdiği paha biçilmez rehberlik, destek, sabır, cesaretlendirme ve değerli önerileri için danışman hocam sayın Prof. Dr. Osman KOLA'ya en derin ve en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Araştırmamın her aşamasında ve bu tezin yazımında onun rehberliği son derece etkili olmuştur. Çalışmamın uygulama aşamalarının gerçekleştirilmesinde, araştırma sürecindeki rehberliği ve tez yazımındaki katkılarıyla bana değerli desteklerini sunan ikinci danışmanım Doç. Dr. Hamza BOZKIR'a da teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca, laboratuvar analizlerinde sağladığı destek ve çalışma sürecimde gösterdiği yardımseverlik, rehberlik, nezaket ve cömert açıklamaları için Arş. Gör. Erva PARILDI'ya da teşekkür etmek isterim.

Çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleriyle katkıda bulunan tüm öğretim üyelerine, birlikte çalışma ve desteklerini alma şansına eriştiğim herkese de ayrıca teşekkürlerimi sunarım; başta Prof. Dr. Sertaç ÖZER, Doç. Dr. Murat Reis AKKAYA, Arş. Gör. Dr. Semih Latif İPEK, Öğr. Üyesi Mehmet DOĞAN ve doktora arkadaşım Suat SÖBÜÇOVALI'ya teşekkür ederim.

Bu süreçte her koşulda yanımda olan kıymetli aileme; sevgileri, anlayışları ve bitmeyen teşvikleriyle beni daima destekleyen anneme, babama ve kardeşlerime; varlıklarıyla güç veren tüm arkadaşlarıma ve özellikle arkadaşlıktan öte, bir kardeş gibi yanımda olan Deniz ATICI'ya en içten teşekkürlerimi ve sonsuz sevgilerimi sunarım.

Neslihan KEÇELİ

Bu tez 21803004 Bilimsel Araştırma Projesi numarası ile Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ ONAY SAYFASI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
<i>İthaf</i>	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xvii
KISALTMALAR	xxi
SEMBOLLER	xxii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	1
2.1. Turunçgiller	2
2.1.1. Dünya’da ve Türkiye’de Turunçgil ve Portakal Üretimi	4
2.2. Portakal (<i>Citrus Cinensis</i> (L.) Osbeck)	4
2.2.1. Portakalın (<i>Citrus sinensis</i>) Kimyasal Bileşenleri	7
2.2.2. Portakalın Besin Değeri ve Sağlık Üzerine Etkileri	9
2.2.3. Portakalın Endüstride Kullanım Alanları	12
2.3. Meyve Kurutma Teknolojileri ve Gıda Endüstrisindeki Uygulama Alanları	13
2.3.1. Kurutma İşleminin Temel Mekanizmaları ve Teknolojik Yöntemler	14
2.3.1.1. Konvansiyonel (Geleneksel) Kurutma Yöntemleri	16
2.3.1.1.1. Güneşte kurutma (Sun Drying, SD)	17
2.3.1.1.2. Sıcak hava ile kurutma (Hot Air Drying, HAD)	17
2.3.1.1.2.1. Sprey kurutma (Spray Drying, SD)	22
2.3.1.2. Non-Konvansiyonel (Geleneksel Olmayan- Modern) Kurutma Yöntemleri	23
2.3.1.2.1. Dondurarak kurutma (Freeze Drying, FD)	23
2.3.1.2.2. Vakum kurutma (Vacuum Drying, VD)	25
2.3.1.2.3. Elektromanyetik radyasyon teknikleri ile kurutma	25
2.3.1.2.3.1. Mikrodalga kurutma (Microwave Drying, MWD)	26
2.3.1.2.3.2. Radyo frekans kurutma (Radio Frequency Drying, RFD)	26

2.3.1.2.3.3.	Kızılötesi kurutma (Infrared Drying, IRD)	27
2.3.1.2.3.4.	Kırınım pencereli kurutma (Refractance Window Drying, RWD™)	28
2.3.1.2.4.	Hibrit ve Kombine Yenilikçi Kurutma Yöntemleri	29
2.3.1.2.4.1.	Vakum-Mikrodalga Kurutma (Vacuum Microwave Drying, VMD)	30
2.3.1.2.4.1.1.	Vakum-Mikrodalga Kurutma Ekipmanlarının Sınıflandırılması	32
2.3.1.2.4.1.1.1.	Statik VMD Sistemleri:	32
2.3.1.2.4.1.1.2.	Döner VMD Sistemleri:	32
2.3.1.2.4.1.1.3.	Tescilli VMD Ekipmanları	34
2.3.1.2.4.2.	Vakum Mikrodalga ile Yapılan Çalışmalar	34
2.3.2.	Kurutma Kinetiğinin Matematiksel Modellenmesi	44
2.3.2.1.	İnce Tabaka Kurutma Modelleri	45
2.3.2.2.	Nem Difüzyonu ve Fick'in İkinci Yasası	47
2.3.3.	Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology – RSM)	48
3.	MATERYAL VE METOT	51
3.1.	Materyal	51
3.1.1.	Deneysel Materyal	51
3.1.2.	Kurutma Deneylerinin Gerçekleştirildiği Laboratuvar Ortamı	51
3.1.3.	Portakal Dilimleyici	51
3.1.3.	Vakumlu Mikrodalga Kurutma Sistemi	52
3.1.4.	Tepsili Kurutma Sistemi	53
3.1.5.	Kimyasallar ve Standart Maddeler	55
3.2.	Metot	56
3.2.1.	Portakal Örneklerinin Hazırlanması ve Kurutulması	56
3.2.2.	Portakal Örneklerinde Yapılan Fiziksel ve Kimyasal Analizler	58
3.2.2.1.	Renk Tayini	58
3.2.2.2.	Rehidrasyon Kapasitesi Tayini	59
3.2.2.3.	Kurutma Kinetiğinin Matematiksel Modellemesi	61
3.2.2.4.	Suda Çözünür KuruMadde Tayini	63
3.2.2.5.	pH Tayini	64
3.2.2.6.	Titrasyon Asitliği Tayini	65

3.2.2.7.	Nem ve Toplam Kurumadde Tayini	65
3.2.2.8.	Su Aktivitesi Tayini	67
3.2.2.9.	Toplam Fenolik Madde Tayini	67
3.2.2.10.	Toplam Karotenoid Tayini	69
3.2.2.11.	Antioksidan Aktivite Tayini	70
3.2.2.12.	Fenolik Bileşenlerinin Dağılımının Belirlenmesi	71
3.2.2.14.	Karotenoid Bileşenlerinin Dağılımının Belirlenmesi	73
3.2.2.15.	Organik Asit Bileşenlerinin Dağılımının Belirlenmesi	75
3.2.2.16.	Şeker Bileşenlerinin Dağılımının Belirlenmesi	76
3.2.2.17.	Hidroksimetilfurfural (HMF) Tayini	77
3.2.3.	DeneySEL Tasarım ve Yöntem	78
4.	ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA	82
4.1.	Washington Navel Portakal Dilimlerinde Vakumlu Mikrodalga ve Tepsili Kurutma Sistemlerinde Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu	82
4.1.1.	Washington Navel Portakal Dilimlerinin Vakum Mikrodalga Kurutucudaki Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu	82
4.1.2.	Washington Navel Portakal Dilimlerinin Tepsili Kurutucudaki Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu	94
4.1.3.	Valencia Portakal Dilimlerinin Vakum Mikrodalga Kurutucudaki Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu	104
4.1.4.	Valencia Portakal Dilimlerinin Tepsili Kurutucudaki Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu	116
4.2.	Vakum Mikrodalga ve Tepsili Kurutma Sistemleri ile Kurutulan Washington Navel ve Valencia Portakal Dilimlerinin Fiziksel, Kimyasal ve Bazı Kalite Özellikleri	129
4.2.1.	Vakum Mikrodalga ve Tepsili Kurutma Sistemleri ile Kurutulan Washington Navel ve Valencia Portakal Dilimlerinin Bazı Kalite Özellikleri	129
4.2.1.1.	<i>Rehidrasyon Kapasitesi Analiz Sonuçları</i>	129
4.2.1.2.	<i>pH ve Tirasyon Asitliği Analiz Sonuçları</i>	133
4.2.1.3.	Nem İçeriği ve Su Aktivitesi Analiz Sonuçları	135
4.2.1.4.	Toplam Fenolik Madde Analiz Sonuçları	137

4.2.1.5.	Toplam Karotenoid Madde Analiz Sonuçları	139
4.2.1.6.	Antioksidan Aktivite Analiz Sonuçları	141
4.2.1.7.	HMF Analiz Sonuçları	143
4.2.2.	Fenolik Bileşen Dağılımı Analiz Sonuçları	145
4.2.3.	Karotenoid Madde Dağılımı Analiz Sonuçları	151
4.2.4.	Organik Asit Dağılımı Analiz Sonuçları	155
4.2.5.	Şeker Dağılımı Analiz Sonuçları	159
4.2.6.	Renk Analiz Sonuçları	162
4.3.	Vakumlu Mikrodalga ve Tepsili Kurutma Sistemleri ile Kurutulan Washington Navel ve Valencia Portakal Dilimlerine ait Kurutma Kinetiği Sonuçları	167
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	180
	KAYNAKÇA	185
	EKLER	198
	ÖZGEÇMİŞ	230

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Dünyadaki başlıca turunçgil üretim bölgeleri	2
Şekil 2.2	Portakal morfolojisi	3
Şekil 2.3	Dünya üzerinde portakal yetiştirilen başlıca bölgeler	6
Şekil 2.4	Meyve Kurutma Yöntemleri	15
Şekil 2.5	Tipik bir kuruma eğrisi ve sabit hız - azalan hız dönemleri	18
Şekil 2.6	Sprey kurutma tekniği şematik gösterimi	22
Şekil 2.7	Vakum mikrodalga kurutma sistemi şematik gösterimi	30
Şekil 2.8	Statik ve döner mekanizmalı vakum mikrodalga kurutma sistemlerine örnekler	33
Şekil 3.1	Portakal dilimleyici ve portakalların dilimlenmesi	52
Şekil 3.2	Vakumlu mikrodalga kurutucu	53
Şekil 3.3	Tepsili Kurutucu	54
Şekil 3.4	Vakumlu Mikrodalga Kurutucuda kurutulan portakal dilimleri	56
Şekil 3.5	Tepsili Kurutucuda kurutulan portakal dilimleri	56
Şekil 3.6	Konica Minolta CM-5 renk ölçüm cihazı	58
Şekil 3.7	Kurutulmuş portakal dilimlerinde rehidrasyon analizi	60
Şekil 3.8	Krüss AR2008 refraktometre cihazı	63
Şekil 3.9	Mettler Toledo Seven Compact S220 model pH metre cihazı	64
Şekil 3.10	Denver Instrument IR-60 model nem ölçüm cihazı	66
Şekil 3.11	AquaLab 4TE marka su aktivite ölçüm cihazı	67
Şekil 3.12	Gallik asit standart eğrisi	68
Şekil 4.1	Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızlarının Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	86
Şekil 4.2	Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızı Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	86
Şekil 4.3	Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	87

Şekil 4.4	Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesi Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	88
Şekil 4.5	Washington Navel Portakallarının Vakumlu Mikrodalgada Kurutulmasında b* Renk Değerinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	89
Şekil 4.6	Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında b* Renk Değeri Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	90
Şekil 4.7	Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızlarının Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	97
Şekil 4.8	Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızı Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	98
Şekil 4.9	Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	99
Şekil 4.10	Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesi Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi.....	100
Şekil 4.11	Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında b* Renk Değerinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	101
Şekil 4.12	Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında b* Renk Değeri Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	102
Şekil 4.13	Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızlarının Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	107
Şekil 4.14	Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızı Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	108

Şekil 4.15	Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	109
Şekil 4.16	Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesi Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	110
Şekil 4.17	Valencia Portakallarının Vakumlu Mikrodalgada Kurutulmasında b* Renk Değerinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	111
Şekil 4.18	Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında b* Renk Değeri Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	112
Şekil 4.19	Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızlarının Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	119
Şekil 4.20	Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızı Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi.....	120
Şekil 4.21	Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	121
Şekil 4.22	Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesi Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	122
Şekil 4.23	Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında a* Renk Değerinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması	123
Şekil 4.24	Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında a* Renk Değeri Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi	124
Şekil 4.25	Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait kuruma hızının nem içeriğine bağlı değişimi	168

Şekil 4.26	Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait nem içeriğinin zamana bağlı değişimi	168
Şekil 4.27	Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait nem oranının (Moisture ratio,MR) zamana bağlı değişimi	168
Şekil 4.28	Tepsili kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait kuruma hızının nem içeriğine bağlı değişimi	169
Şekil 4.29	Tepsili kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait nem içeriğinin zamana bağlı değişimi	169
Şekil 4.30	Tepsili kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait nem oranının (Moisture ratio,MR) zamana bağlı değişimi	170
Şekil 4.31	Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait kurutma hızının nem içeriğine bağlı değişimi	171
Şekil 4.32	Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait nem içeriğinin zamana bağlı değişimi	172
Şekil 4.33	Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait nem oranının (Moisture ratio, MR) zamana bağlı değişimi	172
Şekil 4.34	Tepsili kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait kuruma hızının nem içeriğine bağlı değişimi	173
Şekil 4.35	Tepsili kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait nem içeriğinin zamana bağlı değişimi	173
Şekil 4.36	Tepsili kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait nem oranının (Moisture ratio,MR) zamana bağlı değişimi	174

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1.	Dünya Turunçgil Meyve Üretimi	5
Tablo 2.2.	Türkiye turunçgil üretimi	5
Tablo 2.3.	Portakal çeşitleri	7
Tablo 2.4.	Portakalın (<i>Citrus sinensis</i>) kimyasal bileşenleri	8
Tablo 2.5.	Meyve ve sebzelerin kurutulmasında ince tabaka modelleri	46
Tablo 3.1.	Analizlerde kullanılan standart referans maddeler	55
Tablo 3.2	Mobil faz gradient akış programı	72
Tablo 3.3	Mobil faz gradient akış programı	74
Tablo 3.4	Washington navel portakalının vakum mikrodalga kurutucuda kurutulmasına ilişkin RSM deneme planı ve yanıt değişkenleri	79
Tablo 3.5	Washington navel portakalının tepsili kurutucuda kurutulmasına ilişkin RSM deneme planı ve yanıt değişkenleri	79
Tablo 3.6	Valencia portakalının vakum mikrodalga kurutucuda kurutulmasına ilişkin RSM deneme planı ve yanıt değişkenleri	80
Tablo 3.7	Valencia portakalının tepsili kurutucuda kurutulmasına ilişkin RSM deneme planı ve yanıt değişkenleri	80
Tablo 4.1	Washington Navel Portakal Dilimlerinin Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Kurutma Performansı Analizi	82
Tablo 4.2	Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı ANOVA Analizi	84
Tablo 4.3	Washington Navel Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi	91
Tablo 4.4	Washington Navel Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Optimum Kurutma Koşullarında Elde Edilen DeneySEL ve Tahmin Edilen Değerlerin Karşılaştırılması	93
Tablo 4.5	Washington Navel Portakal Dilimlerinin Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Kurutma Performansı Analizi	94

Tablo 4.6	Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı ANOVA Analizi	95
Tablo 4.7	Washington Navel Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi	103
Tablo 4.8	Washington Navel Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Optimum Kurutma Koşullarında Elde Edilen Deneysel ve Tahmin Edilen Değerlerin Karşılaştırılması	103
Tablo 4.9	Valencia Portakal Dilimlerinin Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Kurutma Performansı Analizi	105
Tablo 4.10	Valencia Portakallarının Vakumlu Mikrodalgada Kurutulmasında RSM Tabanlı ANOVA Analizi	106
Tablo 4.11	Valencia Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi	114
Tablo 4.12	Valencia Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Optimum Kurutma Koşullarında Elde Edilen Deneysel ve Tahmin Edilen Değerlerin Karşılaştırılması	115
Tablo 4.13	Valencia Portakal Dilimlerinin Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Kurutma Performansı Analizi	117
Tablo 4.14	Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı ANOVA Analizi	118
Tablo 4.15	Valencia Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi	126
Tablo 4.16	Valencia Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Optimum Kurutma Koşullarında Elde Edilen Deneysel ve Tahmin Edilen Değerlerin Karşılaştırılması	128
Tablo 4.17	Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerine ait kalite parametreleri	130
Tablo 4.18	Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerine ait kalite parametreleri	130
Tablo 4.19	Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde kalite parametre değerleri	131
Tablo 4.20	Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerinde fenolik bileşen dağılımı	146

Tablo 4.21	Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerinde fenolik bileşen dağılımı	148
Tablo 4.22	Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde fenolik bileşen profili	149
Tablo 4.23	Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerinde karotenoid madde dağılımı	152
Tablo 4.24	Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerinde karotenoid madde dağılımı	152
Tablo 4.25	Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde karotenoid bileşen profili	154
Tablo 4.26	Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerine ait organik asit dağılımı	156
Tablo 4.27	Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerine ait organik asit dağılımı	156
Tablo 4.28	Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde organik asit dağılımı	158
Tablo 4.29	Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerine ait şeker dağılımı	159
Tablo 4.30	Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerine ait şeker dağılımı	160
Tablo 4.31	Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde şeker dağılımı	161
Tablo 4.32	Taze ve farklı kurutma yöntemleri ile kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerine ait renk değerleri	163
Tablo 4.33	Taze ve farklı kurutma yöntemleri ile kurutulmuş Valencia portakal dilimlerine ait renk değerleri	163
Tablo 4.34	Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde renk değerleri	164
Tablo 4.35	Farklı kurutma yöntemi ile kurutulan Washington Navel ve Valencia Portakal dilimlerine ait nem difüzyon katsayıları	175
Tablo 4.36	Washington Navel Portakalın Vakumlu Mikrodalga Kurutma ve Tepsili Kurutma yöntemleri için on farklı kurutma modeline ait istatistiksel değerler	176

Tablo 4.37	Valencia Portakalın Vakumlu Mikrodalga Kurutma ve Tepsili Kurutma yöntemleri için on farklı kurutma modeline ait istatistiksel değerler	177
Tablo 4.38	Washington Navel ve Valencia portakalları için en iyi uyum sağlayan kurutma modelleri	178



KISALTMALAR

AOAC	: Association of Official Analytical Chemists
a_w	: Su Aktivitesi
°C	: Sıcaklık ölçü birimi
EHD	: Electrohydrodynamic Drying
g/g	: Gram su / gram kurumadde
HMF	: Hidroksimetilfurfural
IRD	: Infrared Drying
LPSSD	: Low Pressure Superheated Steam Drying
mg/100 g	: 100 gram kuru madde başına miligram
MR	: Moisture ratio
m/s	: Metre/saniye
MWD	: Microwave Drying
pH	: Hidrojen Potansiyeli
RWD™	: Refractance Window Drying
RFD	: Radio Frequency Drying
TA	: Toplam Asitlik
USP	: United States Pharmacopeia
ΔE	: Toplam Renk Farkı
ΔC	: Kromatiklik Farkı
VMD	: Vakumlu Mikrodalga Kurutma

SEMBOLLER

C	: Karbon
H	: Hidrojen
O	: Oksijen
K	: Potasyum
Ca	: Kalsiyum
Mg	: Magnezyum
Fe	: Demir
P	: Fosfor
Na	: Sodyum
Zn	: Çinko
Cu	: Bakır
Mn	: Manganez
C₆H₈O₇	: Sitrik Asit
C₄H₆O₅	: Malik Asit
C₄H₆O₄	: Süksinik Asit
C₁₂H₂₂O₁₁	: Sakkaroz
C₆H₁₂O₆	: Glikoz
C₆H₁₂O₆	: Fruktoz
C₆H₆O₅	: Gallik Asit
C₉H₁₀O₅	: Vanillic Asit
C₁₅H₁₂O₅	: Kaempferol
C₁₅H₁₄O₆	: Quercetin
C₂₁H₂₂O₁₀	: Hesperidin
C₂₇H₃₀O₁₄	: Rutin

1. GİRİŞ

Narenciye yüksek yıllık tüketimi ve ticareti nedeniyle meyve sektörü içinde önemli bir tarımsal üründür (Chen vd., 2019). Flavonoid ve terpen içeriğinin yanı sıra vitamin ve lif içeriğinin yüksek olması nedeniyle büyük bir besin potansiyeline sahiptir (Ruíz Díaz vd., 2003). Dünyada toplam narenciye üretimi, 98 milyon ton olup, %51'i portakal, %34'ü mandalina, %9'u limon ve %7'si greyturttan oluşmaktadır (Aygören, 2021). Dünya genelindeki toplam narenciye üretiminin yaklaşık yarısını portakal oluşturmaktadır (Chen vd., 2019). Türkiye dünya narenciye üretiminde yaklaşık 4.35 milyon ton üretimi ile sekizinci sırada yer almaktadır (FAO, 2021, 2020). Yıllık üretilen portakal miktarı 1.7 milyon ton olup, ülkemiz narenciye üretiminin %39.5'ini oluşturmaktadır (TÜİK, 2020).

Citrus sinensis (L.) Osbeck)) veya tatlı portakal, Güney Doğu Asya kökenlidir ve mükemmel bir C vitamini kaynağı olarak tüm dünyada tüketilmektedir. Vücudun bağışıklık sistemini oluşturan güçlü bir doğal antioksidandır. Yapısında limonoidler, sinefrin, hesperidin flavonoid, polifenoller, pektin gibi önemli fitokimyasallar ve yeterli miktarda folakin, kalsiyum, potasyum, tiamin, niasin ve magnezyum da mevcuttur. Biyolojik olarak aktif bu bileşikler, ateroskleroz, kanser, böbrek taşı oluşumu ve mide ülseri gibi çeşitli hastalıkların gelişimini önleyici potansiyele sahiptir (Etebu & Nwauzoma, 2014).

Portakal, yüksek C vitamini içeriği ve değerli besin bileşenleri açısından zengin olması nedeniyle hem sofralık olarak tüketilmekte hem de meyve suyu üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, kurutulmuş portakal ürünleri, gıda endüstrisinde katkı maddesi olarak, çay ve bisküvi sanayinde, ayrıca kozmetik ve ilaç sektörlerinde değerlendirilmekte ve çeşitli uygulamalara konu olmaktadır (Karaaslan & Erdem, 2014; Polatçı & Taşova, 2020; Topuz vd., 2005).

Günümüzde tüketicilerin doğal, sağlıklı ve besleyici gıdalara olan ilgisi ve talebi giderek artmaktadır. Bu eğilim, yalnızca nihai ürünleri değil, aynı zamanda çeşitli gıda bileşenlerinin kullanıldığı ürünleri de kapsamaktadır. Özellikle dondurma, tahıl bazlı ürünler, süt ürünleri, şekerlemeler ve unlu mamuller gibi gıda kategorilerinde, besin değeri yüksek ve doğal bileşenler içeren hammaddelerin kullanımı önem kazanmaktadır (Ruíz Díaz vd., 2003). Kurutulmuş meyve ve sebzeler, şekerleme, unlu mamuller, tatlılar, soslar, çaylar, pudingler ve

garnitürler gibi birçok farklı gıda formülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bebek ve çocuklar için gıda takviyeleri gibi fonksiyonel ve yenilikçi ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Hasan vd., 2019). Hazır gıdaların popülaritesinin artması, dünya genelinde yüksek kaliteli kurutulmuş sebze ve meyve ürünlerine olan talebi ve üretimi artırmaktadır (Zhang vd., 2006). Bu nedenle, portakal toz, parça ve dilim formunda farklı şekillerde kurutularak piyasaya sunulmaktadır. Yeni ürün alternatiflerinin geliştirilmesi ve narenciye ürünlerinin doğrudan tüketim veya rehidrasyon için kuru formda sunulması, mevcut tüketim eğilimleri doğrultusunda portakal ve diğer narenciye ürünlerine olan ilgiyi artırmakta ve bu ürünleri daha cazip hale getirmektedir (Ruíz Díaz vd., 2003).

Kurutma, meyve ve sebzeleri korumak ve katma değerli ürünler elde etmek için kullanılan bir işleme operasyonudur. Ürün hacmini azaltır ve su aktivitesini düşürerek mikrobiyal büyümeyi kontrol eder, enzimatik ve enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarını azaltır. (Muyonga vd., 2021). Taze meyve ve sebzeler yüksek nem içeriğine (%80 ‘den fazla) sahiptirler ve uygun şekilde muhafaza edilmezlerse kısa bir süre içinde bozulurlar. Tüm tedarik zinciri boyunca depolama, soğutma ve kontrollü ortam oluşturmak için sürekli enerjiye ihtiyaç duyan teknolojilerin kullanılmasından ötürü pahalıdır (Hasan vd., 2019). Kurutma, gıdaları dengeli ve güvenli bir şekilde muhafaza etmeyi sağlar (Zhang vd., 2006). Ayrıca, kuru formdaki ürünler daha az ağırlığa sahip olacağından nakliye maliyetlerini de düşürür (Mujumdar & Law, 2010).

Meyve ve sebzeler, fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal özellikleri bakımından geniş bir çeşitliliğe sahiptir. Bu ürünlerin farklı kalite standartlarında ve maliyetlerde kurutulması ve korunması amacıyla birçok kurutma teknolojisi geliştirilmiştir. Bilimsel kaynaklarda 500’ün üzerinde farklı kurutucu tipi tanımlanmış olup, bunlardan yaklaşık 100 kadarı endüstriyel ölçekte ticari olarak uygulanabilir niteliktedir (Mujumdar & Law, 2010). Gıda endüstrisinde, çoğunlukla sıcak hava kullanan geleneksel kurutma teknikleri yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu yöntem, meyve ve sebzelerdeki vitaminler, karotenoidler, antioksidanlar, fenolik maddeler ve aroma bileşikleri gibi biyoaktif bileşenlerin kaybına neden olmakta ve ayrıca ürünlerin renk ve lezzet gibi duyuşsal özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir (Bozkir, 2020; Jiang vd., 2017; Polatçı & Taşova, 2020). Bununla birlikte, geleneksel kurutma yöntemlerinin düşük enerji verimliliği ve uzun işlem süreleri gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır (Bozkir, 2020). Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla, mikrodalga, vakum, kızılötesi, dondurarak kurutma, fırın kurutma ve farklı hibrit kurutma

teknolojileri gibi çeşitli kurutma teknikleri geliştirilmiş ve dünya genelinde farklı meyve ve sebzelerde başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Hasan vd., 2019). Kurutma teknolojisinin gelişim süreci, literatürde dört farklı nesil altında kategorize edilmektedir. Bu doğrultuda, mikrodalga (MW) teknolojisinin kullanımı, Vega-Mercado ve arkadaşları tarafından dördüncü nesil kurutma teknolojileri kapsamında değerlendirilmiştir (Vega-Mercado vd., 2001).

Kurutma, mikroorganizmaların gelişimini ve kimyasal reaksiyonların oluşumunu durdurmak veya yavaşlatmak amacıyla gıdadaki suyun uzaklaştırıldığı bir işlemdir. Bu süreç, gıdanın fiziksel ve kimyasal bileşimini olumsuz etkilemeden gerçekleştirilmelidir (Chandrasekaran vd., 2013; Vega-Mercado vd., 2001). Gıdalara uygulanan farklı kurutma teknolojileri, kurutma verimliliği ve nihai ürün kalitesi açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, istenilen ürün özelliklerini en iyi şekilde sağlayan kurutma koşullarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Kuruma süresini azaltarak enerji verimliliğini artıran ve hedeflenen kalite kriterlerine uygun ürün elde etmeyi mümkün kılan optimum kurutma koşullarını belirlemek amacıyla çeşitli optimizasyon çalışmaları yürütülmektedir (Muyonga vd., 2021).

Kurutma süreçlerinin optimizasyonu ve kontrolü için, tüm sürecin başarılı bir şekilde simüle edilmesi veya ölçeklendirilmesi gereklidir. Bunun için, kurutma işleminin temel taşıma mekanizmalarının anlaşılması ve malzemelerin ince tabaka halinde kurutulması önemli bir ön koşuldur. Araştırmalar, yalnızca deneysel kurutma uygulamalarına dayanmanın, kurutucu sistemlerin verimliliğini düşürebileceğini, üretim maliyetlerini artırabileceğini ve elde edilen ürünün kalitesini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, proses tasarımı, optimizasyonu, enerji verimliliği ve sürecin kontrolü açısından matematiksel modellerin kullanımı büyük önem taşımaktadır. Özellikle tarımsal ürünlerin kurutma kinetiğinin belirlenmesi, sürecin daha etkin yönetilmesine katkı sağlayarak kurutma verimliliğini artırmaya ve enerji tüketimini azaltmaya yardımcı olmaktadır (Inyang vd., 2018).

Bu çalışmada, iki farklı portakal çeşidi (Washington Navel ve Valencia), 2 mm, 4 mm ve 6 mm kalınlıklarında dilimlenmiş; farklı kurutma parametreleri altında hem vakumlu mikrodalga kurutma hem de geleneksel tepsili kurutma yöntemleri ile işlenmiştir. Vakumlu mikrodalga kurutucuda, portakal dilimleri 1 kW, 2 kW ve 3 kW güç seviyelerinde ve 60 °C, 70 °C, 80 °C sıcaklıklarda kurutulmuş; aynı şekilde tepsili kurutucuda, farklı hava hızlarında (1 m/dk, 1.5 m/dk, 2 m/dk) ve aynı sıcaklık seviyelerinde kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm örnekler,

%10'un altında nem içeriğine sahip olacak şekilde kurutulmuştur. Üretim koşullarının optimizasyonu için Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology, RSM) kullanılmış; vakumlu mikrodalga kurutucuda güç, vakum sıcaklığı ve dilim kalınlığı, tepsili kurutucuda ise sıcaklık, hava hızı ve dilim kalınlığı değişken olarak ele alınmış; kuruma hızı, renk değerleri ve rehidrasyon oranı ise hedef kalite parametreleri olarak belirlenmiştir. Kurutma sürecinin kinetiği belirli zaman aralıklarında yapılan ölçümlerle incelenmiş; kurutma modelleri ile uyumu değerlendirilmiştir. Ayrıca, elde edilen kuru portakal ürünlerinin kalite özellikleri pH, titrasyon asitliği, nem içeriği, su aktivitesi, renk parametreleri, toplam fenolik madde, toplam karotenoid, antioksidan aktivite, organik asit ve şeker profili, fenolik madde ve karotenoid dağılımı ile hidroksimetilfurfural (HMF) analizleri üzerinden detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Bu kapsamlı çalışma ile vakumlu mikrodalga kurutma teknolojisinin, geleneksel tepsili kurutma yöntemine kıyasla ürün kalitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve yüksek kaliteli kuru portakal üretimi için etkili bir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzde insan sağlığının korunması ve sürdürülebilir gıda üretimi konularında artan farkındalık, tarımsal ürünlerin sadece doğrudan tüketime yönelik değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda ve endüstriyel hammadde olarak değerlendirilmesini de ön plana çıkarmıştır. Bu nedenle, turunçgil meyveleri ve özellikle portakal (*Citrus sinensis*), hem besin değeri yüksek bir meyve olması hem de içerdiği zengin biyoaktif bileşiklerle çok yönlü kullanım potansiyeli sunması açısından dikkat çekmektedir.

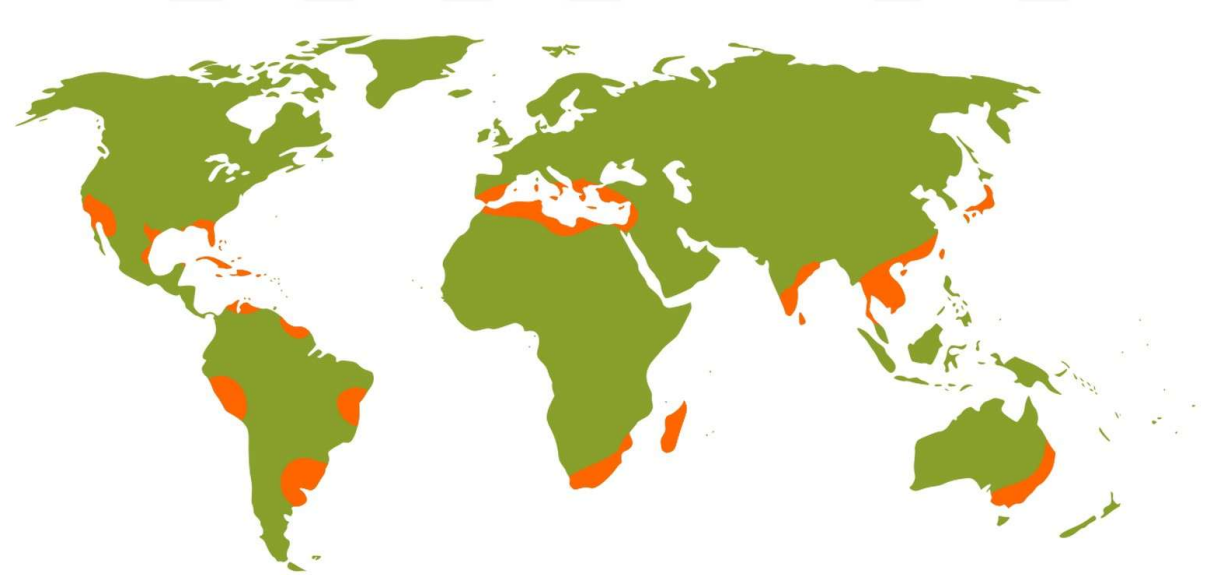
Portakal, yoğun olarak tüketilmesi ve dünya çapında yaygın üretimi ile yalnızca sofralık meyve olarak değil; aynı zamanda gıda, kozmetik, ilaç ve biyoteknoloji sektörlerinde önemli bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmektedir. İçeriğindeki askorbik asit (C vitamini), flavonoidler, karotenoidler, fenolik maddeler, lif ve uçucu yağlar sayesinde hem besleyici hem de tedavi edici özellikler taşımaktadır. Ayrıca, portakalın meyve suyu, kabuğu, çekirdeği ve posası gibi çeşitli fraksiyonları; meşrubat, reçel, pektin, esansiyel yağ, biyoplastik, doğal aroma ve takviye edici gıda üretimi gibi pek çok endüstriyel uygulamada etkin şekilde değerlendirilmektedir.

Portakal üretiminde kalite, yalnızca meyvenin yetiştirildiği koşullara değil, aynı zamanda hasat sonrası uygulamalara ve işleme teknolojilerine de bağlıdır. Özellikle kurutma işlemi, meyvenin raf ömrünü uzatırken, besin bileşenlerinin korunmasını sağlayan en önemli işlemlerden biridir. Bu nedenle, geleneksel kurutma yöntemlerinin ötesine geçilerek, vakumlu mikrodalga kurutma gibi modern tekniklerin ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin araştırılması, hem ürün geliştirme süreçleri hem de endüstriyel verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, portakalın farklı kurutma teknikleriyle işlenmesi sonucunda elde edilen ürünlerin kalite parametreleri karşılaştırılmış; kurutma yöntemlerinin besin değerleri, fizikokimyasal özellikler ve biyoaktif bileşikler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Aynı zamanda portakalın endüstriyel potansiyelinin daha etkin ve sürdürülebilir yollarla nasıl artırılacağı sorusuna da bilimsel veriler ışığında yanıt aranmıştır.

2.1. Turunçgiller

Turunçgil terimi (Fransızca'da “agrumes”, İspanyolca'da “agrios” veya “citriscos”), dünya genelinde yaygın olarak tüketilen, yenilebilir meyvelerin büyük bir grubunu ifade eden genel bir addır. Bitki taksonomisi açısından, “Turunçgil” cinsi, *Geraniales* takımının *Rutaceae* familyasına ve onun bir alt grubu olan *Aurantioideae* alt familyası içerisinde sınıflandırılmaktadır (Berk, 2016; Cebadera-Miranda vd., 2020). Turunçgiller, Batı Pakistan'dan Kuzey-Orta Çin'e kadar uzanan ve güneyde Doğu Hint Takımadaları, Yeni Gine, Bismarck Takımadaları, Kuzeydoğu Avustralya, Yeni Kaledonya, Melanezya ve Batı Polinezya'yı kapsayan geniş bir muson iklim kuşağına yayılmıştır (Wu vd., 2018). Turunçgillerin Güneydoğu Asya kökenli olduğu ve zamanla ticaret ve göç yollarıyla Afrika'ya yayıldığı kabul edilmektedir. Roma İmparatorluğu döneminde soyluların statü sembolü haline gelmiş ve Güney Avrupa'ya tanıtılmıştır. Orta Çağ boyunca, Akdeniz iklimine uyum sağlayarak bu bölgelerde yaygınlaşmış, ardından İspanyol kaşifler aracılığıyla Amerika kıtasına taşınmıştır. Günümüzde turunçgil, dünyanın tropikal ve subtropikal bölgelerinde 140'tan fazla ülkede yaygın olarak yetiştirilmektedir. Şekil 2.1.'de yer alan turuncu renkli alanlar, turunçgil yetiştiriciliğinin yoğun olduğu bölgeleri göstermektedir (Chen vd., 2019).



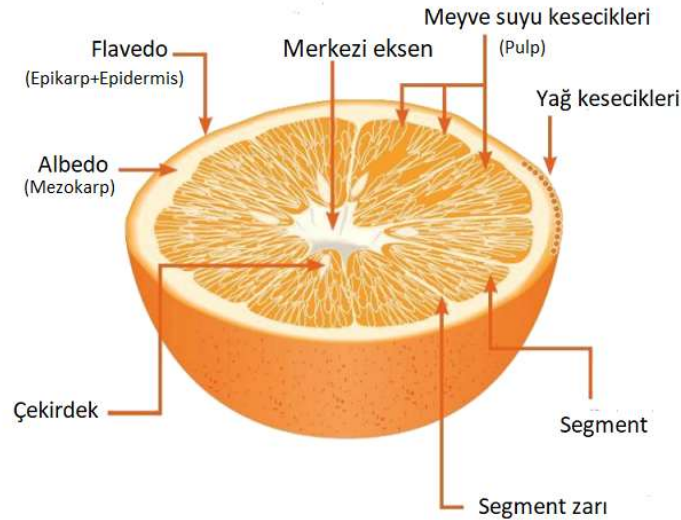
Şekil 2.1. Dünyadaki başlıca turunçgil üretim bölgeleri (Chen vd., 2019)

Türkiye'nin Akdeniz bölgesi, diğer Akdeniz ülkelerinde olduğu gibi, turunçgil üretimi için son derece uygun ekolojik koşullara sahiptir ve bu özelliğiyle dünya genelindeki turunçgil

retimine önemli katkılar sunmaktadır. Ülkemizin toplam turunçgil üretiminin %62'si bu bölgede gerçekleşmektedir (Sari vd., 2005).

Günümüzde dünya çapında yaygın olarak yetiştirilen turunçgiller, tatlı portakal (*C. sinensis* [L.] Osbeck.), mandalina (*C. reticulata* Blanco), limon (*C. limon* L. Burn.) ve greyfurt (*C. paradisi* Macfadyen) gibi 145'ten fazla botanik türü içermektedir. Bu türlerin her biri, farklı çeşitlerden oluşur ve morfolojik özellikleriyle ayırt edilebilir (şekil 2.2) (Cebadera-Miranda vd., 2020).

Turunçgil meyveleri, hesperidium adı verilen, genellikle merkezi eksene bağlı meyve suyu kesecikleri içeren, 8 ila 16 segmente sahip (greyfurt türlerinde segment sayısı 18'e kadar çıkar), modifiye edilmiş veya özelleşmiş bir tür meyvedir (şekil 2.2.). Çekirdek sayısı türlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Meyve, flavedo ve albedo katmanlarının oluşturduğu perikarp (kabuk) ile çevrilidir. Flavedo (ekzokarp, dış kabuk), turunçgil türlerine özgü pigmentleri, yağ bezelerini ve uçucu yağları içeren en dış tabakadır. Albedo (mezokarp) ise genellikle beyaz renkli, süngerimsi iç kabuk katmanıdır. Meyvenin yenilebilir kısmı (pulp veya endokarp), segmentlerden oluşan, meyve suyu içeren vezikülleri ve esansiyel yağları barındıran i bölümdür (Cebadera-Miranda vd., 2020).



şekil 2.2. Portakal morfolojisi (Cebadera-Miranda vd., 2020; Tetra Pak, 2021)

Flavedo, temel olarak selülozik malzemeden oluşan bir dış kabuk tabakasıdır, ancak içeriğinde uçucu yağlar (monoterpenler, alkoller, aldehitler), pigmentler (karotenoidler, klorofiller, flavonoidler), steroidler, triterpenoidler ve parafin mumları gibi çeşitli bileşenleri de barındırır.

Albedo, ağırlıklı olarak pektin maddelerinden zengin, süngerimsi beyaz bir dokudur. Pektinin yanı sıra, bileşiminde vitaminler ve polifenoller gibi çeşitli biyoaktif bileşikler - özellikle hesperidin, narirutin, didymin ve diosmin gibi flavanonlar - bulunur. Meyvenin lifli orta kısmı (pulp), yalnızca yenilebilir bölümü değil, aynı zamanda göbek kısmı, segment (dilim) zarları, meyve suyu kesecikleri ve çekirdekleri de içerir. Pulp ve lifli kısım, diyet lifi bakımından zengindir ve ağırlıklı olarak çözünmeyen lifler (selüloz, hemiselüloz), organik asitler (sitrik, oksalik asitler), şekerler (glukoz, fruktoz) ve polifenoller (özellikle flavonoidler) içermektedir (Mamma & Christakopoulos, 2014; Nieto vd., 2021).

2.1.1. Dünya’da ve Türkiye’de Turunçgil ve Portakal Üretimi

Turunçgil, dünya genelinde yüksek tüketim oranı ve geniş ticaret hacmi sayesinde meyve sektöründe önemli bir tarımsal üründür (Chen vd., 2019). Her yıl 140’tan fazla ülkede yaklaşık 144 milyon ton turunçgil üretilmektedir. Bu üretimde başı çeken ülkeler sırasıyla Çin, Brezilya ve Hindistan olup, bunları Meksika, Amerika Birleşik Devletleri ve İspanya takip etmektedir (FAO, 2021; Ma vd., 2020). Türkiye ise 2023/2024 yılı verilerine göre yaklaşık 7.9 milyon ton üretimi ile dünya turunçgil üretiminde önemli bir yer almaktadır (Tablo 2.2) (Aygören, 2024). Adana, Mersin, Hatay, Muğla ve Osmaniye illeri başta olmak üzere, üretimin neredeyse tamamı Ege ve Akdeniz bölgelerinden sağlanmaktadır (Aygören, 2021).

USDA, 2024 verilerine göre, 2023/24 yılı dünya üretiminin %46.2’si portakal, %37’si mandalina, %9.8’i limon ve %7’si greylortu aittir (Tablo 2.1. ve 2.2.). Dünya turunçgil üretimi içerisinde portakalın ciddi bir payı vardır (Aygören, 2024). Türkiye 2023 yılı 2.3 milyon tonluk üretim miktarı ile dünya portakal üretiminde önemli üreticiler arasında yer almaktadır (TUİK, 2024).

2.2. Portakal (*Citrus Cinensis* (L.) Osbeck)

Portakalın genetik kökeni kesin olarak bilinmemekle birlikte, bazı yabani turunçgil türlerinin türler arası hibridizasyonundan türetildiğine inanılmaktadır (Xu vd., 2013). Portakal için pomelo (şadok) (*Citrus maxima*) ile mandarin (*Citrus reticula*) hibriti olduğu görüşü kabul edilmektedir (Kafa vd., 2010).

Tablo 2.1. Dünya turunçgil üretimi (Aygören, 2024).

Turunçgil Çeşidi	Miktar	
	Ton	%
Greyfurt	6.930.000	6.8
Limon	10.061.000	9.8
Portakal	47.404.000	46.2
Mandalina	38.151.000	37.2
Toplam Üretim	102.546.000	100.0

USDA,2024

Tablo 2.2. Türkiye turunçgil üretimi (TÜİK, 2024)

Turunçgiller	Üretim (Ton)				
	2020	2021	2022	2023	% Değişim
Portakal-Washington	932.466	1.185.796	856.424	1.500.257	75.2
Portakal-Yafa	56.002	60.323	46.693	57.867	23,9
Portakal-Diğer	345.507	495.881	418.883	753.211	79.8
Toplam Portakal	1.333.975	1.742.000	1.322.000	2.311.335	74.8
Mandalina-Satsuma-Mandarin	767.482	801.780	854.720	1.223.181	43.1
Mandalina-Klemantin-Mandarin	93.117	97.761	86.121	123.896	43.9
Mandalina-King- Mandarin	7.083	7.152	5.793	8.452	45.9
Mandalina-Diğer	717.947	912.307	918.366	1.597.246	73.9
Toplam Mandalina	1.585.629	1.819.000	1.865.000	2.952.775	58.3
Limon	1.188.517	1.550.000	1.323.000	2.325.726	75.8
Greyfurt (altıntop)	238.012	249.000	198.000	284.565	43.7
Turunç	2.609	2.615	2.808	3.581	27.5
Toplam Turunçgiller	4.348.742	5.362.615	4.710.808	7.877.982	67.2

Portakalın kökeninin Güneydoğu Asya olduğu tahmin edilmekte olup, MÖ 2500 yıllarında Çin’de yetiştirildiği ve bu dönemde “Çin elması” olarak adlandırıldığı bilinmektedir. Daha sonra, Vasco da Gama’nın Ümit Burnu çevresindeki deniz yolunu keşfetmesini takiben, Portekizli kaşifler tarafından Doğu’ya yapılan seferler doğrultusunda Güney Avrupa’ya getirilmiştir. Bu süreçte portakal, Çin’den Afrika’nın doğu kıyısına, oradan da Avrupa’ya yayılmıştır. Hristiyanlık döneminin başlangıcından kısa bir süre sonra, muhtemelen İtalya’da, portakalın yaygınlaşmaya başladığı düşünülmektedir. 16. yüzyılın başlarında, Roma İmparatorluğu’nun fetihleri, Arap ticaret yolları, İslamiyet’in Akdeniz çevresine yayılması ve Haçlı Seferleri, tatlı portakalın bu coğrafyalarda yerleşmesine ve özellikle Güney Avrupa’da

ticari açıdan önemli bir ürün haline gelmesine olanak sağlamıştır (Roussos, 2016). Şekil 2.3’de dünya üzerinde portakal yetiştirilen başlıca bölgeler gösterilmektedir. Portakalın Türkiye’ye girişi ise İtalya üzerinden olmuştur (Eryılmaz, 2020).



Şekil 2.3. Dünya üzerinde portakal yetiştirilen başlıca bölgeler (Tetra Pak, 2021)

Portakal, parlak yapraklara sahip, küçük çiçekli, yaprak dökmeyen ve yaklaşık 10 metreye kadar büyüeyebilen bir ağaçtır (New World Encyclopedia, 2021). Dünya genelinde turuncu türleri arasında en yaygın olarak yetiştirilen ve tüketilen tür olan portakal, dört ana grup altında sınıflandırılmaktadır (Tablo 2.3.) (Cebadera-Miranda vd., 2020; Özcan, 2020). Söz konusu sınıflandırmaya ek olarak, Özcan (2020) tarafından “Şeker (Asitsiz) Portakal” grubu ayrı bir kategori olarak dördüncü grup şeklinde tanımlanmış olup, bu sınıflandırmaya ilişkin bilgiler Tablo 2.3.’te sunulmaktadır.

Göbekli portakal (Navel) çeşitleri, adını meyvenin alt kısmında bulunan ve göbeğe benzeyen yapısal çıkıntıdan almaktadır. Bu çeşitlerin kökeni, 1820 yılında Brezilya’da bir manastır bahçesinde meydana gelen spontan bir mutasyona dayanmaktadır. Tohum oluşturma yeteneklerinin olmaması nedeniyle, günümüzdeki tüm göbekli portakal ağaçları, bu ilk mutasyon sonucu oluşan bireyden vejetatif çoğaltma yoluyla, özellikle aşıl yöntemiyle elde edilmiştir (Etebu & Nwauzoma, 2014).

Tablo 2.3. Portakal çeşitleri (Cebadera-Miranda vd., 2020; Özcan, 2020)

Grup	Önemli Çeşitleri
Göbekli (Navel) portakallar	Göbek bulunan çeşitleri kapsar. Öne çıkan çeşitler: <i>Navelina</i> , <i>Washington Navel</i> , <i>Navelate</i> .
Göbeksiz (normal) portakallar	Sarı-turuncu ile turuncu arasında değişen renk tonlarına sahiptir ve göbek içermez. Öne çıkan çeşitler: <i>Salustiana</i> , <i>Valencia Late</i> .
Kan (pigmentli) portakalları	Meyvede antosiyanin ve β -karoten gibi karotenoidlerin birikmesiyle kırmızımsı bir renk alır. Öne çıkan çeşitler: <i>Sanguinelli</i> , <i>Tarocco</i> , <i>Moro</i>
Şeker (asitsiz) portakalları	Öne çıkan çeşitler: Lima, Meski, Succari, Sucrena

Valencia portakalı, İspanya'nın portakal üretimiyle bilinen Valencia şehrinden esinlenerek tarım uzmanı William Wolfkill tarafından adlandırılmıştır (Etebu & Nwauzoma, 2014). Kan portakalları (blood oranges), kırmızımsı etli yapılarından dolayı bu ismi almışlardır ve tat profili meyveye göre tatlıdan ekşiye kadar değişiklik gösterir (Etebu & Nwauzoma, 2014).

2.2.1. Portakalın (*Citrus sinensis*) Kimyasal Bileşenleri

Portakal (*Citrus sinensis* L. Osbeck), yüksek tüketim oranı, zengin besin içeriği ve biyoaktif bileşenleri sayesinde insan sağlığı üzerinde pek çok olumlu etkiye sahiptir (Lv vd., 2015). Portakal hem temel makrobesinleri (karbonhidratlar, aminoasitler, mineraller vb.) hem de fonksiyonel bileşenleri (askorbik asit, flavonoidler, fenolik maddeler, karotenoidler ve uçucu yağlar vb.) yönünden oldukça zengindir (Roussos, 2016). 100 gram taze portakalın temel besin bileşimi Tablo 2.4.'te detaylı olarak verilmiştir.

Portakalın (*Citrus sinensis*) kimyasal bileşimi incelendiğinde, meyvenin %86.7 oranında su içerdiği ve 100 gramında yaklaşık 47 kcal enerji sağladığı görülmektedir. Düşük yağ içeriğine sahip olan portakal, 0.12 g protein, 0.15 g toplam lipid ve 10.6 g karbonhidrat içermekte olup, bu karbonhidratların önemli bir kısmı şekerlerden oluşmaktadır. Toplam şeker miktarı 8.57 g olup, bunun 4.2 g'ı sakkaroz, 2.02 g'ı glikoz ve 2.36 g'ı fruktozdur. Bu veriler, portakalın doğal tatlılık profilinin temelini oluşturan şeker kompozisyonunu yansıtmaktadır.

Tablo 2.4. Portakalın (*Citrus sinensis*) kimyasal bileşenleri (USDA, 2019)

Bileşen	Miktar
Su	86.7 g
Enerji	47 kcal
Nitrojen	0.14 g
Protein	0.91 g
Toplam Lipid	0.15 g
Kül	0.43 g
Karbonhidratlar	10.6 g
Toplam Diyet Lif	2 g
Toplam Şeker	8.57 g
Sakaroz	4.19 g
Glikoz	2.02 g
Fruktoz	2.36 g
Mineraller	
– Kalsiyum, Ca	43 mg
– Demir, Fe	0.33 mg
– Magnezyum, Mg	10.7 mg
– Fosfor, P	23 mg
– Potasyum, K	166 mg
– Sodyum, Na	9 mg
– Çinko, Zn	0.11 mg
– Bakır, Cu	0.064 mg
– Manganez, Mn	0.029 mg
Vitaminler ve diğer bileşenler	
– C vitamini, toplam askorbik asit	59.1 mg
– Tiamin	0.068 mg
– Riboflavin	0.051 mg
– Niasin	0.425 mg
– Pantotenik asit	0.261 mg
– Vitamin B-6	0.079 mg
– Folat, toplam	25 mg
– Vitamin K (filokinon)	0 uq
– Vitamin K (Dihidrofilokinon)	0 uq
Aminoasitler	
– Triptofan	0.008 g
– Treonin	0.016 g
– İzolösin	0.014 g
– Lösin	0.025 g
– Lizin	0.032 g
– Metionin	0.007 g
– Sistin	0.009 g
– Fenilalanin	0.051 g
– Tirozin	0.011 g
– Valin	0.022 g
– Arginin	0.099 g
– Histidin	0.011 g
– Alanin	0.028 g
– Aspartik asit	0.120 g
– Glutamik asit	0.242 g
– Glisin	0.020 g
– Prolin	0.153 g
– Serin	0.032 g

Mineral içeriği açısından değerlendirildiğinde, en yüksek oranda bulunan mineral 166 mg ile potasyumdur; bunu sırasıyla 23 mg fosfor, 10.7 mg magnezyum ve 43 mg kalsiyum izlemektedir. Ayrıca portakalda eser miktarda demir, çinko, bakır, sodyum ve manganez de bulunmaktadır. Bu mineraller, hücrel osmotik denge, kemik sağlığı, kas fonksiyonları ve enzimatik aktiviteler açısından önemli rol oynamaktadır.

Vitamin kompozisyonu açısından portakal, özellikle 59.1 mg ile zengin C vitamini (askorbik asit) içeriğiyle dikkat çekmektedir. Ayrıca tiamin (0.08 mg), riboflavin (0.051 mg), niasin (0.425 mg), pantotenik asit (0.261 mg), B6 vitamini (0.079 mg) ve toplam folat (25 µg) gibi B grubu vitaminler de mevcuttur. Bu vitaminler, enerji metabolizması, sinir sistemi sağlığı ve antioksidan savunma mekanizmaları açısından önem taşımaktadır.

Portakal aynı zamanda biyolojik olarak önemli birçok aminoasit içermektedir. Bu aminoasitler arasında lösin (0.025 g), lizin (0.024 g), fenilalanin (0.012 g), glutamik asit (0.242 g), aspartik asit (0.193 g), arginin (0.023 g) ve prolin (0.153 g) gibi esansiyel ve yarı esansiyel aminoasitler yer almakta olup, bunlar protein sentezi, bağ doku oluşumu ve metabolik süreçlerin düzenlenmesinde görev almaktadır.

Bu kapsamlı kimyasal profil, portakalın yalnızca lezzetli bir meyve olmanın ötesinde, sağlık açısından zengin bir mikrobeyin ve fonksiyonel bileşen kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır.

2.2.2. Portakalın Besin Değeri ve Sağlık Üzerine Etkileri

Portakal (*Citrus sinensis*) başta olmak üzere turunçgil meyveleri (mandalina, limon, greyfurt), dünya genelinde yaygın olarak tüketilen ve yüksek besin değeriyle öne çıkan önemli tarımsal ürünlerdir. Bu meyveler, özellikle askorbik asit (C vitamini) bakımından oldukça zengin olup, aynı zamanda şekerler, diyet lifi, potasyum, folat, kalsiyum, tiamin (B₁), niasin (B₃), B₆ vitamini, fosfor, magnezyum, bakır, riboflavin (B₂) ve pantotenik asit (B₅) gibi temel vitamin ve mineraller açısından önemli bir besin kaynağıdır. Portakallar, sadece temel besin öğeleriyle değil, aynı zamanda içerdikleri biyoaktif bileşikler sayesinde de sağlık açısından dikkat çekicidirler. Özellikle flavonoidler, turunçgil meyvelerinde yaygın olarak bulunan polifenolik maddelerdir ve güçlü antioksidan, anti-inflamatuar, antimikrobiyal ve antikanserojenik özellikleriyle bilinmektedir. Ayrıca, serbest radikallerin etkisiz hale getirilmesinde rol oynayan

bu bileşikler, oksidatif stresin azaltılmasına yardımcı olarak kronik hastalıkların önlenmesinde potansiyel koruyucu etki göstermektedir (Lv vd., 2015). Bu biyoaktif bileşikler; detoksifikasyon enzimlerinin aktivasyonunu destekleme, bağışıklık sistemini güçlendirme, trombosit agregasyonunu azaltma, kolesterol ve hormon metabolizmasını düzenleme ile kan basıncını düşürme gibi çeşitli fizyolojik yollarla insan sağlığına katkı sağlamaktadır (Cebadera-Miranda vd., 2020).

Portakal (*Citrus sinensis* L. Osbeck), içerdiği zengin flavonoid profili ile hem besleyici özellikleri hem de terapötik (tedavi edici, iyileştirici) potansiyeli açısından önemli bir turunçgil türüdür. Flavonoidler, turunçgil meyvelerinin yalnızca etli kısımlarında değil, aynı zamanda tohum, yaprak ve kök dokularında da bulunur. Bugüne kadar turunçgil türlerinde 100'den fazla flavonoid tanımlanmış olup, bu bileşikler genellikle glikozit (şekerle konjuge) formunda yer almakta ve moleküler yapılarına göre flavanonlar, flavonlar, flavonoller ve antosiyaninler olarak dört ana gruba ayrılmaktadır (Ma vd., 2020; Wang vd., 2017). Flavonoidler arasında özellikle flavanonlar turunçgillerde en yoğun birikim gösteren grubu oluşturmaktadır (Ma vd., 2020). Portakalda en baskın flavanon hesperidin olup, bunu narirutin, naringin ve didymin gibi diğer bileşikler izlemektedir (Roussos, 2016). Bu flavanonlar, güçlü antioksidan ve metal şelatlama özellikleriyle oksidatif stresin azaltılmasında önemli rol oynamakta ve dolayısıyla hücresel düzeyde koruyucu etki sağlamaktadır. Biyolojik aktiviteleri nedeniyle portakal, geleneksel tıpta yüzyıllardır hazımsızlık, öksürük, cilt inflamasyonu, kas ağrısı ve mantar enfeksiyonları gibi çeşitli rahatsızlıkların tedavisinde kullanılmaktadır. Çin Farmakopesi'nde *C. sinensis*'e ait ürünlerin resmi olarak tıbbi kullanım için onaylanmış olması, bu türün geleneksel tıptaki önemini göstermektedir. Ayrıca portakalın içerdiği biyoaktif bileşiklerin kan basıncını düzenleyici etkiler gösterdiği ve bağışıklık sistemini destekleyici rol üstlendiği de bildirilmektedir. Sahip olduğu besin öğeleri ve biyoaktif bileşikler sayesinde portakal, hem geleneksel tıpta hem de günümüz modern sağlık yaklaşımlarında fonksiyonel bir gıda olarak ön plana çıkmaktadır (Lv vd., 2015).

Portakal, yüksek C vitamini içeriğiyle de güçlü bir antioksidan kaynağıdır (Lv vd., 2015). C vitamini, cilt, kemik, damar ve dişlerin ana yapı taşı olan kollajenin sentezi için gereklidir. Eksikliği, iskorbüt gibi ciddi hastalıklara yol açabilirken; serbest radikalleri etkisiz hale getirerek potansiyel antikanser etkiler gösterebilir. Ayrıca, portakal suyu folik asit (B9) içerir;

bu vitamin DNA sentezinde görev alır ve özellikle gebelikte fetal gelişim açısından önemlidir (Tetra Pak, 2004).

Turunçgil meyveleri, zengin karbonhidrat, organik asit ve aminoasit profili ile hem tat hem de besin değeri açısından dikkat çekmektedir (Ladaniya, 2008). Portakalda başlıca karbonhidrat sakkaroz olup, bunu fruktoz ve glikoz izlemektedir; söz konusu şeker bileşenleri, meyvenin tatlılık profili ile birlikte toplam enerji değerinin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır. Portakalda en baskın organik asit sitrik asit olup, bunu malik ve süksinik asitler izlemekte ve bu bileşikler meyvenin özgün tat profiline anlamlı katkı sağlamaktadır. Prolin, serin ve arjinin gibi amino asitler; bağ doku oluşumu, çeşitli metabolik süreçlerin düzenlenmesi ve kardiyovasküler işlevlerin desteklenmesinde önemli biyolojik roller üstlenmektedir. Portakalın karakteristik aromasının temel kaynağı ise kabuk yağlarında yüksek oranda bulunan d-limonen bileşiğidir; bu monoterpen, aynı zamanda antimikrobiyal ve antiinflamatuvar etkileriyle de dikkat çekmektedir (Roussos, 2016).

Portakalda renk oluşumu ve görsel kalite, başta violaksantin, β -kriptoksantin ve lutein olmak üzere çeşitli karotenoid bileşiklerin varlığıyla şekillenmektedir. Bu karotenoidler, meyveye karakteristik canlı rengini kazandırmanın ötesinde, güçlü antioksidatif özellikleri sayesinde hücresel düzeyde oksidatif stresin azaltılmasına katkı sağlamakta ve özellikle göz sağlığının korunmasında önemli biyolojik roller üstlenmektedir. Mineral içeriği açısından değerlendirildiğinde ise, portakal suyunda en yüksek oranda bulunan mineral potasyumdur; bunu fosfor ve kalsiyum takip etmektedir. Bu mineraller, vücutta elektrolit dengesinin sağlanması, kas fonksiyonlarının düzenlenmesi ve kemik yapısının korunması gibi temel fizyolojik süreçlerde hayati öneme sahiptir (Ma vd., 2020; Roussos, 2016).

Portakalın hem doğrudan tüketime uygun duyuşal özellikleri hem de işlenebilir yapısıyla gıda endüstrisinin temel hammaddelerinden biri haline gelmesi, bu meyvenin ekonomik ve beslenme açısından stratejik önemini ortaya koymaktadır. Literatürde, tek bir portakalın yaklaşık 170 farklı faydalı fitokimyasal bileşik ve 60'tan fazla flavonoid içerdiği; bu bileşiklerin tümör karşıtı, antiinflamatuvar, antitrombotik ve antioksidatif etkilere sahip olduğu bildirilmektedir. Bu özellikler sayesinde portakal, genel sağlığın korunması ve kronik hastalıkların önlenmesinde potansiyel destekleyici bir gıda olarak öne çıkmaktadır. Farklı çeşitleri arasında

kimyasal bileşim açısından bazı farklılıklar bulunsa da, tüm portakal türleri insan sağlığı açısından değerli bir besin kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Etebu & Nwauzoma, 2014).

2.2.3. Portakalın Endüstride Kullanım Alanları

Portakal, sadece sofralık bir meyve olarak değil, aynı zamanda içerdiği biyoaktif bileşenler sayesinde çok çeşitli endüstriyel alanlarda değerlendirilebilen çok yönlü bir tarımsal üründür. Portakalın endüstriyel kullanımı; gıda, kozmetik, ilaç ve biyoteknoloji sektörlerini kapsayan geniş bir alana yayılmaktadır (Lv vd., 2015).

Portakal taze olarak tüketilebildiği gibi, suyu sıkılarak doğrudan içecek olarak ya da konsantre formda saklanarak gazlı içecekler, kokteyller, meyveli içecekler ve likörlerde aroma verici olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında, portakal kabuğu reçel, marmelat, şekerleme, kek ve pastalarda lezzet ve görsellik sağlamak amacıyla hem rendelenmiş hem de şekerlenmiş formda değerlendirilmektedir (Etebu & Nwauzoma, 2014).

Portakalın kabuğu, çiçeği, yaprağı ve dalından elde edilen uçucu yağlar; sabun, krem ve parfüm gibi kozmetik ürünlerde doğal koku ve ferahlık sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Etebu & Nwauzoma, 2014). Özellikle limonen gibi bileşenler, antimikrobiyal, antifungal ve cilt yenileyici özellikleri sayesinde kozmetik sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca, portakal türevli polifenoller anti-aging kozmetik formülasyonlarda yer almakta; flavonoidlerin de anti-kanser ve antioksidan etkileri nedeniyle farmasötik ürünlerde kullanımı araştırılmaktadır (Lv vd., 2015). Portakal çekirdeğinden elde edilen yağ ise hem yemeklik olarak gıda sanayinde hem de plastik üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmektedir (Etebu & Nwauzoma, 2014).

Portakal kabuğu ve posası; çözünür diyet lifleri, polifenoller ve flavonoidler (örneğin hesperidin ve narirutin) gibi sağlığa faydalı bileşikler açısından zengindir. Bu maddeler, fonksiyonel gıdalarda, probiyotik ürünlerde, sporcu besinlerinde ve besin takviyelerinde kullanılmaktadır. Aynı zamanda bağışıklık sistemini güçlendirme, inflamasyonu azaltma ve kalp-damar sağlığını koruma gibi etkiler sağlarlar. Ayrıca portakal kabuğundan elde edilen pektin; gıda ve ilaç sanayinde jel oluşturucu, kıvam artırıcı ve stabilizatör olarak kullanılmaktadır (Lv vd., 2015).

Portakalın endüstriyel olarak işlenmesi sonucunda ortaya çıkan biyokütle atıkları da değerlendirilmektedir. Bu atıklar biyogaz üretiminde, gübre olarak kompost yapımında veya biyoplastik üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. Özellikle kabuklardan elde edilen pektin, biyobozunur gıda ambalaj filmleri üretiminde alternatif çevreci malzeme olarak öne çıkmaktadır (Lv vd., 2015).

2.3. Meyve Kurutma Teknolojileri ve Gıda Endüstrisindeki Uygulama Alanları

Meyveler, yüksek su içerikleri nedeniyle hasattan sonra hızla bozulabilen tarımsal ürünlerdir (Hasan vd., 2019). Bu nedenle, raf ömrünü uzatmak, mikrobiyal bozulmaları önlemek ve besin değerlerini koruyarak meyve ürünlerini farklı formlarda değerlendirebilmek amacıyla çeşitli muhafaza teknikleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin başında gelen kurutma işlemi, meyvelerdeki serbest suyun uzaklaştırılması yoluyla mikrobiyal aktivitenin ve kimyasal reaksiyonların sınırlandırılmasını sağlar. Böylece ürünün hem raf ömrü uzatılır hem de taşınabilirliği, depolanabilirliği ve ticari değeri artırılır (Mujumdar & Law, 2010).

Kurutma işlemi, gıda endüstrisinde yüzyıllardır uygulanan geleneksel bir muhafaza yöntemi olmakla birlikte, günümüzde teknolojik gelişmelerle birlikte daha kontrollü ve verimli hale getirilmiştir (Kovacı vd., 2018). Isı ve kütle transferi ilkelerine dayalı olarak gerçekleştirilen bu süreçte; sıcaklık, hava akışı, basınç ve nem gibi parametrelerin optimize edilmesi, hem ürün kalitesi hem de enerji verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle portakal gibi değerli biyolojik bileşenler ve uçucu aromatik maddeler içeren narenciye meyvelerinde, kurutma yöntemi ve koşullarının seçimi, ürünün fonksiyonel özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Pehlivanoğlu ve Aksoy, 2021).

Bu bölümde, meyve kurutma tekniklerinin temel prensipleri ele alınmış; geleneksel ve modern kurutma yöntemlerinin teknolojik özellikleri, avantajları ve sınırlılıkları kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Ayrıca, tez kapsamında uygulanan tepsili kurutma ve vakumlu mikrodalga kurutma yöntemlerine ilişkin teknik bilgiler sunulmuş; bu yöntemlerle ilgili literatürde yer alan güncel bilimsel araştırmalar özetlenerek konuya dair mevcut bilgi birikimi ortaya konmuştur.

2.3.1. Kurutma İşleminin Temel Mekanizmaları ve Teknolojik Yöntemler

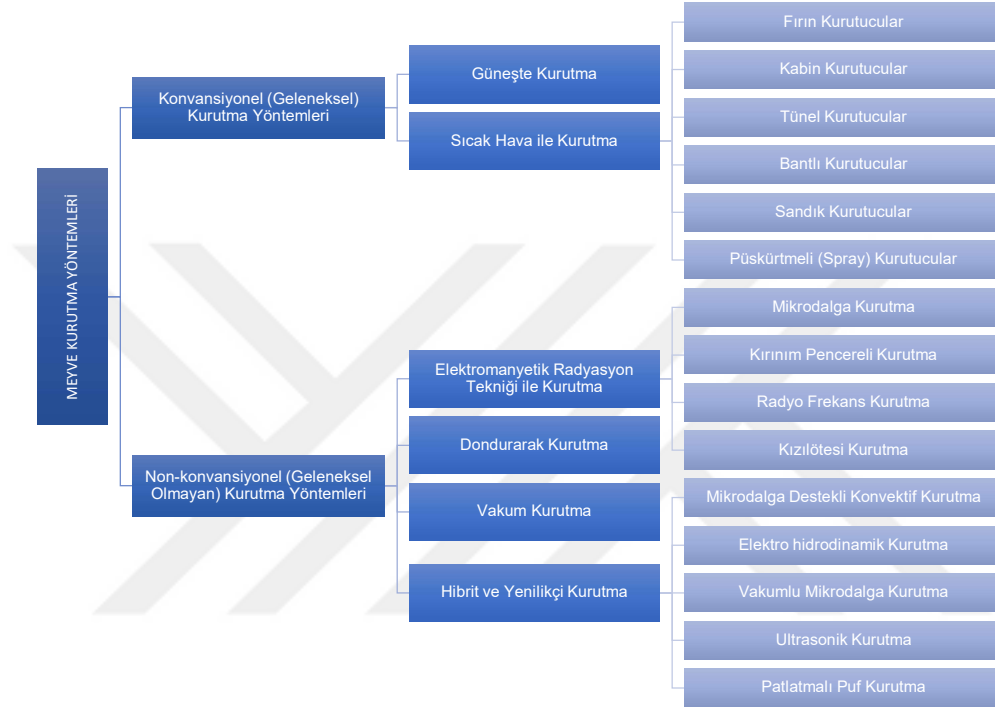
Kurutma, gıda ürünlerinden suyun uzaklaştırılması yoluyla mikroorganizma faaliyetlerinin kontrol altına alınması, kimyasal reaksiyonların yavaşlatılması ve ürünün raf ömrünün artırılması amacıyla uygulanan ısı bir işlem olup, yüzlerce yıldır kullanılan bir tekniktir. Kurutma süreci, ısı ve kütle transferi prensiplerine dayalı olarak ilerleyen, birbirine bağlı fiziksel ve kimyasal değişimlerden oluşan kompleks bir mekanizmadır (Vega-Mercado vd., 2001).

Kurutma sırasında ısı enerjisi, ürüne iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıma (radyasyon) yoluyla, doğrudan veya dolaylı olarak aktarılır, böylece gıda içerisindeki serbest su moleküllerinin enerjisini artırarak suyun buharlaşması sağlanır. Buharlaşan su, ürünün iç yapısından yüzeye taşınır ve hava akımı, vakum veya düşük basınç uygulamalarıyla ortamdan uzaklaştırılarak ürünün kuruması tamamlanır. Bu süreç sıcaklık, nem, hava akışı hızı ve kurutulan materyalin şekli ve yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir (Vega-Mercado vd., 2001). Bu aşamalar, ürünün nem dengesinin sağlanması, yapısal bütünlüğünün korunması ve besin bileşenlerinin kayıplarının en aza indirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Guclu vd., 2022).

Kurutma teknolojileri, gıdaların uzun süreli muhafazasında temel bir birim operasyon olarak değerlendirilmektedir ve gelişen teknolojik olanaklar doğrultusunda birçok farklı yöntemle uygulanabilmektedir (Güngör, 2013). Bu yöntemler, gıda üretim sektöründe toz, pul ve granül gibi çeşitli fiziksel formlarda ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamakta; kullanılan ısıtma kaynağı, enerji transfer mekanizması ve işlem parametrelerine bağlı olarak farklı kalite özelliklerine sahip nihai ürünlerin elde edilmesine imkân tanımaktadır (Bingöl & Devres, 2010; Mujumdar & Law, 2010; Nowacka vd., 2023). Kurutma prosesleri, enerji verimliliğini artırma ve ürün kalitesini maksimum düzeyde koruma hedefi doğrultusunda sürekli olarak geliştirilmektedir (Kian-Pour, 2020; Mujumdar & Law, 2010; Nowacka vd., 2023). Vega-Mercado ve çalışma arkadaşları (2001), kurutma teknolojilerini verimlilik, enerji tüketimi ve ürün kalitesine etkileri bakımından dört grup altında sınıflandırmaktadır. Birinci ve ikinci grup kurutma yöntemleri geleneksel sistemleri ifade ederken, üçüncü ve dördüncü grup yöntemler modern, ileri teknolojiye dayalı sistemleri kapsamaktadır (Vega-Mercado vd., 2001). Literatürde bu sınıflandırmalara dayalı olarak geliştirilen 500'den fazla kurutucu tipi

tanımlanmış olup, bunlardan yaklaşık 100 kadarı endüstriyel ölçekte ticari olarak kullanılabilir niteliktedir (Mujumdar & Law, 2010).

Meyve kurutma yöntemleri, genel olarak Şekil 2.4.'de de gösterildiği üzere, iki ana kategori altında sınıflandırılarak incelenmektedir (Güngör, 2013; Kian-Pour, 2020; Süfer vd., 2024).



Şekil 2.4. Meyve Kurutma Yöntemleri (Tan, 2020; Kian-Pour, 2020)

Bu sınıflandırma, uygulanan enerji transfer mekanizmasına ve kullanılan teknolojik altyapıya göre geleneksel ve modern kurutma yöntemleri olarak temellendirilmektedir.

A. Konvansiyonel (Geleneksel) Kurutma Yöntemleri

- 1. Güneşte Kurutma (Sun Drying, SD)**
- 2. Sıcak Hava ile Kurutma (Hot Air Drying, HAD)**
 - Fırın Kurutucular
 - Kabin Kurutucular
 - Tünel Kurutucular
 - Bantlı Kurutucular
 - Sandık Kurutucular

- Püskürtmeli (Spray) Kurutucular

B. Non-konvansiyonel (Geleneksel Olmayan - Modern) Kurutma Yöntemleri (Kian-Pour, 2020).

1. Dondurarak Kurutma (Freeze Drying, FD)
2. Vakum Kurutma (Vacuum Drying, VD)
3. Elektromanyetik Radyasyon Tekniği ile Kurutma
 - Mikrodalga Kurutma (Microwave Drying, MWD)
 - Radyo Frekans Kurutma (Radio Frequency Drying, RFD)
 - Kızılötesi Kurutma (Infrared Drying, IRD)
 - Kırınım Pencereli Kurutma (Refractance Window Drying, RWD™)
4. Hibrit ve Yenilikçi Kurutma Yöntemleri
 - Mikrodalga Destekli Konvektif Kurutma
 - Vakumlu Mikrodalga Kurutma
 - Elektro hidrodinamik Kurutma (Electrohydrodynamic Drying, EHD)
 - Ultrasonik Kurutma
 - Patlatmalı Puf Kurutma
 - Düşük Basıncılı Kızgın Buhar Kurutma (LPSSD)

2.3.1.1. Konvansiyonel (Geleneksel) Kurutma Yöntemleri

Konvansiyonel kurutma teknikleri, gıda işleme sektöründe uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan ve literatürde "geleneksel kurutma yöntemleri" olarak da adlandırılan sistemlerdir (Kian-Pour, 2020). Bu yöntemler, temel olarak suyun buharlaştırılması esasına dayanmakta olup; güneş ışığı, doğal hava akımı veya kontrollü sıcak hava sirkülasyonu gibi dış enerji kaynaklarının kullanımıyla gerçekleştirilir (Güngör, 2013; Süfer vd., 2024). Düşük yatırım ve işletme maliyetleri nedeniyle ekonomik açıdan avantajlı olmakla birlikte, kuruma süresinin uzun olması, çevresel faktörlerin kontrol edilememesi ve mikrobiyal kontaminasyon riski gibi nedenlerle ürün kalitesinde önemli kayıplara yol açabilmektedir (Süfer vd., 2024). Bu yöntemler arasında güneşte kurutma ve sıcak hava ile kurutma gibi klasik uygulamalar yer almaktadır (Kian-Pour, 2020).

2.3.1.1.1. Güneşte kurutma (Sun Drying, SD)

Güneşte kurutma, doğal güneş ışığı ve hava akımı kullanılarak meyve ve sebzelerin su içeriğinin azaltılması esasına dayanır. Ekstra enerji kaynağı gerektirmemesi ve düşük maliyetli olması en büyük avantajları arasındadır. Ancak, kurutma süresinin uzun olması, ürünlerin toz, toprak, böcek ve mikroorganizmalar gibi dış etkenlere maruz kalması, iklim koşullarına bağlı olarak değişken kurutma verimi, ürünlerde küflenme riski ve kalite kayıpları bu yöntemin bazı dezavantajlarıdır (Günaydın vd., 2022; Kovacı vd., 2018).

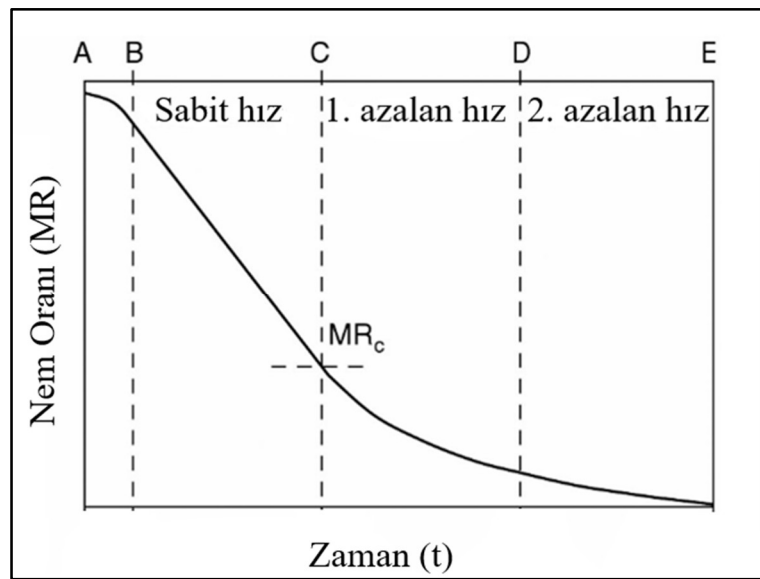
2.3.1.1.2. Sıcak hava ile kurutma (Hot Air Drying, HAD)

Sıcak hava ile kurutma yöntemi, kurutucu içerisine alınan havanın ısıtılarak bir fan yardımıyla gıda ürünlerinin dış yüzeylerinde dolaştırılması ve ürünün dıştan içe doğru ısınmasını sağlayarak kurutulmasıdır. Kurutma işlemi boyunca su, ürün içerisinden yüzeye doğru taşınarak sıcak hava akımıyla ortamdaki uzaklaştırılır. Sıcak hava kurutmanın temel parametreleri; hava sıcaklığı, hava akış hızı ve hava nem içeriğidir. Hava sıcaklığı arttıkça kurutma süresi kısalırken, yüksek sıcaklıklar da kabuk sertleşmesi, renk değişimi ve besin kaybı gibi olumsuzluklara neden olabilmektedir (Chizoba Ekezie vd., 2017; Karacabey vd., 2020). Ayrıca, düşük sıcaklıklarda kurutma süresi uzadıkça enerji tüketimi artmakta, ürünlerin rehidrasyon kapasitesi azalabilmektedir. Düşük yatırım maliyeti ve geniş uygulama alanı sunması endüstriyel kullanımını yaygınlaştırmıştır (Chizoba Ekezie vd., 2017; Günaydın vd., 2022; Süfer vd., 2024).

Konvansiyonel (Sıcak hava) kurutmanın temel mekanizmaları yüzey difüzyonu, sıvı veya buhar difüzyonu ve kılcal (kapiler) harekettir. Yüzey difüzyonu, suyun gıda yüzeyinde buharlaşmasını sağlarken, sıvı veya buhar difüzyonu nem konsantrasyonu farkına bağlı olarak suyun iç bölgelerden yüzeye taşınmasıyla meydana gelir ve genellikle düşük gözenekliliğe sahip gıdalarda gözlemlenir. Kılcal (kapiler) hareket ise gözenekli ve granüler yapıdaki gıdalarda, serbest halde bulunan suyun, kılcal damarlar ve gözenekli boşluklar aracılığıyla hareket etmesidir (Calín-Sánchez vd., 2020; Mujumdar, 2006; Nowacka vd., 2023; Carrín ve Crapiste, 2009).

Kurutma süreci sabit kuruma hızı evresi ve azalan kuruma hızı evresi olmak üzere iki ana evrede gerçekleşir (Şekil 2.5.) Kurutma işlemi başladığında, sıcak hava gıdanın yüzeyine

konveksiyon yoluyla enerji aktararak yüzeyde bulunan serbest suyun buharlaşmasını sağlar. Bu aşama, sabit kuruma hızı evresi olarak adlandırılır ve kuruma hızını hava sıcaklığı, bağıl nem ve hava akış hızı gibi dış etkenler doğrudan etkiler. Yüzeydeki suyun buharlaşması devam ettikçe, iç kısımlardaki suyun yüzeye taşınma işlemi başlar ve bu noktada, gözenekli yapıya sahip gıdalarda kapiler etki devreye girerek nemin iç bölgelerden yüzeye doğru ilerlemesini sağlar. Nem kaybı arttıkça iç bölgelerde bulunan suyun uzaklaştırılması buhar difüzyon mekanizmaları ile gerçekleştirilir ve iç bölgelerden dışa hareketi giderek zorlaşan suyun, difüzyon yoluyla yüzeye taşınıp buharlaşması sağlanır. Bu süreç, azalan kuruma hızı evresi olarak adlandırılır ve kuruma hızında belirgin bir düşüş gözlemlenir, ilk azalan kuruma hızı evresi, yüzey filmi kuruyup gıdanın nem içeriği kritik seviyeye ulaştığında başlar ve sıvı difüzyonu baskın hale gelir. Daha sonra ikinci azalan kuruma hızı evresine geçilir; bu aşamada nemin hareketi, buhar difüzyonu ve iç koşullardaki değişimlere bağlı olarak gerçekleşir, çünkü iç difüzyon hızı, kuruma mekanizmasını belirleyici hale gelir (Inyang vd., 2018). Meyve ve sebzeler gibi higroskopik ürünler genellikle azalan hız evresinde kurur (Calín-Sánchez vd., 2020). Son araştırmalar, meyve ve sebzelerin kurutulmasında ilk sabit kuruma evresinin çok kısa sürdüğünü ve pratikte çoğu zaman ihmal edilebileceğini, esas kurutmanın azalan hızla gerçekleşen dönemlerde meydana geldiğini ortaya koymaktadır (Onwude vd., 2016). Kurutma, suyun uzaklaştırılmasının durduğu, gıdanın denge nemine ulaştığı anda gerçekleşmektedir. Gıda kalitesinin korunması açısından sıcaklık, hava hızı ve kurutma süresi gibi parametrelerin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir (Calín-Sánchez vd., 2020).



Şekil 2.5. Tipik bir kuruma eğrisi ve sabit hız - azalan hız dönemleri (Onwude vd., 2016).

Sıcak hava (konveksiyon) prensibine dayalı kurutucular, gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan kurutma sistemleri arasında yer almakta olup, farklı ürün özelliklerine ve proses ihtiyaçlarına göre çeşitli tiplerde tasarlanmaktadır. Bu grup içerisinde yer alan başlıca kurutucu türleri; fırın kurutucular, kabin kurutucular, tünel kurutucular, bantlı kurutucular, sandık kurutucular ve yüksek yüzey-alan etkileşimi sağlayan püskürtmeli (sprey) kurutuculardır. Bu sistemlerde sıcak hava, ürün yüzeyine kontrollü biçimde temas ederek nemin uzaklaştırılmasını sağlar ve buharlaştırma işlemi boyunca ısı-kütle transferi konvektif olarak gerçekleşir (Tan, 2020).

Kurutma endüstrisinde çoğunlukla sıcak hava ile yapılan geleneksel kurutma teknikleri kullanılmakta, bu da meyve ve sebzelerde kıymetli gıda bileşenlerinde ve duyu özelliklerinde azalmalara neden olmaktadır (Jiang vd., 2017; Polatçı & Tasova, 2020). Portakalın kurutulması için genellikle geleneksel kurutma yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak bu kurutma yönteminde ürün uzun süre ısıya maruz kalmasından ötürü vitaminler, fenolik maddeler, karotenoid maddeler ve antioksidanlar gibi besin bileşenleri aynı zamanda renk, koku, lezzet gibi duyu özelliklerinde azalmalar olmaktadır (Polatçı & Tasova, 2020).

Erdem ve arkadaşları (2018), portakal dilimlerinin sıcak hava ile kurutulması üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında; kurutma süresi, nihai ürünün nem içeriği, renk özellikleri ile bazı makro ve mikro element düzeyleri gibi kalite parametrelerini incelemişlerdir. Araştırmada, 70 °C ve 80 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta uygulanan kurutma işlemleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, 70 °C’de gerçekleştirilen kurutma işleminin 80 °C’ye kıyasla daha uzun sürdüğünü ortaya koyarken, 80 °C’de kurutulan portakal dilimlerinin renk açısından daha cazip özellikler gösterdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıkta (70 °C) gerçekleştirilen kurutma işleminin, ürünlerde daha yüksek düzeyde makro ve mikro element korunumu sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kurutma sıcaklığının hem ürünün görsel kalitesi hem de besin içeriği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Erdem vd., 2018).

Çetin (2019) tarafından yürütülen çalışmada, farklı kalınlıklarda (5, 7 ve 9 mm) kesilmiş elma ve portakal dilimlerinin kabin tipi kurutucuda çeşitli sıcaklık (50, 55 ve 60 °C) ve süre (8, 9 ve 10 saat) kombinasyonları altında kurutulması sonucunda renk değişimleri değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, hem elma hem de portakal için en uygun kurutma koşullarının 7 mm

kalınlık, 8 saat süre ve 50 °C sıcaklık olduğunu ortaya koymuştur. Kurutma süresi ve sıcaklığın, ürünlerin renk özellikleri üzerinde belirleyici etkiler gösterdiği, portakal dilimlerinin ise daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun sürelerde kurutulmasının gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Shukla (2018), portakal dilimlerinin kurutulmasında ozmotik ön işlem uygulamalarının etkisini araştırmış ve en iyi kalitenin, %60'lık şeker çözeltisinde 16 saat süren ozmotik ön işlem sonrası 60 °C sıcaklıkta yapılan tepsi tipi kurutma yöntemiyle elde edildiğini bildirmiştir.

Rafiee ve arkadaşları (2010), portakal dilimlerinin sıcak hava ile kurutulması sürecinde; farklı sıcaklıklar (40, 50, 60, 70 ve 80 °C) ve hava hızları (0.5, 1.0 ve 2.0 m/s) ile kurutma deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda 2, 4 ve 6 mm kalınlığındaki dilimlerin etkin nem difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. Araştırma bulguları, sıcaklık ve hava hızındaki artışın etkin yayılmayı artırdığını; ancak dilim kalınlığının bu parametre üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

Afrin ve arkadaşları (2022), portakal posasının konvektif kurutma yöntemiyle 50, 60 ve 70 °C sıcaklıklarda kurutulmasını konu alan çalışmalarında kurutma kinetiğini değerlendirmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, kurutma sürecinin en iyi biçimde Modified Page modeli ile tanımlanabildiği saptanmıştır. Etkili nem difüzyon katsayısı 3.34×10^{-10} ile 1.06×10^{-9} m²/s aralığında değişmiş ve aktivasyon enerjisi 53.07 kJ/mol olarak belirlenmiştir. Kurutma sıcaklığının artması, emülsifiye etme kapasitesi, şişme oranı ve kristallilik üzerinde olumlu etkiler oluştururken; C vitamini ve antioksidan kapasitesinde kayıplara neden olduğu gözlemlenmiştir.

Bozkır (2020) tarafından yürütülen çalışmada, portakal kabuklarının farklı kurutma teknikleriyle kurutulması sonucunda besin bileşenleri ve uçucu bileşiklerde meydana gelen değişimler değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi en kısa sürede kuruma sağlamakta ve C vitamini, fenolik maddeler ile karotenoidlerin korunmasında en yüksek başarıyı göstermektedir. Uçucu bileşiklerin korunması açısından ise vakumlu kızılötesi kurutma yöntemi daha etkili bulunmuştur. Buna karşılık, tepsili kurutma yöntemi sürecin en uzun sürede tamamlanmasına neden olmuş ve hem besin maddeleri hem de uçucu bileşiklerin kaybı açısından en zayıf performansı sergilemiştir.

Phuon ve arkadaşları (2022), portakal kabuklarının farklı kurutma yöntemleri (konvektif, mikrodalga ve dondurarak kurutma) ile işlenmesinin fizikokimyasal ve fitokimyasal özellikler üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yapılan analizlerde, dondurarak kurutma yönteminin toplam fenolik madde (TPC) ve toplam antioksidan aktivite (TAA) bakımından en yüksek değerleri koruduğu, ancak yüksek zaman ve maliyet gerektirdiği belirlenmiştir. Mikrodalga kurutmanın ise renk korunumu açısından en iyi sonucu verdiği, konvektif kurutma yönteminin ise renk kaybı ve besin ögesi kayıpları açısından daha olumsuz sonuçlar doğurduğu tespit edilmiştir.

Roppolo ve arkadaşları (2025), kan portakal dilimlerinin 70 °C'de 12 saat süreyle sıcak hava kurutmasıyla işlenmesini değerlendirmiştir. Çalışma, bu koşullarda mikrobiyolojik stabilitenin sağlandığını ve ürünün renk bütünlüğünün korunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, modifiye atmosferle paketlenmiş ürünlerin 100 gün boyunca depolanması sonucunda sertlik, renk ve aroma bileşenlerinde olumlu yönde gelişmeler olduğu bildirilmiştir.(Roppolo et al., 2025)

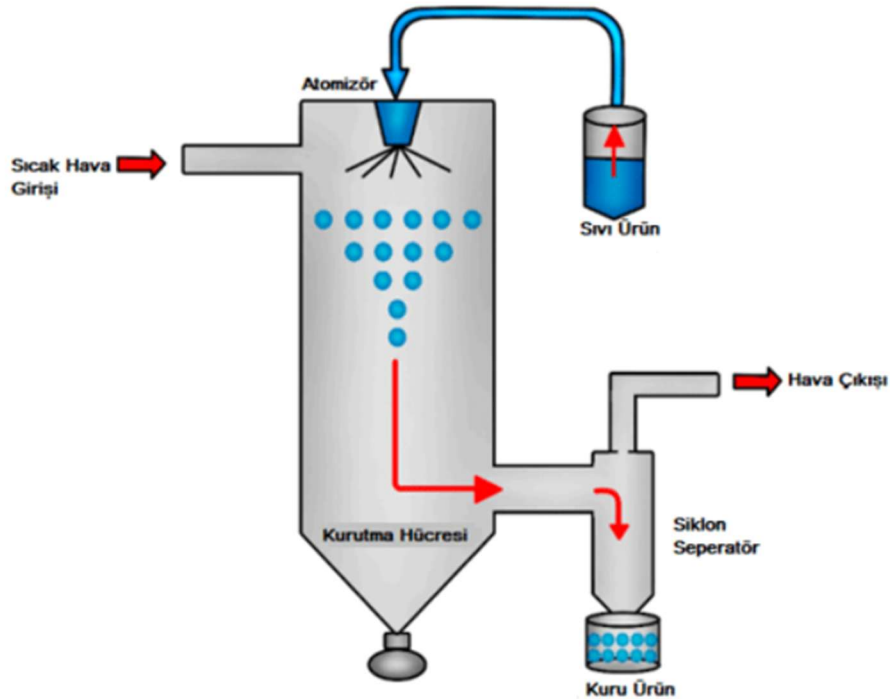
Derose ve arkadaşları (2021) ise portakal meyvesinin (*Citrus sinensis*) farklı kurutma teknikleri [sıcak hava kurutma (HAD), sprey kurutma (SD), dondurarak kurutma (FD), mikrodalga kurutma (MD), inert akışkan yataklı kurutma, ultrasonik kurutma (UD) ve kızılötesi kurutma (IRD)] ile kurutulmasının fonksiyonel bileşenler üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırma sonuçları, yüksek sıcaklık uygulamalarının toplam fenolik içerik ve antioksidan kapasiteyi azalttığını; buna karşılık düşük sıcaklık ve kısa süreli kurutma yöntemlerinin besin öğelerinin korunmasında daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Bu kapsamda, düşük sıcaklık ve hızlı kurutma tekniklerinin biyoaktif bileşenleri muhafaza etmek açısından kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır.

Kaynarca ve Aşkın (2020), portakal kabuklarının fırın ve mikrodalga kurutma yöntemleriyle işlenmesini karşılaştırmışlardır. Fırın kurutma işlemleri 45–65 °C sıcaklık aralığında ve 1 m/s hava hızında uygulanırken, mikrodalga kurutma 400–700 W güç seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçları, toplam fenolik madde (TFM) miktarının sıcaklıkla birlikte anlamlı biçimde azaldığını; toplam karotenoid miktarının (TKM) ise her iki yöntemle de düşüş gösterdiğini, ancak en düşük kaybın 400 W mikrodalga kurutma ile elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, kurutma parametrelerinin portakal kabuklarının fonksiyonel ve duyu özellikleri üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Son olarak, Özcan ve arkadaşları (2020), kumkuat meyvesi üzerinde sıcak hava, vakum ve mikrodalga kurutma yöntemlerinin etkilerini araştırmışlardır. Mikrodalga kurutmanın en yüksek rehidrasyon kapasitesine sahip olduğu tespit edilirken, renk stabilitesi açısından vakum kurutma daha avantajlı bulunmuştur. Ayrıca, mikrodalga kurutma yöntemi süreci önemli ölçüde kısaltmış ve toplam fenolik içerik ile antioksidan kapasiteyi en iyi koruyan yöntem olarak öne çıkmıştır.

2.3.1.1.2.1. Sprey kurutma (Spray Drying, SD)

Sprey kurutma, sıvı veya yarı sıvı formdaki gıda ve biyolojik materyallerin sıcak hava akımıyla temas ettirilerek hızlı bir şekilde toz formuna dönüştürülmesini sağlayan, endüstride yaygın olarak kullanılan modern bir kurutma yöntemidir (Şekil 2.6.). Bu teknik, ürünün ince damlacıklar halinde püskürtülmesi ve aynı anda sıcak hava ile temas ettirilmesi esasına dayanır. Sonuç olarak, ürün içerisindeki su çok kısa sürede buharlaşmakta ve kuru partiküller elde edilmektedir (Günaydın vd., 2022; Kian-Pour, 2020).



Şekil 2.6. Sprey kurutma tekniği şematik gösterimi (Günaydın vd., 2022)

Sprey kurutma yöntemi, gıda sektöründe meyve-sebze suyu tozları, bitki ekstraktları, süt tozu ve puding tozları gibi ürünlerin üretiminde; eczacılık alanında aşılarda, vitaminler, maya kültürleri ve enkapsüle ürünlerin hazırlanmasında; ayrıca biyokimya ve kimya sanayilerinde deterjan, sabun ve benzeri ürünlerin tozlaştırılmasında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bu yöntemin başlıca avantajları arasında; ısıya duyarlı bileşenlerin termal bozulmaya uğramadan korunabilmesi, yüksek yüzey alanı sayesinde son derece hızlı kuruma sağlanması ve fonksiyonel bileşenlerin mikroenkapsülasyonu için uygun bir ortam sunması yer almaktadır. Bununla birlikte, sprej kurutma sistemi yüksek enerji tüketimi gerektirmekte ve proses sırasında oluşan ince toz partiküllerinin kontrolü için ek filtrasyon ve çevresel önlemler alınmasını zorunlu kılmaktadır (Kian-Pour, 2020).

2.3.1.2. Non-Konvansiyonel (Geleneksel Olmayan- Modern) Kurutma Yöntemleri

Modern kurutma teknolojileri, geleneksel kurutma yöntemlerinin sınırlılıklarını ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiş olup, farklı enerji transfer mekanizmalarına dayanan ve kurutma sürecinin çeşitli parametrelerinin hassas biçimde kontrol edilebildiği sistemlerdir (Alonzo Macias, 2014; Süfer vd., 2024). Bu yöntemler; kurutma süresi, enerji tüketimi ve nihai ürün kalitesi gibi kritik faktörler üzerinde sağladıkları olumlu etkiler sayesinde, özellikle yüksek katma değerli gıda ürünlerinin işlenmesinde tercih edilmektedir (Günaydın vd., 2022).

2.3.1.2.1. Dondurarak kurutma (Freeze Drying, FD)

Dondurarak kurutma (freeze-drying; FD), ya da teknik adıyla liyofilizasyon, ürünlerdeki suyun önce dondurulması ve ardından düşük basınç koşullarında süblimasyon yoluyla uzaklaştırılması esasına dayanan, gelişmiş bir kurutma yöntemidir. Süblimasyon, maddenin katı hâlden sıvı faza geçmeden doğrudan gaz fazına geçişi olarak tanımlanır ve bu işlem, atmosfer basıncının altındaki vakum koşullarında gerçekleşmektedir. Bu yöntem, özellikle ısıya ve oksidasyona duyarlı biyolojik materyallerin kurutulmasında üstünlük sağlamaktadır (Vega-Mercado vd., 2001; Indiarto vd., 2021).

Dondurarak kurutma süreci genel olarak üç ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, ürünlerdeki serbest suyun dondurulduğu ön dondurma basamağıdır. Bu aşamada ürün kontrollü bir şekilde

-40 °C ile -80 °C arasında dondurulur ve bu sayede buz kristalleri oluşur. Bu kristallerin boyutu, kurutma süresi ve rehidrasyon kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir. İkinci aşama olan primer kurutma evresinde, vakum altında buza dönüşen suyun yaklaşık %90'ı süblimasyonla uzaklaştırılır. Bu aşamada sıcaklık yavaşça artırılarak, ürünün yapısal bütünlüğünü koruyacak şekilde kontrollü enerji transferi sağlanır. Üçüncü ve son aşama olan sekonder kurutma (desorpsiyon) safhasında, ürün matrisinde bağlı halde kalan nemin uzaklaştırılması sağlanır. Bu aşama, genellikle daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmekte ve nihai ürün nem içeriği %1-3 seviyelerine düşürülmektedir (Indiarto vd., 2021).

Dondurarak kurutma, geleneksel kurutma yöntemlerine kıyasla pek çok üstünlük sunmaktadır. Özellikle ürünün besin değeri, renk, aroma ve yapısal bütünlüğü büyük ölçüde korunur. Ayrıca uçucu bileşiklerin, antioksidanların, vitaminlerin ve enzimlerin stabilitesi FD işlemiyle büyük oranda muhafaza edilebilmektedir. Bu nedenle, yüksek katma değerli gıda ürünleri (örneğin fonksiyonel meyve tozları, probiyotik içeren ürünler, bebek mamaları), biyofarmasötik ürünler (aşılar, protein bazlı ilaçlar), mikrobiyolojik kültürler ve biyokimyasal reaktifler için bu yöntem tercih edilmektedir (Calín-Sánchez vd., 2020; Indiarto vd., 2021).

Bununla birlikte, dondurarak kurutma yönteminin bazı önemli sınırlılıkları da bulunmaktadır. Öncelikle, ekipman maliyetleri ve enerji tüketimi oldukça yüksektir. Kurutma sürecinin uzunluğu birkaç saatten birkaç güne kadar sürebilir ve prosese özgü teknik gereksinimler, özellikle büyük ölçekli üretimlerde ekonomik verimliliği düşürebilmektedir. Ayrıca, vakum uygulaması sırasında bazı uçucu veya oksijen duyarlı bileşenlerin uzaklaştırılması ya da bozunması da söz konusu olabilir. Ayrıca rehidrasyon sırasında, özellikle lifli ve nişasta içerikli ürünlerde elastikiyetin tam olarak geri kazanılamaması kalite açısından dezavantaj oluşturabilir (Calín-Sánchez vd., 2020).

Sonuç olarak, dondurarak kurutma; ürün kalitesinin maksimum düzeyde korunması gereken uygulamalarda vazgeçilmez bir teknoloji olarak ön plana çıkmakta, ancak ekonomik ve teknik kısıtlar nedeniyle gıda endüstrisinde genellikle seçilmiş ve yüksek katma değerli ürünlerle sınırlı bir kullanım alanı bulmaktadır. Gelecekte proses süresinin kısaltılması ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik teknolojik gelişmelerin, bu yöntemin daha yaygın kullanımına olanak sağlayacağı öngörülmektedir.

2.3.1.2.2. Vakum kurutma (Vacuum Drying, VD)

Vakum kurutma, düşük basınç koşulları altında suyun kaynama noktasını düşürerek daha düşük sıcaklıklarda kurutma imkânı sunan, ısıya duyarlı bileşenlerin korunmasını sağlayan ileri bir kurutma yöntemidir (Carrin ve Crapiste, 2009). Bu teknik, oksijenin ortamdan uzaklaştırılmasıyla yağ oksidasyonu, renk değişimi ve uçucu bileşik kaybı gibi olumsuz reaksiyonları minimize ederken, ürünlerin besin değerlerini, duyuşal özelliklerini ve fiziksel bütünlüğünü korumasına olanak tanımaktadır (Hasan vd., 2019; Süfer vd., 2024).

Vakum kurutma sistemlerinde, ısı transferi büyük ölçüde radyasyon ve iletim yoluyla gerçekleşmekte olup, düşük sıcaklıkta çalışılması enzimatik esmerleşmeyi azaltarak renk stabilitesini artırmaktadır. Ancak, uzun süren kurutma süreleri (12-48 saat), yüksek enerji tüketimi ve operasyonel maliyetlerin artması gibi dezavantajlar, vakum kurutmanın endüstriyel ölçekte kullanımını sınırlamaktadır. Özellikle askorbik asidin korunması gereken turunçgil ürünleri, meyve gevrekleri ve uçucu bileşik kaybının en aza indirilmesi gereken gıdalar için etkili bir yöntem olarak uygulanmaktadır. Ürünler 35-60°C arasında düşük sıcaklıklarda vakum altında kurutulur (Tan, 2020; Mujumdar, 2006; Süfer vd., 2024). Ayrıca, esansların ve aroma bileşenlerinin çıkarılması ve konsantre edilmesi amacıyla da tercih edilmektedir (Mujumdar, 2006).

Vakum kurutmanın süresini kısaltmak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla, ultrason (US) ve darbeli elektrik alanı (PEF) gibi yenilikçi teknolojiler ile birleştirilmesi önerilmekte olup, bu hibrit sistemlerin gıda endüstrisinde daha verimli ve sürdürülebilir kurutma süreçleri sağlayabileceği öngörülmektedir (Süfer vd., 2024).

2.3.1.2.3. Elektromanyetik radyasyon teknikleri ile kurutma

Birçok geleneksel kurutma yöntemi, elektrikli ısıtıcılar veya yanma sonucu oluşan baca gazı ile elde edilen sıcak havayı kullanarak, ısı transferini konveksiyon prensibiyle gerçekleştirir. Ancak, enerji kaynağı olarak elektromanyetik dalga spektrumunu kullanan alternatif kurutma teknolojileri de bulunmaktadır. Bu yöntemlerde, belirli dalga boyundaki elektromanyetik radyasyon doğrudan ürüne nüfuz ederek ısı enerjisi oluşturur ve böylece kurutma sürecini hızlandırır (Calín-Sánchez vd., 2020).

Elektromanyetik radyasyon teknikleri, dolaylı elektro ısıtma olarak bilinen elektrik enerjisinin doğrudan ısıya çevrilmeden önce elektromanyetik radyasyona dönüştürülmesi ve bu radyasyonun ürüne ulaştığında ısı enerjisine dönüşmesi prensibine dayanır; yani, elektrik enerjisi önce elektromanyetik dalgalar (mikrodalga, kızılötesi veya radyo frekansı gibi) üreten bir kaynağa iletilir radyasyona dönüştürülerek daha sonra gıdada moleküler düzeyde hareketlenme veya titreşim oluşturarak ısı enerjisine çevrilir ve böylece kurutma süreci başlar. Bu mekanizmayı temel alan çeşitli kurutma teknikleri vardır (Schiffmann, 2006).

2.3.1.2.3.1 Mikrodalga kurutma (Microwave Drying, MWD)

Mikrodalga kurutma, elektromanyetik dalgaların gıda ürünü içine nüfuz etmesiyle su moleküllerinin dipol hareketini artırarak iç ısı üretmesi prensibine dayanır. Bu durum, suyun içten dışa doğru hızlı bir şekilde buharlaşmasını sağlar, böylece ürün dokusundaki bozulmayı en aza indirir ve besin değerlerini korur (Chizoba Ekezie vd., 2017; Hasan vd., 2019).

Mikrodalga kurutucular, elektrik enerjisini yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalara (genellikle 915 MHz veya 2450 MHz) dönüştüren magnetron, dalga dağılımını sağlayan dalga kılavuzu, ürünün mikrodalga enerjisine maruz kaldığı kurutma odası, magnetron ve diğer bileşenlerin aşırı ısınmasını önlemek için soğutma sistemi ve havalandırma sisteminden oluşan bir kurutma teknolojisidir (Günaydın vd., 2022) Mikrodalga enerjisi kullanımı, geleneksel kurutma yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha düşük sıcaklıklarda daha hızlı nem giderimi sağlar. Ayrıca, kurutma süresinin kısalması, düşük enerji tüketimi ve ürünlerde yapısal bütünlüğün, aroma, renk ve besin öğelerinin daha iyi korunması gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, yüksek yatırım maliyeti, kurutma sırasında düzensiz ısı dağılımı, bazı şekerli ürünlerde yanma ve deformasyon gibi olumsuz etkileri de bulunmaktadır (Günaydın vd., 2022; Carrin ve Crapiste, 2009).

2.3.1.2.3.2. Radyo frekans kurutma (Radio Frequency Drying, RFD)

Radyo frekanslı (RF) kurutma, elektromanyetik enerji kullanarak gıdanın hacimsel olarak ısıtılmasını sağlayan yenilikçi bir kurutma teknolojisidir. Geleneksel kurutma yöntemleri, ısıyı yüzeyden iç kısımlara ileterek çalışırken, RF kurutma iki elektrot arasına yerleştirilen ürünün içerisindeki polar moleküllerin elektrik alanı altında sürekli yeniden hizalanmasını sağlayarak

iç sürtünme ile hızlı ve homojen bir ısı üreterek kurutma süreci oluşturur (Calín-Sánchez vd., 2020; Kilic vd., 2024). Çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, özellikle ısıya duyarlı ürünlerin besin değerini ve duyuşal özelliklerini korumasına olanak tanımaktadır. RF kurutma sistemleri, 1–300 MHz frekans aralığında çalışarak geniş bir penetrasyon derinliğı sunar ve nem içeriğı yüksek ürünlerin kurutulmasında avantaj sağlar. Meyve ve sebzelerin kurutulmasında RF destekli sıcak hava kurutma uygulamaları ve aromatik bitkilerin uçucu bileşiklerini korumada etkili olduğı kanıtlanmıştır (Calín-Sánchez vd., 2020).

RF kurutmanın başlıca avantajları arasında hızlı kurutma süresi, düşük enerji tüketimi, homojen nem dağılımı ve daha yüksek nihai ürün kalitesi yer almaktadır. Konvansiyonel kurutma yöntemlerine kıyasla kurutma süresini %50'ye kadar azaltabilmekte, gıdalarda besin bileşenlerini ve duyuşal özellikleri daha iyi koruyarak ticari değerini artırmaktadır (Carrin ve Crapiste, 2009). Bununla birlikte, yüksek ilk yatırım maliyetleri ve süreç kontrolünün (Frekans, voltaj ve ürün konumlandırması gibi değışkenler hassas bir şekilde kontrol edilmelidir) hassasiyet gerektirmesi gibi teknik zorluklar, RF kurutmanın yaygın kullanımını sınırlamaktadır. Günümüzde, RF teknolojisinin vakum kurutma ve sıcak hava kurutma gibi yöntemlerle entegre edilerek hibrit kurutma sistemleri geliştirilmesi üzerine araştırmalar devam etmektedir. Bu gelişmeler, RF kurutmanın daha düşük maliyetli hale getirilerek sanayi ölçeğinde yaygınlaştırılmasını ve enerji verimliliğinin artırılmasını sağlayabilir (Kilic vd., 2024).

2.3.1.2.3.3. Kızılötesi kurutma (Infrared Drying, IRD)

Kızılötesi (IR) kurutma, elektromanyetik radyasyonun doğrudan gıdaya nüfuz ederek ısıya dönüştürülmesi prensibine dayanan ileri bir kurutma yöntemidir. Bu teknoloji, 0.75 ila 1000 µm dalga boyu aralığında çalışarak, homojen ısıtma sağlar ve nemin iç kısımdan yüzeye taşınmasını hızlandırarak yüzeyde buharlaşmayı sağlar. Bu süreç, kurutma süresini önemli ölçüde azaltır ve çevredeki havanın aşırı ısınmasını önler. IR kurutma, dalga boylarına göre sınıflandırılabilir. Yakın Kızılötesi (NIR; 0.78–1.4 µm); yüksek nüfuz etme derinliğine sahip olup, hızlı yüzey ısıtması sağlar. Orta Kızılötesi (MIR; 1.4–3 µm); dengeli nüfuz etme kapasitesine ve ısıtma verimliliğine sahiptir. Uzak Kızılötesi (FIR; 3–1000 µm); daha düşük nüfuz etme kapasitesine sahip olup, yüzey kurutma için uygundur (Nowacka vd., 2024). Kısa dalga boylu IR radyasyonu nemi geçebilirken, uzun dalga boylu IR radyasyonu yüzeyler

tarafından emildiği için, ince tabakalı gıda ürünlerinde uzak-IR teknolojisi daha yüksek ısıtma verimliliği sağlamaktadır (Kilic vd., 2024).

IR kurutma, özellikle meyve, sebze, et ve tahılların işlenmesinde yaygın olarak kullanılmakta olup, geleneksel konvektif kurutma yöntemlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği ve üstün ürün kalitesi sunmaktadır. Araştırmalar, IR kurutmanın gıdaların doğal rengini, duyuşal özelliklerini ve biyoaktif bileşenlerini koruyarak, besin kaybını en aza indirdiğini göstermektedir (Ratti ve Mujumdar, 2006). Ayrıca, bu yöntemin sıcak hava (HAD) ve mikrodalga (MWD) kurutma teknikleri ile birleştirilmesi, enerji tüketimini optimize ederek süreç verimliliğini artırmaktadır (Ratti ve Mujumdar, 2006; Sagar & Suresh Kumar, 2010).

Bununla birlikte, IR kurutmanın bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Yüzeyde yoğun ısı transferine bağılı olarak, özellikle kalın ve yoğun ürünlerde homojen kurutma sağlanması zor olabilir ve aşırı ısınma nedeniyle renk değişimi veya yapısal bozulmalar meydana gelebilir. Ayrıca, IR kurutma sistemlerinin büyük ölçekli üretime entegrasyonu, yüksek maliyet ve hassas sıcaklık kontrolü gerektirdiğinden endüstriyel ölçekte optimizasyon ihtiyacı doğurmaktadır. IR kurutmanın avantajlarından tam anlamıyla yararlanabilmek için, bu teknolojinin sıcak hava veya mikrodalga gibi diğer kurutma yöntemleriyle entegre edilmesi önerilmektedir. (Ratti ve Mujumdar, 2010; Nowacka vd., 2024; Süfer vd., 2024).

2.3.1.2.3.4. Kırınım pencereleli kurutma (Refractance Window Drying, RWD™)

Kırınım Pencereleli Kurutma (Refractance Window Drying, RWD™), ısıya duyarlı sıvı veya yarı akışkan gıdaların besin değerlerini koruyarak verimli şekilde kurutulmasını sağlayan yenilikçi bir teknolojidir. Bu yöntem, konveksiyon, iletim ve radyasyon olmak üzere üç farklı ısı transfer mekanizmasını kullanarak, kızılötesi geçirgen plastik membran aracılığıyla su yüzeyinden ürüne doğrudan ısı transferi gerçekleştirir (Vega-Mercado vd., 2001; Calín-Sánchez vd., 2020). RWD, geleneksel kurutma yöntemlerine kıyasla daha kısa sürede (genellikle 3-5 dakika) ve düşük sıcaklıklarda (~30-70°C) gerçekleştiği için vitaminler, antioksidanlar ve renk pigmentleri gibi duyarlı bileşenlerin korunmasına olanak tanır (Indiarto vd., 2021). Bu özellikleri nedeniyle, RWD özellikle meyve ve sebze püreleri, otlar, süt ürünleri, et ve balık gibi farklı gıda kategorilerinde etkili bir kurutma yöntemi olarak kullanılmaktadır (Tan, 2020; Vega-Mercado vd., 2001).

Yapılan araştırmalar, RWD'nin ürün renk stabilitesi ve kalite koruma açısından sıcak hava kurutma (HAD) ve dondurarak kurutma (FD) ile karşılaştırıldığında önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir (Pehlivanoglu ve Aksoy, 2021). Ancak, yüksek şeker içeriğine sahip gıdalarda yapışma eğilimi göstermesi ve püskürtmeli veya valsli kurutuculara kıyasla daha yüksek yatırım maliyetleri gerektirmesi gibi bazı sınırlamaları bulunmaktadır (Tan, 2020).

2.3.1.2.4. Hibrit ve Kombine Yenilikçi Kurutma Yöntemleri

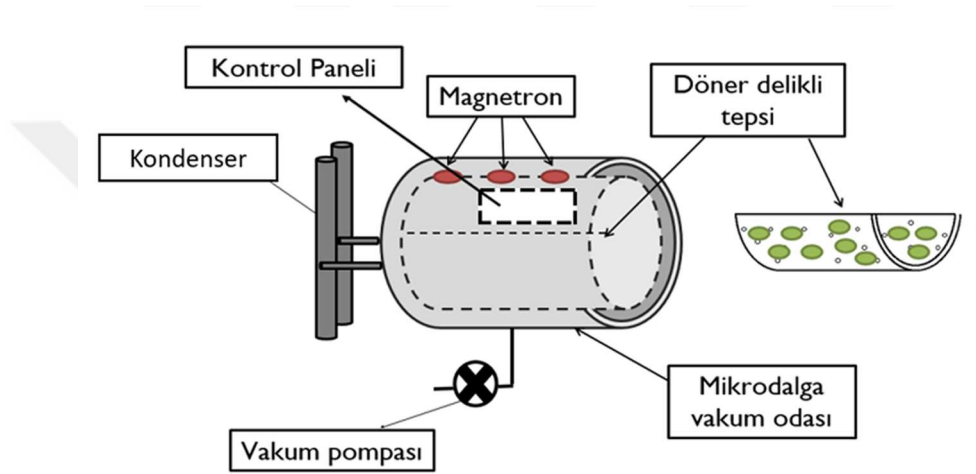
Hibrit kurutma sistemleri, iki veya daha fazla farklı kurutma tekniğini (geleneksel ve yenilikçi kurutma tekniklerini) birleştirerek süreç verimliliğini artıran, enerji tüketimini azaltan ve tek bir yöntemin neden olduğu olumsuzlukları minimize eden yeni nesil kurutma teknolojileridir (Calín-Sánchez vd., 2020; Süfer vd., 2024). Bu sistemler, ısı ve kütle transferi süreçlerini optimize ederek, gıdaların besin değeri, renk, doku ve aroma gibi kritik kalite unsurlarını daha iyi korumasına olanak tanır (Süfer vd., 2024). Hibrit sistemler, sebzeler, meyveler ve su ürünleri gibi çeşitli gıdaların kurutulmasında daha yüksek verimlilik ve maliyet etkinliği sunmaktadır. Bu yöntemler, kurutma sürecinde ürün bozulmasını en aza indirirken, nihai nem içeriğine daha hızlı ulaşmayı sağlamaktadır. Özellikle rehidrasyon kapasitesini artırması, homojen kurutma sağlaması ve duysal özellikleri iyileştirmesi nedeniyle hibrit kurutma sistemleri gıda endüstrisinde önemli bir yenilik olarak değerlendirilmektedir (Hasan vd., 2019; Süfer vd., 2024).

Hibrit sistemlerin bağımsız ön işlemler olarak ya da kurutma sürecinin entegre bir parçası olarak uygulanabilmesi, bu teknolojileri gıda endüstrisi açısından daha cazip hale getirmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte, kombine kurutma sistemleri gıda kalitesini artıran ve enerji verimliliğini optimize eden sürdürülebilir çözümler sunmaktadır (Pehlivanoglu ve Aksoy, 2023; Süfer vd., 2024). Birçok farklı kombine kurutma yöntemi bulunmaktadır. Ancak, bazıları, gıda endüstrisindeki uygulanabilirliği nedeniyle özel bir dikkati hak etmektedir (Calín-Sánchez vd., 2020).

Aşağıdaki bölümde doktora çalışması konusu olan vakum mikrodalga kurutma yöntemine yer verilmiştir. Ayrıca vakum mikrodalga kurutma sistemi ile yapılan çalışmalardan da bahsedilmiştir.

2.3.1.2.4.1. Vakum-Mikrodalga Kurutma (Vacuum Microwave Drying, VMD)

Vakum-mikrodalga kurutma (VMD), mikrodalga enerjisi ve vakum basıncını birleştirerek gıdalardaki suyun düşük sıcaklıklarda hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayan gelişmiş hibrit bir kurutma yöntemidir (Şekil 2.7.). Mikrodalgalar, su moleküllerinin dipolar hareketini hızlandırarak dielektrik ısıtma yoluyla ısı üretirken, vakum ortamı suyun kaynama noktasını düşürerek daha düşük sıcaklıklarda buharlaşmasını kolaylaştırır. (González-Cavieres vd., 2021; Scaman vd., 2014).



Şekil 2.7. Vakum mikrodalga kurutma sistemi şematik gösterimi (Adali, 2022).

Mikrodalga enerjisi, genellikle 2.45 GHz veya 915 MHz frekans aralığında çalışan magnetronlar tarafından üretilir. Mikrodalga ısıtma, gıdanın mikrodalga enerjisini soğurma ve bu enerjiyi ısıya dönüştürme kapasitesine dayanan bir süreçtir (Chandrasekaran vd., 2013). Temel olarak ısıtma, dipol rotasyonu ve iyonik iletim olmak üzere iki ana mekanizma tarafından yönlendirilir (Clary vd., 2007). Elektromanyetik dalgalar, gıda matrisinde bulunan su, yağ ve şeker molekülleri tarafından emilir. Su molekülleri dipol özellik gösterdiğinden, mikrodalga (elektromanyetik dalgalar) etkisiyle oluşan sürekli değişen elektrik alanında sürekli yer değiştirirler. Bu yer değiştirme sebebiyle oluşan moleküler sürtünme, gıda içinde dielektrik ısıtma olarak adlandırılan bir ısı üretim mekanizmasını başlatır. Buna hacimsel ısınma da denir (González-Cavieres vd., 2021). Buna ek olarak ısınma, gıdanın içindeki iyonların salınım hareketiyle de meydana gelebilir. Yüksek frekansta değişen bir elektrik alan altında, iyonlar hızlanarak yer değiştirir ve bu hareketlilik, sürtünme yoluyla ısı oluşumuna katkı sağlar (Chandrasekaran vd., 2013).

Sistemde vakum pompası yardımıyla oluşturulan vakum, gıdanın içindeki suyun düşük sıcaklıklarda kaynamasını sağlar. Vakum-mikrodalga kurutma sürecinde kütle ve ısı transferi eşzamanlı olarak gerçekleşir (González-Cavieres vd., 2021). Gıdanın iç kısmında oluşan su buharı, vakumun sağladığı basınç farkı nedeniyle hızla yüzeye taşınır ve düşük sıcaklıkta kısa sürede etkin bir şekilde uzaklaştırılırken, mikrodalga enerjisi doğrudan gıda iç kısmına nüfuz ederek ısı transferini hızlandırır (Scaman vd., 2014). Suyun sürekli yüzeye taşınma ve ortamdan uzaklaştırılması sayesinde oluşan hızlı kurutma işlemi gıda yüzeyinde kabuklaşma (case-hardening) gibi istenmeyen etkilerin önüne geçer (González-Cavieres vd., 2021). Ayrıca, vakum ortamında oksijenin bulunmaması, ısıya duyarlı bileşenlerin korunmasını sağlarken, oksidasyonu önleyerek renk, tat ve besin değerlerinin muhafaza edilmesine katkıda bulunur (Wardhani vd., 2022).

VMD'nin sağladığı düşük sıcaklıkta hızlı kurutma süreci, yüksek enerji verimliliği ile birlikte gıda endüstrisinde büyük bir potansiyel sunmaktadır (Scaman vd., 2014). Son yıllarda VMD yöntemine olan akademik ve endüstriyel ilgi artış göstermektedir. Elma, frenk üzümü, yaban mersini, nar, sarımsak, çilek, kızcılık ve domates gibi birçok meyve ve bitkisel materyal üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar, VMD'nin kurutma süresini önemli ölçüde kısalttığını ve ürünlerin duysal ve besinsel özelliklerini koruduğunu göstermektedir (Calín-Sánchez vd., 2020; Wardhani vd., 2022). Bununla birlikte, bu sistem henüz gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmamaktadır, ancak mevcut araştırmalar ışığında, ileriye dönük olarak süreç optimizasyonu ve ölçek büyütme çalışmalarının tamamlanmasıyla VMD'nin endüstriyel ölçekte daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir (Orsat vd., 2017). Bu nedenle, araştırmacılar tarafından VMD ekipmanlarının tasarımını optimize etmek ve sistem verimliliğini artırmak amacıyla çeşitli deneysel düzenekler ve patentli sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler, ev tipi mikrodalgaların modifiye edilerek laboratuvar ölçekli deneylerde kullanılmasından, gıdanın homojen hareketini sağlayan ve sürekli üretim hatlarına entegre edilebilen endüstriyel ölçekli sistemlerin tasarımına kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Geliştirilen farklı VMD sistemleri, tasarımsal özelliklerine göre kategorize edilmiştir. Bu sistemler arasında statik kurutma sistemleri, döner mekanizmalı sistemler (çoklu magnetron ve dalga jeneratörü) içeren sistemler ve farklı vakum odası tasarımlarına sahip sistemler) bulunmaktadır. Her bir sistem, işlem sırasında ısı ve kütle transferini optimize ederek gıda kurutma verimliliğini artırmayı hedeflemektedir (González-Cavieres vd., 2021).

2.3.1.2.4.1.1. Vakum-Mikrodalga Kurutma Ekipmanlarının Sınıflandırılması

Mikrodalga vakum kurutma sistemleri, temel olarak statik sistemler ve döner sistemler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Wardhani vd., 2022). Ancak tasarım ve işleyiş özelliklerine göre kendi içinde de gruplandırılmaktadır (González-Cavieres vd., 2021).

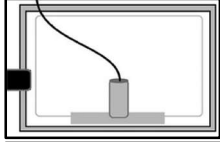
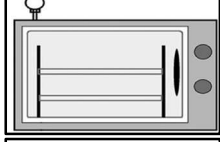
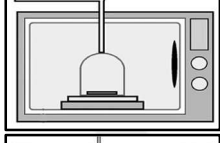
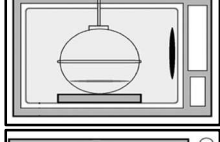
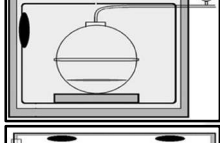
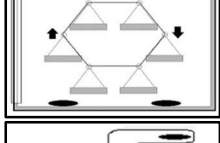
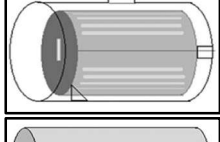
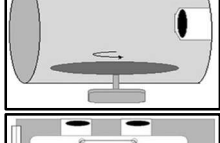
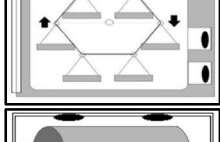
2.3.1.2.4.1.1.1. Statik VMD Sistemleri:

Statik sistemler, genel olarak ev tipi mikrodalga fırınlara benzer bir çalışma prensibine sahip olmakla birlikte, ek olarak cam, polipropilen, teflon, polikarbonat veya çelik gibi farklı malzemelerden yapılmış vakum odası içermektedir. Bu sistemlerde en önemli parametrelerden biri ürün kalınlığıdır. Gıda birden fazla bileşenden oluşan katmanlar içerdiğinde, mikrodalga ışınlarının bu katmanlardan geçişi uzun zaman alabilir ve bu durum düzensiz sıcaklık dağılımına neden olabilir (Wardhani vd., 2022). Statik sistemlerde karşılaşılan diğer zorluklar ise zayıf rehidrasyon kapasitesi (yeniden su kazanımı), gıda bileşenlerinde bozulma, renk değişiklikleri, kırılgan ve gevrek yapı oluşumudur. Bu sistemler düşük maliyetli olup temel laboratuvar araştırmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Statik sistemlerde gözlenen bu ısı iletimi problemleri, döner sistem içeren mikrodalga vakum kurutma sistemlerinin geliştirilmesini teşvik etmiştir (González-Cavieres vd., 2021).

2.3.1.2.4.1.1.2. Döner VMD Sistemleri:

Döner VMD sistemlerinde ürün, döner bir sistem içinde hareket eder ve mikrodalga radyasyonu gıda matrisine daha homojen yayılır (Therdthai & Zhou, 2009). Döner sistemler (Şekil 2.8.), yüksek yoğunluklu polietilen tambur veya silindirik sepetler içerebilir ve mikrodalga içinde dönerek sıcaklık dağılımını iyileştirmeyi amaçlar. Bu sistemde, dönüş hareketi, sıcaklık dağılımını dengeli hale getirmek ve elektrik arklarının oluşmasını önlemek amacıyla optimize edilmiştir. Döner sistemli kurutma işlemlerinde en kritik parametrelerden biri dönme hızı ve mikrodalga gücü arasındaki ilişkidir (Wardhani vd., 2022). Bazı modeller, birden fazla magnetron içererek elektromanyetik alanların daha eşit yayılmasını sağlamaya çalışsa da, bu tasarımlar yerel aşırı ısınma ve sıcaklık düzensizliklerine yol açabilir. Daha yeni tasarımlar, daha yüksek güç seviyelerinde (1000 W üzeri) çalışabilen ve vakum basıncını 75–95 kPa arasında tutarak sıcaklık kontrolünü optimize etmeye çalışan sistemleri içermektedir. Ancak,

bu sistemlerde aşırı ısınma ve ürün kalitesinde bozulma gibi riskler hala önemli dezavantajlar olarak öne çıkmaktadır (González-Cavieres vd., 2021).

	Ürün: Kızılıcık Güç: 1250–1550 W Vakum: 3.4–6.6 kPa	Sunjka vd. (2004)
	Ürün: Çilek Güç: 156–276 W Vakum: 6.2 kPa	B'orquez vd. (2014)
	Ürün: Nar taneleri Güç: 25–95 W Vakum: 3.3–25.99 kPa	Dak vd. (2014)
	Ürün: Mantar Güç: 115–285 W Vakum: 6.5–23.5 kPa	Giri and Prasad (2007)
	Ürün: Armut Güç: 100–200 W Vakum: 26.7–53.3 kPa	Taskin vd. (2019)
	Ürün: Kivi meyvesi Güç: 4200 W Vakum: 75–95 kPa	Tian vd. (2015).
	Ürün: Havuç Güç: 1500–1800 W Vakum: 8–15 kPa	Yaghmaee and Durance (2007).
	Ürün: Üzüm Güç: 500–1500 W Vakum: 2.7 kPa	Clary, Wang ve Petrucci (2005).
	Ürün: Bamya Güç: 500–900 W Vakum: 45–75 kPa	Xu vd. (2019).
	Ürün: Pancar Güç: 120–480 W Vakum: 4–6 kPa	Lech vd. (2015).

Şekil 2.8. Statik ve döner mekanizmalı vakum mikrodalga kurutma sistemlerine örnekler (González-Cavieres vd., 2021). (siyah noktalar, magnetronların yerlerini göstermektedir).

2.3.1.2.4.1.1.3. Tescilli VMD Ekipmanları

Tescilli VMD ekipmanları özel tasarımlarla geliştirilmiş ve patentlenmiş sistemleri içerir. Endüstriyel ölçekte vakum mikrodalga kurutma (VMD) sistemleri, 2000 yılından itibaren hızla gelişmiş ve patent başvurularında ve gıda endüstrisindeki kullanımında önemli bir artış gözlemlenmiştir. 2000-2020 yılları arasında bilimsel yayınlar artmış, araştırmalar ise sürekli çalışan sistemler geliştirerek sürecin verimliliğini artırmaya odaklanmıştır. Son on yılda, kesikli (batch) sistemler ve sürekli akış sistemleri patentlenmiş olup, patentler modüler yükleme mekanizmasına sahip sürekli vakumlu kurutma sistemleri, konveyör bant destekli sürekli vakumlu kurutma sistemleri ve konteyner bazlı vakum mikrodalga kurutma sistemleri olarak sınıflandırılmıştır (González-Cavieres vd., 2021). EnWave Corporation, Ferrite Microwave Technologies, Industrial Microwave Systems gibi firmalar tarafından geliştirilmiş çeşitli patentli VMD cihazları bulunmaktadır (Orsat vd., 2017).

2.3.1.2.4.2. Vakum Mikrodalga ile Yapılan Çalışmalar

Vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) yöntemi, son yıllarda meyve ve sebze kurutma süreçlerinde öne çıkan, düşük sıcaklıkta ve kısa sürede ürün kurutulmasını sağlayarak besin öğelerinin korunmasına imkân tanıyan yenilikçi bir tekniktir. Bu yöntemin farklı bitkisel kaynaklara uygulanmasına yönelik kapsamlı çalışmalar mevcuttur.

Li vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, *Exocarpium Citri Grandis* (Citric Grandis meyvesinin dış kabuğu) dilimlerinin farklı kurutma yöntemleri ile işlenmesine yönelik kurutma kinetiği, kalite parametreleri ve mikroskobik yapıları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu amaçla; sıcak hava kurutma (Hot Air Drying – HAD), vakum kurutma (Vacuum Drying – VD) ve mikrodalga destekli vakum kurutma (Microwave Vacuum Drying – MVD) teknikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kurutma işlemleri sabit sıcaklık ve mikrodalga gücü koşullarında gerçekleştirilmiş olup; sıcak hava kurutmada 70 °C’de 120 dakika, vakum kurutmada 360 dakika ve mikrodalga vakum kurutmada ise 2000 W gücünde yalnızca 20 dakikada işlem tamamlanmıştır.

Kurutma sürecinin matematiksel modellenmesinde, HAD yöntemi için Page modeli, VD için Logaritmik model ve MVD için yine Page modelinin en uygun olduğu belirlenmiştir. Kurutma performansının temel göstergelerinden biri olan etkili nem difüzyon katsayısı açısından en

yüksek değer mikrodalga vakum kurutma yönteminde elde edilmiştir. Bu yöntemle kurutulan örneklerde, flavonoid türlerinden biri olan naringin içeriği; HAD'ye kıyasla %23.05, VD'ye kıyasla ise %45.71 oranında daha yüksek bulunmuştur. Mikroyapı analizleri sonucunda; MVD yöntemiyle elde edilen ürünlerin daha geniş gözenekli ve petek benzeri bir yapı sergilediği, HAD yöntemiyle daha küçük gözenekli yapılar olduğu, VD yöntemiyle ise hücresel çökme sonucu katmanlı bir morfolojinin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, mikrodalga vakum kurutma tekniği yalnızca kurutma süresini önemli ölçüde kısaltmakla kalmayıp, aynı zamanda biyoaktif bileşenlerin korunmasında ve ürün kalitesinin muhafazasında da üstün performans sergilemiştir. Bu yönleriyle, MVD yöntemi, yüksek enerji verimliliği ve ürün fonksiyonelliğinin korunması açısından geleneksel kurutma yöntemlerine kıyasla daha avantajlı olup, *Exocarpium Citri Grandis* gibi fonksiyonel özellikleri yüksek bitkisel hammaddelerin endüstriyel ölçekte işlenmesine yönelik uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Lei ve arkadaşları (2022), çekirdeksiz beyaz üzümlerin (*Vitis vinifera* L.) vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle kurutulmasına yönelik gerçekleştirdikleri çalışmada, ürünün nem içeriği, etkili nem difüzyon katsayısı ve kurutma kinetiği gibi temel parametreleri incelemişlerdir. Deneysel tasarım kapsamında mikrodalga gücü, vakum derecesi ve yük ağırlığı gibi işlem değişkenlerinin kurutma sürecine etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bulgular, mikrodalga gücündeki artışın ve yük ağırlığındaki azalmanın hem kurutma hızını hem de etkili nem yayılma katsayısını anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koyarken, vakum derecesinin etkisinin nispeten daha sınırlı kaldığını göstermiştir. Araştırmacılar, mikrodalga gücü ve yük miktarının optimize edilmesinin, ürünün kurutma süresinin azaltılmasına katkı sağlarken, aynı zamanda kalite özelliklerinin korunmasında da etkili bir strateji olabileceğini belirtmişlerdir.

Benzer şekilde, Bozkır ve arkadaşları (2020) tarafından yürütülen çalışmada, portakal kabuklarının farklı kurutma yöntemleriyle (tepsili kurutma - TD, vakumlu kızılötesi kurutma - VID ve vakumlu mikrodalga kurutma - VMD) işlenmesi sonucunda kurutma süresi, besin öğeleri içeriği ve uçucu bileşik profili üzerindeki etkiler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, 50 °C'de gerçekleştirilen deneyler kapsamında vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin kurutma süresini ciddi biçimde azalttığını göstermiştir. Kurutma süreleri sırasıyla TD'de 300 dakika, VID'de 106 dakika ve VMD'de

yalnızca 20,67 dakika olarak belirlenmiştir. Ayrıca, VMD yöntemi, portakal kabuklarındaki C vitamini, toplam fenolik maddeler ve toplam karotenoidler gibi biyoaktif bileşenlerin korunmasında en başarılı yöntem olarak öne çıkmıştır. Renk analizleri sonucunda, VMD tekniği renk stabilitesini en iyi şekilde korurken, TD yöntemi bu açıdan en düşük performansı göstermiştir. Uçucu bileşik kayıpları açısından ise VID yöntemi en az kayba neden olurken, TD yönteminde en yüksek uçucu bileşik kaybı gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, vakumlu mikrodalga kurutma teknolojisinin sadece kurutma süresini minimize etmekle kalmayıp, aynı zamanda ürünün besin değerlerini ve fiziksel niteliklerini muhafaza etme potansiyeli açısından da endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği yüksek bir alternatif olduğu ifade edilmiştir.

Zhou ve arkadaşları (2021), çalışmalarında mikrodalga vakum destekli kurutma yönteminin, farklı ön işlemlerle işlenmiş bütün kıvılcık meyvelerinin kurutma süreci ve nihai ürün kalitesi üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde incelemişlerdir. Araştırmada, sonikasyon, konvektif dondurma ile kombine sonikasyon, mikrodalga-vakum ön işlemi, konvektif dondurma ile kombine mikrodalga-vakum ön işlemi, konvektif dondurma ve kriyojenik dondurma gibi çeşitli ön işlem stratejileri uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, mikrodalga vakum destekli kurutma yönteminin, geleneksel sıcak hava konvektif kurutmaya kıyasla kurutma süresini yaklaşık %54 oranında azalttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bu yöntemin polifenol (22.14–27.51 mg GAE/g), flavonoid (2.65–3.79 mg CAE/g), antosiyanin (0.75–2.22 mg Cy-3G/g) ve antioksidan aktivite (33.03–47.67 mg TE/g kurumadde) düzeylerinde anlamlı artış sağladığı belirlenmiştir. Görsel kalite açısından da, mikrodalga vakum destekli kurutma yöntemiyle işlenen örneklerin daha iyi bir dış görünüme sahip olduğu verilmiştir. Bu sonuçlar, söz konusu yöntemin hem ürün kalitesini koruma hem de işlem süresini minimize etme açısından etkili bir kurutma tekniği olduğunu göstermektedir.

Benzer şekilde, Zhao ve arkadaşları (2021), lotus tohumlarına uygulanan ultrasonik ön işlemin mikrodalga vakum kurutma (MVD) sürecine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, lotus tohumları 6.08, 8.39 ve 10.84 W/cm² yoğunluklarında 10 dakika süreyle ultrasonik işleme tabi tutulmuştur. En yüksek yoğunlukta (10.84 W/cm²) elde edilen sonuçlar, L* ve b* renk değerlerinde artış, a* değerinde ise azalma meydana geldiğini, ayrıca antioksidan aktivitenin hidroksil ve süperoksit anyon radikal süpürücü etkilerdeki artışla birlikte yükseldiğini göstermiştir. Kimyasal analizler, galik asit (%17.57), klorojenik asit (%106.73), kafeik asit

(%47.80) ve rutin (%105.07) miktarlarında artış olduğunu; ancak p-hidroksibenzoik asit miktarının %15.47 azaldığını ortaya koymuştur. Taramalı elektron mikroskobu (FESEM) görüntülemeleri, ultrasonik ön işlem uygulanan tohumların yüzeylerinde daha belirgin mikro yapısal değişimlerin (girinti ve olukların) meydana geldiğini ve bu yapısal farklılıkların rehidrasyon kapasitesini artırdığını göstermiştir. Bu bağlamda, ultrasonik ön işlemin, MVD ile birlikte kullanıldığında, ürün kalitesini artırıcı etkiler sağladığı ve rehidrasyon gibi fonksiyonel özellikleri iyileştirdiği belirtilmiştir.

Dash ve arkadaşları (2021) tarafından yürütülen çalışmada, sohiong meyvesinin (*Prunus nepalensis*) vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) sürecine ait mikrodalga gücü, vakum seviyesi ve sitrik asit konsantrasyonu gibi işlem parametrelerinin, ürünün fitokimyasal özellikleri ve renk değişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel tasarım, yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak optimize edilmiş ve en uygun işlem koşulları %0.55 sitrik asit konsantrasyonu, 400 W mikrodalga gücü ve 690 mmHg vakum basıncı olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda elde edilen kurutulmuş ürünlerin toplam fenolik içeriği 44.948 mg GAE/g, antosiyanin içeriği 3.739 mg/g kurumadde ve antioksidan aktivitesi %89.761 olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler, vakumlu mikrodalga kurutmanın, yüksek biyofonksiyonel özelliklere sahip ürünler elde etmek için uygun bir teknoloji olduğunu ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Duarte-Correa ve arkadaşları (2020), vakumla emdirme yöntemiyle kalsiyum, C vitamini ve E vitamini ile zenginleştirilen patates atıştırmalıklarının farklı kurutma teknikleriyle kurutulmasının etkilerini değerlendirmişlerdir. Kurutma işlemleri sıcak hava kurutma, dondurarak kurutma ve vakumlu mikrodalga kurutma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Vakumla emdirme işlemi, RSM ile optimize edilerek 77.3 kPa vakum altında 3 dakikalık bekletme ve ardından 4 dakika atmosferik basınç uygulanması şeklinde uygulanmıştır. Sonuçlar, dondurarak kurutma yönteminin besin öğelerini en iyi koruyan teknik olduğunu, bunu sırasıyla vakumlu mikrodalga ve sıcak hava kurutma yöntemlerinin izlediğini göstermiştir. Ayrıca, duyu analizlerde vakumla emdirme ile kombine edilen vakumlu mikrodalga kurutma, tüketici beğenisini en fazla kazanan yöntem olmuştur. Bu bulgular, bu iki teknolojinin entegrasyonunun fonksiyonel gıda üretimi için uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Raj ve Dash (2020), ejder meyvesi (*Hylocereus undatus*) dilimlerinin VMD yöntemi ile kurutulmasını incelemiş ve bu süreci yapay sinir ağı (ANN) ile genetik algoritmalar (GA) kullanarak modellemişlerdir. Optimum işlem parametreleri 450 W mikrodalga gücü, 9 kPa vakum basıncı ve %1.35 sitrik asit konsantrasyonu olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda kurutulan ürünlerde toplam fenolik içeriğin ve rehidrasyon kapasitesinin arttığı, ayrıca kurutma verimliliğinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Modelleme sonuçları ANN-GA yaklaşımının deneysel verilerle yüksek uyum gösterdiğini kanıtlamıştır.

Bozkır (2020) ise portakal dilimlerinin farklı kurutma yöntemleriyle (tepsili kurutma, vakumlu kızılötesi kurutma ve VMD) kurutulması üzerine yaptığı çalışmada, VMD yönteminin sıcak hava kurutma yöntemine kıyasla kurutma süresini %62–64 oranında kısalttığını bildirmiştir. Ayrıca bu yöntemle kurutulan örneklerde toplam fenolik madde, C vitamini, pH ve toplam asitlik gibi kalite parametrelerinin daha iyi korunduğu saptanmıştır. Renk analizleri, VMD yönteminin en az renk kaybına yol açtığını ve böylece ürün kalitesini en iyi koruyan yöntem olduğunu göstermiştir.

Karacabey ve arkadaşları (2020) ise Sultani çekirdeksiz üzüm üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, sıcak hava kurutma ve VMD yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Bulgular, VMD tekniğinin kurutma süresini önemli ölçüde kısalttığını, daha düşük enerji tüketimi sağladığını ve üzümün fenolik madde içeriği ile renk kalitesini daha etkin biçimde muhafaza ettiğini göstermiştir. Bu çalışma, VMD'nin hem enerji verimliliği hem de ürün kalitesi açısından sıcak hava kurutmaya üstün bir alternatif sunduğunu ortaya koymuştur.

Tekgül ve Baysal (2019), çalışmalarında tepki yüzey metodolojisi (RSM) kullanarak vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) yöntemiyle limon kabuklarının kurutulmasını optimize etmiş ve bu kurutma işleminin uçucu bileşen profili, antioksidan kapasitesi, toplam karotenoid ve askorbik asit içeriği üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. En uygun kurutma parametreleri 584 W mikrodalga gücü ve 50 °C sıcaklık olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, VMD tekniğinin limon kabuğu tozlarının fonksiyonel ve aromatik özelliklerini koruma açısından etkili olduğunu ve bu yöntemin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği yüksek bir teknik olduğunu göstermiştir.

Yin ve arkadaşları (2019), elma dilimlerinin kurutulması için hava jet çarpmalı kurutma (AJID) ile VMD yönteminin kombinasyonunu içeren iki aşamalı bir kurutma sistemi geliştirmiştir. Bu

sistemde, elma dilimleri önce 60 dakika boyunca AJID, ardından 40 dakika VMD işlemine tabi tutulmuştur. Bu hibrit kurutma yöntemi ile elde edilen ürünler, 12.65 ± 0.63 nem içeriği ile yüksek kalite göstermiştir. Karşılaştırmalı analizlerde, FD (dondurarak kurutma) yöntemi C vitamini ve renk korunumu açısından üstünlük sağlasa da en yüksek enerji tüketimi ile dezavantaj oluşturmıştır. AJID-MVD yöntemi ise daha düşük enerji tüketimi ile iyi düzeyde kaliteyi sürdürebilmiş ve yalnızca AJID ya da VMD yöntemlerine kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu bağlamda, söz konusu hibrit yöntem büyük ölçekli kurutma uygulamaları için umut vadeden bir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Pu ve arkadaşları (2018), muz dilimlerinin VMD yöntemiyle kurutulma sürecinde, nem içeriği, sertlik ve kırılgenlik gibi kalite parametrelerini tahmin etmek amacıyla yakın kızılötesi hiperspektral görüntüleme (NIR-HSI) ve çok değişkenli veri analizi tekniklerini kullanmışlardır. Araştırma bulguları, VMD'nin muz dilimlerinde yumuşak ve etkili bir su giderme sağladığını ve kahverengileşme derecesi ile sıcaklık dağılımının bilgisayarlı görüntüleme teknikleriyle başarılı şekilde görselleştirilebildiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, spektroskopik görüntüleme teknolojilerinin, kurutma süreçlerindeki kalite kontrol uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Süfer (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Hicaz narı (*Punica granatum L.*) taneleri farklı vakum ve mikrodalga güç seviyelerinde VMD yöntemiyle kurutulmuş, bu yöntem sıcak hava kurutma ile karşılaştırılmıştır. Deneysel optimizasyon RSM ile gerçekleştirilmiş ve 360 W mikrodalga gücü ile 59.70 mbar vakum koşullarının en iyi kalite parametrelerini sağladığı saptanmıştır. VMD ile kurutulan nar örneklerinin toplam fenolik madde, toplam monomerik antosiyanin, gallotanen içeriği ve antioksidan kapasitesinin, taze örneklerle büyük ölçüde uyumlu olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, VMD tekniğinin nar gibi fenolik maddelerce zengin meyvelerin kurutulmasında etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Wojdyło ve arkadaşları (2014), vişne meyvesi örneklerinde farklı kurutma yöntemlerinin (CD, FD, VMD) ürün kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırma bulguları, 50 °C sıcaklık ve 120 W mikrodalga gücünde uygulanan VMD'nin, özellikle antosiyaninler, toplam fenolik maddeler ve kuersetin türevleri gibi biyoaktif bileşenlerin korunmasında en başarılı yöntem olduğunu göstermiştir. FD yöntemi kalite açısından en iyi sonuçları sunsa da, yüksek enerji tüketimi nedeniyle sınırlayıcı olmuştur. Bu bağlamda, VMD yöntemi hem işlem süresinin

kısaltılması hem de besin öğelerinin korunması açısından etkili bir teknoloji olarak değerlendirilmiştir.

Calín-Sánchez ve arkadaşları (2015), aronia (chokeberry) meyvelerinin kurutulmasında VMD, dondurarak kurutma ve osmotik dehidrasyon yöntemlerini karşılaştırmıştır. Kurutma kinetiği Page modeli ile başarıyla tanımlanmış, VMD yöntemi ortalama 54 dakikalık kurutma süresiyle en hızlı teknik olarak öne çıkmıştır. Duyusal analizlerde, 360 W mikrodalga gücünde uygulanan VMD ile en yüksek beğeni düzeyi sağlanmış, mikro yapısal analizlerde ise FD yöntemi %76 gözeneklilikle en iyi sonucu vermiştir. VMD yöntemi %39'luk gözeneklilik değeriyle daha düşük olmasına rağmen, genel kalite açısından tatmin edici sonuçlar vermiştir. Bu yönüyle VMD, aronia gibi fenolik maddelerce zengin meyvelerin hızlı ve kaliteli şekilde kurutulması için uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Nahimana ve Zhang (2011), çalışmalarında havuç dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) yöntemiyle kurutulması sürecini incelemiş ve bu yöntemin kurutma süresi ile ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Araştırmada, kurutma hızı, şekil deformasyonu, radyal büzülme, renk değişimi ve karotenoid içeriğindeki değişimler gözlemlenmiştir. Mikrodalga gücündeki artışın kurutma hızını anlamlı biçimde artırdığı ve toplam kurutma süresini kısalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, VMD yöntemiyle kurutulan örneklerin rehidrasyon kapasitesinin, hava ile kurutulan örneklerle kıyasla daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bu durum, mikrodalga ısıtmanın daha gözenekli ve daha az büzülmüş bir yapı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, kurutma işlemi sırasında havuç dilimlerinde %0.58 ila %44.3 oranında şekil değişimi meydana gelmiş ve karotenoid içeriğinde azalma gözlemlenmiştir.

Kruma ve arkadaşları (2011), dereotu (*Anethum graveolens* L.) sap ve yapraklarının VMD yöntemiyle kurutulması üzerine yürüttükleri çalışmada, bu yöntemin uçucu bileşik profili üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada farklı vakum seviyeleri, tambur dönüş hızları ve özgül enerji değerleri içeren sekiz farklı VMD programı uygulanmış, elde edilen kurutulmuş örneklerin uçucu bileşenleri gaz kromatografi-kütle spektrometresi (GC-MS) ile analiz edilmiştir. Bulgular, VMD yönteminin aroma bileşenleri üzerinde önemli düzeyde etkili olduğunu ve bazı spesifik kurutma parametrelerinin, taze ürüne daha yakın aroma profili oluşturabildiğini ortaya koymuştur.

Leusink ve arkadaşları (2010), yaban mersini (*Vaccinium corymbosum*) örneklerini üç farklı kurutma yöntemiyle (VMD, sıcak hava kurutma - HAD ve dondurarak kurutma - FD) işleyerek, bu tekniklerin fiziksel değişimler ve biyoaktif bileşik korunumu üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bulgular, VMD ve FD yöntemlerinin, HAD'ye kıyasla daha yüksek antioksidan aktivite sağladığını ve antosiyaninlerin korunmasında daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, VMD yöntemiyle kurutulan yaban mersinlerinde toplam gözeneklilik ve ortalama gözenek yarıçapının daha yüksek olduğu saptanmış, bu durumun rehidrasyon kapasitesini artırdığı ifade edilmiştir.

Therdthai ve Zhou (2009), nane yapraklarını sıcak hava kurutma ve VMD yöntemleriyle kurutarak, bu yöntemlerin kurutma süresi, nem difüzyonu ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Çalışma, VMD'nin kurutma süresini önemli ölçüde kısalttığını ve daha yüksek nem yayılımı sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bu yöntemle kurutulan nane yapraklarının daha açık yeşil renk, daha gözenekli yapı ve daha yüksek rehidrasyon hızı sunduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, VMD'nin yapraklı aromatik bitkilerin kurutulmasında üstün bir teknik olduğunu göstermektedir.

Cui ve arkadaşları (2008), VMD ile dondurarak kurutma (FD) yönteminin kombinasyonunu kullanarak havuç ve elma dilimlerinin yüksek kaliteyle kurutulmasını amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Elde edilen veriler, bu kombine yöntemin kimyasal (karoten ve C vitamini korunumu) ve fiziksel (büzülme, renk, doku ve rehidrasyon kapasitesi) parametreler açısından FD'ye yakın kalite sağladığını göstermiştir. Kurutma sonrası ürünlerin, geleneksel sıcak hava kurutmasına kıyasla daha iyi besin ve kalite özellikleri gösterdiği, ancak FD'ye kıyasla biraz daha fazla büzülme meydana geldiği belirlenmiştir. Özellikle mikrodalga gücü yoğunluğu ile ürün deformasyonu arasında doğrudan bir ilişki tespit edilmiştir. Bu çalışma, FD kadar yüksek kalite sağlayabilen, fakat daha kısa sürede gerçekleştirilebilen alternatif bir kurutma yöntemi önerisi sunmaktadır.

Giri ve Prasad (2007), vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin kültür mantarlarının kurutulmasındaki etkinliğini değerlendirdikleri çalışmalarında, kurutma parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak optimize edilen sistemde, mikrodalga gücü (202 W), sistem basıncı (6.5 kPa) ve dilim kalınlığı (7.7 mm) optimum koşullar olarak belirlenmiştir. Bulgular, düşük vakum basıncının

mantarların renk, sertlik, rehidrasyon oranı ve duyuşal özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. VMD yöntemi, özellikle ürün kalitesini muhafaza ederken kurutma süresini azaltma yönüyle etkili bir teknik olarak tanımlanmıştır.

Clary ve arkadaşları (2007), VMD sırasında sıcaklık kontrolü uygulayarak mikrodalga gücünün optimizasyonunu gerçekleştirmiş ve bu kontrolün, üzüm kurutma sürecindeki performans ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma bulgularına göre, vakumlu mikrodalga kurutulan üzümler, geleneksel güneşte kurutulmuş örneklere kıyasla daha yüksek düzeyde besin ögesi içermektedir. Özellikle, A vitamini yalnızca VMD yöntemiyle kurutulan örneklerde tespit edilirken, C vitamini, tiamin ve riboflavin gibi ısıya duyarlı vitaminlerin de bu yöntemde daha iyi korunduğı rapor edilmiştir.

Hu ve arkadaşları (2006), edamame (olgunlaşmamış soya fasulyesi) örnekleri üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, sıcak hava kurutma ve VMD yöntemlerinin ayrı ayrı ve kombine olarak uygulanmasını değerlendirmiştir. Araştırma, VMD'nin kuruma süresini önemli ölçüde azalttığını, sıcak hava ile VMD kombinasyonunun ise hem ürün kalitesi hem de kurutma süresi açısından etkili sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, bu kombinasyon yöntemi, düşük kütle yükü ve enerji tüketimi ile daha ekonomik bir seçenek olarak öne çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar, kurutma sistemlerinde enerji verimliliğı ile ürün kalitesini aynı anda sağlama potansiyelini göstermektedir.

Clary, Wang ve Petrucci (2005), vakumlu mikrodalga kurutma sürecinde mikrodalga gücünün üzüm kurutma performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, mikrodalga gücünün kademeli olarak azaltılması ile %3.5 nem içeriğine ulaşılabilmiş ve optimum özgül enerji tüketimi 0.92 W-h/g taze üzüm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, sıcaklık ölçümünün ve enerji uygulamasının kontrollü yapılmasının, kurutma sürecinin verimliliğini artırdığı ve ürün kalitesini olumlu etkilediğı belirlenmiştir. Bu çalışma, VMD uygulamalarında sıcaklık takibi ve enerji yönetiminin önemine dikkat çekmektedir.

Xu ve arkadaşları (2004), sıcak hava kurutma ile vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) yöntemlerini kombine ederek yabani lahananın kurutulmasını incelemişlerdir. Bu kombine yöntemle, toplam kurutma süresinin geleneksel yöntemlere kıyasla yaklaşık %50 oranında azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, elde edilen ürünlerde klorofil ve askorbik asit içeriklerinin

önemli ölçüde korunduğu rapor edilmiştir. Bu bulgular, VMD yönteminin sıcak hava kurutmayla birlikte kullanımının hem işlem süresini optimize ettiği hem de ürünün besin değerlerini muhafaza etme açısından etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Cui ve arkadaşları (2004a), Çin frenk soğanı yaprakları ve havuç dilimlerini VMD ve bu yöntemin diğer kurutma teknikleriyle kombinasyonları ile kurutarak, elde edilen ürünlerin karotenoid ve klorofil içeriğini değerlendirmiştir. Dondurarak kurutma ve geleneksel sıcak hava kurutma yöntemleriyle karşılaştırmalı yapılan analizlerde, VMD ve kombinasyonlarının, renk ve besin ögesi kayıplarını önemli ölçüde azaltarak üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, VMD süreci sırasında nemin hızla azalması ve oksijensiz ortamın sağlanması nedeniyle, renk bozulmasına yol açabilecek enzimatik faaliyetlerin baskılandığı ve bu nedenle ön haşlama (blanching) uygulamasına ihtiyaç duyulmadığı ifade edilmiştir. Bu çalışma, özellikle yeşil ve pigment açısından zengin sebzelerde VMD'nin besin değerlerini koruyarak etkin kurutma sağladığını göstermektedir.

Cui ve arkadaşları (2004b), ince tabaka hâlinde dilimlenmiş havuçların VMD yöntemiyle kurutulmasına yönelik teorik bir model geliştirmiştir. Modelde, kurutma süreci boyunca nem içeriği ve kurutma hızı arasındaki ilişki detaylı şekilde ele alınmıştır. Araştırma sonucunda, kurutma hızının nem içeriği %2 kurumadde seviyesine ulaşana kadar sabit kaldığı, ardından azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, mikrodalga gücünün kurutma hızını artırıcı etkisi açıkça gözlemlenirken, vakum basıncının etkisinin daha sınırlı kaldığı saptanmıştır. Bu çalışma, VMD'nin proses dinamiklerinin modellenmesi açısından önemli bir katkı sunmakta ve özellikle ince kesilmiş sebze-meyveler için sürecin optimizasyonunda yol gösterici bir çerçeve sağlamaktadır.

Sham ve arkadaşları (2001), VMD yöntemiyle gevrek elma cipsleri üretmek amacıyla en uygun kurutma koşullarını belirlemişlerdir. Çalışmada, kurutma işlemine kalsiyum klorür (%1 CaCl_2) ön işlemi uygulanmış ve bu işlemin ürünün gevrekliği ile duyusal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, farklı vakum seviyeleri ve elma çeşitlerinin fiziksel kaliteye etkisi analiz edilmiştir. Bulgular, daha yüksek vakum seviyelerinin ürün yoğunluğunu azaltarak gevrekliği artırdığını, CaCl_2 uygulamasının da cipsin yapısal bütünlüğünü güçlendirdiğini ve tadı olumsuz etkilemeden kaliteyi yükselttiğini göstermiştir. Bu bağlamda çalışma, VMD teknolojisinin gevrek dokulu meyve atıştırmalıkları üretiminde potansiyel taşıdığını vurgulamaktadır.

Pappas ve arkadaşları (1999), elma, avokado, mantar, armut ve çilek gibi farklı meyve ve sebzelerin vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) yöntemiyle kurutulmasına yönelik kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, mikrodalga gücü, vakum basıncı ve ürünün fiziksel şekli gibi kurutma parametrelerinin, kurutma süreci ve ürünün rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, kurutma hızı ve rehidrasyon oranı, uygulanan mikrodalga gücü ve sistem basıncına bağlı olarak önemli ölçüde değişim göstermektedir. Özellikle düşük vakum basıncı ve yüksek mikrodalga gücünün, kurutma süresini kısalttığı ve su giderimini artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, daha küçük parçalanmış meyvelerin daha hızlı nem kaybettiği ve daha etkin dehidrasyon sağladığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, VMD yönteminin farklı meyve ve sebzelerde hem verimli bir su giderme süreci sağladığını hem de yeniden sulandırılabilirliği yüksek ürünler elde edilmesine olanak sunduğunu ortaya koymaktadır.

Lin ve arkadaşları (1998), havuç dilimlerini VMD yöntemiyle kurutarak, bu yöntemi sıcak hava kurutma ve dondurarak kurutma teknikleriyle karşılaştırmıştır. Yapılan kalite analizlerinde, VMD ile kurutulan havuçların, rehidrasyon kapasitesinin diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu yöntemde karoten ve C vitamini gibi ısıya duyarlı bileşenlerin daha iyi korunduğu, ürünün yoğunluğunun daha düşük ve dokusunun daha yumuşak olduğu saptanmıştır. Organoleptik değerlendirmelerde, VMD ile kurutulan havuçların aroma, tat ve doku özellikleri açısından, dondurarak kurutulan örneklerle eşit hatta bazı yönlerden üstün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma, VMD'nin yalnızca hızlı kurutma avantajı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda yüksek besin ve duyu kaliteyi muhafaza etmede de etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3.2. Kurutma Kinetiğinin Matematiksel Modellenmesi

Kurutma kinetiğinin incelenmesi, uygun kurutma yöntemlerinin seçilmesi ve kurutma sürecinin kontrolü için kaçınılmazdır. Bu inceleme, nem uzaklaştırma sürecinin ilerleyişini anlamaya ve tam ölçekli deneyler yapmaya gerek kalmadan uygun kurutma koşullarını belirlemeye yardımcı olur. Kurutma kinetiği, nem uzaklaştırılması ile kurutma süreci değişkenleri arasındaki ilişkiyi açık bir şekilde ifade eder (Delfiya vd., 2022). Özellikle mühendislik uygulamaları ve proses optimizasyonu için kurutma kinetiğinin modellenmesi kritik bir rol oynamaktadır. Çünkü doğrudan tam ölçekli deneyler hem maliyetli hem de zaman alıcıdır. Bu nedenle, deneysel

verilerin desteklendiği matematiksel modelleme, sürecin daha verimli kontrol edilmesini ve istenen ürün kalitesine ulaşılmasını sağlar (Inyang vd., 2018).

Matematiksel modelleme, kurutma süreçlerinin sanal ortamda simüle edilmesini sağlayarak, hem zaman hem de maliyet açısından avantaj sunan etkili bir araçtır. Bu sayede henüz test edilmemiş veya yeni geliştirilen proseslerin optimizasyonu ve ölçeklendirilmesi mümkün olurken, deneysel deneme-yanılma sürecine olan ihtiyaç da önemli ölçüde azalır. Ancak, gıda materyallerinin karmaşık yapısı ve değişken bileşimi nedeniyle bu ürünlerin kuruma davranışlarını evrensel bir yaklaşımla modellemek zordur. Bu durum, literatürde yer alan çok sayıda farklı modelleme yaklaşımıyla da doğrulanmaktadır. Ayrıca, çoğu kurutma modeli yalnızca belirli ürün ve ekipman kombinasyonları için geçerli olabilmektedir (Sabarez, 2015). Meyve ve sebzelerde, kuruma kinetiği genellikle ince tabaka kurutma tekniği kullanılarak belirlenir. Bu teknikte numune tabakası sıcak hava akımıyla kurutulur; böylece kütle ve ısı transferi eş zamanlı gerçekleşir ve kurutma verimi artırılır (Onwude vd., 2016).

2.3.2.1. İnce Tabaka Kurutma Modelleri

İnce tabaka kurutma, tarımsal kökenli ürünlerin kuruma kinetiğinin nicel olarak analiz edilmesine olanak tanıyan, ısı ve kütle transferinin eşzamanlı gerçekleştiği bir kurutma yaklaşımıdır. Bu yöntem, kurutma sürecinin matematiksel modeller aracılığıyla tanımlanmasına imkân sunması bakımından, özellikle optimum kurutma koşullarının belirlenmesi ve enerji verimliliğinin artırılması açısından gıda mühendisliği uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Onwude vd., 2016). İnce tabaka modelleme, deneysel veriler ışığında kuruma davranışının nicelenmesi, süreç performansının iyileştirilmesi ve enerji tüketiminin minimize edilmesi bakımından önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu nedenle geliştirilen ince tabaka kurutma modelleri; teorik, yarı-teorik ve ampirik olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır. Teorik modeller, çoğunlukla karmaşık diferansiyel denklemler içermeleri ve çok sayıda varsayıma dayanma zorunluluğu nedeniyle pratik uygulamalarda sınırlı kullanım alanı bulmaktadır. Öte yandan, yarı-teorik modeller, genellikle Fick'in ikinci difüzyon yasasından türetilmekte olup, ısı ve kütle transferi süreçlerini daha gerçekçi şekilde yansıtmaları nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir (Tablo 2.5.). Ampirik modeller ise doğrudan deneysel verilerden türetilmekte olup, özellikle yüksek nem

içeriğine sahip tarımsal ürünlerin kuruma davranışlarının modellenmesinde tercih edilmektedir (Onwude vd., 2016).

Tablo 2.5. Meyve ve sebzelerin kurutulmasında ince tabaka modelleri (Onwude vd., 2016).

Model Adı	Model*	Referans
1 Lewis (Newton) model	$MR = \exp(-kt)$	El-Beltagy vd. (2007)
2 Page model	$MR = \exp(-ktn)$	Akoy (2014)
3 Henderson and Pabis model	$MR = a \exp(-ktn)$	Tzempelikos vd. (2014)
4 Modified Henderson and Pabis model	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Meisami-asl vd. (2010)
5 Logarithmic model	$MR = a \exp(-kt) + c$	Hashim vd. (2014)
6 Two-term model	$MR = a \exp(-K_1t) + b \exp(-K_2t)$	Zenoozian vd. (2008)
7 Two-term exponential model	$MR = a \exp(-k_0t) + (1-a) \exp(-k_1at)$	Rayaguru ve Routray (2012)
8 Verma and others model	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Kaur ve Singh (2014)
9 Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Sacilik (2007)
10 Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Dash vd. (2013)
		Akpınar (2006)
		Yaldız ve Ertekin (2007)
		Omolola vd. (2014)

* k ve n: kuruma sabitlerini, t: zamanı ve a,b,c,d ise kuruma katsayılarını ifade etmektedir.

Kuruma sürecinin analizi kapsamında ürünün nem oranının (moisture ratio, MR) zamanla değişimi kritik bir parametre olup, bu değişim çoğunlukla eksponansiyel fonksiyonlar ile tanımlanmaktadır. MR değerindeki azalmayı tanımlayan modellerin çoğu, kuruma sabitleri (k, g, h, K₁, K₂, K₀ gibi) ile birlikte çeşitli empirik sabitler (a, b, c, d, l vb.) içermektedir. Kuruma davranışlarını başarılı bir şekilde açıklayan bu modellerin çoğu, fiziksel temele dayalı yarı-teorik yapıda olup, Newton'un soğuma yasası ile Fick'in difüzyon yasalarından türetilmiştir (Inyang vd., 2018; Onwude vd., 2016).

Model seçiminde, kuruma davranışını temsil etme düzeyini belirlemek amacıyla çeşitli istatistiksel parametreler kullanılmaktadır. Bu bağlamda; determinasyon katsayısı (R²), ortalama kare hata (RMSE), ortalama bağıl hata (MBE), korelasyon katsayısı (r), standart hata (SEE), kalan kareler toplamı (RSS) ve indirgenmiş ki-kare (χ^2) gibi kriterler dikkate alınmaktadır. Yüksek R² ve düşük RMSE ile χ^2 değerleri, modelin deneysel verilerle uyumunun

yüksek olduğunu ve kurutma kinetiğini başarıyla temsil ettiğini göstermektedir (Onwude vd., 2016).

Sonuç olarak, kurutma sürecinin dinamik yapısı, ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerine, uygulanan kurutma yöntemine ve çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğinden, tüm meyve ve sebzeler için evrensel geçerliliğe sahip tek bir kurutma modeli mevcut değildir. Bu nedenle her ürün ve kurutma yöntemi özelinde en uygun modelin deneysel veriler doğrultusunda belirlenmesi gerekmektedir.

2.3.2.2. Nem Difüzyonu ve Fick'in İkinci Yasası

Gıda kurutma süreçlerinde nemin ürünün iç kısmından yüzeye doğru taşınması, temel olarak difüzyon mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. Bu süreçteki su taşınımı, özellikle azalan hız evresi boyunca kurutma kinetiğini belirleyen ana faktörlerden biri olarak tanımlanmaktadır (Guiné & Lima, 2020). Kurutma esnasında gerçekleşen nem difüzyonu, ürün içindeki suyun iç transfer direnciyle sınırlı olduğu durumlarda belirgin bir şekilde önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}), kurutma süreci boyunca nemin iç hareketini nicel olarak tanımlayan ve ürünün kuruma davranışının modellenmesinde temel öneme sahip olan bir parametredir.

Etkin difüzyon katsayısı; nem içeriği, sıcaklık, ürünün fiziksel yapısındaki büzülme derecesi, çevresel hava hızı ve örnek kalınlığı gibi birçok değişkenden etkilenmektedir (Kian-Pour & Karatas, 2019; Mugi & Chandramohan, 2021). Söz konusu parametre, ürün içerisinde gerçekleşen nem hareketinin dirençle karşılaşan yönünü ve hızını tanımlamakta olup, kurutma sürecinin optimize edilmesi açısından kritik bir değerlendirme ölçütü sunmaktadır.

Gıda kurutma süreçlerinde içsel nem difüzyonunun modellenmesinde en yaygın şekilde kullanılan kuramsal yaklaşım, Fick'in ikinci difüzyon yasasıdır. Bu yasa, tek boyutlu ve zamana bağlı kütle transferini tanımlamakta olup, ürün içerisindeki nem dağılımını zamanla tahmin etmek için kullanılmaktadır. Gıdanın fizikokimyasal özelliklerinde süreç boyunca meydana gelen değişikliklere rağmen, Fick modeli kurutma simülasyonlarında geçerliliğini büyük ölçüde korumaktadır (Guiné & Lima, 2020; Kian-Pour & Karatas, 2019). Matematiksel olarak bu model, aşağıdaki diferansiyel denklemle ifade edilmektedir:

$$\partial MR / \partial t = D_{eff} (\partial^2 MR / \partial x^2) \quad (2.1)$$

Plaka-levha (yassı) şekle sahip örnekler için bu denklemin analitik çözümü ise Eşitlik (2) ile aşağıda verilmiştir.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{((2n+1)^2)}{4} \frac{\pi^2 D_{eff} t}{x_1^2} \right] \quad (2.2)$$

Burada:

D_{eff} : Difüzyon katsayısı (m^2/s),

n : Pozitif bir tam sayı

x_1 : Örneğin yarı kalınlığını (m) ifade etmektedir.

Denklemin sadeleştirilmiş ve logaritmik formu aşağıda verilmiştir:

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4x_1^2} \right) \quad (2.3)$$

Difüzyon katsayısı, $\ln(MR)$ ile kurutma zamanı arasındaki grafik çizilerek hesaplanır. Grafiğinin eğimi (K) denklem (2.4) ile ifade edilmektedir:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4x_1^2} \quad (2.4)$$

2.3.3. Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology – RSM)

Yanıt Yüzey Metodolojisi (Response Surface Methodology, RSM), 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilmiş ve ilk olarak kimya endüstrisinde süreç optimizasyonu amacıyla uygulanmıştır (Koç & Kaymak-Ertekin, 2009). RSM; deneysel tasarım, ampirik modelleme ve istatistiksel optimizasyon tekniklerini bir araya getiren, süreçlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve optimize edilmesi amacıyla kullanılan güçlü bir istatistiksel yaklaşımlar bütünüdür (Carley vd., 2004).

Bu yöntem, birden fazla bağımsız değişkenin (örneğin sıcaklık, süre, konsantrasyon vb.) bir ya da daha fazla yanıt değişkeni (örneğin verim, kalite parametresi) üzerindeki etkisini inceleyerek, değişkenler arasındaki etkileşimleri tanımlamayı ve sürecin matematiksel

modellemesini gerçekleştirmeyi hedefler. Bu kapsamda RSM, hem deney maliyetlerini azaltmak hem de deneysel veriler üzerinden optimum işlem koşullarını belirlemek amacıyla oldukça etkili bir araçtır (Carley vd., 2004; Koç & Kaymak-Ertekin, 2009).

RSM uygulamaları tipik olarak üç temel aşamada gerçekleştirilir:

- 1. Eleme Aşaması (Screening):** Bu ilk aşamada, potansiyel olarak etkili olabilecek çok sayıda değişken arasından süreci anlamlı düzeyde etkileyen faktörler seçilir. Böylece deneylerin kapsamı daraltılarak maliyet ve zaman açısından verimlilik sağlanır.
- 2. Bölge Araştırması (Region Exploration):** Seçilen değişkenler çerçevesinde optimum bölgeye yakın koşullar tanımlanır. Bu aşamada değişkenlerin tepkisel eğilimleri analiz edilir.
- 3. Optimizasyon Aşaması:** Bu son aşamada, ikinci dereceden (quadratic) polinomsal model kullanılarak matematiksel optimizasyon gerçekleştirilir. Böylece sistemin davranışı daha hassas şekilde tanımlanır ve optimum işlem koşulları belirlenir. Sonuçların güvenilirliği doğrulama deneyleriyle desteklenir (Carley vd., 2004).

Geliştirilen modellerin güvenilirliği ve geçerliliği, başta varyans analizi (ANOVA) olmak üzere çeşitli istatistiksel kriterlerle değerlendirilir. Bu bağlamda, determinasyon katsayısı (R^2 ve düzeltilmiş R^2), modelin p-değeri, uyumsuzluk testi (Lack of Fit) ve varyasyon katsayısı (Coefficient of Variation, CV) gibi göstergeler dikkate alınmaktadır (Carley vd., 2004; Koç & Kaymak-Ertekin, 2009). Özellikle CV'nin $<10\%$ olması, deneyin yüksek güvenilirlikte olduğunu göstermektedir (Hashemi & Nedamani, 2022).

Gıda mühendisliği alanında RSM uygulamaları, proses parametrelerinin optimize edilmesi, yeni ürün geliştirme ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi gibi pek çok alanda yaygınlık kazanmıştır. Bu metodoloji; deney sayısını azaltarak zaman ve maliyet avantajı sağlaması, çoklu değişkenlerin aynı anda etkilerini analiz etme yeteneği sunması, grafiksel analizler (kontur ve üç boyutlu yüzey grafikleri) ile sürecin görselleştirilebilmesi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır (Koç & Kaymak-Ertekin, 2009).

Bununla birlikte, RSM uygulamalarında model yeterliliğinin dikkatle değeriendirilmesi gerekmektedir. Özellikle çok değışkenli sistemlerde yüzeydeki eğriliklerin doğru temsil edilebilmesi için uygun model yapısının seçilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca, çoklu yanıtların optimize edilmesinde her bir yanıtın hedef değeriinin ve önem düzeyinin dikkate alındığı desirability fonksiyonu gibi bütüncül yaklaşımlar önerilmektedir (Carley vd., 2004).



3. MATERİYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Deneysel Materyal

Bu çalışmada kurutma işlemlerinde kullanılmak üzere *Citrus sinensis* türüne ait iki farklı portakal çeşidi (Washington Navel ve Valencia portakal çeşitleri) seçilmiştir. Washington Navel portakalları Adana ili Yüreğir ilçesindeki ticari bir üretim alanından, Valencia portakalları ise yine Adana ili sınırlarında yer alan Mıdık bölgesinden temin edilmiştir. Meyveler, hasat sonrası kalite parametrelerinin korunması amacıyla hem kurutma öncesi hazırlık sürecinde hem de kurutma işlemleri boyunca +4 °C sıcaklıktaki soğuk hava deposunda muhafaza edilmiştir. Bu uygulama, meyve içerisindeki metabolik aktivitelerin yavaşlatılarak kalite kayıplarının minimize edilmesini sağlamıştır.

3.1.2. Kurutma Deneylerinin Gerçekleştirildiği Laboratuvar Ortamı

Portakalların muhafazası, dilimlenmesi ve dilimlenmiş kuru portakal üretimine yönelik kurutma uygulamaları, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Ar-Ge Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Bu laboratuvar, soğuk hava koşullarına, vakumlu mikrodalga kurutma ve geleneksel sıcak hava ile tepsili kurutma sistemlerinin kontrollü bir biçimde çalıştırılabildiği deneysel altyapıya sahiptir.

3.1.3. Portakal Dilimleyici

Kurutma işlemine tabi tutulmadan önce portakal meyveleri, homojen kalınlıkta ve standart yapıda dilimlenerek kurutma koşullarının ürün üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmesine olanak sağlanmıştır. Bu amaçla, endüstriyel özelliklere sahip Sirman 14251628 Mirra 250 Plus model elektrikli dilimleyici kullanılmıştır (Şekil 3.1.). İtalya menşeli olan bu cihaz, 12 inç (30,5 cm) çapında, paslanmaz çelikten imal edilmiş yüksek hassasiyetli kesim bıçağına sahiptir ve gıda ürünlerinin eşit kalınlıkta dilimlenmesini mümkün kılmaktadır.

Dilimleme işlemi sırasında portakal meyvelerinin bütünlüğü korunmuş; dilim kalınlıkları çalışma tasarımına uygun olarak 2 mm, 4 mm ve 6 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Cihazın milimetrik ayarlanabilirlik sağlayan kesim mekanizması sayesinde tüm dilimlerin kalınlığı sabit

tutulmuş, böylece kurutma sürecine etki eden değişkenlerden biri olan yüzey-hacim oranı kontrol altına alınmıştır. Bu, kurutma kinetiği, nem difüzyonu ve kalite parametreleri üzerinde standardizasyon sağlamak açısından kritik bir uygulamadır.



Şekil 3.1. Portakal dilimleyici ve portakalların dilimlenmesi

3.1.3. Vakumlu Mikrodalga Kurutma Sistemi

Çalışmada kullanılan vakumlu mikrodalga kurutucu, Bozkır (2019) tarafından geliştirilen prototip bir sistemdir (Şekil 3.2.). Cihaz, 1–4 kW arasında ayarlanabilir mikrodalga gücüne ve 0–1000 mbar arasında değiştirilebilir vakum seviyesine sahiptir. Kurutucu, dört adet yüksek frekanslı magnetron içermekte olup, ürünün tüm hacmi boyunca homojen enerji dağılımı sağlayarak etkili bir kurutma gerçekleştirmektedir. Cihaz ayrıca, kurutma sıcaklığı ve iç ortam vakum düzeyinin hassas bir şekilde izlenip kontrol edilebildiği dijital gösterge sistemine sahiptir. Bu sistem, işlem parametrelerinin gerçek zamanlı takibini ve istenilen kurutma profiline göre müdahale imkânı sunmaktadır.



Şekil 3.2. Vakumlu mikrodalga kurutucu

Portakal dilimleri, standart boyutlarda ($25 \times 65 \times 5$ cm) ve delikli yapıya sahip beş adet teflon sepet içerisine tek tabaka halinde yerleştirilmiş ve kurutma odasına yerleştirilmiştir. Bu sepetsel yapı, mikrodalga enerjisinin ürünle daha etkin teması ve su buharının dış ortama daha kolay transferi açısından tercih edilmiştir.

Kurutma işlemi süresince, ürünlerin kütle değişimleri belirli zaman aralıklarında hassas terazi yardımıyla ölçülmüş ve bu veriler üzerinden nem kaybı dinamiği takip edilmiştir. Kurutma süreci, ürünün hedeflenen nihai nem içeriğine (%10'un altı) ulaşmasıyla birlikte sonlandırılmıştır. Böylece, ürünün hem mikrobiyolojik stabilitesi hem de raf ömrü açısından uygun bir yapıya kavuşması sağlanmıştır.

3.1.4. Tepsili Kurutma Sistemi

Bu çalışmada karşılaştırmalı değerlendirme yapılabilmesi amacıyla, vakumlu mikrodalga kurutma sistemine ek olarak konvansiyonel bir tepsili sıcak hava kurutma sistemi de kullanılmıştır. Kurutma işlemleri, Adakurutma firması tarafından üretilen, paslanmaz çelik gövdeli, dört katmanlı ve programlanabilir bir sıcak hava kurutucusu ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın genel görünümü, iç yapısı ve dijital kontrol paneli sırasıyla Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Tepsili Kurutucu

Kurutucu, hava akış hızı ayarlanabilen yatay yönlendirmeli bir fan sistemi ile donatılmış olup, iç ortam sıcaklığı, alt ve üst bölgelerde bulunan rezistanslar aracılığıyla bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Kurutma sırasında ortam içi sıcaklık, bağıl nem değeri, giriş havası sıcaklığı, alt bölge ve üst bölge sıcaklıkları dijital bir kontrol paneli üzerinden anlık olarak izlenebilmekte ve gerektiğinde manuel müdahalelere olanak tanımaktadır.

Cihazda, standart boyutlarda (yaklaşık 30×50 cm) dört adet kurutma tepsisi bulunmaktadır. Bu tepsiler, kare şeklinde delikli plastik materyalden imal edilmiştir ve ürün ile hava arasındaki temas yüzeyini artırarak daha etkin bir kurutma süreci sağlanmıştır. Dilimlenmiş portakal örnekleri, bu tepsilere tek katman halinde yerleştirilmiş ve kurutma işlemi boyunca konvektif sıcak hava akımına maruz bırakılmıştır.

Kurutma işlemi esnasında, ürünlerin kütleleri belirli aralıklarla ölçülerek nem kaybı izlenmiş; kurutma süreci ürünlerin hedeflenen nihai nem içeriğine (%10'un altı) ulaşmasıyla birlikte sonlandırılmıştır.

3.1.5. Kimyasallar ve Standart Maddeler

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizlerde kullanılan tüm kimyasallar ve standart referans maddeler (Tablo 3.1.), yüksek safiyet derecesine sahip analitik kalite özellikleri gözetilerek temin edilmiştir. Kullanılan reaktiflerin tamamı, uluslararası kalite standartlarına uygunluklarıyla bilinen European Pharmacopoeia, USP, Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, ABD) ve Merck (Darmstadt, Almanya) firmalarından tedarik edilmiştir.

Tablo 3.1. Analizlerde kullanılan standart referans maddeler

Standart maddeler ve temin edilen firmalar		
Fenolik Madde Adı	Firma	Ürün Kodu
Gallik asit	Merck	842649
Chlorogenic acid	European Pharmacopoeia	Y0000569
(+) Catechin hydrate	Sigma-Aldrich	C1251
(-) Epigallocatechin	Sigma-Aldrich	E3768
(-) Epicatechin	Sigma-Aldrich	E4018
Vanillic acid	Sigma-Aldrich	94770
Syringic acid	Sigma-Aldrich	S6881
Cafeic acid	Sigma-Aldrich	C0625
Sinapic acid	Sigma-Aldrich	D7927-1G
Isoquercetin	Sigma-Aldrich	00140585
Ferrulic acid	European Pharmacopoeia	Y0001013
PAEE (3,4-dihidroksibenzoic acid, protocatechuic acid)	Sigma-Aldrich	03930590
Quercetin	Sigma-Aldrich	Q4951
Neohesperidin	Sigma-Aldrich	N1887-100MG
Rutin	Sigma-Aldrich	R5143
p-cumaric acid	Sigma-Aldrich	C9008
phloridzin dehydrate	Sigma-Aldrich	P3449-1G
Hesperidin	Sigma-Aldrich	H5254-100G
Luteolin	Sigma-Aldrich	72511
Naringin	Sigma-Aldrich	N1376-25G
o-cumaric acid	Sigma-Aldrich	PHL82343
Myricetin	Sigma-Aldrich	70050-25MG
Naringenin	Sigma-Aldrich	N5893-5G
Kampferol	Sigma-Aldrich	60010
Karotenoid Madde Adı	Firma	Ürün Kodu
α -Kriptoksantin	Sigma-Aldrich	69553-1MG
ApoKarotenol	USP	1040854
Lutein	Sigma-Aldrich	07168-1MG
β -Karoten	Sigma-Aldrich	1239-1G
β -Kriptoksantin	Sigma-Aldrich	C6368-1MG
α - Karoten	Sigma-Aldrich	50887-1MG
Zeaksantin	Sigma-Aldrich	14681-1MG-F

3.2. Metot

3.2.1. Portakal Örneklerinin Hazırlanması ve Kurutulması

Çalışmada kurutma işlemine tabi tutulacak portakal örneklerinin hazırlanması sürecinde, hasat edilen Washington Navel ve Valencia çeşidi portakallar, öncelikle musluk suyu ile yıkanarak yüzeydeki olası kir ve yabancı maddelerden arındırılmıştır. Temizlik işlemi sonrası meyveler, paslanmaz çelik bıçaklara sahip hassas bir dilimleyici (Sirman Mirra 250 Plus, Italy) yardımıyla halka şeklinde dilimlenmiştir. Dilimleme işlemi, deneysel tasarımda belirlenen kalınlık seviyeleri olan 2 mm, 4 mm ve 6 mm olarak gerçekleştirilmiş ve her bir dilimleme kalınlığı için ayrı ayrı üretim süreçleri kurgulanmıştır (Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.). Bu sayede, yüzey/hacim oranının kurutma dinamikleri üzerindeki etkisi analiz edilebilmiştir.



Şekil 3.4. Vakumlu Mikrodalga Kurutucuda kurutulan portakal dilimleri.



Şekil 3.5. Tepsili Kurutucuda kurutulan portakal dilimleri.

Hazırlanan portakal dilimleri, vakumlu mikrodalga kurutma ve konvansiyonel tepsili sıcak hava kurutma sistemlerinde kurutulmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Her iki kurutma yöntemi için de üretim koşullarının belirlenmesinde Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology, RSM) kullanılmış; deneysel tasarımlar Design Expert 13.0 (Stat-Ease Inc., Minneapolis, MN, USA) yazılımı yardımıyla oluşturulmuştur.

Vakumlu mikrodalga kurutma işlemlerinde deneysel tasarım faktörleri olarak mikrodalga güç seviyesi (1–4 kW), kurutma sıcaklığı (vakum düzeyi üzerinden kontrol edilerek) ve dilim kalınlığı belirlenmiştir. Buna karşılık tepsili kurutucu için değişken parametreler kurutma sıcaklığı, hava hızı (1.0–2.0 m/s aralığında ayarlanabilir) ve dilim kalınlığı olarak tanımlanmıştır. Her iki sistemde de yanıt değişkenleri olarak kurutma hızı (kg su/kg kurumadde·saat), renk parametreleri (L^* , a^* , b^*) ve rehidrasyon kapasitesi (g/g) seçilmiştir.

Her bir portakal çeşidi (Washington Navel ve Valencia) için, hem vakumlu mikrodalga hem de tepsili kurutucu sistemlerinde ön üretim denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda her kurutma yöntemi için 17’şer farklı kombinasyonda deneme yapılmış ve deneysel veriler kullanılarak en uygun üretim koşulları matematiksel modelleme ile belirlenmiştir. Ön üretim sürecinde ürünlerin kütle kayıpları belirli zaman aralıklarında tartılarak kaydedilmiş ve bu sayede nem kaybı dinamikleri hesaplanmıştır.

Modelleme sonuçlarına göre belirlenen optimum üretim koşulları aşağıda özetlenmiştir:

- Washington Navel
 - *Vakumlu Mikrodalga Kurutucu:*
Güç: 4 kW, Sıcaklık: 60 °C, Dilim Kalınlığı: 2 mm
 - *Tepsili Kurutucu:*
Hava Hızı: 1.56 m/s, Sıcaklık: 78 °C, Dilim Kalınlığı: 2.3 mm
- Valencia
 - *Vakumlu Mikrodalga Kurutucu:*
Güç: 4 kW, Sıcaklık: 80 °C, Dilim Kalınlığı: 2.2 mm
 - *Tepsili Kurutucu:*
Hava Hızı: 1.8 m/s, Sıcaklık: 80 °C, Dilim Kalınlığı: 2 mm

Belirlenen optimum koşullarda, her iki kurutma yöntemi ve portakal çeşidi için üçer tekerrür olacak şekilde üretimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kurutma sürecinin kinetiğini değerlendirmek amacıyla yine bu optimum koşullarda kurutma kinetiği çalışmaları yapılmış ve her kurutma türü için 3 bağımsız tekrar uygulanmıştır.

Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, ürünlerin soğuması beklenmiş ve ardından kalite analizlerinde kullanılmak üzere örnekler, kilitli alüminyum-polipropilen lamine ambalajlarda, -18 °C ve -80 °C sıcaklıklarda muhafaza edilmek üzere derin dondurucularda muhafaza edilmiştir. Analiz öncesi, kurutulmuş portakal dilimleri IKA A11 Basic Analitik Öğütücü ile toz haline getirilmiş ve fiziksel, kimyasal kalite analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Portakal Örneklerinde Yapılan Fiziksel ve Kimyasal Analizler

3.2.2.1. Renk Tayini

Bu çalışmada, taze ve kurutulmuş portakal numunelerinin renk özelliklerinin belirlenmesi amacıyla CIELAB renk sistemine dayalı objektif renk analizleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, yüksek hassasiyete sahip Konica Minolta CM-5 model spektrofotometre (Konica Minolta Sensing, Inc., Japonya) cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.7.). Cihaz, D65 ışık kaynağı altında ve 10° gözlem açısıyla siyah plaka yardımıyla kalibre edilmiştir. Numuneler ölçüm haznesine yerleştirilmiş ve her bir numune için en az üç ölçüm alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. Konica Minolta CM-5 renk ölçüm cihazı

Renk analizleri kapsamında, CIELAB sistemine ait L* (parlaklık), a* (kırmızı-yeşil eksen), b* (sarı-mavi eksen) değerleri ile bu değerlerden türetilen Chroma (C*) ve Hue açısı (h°) parametreleri hesaplanmıştır.

- L* değeri, 0 (siyah) ile 100 (beyaz) arasında değişen parlaklık düzeyini,
- a* pozitif değerleri kırmızıya, negatif değerleri yeşile doğru yönelimi,
- b* pozitif değerleri sarıya, negatif değerleri maviye doğru yönelimi,
- Chroma (C*), rengin doygunluğunu,
- Hue açısı (h°) ise rengin tonunu ifade etmektedir.

Her bir örnek için toplam renk değişimi (ΔE) aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\Delta E = \sqrt{[(L_i - L_s)^2 + (a_i - a_s)^2 + (b_i - b_s)^2]} \quad (3.1)$$

Burada:

- L* : Renk parlaklığı (ışıklılık),
a* : negatif değerler yeşil, pozitif değerler kırmızı rengini gösterir,
b* : Negatif değerler mavi, pozitif değerler sarı rengini gösterir,
i : Kurutulmuş portakal dilimleri,
s : taze portakal dilimleri.

3.2.2.2. Rehidrasyon Kapasitesi Tayini

Kurutma işlemi sonrasında portakal dilimlerinin su tutma kapasitesini değerlendirmek amacıyla rehidrasyon kapasitesi analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, Cui vd. tarafından bildirilen yöntem esas alınmış (Cui, Li, Song ve Song, 2008); çalışmanın örnek yapısına uygun olarak kısmen modifiye edilmiştir.

Analiz kapsamında, her bir kurutulmuş portakal örneğinden 10 g tartılmış ve Şekil 3.6.'daki kaplar içerisine alınmıştır. Numunelere 200 mL saf su (distile su) ilave edilmiş ve kaplar, oda sıcaklığına yakın koşullarda, 25 ± 1 °C sıcaklıkta, ışık almayan ortamda 24 saat boyunca bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda, numuneler süzgeç yardımıyla süzülerek yüzeydeki serbest su uzaklaştırılmış; ardından örnekler hassas terazide tartılarak rehidrasyon sonrası ağırlıkları (W_r) belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Kurutulmuş portakal dilimlerinde rehidrasyon analizi

Her bir numune için analizler üç tekerrür şeklinde yapılmış ve elde edilen veriler ortalama $\pm$ standart sapma olarak ifade edilmiştir. Rehidrasyon kapasitesi, numunenin rehidrasyon öncesi kurutulmuş ürünün başlangıçtaki kuru ağırlığı (W_d) ve rehidrasyon sonrası ürünün ağırlığı (W_r) dikkate alınarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\text{Rehidrasyon kapasitesi} = \frac{W_r}{W_d} \quad (3.2.)$$

W_r : Rehidrasyon sonrası ürünün ağırlığı (g)

W_d : Kurutulmuş ürünün başlangıçtaki kuru ağırlığı (g)

3.2.2.3. Kurutma Kinetiğinin Matematiksel Modellemesi

Portakal numunelerinin sıcak hava (HAD) ve vakum mikrodalga kurutma (VM) yöntemleriyle elde edilen verileri, kuruma eğrilerini modellemek amacıyla yaygın olarak kullanılan kurutma modellerine uygulanmıştır (Onwude vd., 2016). Kurutma işlemi süresince 5 dk zaman aralıklarıyla (t), ürün ağırlıkları, ölçülerek portakal dilimlerinin nem içerikleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (\text{kg H}_2\text{O/kg kurumadde}) \quad (3.3)$$

Eşitlikte toplam ağırlık w (kg), kurumadde ağırlığı ws (kg) ile gösterilmiştir.

Numunelerin nem oranı (MR) kurumadde esasına göre aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Tuncer vd., 2020):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (\text{kg H}_2\text{O/kg kurumadde}) \quad (3.4)$$

Eşitlikte;

M_t : t zamanında ürünün nem içeriğini (kurumadde esasına göre) (kg H₂O / kg kurumadde),

M_o : Başlangıçtaki nem içeriğini (kurumadde esasına göre),

M_e : Denge nem içeriğini (kurumadde esasına göre) temsil etmektedir.

Örneklerin kuruma hızı ise Eşitlik (3.5) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$DR = \frac{(M_{t+dt} - M_t)}{dt} \quad (3.5)$$

Burada:

DR : Kurutma hızını (kg H₂O / kg kurumadde),

M_t ve M_{t+dt} : Ürünün t ve t+dt zamanındaki nem içeriğini (kg H₂O / kg kurumadde),

T : Kurutma süresini (dakika) ifade etmektedir.

Portakal dilimlerine ait deneysel kurutma verileri, tarımsal ürünler için literatürde yaygın olarak kullanılan 10 farklı ince tabaka kurutma modeliyle karşılaştırılmıştır (Tablo 2.5). Bu amaçla,

nem oranı (moisture ratio, MR) ile zamana bağlı değişimlerin modellenmesi için doğrusal olmayan regresyon analizinden yararlanılmıştır. Doğrusal olmayan regresyon analizleri, IBM SPSS Statistics 27.0.1 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde, her bir kurutma modelinin deneysel verilere ne düzeyde uyum sağladığını belirlemek amacıyla determinasyon katsayısı (R^2), ortalama standart hata (SEM), azaltılmış Ki-kare (χ^2) ve karekök ortalama hata (RMSE) gibi istatistiksel değerlendirme ölçütleri kullanılmıştır (Çetin, 2022). Yapılan analiz sonucunda, portakal dilimlerinin kuruma davranışını en iyi yansıtan en yüksek R^2 değerine ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip model olarak kabul edilmiştir. En iyi uyumu sağlayan model, en düşük RMSE ve SEM değerleri ile en yüksek R^2 değerine göre belirlenmiştir.

Örneklerin difüzyon katsayısı $\ln(MR)$ ile kuruma süresi arasındaki grafik çizilerek hesaplanmıştır. D_{eff} , difüzyon katsayısı için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{((2n+1)^2)}{4} \frac{\pi^2 D_{eff} t}{x_1^2} \right] \quad (3.6)$$

Denklem sadeleştirildiğinde;

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4x_1^2} \right) \quad (3.7)$$

Burada:

D_{eff} : Difüzyon katsayısını (m^2/s),

x_1 : Örneğin yarı kalınlığını (m) ifade etmektedir.

Çizilen grafikte eğimin belirlenmesi için, doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. SPSS (IBM SPSS Statistics, Windows Version için 27.0) yazılımı kullanılarak deneysel veriler ile kuramsal model arasında doğrusal ilişki olup olmadığını belirleyerek, grafiğin eğimi (K) bulunmuştur.

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4x_1^2} \quad (3.8)$$

3.2.2.4. Suda Çözünür KuruMadde Tayini

Portakal numunelerinde suda çözünür kurumadde (SÇKM) miktarı, yani °Brix değeri, Abbe tip refraktometre (Krüss, AR2008, Almanya) kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 3.8.). Bu analiz, gerek portakal suyunda gerekse kurutulmuş portakal numunelerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar %Briks cinsinden ifade edilmiştir (IFU, 2017a).



Şekil 3.8. Krüss AR2008 refraktometre cihazı

Kurutulmuş portakal örneklerinde briks ölçümü için, hassas terazide 0.5 g portakal tozu tartılmış ve 25 mL saf (distile) su ile karıştırılarak homojen bir çözelti elde edilmiştir. Elde edilen bu seyreltik çözeltiden 2–3 damla örnek, refraktometrenin temiz ve kuru prizma yüzeyine dikkatlice damlatılmış ve ölçüm yapılmıştır.

Taze portakal meyveleri için ise meyveler mekanik olarak sıkılmış, elde edilen portakal suyu herhangi bir seyreltme uygulanmaksızın doğrudan analiz edilmiştir. Taze meyve suyundan yine 2–3 damla örnek alınarak, cihazın prizma yüzeyine damlatılmış ve briks değeri okunmuştur.

Ölçümler ideal olarak 20 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş olup, farklı sıcaklıklarda yapılan ölçümler için, sıcaklık ve asitlik düzeltme tabloları kullanılarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Tüm ölçümler en az üç tekerrür şeklinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ortalama değerler olarak değerlendirilmiştir.

3.2.2.5. pH Tayini

Çalışmada hem taze portakal suyu hem de kurutulmuş portakal tozundan hazırlanan numunelerin pH değerleri, Mettler Toledo Seven Compact S220 model pH metre (Mettler Toledo AG, İsviçre) kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.9.). Tüm ölçümler, pH metre cihazının üretici talimatlarına uygun şekilde kalibrasyonu yapıldıktan sonra, 20 ± 1 °C sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiştir (IFU, 2015).



Şekil 3.9. Mettler Toledo Seven Compact S220 model pH metre cihazı

Kurutulmuş portakal örnekleri için pH ölçüm işlemi şu şekilde uygulanmıştır: 0.5 g portakal tozu, 25 mL saf (distile) su içerisinde çözdürülmüş ve bu çözelti manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen bir süspansiyon haline getirilmiştir. pH ölçüm probu çözelti içerisine daldırılmış ve karışım karıştırılırken yaklaşık 1 dakika süreyle sabit değer elde edilinceye kadar ölçüm gerçekleştirilmiştir.

Taze portakal için, meyveler mekanik olarak sıkılarak elde edilen doğal portakal suyundan yeterli miktarda alınmış, herhangi bir seyreltme uygulanmadan aynı prosedür izlenerek pH ölçümü yapılmıştır. Her iki durumda da ölçümler üç tekerrürlü olarak yürütülmüş ve ortalama pH değeri hesaplanmıştır.

Ölçüm sırasında ortam sıcaklığı 20 °C'den farklı ise, sıcaklık farkına bağlı ölçüm sapmalarının önüne geçmek amacıyla tarafından önerilen düzeltme yöntemlerine göre pH değerlerine gerekli sıcaklık düzeltmeleri uygulanmıştır.

3.2.2.6. Titrasyon Asitliği Tayini

Hem taze portakal suyu hem de kurutulmuş portakal tozundan hazırlanan numunelerin titrasyon asitliği tayini, elektrometrik yöntem esas alınarak gerçekleştirilmiştir (IFU, 2017b). Bu amaçla, öncelikle kurutulmuş portakal dilimleri, IKA A11 Basic Analitik Öğütücü kullanılarak toz haline getirilmiş ve homojen örnekler elde edilmiştir. Her bir numune, örnek kütlesinin 50 katı hacminde saf (distile) su ile seyreltilmiş ve manyetik karıştırıcı yardımıyla çözeltinin homojenliği sağlanmıştır.

Bu şekilde hazırlanan numuneler, 0.1 N sodyum hidroksit (NaOH) standart çözeltisi ile dijital bir büret kullanılarak titre edilmiştir. Titrasyon işlemi sırasında pH metre yardımıyla pH 8.1'e kadar titrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Titrasyon sonucunda, örneklerdeki toplam asitlik miktarı, susuz sitrik asit cinsinden ifade edilmek üzere aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\text{Titrasyon asitliği (\% sitrik asit cinsinden)} = \frac{V \times f \times E \times 100}{M} \quad (3.9.)$$

Burada;

V : Harcanan 0.1 N NaOH miktarı, mL

F : Faktör

E : 0.1 N NaOH'in eşdeğeri asit miktarı, g

M : Titre edilen örneğin gerçek miktarı, g

3.2.2.7. Nem ve Toplam Kurumadde Tayini

Portakal örneklerinin nem içerikleri, infrared (IR) nem tayin cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Analizlerde, Denver Instrument IR-60 model cihaz kullanılmış (Şekil 3.10.) ve ölçümler,

AOAC (1995) tarafından tanımlanan standart yönteme uygun olarak yürütülmüştür.(AOAC, 1995)



Şekil 3.10. Denver Instrument IR-60 model nem ölçüm cihazı

Analiz kapsamında, her örnekten belirli miktarda numune hassas terazi ile tartılarak cihazın numune tablasına yerleştirilmiştir. Numuneler, cihaz içerisinde 105  C sıcaklıkta, sabit a ırlı a ulaşıncaya kadar kurutulmuş ve cihaz tarafından otomatik olarak kaydedilen kütle farkı esas alınarak nem miktarı % olarak hesaplanmıştır. Sabit a ırlı a ulaşma kriteri, ardışık ölçümlerde kütle değişiminin belirli bir tolerans aralığının ($\pm 0,001$ g) altına d  mesi ile tanımlanmıştır.

Nem oranının belirlenmesinin ardından, toplam kurumadde miktarı ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Kurumadde (\%)} = 100 - \text{Nem (\%)}$$

Tüm  l  mler    tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde verilmiştir.

3.2.2.8. Su Aktivitesi Tayini

Kurutulmuş portakal numunelerinin mikrobiyolojik stabilitesi, raf ömrü ve kimyasal bozulmaya karşı dayanıklılığı açısından kritik bir kalite parametresi olan su aktivitesi (a_w) değerleri, AquaLab 4TE (Decagon Devices Inc., ABD) marka su aktivite ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. AquaLab 4TE marka su aktivite ölçüm cihazı

Analiz için, portakal örneklerinden uygun miktarda alınarak cihazın özel numune kabına dikkatlice yerleştirilmiş ve cihazın ölçüm haznesine kapak kapatılarak konulmuştur. Ölçüm esnasında cihaz, numune ile çevresindeki ortam arasında denge kuruluncaya kadar beklemiş ve denge sağlandıktan sonra su aktivitesi değeri cihaz ekranında otomatik olarak görüntülenmiştir.

Ölçümler, cihazın üretici talimatları doğrultusunda yapılmış olup, tüm analizler 20 ± 1 °C sıcaklıkta ve sabit ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek için ölçümler üç tekerrürlü olarak yapılmış ve ortalama su aktivitesi değerleri kaydedilmiştir. Su aktivitesi değeri, 0 ile 1 arasında bir oran olarak ifade edilmiştir.

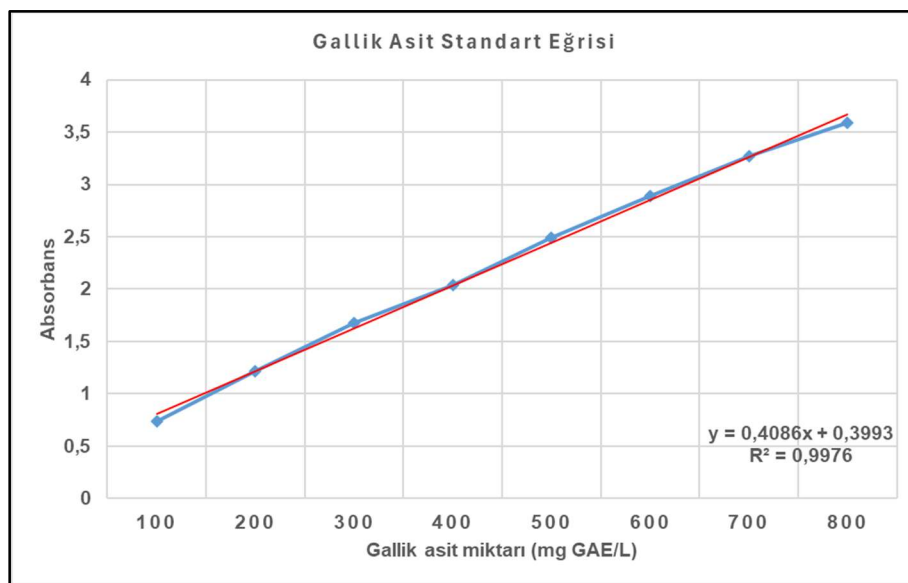
3.2.2.9. Toplam Fenolik Madde Tayini

Çalışmada hem taze portakal suyu hem de kurutulmuş portakal tozundan hazırlanan numunelerin toplam fenolik madde miktarının belirlenmesi amacıyla, kolorimetrik esaslara dayanan Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, Hegde vd. (2015) tarafından tanımlanan protokol esas alınarak, çalışmanın ihtiyaçlarına uygun şekilde modifiye edilmiştir.

Analiz için öncelikle, kurutulmuş portakal dilimlerinden öğütülmüş halde 1,00 g numune tartılmış ve üzerine 20 mL %80 (v/v) metanol-su karışımı ilave edilmiştir. Karışım, 30 saniye süreyle vortex cihazında (IKA MS3 basic, Almanya) karıştırılmış; ardından ultrasonik su banyosunda (25 ± 1 °C) 30 dakika bekletilerek fenolik maddelerin çözücüye maksimum düzeyde geçmesi sağlanmıştır. Ekstraksiyon sonrasında numuneler 3.500 rpm'de 15 dakika süreyle santrifüjlenmiş ve üst faz, Whatman No.1 filtre kağıdından süzülerek berrak ekstrakt elde edilmiştir. Hazırlanan ekstraktlar kullanılıncaya kadar +4 °C'de, ışık almayan ortamda 24 saat süreyle muhafaza edilmiştir.

Fenolik madde tayini için, ekstraktan belirli hacimde alınarak üzerine aynı hacimde Folin-Ciocalteu reaktifi ve ardından %10'luk sodyum karbonat (Na_2CO_3) çözeltisi ilave edilmiştir. Reaksiyon karışımı, toplam hacmi sabitlemek amacıyla distile su ile seyreltilmiş ve ardından karanlık ortamda, oda sıcaklığında 1 saat süreyle inkübasyona bırakılmıştır. Reaksiyon sonunda oluşan mavi renkli kompleksin absorbansı 760 nm dalga boyunda UV-Vis spektrofotometre (Shimadzu UV-1800, Japonya) ile ölçülmüştür.

Örneklerdeki toplam fenolik madde içeriği, farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış standart gallik asit çözeltileri ile oluşturulan kalibrasyon eğrisi doğrultusunda hesaplanmıştır (Şekil 3.12.). Sonuçlar, örnek başına düşen fenolik madde miktarını gösterecek şekilde mg gallik asit eşdeğeri (GAE)/L cinsinden ifade edilmiştir (Işık, 2008).



Şekil 3.12. Gallik asit standart eğrisi

Tüm analizler üç tekerrürlü olarak yürütülmüş ve sonuçlar ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde verilmiştir.

3.2.2.10. Toplam Karotenoid Tayini

Bu çalışmada, taze portakal meyveleri ile vakumlu mikrodalga kurutma ve tepsili sıcak hava kurutma yöntemleri ile işlenmiş portakal örneklerinin toplam karotenoid içerikleri, Meléndez-Martínez vd. (2007) tarafından tanımlanan yöntem esas alınarak, modifiye edilmiş bir protokol ile belirlenmiştir. Analiz, spektrofotometrik prensiplere dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Her bir örnekten 2 g tartılmış ve üzerine 10 mL ekstraksiyon çözeltisi ilave edilmiştir. Bu çözeltide, hekzan/aseton/metanol (50:25:25, v/v/v) oranlarında hazırlanmış karışım yer almakta olup, %0.1 BHT (bütillenmiş hidroksitoluen) ilavesi ile karotenoidlerin oksidatif degradasyonu önlenmiştir. Ekstraksiyon işlemi, örneklerin homojenize edilmesinden sonra 4 °C sıcaklıkta, 6000 rpm’de, 10 dakika süreyle santrifüjlenerek gerçekleştirilmiştir.

Santrifüjleme sonrasında oluşan berrak üst faz, ekstraksiyon çözeltisi ile 10 kat seyreltilmiş ve numuneler spektrofotometrik analiz için hazırlanmıştır. Toplam karotenoid miktarının tayini amacıyla, VIS spektrofotometrede (Rayleigh VIS-723G) 450 nm dalga boyunda absorbans ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları, β -karoten referans standardı dikkate alınarak aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmış ve veriler mg β -karoten eşdeğeri/100 g kurumadde cinsinden ifade edilmiştir:

$$\text{Toplam karotenoid içeriği (mg/100g KM)} = (\text{Abs} \times \text{Sf} / 2500) \times 1000 \quad (3.10.)$$

Burada:

Sf : Numunelerin seyreltme faktörü

Abs : Numunelerin absorbans değerleri

Analizler her bir örnek için üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş; sonuçlar ortalama değer ve standart sapma şeklinde verilmiştir.

3.2.2.11. Antioksidan Aktivite Tayini

Hem taze portakal suyu hem de kurutulmuş portakal tozundan hazırlanan numunelerin antioksidan aktivitelerinin belirlenmesinde, serbest radikal giderim kapasitesine dayalı DPPH (2,2-difenil-1-pikrilhidrazil) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, Brand-Williams vd. (1995) tarafından geliştirilen spektrofotometrik protokol temel alınarak, çalışmanın yapısına uygun şekilde modifiye edilmiştir.

Antioksidan bileşiklerin ekstraksiyonu amacıyla, kurutulmuş portakal tozlarından 1.00 g tartılmış ve üzerine 25 mL %80 (v/v) metanol ilave edilmiştir. Karışım, ultrasonik banyo (25 ± 1 °C) içerisinde 60 dakika süreyle bekletilmiştir. Ekstraksiyon sonrası süspansiyon, 4000 rpm’de 10 dakika santrifüjlenmiş ve oluşan berrak süpernatant analiz için kullanılmıştır.

DPPH stok çözeltisi, 2,4 mg DPPH’nin 100 mL %80’lik metanol içerisinde çözündürülmesi ile hazırlanmış ve kullanılıncaya kadar -20 °C’de karanlık koşullarda muhafaza edilmiştir.

Analiz prosedürü kapsamında, her numuneden 0.1 mL ekstrakt alınarak kuvet içerisine aktarılmış, üzerine 3.9 mL DPPH çözeltisi ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım, karanlık ortamda 30 dakika süreyle bekletildikten sonra, absorbans değerleri 515 nm dalga boyunda, VIS spektrofotometrede (Rayleigh VIS-723G) kullanılarak ölçülmüştür. %80’lik metanol, blank (boş) olarak kullanılmıştır.

Radikal giderim yüzdesi (% inhibisyon) aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır (Klimczak vd., 2007):

$$\% \text{ DPPH}_{sc} = \frac{A_{cont} - A_{samp}}{A_{cont}} \times 100 \quad (3.11.)$$

Burada:

A_{cont} : Kontrol çözeltisinin (yalnızca DPPH) absorbans değeri

A_{samp} : Örnek içeren çözeltinin absorbans değeri

Analizlerde kullanılmak üzere Trolox stok çözeltisi, literatürde Re vd. (1999) tarafından bildirilen yöntem esas alınarak hazırlanmıştır. Bu kapsamda, Trolox çözeltisi %80 (v/v)

metanol içerisinde 2,5 mM derişimde hazırlanmış ve çözeltinin tam çözünürlüğü manyetik karıştırıcıda sağlanmıştır. Hazırlanan stok çözelti, ışık almayan amber renkli şişelerde muhafaza edilmiş ve kullanılıncaya kadar -20 °C'de saklanmıştır.

Standart eğri oluşturulmasında, bu stok çözeltiden uygun hacimlerde alınarak 25–250 ppm aralığında çeşitli konsantrasyonlarda Trolox standartları hazırlanmış ve antioksidan aktivite tayininde bu standart çözeltiler referans olarak kullanılmıştır. Ölçülen örnek absorbansları, bu kalibrasyon eğrisine karşılık gelen doğrusal denklem yardımıyla değerlendirilmiş ve sonuçlar mg Trolox eşdeğeri (TE) / g örnek cinsinden hesaplanmıştır. Tüm analizler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş; veriler ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde değerlendirilmiştir.

3.2.2.12. Fenolik Bileşenlerinin Dağılımının Belirlenmesi

Portakal örneklerinde yer alan fenolik maddelerin tanımlanması ve kantitatif analizinin gerçekleştirilmesi amacıyla yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, analiz koşulları Erdoğan ve Erdemoğlu (2011) tarafından bildirilen yöntem temel alınarak çeşitli modifikasyonlarla optimize edilmiş; mobil faz bileşimi, akış hızı ve gradient akış programı birçok deneme sonucunda en yüksek ayırıcılık sağlayan koşullar doğrultusunda belirlenmiştir.

Fenolik maddelerin tanımlanması ve kantitatif analizinde numune hazırlığı ve ekstraksiyon işlemi de aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla, taze ve kurutulmuş portakal örnekleri, IKA A11 Basic analitik öğütücü kullanılarak toz haline getirilmiştir. Her bir öğütülmüş numuneden 0,5 g alınarak, örnek miktarının 10 katı hacminde metanol (MeOH) ile karıştırılmış ve homojen bir süspansiyon elde edilmiştir. Ekstraksiyon işlemi, González-Gómez vd. (2010) tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek gerçekleştirilmiş; karışım, 4 °C sıcaklıkta 24 saat süreyle bekletilmiştir. Bekleme süresi sonunda karışım, Whatman No.1 filtre kağıdı kullanılarak süzölmüş, ardından süzöntü 0.45 µm membran filtre (şırınga ucu) yardımıyla filtre edilerek HPLC vial'lerine aktarılmıştır.

Numuneler, otomatik örnekleyici (autosampler) ile cihaz sistemine enjekte edilmiştir. Her bir analiz için enjeksiyon hacmi 20 µL olarak belirlenmiştir.

Kromatografik Koşullar:

- Dedektör : Fotodiyot dizi dedektör (PAD)
- Kolon : Inertsil ODS-3, 5 µm, 250 × 4.6 mm (UP)
- Kolon sıcaklığı : 25 °C
- Mobil Faz:
 - Solvent A: %3 (v/v) asetik asit
 - Solvent B: Asetik asit:Asetonitril:Su (3:25:72, v/v/v)
- Akış Hızı : Gradient akış programı ile 1.0–1.2 mL/dk (Tablo 3.1.)
- Dalga Boyları : 280 nm, 320 nm ve 360 nm
- Enjeksiyon Hacmi: 20 µL

Analizler boyunca kromatogramlar 280, 320 ve 360 nm dalga boylarında izlenmiş, fenolik maddelerin ayrımı bu spektral bölgelerde değerlendirilmiştir. Verilerin kantitatif değerlendirmesinde ticari standartlar kullanılarak kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş (Ek-A) ve sonuçlar mg/L veya µg/g kurumadde cinsinden verilmiştir.

Tablo 3.2. Mobil faz gradient akış programı

Süre (dk)	Akış Hızı (mL/dk)	Solvent A (Asetik Asit) (%3)	Solvent B (Asetik Asit:Asetonitril:Su) (3:25:72)	Dalga Boyu (nm)
0-5	1.0	100	0	280-320-360
5-40	1.0	30	70	280-320-360
40-45	1.0	20	80	280-320-360
45-55	1.2	15	85	280-320-360
55-57	1.2	10	90	280-320-360
57-75	1.2	10	90	280-320-360
75-80	1.0	100	0	280-320-360

Fenolik maddelerin kantitatif analizinde kullanılmak üzere 24 adet fenolik madde standardı için stok çözeltiler hazırlanmıştır. Her bir fenolik standarttan 10 mg tartılarak, üzerine 10 mL hacminde metanol:su (50:50, v/v) karışımı eklenmiş ve vortex karıştırıcı (IKA MS3 Basic, Almanya) yardımıyla tam çözünme sağlanana kadar karıştırılmıştır. Bu işlemler sonucunda her bir fenolik madde için 1.000 ppm (mg/L) derişiminde stok çözeltiler elde edilmiştir. Bu işlem aşağıda listelenen tüm fenolik maddeler için ayrı ayrı uygulanmıştır: Gallik asit, Chlorogenic acid, (+) Catechin hydrate, (-) Epigallocatechin, (-) Epicatechin, Vanillic acid, Syringic acid, Cafeic acid, Sinapic acid, Isoquercetin, Ferrulic acid, PAEE (3,4-dihidroksibenzoic acid,

protocatechuic acid), Quercetin, Neohesperidin, Rutin, p-cumaric acid, phloridzin dehydrate, Hesperidin, Luteolin, Naringin, o-cumaric acid, Myricetin, Naringenin, Kampferol.

Hazırlanan bu stok çözeltiler, HPLC analizlerinde kalibrasyon eğrilerinin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Bu kapsamda, her bir fenolik bileşiğin stok çözeltisinden belirli hacimlerde alınarak, son konsantrasyonu 50 ppm olacak şekilde bir karışım standart çözeltisi hazırlanmış ve analiz öncesinde HPLC vial'lerine alınarak otomatik örnekleyici aracılığıyla cihaza enjekte edilmiştir.

Tüm çözeltiler, ışığa duyarlı bileşiklerin stabilitesini korumak amacıyla amber renkli cam şişelerde, +4 °C'de saklanmış ve çözöldükten sonra en kısa sürede kullanılmıştır.

3.2.2.14. Karotenoid Bileşenlerinin Dağılımının Belirlenmesi

Taze ve kurutulmuş portakal örneklerinde bulunan karotenoid bileşiklerin tanımlanması ve miktar tayini amacıyla, yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, Gama ve Sylos (2005) tarafından geliştirilen protokol esas alınarak çalışma koşullarına uygun şekilde modifiye edilmiştir. Analizlerde Inertsil ODS-3 kolonu (5 µm, 250 × 4.6 mm, UP) kullanılmıştır.

Karotenoid bileşiklerin tanımlanması ve kantitatif analizinde numune hazırlığı ve ekstraksiyon işlemi de aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

Analiz için 2 g taze portakal suyu ya da 2.00 g kurutulmuş portakal örneği tartılmış ve üzerine, %0.1 BHT (bütilenmiş hidroksitoluen) içeren 30 mL metanol:hekzan (50:50, v/v) ekstraksiyon çözeltisi ilave edilmiştir. Karışım, 1 dakika süreyle homojenizatörde öğütölerek ekstrakte edilmiştir. Elde edilen sıvı faz ayrı bir tüpe alınmış ve kalan posa üzerine yeniden 20 mL ekstraksiyon çözeltisi eklenerek işlem tekrarlanmıştır. Bu ekstraksiyon döngüsü toplamda 4 kez uygulanmıştır.

Toplanan tüm sıvı fazlar birleştirilmiş, ardından 9000 rpm'de, 10 dakika, 4 °C sıcaklıkta santrifüj edilmiştir. Elde edilen berrak üst faz, 0.45 µm'lik membran filtreden şırınga yardımıyla süzölerek rotary evaporatör balonuna aktarılmış ve 40 °C sıcaklıkta çözücüler

uzaklaştırılarak karotenoidler konsantre edilmiştir. Kurutulan ekstrakt, analiz öncesinde asetonitril içerisinde çözülerek HPLC vial'lerine aktarılmış ve otomatik örnekleyici aracılığıyla cihaz sistemine enjekte edilmiştir.

Kromatografik Koşullar:

- Dedektör : Fotodiyot dizi dedektör (PAD), 450 nm dalga boyu
- Kolon : Inertsil ODS-3 (5 µm, 250 × 4.6 mm, UP)
- Kolon Sıcaklığı : 25 °C
- Mobil Faz : Solvent A: Asetonitril, Solvent B: Metanol, Solvent C: Etilasetat
- Akış Hızı : 0.7 mL/dk (gradient akış programı uygulanmıştır) (Tablo 3.3.)
- Toplam Süre : 60 dakika
- Enjeksiyon Hacmi: 20 µL
- Dalga boyu : 450 nm

Tablo 3.3. Mobil faz gradient akış programı

Süre (dk)	Akış Hızı (mL/dk)	Solvent A (Asetonitril)	Solvent B (metanol)	Solvent C (Etilasetat)
0	0.7	99	1	0
25	0.7	99	1	0
30	0.7	60	10	30
50	0.7	60	10	30
55	0.7	99	1	0
60	0.7	99	1	0

Gradient akış programı ve mobil faz detayları Tablo 3.2'de verilmiştir. Tüm kromatogramlar 450 nm dalga boyunda gözlemlenmiş ve karotenoid bileşiklerin ayrımı bu spektral bölge üzerinden yapılmıştır.

Karotenoidlerin kantitatif analizinde kullanılmak üzere, her bir karotenoid bileşeni için stok çözeltiler hazırlanmıştır. Bu kapsamda, 1 mg karotenoid standardı, 1 mL hekzan:metanol (50:50, v/v) karışımında çözülmüş ve vortex karıştırıcıda homojenize edilerek 1000 ppm derişiminde çözeltiler elde edilmiştir.

Bu işlem yedi farklı karotenoid bileşik için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir: Lutein, Zeaksantin, α -Kriptoksantin, α -Karoten, β -Karoten, β -Kriptoksantin, β -Apo- γ -karotenol.

Kalibrasyon eğrilerinin oluşturulması amacıyla, bu stok çözeltilerden uygun hacimlerde alınarak 50 ppm konsantrasyona seyreltilmiş karotenoid karışım standart çözeltisi hazırlanmış ve analiz için HPLC vial'lerine aktarılmıştır. Kalibrasyon eğrileri doğrusal regresyon analizi ile değerlendirilmiş (Ek-B) ve bireysel karotenoid miktarları mg/100 g kurumadde cinsinden hesaplanmıştır.

3.2.2.15. Organik Asit Bileşenlerinin Dağılımının Belirlenmesi

Taze portakal meyveleri ile vakumlu mikrodalga kurutma ve tepsili sıcak hava kurutma yöntemleri ile işlenmiş portakal örneklerinde bulunan organik asit bileşiklerinin nitel ve nicel analizleri, yüksek performanslı sıvı kromatografi (HPLC) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, Shimadzu marka HPLC sistemi ve ICE-ORH-801 (300 $\times$ 6.5 mm) Coregel ORH 801 kolon kullanılmıştır. Organik asit bileşenlerinin dağılımının belirlenmesinde, Onsekizoğlu vd. (2010) tarafından bildirilen yöntem esas alınarak, çalışma koşullarına uygun şekilde modifiye edilmiştir.

Kurutulmuş portakal dilimleri, analiz öncesi IKA A11 Basic analitik öğütücü ile toz haline getirilmiş ve homojen numuneler elde edilmiştir. Her bir örnekten 0.50 g tartılmış ve üzerine 50 mL HPLC-grade saf su (1:100 oranında seyreltilmiş) ilave edilmiştir. Elde edilen süspansiyon, manyetik karıştırıcıda 3 dakika süreyle karıştırılarak homojenize edilmiştir. Daha sonra süspansiyon, 0.45 μ m'lik filtre kullanarak şırınga yardımıyla süzülerek HPLC vial'ine aktarılmıştır. Hazırlanan örnekler, otomatik örnekleyici aracılığıyla HPLC cihazına enjekte edilmiştir.

Organik asit analizinde izokratik koşullar altında çalışma gerçekleştirilmiştir. Mobil faz olarak 0.01 N seyreltik sülfürik asit (H₂SO₄) kullanılmıştır. Ayırma işlemi, 45 °C kolon sıcaklığında, 0.4 mL/dk akış hızıyla gerçekleştirilmiştir. Dedeksiyon işlemi, fotodiyot dizi dedektör (PAD) ile 210–244 nm dalga boyu aralığında eş zamanlı olarak izlenmiştir. Analizlerde enjeksiyon hacmi 20 μ L olarak uygulanmıştır.

Kromatografik Koşullar:

- Dedektör :Fotodiyot Dizi Dedektör (PAD)
- Mobil Faz :0.01 N H₂SO₄ çözeltisi
- Kolon : Coregel ORH 801, 300 × 6.5 mm, ICE-ORH-801
- Kolon Sıcaklığı : 45 °C
- Akış Hızı : 0.4 mL/dk (izokratik akış)
- Dalga Boyu : 210–244 nm
- Enjeksiyon Hacmi: 20 µL

Organik asitlerin tanımlanması ve miktar tayini için, ilgili ticari standart çözeltilerle kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş (Ek-C); sonuçlar mg/100 g kurumadde cinsinden ifade edilmiştir. Tüm analizler üç tekerrürlü olarak yürütülmüş, veriler ortalama ± standart sapma şeklinde verilmiştir.

3.2.2.16. Şeker Bileşenlerinin Dağılımının Belirlenmesi

Taze ve kurutulmuş portakal numunelerindeki glikoz, fruktoz, sakkaroz ve sorbitol gibi çözünür şekerlerin tanımlanması ve kantitatif tayini amacıyla yüksek performanslı sıvı kromatografi (HPLC) yöntemi uygulanmıştır. Yöntem, Slatnar vd. (2011) tarafından geliştirilen protokol esas alınarak modifiye edilmiştir. Analizlerde Concise Separation CarboSep CHO-87 kolon ve refraktif indeks dedektör (RID) kullanılmıştır.

Kurutulmuş portakal örnekleri, analiz öncesi IKA A11 Basic analitik öğütücüde toz haline getirilmiştir. Her bir örnekten 1.00 g tartılmış ve üzerine 10 mL ultra saf su (HPLC-grade) eklenerek manyetik karıştırıcıda 5 dakika süreyle homojenize edilmiştir. Elde edilen süspansiyon, 10 °C sıcaklıkta, 9000 rpm’de, 10 dakika süreyle santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonrası elde edilen berrak üst faz, 0.2 µm’lik membran filtre ile şırınga yardımıyla süzölmüş ve HPLC vial’ine aktarılmıştır. Hazırlanan örnekler, otomatik örnekleyici aracılığıyla HPLC cihazına enjekte edilmiştir.

Kromatografik Koşullar:

- Dedektör : Refraktif indeks (RID)
- Mobil Faz : Ultra saf su

- Kolon : Concise Separation CarboSep CHO-87 kolon
- Kolon sıcaklığı : 84°C
- Akış hızı : 0.6 ml/dk
- Çalışma süresi : 30 dk
- Enjeksiyon hacmi : 20 µl'dir.

Analizler sırasında elde edilen kromatogramlar üzerinden glikoz, fruktoz, sakkaroz ve sorbitol pik alanları değerlendirilmiş, her bir şeker bileşiği için ticari standartlar kullanılarak kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur (Ek-D). Elde edilen konsantrasyonlar, mg/100 g kurumadde cinsinden hesaplanmış ve tüm analizler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde verilmiştir.

3.2.2.17. Hidroksimetilfurfural (HMF) Tayini

Taze ve kurutulmuş portakal numunelerinin hidroksimetilfurfural (HMF) içeriği, kantitatif olarak yüksek performanslı sıvı kromatografi (HPLC) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Analizlerde, Tontul ve Topuz (2017) tarafından bildirilen metot temel alınmış ve çalışma koşullarına uygun olarak modifiye edilmiştir.

Analiz öncesinde portakal örnekleri, IKA A11 Basic analitik öğütücüde toz haline getirilmiştir. Her bir örnekten 0.50 g tartılmış, üzerine 50 mL HPLC-grade saf su ilave edilerek 100 kat seyreltilmiş bir çözelti hazırlanmıştır. Karışım, manyetik karıştırıcıda 3 dakika süreyle homojenize edilmiştir. Elde edilen süspansiyon, 0.45 µm'lik membran filtre ile şırınga yardımıyla süzölmüş ve süzöntü HPLC vial'lerine aktarılmıştır. Örnekler, otomatik örnekleyici (autosampler) ile HPLC sistemine enjekte edilmiştir.

Kantitatif analiz için HMF standart çözeltileri, HPLC-grade saf su kullanılarak 5, 10, 20, 30, 40 ve 50 mg/L konsantrasyonlarında hazırlanmıştır. Bu standart çözeltiler, aynı HPLC koşullarında analiz edilerek elde edilen pik alanları yardımıyla kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Kalibrasyon eğrisine ait doğrusal regresyon denklemi kullanılarak örneklerdeki HMF miktarları kantitatif olarak hesaplanmıştır (Ek-E). Sonuçlar, mg/100 g kurumadde cinsinden ifade edilmiştir.

Kromatografik Koşullar:

- Dedektör : PAD Dedektör
- Mobil Faz : Metanol : Su (10:90)
- Kolon : Capcell Pack C18 MGII kolonu
- Kolon sıcaklığı : 40 °C
- Akış hızı : 1 mL/dk
- Çalışma Süresi : 30 dk
- Enjeksiyon hacmi : 20 µl' dir.

Tüm örnekler üç paralel olarak analiz edilmiş; sonuçlar ortalama $\pm$ standart sapma olarak değerlendirilmiştir.

3.2.3. Deneysel Tasarım ve Yöntem

Bu çalışmada, Washington Navel ve Valensiya portakal çeşitlerinin farklı kurutma yöntemleri altında kurutulması sürecinde ürün kalitesi üzerinde etkili olan işlem parametrelerinin optimize edilmesi amacıyla Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology, RSM) kullanılmıştır. Deneysel tasarım, her iki portakal çeşidi için iki farklı kurutma tekniğini (vakum mikrodalga kurutma ve tepsili sıcak hava kurutma) kapsamaktadır. Bu kapsamda üç faktör (bağımsız değişken) değerlendirilmiş olup; bu faktörler vakum mikrodalga kurutma için mikrodalga gücü (kW), kurutma sıcaklığı (°C) ve dilim kalınlığı (mm) olarak belirlenmiştir. Tepsili kurutma yönteminde ise faktörler hava hızı (m/s), kurutma sıcaklığı (°C) ve dilim kalınlığı (mm) şeklindedir.

Deneylerde yanıt değişkenleri olarak kurutma hızı (m/s), rehidrasyon kapasitesi ve b* renk parametresi ölçülmüştür. Tüm deneyler, 17 koşullu deney setiyle Box-Behnken tipi tasarım temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan faktöriyel düzende her koşulda üç yanıt parametresi ölçülmüş, elde edilen veriler optimizasyon analizine tabi tutulmuştur.

Washington Navel portakallarının vakum mikrodalga kurutma yöntemiyle işlenmesine ilişkin deneysel tasarım ve yanıtlar Tablo 3.4.'de; aynı çeşit portakalın tepsili sıcak hava kurutucuda kurutulmasıyla elde edilen veriler ise Tablo 3.5.'de verilmiştir. Benzer şekilde, Valensiya portakallarının vakum mikrodalga kurutucuda kurutulmasıyla elde edilen veriler Tablo 3.6.'da; tepsili kurutma yöntemine ilişkin bulgular ise Tablo 3.7.'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Washington navel portakalının vakum mikrodalga kurutucuda kurutulmasına ilişkin RSM deneme planı ve yanıt değişkenleri

Std	Run	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
		A: Güç (KW)	B: Sıcaklık (°C)	C: Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x saat)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* Değeri
13	1	3	70	4			
1	2	2	60	4			
5	3	2	70	2			
11	4	3	60	6			
8	5	4	70	6			
9	6	3	60	2			
4	7	4	80	4			
17	8	3	70	4			
16	9	3	70	4			
15	10	3	70	4			
7	11	2	70	6			
2	12	4	60	4			
3	13	2	80	4			
14	14	3	70	4			
12	15	3	80	6			
10	16	3	80	2			
6	17	4	70	2			

Tablo 3.5. Washington navel portakalının tepsili kurutucuda kurutulmasına ilişkin RSM deneme planı ve yanıt değişkenleri

Std	Run	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
		A: Hava Hızı (m/s)	B: Sıcaklık (°C)	C: Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x saat)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* Değeri
8	1	2.0	70	6			
9	2	1.5	60	2			
10	3	1.5	80	2			
16	4	1.5	70	4			
2	5	2.0	60	4			
1	6	1.0	60	4			
14	7	1.5	70	4			
5	8	1.0	70	2			
7	9	1.0	70	6			
3	10	1.0	80	4			
15	11	1.5	70	4			
6	12	2.0	70	2			
13	13	1.5	70	4			
11	14	1.5	60	6			
4	15	2.0	80	4			
17	16	1.5	70	4			
12	17	1.5	80	6			

Tablo 3.6. Valencia portakalının vakum mikrodalga kurutucuda kurutulmasına ilişkin RSM deneme planı ve yanıt değişkenleri

Std	Run	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
		A: Güç (KW)	B: Sıcaklık (°C)	C: Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x saat)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* Değeri
13	1	3	70	4			
1	2	2	60	4			
5	3	2	70	2			
11	4	3	60	6			
8	5	4	70	6			
9	6	3	60	2			
4	7	4	80	4			
17	8	3	70	4			
16	9	3	70	4			
15	10	3	70	4			
7	11	2	70	6			
2	12	4	60	4			
3	13	2	80	4			
14	14	3	70	4			
12	15	3	80	6			
10	16	3	80	2			
6	17	4	70	2			

Tablo 3.7. Valencia portakalının tepsili kurutucuda kurutulmasına ilişkin RSM deneme planı ve yanıt değişkenleri

Std	Run	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
		A: Güç (KW)	B: Sıcaklık (°C)	C: Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x saat)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	a* Değeri
8	1	2.0	70	6			
9	2	1.5	60	2			
10	3	1.5	80	2			
16	4	1.5	70	4			
2	5	2.0	60	4			
1	6	1.0	60	4			
14	7	1.5	70	4			
5	8	1.0	70	2			
7	9	1.0	70	6			
3	10	1.0	80	4			
15	11	1.5	70	4			
6	12	2.0	70	2			
13	13	1.5	70	4			
11	14	1.5	60	6			
4	15	2.0	80	4			
17	16	1.5	70	4			
12	17	1.5	80	6			

Her iki portakal çeşidi için, kurutma yöntemi ve koşullarına göre elde edilen veriler SPSS ve Design Expert yazılımları ile analiz edilmiştir. Varyans analizleri (ANOVA), model uygunluğu, etkileşimler ve optimum kurutma koşullarının belirlenmesi bu yazılımlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm lmler  tekerrürlü olarak yapılmış ve elde edilen ortalama değerler değerlendirmeye alınmıştır.



4. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Washington Navel Portakal Dilimlerinde Vakumlu Mikrodalga ve Tepsili Kurutma Sistemlerinde Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu

4.1.1. Washington Navel Portakal Dilimlerinin Vakum Mikrodalga Kurutucudaki Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu

Bu kısımda, Washington Navel portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutma sistemi altında işlenmesi sırasında mikrodalga gücü, sıcaklık ve dilim kalınlığı gibi üç temel proses parametresinin kurutma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir (Tablo 4.1.).

Tablo 4.1. Washington Navel Portakal Dilimlerinin Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Kurutma Performansı Analizi

Numune ⁽¹⁾	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
	A: Güç (KW)	B: Sıcaklık (°C)	C: Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x saat)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* Değeri
VM1	3	70	4	3.968	4.209	43.991
VM2	2	60	4	4.321	4.300	42.454
VM3	2	70	2	7.634	4.888	41.567
VM4	3	60	6	2.220	4.051	39.315
VM5	4	70	6	4.332	4.225	43.593
VM6	3	60	2	8.298	4.729	43.733
VM7	4	80	4	7.337	4.074	36.842
VM8	3	70	4	4.465	4.071	43.887
VM9	3	70	4	4.434	4.100	41.373
VM10	3	70	4	4.877	4.112	38.211
VM11	2	70	6	4.262	3.899	40.547
VM12	4	60	4	5.735	4.316	45.553
VM13	2	80	4	5.567	4.260	41.009
VM14	3	70	4	6.402	4.007	41.637
VM15	3	80	6	4.191	3.813	47.791
VM16	3	80	2	9.482	4.857	33.410
VM17	4	70	2	13.359	4.693	35.549

⁽¹⁾ VM = Numune kodu

Deneyisel çalışma, yanıt yüzey yöntemi (Response Surface Methodology, RSM) yaklaşımı temel alınarak ve Box-Behnken tasarımı çerçevesinde planlanan toplam 17 koşulda

yürütülmüştür. Denemelerde, kurutma hızı (kg H₂O/kg kurumadde x saat), rehidrasyon kapasitesi (g/g) ve b* renk değeri olmak üzere üç kritik kalite parametresi yanıt değişkeni olarak değerlendirilmiştir. Deneysel koşullar ve bu koşullara karşılık gelen yanıtlar Tablo 4.1.'de verilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, optimum kurutma koşullarının belirlenmesi amacıyla RSM'ye dayalı çok değişkenli istatistiksel analiz ve optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Deneysel veriler ile oluşturulan ikinci dereceden (kuadratik) model arasındaki istatistiksel uyumu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Optimizasyon çalışması kapsamında, yanıt değişkenlerine yönelik gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda elde edilen ikinci dereceden (kuadratik) polinomsal modeller, kodlanmış bağımsız değişkenler kullanılarak oluşturulmuş ve ilgili matematiksel ifadeler Eşitlik 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. Bu modeller, kurutma sürecine ilişkin işlem parametreleri ile yanıt değişkenleri (kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b* renk değeri) arasındaki ilişkiyi nicel olarak tanımlamakta ve istatistiksel açıdan anlamlı bir tahmin aracı olarak kullanılmaktadır.

$$\text{Kurutma Hızı} = +4.83 + 1.12*A + 0.7502*B - 2.97*C + 0.0891*AB - 1.41*AC + 0.1969*BC + 1.13*A^2 - 0.2191*B^2 + 1.44*C^2 \quad (4.1)$$

$$\text{Rehidrasyon Kapasitesi} = +4.10 - 0.0050*A - 0.0492*B - 0.3973*C - 0.0505*AB + 0.1302*AC - 0.0915*BC + 0.1010*A^2 - 0.0372*B^2 + 0.2256*C^2 \quad (4.2)$$

$$b^* \text{ değeri} = +41.20 - 0.5050*A - 1.50*B + 2.12*C - 1.82*AB + 2.27*AC + 4.70*BC \quad (4.3)$$

Bağımsız Değişkenler; A = Güç (KW) B= Sıcaklık (°C) C= Dilim Kalınlığı (mm)

Washington Navel portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutma koşulları altında kurutulmasıyla elde edilen deneysel veriler, üç temel kalite göstergesi olan kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b* renk parametresi açısından istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Her bir yanıt değişkeni için geliştirilen ikinci dereceden modellerin geçerliliği, varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiş ve modellerin anlamlılığı istatistiksel olarak ortaya konmuştur.

Kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b^* renk parametresi için elde edilen determinasyon katsayısı (R^2) sırasıyla 0.9601, 0.9737 ve 0.8249 olarak belirlenmiş; bu değerler, modellerin verileri yüksek düzeyde açıkladığını göstermektedir. Ayrıca, modellerin anlamlılığı düşük p-değerleri (sırasıyla 0.0004, 0.0001 ve 0.0025) ile istatistiksel olarak desteklenmiştir. Varyasyon katsayıları (%CV) ise sırasıyla %13.51, %1.88 ve %4.72 olup, kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunmuştur. F-değerleri (18.70, 28.80 ve 7.85) ve ilgili p-değerleri, kurulan modellerin her üç yanıt değişkeni için de istatistiksel olarak anlamlı ve güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 4.2 Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı ANOVA Analizi

Kaynak	Hata Kareler Toplamı	df	Ortalama Hata Karesi	F- değeri	p- değeri
Kurutma Hızı					
Model	108.24	9	12.03	18.70	0.0004
Residual (Kalıntı)	4.50	7	0.6431		
Lack of Fit	0.9972	3	0.3324	0.3794	0.7740
Pure Error (Saf Hata)	3.50	4	0.8761		
Toplam	112.74	16			
R ² = 0.9601					
CV%=13.51					
Rehidrasyon Kapasitesi					
Model	1.67	9	0.1861	28.80	0.0001
Residual (Kalıntı)	0.0452	7	0.0065		
Lack of Fit	0.0237	3	0.0079	1.47	0.3493
Pure Error (Saf Hata)	0.0215	4	0.0054		
Toplam	1.72	16			
R ² = 0.9737					
CV%=1.88					
b^* değeri					
Model	178.21	6	29.70	7.85	0.0025
Residual (Kalıntı)	37.82	10	3.78		
Lack of Fit	15.58	6	2.60	0.4669	0.8068
Pure Error (Saf Hata)	22.24	4	5.56		
Toplam	216.03	16			
R ² = 0.8249					
CV%=4.72					

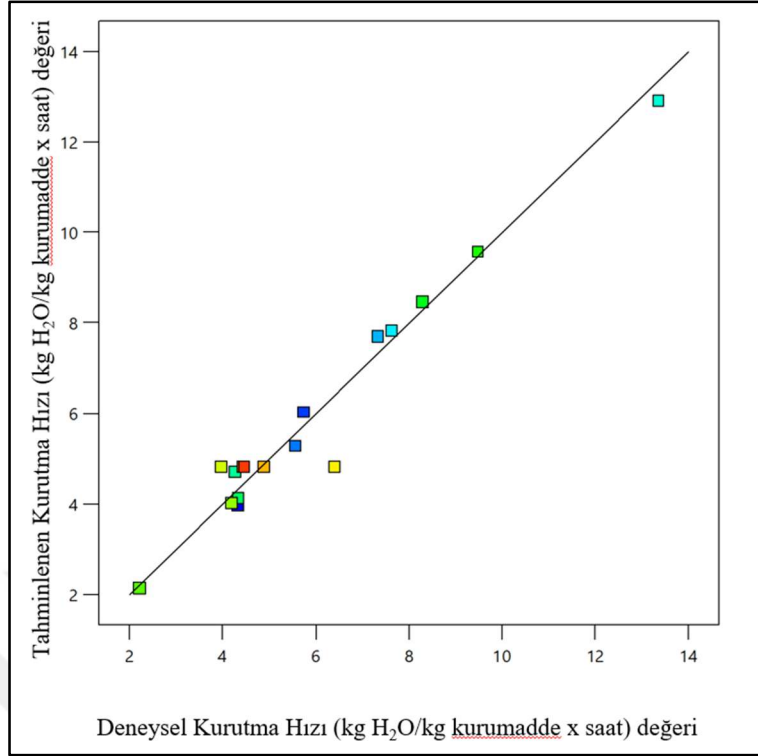
Bir regresyon modelinin gelecekteki tahminlerde güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi için Adequate Precision (Yeterli Duyarlılık) değerinin 4'ün üzerinde olması gerektiği literatürde genel kabul görmektedir. Bu çalışmada geliştirilen modellerin her biri için bu değer oldukça yüksek çıktığı gözlemlenmiştir: kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b^* renk parametresi yanıtlarına ait modellerde sırasıyla 17.5177, 18.4004 ve 10.9351 değerinde Adequate Precision hesaplanmıştır. Bu yüksek değerler, modellerin istatistiksel olarak güvenilir olduğunu ve geniş bir sinyal-gürültü oranına sahip olduklarını göstermektedir.

Buna ek olarak, model varsayımlarının geçerliliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen kalıntı (residual) analizleri, model ile gözlemsel veriler arasındaki uygunluğu değerlendirmek açısından kritik rol oynamaktadır. Elde edilen kalıntı grafikleri, artıkların normal dağılım varsayımını karşıladığını, sabit varyans sağladığını ve sistematik bir sapma içermediğini ortaya koymuş; bu bulgular modelin istatistiksel geçerliliğini desteklemiştir.

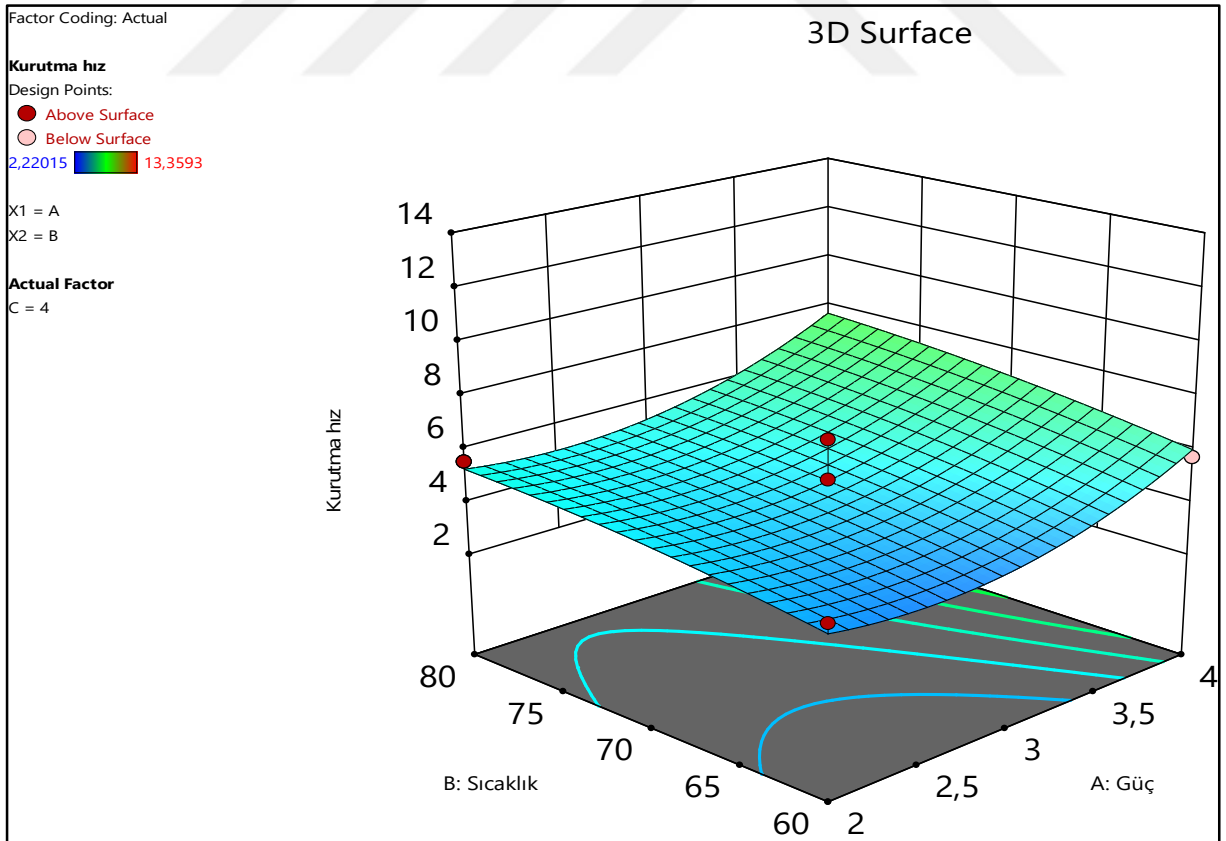
Kurutma hızına ilişkin geliştirilen modelin Lack of Fit (Uygunsuzluk Testi) p-değeri 0.774 olarak elde edilmiş olup, bu değer modelin kalıntılarla anlamlı düzeyde farklılık göstermediğini ve dolayısıyla modelin deneysel verilere yüksek derecede uyum sağladığını kanıtlamaktadır. Ayrıca, tahmin edilen değerler ile deneysel veriler arasındaki ilişkiyi gösteren regresyon grafiği (Şekil 4.1.), modelin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.2.'de sunulan üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği, mikrodalga gücü (A) ve kurutma sıcaklığı (B) parametrelerinin kurutma hızı üzerindeki etkilerini nicel olarak göstermektedir. Renk skalası, farklı kurutma hızı seviyelerini temsil etmekte olup; açık mavi ve turkuaz renkler düşük kurutma hızı değerlerini (~ 2.2 m/sn), yeşil tonlar orta düzey değerleri ve sarıdan kırmızıya yönelen tonlar yüksek kurutma hızı seviyelerini (~ 13.4 m/sn) ifade etmektedir.

Model üzerinden elde edilen yüzey profiline göre, hem mikrodalga gücünün hem de sıcaklığın artışı, kurutma hızı üzerinde pozitif yönde etkili olmuş; her iki parametredeki artışla birlikte kurutma hızının belirgin şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, vakumlu mikrodalga kurutma koşullarında ısı ve enerji girdisinin artırılmasının, portakal dilimlerinden suyun uzaklaştırılma hızını anlamlı düzeyde iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca yüzey üzerindeki düzgün gradyanlar, modelin sistematik bir etkileşim örüntüsü sunduğunu ve deneysel verilerle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.

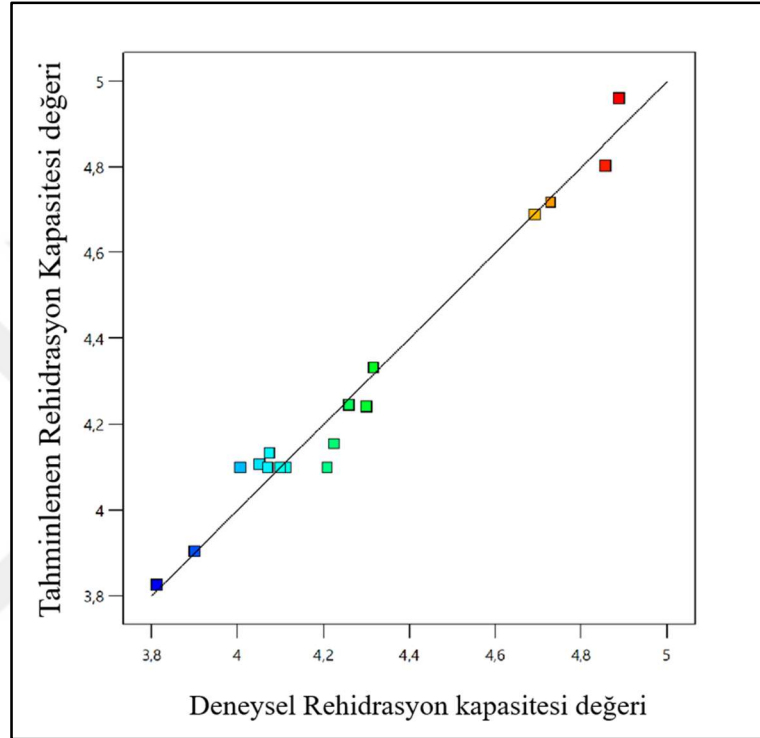


Şekil 4.1. Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızlarının DeneySEL ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 4.2. Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızı Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Şekil 4.3., Washington Navel portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutma koşulları altında elde edilen rehidrasyon kapasitesi değerlerinin, deneysel ölçümler ile yanıt yüzey metoduna (RSM) dayalı model tahminleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Verilerin 45° referans doğrusu boyunca dağılım göstermesi, model tarafından hesaplanan rehidrasyon kapasitesi değerlerinin deneysel bulgularla yüksek düzeyde örtüştüğünü ortaya koymaktadır.

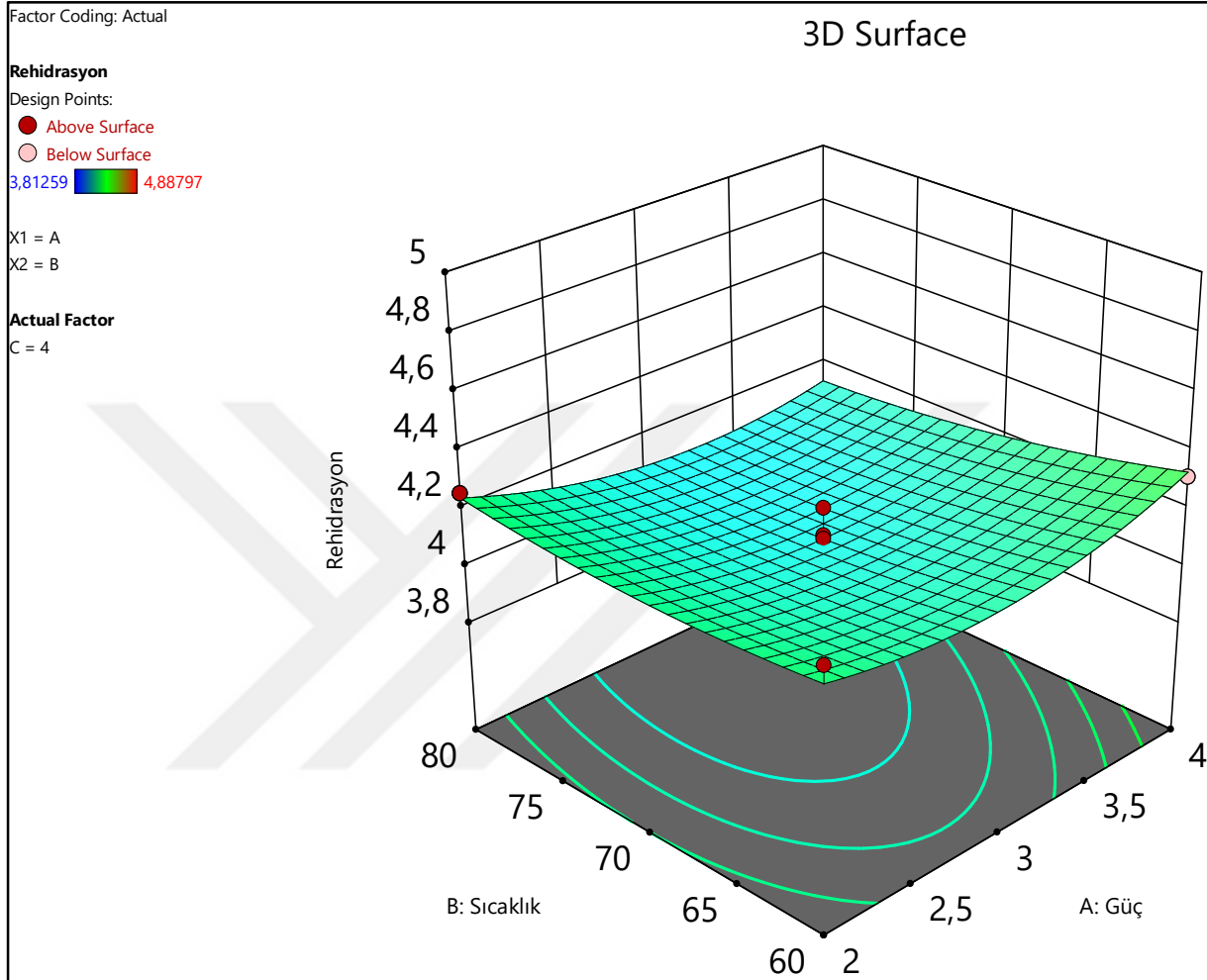


Şekil 4.3. Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda modelin determinasyon katsayısı (R^2) 0.9737 olarak bulunmuş, bu da modelin rehidrasyon kapasitesine ilişkin varyasyonu %97.37 oranında açıkladığını göstermektedir. Ayrıca varyasyon katsayısının (CV%) %1.88 gibi oldukça düşük bir değerde olması, modelin hem güvenilir hem de tutarlı olduğunu desteklemektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen modelin rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkileri doğru şekilde öngörebildiğini ve tahmin performansının yüksek olduğunu kanıtlamaktadır.

Şekil 4.4.'te sunulan üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği, mikrodalga gücü (A) ve sıcaklık (B) faktörlerinin rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkileşimlerini göstermektedir. Grafik, RSM modellemesi ile elde edilmiş olup, yüzeyin eğimi ve kontur çizgileri söz konusu faktörlerin

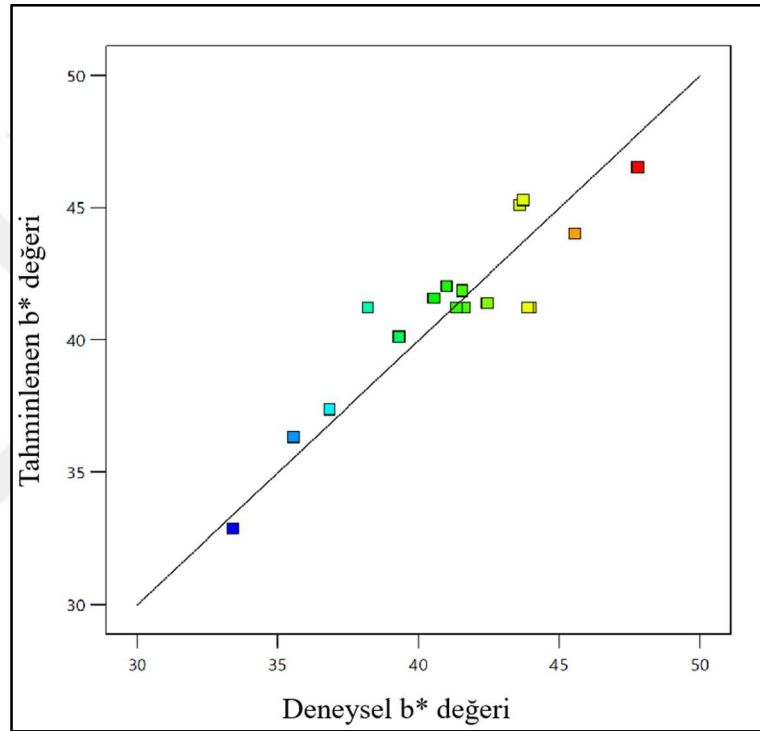
yanıt değişkeni üzerindeki etkisini görsel olarak ortaya koymaktadır. Renk skalası, düşükten yükseğe doğru değişen rehidrasyon kapasitesi değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 4.4. Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesi Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Grafikten de görüleceği üzere, hem mikrodalga gücü hem de sıcaklık parametresi rehidrasyon kapasitesini etkilemektedir; ancak bu etkinin doğrusal olmadığı ve belirli bir optimum bölgeye işaret ettiği gözlemlenmiştir. Özellikle orta düzeydeki sıcaklık (yaklaşık 70 °C) ve mikrodalga gücü (yaklaşık 3.0–3.5 kW) seviyelerinde, rehidrasyon kapasitesinin maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum, aşırı yüksek sıcaklık ve güç seviyelerinin ürünün iç yapısında meydana getirebileceği bozulmalar nedeniyle su tutma kapasitesini azaltabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, bu parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, ürün kalitesinin korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Şekil 4.5., vakumlu mikrodalga kurutma koşulları altında kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait b^* renk parametresinin, deneysel olarak ölçülen ve RSM (Yanıt Yüzey Metodu) ile tahmin edilen değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Verilerin 45° referans doğrusu etrafında kümelenmesi, modelin deneysel verilerle anlamlı bir uyum sağladığını ortaya koymaktadır. Ancak önceki iki yanıt değişkenine kıyasla verilerin referans doğrusundan daha fazla sapma göstermesi, modelin b^* renk parametresini açıklamada nispeten daha sınırlı bir doğrulukla çalıştığını göstermektedir.

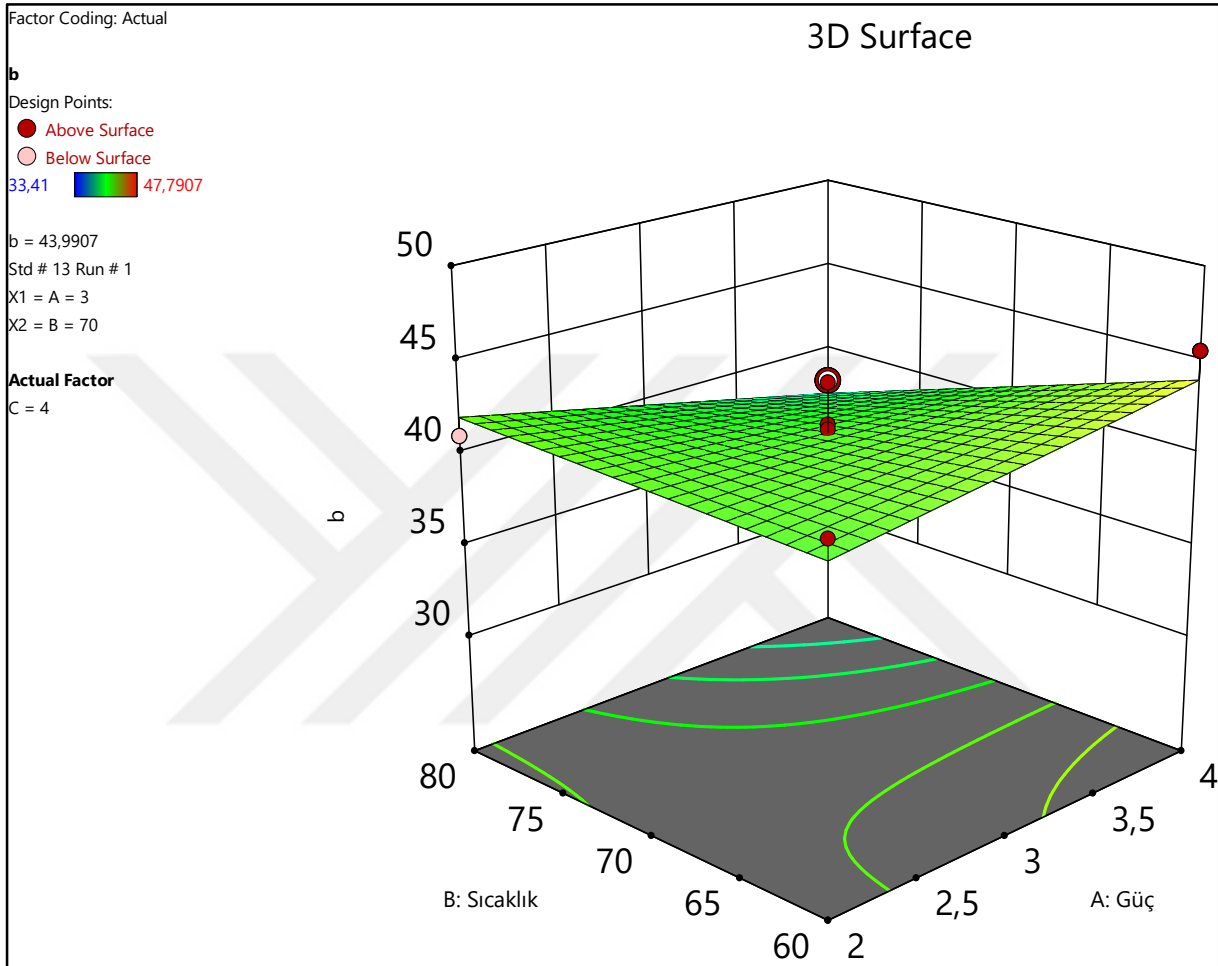


Şekil 4.5. Washington Navel Portakallarının Vakumlu Mikrodalgada Kurutulmasında b^* Renk Değerinin DeneySEL ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Bu durum, modelin determinasyon katsayısının ($R^2 = 0.8249$) diğer yanıt değişkenlerine göre daha düşük olmasına ve varyasyon katsayısının ($CV\% = 4.72$) daha yüksek olmasına paralel olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($p = 0.0025$) ve tahmin kabiliyetinin yeterli düzeyde bulunduğu ifade edilebilir. Sonuçlar, renk değişiminin daha karmaşık mekanizmalarla belirlendiğini ve işlem parametrelerinin yanında muhtemelen diğer faktörlerin de etkili olabileceğini düşündürmektedir.

Şekil 4.6.'den de görülebileceği gibi, üç boyutlu yanıt yüzeyi ve kontur eğrileri, mikrodalga gücü (A) ve sıcaklık (B) parametrelerinin b^* renk değeri üzerindeki etkisini görsel olarak ortaya

koymaktadır. Renk skalası, ürünün sarı renk yoğunluğunu ifade eden b^* değerinin büyüklüğünü yansıtmaktadır. Grafik incelendiğinde, mavi tonlardan yeşil ve sarıya doğru geçişin, b^* değerinin arttığını, yani ürünün daha sarı bir ton kazandığını göstermektedir.



Şekil 4.6. Washington Navel Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında b^* Renk Değeri Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Model yüzeyinde gözlemlenen eğilimler, mikrodalga gücü ve sıcaklık değerlerinde artışa bağlı olarak b^* değerinin genel olarak yükseldiğini ve bu artışın özellikle belirli bir güç-sıcaklık etkileşim aralığında daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Bu durum, yüksek sıcaklık ve güç seviyelerinde Maillard reaksiyonları ve karamelizasyon gibi ısı işlemlerin renk gelişimi üzerinde etkili olabileceğini kanısına varılmıştır.

Bu model verileri doğrultusunda gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde, kurutma hızının artırılması, rehidrasyon kapasitesinin iyileştirilmesi ve b^* renk değerinin maksimize edilmesi

hedeflenmiştir. Uygulanan istenilirlik (desirability) fonksiyonu sonucunda yazılım tarafından önerilen 59 farklı alternatif çözüm noktası belirlenmiş olup, bu çözümlere ilişkin ayrıntılar Tablo 4.3.'te verilmiştir. En yüksek istenilirlik değerine sahip çözüm noktası tercih edilmiş ve bu noktada işlem parametreleri mikrodalga gücü 4.0 kW, sıcaklık 60 °C ve dilim kalınlığı 2.0 mm olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, hem ürün kalitesi hem de işlem verimliliği açısından optimum kurutma koşullarının başarılı bir şekilde tanımlandığını göstermektedir.

Tablo 4.3. Washington Navel Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Güç (KW)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* değeri	İstenilirlik (Desirability)	
1	4.000	60.000	2.000	12.042	4.734	44.326	0.831	Seçildi
2	3.993	60.000	2.000	12.008	4.733	44.333	0.830	
3	4.000	60.110	2.000	12.054	4.733	44.238	0.829	
4	3.984	60.000	2.000	11.969	4.732	44.341	0.828	
5	3.973	60.000	2.000	11.915	4.731	44.352	0.827	
6	4.000	60.072	2.023	11.963	4.726	44.265	0.825	
7	3.948	60.000	2.000	11.803	4.728	44.375	0.823	
8	3.940	60.000	2.000	11.765	4.727	44.383	0.822	
9	4.000	60.360	2.009	12.048	4.728	44.037	0.822	
10	3.930	60.000	2.000	11.719	4.726	44.393	0.821	
11	4.000	60.505	2.010	12.058	4.726	43.921	0.819	
12	3.913	60.000	2.000	11.640	4.724	44.409	0.818	
13	4.000	60.792	2.001	12.123	4.727	43.691	0.815	
14	3.880	60.000	2.000	11.494	4.721	44.441	0.814	
15	4.000	60.899	2.000	12.137	4.726	43.606	0.813	
16	3.859	60.000	2.000	11.400	4.719	44.461	0.811	
17	4.000	61.074	2.011	12.115	4.722	43.466	0.807	
18	3.815	60.000	2.000	11.209	4.715	44.503	0.805	
19	3.702	60.000	2.000	10.742	4.708	44.610	0.792	
20	4.000	60.006	2.212	11.268	4.670	44.289	0.788	
21	3.642	60.000	2.000	10.502	4.705	44.668	0.784	
22	4.000	60.000	2.263	11.087	4.655	44.285	0.778	
23	3.567	60.000	2.000	10.217	4.702	44.739	0.776	

Tablo 4.3. (Devamı). Washington Navel Portakalında Vakum Mikrodalga Kurutmada RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Güç (KW)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* değeri	İstenilirlik (Desirability)
24	4.000	64.145	2.000	12.453	4.706	41.003	0.739
25	2.000	60.000	2.000	7.148	4.903	46.235	0.733
26	2.008	60.000	2.000	7.150	4.901	46.228	0.733
27	2.018	60.000	2.000	7.152	4.898	46.218	0.733
28	2.028	60.000	2.000	7.155	4.895	46.208	0.733
29	2.038	60.000	2.000	7.157	4.892	46.199	0.733
30	2.051	60.000	2.000	7.161	4.889	46.187	0.733
31	3.053	60.000	2.000	8.598	4.713	45.230	0.733
32	2.093	60.000	2.000	7.176	4.877	46.147	0.731
33	3.006	60.000	2.000	8.481	4.717	45.275	0.731
34	2.059	60.797	2.000	7.234	4.888	45.822	0.730
35	2.110	60.010	2.000	7.183	4.873	46.126	0.730
36	2.000	60.000	2.028	7.083	4.890	46.167	0.729
37	2.145	60.000	2.000	7.199	4.864	46.097	0.728
38	2.948	60.000	2.000	8.340	4.722	45.331	0.728
39	2.154	60.001	2.000	7.204	4.861	46.088	0.727
40	2.218	60.000	2.000	7.243	4.845	46.027	0.724
41	2.254	60.000	2.000	7.269	4.837	45.993	0.723
42	2.000	62.430	2.000	7.355	4.910	45.170	0.722
43	2.278	60.000	2.000	7.288	4.831	45.969	0.722
44	2.790	60.000	2.000	8.002	4.739	45.481	0.721
45	2.297	60.000	2.000	7.304	4.827	45.951	0.721
46	2.342	60.000	2.000	7.345	4.817	45.909	0.720
47	2.489	60.000	2.000	7.511	4.787	45.768	0.718
48	2.531	60.000	2.000	7.567	4.779	45.728	0.718
49	2.000	64.902	2.000	7.538	4.921	44.086	0.708
50	2.000	66.151	2.000	7.621	4.928	43.539	0.699
51	2.000	66.733	2.000	7.657	4.932	43.283	0.695
52	2.000	67.499	2.000	7.702	4.938	42.948	0.689

Tablo 4.3. (Devamı). Washington Navel Portakalında Vakum Mikrodalga Kurutmada RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Güç (KW)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* değeri	İstenilirlik (Desirability)
53	4.000	60.000	2.756	9.427	4.529	44.209	0.687
54	2.000	68.041	2.000	7.732	4.942	42.710	0.684
55	2.000	69.052	2.000	7.786	4.950	42.267	0.675
56	2.000	74.931	2.000	8.007	5.013	39.690	0.610
57	4.000	72.255	3.455	8.550	4.270	38.465	0.440
58	4.000	67.134	4.479	5.842	4.182	42.378	0.412
59	2.000	60.000	4.176	3.813	4.205	40.967	0.302

Belirlenen optimum işlem parametrelerinin doğruluğunu test etmek amacıyla, seçilen koşullarda üç bağımsız doğrulama denemesi gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen deneysel yanıt değerleri ile yanıt yüzey modelinden tahmin edilen teorik değerler karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Washington Navel Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Optimum Kurutma Koşullarında Elde Edilen Deneysel ve Tahmin Edilen Değerlerin Karşılaştırılması

Yanıtlar	Deneysel Veriler	Tahminlenen Veriler
Kurutma Hızı	11.988±0.379	12.042
Rehidrasyon Kapasitesi	4.736±0.105	4.734
b*renk değeri	43.767±0.360	44.326

Tablo 4.4.'te sunulan verilere göre, optimum kurutma koşullarında gerçekleştirilen üç tekrarlı doğrulama denemesinden elde edilen ortalama deneysel sonuçlar ile yanıt yüzey modeli tarafından tahmin edilen teorik değerler karşılaştırılmıştır. Kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b* renk değeri olmak üzere üç temel yanıt değişkeni açısından yapılan değerlendirmede, deneysel ve tahmini veriler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu değerlendirme, her bir yanıt değişkeni için uygulanan tek örnekli t-testi ile gerçekleştirilmiş olup, test sonuçlarına ilişkin ayrıntılı veriler (Ek F)'da verilmiştir.

4.1.2. Washington Navel Portakal Dilimlerinin Tepsili Kurutucudaki Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu

Bu kısımda da, Washington Navel portakal dilimlerinin konvansiyonel tepsili kurutma sistemi ile kurutulmasında uygulanan işlem parametrelerinin optimizasyonu amacıyla Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology, RSM) kullanılmıştır. Deneysel tasarım kapsamında üç bağımsız değişken belirlenmiş; hava hızı 1.0, 1.5 ve 2.0 m/s; kurutma sıcaklığı 60 °C, 70 °C ve 80 °C; dilim kalınlığı ise 2, 4 ve 6 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Toplam 17 farklı koşulda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, kurutma hızı (kg H₂O/kg kurumadde x saat), rehidrasyon kapasitesi (g/g) ve b* renk değeri olmak üzere üç temel yanıt değişkeni değerlendirilmiştir.

Elde edilen veriler doğrultusunda, optimum kurutma koşullarının belirlenmesi amacıyla çok değişkenli regresyon analizleri uygulanmış ve deneysel deneme deseni ile ilgili yanıtlar Tablo 4.5.'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Washington Navel Portakal Dilimlerinin Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Kurutma Performansı Analizi

Numune ⁽¹⁾	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
	A: Hava Hızı (m/s)	B: Sıcaklık (°C)	C: Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x saat)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* Değeri
TK1	2.0	70	6	4.102	0.890	40.760
TK2	1.5	60	2	4.595	2.263	32.285
TK3	1.5	80	2	4.606	2.612	35.927
TK 4	1.5	70	4	4.437	1.268	39.663
TK 5	2.0	60	4	4.077	0.944	35.726
TK 6	1.0	60	4	4.300	0.631	34.540
TK 7	1.5	70	4	4.628	1.274	40.183
TK 8	1.0	70	2	4.478	2.547	33.695
TK 9	1.0	70	6	4.100	0.666	40.179
TK 10	1.0	80	4	3.971	1.491	38.745
TK 11	1.5	70	4	4.385	1.242	38.189
TK 12	2.0	70	2	4.685	2.140	36.079
TK 13	1.5	70	4	4.360	1.152	40.409
TK 14	1.5	60	6	4.222	0.665	39.519
TK 15	2.0	80	4	4.593	1.373	39.725
TK 16	1.5	70	4	4.630	1.211	41.510
TK 17	1.5	80	6	4.141	1.197	40.078

⁽¹⁾ TK = Numune kodu

Washington Navel portakal dilimlerinin tepsili kurutma sistemiyle gerçekleştirilen kurutma işlemlerine ait deneysel veriler ile ikinci dereceden (kuadratik) model arasındaki istatistiksel uyumu değerlendirmek amacıyla yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 4.6.'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı ANOVA Analizi

Kaynak	Hata Kareler Toplamı	df	Ortalama Hata Karesi	F- değeri	p- değeri
Kurutma Hızı					
Model	6.37	9	0.7076	98.57	< 0.0001
Residual (Kalıntı)	0.0503	7	0.0072		
Lack of Fit	0.0402	3	0.0134	5.35	0.0695
Pure Error (Saf Hata)	0.0100	4	0.0025		
Toplam	6.42	16			
R ² = 0.9922					
CV%=6.11					
Rehidrasyon Kapasitesi					
Model	0.7913	9	0.0879	7.32	0.0078
Residual (Kalıntı)	0.0841	7	0.0120		
Lack of Fit	0.0147	3	0.0049	0.2826	0.8363
Pure Error (Saf Hata)	0.0694	4	0.0173		
Toplam	0.8754	16			
R ² = 0.9039					
CV%=2.51					
b* değeri					
Model	116.49	9	12.94	11.38	0.0021
Residual (Kalıntı)	7.96	7	1.14		
Lack of Fit	2.09	3	0.6963	0.4743	0.7169
Pure Error (Saf Hata)	5.87	4	1.47		
Toplam	124.45	16			
R ² = 0.9360					
CV%=2.80					

Optimizasyon çalışması kapsamında, kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b* renk değeri olmak üzere üç temel yanıt değişkenine ilişkin olarak gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda elde edilen ikinci dereceden (kuadratik) polinomsal modellerin matematiksel ifadeleri Eşitlik 4.4, 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Söz konusu modeller, tepsili kurutma sisteminde

uygulanan işlem parametreleri ile yanıt değişkenleri arasındaki ilişkileri nicel olarak tanımlamakta ve bu parametrelerin süreç üzerindeki etkilerinin öngörülmesinde istatistiksel bir araç olarak kullanılmaktadır.

$$\text{Kurutma Hızı} = +1.23 + 0.0015*A + 0.2711*B - 0.7681*C - 0.1079*AB + 0.1577*AC + 0.0459*BC - 0.1216*A^2 + 0.0021*B^2 + 0.4529*C^2 \quad (4.4)$$

$$\text{Rehidrasyon Kapasitesi} = +4.49 + 0.0760*A + 0.0147*B - 0.2250*C + 0.2112*AB - 0.0513*AC - 0.0230*BC - 0.1514*A^2 - 0.1014*B^2 + 0.0048*C^2 \quad (4.5)$$

$$b^* \text{ değeri} = +39.99 + 0.6413*A + 1.55*B + 2.82*C - 0.0516*AB - 0.4505*AC - 0.7708*BC - 1.04*A^2 - 1.77*B^2 - 1.27*C^2 \quad (4.6)$$

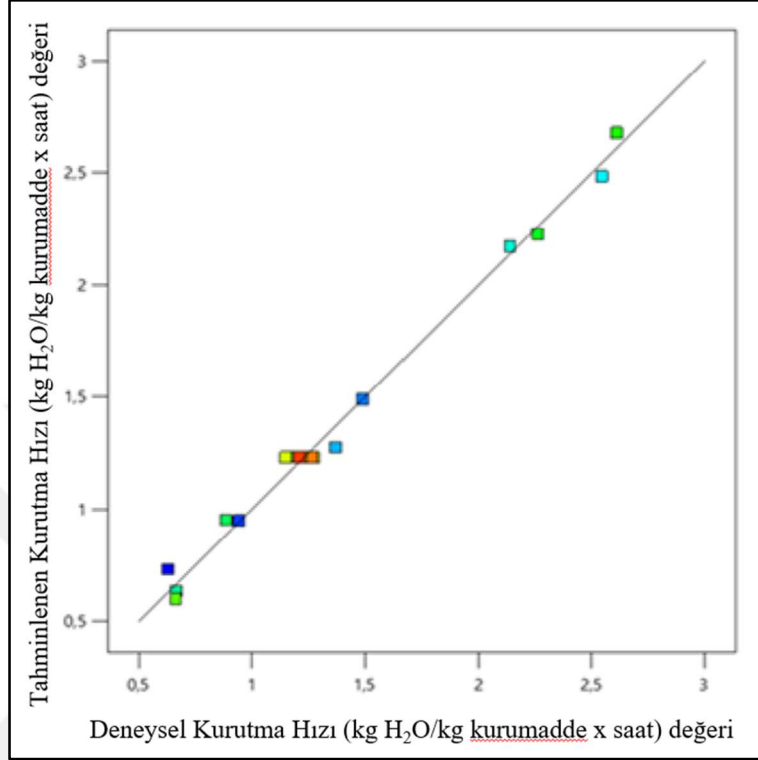
A = Hava Hızı (m/sn) B= Sıcaklık (°C) C= Dilim Kalınlığı (mm)

Tepsili kurutma sistemi için kurutma hızı yanıt değişkenine ilişkin geliştirilen modelin istatistiksel anlamlılığı varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiş olup, elde edilen F-değeri 98.57 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek F-değeri, modelin yalnızca rastlantısal varyasyonla açıklanma olasılığının %0.01'den daha düşük olduğunu ($p < 0.0001$) göstermekte ve modelin istatistiksel açıdan son derece anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca modelin determinasyon katsayısı ($R^2 = 0.9922$) olup, bu değer kurulan modelin toplam varyansın %99.22'sini açıkladığını göstermekte ve modelin yüksek derecede açıklayıcı güce sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Modelin uygunluk düzeyini test etmek amacıyla gerçekleştirilen “Lack of Fit” analizinde elde edilen p-değeri 0.0695 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, model ile kalıntılar arasında anlamlı bir farklılık olmadığını ve modelin deneysel verilere iyi uyum sağladığını göstermektedir. Ayrıca, tahmin edilen ve gözlenen değerler arasındaki ilişkiyi görsel olarak gösteren regresyon grafiği (Şekil 4.7.), modelin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.8.'de de sunulan üç boyutlu yanıt yüzeyi, Washington Navel portakal dilimlerinin tepsili kurutma sisteminde kurutulması sırasında hava hızı (A) ve sıcaklık (B) değişkenlerinin kurutma hızı üzerindeki etkisini göstermektedir. Yüzey üzerindeki renk skalası, kurutma hızı

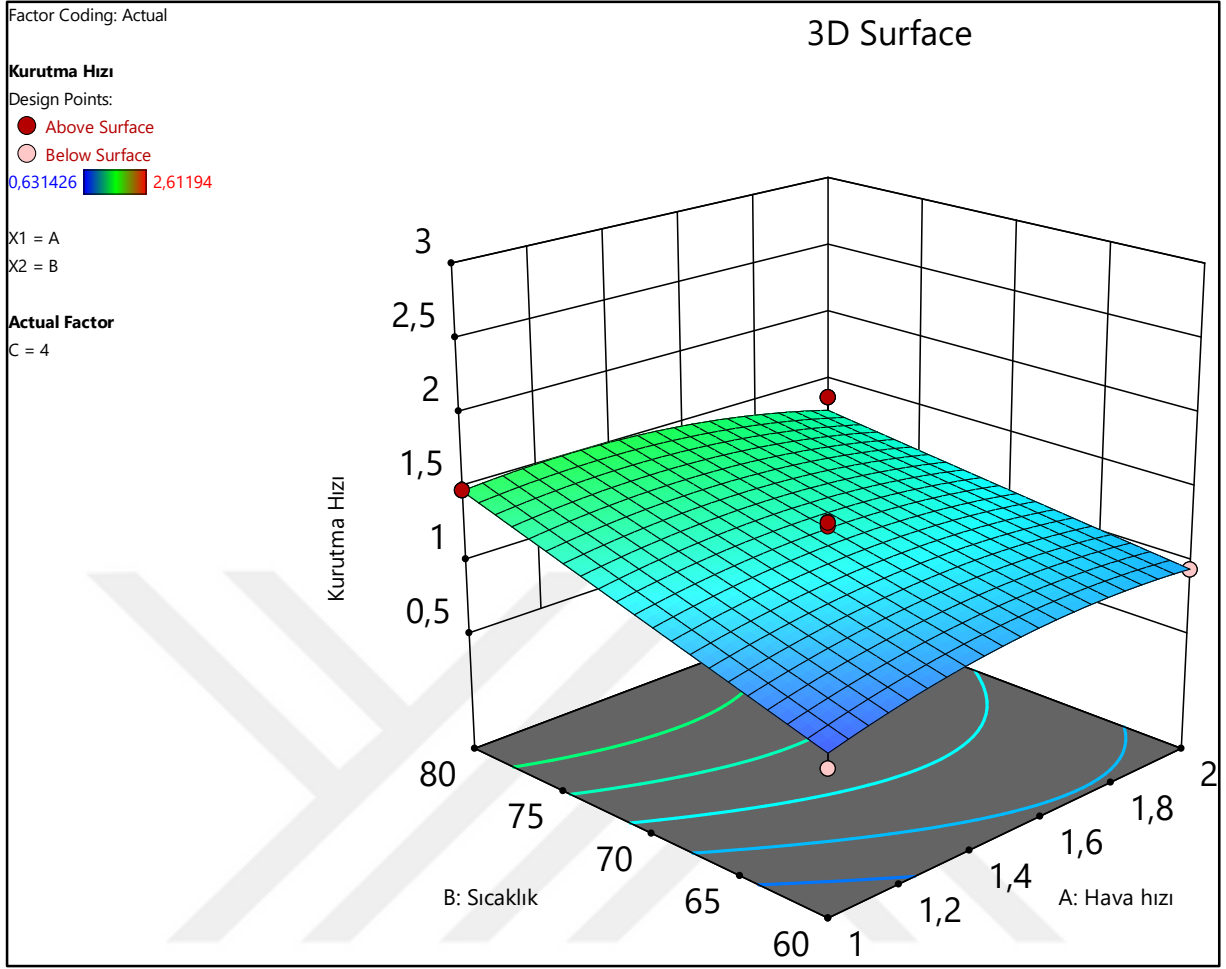
değerlerinin büyüklüğünü temsil etmekte olup; mavi tonlar düşük kurutma hızlarını (~ 0.63 m/sn), yeşil tonlar ise daha yüksek kurutma hızlarını (~ 2.61 m/sn) ifade etmektedir.



Şekil 4.7. Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızlarının DeneySEL ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Grafikteki yüzey formu incelendiğinde, kurutma hızının hem sıcaklık hem de hava hızı parametrelerindeki artışla birlikte belirgin bir şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek sıcaklık (80°C) ve yüksek hava hızı (2.0 m/s) kombinasyonlarında kurutma hızının maksimum seviyelere ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu durum, tepsili kurutma sisteminde ısı ve kütle transferi süreçlerinin sinerjik etkisini yansıtmaktadır. Ayrıca yüzeyin düzgün ve sürekli bir yapı sergilemesi, modelin deneySEL verilerle uyumlu olduğunu ve tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.

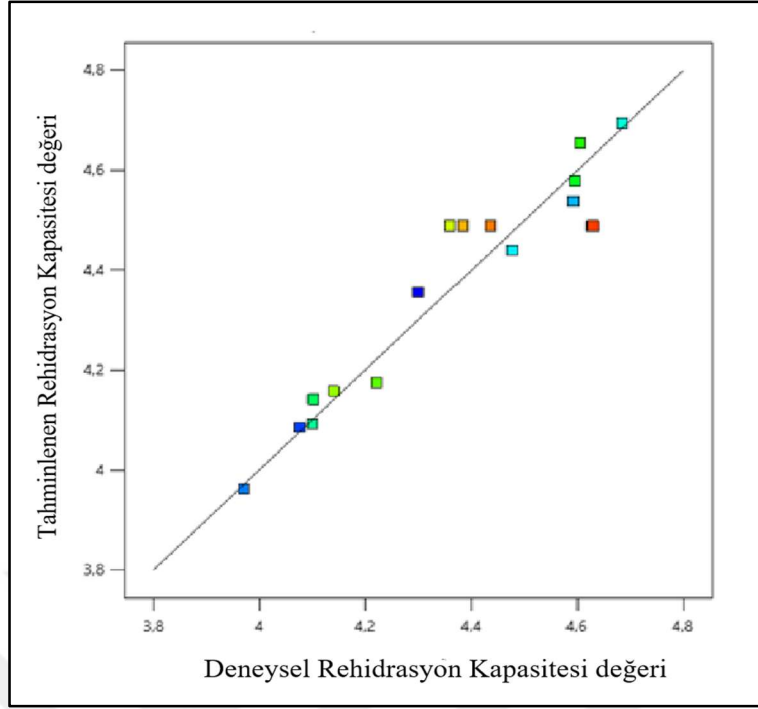
Bu bulgular, kurutma performansını iyileştirmek amacıyla sıcaklık ve hava hızı gibi proses parametrelerinin optimize edilmesinin, kurutma süresini kısaltarak enerji verimliliğini artırabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.8. Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızı Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Tepsili kurutma sisteminde kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait rehidrasyon kapasitesi yanıt değişkeni, hem model geçerliliğini ortaya koymak hem de işlem parametrelerinin etkisini görsel olarak değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir. Bu kapsamda, deneysel ve tahmini rehidrasyon kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.9.'da, sıcaklık ve hava hızı parametrelerinin bu yanıt üzerindeki etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzeyi ve kontur eğrileri ise Şekil 4.10.'da verilmiştir.

Şekil 4.9.'da, RSM modeli ile tahmin edilen rehidrasyon kapasitesi değerlerinin, deneysel olarak elde edilen ölçümlerle karşılaştırılması grafiksel olarak verilmiştir. Gözlenen veri noktalarının büyük çoğunluğu 45° referans doğrusu boyunca dağılmış olup, bu durum modelin güçlü tahmin kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir.



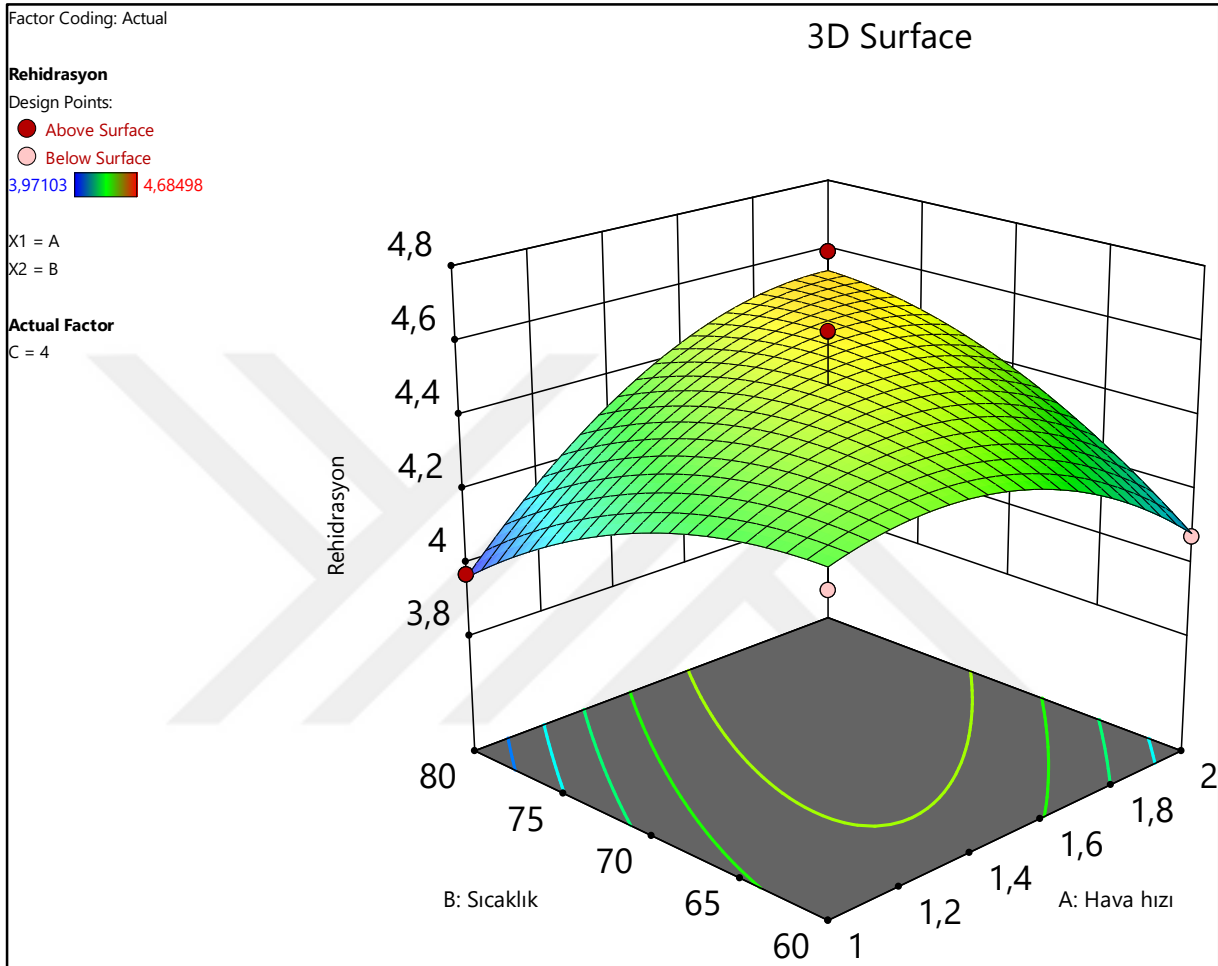
Şekil 4.9. Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Modelin determinasyon katsayısı $R^2 = 0.9844$ olup, varyasyon katsayısı (CV%) 0.66 düzeyindedir. Bu sonuçlar, modelin verilerin %98.44'ünü açıkladığını ve çok düşük varyasyonla çalıştığını kanıtlamaktadır. Modelin tahmin aralığı yaklaşık 3.97 ile 4.68 arasında değişmektedir ve bu, deneysel ölçümlerle oldukça tutarlıdır. Bu bulgular, kurulan modelin rehidrasyon kapasitesini doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edebildiğini ve optimize edilmiş koşullarda uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.10.'da verilen yanıt yüzeyi ve eş yükselti eğrileri, sıcaklık ve hava hızı parametrelerinin rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymaktadır. Renk skalası mavi (3.97) ile sarı-yeşil tonlarına doğru (4.69) ilerledikçe rehidrasyon kapasitesinin arttığını göstermektedir.

Grafik yüzey analizi, her iki parametredeki artışın belirli düzeylere kadar rehidrasyon kapasitesinde artış sağladığını, ancak bu artışın yüksek düzeyde sabitlenmediğini göstermektedir. Özellikle sıcaklık 70–75 °C civarında ve hava hızı 1.5–2.0 m/s aralığında rehidrasyon kapasitesi en yüksek değerlere ulaşmaktadır (yaklaşık 4.69). Bu bölge, optimum işlem koşullarını temsil etmektedir. Ancak, sıcaklık veya hava hızının daha da artırılması

durumunda rehidrasyon kapasitesinde düşüş gözlemlenmekte olup, bu durum muhtemelen ürün dokusundaki hücresel yapının bozulması ve su bağlama kapasitesinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

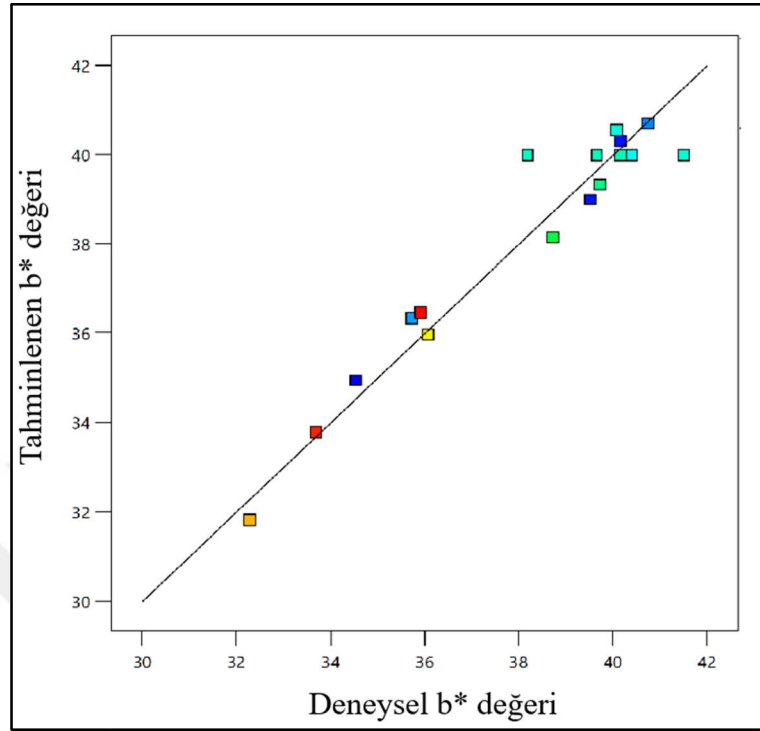


Şekil 4.10. Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesi Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Bu analiz, rehidrasyon kapasitesini maksimize etmek için sıcaklık ve hava hızı parametrelerinin dikkatle dengelenmesi gerektiğini ve aşırı koşullardan kaçınılmasının ürün kalitesi açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Washington Navel portakal dilimlerinin tepsili kurutucuda işlenmesi sonucunda elde edilen b* renk parametresi, ürün renginin sarı tonlardaki yoğunluğunu temsil etmekte olup, tüketici algısı ve ürün kalitesi açısından kritik bir kalite göstergesidir. Bu kapsamda, modelin tahmin gücü

Şekil 4.11. ile, işlem parametrelerinin (hava hızı ve sıcaklık) etkisi ise Şekil 4.12. ile verilmiştir.



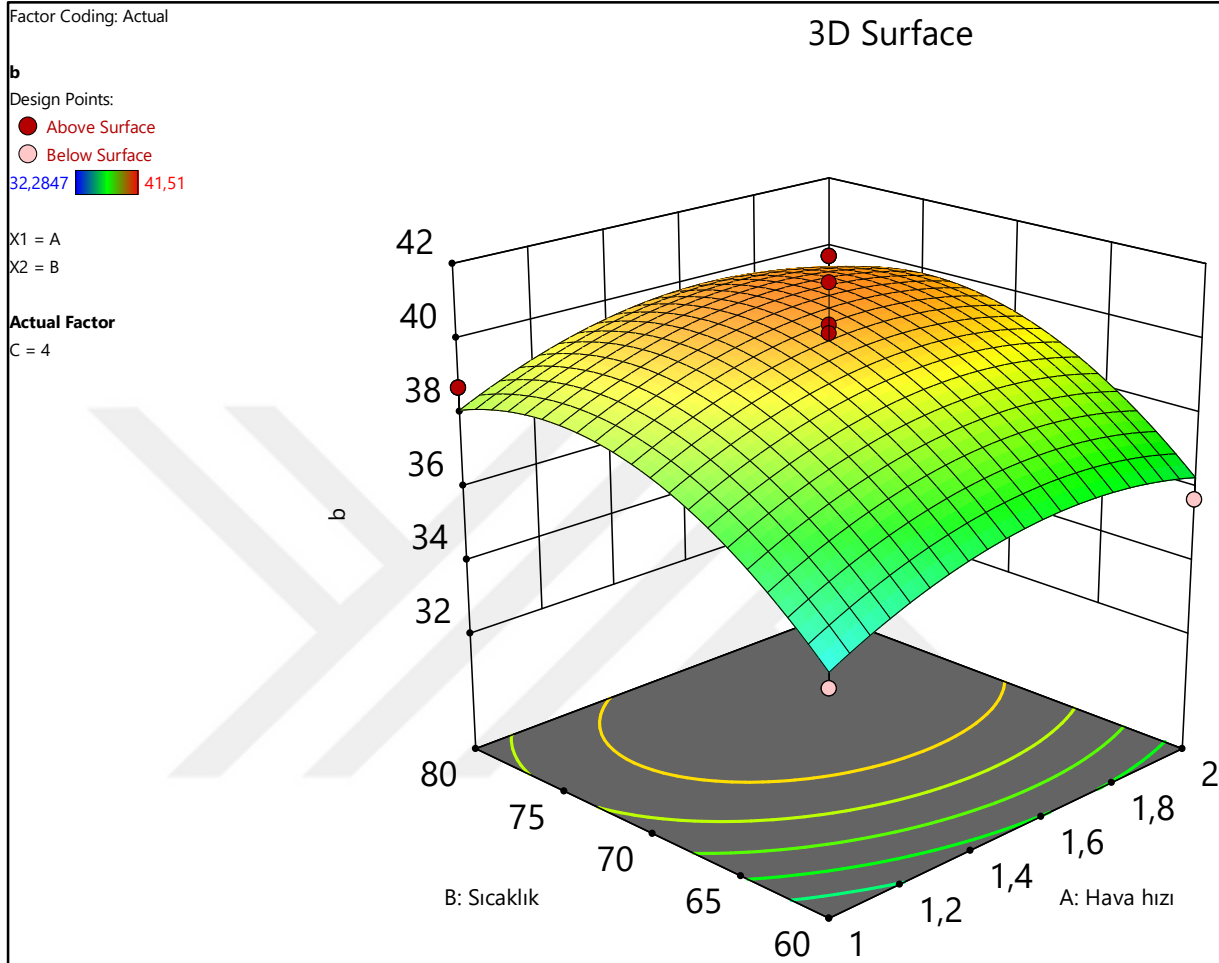
Şekil 4.11. Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında b* Renk Değerinin DeneySEL ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.11.'de, RSM modeliyle tahmin edilen b* renk değerlerinin deneySEL ölçümlerle karşılaştırılması değerlendirilmiştir. Grafik, tahmin edilen ve gözlenen değerlerin 45° referans doğrusuna yakın dağıldığını göstermektedir; bu da modelin yüksek düzeyde tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle 38–41 aralığında yoğunlaşan veri noktaları, modelin bu bölgedeki verileri oldukça başarılı şekilde öngörebildiğini ortaya koymaktadır.

Modelin tahmin aralığı yaklaşık 30.0 ile 42.0 b* birimi arasında değişmektedir. DeneySEL verilerin bu aralığın içinde yer alması, tahmin kapasitesinin geçerli olduğunu göstermektedir. Tahmin edilen en yüksek b* değeri 42.0 iken, bazı düşük sıcaklık ve hava hızlarında 30.0'a kadar düşen b* değerleri gözlemlenmiştir. Bu, kurutma koşullarının renk gelişimi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.12.'de yer alan üç boyutlu yanıt yüzeyi, hava hızı (A) ve sıcaklık (B) parametrelerinin b* renk değeri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Renk skalasına göre en düşük b* değeri

32.85, en yüksek değer ise 41.51 olarak modellenmiştir. Yüzey eğimi ve kontur çizgileri, hem sıcaklığın hem de hava hızının artmasıyla birlikte b^* değerinin yükseldiğini göstermektedir.



Şekil 4.12. Washington Navel Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında b^* Renk Değeri Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Sıcaklık ve hava hızı birlikte artırıldığında, ürünün sarı tonlardaki yoğunluğu artmakta, bu da kurutma sırasında gerçekleşen Maillard reaksiyonları ve karamelizasyon süreçlerinin yoğunluğunun arttığını düşündürmektedir. Ancak belirli bir eşik değerinin ötesine geçildiğinde renk dengesinin bozulabileceğı, bu nedenle optimum işlem koşullarının dikkatle belirlenmesi gerektiğı de anlaşılmaktadır.

Modelin sunduğı bu yüzey, en yüksek b^* değerlerinin sıcaklık 80 °C ve hava hızı 2.0 m/s civarlarında elde edildiğini göstermekte, bu da renk gelişimi açısından maksimum verimi sağlayan koşulların tanımlanmasını mümkün kılmaktadır.

Deneme desenine dayalı olarak yürütülen optimizasyon sürecinde, kurutma işleminin verimliliğini artırmak ve ürün kalitesini en üst düzeye çıkarmak amacıyla üç temel yanıt değişkeni olan kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b^* renk değeri maksimize edilmesi gereken hedefler olarak belirlenmiştir. Bu çok yanıtlı optimizasyon sürecinde, desirability (istenilirlik) fonksiyonu kullanılarak tüm yanıt değişkenlerinin aynı anda optimize edilmesini sağlayan matematiksel model uygulanmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, belirlenen sınır koşulları dahilinde maksimum istenilirlik değeri sağlayan tek bir optimum çözüm elde edilmiştir. İlgili çözüm noktası Tablo 4.7.'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Optimum koşulların belirlenmesinde, yazılım tarafından önerilen çözüm alternatifleri arasından birinci çözüm noktası tercih edilmiştir. Bu noktada işlem parametreleri şu şekilde hesaplanmıştır: sıcaklık: 78 °C, hava hızı: 1.57 m/s ve dilim kalınlığı: 2.3 mm. Belirlenen bu koşullar altında, hem kurutma performansı hem de ürün kalitesinin istenilen düzeyde elde edilmesi mümkün hale gelmiştir.

Tablo 4.7. Washington Navel Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Hava Hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b^* değeri	İstenilirlik (Desirability)	
1	1.568	78.020	2.270	2.387	4.685	37.358	0.787	Seçildi

Belirlenen optimum işlem koşullarının geçerliliğini değerlendirmek amacıyla, seçilen parametre kombinasyonu (78 °C sıcaklık, 1.57 m/s hava hızı, 2.3 mm dilim kalınlığı) altında üç bağımsız doğrulama denemesi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama çalışmaları kapsamında elde edilen deneysel veriler ile yanıt yüzey metoduna (RSM) dayalı model tahminleri karşılaştırılmıştır. İlgili deneysel sonuçlar ile tahmin edilen teorik değerler Tablo 4.8.'de verilmiştir.

Tablo 4.8. Washington Navel Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Optimum Kurutma Koşullarında Elde Edilen Deneysel ve Tahmin Edilen Değerlerin Karşılaştırılması

Yanıtlar	Deneysel Veriler	Tahminlenen Veriler
Kurutma Hızı	2.361±0.022	2.388
Rehidrasyon Kapasitesi	4.566±0.159	4.685
b^* Renk Değeri	40.117±2.167	37.357

Kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b^* renk değeri yanıt değişkenlerine ilişkin olarak, belirlenen optimum koşullar altında gerçekleştirilen doğrulama denemelerinde elde edilen ortalama deneysel sonuçlar ile yanıt yüzey modelinden tahmin edilen teorik değerler karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, her üç yanıt değişkeni için de deneysel ve tahmini değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu bulgu, geliştirilen modellerin yüksek doğrulukta öngörüler yapabildiğini ve optimize edilen koşulların deneysel olarak da doğrulanabildiğini göstermektedir.

İlgili karşılaştırmalar, her bir yanıt için ayrı ayrı uygulanan tek örnek t-testi ile değerlendirilmiş olup, test sonuçları detaylı biçimde /Ek F) 'de verilmiştir.

4.1.3. Valencia Portakal Dilimlerinin Vakum Mikrodalga Kurutucudaki Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu

Bu çalışma kapsamında, Valencia portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutma sistemi altında işlenmesi sürecine ilişkin optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla 17 farklı deneysel koşulda ön deneme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarımda üç temel proses parametresi bağımsız değişken olarak ele alınmıştır: mikrodalga gücü, kurutma sıcaklığı ve dilim kalınlığı. Bu parametrelerin etkileri, üç temel yanıt değişkeni üzerinden değerlendirilmiştir: kurutma hızı ($\text{kg H}_2\text{O/kg kurumadde} \times \text{saat}$), rehidrasyon kapasitesi (g/g) ve b^* renk değeri.

Elde edilen deneysel yanıtlar ile deney düzeneğine ilişkin ayrıntılı bilgiler Tablo 4.9.'da verilmiştir.

Valencia portakal dilimlerine ait deneysel verilerin, ikinci dereceden (kuadratik) model ile istatistiksel uyumunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen varyans analizi (ANOVA) bulguları da Tablo 4.10.'da verilmiştir. Bu analiz, geliştirilen modelin yanıt değişkenleri üzerindeki açıklayıcılık gücünü ve istatistiksel anlamlılığını ortaya koymaktadır.

Optimizasyon çalışması kapsamında, Valencia portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutulması sürecine ilişkin olarak gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda elde edilen ikinci dereceden (kuadratik) polinomsal modeller, Eşitlik 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. Bu

matematiksel ifadeler, kurutma sürecinde kullanılan işlem parametreleri ile üç temel yanıt değişkeni —kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b* renk değeri— arasındaki nicel ilişkileri tanımlamaktadır. Elde edilen modeller, süreç optimizasyonuna yönelik güçlü bir öngörü aracı olarak kullanılmıştır.

Tablo 4.9. Valencia Portakal Dilimlerinin Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Kurutma Performansı Analizi

Numune ⁽¹⁾	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
	A: Güç (KW)	B: Sıcaklık (°C)	C: Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x saat)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* Değeri
VM1	3	70	4	4.518	4.071	34.564
VM2	2	60	4	3.435	4.587	37.128
VM3	2	70	2	8.941	4.922	30.397
VM4	3	60	6	2.464	4.306	41.314
VM5	4	70	6	4.351	3.884	43.676
VM6	3	60	2	8.210	4.666	28.729
VM7	4	80	4	6.217	4.072	39.986
VM8	3	70	4	4.784	4.153	36.898
VM9	3	70	4	4.611	4.099	38.083
VM10	3	70	4	4.533	3.997	37.166
VM11	2	70	6	3.015	3.771	42.673
VM12	4	60	4	4.559	4.176	42.601
VM13	2	80	4	4.883	4.161	41.878
VM14	3	70	4	4.544	4.285	36.759
VM15	3	80	6	3.285	3.687	42.210
VM16	3	80	2	10.496	5.031	31.385
VM17	4	70	2	10.009	4.516	35.569

⁽¹⁾ VM = Numune kodu

$$\text{Kurutma Hızı} = +4.60 + 0.6078*A + 0.7768*B - 3.07*C + 0.0524*AB - 0.0670*AC - 0.3664*BC + 0.3205*A^2 - 0.1450*B^2 + 1.66*C^2 \quad (4.7)$$

$$\text{Rehidrasyon Kapasitesi} = +4.12 - 0.0993*A - 0.0981*B - 0.4360*C + 0.0807*AB + 0.1298*AC - 0.2460*BC + 0.0107*A^2 + 0.1384*B^2 + 0.1630*C^2 \quad (4.8)$$

$$b^* \text{ değeri} = +36.69 + 1.22*A + 0.7108*B + 5.47*C - 1.84*AB - 1.04*AC - 0.4400*BC + 2.94*A^2 + 0.7677*B^2 - 1.55*C^2 \quad (4.9)$$

A = Güç (KW) B= Sıcaklık (°C) C= Dilim Kalınlığı (mm)

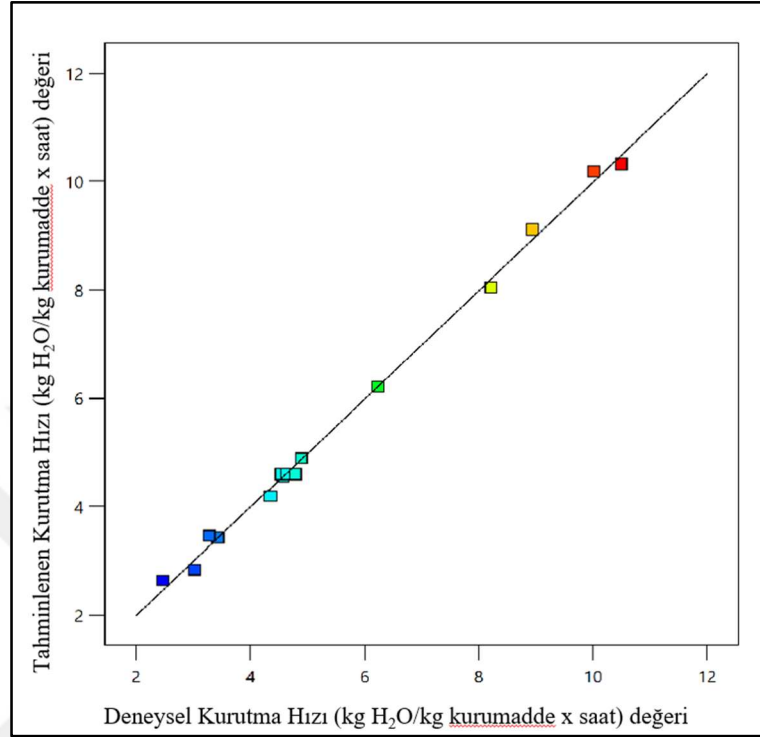
Tablo 4.10. Valencia Portakallarının Vakumlu Mikrodalgada Kurutulmasında RSM Tabanlı ANOVA Analizi

Kaynak	Hata Kareler Toplamı	df	Ortalama Hata Karesi	F- değeri	p- değeri
Kurutma Hızı					
Model	95.95	9	10.66	262.33	< 0.0001
Residual (Kalıntı)	0.2845	7	0.0406		
Lack of Fit	0.2359	3	6.48	0.0514	
Pure Error (Saf Hata)	0.0486	4	0.0121		
Toplam	96.23	16			
R ² = 0.9970					
CV%=3.69					
Rehidrasyon Kapasitesi					
Model	2.22	9	0.2461	27.86	0.0001
Residual (Kalıntı)	0.0618	7	0.0088		
Lack of Fit	0.0156	3	0.0052	0.4499	0.7311
Pure Error (Saf Hata)	0.0462	4	0.0116		
Toplam	2.28	16			
R ² = 0.9728					
CV%=2.21					
b* değeri					
Model	321.93	9	35.77	27.91	0.0001
Residual (Kalıntı)	8.97	7	1.28		
Lack of Fit	2.24	3	0.7462	0.4433	0.7351
Pure Error (Saf Hata)	6.73	4	1.68		
Toplam	330.90	16			
R ² = 0.9729					
CV%=3.00					

Valencia portakal dilimlerinin vakum mikrodalgada kurutma yöntemiyle işlenmesi sürecinde elde edilen kurutma hızı verileri, hem modelin öngörü performansını değerlendirmek hem de işlem parametrelerinin etkisini analiz edebilmek amacıyla modellenmiştir. Bu kapsamda, deneysel veriler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması Şekil 4.13.'te, mikrodalgada gücü ve sıcaklığın etkilerini gösteren yanıt yüzeyi ve kontur eğrileri ise Şekil 4.14.'te verilmiştir.

Şekil 4.13.'te, kurutma hızı yanıt değişkenine ilişkin olarak deneysel veriler ile model tarafından tahmin edilen değerlerin karşılaştırması verilmiştir. Veri noktalarının büyük

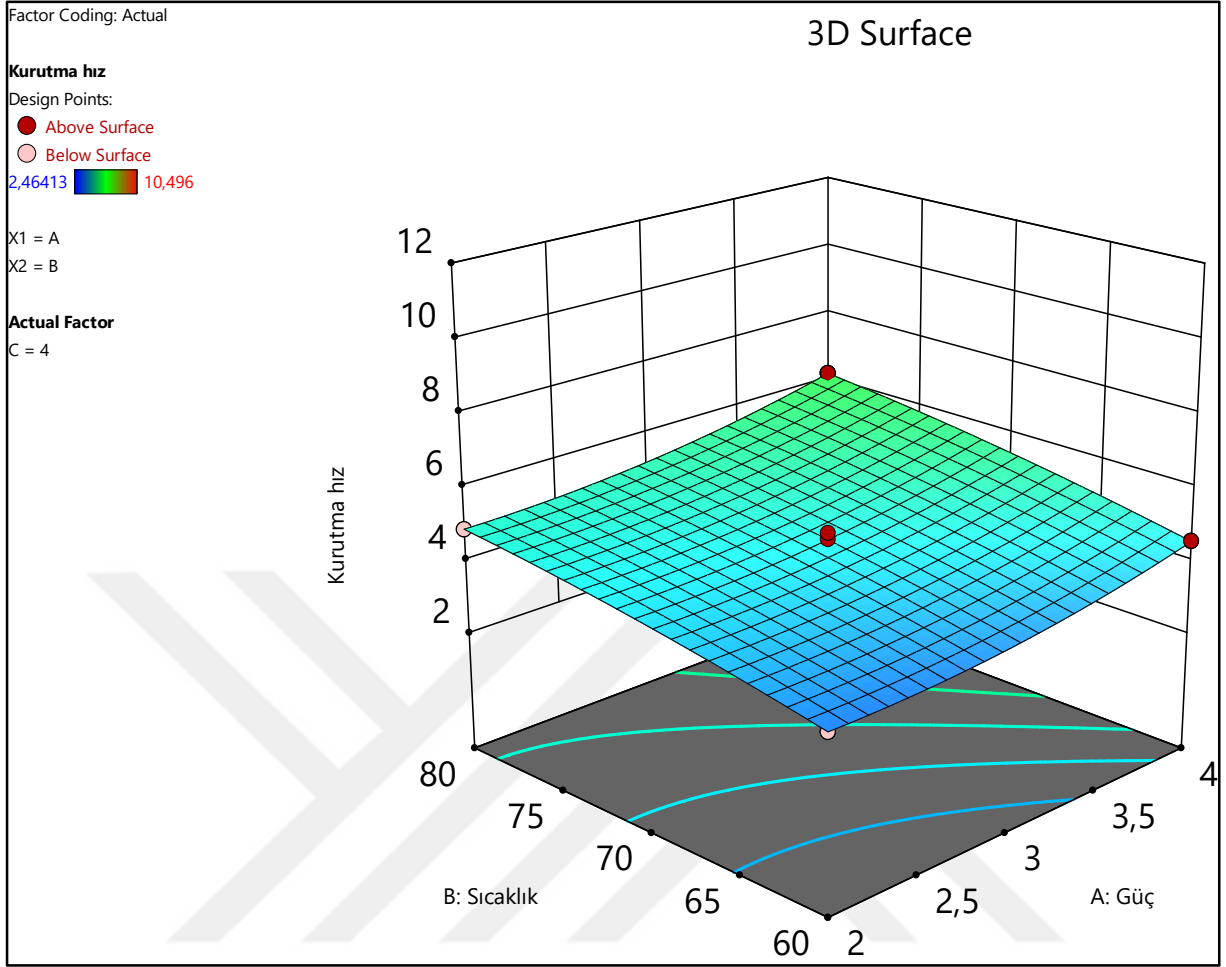
çoğunluğu 45° referans doğrusuna oldukça yakın konumlanmıştır; bu durum, modelin yüksek öngörü gücüne sahip olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 4.13. Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızlarının DeneySEL ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Grafikte yer alan değer aralığı yaklaşık 2.5 m/sn ile 10.5 m/sn arasında değişmektedir. Bu geniş tahmin aralığı, deneysel koşullarda kurutma hızının önemli düzeyde değişebildiğini; modelin ise bu değişimi başarıyla takip ettiğini ortaya koymaktadır. Modelin determinasyon katsayısının (R^2) yüksek, varyasyon katsayısının (CV%) ise düşük olması, bu gözlemi istatistiksel olarak da desteklemektedir. Bu bulgular, modelin kurutma hızını tahmin etmede yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu göstermektedir.

Şekil 4.14.'te yer alan üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği, mikrodalga gücü ve kurutma sıcaklığı parametrelerinin kurutma hızı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Renk skalasına göre en düşük kurutma hızı değeri yaklaşık 2.46 m/sn, en yüksek değer ise 10.50 m/sn civarındadır. Grafik yüzeyi ve kontur eğrileri, her iki parametredeki artışın kurutma hızını pozitif yönde etkilediğini göstermektedir.



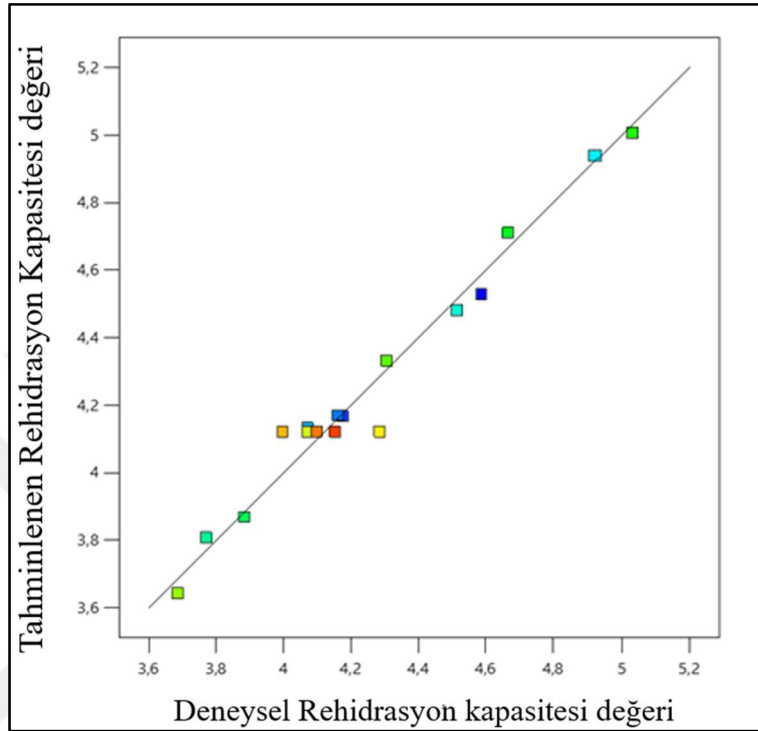
Şekil 4.14. Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızı Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Özellikle mikrodalga gücünün yüksek olduğu (yaklaşık 4 kW) ve sıcaklığın 75–80 °C'ye ulaştığı durumlarda, kurutma hızının maksimum düzeylere çıktığı gözlemlenmiştir. Bu eğilim, mikrodalga enerjisi ve sıcaklığın birlikte suyun buharlaşma kinetiğini hızlandığını ve böylece kurutma sürecinin daha verimli gerçekleştiğini göstermektedir.

Model yüzeyinin düzgün eğimli yapısı, değişkenler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunduğunu ve modelin fiziksel süreci başarıyla temsil ettiğini desteklemektedir. Bu durum, Valencia portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutulmasında enerji ve sıcaklık parametrelerinin birlikte optimize edilmesinin kritik olduğunu göstermektedir.

Valencia portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutulması sürecinde, ürün kalitesini yansıtan temel parametrelerden biri olan rehidrasyon kapasitesi, kurutma işlem koşullarının

nem tutma yeteneği üzerindeki etkisini göstermesi açısından önemli bir yanıt değişkenidir. Bu kapsamda, rehidrasyon kapasitesine ilişkin modelin tahmin gücü Şekil 4.15. ile, mikrodalga gücü ve sıcaklık parametrelerinin bu yanıt üzerindeki etkisi ise Şekil 4.16.'da verilmiştir.



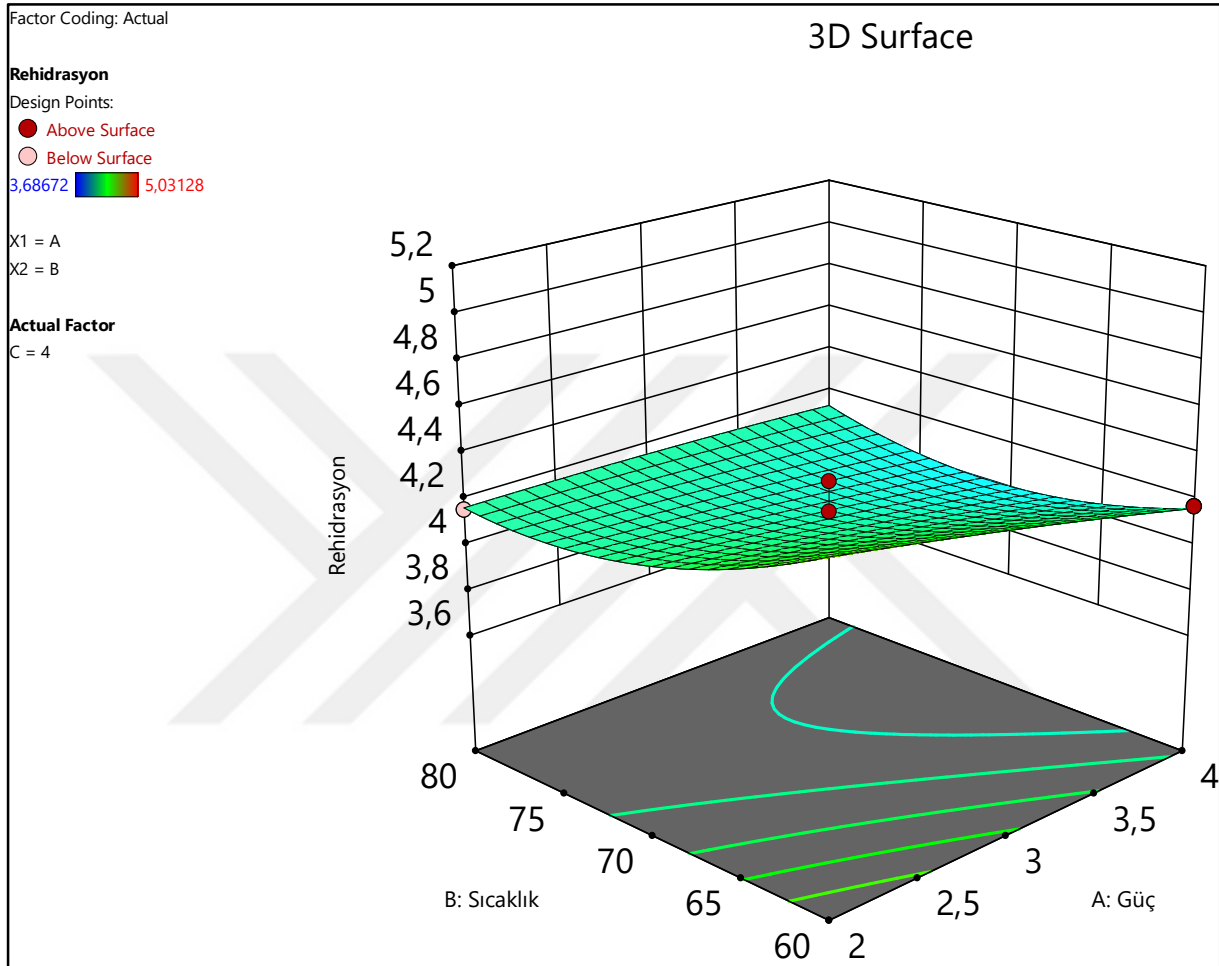
Şekil 4.15. Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesinin DeneySEL ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.15.'te yer alan grafik, RSM modeli ile tahmin edilen rehidrasyon kapasitesi değerlerinin deneySEL verilerle olan ilişkisini göstermektedir. Grafik üzerindeki veri noktalarının büyük oranda 45° referans doğrusuna yakın konumlanması, modelin yüksek doğrulukta tahminler yaptığını ortaya koymaktadır.

Rehidrasyon kapasitesine ilişkin veriler, yaklaşık 3.6 ile 5.2 aralığında değişmekte olup, bu geniş varyasyon modelin çeşitli işlem koşullarında elde edilen sonuçları başarıyla yansıtabildiğini göstermektedir. Özellikle 4.5'in üzerindeki değerlerde tahmin edilen sonuçların deneySEL ölçümlerle güçlü bir uyum içinde olması, modelin yüksek rehidrasyon kapasitesi aralığında daha hassas tahminler yapabildiğine işaret etmektedir.

Şekil 4.16.'da sunulan yanıt yüzeyi grafiği, mikrodalga gücü ve sıcaklık parametrelerinin rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkilerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Grafik üzerindeki

renk skalası, rehidrasyon kapasitesinin 3.63 ile 5.08 arasında değiştiğini göstermektedir. Bu değerler, işlem koşullarının ürünün su tutma kapasitesi üzerindeki etkisini net şekilde ortaya koymaktadır.

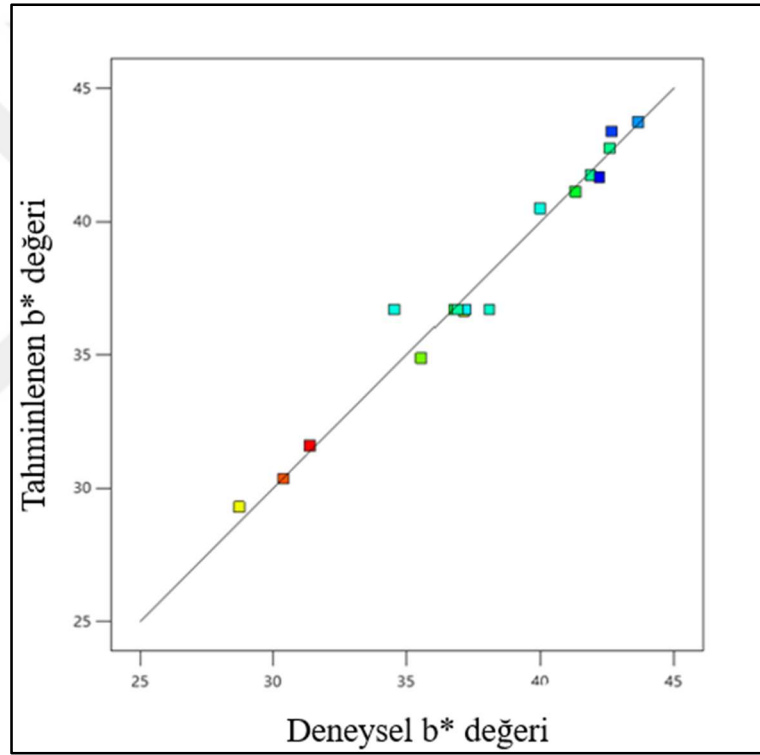


Şekil 4.16. Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesi Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Yanıt yüzeyinin eğimi ve kontur çizgileri incelendiğinde, rehidrasyon kapasitesinin mikrodalga gücü ve sıcaklık parametrelerinin birlikte artmasıyla bir ölçüye kadar yükseldiği, ancak daha sonra plato seviyesine ulaştığı görülmektedir. Özellikle yaklaşık 3.5–3.8 kW gücünde ve 75–80 °C sıcaklık aralığında rehidrasyon kapasitesinin maksimum değerlere yaklaştığı tespit edilmiştir. Bunun ötesindeki aşırı yüksek enerji düzeylerinde, doku hasarı nedeniyle su tutma kapasitesinde azalma meydana gelebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

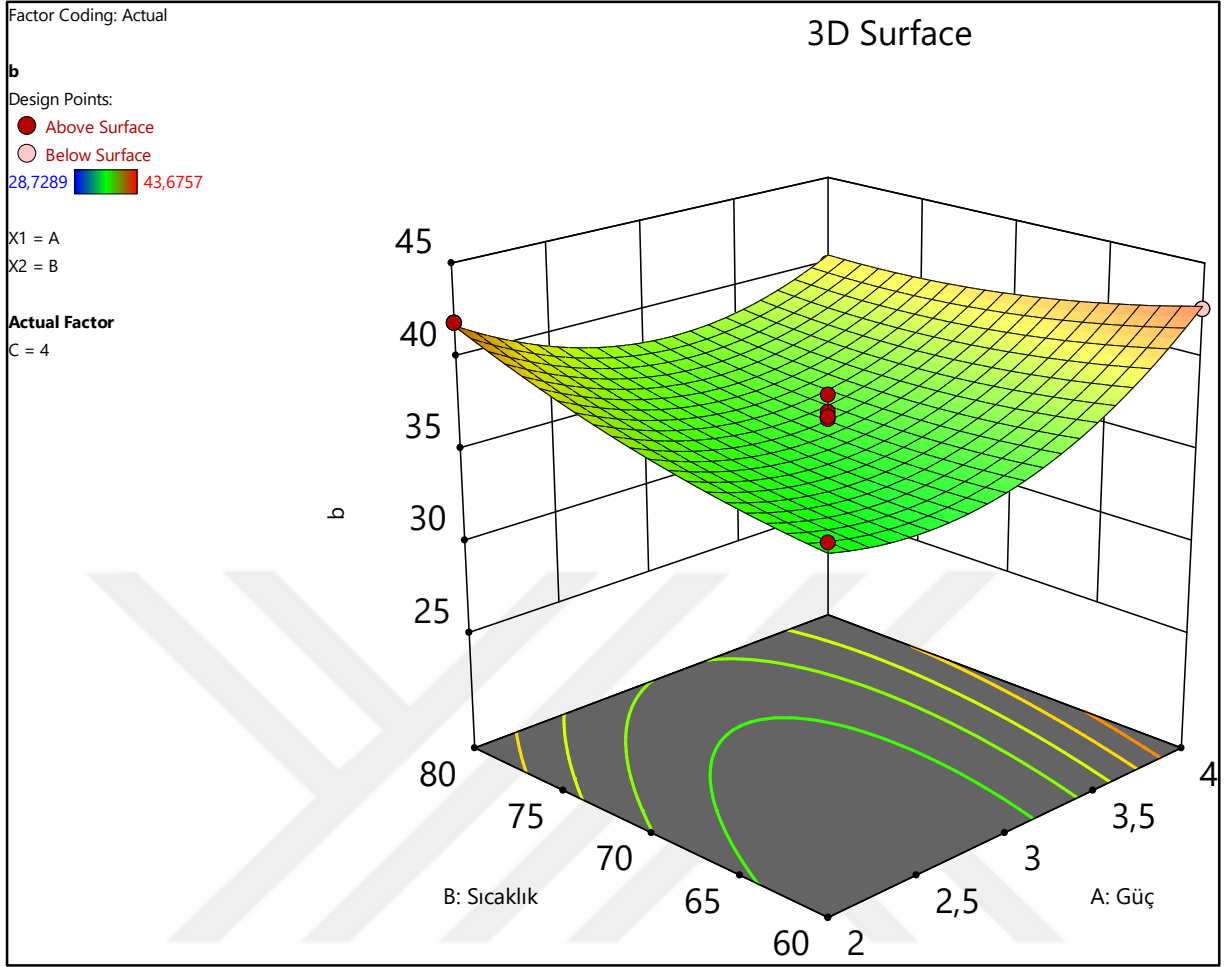
Bu analiz, Valencia portakal dilimlerinde kurutma verimini artırırken rehidrasyon kalitesini korumak adına işlem parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Valencia portakal dilimlerinin vakum mikrodalgada kurutma işlemi sırasında ürün renginde meydana gelen değişimlerin değerlendirilmesinde, b^* renk parametresi önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Sarı renk yoğunluğunu yansıtan bu parametre, tüketici algısı ve ürün kabulü açısından kritik bir kalite kriteridir. Bu bağlamda, modelin tahmin performansı Şekil 4.17. ile, işlem parametrelerinin etkisi ise Şekil 4.18.'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Valencia Portakallarının Vakumlu Mikrodalgada Kurutulmasında b^* Renk Değerinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.17., b^* renk parametresine ilişkin olarak deneysel olarak elde edilen değerlerle, yanıt yüzey modelinden tahmin edilen değerlerin karşılaştırmasını sunmaktadır. Grafik üzerinde yer alan veri noktalarının büyük çoğunluğu 45° referans doğrusuna oldukça yakın konumlanmakta olup, bu durum modelin güçlü bir öngörü kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.18. Valencia Portakallarının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında b^* Renk Değeri Üzerine Güç ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Grafikte tahmin edilen b^* değerlerinin yaklaşık 27 ile 45 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Bu geniş aralık, renk parametresinin kurutma koşullarına karşı oldukça duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık ve güç seviyelerinde b^* değerlerinin arttığı koşullarda modelin tahmin doğruluğunun daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu sonuç, modelin özellikle renk yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde daha hassas çalıştığını göstermektedir.

Şekil 4.18.'de, mikrodalga gücü ve sıcaklık parametrelerinin b^* renk değeri üzerindeki etkilerini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği ve eş yükselti eğrileri verilmiştir. Renk skalasına göre b^* değerleri 28.73 ile 43.68 arasında değişmektedir. Bu aralık, ürünün sarı renk tonlarındaki yoğunluğunun işlem koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde farklılaştığını göstermektedir.

Grafik yüzeyi incelendiğinde, sıcaklık ve mikrodalga gücündeki artışa paralel olarak b^* değerinin genel olarak yükseldiği görülmektedir. Bu eğilim, ısı ve mikrodalga enerjisi etkisiyle meydana gelen Maillard reaksiyonları ve pigment dönüşümleri sonucunda renk gelişiminin arttığını göstermektedir. Özellikle 80 °C sıcaklık ve 4 kW mikrodalga gücü kombinasyonlarında, sarı renk yoğunluğunun en yüksek seviyelere ulaştığı gözlemlenmektedir.

Modelin düzgün yüzey yapısı ve kontur çizgilerinin açıklığı, parametreler ile b^* renk değeri arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, renk parametresinin kontrolü için proses koşullarının dikkatle optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Deneme desenine dayalı olarak yürütülen çok yanıtlı optimizasyon sürecinde, hedeflenen kalite parametreleri olan kurutma hızının artırılması, rehidrasyon kapasitesinin yükseltilmesi ve b^* renk değerinin maksimize edilmesi esas alınmıştır. Bu kapsamda, yanıt yüzey metoduna (RSM) entegre edilen istenilirlik fonksiyonu (desirability function) kullanılarak optimum performansı sağlayan işlem koşulları belirlenmiştir.

Yapılan analiz sonucunda, model tarafından önerilen ve istenilirlik değeri belirli bir eşik üzerinde olan toplam 49 farklı alternatif çözüm tanımlanmıştır. Bu çözümlere ilişkin ayrıntılı bilgiler Tablo 4.11.'de verilmiştir. Söz konusu alternatifler arasından, maksimum genel istenilirlik değerine sahip olan birinci çözüm optimum koşul olarak seçilmiştir. Bu çözüm noktasında işlem parametreleri şu şekilde hesaplanmıştır: sıcaklık: 80 °C, mikrodalga gücü: 4 kW ve dilim kalınlığı: 2.23 mm. Elde edilen bu optimum kombinasyon, Valencia portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutma sürecinde hem kurutma verimi hem de ürün kalitesi açısından en uygun koşulları temsil etmektedir.

Belirlenen optimum işlem koşullarının model tarafından öngörülen performansı sağlayıp sağlamadığını doğrulamak amacıyla, seçilen parametre kombinasyonu (80 °C sıcaklık, 4 kW mikrodalga gücü, 2.23 mm dilim kalınlığı) altında üç bağımsız doğrulama denemesi gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmalar, teorik modelin güvenilirliğini test etmek ve optimizasyon çıktılarının uygulamaya aktarılabilirliğini değerlendirmek amacıyla yürütülmüştür.

Tablo 4.11. Valencia Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Güç (KW)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* değeri	İstenilirlik (Desirability)	
1	4.000	80.000	2.228	10.496	4.749	35.733	0.718	Seçildi
2	4.000	80.000	2.209	10.557	4.757	35.668	0.718	
3	4.000	80.000	2.176	10.664	4.772	35.554	0.717	
4	4.000	79.879	2.225	10.496	4.745	35.712	0.716	
5	4.000	79.962	2.159	10.713	4.777	35.495	0.716	
6	4.000	79.989	2.080	10.971	4.812	35.225	0.714	
7	2.000	80.000	2.201	9.381	5.031	35.012	0.713	
8	2.000	80.000	2.201	9.381	5.031	35.011	0.713	
9	4.000	80.000	2.037	11.115	4.831	35.074	0.712	
10	2.000	80.000	2.187	9.429	5.039	34.946	0.712	
11	4.000	80.000	2.026	11.153	4.836	35.033	0.712	
12	4.000	79.533	2.215	10.496	4.733	35.654	0.712	
13	2.000	79.997	2.228	9.295	5.016	35.128	0.711	
14	3.961	80.000	2.213	10.496	4.762	35.443	0.711	
15	2.000	79.911	2.196	9.391	5.031	34.949	0.711	
16	2.000	80.000	2.158	9.524	5.056	34.817	0.710	
17	3.986	80.000	2.023	11.144	4.839	34.940	0.709	
18	4.000	79.325	2.210	10.496	4.725	35.620	0.709	
19	4.000	79.048	2.202	10.496	4.716	35.574	0.705	
20	2.000	80.000	2.078	9.789	5.100	34.457	0.704	
21	3.954	80.000	2.026	11.095	4.843	34.756	0.703	
22	3.960	79.999	2.000	11.189	4.854	34.697	0.702	
23	2.063	80.000	2.188	9.423	5.031	34.613	0.699	
24	3.897	80.000	2.143	10.643	4.802	34.835	0.697	
25	2.128	80.000	2.174	9.469	5.031	34.231	0.685	
26	2.000	78.740	2.151	9.445	5.020	34.235	0.682	
27	2.000	80.000	2.610	8.126	4.812	36.758	0.682	
28	2.000	80.000	2.633	8.057	4.800	36.854	0.679	
29	3.828	80.000	2.019	10.971	4.868	34.017	0.677	
30	4.000	80.000	2.773	8.901	4.532	37.454	0.665	

Tablo 4.11. (Devamı) Valencia Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Güç (KW)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	b* değeri	İstenilirlik (Desirability)
31	2.000	80.000	2.815	7.547	4.708	37.587	0.658
32	2.230	80.000	2.447	8.619	4.875	34.924	0.655
33	4.000	73.817	2.039	10.496	4.574	34.859	0.647
34	2.000	80.000	2.928	7.245	4.652	38.027	0.643
35	4.000	65.954	2.000	9.680	4.411	35.271	0.596
36	4.000	60.000	2.000	8.847	4.390	36.325	0.596
37	4.000	60.341	2.000	8.897	4.389	36.249	0.595
38	4.000	60.454	2.000	8.914	4.388	36.225	0.595
39	4.000	61.514	2.000	9.069	4.386	36.005	0.593
40	4.000	64.102	2.000	9.432	4.394	35.541	0.592
41	4.000	61.817	2.000	9.112	4.386	35.945	0.592
42	4.000	63.777	2.000	9.387	4.392	35.593	0.592
43	4.000	62.443	2.000	9.201	4.387	35.826	0.592
44	4.000	63.373	2.000	9.331	4.390	35.661	0.592
45	3.957	61.328	2.000	8.994	4.400	35.632	0.584
46	4.000	60.000	3.196	5.880	4.218	40.538	0.510
47	2.000	68.348	2.808	6.608	4.614	33.533	0.485
48	4.000	60.000	6.000	3.579	4.270	46.067	0.392
49	4.000	60.111	5.997	3.586	4.264	46.031	0.391

Doğrulama denemeleri sonucunda elde edilen ortalama deneysel yanıtlar ile model tarafından tahmin edilen teorik değerler karşılaştırmalı olarak Tablo 4.12.'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Valencia Portakalının Vakum Mikrodalga Kurutucuda Kurutulmasında Optimum Kurutma Koşullarında Elde Edilen Deneysel ve Tahmin Edilen Değerlerin Karşılaştırılması

Yanıtlar	Deneysel Veriler	Tahminlenen Veriler
Kurutma Hızı	10.505±0.420	10.496
Rehidrasyon Kapasitesi	4.480±0.173	4.749
b*renk değeri	35.82±0.629	35.733

Kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve b^* renk değeri yanıt değişkenlerine ilişkin olarak, belirlenen optimum işlem koşullarında gerçekleştirilen doğrulama denemeleri sonucunda elde edilen ortalama deneysel veriler ile model tarafından öngörülen tahmini değerler karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, her üç yanıt değişkeni için de deneysel ölçümler ile model tahminleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın bulunmadığı belirlenmiştir.

Bu bulgu, geliştirilen ikinci dereceden regresyon modellerinin yüksek doğrulukta tahmin gücüne sahip olduğunu ve önerilen optimum koşulların deneysel uygulamalarda da geçerliliğini koruduğunu göstermektedir. Karşılaştırmalar, her bir yanıt için ayrı ayrı uygulanan tek örnek t-testi yöntemiyle değerlendirilmiş olup, test sonuçlarının ayrıntıları (Ek G)'de verilmiştir.

4.1.4. Valencia Portakal Dilimlerinin Tepsili Kurutucudaki Kurutma Parametrelerinin Yanıt Yüzey Metodu (RSM) ile Optimizasyonu

Bu çalışma kapsamında, Valencia portakal dilimlerinin tepsili kurutma sistemi ile kurutulmasına ilişkin optimum işlem koşullarının belirlenmesi amacıyla, 17 farklı deneysel koşul altında ön deneme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarımda üç temel proses parametresi —hava hızı (m/s), kurutma sıcaklığı (°C) ve dilim kalınlığı (mm)— bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Bu parametrelerin etkileri, üç temel yanıt değişkeni üzerinden değerlendirilmiştir: kurutma hızı (kg H₂O/kg kurumadde x saat), rehidrasyon kapasitesi (g/g) ve a^* renk değeri.

Deneysel veriler ve ilgili deney tasarımına ait ayrıntılı bilgiler Tablo 4.13.'te verilmiştir.

Valencia portakal dilimlerinin tepsili kurutma sistemi altında gerçekleştirilen kurutma işlemleri sonucunda elde edilen deneysel verilerin, ikinci dereceden (kuadratik) model ile istatistiksel uyumunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 4.14.'te verilmiştir. Bu analiz, yanıt değişkenleri ile proses parametreleri arasındaki ilişkilerin anlamlılığını ve modelin açıklayıcılık gücünü ortaya koymaktadır.

Tablo 4.13. Valencia Portakal Dilimlerinin Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Kurutma Performansı Analizi

Numune ⁽¹⁾	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
	A: Güç (KW)	B: Sıcaklık (°C)	C: Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x saat)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	a* Değeri
TK1	2.0	70	6	0.685	3.548	10.156
TK2	1.5	60	2	1.808	4.710	2.787
TK3	1.5	80	2	2.818	4.788	3.880
TK 4	1.5	70	4	1.175	4.118	8.690
TK 5	2.0	60	4	0.734	3.927	7.438
TK 6	1.0	60	4	0.763	4.193	4.720
TK 7	1.5	70	4	1.076	4.068	9.810
TK 8	1.0	70	2	1.866	4.520	2.935
TK 9	1.0	70	6	0.704	3.400	12.342
TK 10	1.0	80	4	1.423	4.115	8.130
TK 11	1.5	70	4	1.093	4.234	7.860
TK 12	2.0	70	2	2.154	4.777	2.505
TK 13	1.5	70	4	1.321	4.185	4.348
TK 14	1.5	60	6	0.512	3.459	11.329
TK 15	2.0	80	4	1.415	3.993	5.643
TK 16	1.5	70	4	1.333	3.801	5.933
TK 17	1.5	80	6	1.333	4.057	10.372

⁽¹⁾ TK = Numune kodu

Optimizasyon çalışmaları kapsamında, Valencia portakal dilimlerinin tepsili kurutma sistemi altında gerçekleştirilen kurutma işlemine ilişkin yanıt değişkenlerinin regresyon analizi ile modellenmesi sonucunda elde edilen ikinci dereceden (kuadratik) polinomsal denklemler, Eşitlik 4.10, 4.11 ve 4.12’de verilmiştir. Bu matematiksel modeller, kurutma sürecinde uygulanan işlem parametreleri (hava hızı, sıcaklık ve dilim kalınlığı) ile üç temel yanıt değişkeni (kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve a* renk değeri) arasındaki nicel ilişkileri ortaya koymakta ve sürecin optimizasyonuna yönelik analitik bir temel sağlamaktadır.

$$\text{Kurutma Hızı} = +1.20 + 0.0290*A + 0.3580*B - 0.7149*C + +0.0053*AB - 0.0768*AC - 0.1243*BC - 0.1521*A^2 + 0.0364*B^2 + 0.3050*C^2 \quad (4.10)$$

$$\text{Rehidrasyon Kapasitesi} = +4.11 + 0.0020*A + 0.0831*B - 0.5413*C \quad (4.11)$$

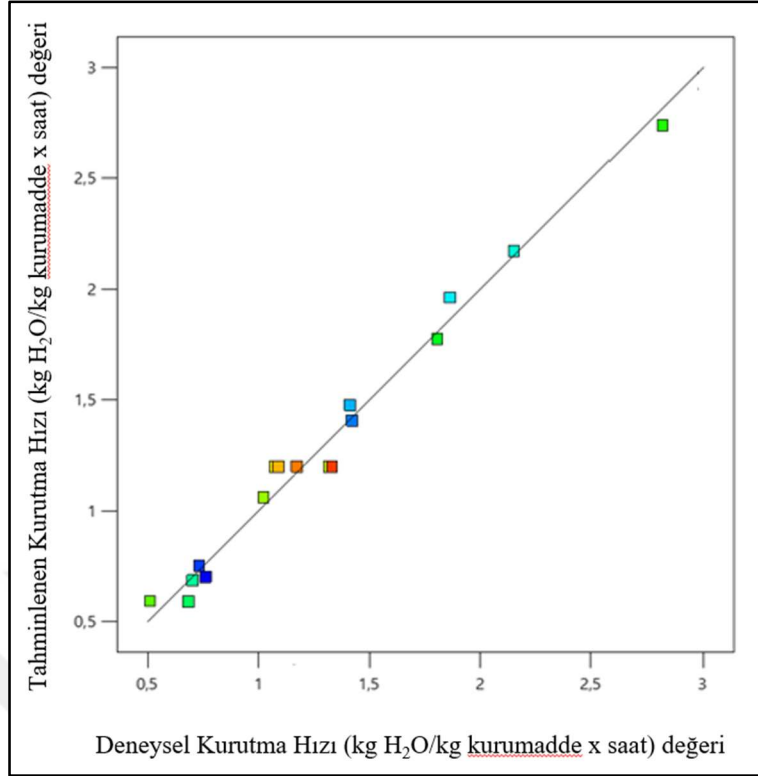
$$a^* \text{ değeri} = +6.99 - 0.2981 * A + 0.2190 * B + 4.01 * C \quad (4.12)$$

A = Hava Hızı (m/sn) B= Sıcaklık (°C) C= Dilim Kalınlığı (mm)

Tablo 4.14. Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı ANOVA Analizi

Kaynak	Hata Kareler Toplamı	df	Ortalama Hata Karesi	F- değeri	p- değeri
Kurutma Hızı					
Model	5.69	9	0.6317	43.41	< 0.0001
Residual (Kalıntı)	0.1019	7	0.0146		
Lack of Fit	0.0422	3	0.0141	0.9418	0.4995
Pure Error (Saf Hata)	0.0597	4	0.0149		
Toplam	5.79	16			
R ² = 0.9824					
CV% = 9.36					
Rehidrasyon Kapasitesi					
Model	2.40	3	0.7998	23.01	< 0.0001
Residual (Kalıntı)	0.4520	13	0.0348		
Lack of Fit	0.3380	9	0.0376	1.32	0.4227
Pure Error (Saf Hata)	0.1140	4	0.0285		
Toplam	2.85	16			
R ² = 0.8415					
CV% = 4.54					
a* değeri					
Model	129.83	3	43.28	18.06	< 0.0001
Residual (Kalıntı)	31.16	13	2.40		
Lack of Fit	12.03	9	1.34	0.2796	0.9480
Pure Error (Saf Hata)	19.13	4	4.78		
Toplam	160.99	16			
R ² = 0.8065					
CV% = 22.14					

Valencia portakal dilimlerinin tepsili kurutucuda kurutulması sürecinde, kurutma veriminin en önemli göstergelerinden biri olan kurutma hızı, işlem parametrelerine duyarlılığı yüksek bir yanıt değişkenidir. Bu nedenle, modelin tahmin doğruluğunu ve işlem parametrelerinin etkisi Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.'de verilmiştir.

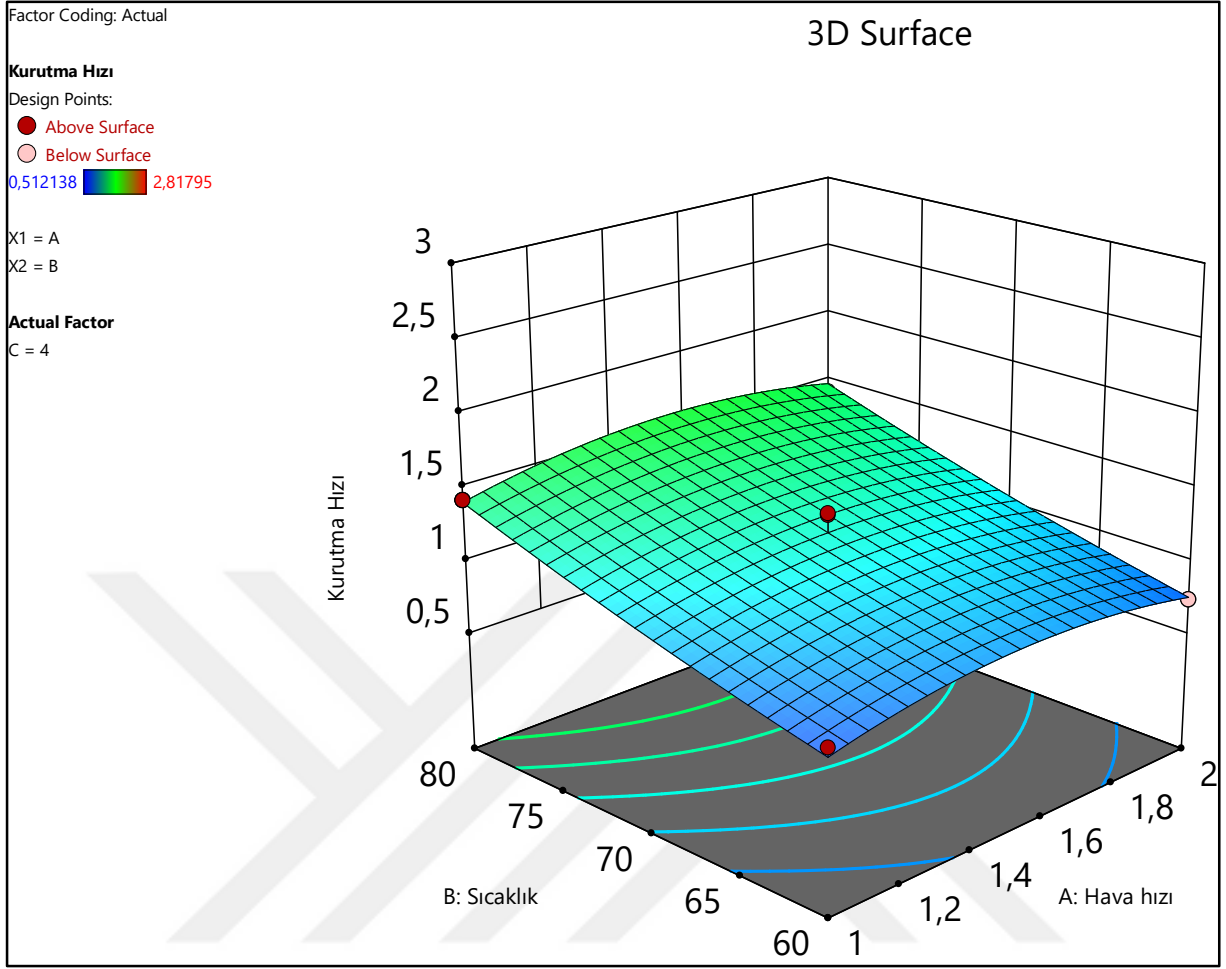


Şekil 4.19. Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızlarının DeneySEL ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.19.'da, kurutma hızı yanıt değişkenine ait deneysel ölçümler ile model tarafından tahmin edilen değerler arasındaki uyum değerlendirilmiştir. Noktaların 45° referans doğrusuna yakın bir dağılım göstermesi, modelin yüksek doğrulukta tahminlerde bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Grafikte yer alan kurutma hızı değerleri yaklaşık 0.5 m/s ile 2.9 m/s aralığında değişmektedir. Bu aralık, tepsili kurutma sisteminin sınırlı ısı transfer kapasitesiyle uyumlu olup, özellikle orta ve yüksek sıcaklıklarda kurutma hızının arttığı deneysel olarak doğrulanmıştır. Tahmin edilen ve deneysel değerlerin birbirine oldukça yakın olması, modelin geçerliliğini destekleyen önemli bir bulgudur.

Şekil 4.20.'de sunulan üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği, hava hızı (m/s) ve kurutma sıcaklığı (°C) değişkenlerinin kurutma hızı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Renk skalasına göre kurutma hızı değerleri yaklaşık 0.51 m/s ile 2.82 m/s arasında değişmektedir.



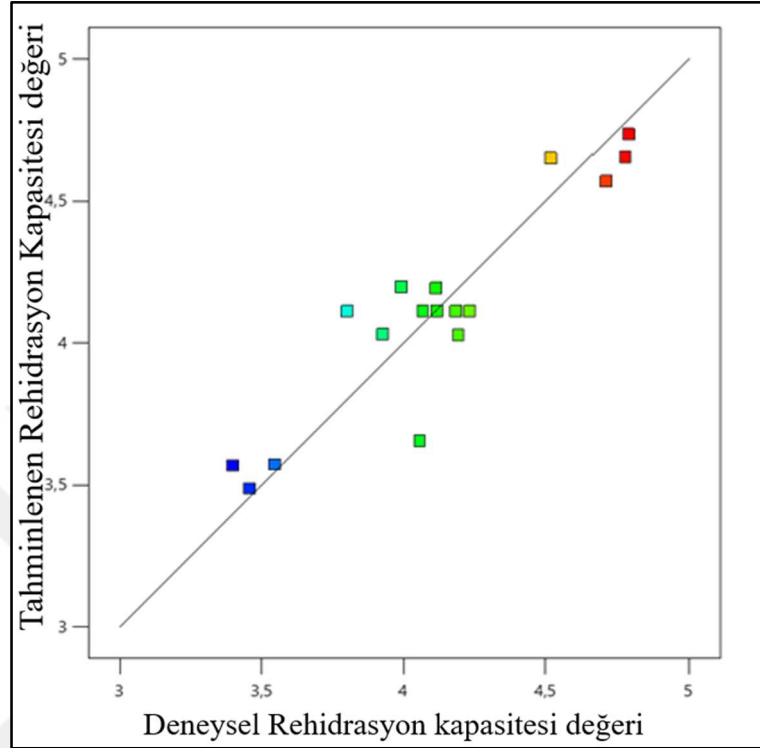
Şekil 4.20. Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Kurutma Hızı Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Yüzeyin eğimi, hem sıcaklık hem de hava hızındaki artışın kurutma hızını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Özellikle 80 °C sıcaklık ve 2 m/s hava hızı kombinasyonu, maksimum kurutma hızına karşılık gelmektedir. Bu durum, ısı transferinin hızlanması ve nem difüzyonunun artmasıyla ilişkilidir. Kontur çizgilerinin eşit aralıklı ve düzgün olması, modelin istatistiksel anlamlılığını ve parametrik etkileşimlerin kontrol edilebilirliğini desteklemektedir.

Bu analiz, tepsili kurutma sisteminde optimum kurutma verimine ulaşmak için sıcaklık ve hava hızı parametrelerinin birlikte optimize edilmesi gerektiğini açıkça göstermektedir.

Rehidrasyon kapasitesi, kurutulmuş ürünlerin suyu geri alma yeteneğini ifade eder ve kaliteyi doğrudan etkileyen kritik bir göstergedir. Valencia portakal dilimlerinin tepsili kurutma

işleminde bu yanıt değişkenine ait deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması ve işlem parametrelerinin etkisinin değerlendirilmesi Şekil 4.21. ve Şekil 4.22.'de verilmiştir.



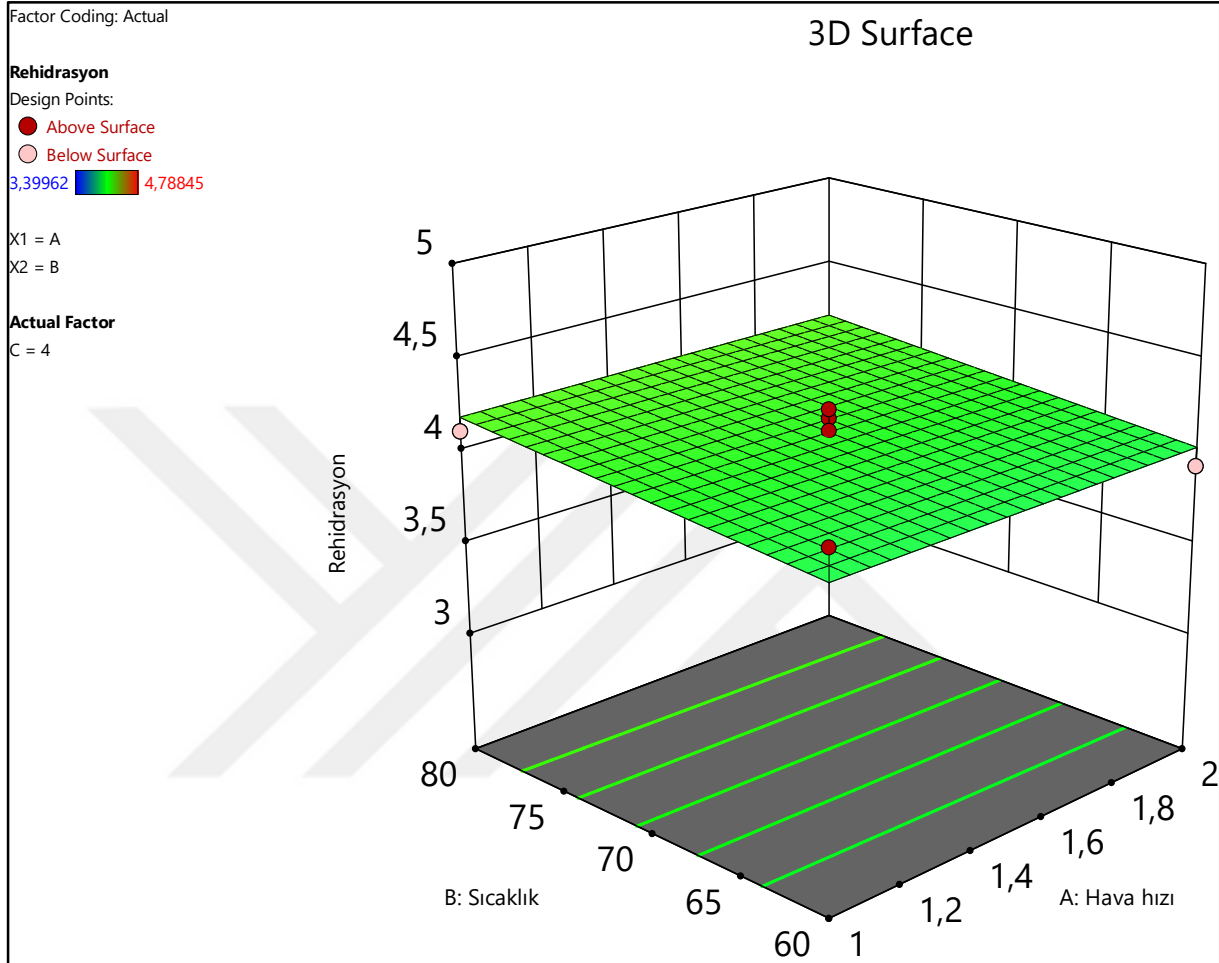
Şekil 4.21. Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.21.'de, Valencia portakallarının rehidrasyon kapasitesi için deneysel olarak ölçülen değerlerle, RSM modeli tarafından tahmin edilen teorik değerler karşılaştırılmaktadır. Grafik incelendiğinde, veri noktalarının çoğunluğunun 45° referans doğrusuna yakın konumlandığı görülmektedir. Bu durum, modelin yüksek tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.

Veriler, rehidrasyon kapasitesi değerlerinin yaklaşık 3.5 mL/g ile 5.0 mL/g arasında değiştiğini ortaya koymaktadır. Modelin düşük ve yüksek uçlardaki tahminleri arasında sınırlı sapmalar görülse de genel eğilim deneysel değerlerle yüksek derecede örtüşmektedir. Bu da kurulan ikinci dereceden modelin geçerliliğini ve pratikte kullanılabilirliğini desteklemektedir.

Şekil 4.22., sıcaklık ve hava hızı parametrelerinin rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkilerini gösteren üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği ve eş yükselti eğrileri verilmiştir. Renk skalasına göre

rehidrasyon kapasitesi değerleri 3.89 ile 4.78 mL/g arasında değişmektedir. Bu durum, işlem koşullarının ürünün su tutma kapasitesinde anlamlı farklar yarattığını göstermektedir.

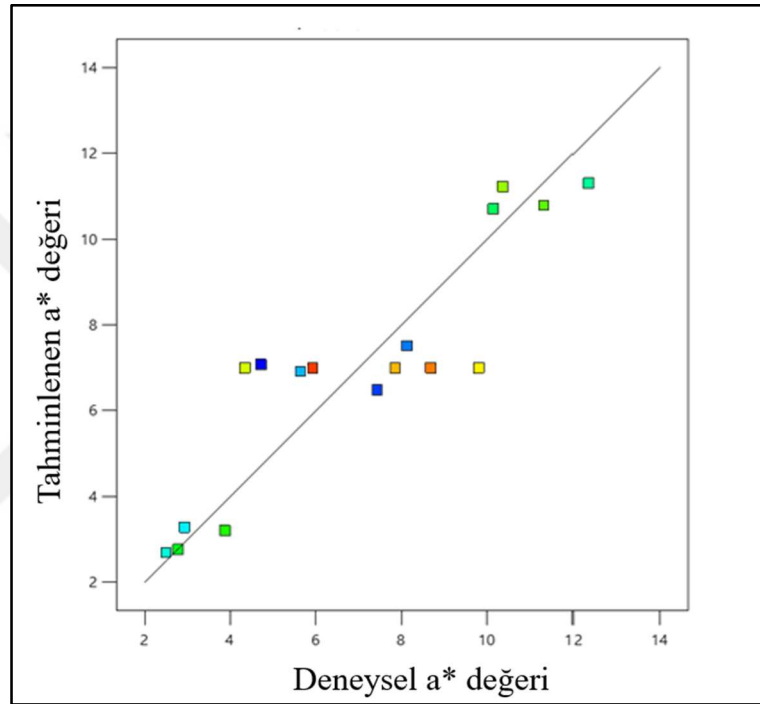


Şekil 4.22. Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Rehidrasyon Kapasitesi Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Grafikteki yüzey yapısı ve eğimler incelendiğinde, hem sıcaklık hem de hava hızındaki artışın rehidrasyon kapasitesi üzerinde pozitif etkiler yarattığı, ancak bu etkinin lineer değil, daha çok kuadratik bir eğilim gösterdiği gözlemlenmektedir. Özellikle orta düzey sıcaklık ve hava hızı kombinasyonlarında maksimum rehidrasyon kapasitesine ulaşıldığı görülmektedir. Bu, aşırı yüksek sıcaklıkların ürünün iç yapısında bozulmaya neden olarak su tutma kapasitesini sınırlayabileceği anlamına gelmektedir.

Valencia portakal dilimlerinin tepsili kurutma işleminde, ürünün görsel kalitesini belirleyen en önemli parametrelerden biri olan b* renk değeri, kurutma koşulları altında meydana gelen renk

dönüşümlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, geliştirilmiş yanıt yüzeyi modeli (RSM) ile elde edilen tahmin değerlerinin deneysel ölçümlerle karşılaştırılması, modelin öngörü gücünü ve kurutma sürecinde renk gelişimine etki eden proses parametrelerinin (özellikle güç ve sıcaklık) rolünü değerlendirmede kritik öneme sahiptir. Bu amaçla; Şekil 4.23.'te a^* renk değerine ilişkin deneysel ve model tahmin değerlerinin karşılaştırılması, Şekil 4.24.'te ise güç ve sıcaklığın a^* değerine etkisini gösteren yanıt yüzeyi ve eş yükselti eğrileri verilmiştir.

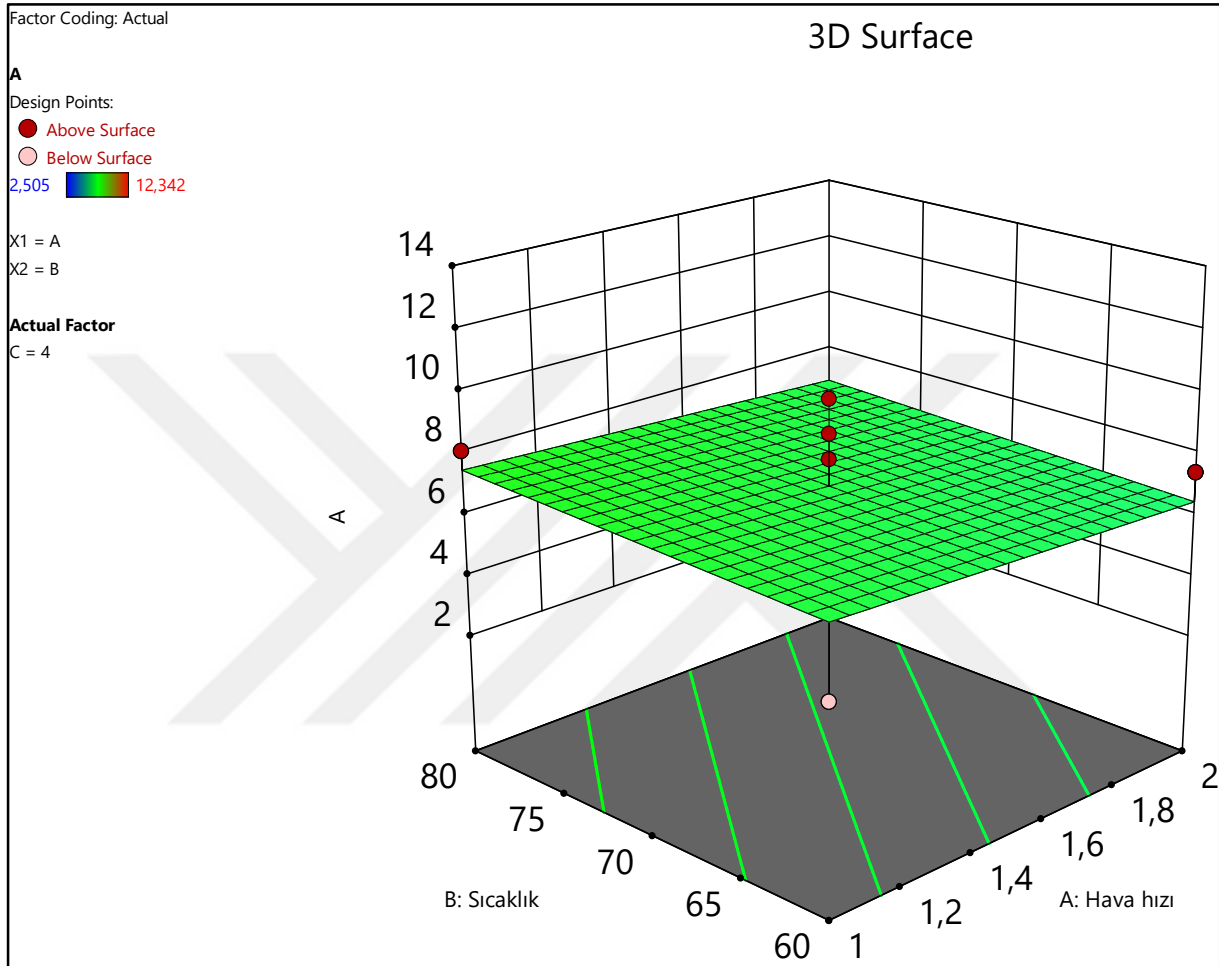


Şekil 4.23. Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında a^* Renk Değerinin Deneysel ve RSM Model Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.23.'te, deneysel olarak ölçülen a^* renk değerleri ile RSM modeli tarafından tahmin edilen değerler karşılaştırılmaktadır. Grafik üzerinde, ideal uyumu temsil eden 45° referans doğrusu ile veri noktaları arasındaki dağılım incelendiğinde, tahminlerin çoğunlukla deneysel değerlere yakın konumlandığı görülmektedir. Ancak, yüksek kurutma hızı aralıklarında modelin tahmin değerlerinde deneysel verilere göre sapma eğilimi gösterdiği gözlemlenmektedir.

a^* değerleri yaklaşık olarak 2.5 ile 13.0 m/s aralığında değişmektedir. Tahmin edilen değerlerin bazı uç noktalar dışında referans doğrusuna yakın seyretmesi, modelin genel geçerliliğini

desteklemekle birlikte, özellikle yüksek sıcaklık ve düşük kalınlık gibi sınır koşullarda doğruluğun nispeten azaldığını göstermektedir. Bu durum, modelin validasyonu açısından dikkate alınması gereken bir unsurdur.



Şekil 4.24. Valencia Portakallarının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında a* Renk Değeri Üzerine Hava Hızı ve Sıcaklığın Etkisini Gösteren Yanıt Yüzeyi ve Eş Yükseklik Eğrisi

Şekil 4.24.'te yer alan yanıt yüzey grafiği, sıcaklık ve mikrodalga gücünün a* renk parametresi üzerindeki etkisini göstermektedir. Renk skalasına göre a* değerlerinin 2.5 ile 12.3 arasında değiştiği görülmektedir. Yüzey eğrisi incelendiğinde, yüksek sıcaklık ve güç seviyelerinde a* değerinin arttığı anlaşılmaktadır. Bu durum, sıcaklığın ve enerji girdisinin artışına bağlı olarak renk pigmentlerinin daha belirgin hale geldiğini ve sarı rengin yoğunlaştığını ortaya koymaktadır.

Grafikteki düzlemsel yapı ve renk geçişleri, sıcaklık ve gücün a^* rengi üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı fakat nispeten lineer olduğunu göstermektedir. Eş yükselti eğrileri ise, özellikle orta düzey sıcaklık (yaklaşık 70 °C) ve yüksek güç (yaklaşık 4 kW) seviyelerinde a^* değerinin maksimuma ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu durum, kurutma işlemi esnasında görsel kalite açısından hedeflenen sarı rengin en yüksek düzeyde elde edilebildiği koşulları işaret etmektedir.

Deneme desenine dayalı olarak yürütülen optimizasyon çalışmasında, kurutma sürecinde hedeflenen kalite kriterleri doğrultusunda kurutma hızının artırılması, rehidrasyon kapasitesinin maksimize edilmesi ve a^* renk parametresinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çoklu optimizasyon amacı doğrultusunda istenilirlik fonksiyonu (desirability function) kullanılmış ve toplamda 82 farklı alternatif çözüm kombinasyonu belirlenmiştir. Belirlenen bu çözüm kombinasyonlarına ilişkin detaylı bilgiler Tablo 4.15.'te sunulmaktadır.

Optimum işlem koşullarının belirlenmesinde, yazılım tarafından önerilen çözümler arasından en yüksek istenilirlik indeksine sahip olan birinci çözüm alternatifi tercih edilmiştir. Bu noktada elde edilen optimum işlem parametreleri; sıcaklık için 80 °C, hava hızı için 1.806 m/s ve dilim kalınlığı için 2.00 mm olarak belirlenmiştir. Söz konusu koşullar, hem kurutma verimliliğinin artırılması hem de nihai ürün kalitesinin görsel ve yapısal özellikler bakımından iyileştirilmesini mümkün kılacak potansiyele sahiptir.

Belirlenen optimum işlem parametrelerinin geçerliliğini test etmek amacıyla, aynı koşullarda üç bağımsız doğrulama kurutma denemesi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen ortalama deneysel veriler ile model tarafından öngörülen tahmini değerler karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar da Tablo 4.16.'da verilmiştir. Bu doğrulama süreci, optimizasyon modelinin tahmin gücünün ve pratik uygulanabilirliğinin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Optimum işlem koşullarında gerçekleştirilen doğrulama denemeleri sonucunda elde edilen ortalama deneysel veriler ile, yanıt yüzey metoduna (RSM) dayalı model tarafından tahmin edilen kurutma hızı, rehidrasyon kapasitesi ve a^* renk değeri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın bulunmadığı belirlenmiştir. Bu bulgu, kurulan modellerin geçerliliğini ve

tahmin edici gücünü desteklemektedir. Söz konusu karşılaştırma, tek örnek t-testi ile değerlendirilmiş olup, analiz sonuçları (Ek G)'de ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Tablo 4.15. Valencia Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Hava Hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	a* değeri	İstenilirlik (Desirability)	
1	1.806	80.000	2.000	2.749	4.737	3.018	0.960	Seçildi
2	1.810	80.000	2.000	2.748	4.737	3.015	0.960	
3	1.798	80.000	2.000	2.750	4.737	3.023	0.960	
4	1.801	79.999	2.000	2.750	4.737	3.021	0.960	
5	1.822	80.000	2.000	2.746	4.737	3.008	0.960	
6	1.786	80.000	2.000	2.752	4.737	3.030	0.960	
7	1.829	80.000	2.000	2.745	4.737	3.004	0.960	
8	1.778	80.000	2.000	2.753	4.737	3.034	0.960	
9	1.758	80.000	2.000	2.755	4.737	3.046	0.960	
10	1.752	80.000	2.000	2.755	4.737	3.050	0.960	
11	1.872	80.000	2.000	2.736	4.737	2.978	0.960	
12	1.727	80.000	2.000	2.757	4.737	3.065	0.960	
13	1.715	80.000	2.000	2.758	4.737	3.072	0.960	
14	1.896	80.000	2.000	2.731	4.737	2.964	0.960	
15	1.839	79.937	2.001	2.739	4.736	2.999	0.959	
16	1.693	80.000	2.000	2.758	4.737	3.085	0.959	
17	1.783	79.858	2.000	2.744	4.736	3.029	0.959	
18	1.933	80.000	2.000	2.720	4.738	2.942	0.959	
19	1.803	79.836	2.000	2.740	4.736	3.016	0.959	
20	1.769	80.000	2.006	2.749	4.735	3.052	0.959	
21	1.947	80.000	2.000	2.716	4.738	2.934	0.958	
22	1.655	80.000	2.000	2.758	4.736	3.108	0.958	
23	1.967	80.000	2.000	2.709	4.738	2.922	0.958	
24	1.975	80.000	2.000	2.706	4.738	2.917	0.958	
25	1.629	80.000	2.000	2.757	4.736	3.123	0.958	
26	1.613	80.000	2.000	2.755	4.736	3.133	0.957	
27	1.607	80.000	2.000	2.755	4.736	3.137	0.957	
28	1.986	80.000	2.003	2.700	4.737	2.917	0.957	

Tablo 4.15. (Devamı). Valencia Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Hava Hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	a* değeri	İstenilirlik (Desirability)
29	1.598	80.000	2.000	2.754	4.736	3.142	0.956
30	1.593	80.000	2.000	2.753	4.736	3.145	0.956
31	1.585	80.000	2.000	2.752	4.736	3.150	0.956
32	2.000	79.863	2.000	2.689	4.737	2.899	0.956
33	1.570	80.000	2.000	2.751	4.736	3.158	0.955
34	1.745	79.506	2.000	2.728	4.733	3.044	0.955
35	1.563	80.000	2.000	2.750	4.736	3.163	0.955
36	1.555	80.000	2.000	2.748	4.736	3.167	0.955
37	1.991	80.000	2.012	2.691	4.735	2.931	0.954
38	1.738	79.390	2.000	2.723	4.732	3.045	0.954
39	1.533	80.000	2.000	2.745	4.736	3.181	0.954
40	1.497	80.000	2.000	2.737	4.736	3.202	0.952
41	1.483	80.000	2.000	2.734	4.736	3.210	0.951
42	1.469	80.000	2.000	2.731	4.736	3.219	0.950
43	1.465	80.000	2.000	2.730	4.736	3.221	0.950
44	1.865	78.869	2.000	2.675	4.728	2.958	0.949
45	1.484	79.672	2.000	2.716	4.733	3.202	0.948
46	1.413	80.000	2.000	2.714	4.735	3.252	0.947
47	1.412	80.000	2.000	2.714	4.735	3.253	0.947
48	1.407	80.000	2.000	2.712	4.735	3.256	0.946
49	1.401	80.000	2.000	2.710	4.735	3.259	0.946
50	1.671	79.898	2.053	2.713	4.721	3.203	0.945
51	1.387	80.000	2.000	2.705	4.735	3.268	0.945
52	1.379	79.999	2.000	2.702	4.735	3.272	0.944
53	1.727	78.221	2.000	2.659	4.722	3.026	0.943
54	1.342	80.000	2.000	2.688	4.735	3.295	0.941
55	1.753	80.000	2.078	2.697	4.716	3.207	0.941
56	1.515	79.968	2.054	2.701	4.721	3.298	0.940
57	1.254	80.000	2.000	2.646	4.735	3.347	0.934
58	1.230	80.000	2.000	2.634	4.735	3.361	0.931
59	1.217	80.000	2.000	2.626	4.735	3.369	0.930

Tablo 4.15. (Devamı). Valencia Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında RSM Tabanlı Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi

Çözüm	Hava Hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)	Dilim Kalınlığı (mm)	Kurutma Hızı (kg H ₂ O/kg KM x s)	Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)	a* değeri	İstenilirlik (Desirability)
60	1.565	77.053	2.000	2.589	4.712	3.097	0.928
61	2.000	76.823	2.000	2.523	4.711	2.833	0.927
62	2.000	80.000	2.125	2.603	4.704	3.152	0.927
63	1.185	80.000	2.004	2.605	4.733	3.396	0.925
64	1.171	80.000	2.000	2.599	4.734	3.397	0.925
65	1.166	79.993	2.000	2.596	4.734	3.399	0.924
66	1.955	75.482	2.000	2.468	4.700	2.830	0.916
67	1.094	79.999	2.000	2.548	4.734	3.442	0.916
68	1.067	80.000	2.000	2.528	4.734	3.458	0.912
69	1.993	80.000	2.219	2.536	4.679	3.345	0.904
70	1.003	80.000	2.000	2.477	4.734	3.497	0.903
71	1.291	76.257	2.000	2.463	4.704	3.243	0.902
72	1.539	74.095	2.000	2.430	4.687	3.048	0.900
73	2.000	73.511	2.000	2.349	4.684	2.760	0.895
74	2.000	73.243	2.000	2.335	4.682	2.754	0.893
75	2.000	71.941	2.000	2.269	4.671	2.726	0.880
76	1.000	77.346	2.000	2.331	4.712	3.440	0.877
77	2.000	71.102	2.000	2.227	4.664	2.707	0.872
78	2.000	69.406	2.000	2.144	4.650	2.670	0.856
79	2.000	67.956	2.000	2.075	4.638	2.638	0.842
80	2.000	63.108	2.000	1.854	4.597	2.532	0.794
81	1.340	63.350	2.000	1.867	4.597	2.931	0.785
82	1.192	61.328	2.000	1.708	4.579	2.975	0.749

Tablo 4.16. Valencia Portakalının Tepsili Kurutucuda Kurutulmasında Optimum Kurutma Koşullarında Elde Edilen Deneysel ve Tahmin Edilen Değerlerin Karşılaştırılması

Yanıtlar	Deneysel Veriler	Tahminlenen Veriler
Kurutma Hızı	2.725±0.003	2.749
Rehidrasyon Kapasitesi	4.631±0.068	4.737
a* renk değeri	3.000±0.361	3.018

4.2. Vakum Mikrodalga ve Tepsili Kurutma Sistemleri ile Kurutulan Washington Navel ve Valencia Portakal Dilimlerinin Fiziksel, Kimyasal ve Bazı Kalite Özellikleri

Farklı kurutma yöntemlerinin (Vakum Mikrodalga ve Tepsili Kurutma) portakal dilimlerinin kalite parametreleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla, kurutma işlemine tabi tutulan örneklerin fiziksel özellikleri, kimyasal bileşimleri ve bazı kalite özellikleri incelenmiştir; elde edilen bulgular ışığında her iki yöntemin ürün kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan aistatistiksel değerlendirme sonuçları (Ek H)'de verilmiştir.

4.2.1. Vakum Mikrodalga ve Tepsili Kurutma Sistemleri ile Kurutulan Washington Navel ve Valencia Portakal Dilimlerinin Bazı Kalite Özellikleri

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmuş ve ürünlerin çeşitli kalite parametreleri üzerindeki etkileri bu kısımda değerlendirilmiştir. Kurutma işlemi sonrası rehidrasyon kapasitesi, pH ve titrasyon asitliği, su aktivitesi ve nem içeriği, toplam fenolik madde içeriği, toplam karotenoid madde miktarı, antioksidan aktivite değeri ve hidroksimetilfurfural (HMF) oluşumu gibi kalite göstergeleri analiz edilmiştir. Bu parametreler, hem kurutma yöntemlerinin ürün kalitesi üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkilerini belirlemek hem de ürünlerin fonksiyonel ve besinsel özelliklerini ortaya koymak açısından önem arz etmektedir. Aşağıdaki kısımda her bir başlık altında elde edilen analiz sonuçları, portakal dilimlerinin işlenme sonrası kalite özelliklerini belirlemek amacıyla bilimsel ve istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir (Tablo 4.17., Tablo 4.18., Tablo 4.19.).

4.2.1.1. *Rehidrasyon Kapasitesi Analiz Sonuçları*

Kurutulmuş gıdaların kalite değerlendirmesinde dikkate alınan temel parametrelerden biri rehidrasyon kapasitesidir. Rehidrasyon, kurutulmuş bir ürünün su ile yeniden temas ettiğinde orijinal yapısal özelliklerini, dokusal bütünlüğünü ve fonksiyonel niteliklerini geri kazanabilme yeteneğini ifade etmektedir. Bu özellik, ürünün gözenekli yapısına, hücresel bütünlüğüne ve kurutma sürecinde maruz kaldığı fiziksel ve kimyasal değişimlerin boyutuna doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, rehidrasyon kapasitesi, gıdanın dokusal bozulma düzeyini, kurutma sırasında meydana gelen hücre zarı hasarını ve su tutma yeteneğini yansıtan önemli bir kalite göstergesi olarak kabul edilmektedir (Krokida & Maroulis, 2001).

Tablo 4.17. Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerine ait kalite parametreleri

Özellikler	Washington Navel		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)		4.64 ± 0.188 ^a	4.45 ± 0.177 ^b
pH	4.59 ± 0.018 ^c	4.83 ± 0.032 ^a	4.73 ± 0.118 ^b
Titrasyon Asitliği (g/100 g)	3.78 ± 0.072 ^a	2.51 ± 0.173 ^c	2.84 ± 0.330 ^b
Nem (%)	84.37 ± 0.429 ^a	6.93 ± 0.344 ^b	5.25 ± 0.999 ^c
Su aktivitesi (a _w)		0.42 ± 0.021 ^a	0.28 ± 0.076 ^b
Toplam Fenolik Madde (mg GAE/100 g KM)	2379.41 ± 44.504 ^a	584.73 ± 9.948 ^b	477.81 ± 13.703 ^c
Toplam Karotenoid (mg / 100 g KM)	8.77 ± 0.527 ^a	7.54 ± 0.251 ^b	6.38 ± 0.394 ^c
Antioksidan Aktivite (mM TE/100 gr KM)	37.22 ± 3.82 ^a	25.62 ± 0.429 ^b	24.52 ± 1.034 ^b
Hidroksi Metil Furfural (mg/100g)		14.12 ± 2.276 ^b	36.81 ± 1.196 ^a

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Tablo 4.18. Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerine ait kalite parametreleri

Özellikler	Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)		4.70 ± 0.177 ^a	4.57 ± 0.136 ^a
pH	4.24 ± 0.039 ^b	4.81 ± 0.043 ^a	4.82 ± 0.017 ^a
Titrasyon Asitliği (g/100 g)	5.92 ± 0.594 ^a	4.09 ± 0.166 ^b	3.83 ± 0.124 ^b
Nem (%)	83.37 ± 0.826 ^a	7.83 ± 1.265 ^b	6.08 ± 0.864 ^c
Su aktivitesi (a _w)		0.32 ± 0.040 ^a	0.30 ± 0.020 ^a
Toplam Fenolik Madde (mg GAE/100 g KM)	2289.54 ± 61.494 ^a	573.43 ± 7.256 ^b	507.73 ± 18.843 ^c
Toplam Karotenoid (mg/100 g KM)	20.88 ± 3.449 ^a	12.35 ± 1.174 ^b	11.57 ± 1.712 ^b
Antioksidan Aktivite (mM TE/100 gr KM)	30.50 ± 2.19 ^a	25.62 ± 1.018 ^b	25.82 ± 0.473 ^b
Hidroksi Metil Furfural (mg/100g)		9.75 ± 0.194 ^b	40.88 ± 1.036 ^a

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Tablo 4.19. Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde kalite parametre değerleri

Özellikler	Portakal Çeşitleri ve Kurutma Yöntemleri					
	Washington Navel			Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Rehidrasyon Kapasitesi (g/g)		4.64 ± 0.188 ^{a,A}	4.45 ± 0.177 ^{b,B}		4.70 ± 0.177 ^{a,A}	4.57 ± 0.136 ^{a,AB}
pH	4.59 ± 0.019 ^{c,C}	4.83 ± 0.032 ^{a,A}	4.73 ± 0.118 ^{b,B}	4.24 ± 0.039 ^{b,D}	4.81 ± 0.043 ^{a,A}	4.82 ± 0.017 ^{a,A}
Titrasyon Asitliği (g/100 g)	3.78 ± 0.072 ^{a,C}	2.51 ± 0.173 ^{c,E}	2.84 ± 0.330 ^{b,D}	5.92 ± 0.594 ^{a,A}	4.10 ± 0.166 ^{b,B}	3.83 ± 0.124 ^{b,BC}
Nem (%)	84.37 ± 0.826 ^{a,A}	6.93 ± 0.344 ^{b,D}	5.25 ± 0.999 ^{c,F}	83.37 ± 0.826 ^{a,B}	7.83 ± 1.265 ^{b,C}	6.08 ± 0.864 ^{c,E}
Su aktivitesi (a_w)		0.42 ± 0.021 ^{a,A}	0.28 ± 0.076 ^{b,B}		0.32 ± 0.040 ^{a,B}	0.30 ± 0.020 ^{a,B}
Toplam Fenolik Madde (mg GAE/100 g KM)	2379.41 ± 44.504 ^{a,A}	584.73 ± 9.948 ^{b,C}	477.81 ± 13.703 ^{c,D}	2289.54 ± 61.494 ^{a,B}	573.43 ± 7.256 ^{b,C}	507.73 ± 18.843 ^{c,D}
Toplam Karotenoid (mg / 100 g KM)	8.77 ± 0.527 ^{a,C}	7.54 ± 0.251 ^{b,CD}	6.38 ± 0.394 ^{c,D}	20.88 ± 3.449 ^{a,A}	12.35 ± 1.174 ^{b,B}	11.57 ± 1.712 ^{b,B}
Antioksidan Aktivite (mM TE/100 gr KM)	37.22 ± 3.82 ^{a,A}	25.62 ± 0.429 ^{b,CD}	24.52 ± 1.034 ^{b,D}	30.50 ± 2.19 ^{a,B}	25.62 ± 1.018 ^{b,C}	25.82 ± 0.473 ^{b,C}
Hidroksi Metil Furfural (mg/100 g)		14.12 ± 2.276 ^{b,C}	36.81 ± 1.196 ^{a,B}		9.75 ± 0.194 ^{b,D}	40.88 ± 1.036 ^{a,A}

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Aynı satırda yer alan ve farklı büyük harflerle (A, B, C) gösterilen ortalamalar, meyve çeşitleri arasındaki değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerine uygulanan farklı kurutma yöntemlerinin (vakum mikrodalga kurutma ve tepsili kurutma) rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

Washington Navel portakal dilimlerinin rehidrasyon kapasitesi, uygulanan kurutma yöntemine bağlı olarak anlamlı şekilde farklılık göstermiştir ($p \leq 0.05$). Vakumlu mikrodalga kurutucu ile kurutulan örneklerde 4.64 ± 0.188 g/g, tepsili kurutma yöntemiyle elde edilen örneklerde rehidrasyon kapasitesi 4.45 ± 0.177 g/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler kurutma yöntemlerinin örneklerin rehidrasyon kapasitesi üzerine etkisinin önemli olduğunu göstermektedir ($p < 0.05$). İki kurutma metodu arasında istatistiksel açıdan fark vardır. Elde edilen bu bulgular, vakumlu mikrodalga kurutma sisteminin ürünün yapısal bütünlüğünü daha iyi koruyarak suyu yeniden tutma kapasitesini artırdığını ortaya koymuştur.

Valencia portakal dilimlerine ait rehidrasyon kapasitesi verileri de benzer şekilde değerlendirildiğinde; vakumlu mikrodalga kurutma (4.70 ± 0.177 g/g) ve tepsili kurutma (4.57 ± 0.136 g/g) yöntemlerinin rehidrasyon kapasitesi üzerine etkisi önemsiz bulunmuştur ($p > 0.05$). Elde edilen bulgulara göre, Valencia çeşidinde her iki kurutma yöntemi de rehidrasyon kapasitesini önemli ölçüde etkilememiştir. Kurutma yöntemleri arasındaki istatistiksel açıdan fark yoktur ($p > 0.05$).

Rehidrasyon kapasitesi yönünden her iki portakal çeşidi karşılaştırıldığında ise, kurutma yöntemlerinin rehidrasyon kapasitesi üzerine etkisi istatistiksel açıdan Washington navel için önemli ($p < 0.05$) Valencia için önemsiz bulunmuştur ($p > 0.05$). Genel olarak Valencia dilimlerinin kurutma sonrasında rehidrasyon performansının istatistiksel açıdan aynı olması daha stabil bir yapıda kaldığını düşündürmektedir. Vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin, Washington Navel portakal çeşidinde istatistiksel anlamda daha belirgin ve anlamlı etkisinin olduğu saptanmıştır ($p < 0.05$). Tepsili kurutma yönteminde ise Washington Navel dilimlerinde rehidrasyon kapasitesi anlamlı şekilde azalırken, Valencia çeşidinde böyle bir düşüş gözlenmemiştir. Bu durum, Valencia portakalının hücresel yapısının kurutma işlemleri sonrası suyu yeniden absorbe etme kapasitesini daha iyi koruduğunu ve yapısal deformasyona karşı daha dirençli olduğunu düşündürmektedir.

Genel değerlendirme yapıldığında, rehidrasyon kapasitesi açısından vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi, her iki portakal çeşidi için de avantajlı bir kurutma tekniği olarak öne çıkmıştır. Bu yöntemin, hücresel yapı üzerinde daha az tahribata neden olduğu ve gözenekli bir matris oluşumunu desteklediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, Washington Navel çeşidinin, tepsili kurutma yöntemine karşı yapısal stabilitesi daha zayıf olduğu, dolayısıyla rehidrasyon kapasitesinin bu yöntemde belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, portakal çeşidine bağlı olarak kurutma yöntemine verilen yapısal tepkilerin farklılaştığını göstermektedir.

4.2.1.2. pH ve Tirasyon Asitliği Analiz Sonuçları

Bir gıdanın asidik karakteri genellikle hem pH hem de titrasyon asitliği (TA) ile tanımlanır. pH, çözeltideki serbest H⁺ iyonlarının aktivitesini yansıtarak anlık asiditeyi gösterirken; TA, toplam asit varlığını yani hem serbest hem de zayıf bağlarla kompleks hâlinde bulunan organik asitleri içeren daha kapsamlı bir asidite ölçüsüdür. Bu iki parametre çoğunlukla birlikte değerlendirilir; çünkü pH yalnızca anlık iyonik durumu yansıtırken, TA ürünün toplam asit yükünü daha doğru bir şekilde temsil eder. Genellikle, biri artarken diğeri azalma eğilimi gösterir.

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının pH ve titrasyon asitliği üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir (Tablo 4.17., Tablo 4.18., Tablo 4.19.).

Washington Navel portakal dilimlerine ait pH değerinin, taze örneklerde 4.59 ± 0.018 olduğu ve kurutma işlemleri sonrasında pH değerlerinde anlamlı artışlar meydana geldiği belirlenmiştir ($p \leq 0.05$). Vakumlu mikrodalga kurutucu ile kurutulan örneklerde pH değeri 4.83 ± 0.032 , tepsili kurutucu ile kurutulanlarda ise 4.73 ± 0.118 olarak tespit edilmiş ve her iki kurutma yöntemi de istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ve aralarında fark vardır ($p < 0.05$).

Titrasyon asitliği değerleri ise kurutma yöntemiyle birlikte anlamlı şekilde azalmıştır. Taze örneklerde asitlik değeri 3.78 ± 0.072 g/100 g olarak belirlenmiş, vakumlu mikrodalga kurutmada 2.51 ± 0.173 , tepsili kurutmada ise 2.84 ± 0.330 g/100 g olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu bulgular, vakumlu mikrodalga kurutmanın asit kaybı açısından daha belirgin etki

yarattığını, tepsili kurutmanın ise bu kaybı daha sınırlı düzeyde gerçekleştirdiğini göstermiştir. Vakumlu mikrodalga ve tepsili kurutucuda kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerinin titrasyon asitliği değerleri istatistiksel açıdan anlamlıdır ($p<0.05$)

Valencia portakalında ise pH değeri, taze örneklerde 4.24 ± 0.039 olarak ölçülmüş, kurutma işlemleri sonrasında bu değerde anlamlı artışlar olduğu belirlenmiştir ($p \leq 0.05$). Vakumlu mikrodalga kurutma ile kurutulan örneklerde pH 4.81 ± 0.043 , tepsili kurutma ile kurutulan örneklerde ise 4.82 ± 0.017 olarak tespit edilmiştir. Her iki kurutma yöntemi de, taze örneklerle karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar oluşturmuştur ($p<0.05$); ancak vakumlu mikrodalga ve tepsili kurutma yöntemleri kendi aralarında anlamlı bir fark göstermemiştir ($p>0.05$). Bu durum, kurutma işleminin ürün yapısı üzerinde genel bir etki yarattığını, ancak tercih edilen yöntemin pH üzerinde birbirinden belirgin şekilde ayrılmadığını ortaya koymaktadır.

Valencia portakalında titrasyon asitliği bakımından ise taze örneklerin asitlik değeri 5.92 ± 0.594 g/100 g olarak tespit edilmiştir. Vakumlu mikrodalga kurutma sonrasında bu değer 4.09 ± 0.166 , tepsili kurutma ile ise 3.83 ± 0.124 g/100 g olarak saptanmıştır. Her iki kurutma yönteminin de titrasyon asitliğinde azalmaya yol açtığı; tepsili kurutmada, asitliğin daha fazla azalarak vakumlu mikrodalga kurutmaya kıyasla farklı olduğu belirlenmiştir. Ancak istatistiksel açıdan her iki kurutma yöntemi arasında titrasyon asitliği bakımından fark yoktur ($p>0.05$)

Portakal çeşitleri ve kurutma yöntemlerine göre pH değerleri bakımından değerlendirildiğinde, her iki portakal çeşidinde de kurutma işlemleri sonrası anlamlı artışlar meydana geldiği belirlenmiştir. Ancak Valencia çeşidinin başlangıç pH değeri (4.24) Washington Navel'e (4.59) göre daha düşük olup, daha asidik bir yapıya sahip olduğu saptanmıştır. Kurutma sonrası her iki portakal çeşidi de benzer pH aralıklarına ulaşmış olsa da, pH'daki artışın Valencia'da daha yüksek oranda gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Titrasyon asitliği açısından incelendiğinde, Valencia portakalında taze örneklerde asitlik değeri Washington Navel'den anlamlı düzeyde yüksek bulunmuştur (5.92 g/100 g, 3.78 g/100 g). Ancak her iki çeşitte de kurutma işlemleriyle birlikte asitlik değerleri belirgin şekilde azalmıştır.

Washington Navel’de vakumlu mikrodalga kurutma, en düşük titrasyon asitliği ile sonuçlanırken; Valencia’da ise bu azalma en çok tepsili kurutma ile gözlenmiştir.

pH değerindeki yükselme ile titrasyon asitliğindeki düşüşün temel nedeninin, kurutma işlemi sırasında özellikle dilimlenmiş portakal yüzeylerinden gerçekleşen sıvı kaybı olduğu kanısına varılmıştır. Özellikle dilimlenmiş yüzey alanlarının genişliği ve açıkta kalan hücresel yapılar, bu kayıpları artırarak pH ve titrasyon asitliği parametreleri üzerinde doğrudan etkili olduğu kanısına varılmıştır.

4.2.1.3. Nem İçeriği ve Su Aktivitesi Analiz Sonuçları

Kurutulmuş ürünlerde su aktivitesi, ürünün içerdiği toplam su miktarından ziyade mikrobiyal bozulma, enzimatik aktivite ve kimyasal tepkimelere katılabilecek serbest suyun oranını yansıtır; bu nedenle düşük su aktivitesi, raf ömrünü uzatır ve ürün güvenliğini artırır (Kutlu vd., 2015).

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının nem içeriği (%) ve su aktivitesi (a_w) üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.17., Tablo 4.18., Tablo 4.19.).

Washington Navel portakal dilimlerinde nem içeriği ve su aktivitesi değerleri, uygulanan kurutma yöntemine bağlı olarak istatistiksel açıdan anlamlı şekilde değişiklik göstermiştir ($p<0.05$). Taze örneklerde nem içeriği 84.37 ± 0.826 olarak belirlenmiştir. Kurutma işlemleri sonucunda nem içeriğinin, vakumlu mikrodalga kurutmada 6.93 ± 0.34 , tepsili kurutmada ise 5.25 ± 0.99 düzeyine düştüğü saptanmıştır. Her iki kurutma yönteminde nem içeriği önemli ölçüde azalmış olmakla birlikte, tepsili kurutma yönteminde nem içeriğinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kurutma yöntemlerinin nem içeriği (%) üzerine etkisi önemlidir ($p<0.05$).

Benzer şekilde, su aktivitesi (a_w) değerleri kurutulmuş örneklerde vakumlu mikrodalgada 0.42 ± 0.02 , tepsili kurutucu ile 0.28 ± 0.08 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu bulgular, su

aktivitesi bakımından da tepsili kurutmanın daha etkili nem uzaklaştırması sağladığını ve mikrobiyolojik stabilite açısından daha güvenli bir ürün elde edildiğini göstermektedir.

Valencia portakal dilimlerinde de benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Taze örneklerde nem içeriği 83.37 ± 0.83 olarak belirlenmiş, vakumlu mikrodalga kurutucuda ise nem içeriğinin 7.83 ± 1.27 'ye, tepsili kurutucuda ise 6.08 ± 0.86 'ye düştüğü belirlenmiştir. Her iki yöntem de taze meyveye göre anlamlı bir nem kaybı saptanmış, ancak tepsili kurutma ile elde edilen ürünlerin daha düşük nem içerdiği tespit edilmiştir. Aynı şekilde Valencia portakalda da kurutma yöntemleri arasında nem içeriği (%) bakımından istatistiksel açıdan anlamlı fark vardır ($p < 0.05$).

Valencia portakal dilimleri su aktivitesi açısından değerlendirildiğinde, vakum mikrodalga kurutucu ile kurutulan örneklerde a_w değeri 0.32 ± 0.040 , tepsili kurutmada ise 0.30 ± 0.020 olarak belirlenmiş; bu değerler istatistiksel olarak farklılık göstermemiştir. Valencia çeşidinde her iki yöntem de güvenli depolama için yeterli su aktivitesi seviyesine ulaşmış, ancak su aktivitesi bakımından yöntemler arasında anlamlı bir fark olmadığı tespit edilmiştir ($p > 0.05$).

Nem içeriği (%) açısından genel olarak değerlendirildiğinde, hem Washington Navel hem de Valencia portakal çeşitlerinde taze meyveler yüksek nem oranına sahipken, kurutma işlemleriyle bu değerlerde ciddi düşüşler sağlanmıştır. Her iki çeşitte de tepsili kurutma, vakumlu mikrodalga kurutmaya kıyasla daha düşük nem oranı sağlamış, bu durum kurutma süresinin uzunluğu ve ısı ile işlemin etkisiyle ilişkilendirilmiştir. Ancak, Valencia örneklerindeki kalan nem içeriği Washington Navel'e göre genel olarak daha yüksektir; bu da Valencia çeşidinin su tutma kapasitesinin daha fazla olabileceğini göstermektedir.

Su aktivitesi bakımından ise Washington Navel'de kurutma yöntemleri arasında istatistiksel bakımdan fark olduğu (vakumlu mikrodalga: 0.42, tepsili: 0.28), Valencia çeşidinde ise vakumlu mikrodalga ve tepsili kurutma yöntemleri arasında istatistiksel fark bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, Washington Navel çeşidinin su aktivitesinin kurutma yöntemlerinden daha fazla etkilendiğini göstermektedir.

Her iki portakal çeşidinde uygulanan kurutma işlemleri, ürünlerin nem içeriği değerlerini istatistiksel olarak anlamlı düzeyde azaltmıştır ($p < 0.05$). Özellikle tepsili kurutma yöntemi,

daha düşük nem içeriği ve su aktivitesi değerleri sağlayarak, raf ömrü ve mikrobiyolojik stabilite açısından daha güvenli ürünlerin elde edilmesine olanak tanımıştır. Bununla birlikte, Washington Navel çeşidi, su aktivitesi bakımından kurutma yöntemlerinden daha fazla etkilendiğini göstermiştir. Diğer yandan, Valencia çeşidinde kurutma yöntemine açısından su aktivitesi değerlerinde farklılık olmadığı belirlenmiştir ($p>0.05$) Elde edilen bu bulgular, portakal çeşidi ile kurutma yöntemi arasındaki etkileşimin, nihai ürün kalitesi üzerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

4.2.1.4. Toplam Fenolik Madde Analiz Sonuçları

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının toplam fenolik madde üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.17., Tablo 4.18., Tablo 4.19.).

Washington Navel portakal dilimlerinde toplam fenolik madde içeriğinin, uygulanan kurutma yöntemine bağlı olarak istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde değişiklik gösterdiği belirlenmiştir ($p\leq 0.05$). Taze örneklerde toplam fenolik madde içeriği 2379.41 ± 44.504 mg GAE/100 g kurumadde olarak saptanmıştır. Vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi ile kurutulan örneklerde toplam fenolik madde içeriğinin 584.73 ± 9.948 mg GAE/100 g kurumaddeye, tepsili kurutma yöntemi ile kurutulan örneklerde ise 477.81 ± 13.703 mg GAE/100 g kurumaddeye düştüğü tespit edilmiştir. Her iki kurutma yöntemin de taze örneklerle göre toplam fenolik madde içeriğinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalma meydana gelmiştir. Ayrıca, vakumlu mikrodalga kurutmanın, tepsili kurutmaya göre fenolik bileşen kaybını daha az düzeyde gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Kurutma yöntemlerinin toplam fenolik madde üzerine etkileri yapılan istatistiksel analizler açısından anlamlı bulunmuştur ($p<0.05$).

Valencia portakal dilimlerinde de benzer şekilde kurutma işlemlerinin toplam fenolik madde içeriği üzerinde önemli etkiler yarattığı saptanmıştır ($p \leq 0.05$). Taze örneklerde toplam fenolik madde içeriği 2289.54 ± 61.494 mg GAE/100 g kurumadde olarak ölçülmüştür. Vakumlu mikrodalga kurutma ile bu değer 573.43 ± 7.256 mg, tepsili kurutmada ise 507.73 ± 18.843 mg GAE/100 g kurumaddeye düştüğü belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, her iki kurutma yöntemi de fenolik madde miktarında istatistiksel olarak anlamlı kayıplara

neden olmuştur. Aynı zamanda, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi, Valencia çeşidinde de fenolik bileşenlerin korunması açısından tepsili kurutmaya göre daha avantajlı olduğu görülmüştür.

Her iki portakal çeşidi açısından değerlendirildiğinde, taze örneklerin toplam fenolik madde içerikleri oldukça yüksek bulunmuştur (Washington Navel: 2379.41 mg GAE/100 g; Valencia: 2289.54 mg GAE/100 g). Bu durum, her iki çeşidin zengin fenolik profillere sahip olduğunu göstermektedir. Kurutma işlemleri ise toplam fenolik madde içeriğini önemli ölçüde azaltmıştır.

Kurutma yöntemi karşılaştırıldığında, hem Washington Navel hem de Valencia çeşitlerinde vakumlu mikrodalga kurutmanın, fenolik bileşenleri tepsili kurutmaya göre daha iyi koruduğu belirlenmiştir. Bu fark, vakum ortamının oksidatif reaksiyonları sınırlaması ve mikrodalga enerjisinin daha kısa sürede kurutma sağlayarak termal bozulmayı azaltmasıyla açıklanabilir ve bu durum yapılan önceki çalışmalarla da desteklenmektedir (Lewicki, 2006).

Çeşitler arası karşılaştırmada ise, her iki kurutma yönteminde de Washington Navel portakalının Valencia'ya göre daha yüksek toplam fenolik madde içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, Washington Navel çeşidinin yapısal ve biyokimyasal açıdan fenolik bileşik bakımından daha zengin olduğunu göstermektedir.

Toplam fenolik madde içeriği, hem portakal çeşidine hem de uygulanan kurutma yöntemine bağlı olarak istatistiksel açıdan anlamlı şekilde değişmiştir. Kurutma yöntemleri arasında toplam fenolik madde içeriği açısından istatistiksel açıdan anlamlı fark vardır ($p < 0.05$). Taze örneklerde oldukça yüksek olan fenolik madde düzeyleri, özellikle tepsili kurutma işlemiyle ciddi kayıplara uğramıştır. Vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi, her iki portakal çeşidinde de fenolik bileşenlerin korunması açısından daha uygun bir kurutma teknolojisi olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, fenolik bileşiklerin kurutma sürecine duyarlılığını ve uygun kurutma tekniği seçiminde dikkate alınması gereken kritik bir kalite göstergesi olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Bozkır vd. (2020) tarafından portakal kabuğu üzerinde ve Zhou vd. (2021) tarafından kıvılcık meyvesi üzerinde yürütülen araştırmalarla paralellik göstermektedir. Söz konusu çalışmalarda da belirtildiği üzere, kurutma süresinin uzaması

fenolik bileşiklerde daha fazla kayba neden olmakta, bu da ürünlerin fonksiyonel özelliklerinin azalmasına yol açmaktadır. Mikrodalga-vakum kurutma (VMD) yöntemi ile gerçekleştirilen kısa süreli kurutma işlemleri, fenolik bileşiklerin oksidatif bozunmasını minimize etmekte ve dolayısıyla toplam fenolik (TP) içerikte anlamlı düzeyde artışlara neden olmaktadır. Mikrodalga enerjisinin etkisiyle bitki dokusu içerisinde kısa sürede yüksek buhar basıncı ve sıcaklık oluşmakta, bu da hücre duvarı polimerlerinin parçalanmasına ve fenolik bileşiklerin serbest hale geçerek ekstraksiyon veriminin artmasına olanak sağlamaktadır (Zhou vd., 2021). Ayrıca, kısa işlem süresi, fenolik bileşiklerin termal ve oksidatif bozulmalarını da önemli ölçüde sınırlamaktadır.

Fenolik madde kayıpları, kurutma sürecinde sıklıkla yüksek sıcaklık uygulamaları, oksijen varlığı ve suyun hızlı uzaklaştırılması ile aktive olan enzimatik ve kimyasal bozunma reaksiyonları ile ilişkilendirilmektedir. VMD yöntemi, düşük oksijenli ortamda daha kısa sürede kuruma sağlayarak bu bozunmaları büyük ölçüde engellemektedir. Bununla birlikte, mikrodalga enerjisinin oluşturduğu lokal ısı odaklanma bölgelerinde, yüksek sıcaklığa bağlı olarak belirli oranda polifenol parçalanması da meydana gelebileceği öngörülmektedir. Tepsili kurutma yöntemi ise daha düşük yoğunlukta ancak uzun süreli ısıya maruz kalma nedeniyle, özellikle kümülatif etkiyle fenolik bileşiklerde daha fazla kayba yol açmıştır.

Her iki portakal çeşidi değerlendirildiğinde, Valencia'nın başlangıçta Washington Navel'e kıyasla daha düşük toplam fenolik içeriğe sahip olduğu, ancak kurutma işlemlerine karşı benzer düzeyde duyarlılık gösterdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, her iki çeşit açısından da mikrodalga-vakum kurutma yöntemi, fenolik bileşenlerin korunması açısından daha etkili ve avantajlı bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, biyoaktif bileşiklerin maksimum düzeyde korunması hedeflenen fonksiyonel gıda üretim süreçlerinde, kurutma parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.2.1.5. Toplam Karotenoid Madde Analiz Sonuçları

Karotenoidler, meyve ve sebzelerde kırmızı, turuncu ve sarı renklerin oluşumundan sorumlu, lipofilik yapıya sahip doğal pigmentlerdir. Fotosentetik organizmalar tarafından sentezlenen bu bileşikler, α -karoten, β -karoten, likopen ve lutein gibi formlarıyla hem A vitamini öncülü hem de önemli biyoaktif bileşikler olarak insan beslenmesinde yer alır. Toplam karotenoid içeriği,

meyve ve sebzelerin renk kalitesinin yanı sıra besin değerini etkileyen önemli bir biyoaktif bileşen göstergesidir. (Onwude vd., 2017). Bu çalışmada elde edilen veriler, farklı kurutma yöntemlerinin Washington Navel çeşidinde toplam karotenoid madde miktarını istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilediğini ortaya koymuştur ($p \leq 0.05$).

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının toplam karotenoid madde üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.17., Tablo 4.18., Tablo 4.19.).

Washington Navel portakal dilimlerinde toplam karotenoid içeriği, kurutma yöntemiyle birlikte istatistiksel açıdan anlamlı şekilde değişiklik göstermiştir ($p \leq 0.05$). Taze örneklerde toplam karotenoid içeriği 8.77 ± 0.527 mg β -karoten/100g kurumadde olarak belirlenmiştir. Kurutma işlemleri sonrasında karotenoid içeriğinin, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle 7.54 ± 0.251 , tepsili kurutma yöntemiyle ise 6.38 ± 0.394 mg/100g düzeyine düştüğü tespit edilmiştir. Her iki kurutma yönteminin de karotenoid madde üzerine etkisi istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Vakumlu mikrodalga kurutmanın tepsili kurutmaya göre daha yüksek karotenoid korunumuna olanak sağladığı belirlenmiştir.

Valencia portakal dilimlerine ait toplam karotenoid içerikleri de benzer şekilde kurutma yönteminden anlamlı düzeyde etkilenmiştir ($p \leq 0.05$). Taze örneklerde karotenoid içeriği 20.88 ± 3.449 mg β -karoten/100g kurumadde olarak ölçülmüş, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle bu değer 12.35 ± 1.174 , tepsili kurutma yöntemiyle ise 11.57 ± 1.712 olarak tespit edilmiştir. Her iki kurutma işlemi de karotenoid bileşiklerinde belirgin kayıplara neden olmuştur. Ancak kurutma yöntemleri arasında toplam karotenoid içerikleri açısından farklılık istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p > 0.05$). Washington Navel’de olduğu gibi, Valencia’da da vakumlu mikrodalga yöntemi daha iyi korunum sağlamıştır.

Kurutma işlemleri sonucunda ise her iki çeşitte de anlamlı kayıplar meydana gelmiştir. Vakumlu mikrodalga kurutma, her iki portakal çeşidinde de tepsili kurutma yöntemine kıyasla daha yüksek karotenoid korunumuna olanak sağlamıştır. Bu, VMD yönteminin kısa sürede ve düşük oksijenli ortamda kurutma sağlamasıyla karotenoidlerin termal ve oksidatif bozulmasını

sınırlandırmasına bağlanabilir. Buna karşılık, tepsili kurutma yöntemi, daha uzun sürede gerçekleşen ve daha fazla oksijenle temas edilen bir proses olduğundan, karotenoidlerin parçalanma riskini artırmıştır.

Çeşitler arası karşılaştırma sonucunda, taze örneklerde Valencia çeşidinin Washington Navel çeşidine kıyasla sınırlı düzeyde daha yüksek karotenoid içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak kurutma işlemleri sonrasında, her iki çeşitte de kalan karotenoid miktarlarının benzer seviyelere gerilediği tespit edilmiştir. Bu bulgu, Valencia çeşidinin, hem vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) hem de tepsili kurutma yöntemleri uygulandığında, karotenoid bileşenlerini koruma açısından Washington Navel çeşidine oldukça benzer bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, toplam karotenoid içeriği, hem portakal çeşidine hem de uygulanan kurutma yöntemine bağlı olarak istatistiksel olarak anlamlı düzeyde azalmıştır. Her iki portakal türü için de vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi, karotenoid bileşiklerin korunumu açısından daha etkili bulunmuştur. Bu bulgular, özellikle doğal renk ve antioksidan kapasite açısından zengin ürünlerin kurutulmasında, uygun teknolojik parametrelerin seçilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

4.2.1.6. Antioksidan Aktivite Analiz Sonuçları

Antioksidan aktivite, gıdanın oksidatif bozulmaya karşı direncini ve biyoaktif potansiyelini yansıtan kritik bir kalite göstergesidir (Shahidi & Ambigaipalan, 2015).

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının toplam antioksidan aktivite üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.17., Tablo 4.18., Tablo 4.19.).

Washington Navel portakal dilimlerinin antioksidan aktivite düzeyleri, uygulanan kurutma yöntemine bağlı olarak istatistiksel açıdan anlamlı farklılık göstermiştir ($p \leq 0.05$). Taze örneklerde antioksidan aktivite 37.22 ± 3.82 mM TE/100 g kurumadde olarak belirlenmiş, bu

değer vakumlu mikrodalga kurutma sonrasında 25.62 ± 0.426 'ye, tepsili kurutma sonrası ise 24.52 ± 1.034 seviyesine düştüğü saptanmıştır. Her iki kurutma yöntemi de antioksidan aktiviteyi azaltmıştır. Ancak vakumlu mikrodalga yöntemi ile kurutulan örnekler, tepsili kurutmaya göre daha yüksek antioksidan aktivite düzeyi göstermiştir. Bu durum, VMD yönteminin kısa sürede kurutma sağlaması ve oksidatif stresin daha düşük seviyelerde gerçekleşmesi ile açıklanabilir.

Valencia portakal dilimlerinde de benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Taze örneklerde antioksidan aktivite 30.50 ± 2.19 mM TE/100 g kurumadde olarak ölçülmüş, kurutma işlemleri sonrasında vakumlu mikrodalga ile bu değer 25.62 ± 1.018 'e, tepsili kurutma ile 25.82 ± 0.473 'e gerilemiştir. Kurutma yöntemleri, antioksidan kapasite üzerinde istatistiksel olarak azalmaya neden olmuş; ancak kurutma yöntemlerinin antioksidan kapasite üzerinde etkisi istatistiksel açıdan farklılık göstermemiştir ($p > 0.05$).

Antioksidan aktivite bakımından her iki portakal çeşidinde benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Taze örneklerde hem Washington Navel (37.22 mM TE/100 g kurumadde) hem de Valencia (30.50 mM TE/100 g kurumadde) yüksek düzeyde antioksidan kapasiteye sahip bulunmuştur. Kurutma işlemleri bu değeri her iki çeşitte de önemli ölçüde düşürmüştür.

Vakumlu mikrodalga kurutma, Washington Navel çeşitte tepsili kurutmaya göre daha yüksek antioksidan aktivite düzeyinin korunmasına olanak sağlamıştır. Bu durum, mikrodalga-vakum sisteminin daha kısa süre ve daha az oksidatif ortamda işlem yapması ile ilişkilendirilmektedir. Tepsili kurutma ise, daha uzun süreli ısıya maruziyet nedeniyle biyoaktif bileşenlerin bozunmasını artırmış ve antioksidan kapasitede daha fazla azalmaya neden olmuştur.

Çeşitler karşılaştırıldığında, taze örneklerde Washington Navel'in antioksidan aktivitesi Valencia'ya kıyasla hafif düzeyde daha yüksek bulunmuştur. Kurutma sonrası her iki çeşidin de antioksidan aktivite düzeyleri yakın değerlere gerilese de, Washington Navel çeşidi, her iki kurutma yöntemi altında da genel olarak daha yüksek inhibisyon oranı göstermiştir.

Her iki portakal çeşidinde uygulanan kurutma yöntemleri, antioksidan aktivite üzerinde istatistiksel olarak azalmaya neden olmuştur. Taze meyvelerde oldukça yüksek olan antioksidan aktivite düzeyleri, özellikle tepsili kurutma yöntemiyle azalmıştır. Vakumlu mikrodalga

kurutma, daha kontrollü ve kısa süreli işlem koşulları sayesinde, biyoaktif bileşiklerin oksidatif bozulmasını sınırlayarak antioksidan kapasitenin korunmasında daha etkin bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Her iki portakal çeşidi açısından değerlendirildiğinde ise, Washington Navel çeşidi genel olarak daha yüksek antioksidan potansiyele sahip olup, bu özelliğini kurutma sonrası da görece olarak koruyabilmiştir. Bu sonuçlar, ürünlerin fonksiyonel niteliklerinin sürdürülmesi açısından kurutma teknolojisinin seçiminde antioksidan aktivitenin kritik bir kalite parametresi olduğunu ortaya koymuştur.

Literatürde, mikrodalga enerjisinin polifenolik bileşenler üzerinde çift yönlü bir etki oluşturabileceği belirtilmiştir. Kaynarca ve Aşkın (2020) tarafından yapılan çalışmada da vurgulandığı üzere, mikrodalga enerjisi bir yandan yüksek lokal sıcaklık oluşumu nedeniyle bazı polifenollerin yapısal bütünlüğünü bozarak parçalanmasına yol açabilmekte, diğer yandan ise bitki hücre yapılarının bozulmasını hızlandırarak daha önce hücre duvarlarına veya makromoleküler yapılara bağlı durumda bulunan antioksidan bileşiklerin serbest hale geçmesini sağlamaktadır. Bu durum, mikrodalga-vakum kurutma gibi kısa süreli, kontrollü ve düşük oksijenli ortamlarda uygulanan teknolojilerin, toplam antioksidan kapasite üzerindeki etkisinin sadece biyoaktif madde kaybına değil, aynı zamanda biyoyararlılığın artışına da katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

4.2.1.7. HMF Analiz Sonuçları

Hidroksimetilfurfural (HMF), ısıtıl işlem uygulanmış ürünlerde Maillard reaksiyonu veya karamelizasyon sonucunda oluşan bir indikatör bileşiktir ve hem ürünün işlenme şiddetini hem de olası kalite kayıplarını yansıtan önemli bir parametredir.

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının HMF içeriği üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.17., Tablo 4.18., Tablo 4.19.).

Washington Navel portakal dilimlerinde HMF içeriği, uygulanan kurutma yöntemine bağlı olarak istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir ($p \leq 0.05$). Taze örneklerde HMF tespit edilmemiştir, bu durum doğal durumda HMF oluşumunun

gözlenmediğini ortaya koymuştur. Kurutma işlemleri sonrasında HMF oluşumunun başladığı; vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle elde edilen örneklerde HMF içeriği 14.12 ± 2.27 mg/100 g olarak, tepsili kurutma yöntemiyle kurutulan örneklerde ise bu değer 36.81 ± 1.196 mg/100 g olarak belirlenmiştir. Her iki kurutma yönteminin HMF üzerinde etkisi istatistiksel açıdan önemli olduğu belirlenmiş ($p < 0.05$) ve hidroksimetilfurfural (HMF) oluşumunun anlamlı düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Ancak, tepsili kurutma yöntemi, vakumlu mikrodalga kurutmaya göre daha yüksek düzeyde HMF birikimine yol açmıştır. Bu durum, uzun süreli ve konvansiyonel ısı uygulamasının, özellikle Maillard reaksiyonları ile şeker bozunmalarını hızlandırarak HMF oluşumunu artırdığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, kurutma süresi ve sıcaklık profilinin ısıl bozunma ürünlerinin oluşumu üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

Valencia portakal dilimlerinde de benzer şekilde, taze örneklerde HMF tespit edilmemiştir. Kurutma işlemlerinin ardından HMF oluşumu gözlemlenmiş; vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle kurutulan örneklerde HMF içeriği 9.75 ± 0.194 mg/100 g, tepsili kurutma yöntemiyle kurutulan örneklerde ise 40.88 ± 1.036 mg/100 g olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler, her iki kurutma yönteminin HMF oluşumuna etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ($p < 0.05$), ancak tepsili kurutma yönteminin Valencia çeşidinde daha yüksek düzeyde HMF oluşumuna yol açtığını ortaya koymuştur. Bu fark, Valencia portakalının içerdiği doğal şeker profili, asitlik düzeyi ve kurutma sırasında termal bozulmalara olan duyarlılığı ile açıklanabilir.

HMF (hidroksimetilfurfural) içeriği açısından yapılan değerlendirmelerde, her iki portakal çeşidinin taze örneklerinde HMF tespit edilmemiştir. Bu durum, HMF'nin doğal formda oluşmadığını ve yalnızca ısıl işlem kaynaklı meydana geldiğini göstermektedir. Kurutma işlemleri sonrasında ise, her iki çeşitte de HMF içeriğinde istatistiksel olarak anlamlı artışlar gözlemlenmiştir ($p < 0.05$). Bu bulgular, HMF oluşumunun ısıya maruz kalma süresi ve sıcaklıkla doğrudan ilişkili olduğunu, dolayısıyla kurutma işlemlerinin Maillard reaksiyonları ve şeker bozunması yoluyla termal bozulma ürünlerinin oluşumunu tetiklediğini ortaya koymuştur.

Kurutma yöntemleri karşılaştırıldığında, HMF açısından tüm örnekler arasındaki fark anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Hem Washington Navel hem de Valencia portakal dilimlerinde tepsili

kurutma yöntemi, vakumlu mikrodalga kurutmaya kıyasla daha fazla HMF oluşumuna neden olmuştur. Bu bulgu, tepsili kurutmanın daha uzun sürede ve açık sistemde gerçekleşmesi nedeniyle Maillard reaksiyonlarının daha ileri düzeyde geliştiğini göstermektedir. Buna karşılık, vakumlu mikrodalga kurutma, kısa sürede gerçekleşmesi ve düşük oksijen ortamı sağlaması nedeniyle HMF oluşumunu sınırlı düzeyde tutmuştur.

Portakal çeşitleri karşılaştırıldığında, her iki kurutma yöntemi altında da Valencia çeşidinin HMF düzeylerinin Washington Navel'e göre bir miktar daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, Valencia'nın şeker/asit dengesi, dokusal yapısı veya kurutma sürecine karşı duyarlılığı ile ilişkili olabilir.

4.2.2. Fenolik Bileşen Dağılımı Analiz Sonuçları

Fenolik bileşenler, bitkisel kaynaklı fonksiyonel gıdalarda antioksidan aktivitenin temel belirleyicileri arasında yer almakta olup; bu çalışmada HPLC ile analiz edilen örneklerde altı grup toplamda 17 fenolik bileşen tespit edilmiştir. Bunlar, 4 hidroksibenzoik asit (gallik asit, PAEE, vanilik asit, syringic asit), 6 hidroksisinamik asit (klorojenik asit, ferulik asit, o-kumarik asit, p-kumarik asit, kafeik asit, sinapik asit), 1 adet flavanonlar (naringin), 2 flavonoid glikozitler (rutin, phloridzin dehydrate), 2 flavonoller (myricetin, quercetin) ve 2 flavan-3-oller (epigallocatechin, catechin)'dir.

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının fenolik bileşen dağılımı üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.20., Tablo 4.21., Tablo 4.22.).

Washington Navel portakal dilimlerine ait fenolik alt grupların dağılımı, taze örneklerde oldukça zengin ve dengeli bir kompozisyon sergilemiştir. Taze örneklerde en yüksek oran, toplam hidroksisinamik asitler grubunda belirlenmiş olup bu değer 472.07 mg/100 g kurumadde olarak tespit edilmiştir. Bu grubu sırasıyla flavanonlar (216.06 mg/100 g kurumadde) ve hidroksibenzoik asitler (141.63 mg/100 g kurumadde) izlemiştir. Bu dağılım,

Tablo 4.20. Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerinde fenolik bileşen dağılımı

Fenolik Bileşenler	Washington Navel		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Hidroksibenzoik asitler (HBAs)			
Gallik Asit	17.34 ± 6.957 ^c	148.04 ± 14.429 ^a	55.98 ± 9.623 ^b
Protokateşuik asit (PAEE)	36.17 ± 16.617 ^b	26.15 ± 20.363 ^b	83.82 ± 20.754 ^a
Vanilik asit	88.12 ± 26.754 ^a		
Şiringik asit		3.95 ± 0.215 ^a	3.45 ± 0.347 ^b
Hidroksi Sinamik asitler			
Klorojenik asit	306.26 ± 84.180 ^a	5.57 ± 1.184 ^b	4.19 ± 0.470 ^b
Ferulik asit	11.78 ± 1.015 ^a		
o-Kumarik asit		1.69 ± 0.170 ^a	1.38 ± 0.095 ^b
p-Kumarik asit	50.24 ± 41.040 ^a	24.04 ± 1.775 ^b	
Kafeik asit			5.67 ± 0.651 ^a
Sinapik asit	103.79 ± 7.342 ^a		
Flavanonlar			
Naringin	216.06 ± 2.260 ^a	10.15 ± 0.625 ^b	9.56 ± 0.592 ^b
Flavonoid glikozidler			
Floridzin dihidrat	83.11 ± 82.049 ^a	34.67 ± 4.237 ^b	31.19 ± 2.835 ^b
Rutin		20.34 ± 3.792 ^a	15.68 ± 6.853 ^b
Flavonoller			
Kuersetin		5.72 ± 0.073 ^a	5.20 ± 0.264 ^b
Mirisetin	32.77 ± 9.404 ^a	7.26 ± 3.456 ^b	5.49 ± 1.063 ^b
Flavan-3-ol'ler			
(-)-Epigallokateşin	147.66 ± 98.698 ^a	27.96 ± 0.508 ^b	19.67 ± 1.477 ^b
(+)-Kateşin hidrat		1.29 ± 0.210 ^b	1.77 ± 0.397 ^a

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

taze portakalın fenolik profili bakımından hem yapısal çeşitliliği hem de antioksidan potansiyeli açısından oldukça güçlü olduğunu göstermektedir.

Kurutma işlemleri sonrasında bu dağılımın önemli ölçüde değiştiği belirlenmiştir. Vakumlu mikrodalga kurutma işlemi ile elde edilen örneklerde, hidroksibenzoik asit içeriği artarak 178.14 mg/100 g kurumadde seviyesine yükselmiş, buna karşılık hidroksisinamik asit içeriği ciddi bir azalma göstererek 31.30 mg/100 g kurumadde düzeyine gerilemiştir. Benzer şekilde, tepsili kurutma işleminde de hidroksibenzoik asitlerin miktarı artış göstermiş (143.25 mg/100 g kurumadde), ancak hidroksisinamik asit içeriği daha da belirgin şekilde düşerek 11.24 mg/100 g kurumadde olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, özellikle hidroksisinamik asitlerin kurutma sürecine karşı oldukça hassas bileşikler olduğunu ve yüksek sıcaklık veya uzun işlem süresinde termal bozunmaya uğradığını göstermektedir.

Taze örneklerde flavan-3-ol grubundan epigallocateşin, oldukça yüksek bir seviyede bulunmuş (147.66 mg/100 g kurumadde), ancak kurutma işlemleriyle birlikte önemli ölçüde azalmıştır. Vakumlu mikrodalga kurutmada bu değer 27.96 mg/100 g tepsili kurutmada ise 19.67 mg/100 g olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, flavan-3-ol bileşiklerinin kurutma sırasında ciddi şekilde bozulduğunu ve termal-kararsız yapı sergilediğini ortaya koymuştur.

Öte yandan, flavonoid glikozid grubu fenoliklerden phloridzin üzerine kurutma yöntemlerinin etkisi istatistiksel açıdan önemsiz bulunmuştur ($p>0.05$). Ancak, phloridzin içeriğinde taze örneğe kıyasla her iki kurutma yönteminde de düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş, istatistiksel anlamlılık göstermese de vakumlu mikrodalga kurutma metodu ile phloridzin miktarı tepsili kurutmaya kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca kurutma yöntemlerinin rutin fenolik maddesi üzerine etkisi istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($p<0.05$).

Genel olarak değerlendirildiğinde, kurutma işlemlerinin fenolik alt grup bileşiminde belirgin yapısal kaymalara ve miktarsal azalışlara neden olduğu belirlenmiştir. Toplam fenolik içerik, taze örneklerde 1137.68 mg/100 g iken, vakumlu mikrodalga kurutma ve tepsili kurutma sonrası sırasıyla 347.65 mg/100 g ve 255.67 mg/100 g seviyelerine düşmüştür. Ancak, yapılan varyans analizine göre kurutma yöntemleri (vakumlu mikrodalga, tepsili) arasında toplam fenolik alt gruplar üzerindeki etkiler istatistiksel olarak bazı fenoliklerde anlamlı bulunurken ($p<0.05$) bazı fenoliklerde anlamlı bulunmamıştır ($p>0.05$). Bu bulgular, her iki kurutma yönteminin fenolik bileşenlerde belirgin kayıplara yol açtığını ortaya koymakla birlikte, vakumlu mikrodalga kurutmanın daha koruyucu bir profil sunduğu dikkat çekmektedir.

Tablo 4.21. Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerinde fenolik bileşen dağılımı

Fenolik Bileşenler	Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Hidroksibenzoik asitler (HBAs)			
Gallik Asit	3.00 ± 0.993 ^c	9.15 ± 0.496 ^a	6.34 ± 0.196 ^b
Protokateşuik asit (PAEE)	30.22 ± 2121 ^c	115.73 ± 5.649 ^a	48.11 ± 5.344 ^b
Vanilik asit	19.56 ± 2.542 ^a	2.90 ± 0.627 ^b	
Şiringik asit		3.77 ± 1.813 ^a	2.65 ± 0.076 ^b
Hidroksi Sinamik asitler			
Klorojenik asit		34.89 ± 1.312 ^a	4.54 ± 1.006 ^b
Ferulik asit		4.47 ± 1.409 ^a	
o-Kumarik asit	35.55 ± 4.974 ^a	33.65 ± 6.895 ^a	1.86 ± 0.771 ^b
p-Kumarik asit	17.47 ± 6.839 ^a	2.23 ± 0.524 ^b	5.92 ± 2.342 ^b
Kafeik asit		11.81 ± 4.341 ^a	
Sinapik asit		5.56 ± 0.438 ^a	4.98 ± 2.081 ^a
Flavanonlar			
Naringin	14.78 ± 2.3154 ^a	17.77 ± 8.365 ^a	7.61 ± 2.168 ^b
Flavonoid glikozidler			
Floridzin dihidrat		3.08 ± 1.017 ^b	7.66 ± 0,967 ^a
Rutin		1.41 ± 0.213 ^a	
Flavonoller			
Kuersetin		19.79 ± 3.451 ^a	4.36 ± 0.191 ^b
Mirisetin			
Flavan-3-ol'ler			
(-)-Epigallokateşin		15.89 ± 3.401 ^b	48.08 ± 4.353 ^a
(+)-Kateşin hidrat		8.49 ± 1.161 ^a	1.42 ± 0.217 ^b

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Tablo 4.22. Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde fenolik bileşen profili

Fenolik Bileşenler	Portakal Çeşitleri ve Kurutma Yöntemleri					
	Washington Navel			Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Hidroksibenzoik asitler (HBAs)						
Gallik Asit	17.34 ± 6.957 ^{c,C}	148.04 ± 14.429 ^{a,A}	55.98 ± 9.623 ^{b,B}	3.00 ± 0.993 ^{c,D}	9.15 ± 0.496 ^{a,D}	6.34 ± 0.196 ^{b,D}
Protokateşuik asit (PAEE)	36.17 ± 16.617 ^{b,CD}	26.15 ± 20.363 ^{b,D}	83.82 ± 20.754 ^{a,B}	30.22 ± 2121 ^{c,D}	115.73 ± 5.649 ^{a,A}	48.11 ± 5.344 ^{b,C}
Vanilik asit	88.12 ± 26.754 ^{a,A}			19.56 ± 2.542 ^{a,B}	2.90 ± 0.627 ^{b,C}	
Şiringik asit		3.95 ± 0.215 ^{a,A}	3.45 ± 0.347 ^{b,A}		3.77 ± 1.813 ^{a,A}	2.65 ± 0.076 ^{b,B}
Hidroksi Sinamik asitler						
Klorojenik asit	306.26 ± 84.180 ^{a,A}	5.57 ± 1.184 ^{b,B}	4.19 ± 0.470 ^{b,B}		34.89 ± 1.312 ^{a,B}	4.54 ± 1.006 ^{b,B}
Ferulik asit	11.78 ± 1.015 ^{a,A}				4.47 ± 1.409 ^{a,B}	
o-Kumarik asit		1.69 ± 0.170 ^{a,B}	1.38 ± 0.095 ^{b,B}	35.55 ± 4.974 ^{a,A}	33.65 ± 6.895 ^{a,A}	1.86 ± 0.771 ^{b,B}
p-Kumarik asit	50.24 ± 41.040 ^{a,A}	24.04 ± 1.775 ^{b,B}		17.47 ± 6.839 ^{a,BC}	2.23 ± 0.524 ^{b,C}	5.92 ± 2.342 ^{b,C}
Kafeik asit			5.67 ± 0.651 ^{a,B}		11.81 ± 4.341 ^{a,A}	
Sinapik asit	103.79 ± 7.342 ^{a,A}				5.56 ± 0.438 ^{a,B}	4.98 ± 2.081 ^{a,B}
Flavanonlar						
Naringin	216.06 ± 2.260 ^{a,A}	10.15 ± 0.625 ^{b,C}	9.56 ± 0.592 ^{b,C}	14.78 ± 2.3154 ^{a,B}	17.77 ± 8.365 ^{a,B}	7.61 ± 2.168 ^{b,C}
Flavonoid glikozidler						
Floridzin dihidrat	83.11 ± 82.049 ^{a,A}	34.67 ± 4.237 ^{b,B}	31.19 ± 2.835 ^{b,B}		3.08 ± 1.017 ^{b,B}	7.66 ± 0.967 ^{a,B}
Rutin		20.34 ± 3.792 ^{a,A}	15.68 ± 6.853 ^{b,B}		1.41 ± 0.213 ^{a,C}	
Flavonoller						
Kuersetin		5.72 ± 0.073 ^{a,B}	5.20 ± 0.264 ^{b,B}		19.79 ± 3.451 ^{a,A}	4.36 ± 0.191 ^{b,B}
Mirisetin	32.77 ± 9.404 ^{a,A}	7.26 ± 3.456 ^{b,B}	5.49 ± 1.063 ^{b,B}			
Flavan-3-ol'ler						
(-)-Epigallocateşin	147.66 ± 98.698 ^{a,A}	27.96 ± 0.508 ^{b,BC}	19.67 ± 1.477 ^{b,BC}		15.89 ± 3.401 ^{b,BC}	48.08 ± 4.353 ^{a,B}
(+)-Kateşin hidrat		1.29 ± 0.210 ^{b,B}	1.77 ± 0.397 ^{a,B}		8.49 ± 1.161 ^{a,A}	1.42 ± 0.217 ^{b,B}

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır. Aynı satırda yer alan ve farklı büyük harflerle (A, B, C) gösterilen ortalamalar, meyve çeşitleri arasındaki değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Washington Navel ve Valencia portakal çeşitlerinde gerçekleştirilen bu çalışmada, galik asit, klorojenik asit, hidroksisinamik ve hidroksibenzoik asitler gibi fenolik alt gruplar üzerine farklı kurutma yöntemlerinin etkisi detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Bulgular, fenolik bileşenlerin kurutma koşullarına bağlı olarak farklı tepkiler verdiğini ortaya koymuştur.

Washington Navel portakalında, gallik asit içeriği bakımından en yüksek değer vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle elde edilen örneklerde gözlenmiştir (148.04 mg/100 g kurumadde), tepsili kurutma sonrasında ise bu değer anlamlı düzeyde azalarak 55.98 mg/100 g kurumadde olarak tespit edilmiştir. Valencia portakalında ise en yüksek gallik asit miktarı vakumlu mikrodalga kurutma ile elde edilmiş olup 9.15 mg/100 g kurumadde olarak belirlenmiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, her iki kurutma yöntemi arasında anlamlı farklar tespit edilmiştir ($p<0.05$). Bu durum, gallik asidin belirli kurutma koşullarında serbestleşebileceğini veya daha iyi korunabileceğini göstermektedir.

Klorojenik asit açısından değerlendirildiğinde, Washington Navel portakalında taze örneklerde oldukça yüksek bir değer olan 306.26 mg/100 g kurumadde tespit edilmiştir. Ancak bu değer, vakumlu mikrodalga kurutma ile 5.57 mg/100 g, tepsili kurutma ile ise 4.19 mg/100 g düzeyine düşerek ciddi oranda azalmıştır. Bu azalma istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0.05$), ancak bileşiğin ısıl işleme karşı yüksek duyarlılığını açıkça ortaya koymuştur. Valencia portakalında ise klorojenik asit içeriği vakumlu mikrodalgada 34.89 mg/100 g, tepsili kurutmada 4.54 mg/100 g olarak ölçülmüş ve bu farklılık istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0.05$). Bu bulgular, klorojenik asidin Valencia çeşidinde daha stabil kaldığını, özellikle vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle daha iyi korunduğunu göstermektedir.

Valencia portakalında, taze örneklerde hidroksisinamik asit miktarı 53.02 mg/100 g, hidroksibenzoik asit miktarı ise 52.78 mg/100 g olarak belirlenmiştir. Kurutma sonrası, vakumlu mikrodalga kurutma ile hidroksisinamik asit miktarı 92.61 mg/100 g'a artarken, tepsili kurutma ile bu değer 17.30 mg/100 g'a düşmüştür. Aynı şekilde, hidroksibenzoik asit miktarı vakumlu mikrodalgada 131.55 mg/100 g, tepsili kurutmada ise 57.10 mg/100 g olarak belirlenmiştir. Bu veriler, bazı fenolik bileşiklerin kurutma sırasında ısıl yıkımdan çok, bağlı formdan serbest forma dönüşerek artış gösterebileceğini desteklemektedir.

Bu sonuçlar, fenolik bileşiklerin sadece ısıya karşı duyarlılıkla değil, aynı zamanda bitki matrisinden salınım dinamikleriyle de şekillendiğini göstermektedir. Nitekim literatürde yer alan çeşitli çalışmalar (Lai vd., 2022; Nacz & Shahidi, 2004; Razola-Díaz vd., 2023), kurutma sonrası bazı fenolik bileşiklerin miktarında gözlemlenen artışların, hücre duvarı yapılarının ısıyla zayıflaması, fenoliklerin bitki dokusunda bağlı oldukları şeker, protein ya da polisakkarit yapılarından ayrışması ve polifenol oksidaz gibi bozucu enzimlerin aktivitesinin sınırlanmasıyla ilişkili olduğunu belirtmektedir. Özellikle Razola-Díaz vd. (2023), portakal kabuğunda 60 °C'de konvektif kurutma ile fenolik madde içeriğinde anlamlı artışların gözlemlendiğini ve bu artışın bitki hücre duvarı geçirgenliğinin artmasına bağlandığını ifade etmişlerdir.

Sonuç olarak, kurutma işlemlerinin fenolik bileşenler üzerindeki etkisinin yüksek ölçüde bileşene göre spesifik olduğu belirlenmiştir. Gallik asit gibi bazı fenoller belirli kurutma koşullarında daha iyi korunabilirken, klorojenik asit gibi termolabil bileşikler ciddi kayıplar yaşayabilmektedir. Vakumlu mikrodalga kurutma, bazı fenolik bileşenlerin korunumu açısından avantajlı bir yöntem olarak öne çıkarken, bağlı formdaki fenollerin serbestleşmesini de kolaylaştırabilmektedir. Bu bulgular, bitki kaynaklı ürünlerde fonksiyonel kaliteyi maksimize etmek amacıyla, kurutma teknolojilerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

4.2.3. Karotenoid Madde Dağılımı Analiz Sonuçları

Karotenoidler, doğada yaygın olarak bulunan izoprenoid bileşiklerdir ve bitkilerde çiçek ve meyvelere sarı, turuncu, kırmızı renklerini kazandıran başlıca pigmentlerdir. İnsan sağlığı açısından önemli olan bu bileşikler arasında α -karoten, β -karoten ve β -kriptoksantin, vücutta A vitaminine dönüştürülebildikleri için, A vitamini öncülleri (provitamin A) olarak görev yapar ve aynı zamanda güçlü antioksidan özellikleriyle bilinir. (Ma vd., 2020).

Narenciye meyveleri, karotenoidler için zengin kaynaklardır; yaklaşık 115 farklı karotenoid tanımlanmıştır. β -kriptoksantin ve violaksantin, narenciyede en sık rastlanan pigmentlerdir. Bu pigmentlerin içeriği, tür, yetiştirme koşulları ve coğrafi orijin gibi faktörlerden etkilenir ve hem ticari hem de besinsel değer açısından önem taşır (Ma vd., 2020).

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının karotenoid madde dağılımı üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.23., Tablo 4.24., Tablo 4.25.).

Tablo 4.23. Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerinde karotenoid madde dağılımı

Karotenoidler	Washington Navel		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
α -karoten	11.22 ± 0.676^a	4.05 ± 0.660^b	2.21 ± 0.231^c
β -karoten	24.10 ± 1.888^a	4.36 ± 0.681^b	2.27 ± 0.107^c
β -kriptoksantin	134.60 ± 26.190^a	8.41 ± 0.673^b	4.09 ± 0.699^b
α - kriptoksantin	13.75 ± 1.622^a	1.37 ± 0.155^b	0.71 ± 0.287^b
Zeaksantin	7.31 ± 0.271^a	0.79 ± 0.007^b	0.77 ± 0.002^b
Lutein	6.49 ± 0.057^a	0.84 ± 0.004^b	0.82 ± 0.001^b

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Tablo 4.24. Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerinde karotenoid madde dağılımı

Karotenoidler	Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
α -karoten	9.79 ± 0.783^a	7.05 ± 1.224^b	4.62 ± 0.961^c
β -karoten	22.51 ± 2.460^a	4.86 ± 0.479^b	2.79 ± 0.286^c
β -kriptoksantin	35.39 ± 8.441^a	7.45 ± 1.446^b	3.75 ± 0.342^b
α - kriptoksantin	10.07 ± 2.162^a	1.52 ± 0.192^b	0.90 ± 0.071^b
Zeaksantin	6.46 ± 0.196^a	0.81 ± 0.005^b	0.78 ± 0.003^b
Lutein	6.17 ± 0.077^a	0.86 ± 0.054^b	0.84 ± 0.006^b

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Taze Washington Navel portakal dilimlerinde, β -kriptoksantin, β -karoten, α -karoten, lutein ve zeaksantin gibi temel karotenoid bileşenler yüksek düzeylerde tespit edilmiştir. Özellikle β -kriptoksantin içeriği, taze örneklerde 134.60 $\mu\text{g/g}$ kurumadde düzeyinde ölçülmüştür. Bu değer, vakumlu mikrodalga kurutma sonrasında 8.41 $\mu\text{g/g}$ kurumadde, tepsili kurutma sonrasında ise 4.09 $\mu\text{g/g}$ kurumadde seviyelerine kadar gerilemiştir. Söz konusu azalma, istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0.05$); ancak uygulanan kurutma yöntemleri arasında bu bileşiğe ilişkin farklılık istatistiksel açıdan anlamlı değildir ($p>0.05$).

Diğer karotenoid bileşenler lutein, zeaksantin ve α -kriptoksantin için de benzer yönlü ve anlamlı azalmalar kaydedilmiştir. Bu değişiklikler, kurutma işleminin karotenoid stabilitesi üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu, ancak kullanılan kurutma yöntemleri açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık yaratmadığını göstermektedir ($p>0.05$). Elde edilen bulgular, karotenoid bileşiklerin termal koşullara karşı genel olarak düşük stabilite gösterdiğini ve bu nedenle kurutma sırasında önemli oranda kayba uğradığını ortaya koymuştur.

Ayrıca, β -karoten ve α -karoten bileşikleri açısından vakumlu mikrodalga kurutma tepsili kurutmaya kıyasla anlamlı derecede daha yüksek koruma sağlamıştır. Kurutma yöntemleri arasındaki fark istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($p<0.05$).

Valencia portakalında da benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Taze örneklerde karotenoid içeriği yüksek düzeylerde ölçülmüş, ancak kurutma işlemleri sonucunda tüm bileşiklerde anlamlı azalmalar kaydedilmiştir. Özellikle α -kriptoksantin, β -kriptoksantin, zeaksantin ve lutein bileşiklerinde kurutma yöntemleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar saptanamamıştır ($p>0.05$). Bununla birlikte α -karoten ve β -karoten içeriği taze örneklerde 9.79 ve 22.51 $\mu\text{g/g}$ kurumadde iken, vakumlu mikrodalga kurutma sonrası 7.05 ve 4.86 $\mu\text{g/g}$ kurumadde, tepsili kurutma sonrası ise 4.62 ve 2.79 $\mu\text{g/g}$ kurumadde düzeyine düşmüştür. Bu düşüş kurutma işlemi açısından anlamlı bulunmuş ($p<0.05$) ve uygulanan kurutma yöntemleri arasındaki fark istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($p<0.05$). Vakumlu mikrodalga kurutma, tüm karotenoidler için tepsili kurutmaya kıyasla daha yüksek koruma sağlamıştır. En iyi koruma α -karoten (%72) ve en düşük koruma α -kriptoksantin (%15) için gözlenmiştir; tepsili kurutmada ise en iyi koruma yine α -karoten (%47), en düşük koruma ise α -kriptoksantin (%9) için gerçekleşmiştir.

Tablo 4.25. Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde karotenoid bileşen profili

Karotenoitler	Portakal Çeşitleri ve Kurutma Yöntemleri					
	Washington Navel			Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
α-karoten	11.22 ± 0.676 ^{a,A}	4.05 ± 0.660 ^{b,D}	2.21 ± 0.231 ^{c,E}	9.79 ± 0.783 ^{a,B}	7.05 ± 1.224 ^{b,C}	4.62 ± 0.961 ^{c,D}
β-karoten	24.10 ± 1.888 ^{a,A}	4.36 ± 0.681 ^{b,C}	2.27 ± 0.107 ^{c,D}	22.51 ± 2.460 ^{a,B}	4.86 ± 0.479 ^{b,C}	2.79 ± 0.286 ^{c,D}
β-kriptoksantin	134.60 ± 26.190 ^{a,A}	8.41 ± 0.673 ^{b,C}	4.09 ± 0.699 ^{b,C}	35.39 ± 8.441 ^{a,B}	7.45 ± 1.446 ^{b,C}	3.75 ± 0.342 ^{b,C}
α- kriptoksantin	13.75 ± 1.622 ^{a,A}	1.37 ± 0.155 ^{b,C}	0.71 ± 0.287 ^{b,C}	10.07 ± 2.162 ^{a,B}	1.52 ± 0.192 ^{b,C}	0.90 ± 0.071 ^{b,C}
Zeaksantin	7.31 ± 0.271 ^{a,A}	0.79 ± 0.007 ^{b,C}	0.77 ± 0.002 ^{b,C}	6.46 ± 0.196 ^{a,B}	0.81 ± 0.005 ^{b,C}	0.78 ± 0.003 ^{b,C}
Lutein	6.49 ± 0.057 ^{a,A}	0.84 ± 0.004 ^{b,C}	0.82 ± 0.001 ^{b,C}	6.17 ± 0.077 ^{a,B}	0.86 ± 0.054 ^{b,C}	0.84 ± 0.006 ^{b,C}

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Aynı satırda yer alan ve farklı büyük harflerle (A, B, C) gösterilen ortalamalar, meyve çeşitleri arasındaki değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Her iki portakal çeşidinde de kurutma işlemleri, başta β -kriptoksantin, β -karoten ve α -karoten olmak üzere temel karotenoid bileşenlerde anlamlı düşüslere neden olmuştur. Bu durum, karotenoidlerin ısıya karşı yüksek derecede duyarlı olduğunu ve oksijen varlığı, sıcaklık şiddeti ve işlem süresi gibi faktörlerin bu kayıplarda doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, karotenoid bileşiklerin portakal örneklerinde kurutma sürecine karşı son derece duyarlı olduğunu göstermiştir. Washington Navel portakal dilimlerinin başlangıçtaki karotenoid konsantrasyonlarının Valencia çeşidine göre daha yüksek olması, vakumlu mikrodalga kurutmada elde edilen β -kriptoksantin (8,41 $\mu\text{g/g}$ kurumadde) ve β -karoten (4,36 $\mu\text{g/g}$ kurumadde) düzeylerinde Valencia'ya (sırasıyla 7,45 $\mu\text{g/g}$ kurumadde ve 4,86 $\mu\text{g/g}$ kurumadde) göre belirgin bir üstünlük sağlamıştır. Buna karşın, yüzde koruma verileri incelendiğinde Valencia portakalında özellikle α -karoten ve ksantin bileşiklerinin, Washington Navel'e kıyasla daha yüksek oranda korunduğu saptanmıştır. Bu bulgular, her iki çeşidin karotenoid profilinin muhafazasında vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin tepsili kurutmaya göre açık bir avantaj sunduğunu; ancak başlangıç konsantrasyonlarındaki farklılıklar ile karotenoidlerin termal ve oksidatif kararlılıklarının göz önünde bulundurularak kurutma parametrelerinin (sıcaklık, süre, vakum seviyesi) optimize edilmesinin zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır. Karotenoidlerin korunumu açısından düşük sıcaklıkta kısa süreli işlemler veya oksijensiz ortamda yapılan alternatif kurutma teknolojileri üzerine odaklanılması gerektiği önerilmektedir.

4.2.4. Organik Asit Dağılımı Analiz Sonuçları

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının organik asit dağılımı üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.26., Tablo 4.27., Tablo 4.28.).

Washington Navel portakalında bulunan askorbik asit (C vitamini) içeriği taze örneklerde 1.034 g/100 g kurumadde düzeyinde ölçülmüştür. Kurutma işlemleri sonrasında bu bileşiğin miktarı, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle 0.58 g/100 g kurumadde, tepsili kurutma yöntemiyle

ise 0.42 g/100 g kurumadde seviyelerine düşmüştür. Her iki yöntemde de askorbik asitte meydana gelen kayıplar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0.05$).

Tablo 4.26. Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerine ait organik asit dağılımı

Organik Asitler	Washington Navel		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Askorbik asit	1.034 ± 0.184^a	0.58 ± 0.036^b	0.42 ± 0.045^c
Malik asit	3.463 ± 0.796^a	1.99 ± 0.322^b	1.29 ± 0.620^c
Tartarik asit	0.919 ± 0.252^a	0.50 ± 0.117^b	0.28 ± 0.018^c
Sitrik asit	8.800 ± 0.934^a	3.71 ± 0.148^b	3.17 ± 0.375^b
Suksinik asit	3.150 ± 0.642^a	1.95 ± 0.483^b	1.27 ± 1.196^c

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Tablo 4.27. Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerine ait organik asit dağılımı

Organik Asitler	Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Askorbik asit	0.70 ± 0.021^a	0.32 ± 0.009^b	0.20 ± 0.155^c
Malik asit	4.51 ± 0.395^a	2.92 ± 0.697^b	1.44 ± 1.160^c
Tartarik asit	1.94 ± 1.106^a	0.16 ± 0.125^b	0.19 ± 0.199^b
Sitrik asit	16.27 ± 0.449^a	4.73 ± 0.224^b	2.94 ± 2.247^c
Suksinik asit	3.81 ± 0.082^a	2.80 ± 1.205^b	1.27 ± 1.196^c

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Benzer şekilde malik asit, tartarik asit ve süksinik asit içeriklerinde de kurutma işlemleri sonrasında anlamlı düzeyde azalma gözlemlenmiştir. Kurutma yöntemlerinin etkisi istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuştur ($p<0.05$). Sitrik asit, taze örneklerde 8.80 g/100 g kurumadde düzeyinde tespit edilmiş olup, kurutma işlemleri sonrasında bu değerlerde yaklaşık %50–60 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

Valencia portakalında da kurutma işlemleri, organik asit içeriklerinde önemli azalışlara neden olmuştur. Taze örneklerde askorbik asit düzeyi 0.70 g/100 g kurumadde iken, bu değer VMD kurutmada 0.32 g/100 g, tepsili kurutmada ise 0.20 g/100 g olarak tespit edilmiştir. Askorbik asit miktarındaki bu düşüş istatistiksel açıdan anlamlıdır ($p<0.05$), ayrıca kurutma metotları arasında da anlamlı farklılık olduğu saptanmıştır. Tepsili kurutma yöntemi, askorbik asit açısından daha fazla kayba yol açmıştır.

Malik asit ve sitrik asit miktarları da her iki kurutma yöntemiyle belirgin şekilde azalmış olup, özellikle sitrik asit içeriği tepsili kurutma sonrasında yaklaşık %82 oranında düşmüştür. Tartarik asit içeriği ise valencia portakal çeşidinde istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermemiştir ($p>0.05$).

Titrasyon asitliği, organik asitlerin genel asidik karakterini yansıtan önemli bir kalite göstergesidir. Taze Washington Navel portakalında TA değeri 3.78 g/100 g kurumadde olarak ölçülmüş, VMD uygulamasında bu değer 2.51 g/100 g, tepsili kurutmada ise 2.84 g/100 g düzeyine gerilemiştir. Bu düşüşler istatistiksel olarak anlamlıdır ($p \leq 0.05$).

Valencia portakalında taze örneklerin TA değeri 5.92 g/100 g kurumadde olup, bu değer Washington Navel'e göre yaklaşık %60 daha yüksektir. Kurutma işlemleri sonrasında bu değerler VMD'de 4.09 g/100 g, tepsili kurutmada ise 3.83 g/100 g olarak ölçülmüştür. TA değerindeki bu düşüşler istatistiksel olarak anlamlıdır ve VMD yöntemi, Valencia portakalında daha yüksek asiditenin korunmasına katkı sağlamıştır.

Vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi, hem Washington Navel hem de Valencia portakal dilimlerinde tepsili kurutmaya kıyasla başta C vitamini olmak üzere tüm organik asit bileşenlerini daha etkin biçimde muhafaza etmiştir. Bununla birlikte, her iki yöntemin de taze duruma göre anlamlı asit kayıplarına yol açtığı; vakumlu mikrodalga yönteminin özellikle kaliteyi korumada avantaj sağladığı görülmüştür.

Tablo 4.28. Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde organik asit dağılımı

Organik Asitler	Portakal Çeşitleri ve Kurutma Yöntemleri					
	Washington Navel			Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Askorbik asit	1.034 ± 0.184 ^{a,A}	0.58 ± 0.036 ^{b,C}	0.42 ± 0.045 ^{c,D}	0.70 ± 0.021 ^{a,B}	0.32 ± 0.009 ^{b,E}	0.20 ± 0.155 ^{c,F}
Malik asit	3.463 ± 0.796 ^{a,B}	1.99 ± 0.322 ^{b,C}	1.29 ± 0.620 ^{c,D}	4.51 ± 0.395 ^{a,A}	2.92 ± 0.697 ^{b,B}	1.44 ± 1.16 ^{c,CD}
Tartarik asit	0.919 ± 0.252 ^{a,B}	0.50 ± 0.117 ^{b,BC}	0.28 ± 0.018 ^{c,C}	1.94 ± 1.106 ^{a,A}	0.16 ± 0.125 ^{b,C}	0.19 ± 0.199 ^{b,C}
Sitrik asit	8.800 ± 0.934 ^{a,B}	3.71 ± 0.148 ^{b,D}	3.17 ± 0.375 ^{b,D}	16.27 ± 0.449 ^{a,A}	4.73 ± 0.224 ^{b,C}	2.94 ± 2.247 ^{c,D}
Suksinik asit	3.150 ± 0.642 ^{a,AB}	1.95 ± 0.483 ^{b,C}	1.27 ± 1.196 ^{c,C}	3.81 ± 0.082 ^{a,A}	2.80 ± 1.205 ^{b,B}	1.27 ± 1.196 ^{c,C}

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır. Aynı satırda yer alan ve farklı büyük harflerle (A, B, C) gösterilen ortalamalar, meyve çeşitleri arasındaki değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Sonuç olarak, hem meyve çeşidi hem de kurutma yöntemi, organik asitlerin korunumu ve asidik karakterin sürdürülebilirliği açısından kritik rol oynamaktadır. Kurutma koşullarının optimum düzeyde seçilmesi, portakal gibi yüksek değerli meyvelerin fonksiyonel kalitesini korumak açısından büyük önem taşımaktadır.

4.2.5. Şeker Dağılımı Analiz Sonuçları

Narenciye meyvelerindeki karbonhidratların büyük kısmını sakkaroz, glikoz ve fruktoz gibi basit şekerler oluşturur. Bu üç şeker türü, portakal suyundaki toplam çözünür katı maddenin yaklaşık %80'ini temsil eder (Kelebek & Selli, 2011).

Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinin farklı kurutma sistemleri (vakum mikrodalga ve tepsili kurutma) ile kurutulmasının şeker dağılımı üzerindeki etkileri bu bölümde hem portakal çeşidi bazında ayrı ayrı hem de her iki portakal çeşidi birlikte ele alınarak istatistiksel açıdan detaylı şekilde değerlendirilmiştir. (Tablo 4.29., Tablo 4.30., Tablo 4.31.).

Tablo 4.29. Taze ve kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerine ait şeker dağılımı

Şekerler	Washington Navel		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Glikoz (g/100g kurumadde)	15.53 ± 0.136 ^a	16.37 ± 1.426 ^a	16.54 ± 0.309 ^a
Fruktoz (g/100g kurumadde)	14.47 ± 0.074 ^a	15.62 ± 0.702 ^a	15.29 ± 1.289 ^a
Sakkaroz (g/100g kurumadde)	20.22 ± 0.012 ^a	20.09 ± 1.896 ^a	21.79 ± 1.397 ^a

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Taze Washington Navel portakal örneklerinde en yüksek oranda bulunan şeker bileşiği sakkaroz olup, bu değer 20.22 g/100 g kurumadde olarak belirlenmiştir ve toplam şekerin yaklaşık %40,3'unu oluşturmaktadır. Bunu sırasıyla glikoz (%30.9) ve fruktoz (%28.8) takip etmektedir. Kurutma işlemleri sonrasında tüm şeker bileşenlerinde istatistiksel açıdan anlamlı bir fark gözlenmemiştir ($p > 0.05$).

- Glikoz: Taze örnekte 15.53 g/100 g → VMD: 16.37 g/100 g → Tepsili: 16.54 g/100g

- Fruktoz: Taze örnekte 14.47 g/100 g → VMD: 15.62 g/100 g → Tepsili: 15.29 g/100 g
- Sakkaroz: Taze örnekte 20.22 g/100 g → VMD: 20.09 g/100 g → Tepsili: 21.79 g/100 g

Tablo 4.30. Taze ve kurutulmuş Valencia portakal dilimlerine ait şeker dağılımı

Şekerler	Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Glikoz (g/100g kurumadde)	16.14 ± 3.639 ^a	13.04 ± 0.505 ^b	12.70 ± 0.352 ^b
Fruktoz (g/100g kurumadde)	15.38 ± 3.468 ^a	12.08 ± 0.838 ^b	11.69 ± 0.240 ^b
Sakkaroz (g/100g kurumadde)	23.39 ± 1.307 ^a	17.09 ± 0.388 ^b	16.46 ± 1.041 ^b

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Valencia portakalında şeker bileşenleri farklı bir davranış gösterdiği belirlenmiştir. Taze örneklerde toplam şekerin %42.6'sını sakkaroz, %29.4'ünü glikoz, %28'ini fruktoz oluşturmuştur. Ancak kurutma işlemleri sonrasında bu şeker bileşenlerinde azalma gözlenmiştir.

- Sakkaroz: Taze örnekte 23.39 g/100 g → VMD: 17.09 g/100 g → Tepsili: 16.46 g/100 g
- Glikoz ve Fruktoz: Her iki şeker türü de benzer şekilde taze örneklerle kıyasla kurutma sonrası daha düşük düzeylerde ölçülmüştür.

Bu şeker kayıplarının, kurutma aşamasında tepsiye yerleştirilen portakal dilimlerinden sızan serbest suyun, pulp içerisindeki çözünür şeker bileşenlerini de beraberinde sürükleyerek tepsi yüzeyine taşınması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir.

Kurutma yöntemleri açısından değerlendirildiğinde, her iki çeşitte de VMD ile tepsili kurutma arasında şeker miktarları bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamıştır ($p > 0.05$).

Tablo 4.31. Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde şeker dağılımı

Şekerler	Portakal Çeşitleri ve Kurutma Yöntemleri					
	Washington Navel			Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
Glikoz	15.53 ± 0.136 ^{a,A}	16.37 ± 1.426 ^{a,A}	16.54 ± 0.309 ^{a,A}	16.14 ± 3.639 ^{a,A}	13.04 ± 0.505 ^{b,B}	12.70 ± 0.352 ^{b,B}
Fruktoz	14.47 ± 0.074 ^{a,A}	15.62 ± 0.702 ^{a,A}	15.29 ± 1.289 ^{a,A}	15.38 ± 3.468 ^{a,A}	12.08 ± 0.838 ^{b,B}	11.69 ± 0.240 ^{b,B}
Sakkaroz	20.22 ± 0.012 ^{a,C}	20.09 ± 1.896 ^{a,C}	21.79 ± 1.397 ^{a,B}	23.39 ± 1.307 ^{a,A}	17.09 ± 0.388 ^{b,D}	16.46 ± 1.041 ^{b,D}

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, meyve çeşidinde kendi içinde değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Aynı satırda yer alan ve farklı büyük harflerle (A, B, C) gösterilen ortalamalar, meyve çeşitleri arasındaki değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

4.2.6. Renk Analiz Sonuçları

Portakal gibi turunçgil meyvelerinde ve bunlardan üretilen ürünlerde; renk, hem tüketici algısı hem de ürünün pazarlanabilirliği açısından kritik bir kalite göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, Washington Navel ve Valencia portakal çeşitlerine ait örneklerin vakumlu mikrodalga ve tepsili kurutma işlemleri sonrasında meydana gelen renk değişimleri, CIE Lab* renk sistemi temel alınarak analiz edilmiştir. Yürütülen çalışmalarda, L* (parlaklık), a* (kırmızı-yeşil eksen), b* (sarı-mavi eksen), ΔE (toplam renk farkı), ΔC (kromatiklik farkı) ve hue açısı (renk tonu) olmak üzere altı temel renk parametresi değerlendirmeye alınmıştır.

Kurutma yöntemlerinin renk parametreleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmak amacıyla, iki veya daha fazla grup ortalaması arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test eden tek yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA sonucunda gruplar arasında anlamlı farklar tespit edilmesi durumunda, bu farkların hangi gruplar arasında gerçekleştiğini belirlemek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır. Yapılan analizler %95 güven düzeyinde değerlendirilmiş olup, elde edilen istatistiksel sonuçlar Ek-H'de verilmiştir.

Elde edilen bulgular, kurutma yöntemine bağlı olarak portakal dilimlerinin renk parametrelerinde anlamlı farklılıklar meydana geldiğini ortaya koymuştur. İlgili veriler, ayrıntılı biçimde Tablo 4.32 ve Tablo 4.33'de verilmiştir. Bu sonuçlar, uygulanan kurutma proseslerinin ürün renginde yarattığı değişimlerin nitelikli bir şekilde izlenmesine ve kalite değerlendirmesine olanak sağlamıştır.

Tablo 4.32'de Washington Navel portakal dilimlerinin taze, vakumlu mikrodalga kurutucu ve tepsili kurutucu ile kurutulmuş örneklerine ait renk değerleri, CIE Lab* sistemine göre değerlendirilmiştir. L* değeri (parlaklık), kurutma işlemleri sonrasında anlamlı şekilde artmıştır. Taze örneklerde en düşük L* değeri 55.32 ± 0.914 olarak belirlenmişken, vakumlu mikrodalga kurutma (82.43 ± 0.657) ve tepsili kurutma (82.09 ± 0.734) işlemleri bu değerle istatistiksel olarak anlamlı bir artışa neden olmuştur ($p \leq 0.05$) Ancak kurutma yöntemleri arasında L* değeri açısından fark anlamlı değildir ($p > 0.05$).

a* değeri (kırmızı-yeşil eksen), taze örneklerde (4.77 ± 0.842) daha yüksek bulunmuş, kurutma işlemleriyle birlikte belirgin şekilde azalmıştır. Vakumlu mikrodalga kurutma (1.90 ± 0.314) ve tepsili kurutma (1.66 ± 0.703) uygulamaları sonucunda a* değerinde istatistiksel olarak düşüşler tespit edilmiştir. Ancak kurutma yöntemleri arasında a* değeri açısından fark anlamlı değildir ($p > 0.05$).

Tablo 4.32. Taze ve farklı kurutma yöntemleri ile kurutulmuş Washington Navel portakal dilimlerine ait renk değerleri

Renk Değerleri	Washington Navel		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
L*	55.32 ± 0.914^b	82.43 ± 0.657^a	82.09 ± 0.734^a
a*	4.77 ± 0.842^a	1.90 ± 0.314^b	1.66 ± 0.703^b
b*	42.49 ± 1.382^a	40.18 ± 1.470^c	54.01 ± 1.381^a
Delta e		27.42 ± 0.693^b	29.37 ± 0.520^a
Delta c		3.85 ± 1.046^b	11.96 ± 1.231^a
hue	83.58 ± 1.119^c	87.30 ± 0.448^b	88.24 ± 0.707^a

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Tablo 4.33. Taze ve farklı kurutma yöntemleri ile kurutulmuş Valencia portakal dilimlerine ait renk değerleri

Renk Değerleri	Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
L*	54.79 ± 1.042^b	83.20 ± 0.539^a	83.23 ± 1.238^a
a*	8.08 ± 0.451^a	1.76 ± 0.538^b	1.74 ± 0.392^b
b*	46.88 ± 0.528^a	45.28 ± 0.885^b	34.79 ± 0.862^c
ΔE		29.16 ± 0.536^b	31.58 ± 0.943^a
ΔC		6.59 ± 0.659^b	13.70 ± 0.627^a
hue	80.21 ± 0.606^c	87.78 ± 0.659^a	87.13 ± 0.718^b

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Tablo 4.34. Farklı kurutma teknikleri ile kurutulmuş Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde renk değerleri

Renk Değerleri	Portakal Çeşitleri ve Kurutma Yöntemleri					
	Washington Navel			Valencia		
	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu	İşlem Görmemiş (Taze)	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
L*	55.32 ± 0.914 ^{b,C}	82.43 ± 0.657 ^{a, AB}	82.09 ± 0.734 ^{a,B}	54.79 ± 1.042 ^{b,C}	83.20 ± 0.539 ^{a,A}	83.23 ± 1.238 ^{a,A}
a*	4.77 ± 0.842 ^{a,B}	1.90 ± 0.314 ^{b,C}	1.66 ± 0.703 ^{b,C}	8.08 ± 0.451 ^{a,A}	1.76 ± 0.538 ^{b,C}	1.74 ± 0.392 ^{b,C}
b*	42.49 ± 1.382 ^{a,D}	40.18 ± 1.470 ^{c,E}	54.01 ± 1.381 ^{a,A}	46.88 ± 0.528 ^{a,B}	45.28 ± 0.885 ^{b,C}	34.79 ± 0.862 ^{c,F}
Delta e		27.42 ± 0.693 ^{b,C}	29.37 ± 0.520 ^{a,B}		29.16 ± 0.536 ^{b,B}	31.58 ± 0.943 ^{a,A}
Delta c		3.85 ± 1.046 ^{b,D}	11.96 ± 1.231 ^{a,B}		6.59 ± 0.659 ^{b,C}	13.70 ± 0.627 ^{a,A}
hue	83.58 ± 1.119 ^{c,C}	87.30 ± 0.448 ^{b,B}	88.24 ± 0.707 ^{a,A}	80.21 ± 0.606 ^{c,D}	87.78 ± 0.659 ^{a,AB}	87.13 ± 0.718 ^{b,B}

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır. Aynı satırda yer alan ve farklı büyük harflerle (A, B, C) gösterilen ortalamalar, meyve çeşitleri arasındaki değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

b* değeriinde ise farklı kurutma yöntemleri arasında dikkat çekici farklar gözlenmiştir. Taze örneklerdeki b* değeri (42.49 ± 1.382) ile vakumlu mikrodalga kurutma (40.18 ± 1.470) arasında anlamlı bir fark bulunmazken, tepsili kurutma (54.01 ± 1.381) ile bu değerin anlamlı düzeyde arttığı belirlenmiştir ($p < 0.05$).

Kurutma işlemleri sonucunda hesaplanan toplam renk farkı (ΔE), vakumlu mikrodalga kurutmada 27.42 ± 0.693 , tepsili kurutmada ise 29.37 ± 0.520 olarak ölçülmüş ve bu iki yöntem arasında istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır. Benzer şekilde, kromatiklik farkı (ΔC) tepsili kurutucuda (11.96 ± 1.231) vakumlu mikrodalga kurutucuya (3.85 ± 1.046) kıyasla anlamlı derecede yüksek bulunmuştur ($p < 0.05$).

Hue açısı bakımından değerlendirildiğinde, taze örneklerin hue değeri (83.58 ± 1.119) kurutma işlemleri sonrası anlamlı şekilde artmış; vakumlu mikrodalga kurutma (87.30 ± 0.448) ve tepsili kurutma (88.24 ± 0.707) uygulamaları arasında da istatistiksel farklılıklar gözlemlenmiştir ($p < 0.05$).

Valencia portakal dilimlerinin renk değerleri de benzer şekilde değerlendirilmiş (Tablo 4.32.) ve kurutma işlemlerinin önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. L* değeri, taze örneklerde 54.79 ± 1.042 iken, vakumlu mikrodalga (83.20 ± 0.539) ve tepsili kurutma (83.23 ± 1.238) ile bu değerde anlamlı artışlar meydana gelmiştir. Ancak kurutma yöntemleri arasında L* değeri açısından anlamlı fark bulunmamıştır ($p > 0.05$).

a* değeri, taze örneklerde 8.08 ± 0.451 ile en yüksek seviyede bulunmuş, kurutma işlemleri sonucunda vakumlu mikrodalga (1.76 ± 0.538) ve tepsili kurutma (1.74 ± 0.392) işlemleri ile istatistiksel olarak anlamlı düşüşler gerçekleşmiştir ($p < 0.05$).

b* değeri incelendiğinde, taze örneklerde 46.88 ± 0.528 olarak ölçülen bu parametrenin, kurutma işlemleriyle birlikte anlamlı düzeyde azaldığı belirlenmiştir ($p < 0.05$). Vakumlu mikrodalga kurutmada 45.28 ± 0.885 , tepsili kurutmada ise 34.79 ± 0.862 değeri elde edilmiştir. Özellikle tepsili kurutmanın sarı tonlarında ciddi bir azalmaya neden olduğu anlaşılmıştır.

ΔE değeri açısından, kurutma işlemlerinin toplam renk farkını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Vakumlu mikrodalga kurutmada ΔE 29.16 ± 0.536 iken, tepsili kurutma ile bu değer 31.58 ± 0.943 'ya yükselmiş ve aralarındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur.

Kromatiklik farkı olan ΔC parametresi de vakumlu mikrodalga kurutmada (6.59 ± 0.659) tepsili kurutmaya (13.70 ± 0.627) göre anlamlı olarak daha düşük bulunmuştur ($p < 0.05$).

Hue açısı, taze örneklerde 80.21 ± 0.606 , vakumlu mikrodalga kurutmada 87.78 ± 0.659 ve tepsili kurutmada 87.13 ± 0.718 olarak ölçülmüş olup, kurutma yöntemlerine bağlı olarak istatistiksel farklılıklar oluşturmıştır.

Portakal çeşitleri arasında renk değerleri karşılaştırıldığınd;

- Her iki portakal çeşidinde de L^* değeri kurutma işlemleri ile belirgin şekilde artmış; vakumlu mikrodalga ve tepsili kurutma arasında anlamlı fark gözlenmemiştir.
- a^* değerleri her iki portakal çeşidinde de kurutma sonrası önemli ölçüde azalmıştır. Ancak Valencia çeşidinin başlangıç (taze) a^* değeri Washington Navel'e göre daha yüksektir.
- b^* değeri yönünden, Washington Navel tepsili kurutmada artış gösterirken, Valencia'da tam tersi bir eğilim gözlemlenmiştir. Bu durum portakal çeşitlerinin sarı-mavi eksenindeki renk tepkilerinin farklı olduğunu ortaya koymuştur.
- ΔE ve ΔC değerleri, tepsili kurutma işleminin her iki çeşitte de daha yüksek renk farkına neden olduğunu göstermiştir. Özellikle ΔC , Valencia'da daha yüksek düzeyde farklılık göstermiştir.
- Hue açısı, her iki çeşitte de kurutma sonrası artış göstermiştir. Valencia'nın (taze) hue değeri, Washington Navel'e göre daha düşüktür; bu nedenle başlangıçta daha turuncumsu/kırmızımsı tona sahip olduğu kanısına varılmıştır.

Her iki portakal çeşidi, uygulanan kurutma yöntemlerinden istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilenmiştir. Ancak Valencia portakalının renk parametreleri, özellikle b^* ve ΔC gibi sarı

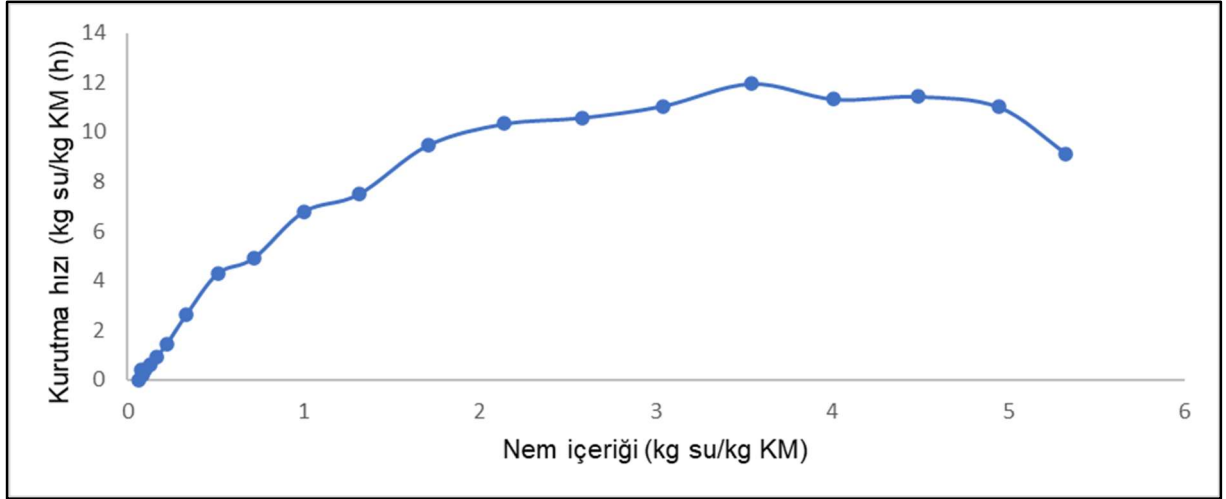
tonunu ve renk canlılığını yansıtan değerlerde Washington Navel'e kıyasla daha fazla (hassas) değişim göstermiştir. Tepsili kurutmanın renk parametreleri üzerinde daha yoğun bir etkisi olduğu, buna karşın vakumlu mikrodalga kurutmanın renk korunumunda daha avantajlı sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

4.3. Vakumlu Mikrodalga ve Tepsili Kurutma Sistemleri ile Kurutulan Washington Navel ve Valencia Portakal Dilimlerine ait Kurutma Kinetiği Sonuçları

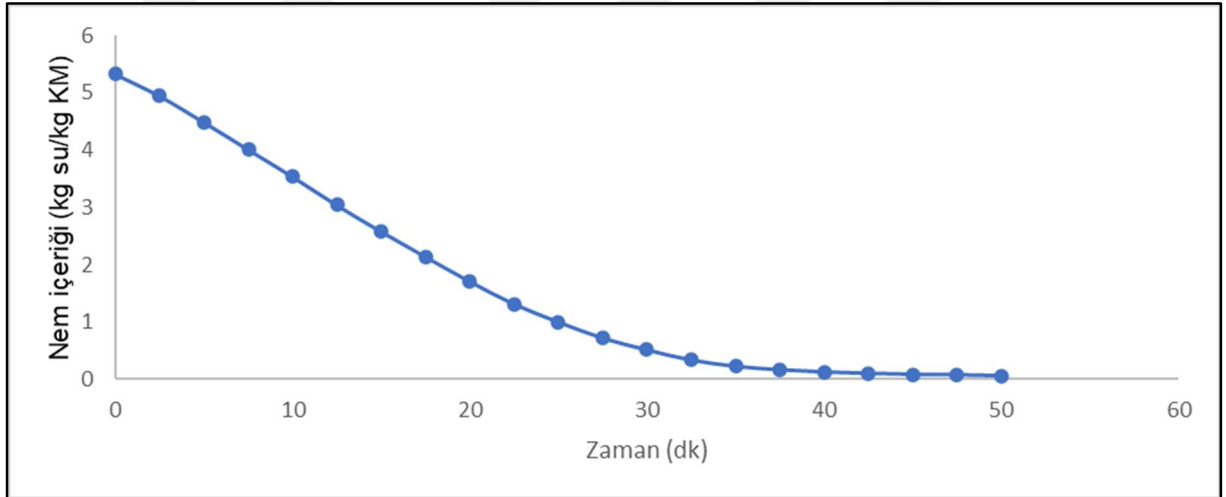
Vakumlu mikrodalga ve tepsili kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulan Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerine ait kuruma hızları hesaplanmıştır. Kurutma sürecinde, örneklerin nem içeriklerine bağlı olarak kuruma hızındaki değişimler analiz edilmiş ve elde edilen veriler grafiksel olarak verilmiştir. Bu kapsamda, kuruma hızlarının değişimini gösteren grafikler ile farklı kurutma tekniklerine tabi tutulan portakal dilimlerinin zamana bağlı olarak değişen nem içerikleri ve nem oranları (Moisture Ratio, MR), Şekil 4.25–Şekil 4.36 arasında verilmiştir. Elde edilen bulgular, uygulanan kurutma yöntemlerinin nem transferi üzerindeki etkilerini değerlendirme açısından önemli bilgiler sağlamıştır.

Vakumlu mikrodalga kurutma işlemi sırasında, örneklerin nem içeriği arttıkça kuruma hızında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Kuruma hızının, yaklaşık 3.2–3.5 kg su/kg KM aralığında maksimum seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 4.25.). Bu durum, başlangıçta serbest suyun hızlı bir şekilde uzaklaştırıldığını, ilerleyen aşamalarda ise kurutma mekanizmasının difüzyon kontrollü hale geldiğini ortaya koymuştur. Nem içeriğinin, kurutma süresi boyunca sürekli olarak azaldığı ve yaklaşık 50. dakikada denge nemine ulaşıldığı belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, vakumlu mikrodalga kurutucunun yüksek ısı transfer verimliliği sayesinde nemin etkin bir şekilde uzaklaştırıldığını göstermiştir (Şekil 4.26.).

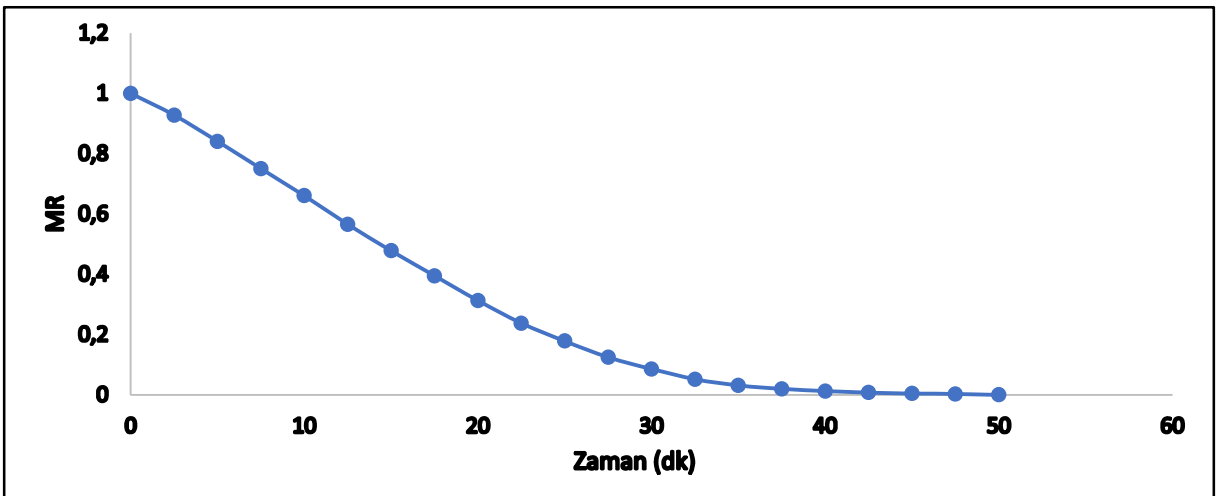
MR (Moisture Ratio) değerlerinde zamanla belirgin bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yaklaşık 40. dakikada MR değerinin 0.05 seviyelerine indiği tespit edilmiştir. Bu durum, kurutmanın son aşamalarında su içeriğinin oldukça düşük seviyelere gerilediğini ve ürünün denge nemine yaklaştığını göstermiştir (Şekil 4.27.).



Şekil 4.25. Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait kuruma hızının nem içeriğine bağlı değişimi

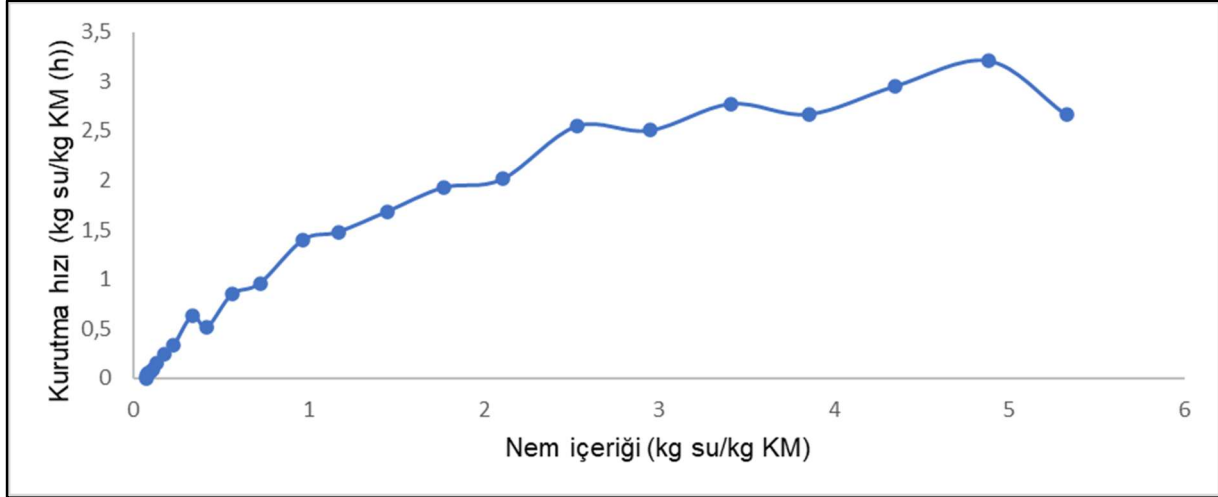


Şekil 4.26. Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait nem içeriğinin zamana bağlı değişimi



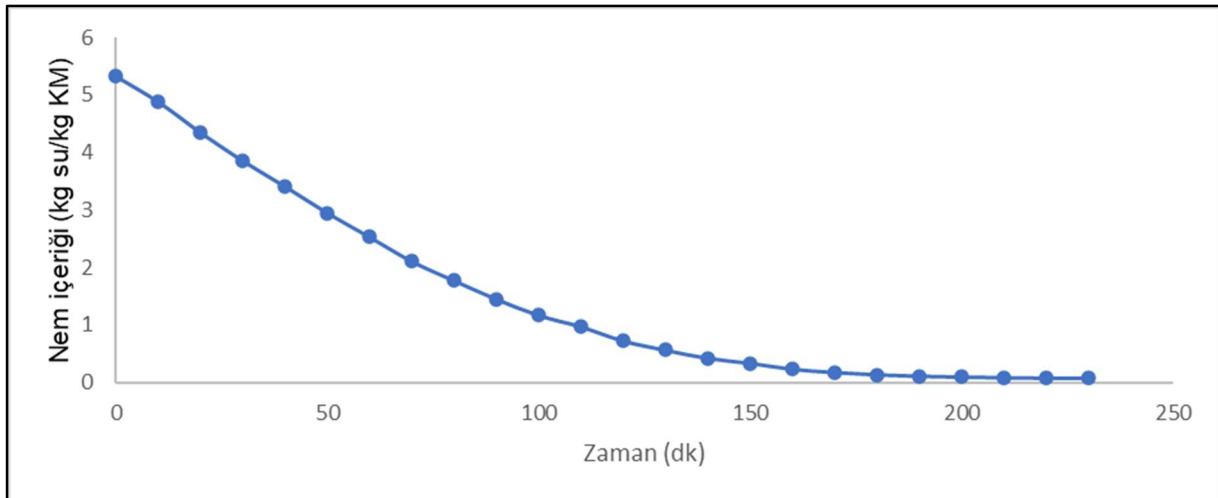
Şekil 4.27. Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait nem oranının (Moisture ratio,MR) zamana bağlı değişimi

Tepsili kurutma sürecinde nem içeriği arttıkça kuruma hızında kademeli bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. Kuruma hızının, yaklaşık 5 kg su/kg KM seviyelerinde en yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Ancak genel kuruma hızının, vakumlu mikrodalga yöntemiyle elde edilen değerlere kıyasla daha düşük olduğu saptanmıştır (Şekil 4.28.).



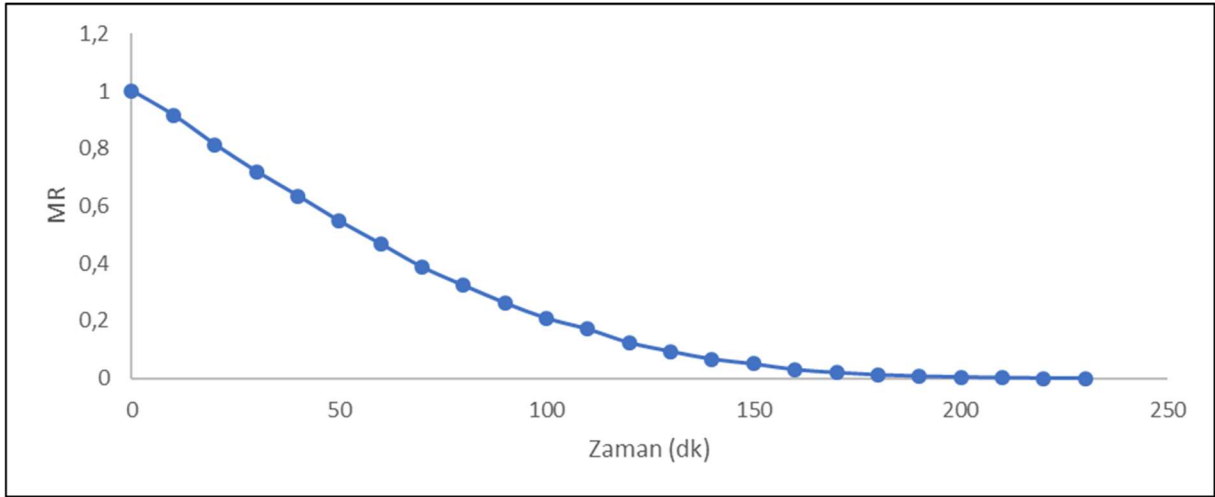
Şekil 4.28. Tepsili kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait kuruma hızının nem içeriğine bağlı değişimi

Kurutma süresi boyunca nem içeriğinin sürekli azaldığı ve yaklaşık 210. dakikada sabit bir seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Bu bulgu, tepsili kurutucunun daha uzun sürede kurutma sağladığını ve nemin uzaklaştırılmasının daha yavaş gerçekleştiğini ortaya koymuştur (Şekil 4.29.).



Şekil 4.29. Tepsili kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait nem içeriğinin zamana bağlı değişimi

MR değerlerinin zamana bağlı olarak sürekli bir düşüş gösterdiği ve yaklaşık 200. dakikada 0.05 seviyesine indiği tespit edilmiştir. Bu eğilim, tepsili kurutma yönteminin daha düşük kurutma kinetiğine sahip olduğunu ve su uzaklaştırma sürecinin daha yavaş ilerlediğini göstermiştir (Şekil 4.30.).



Şekil 4.30. Tepsili kurutucuda kurutulan Washington Navel portakal dilimlerine ait nem oranının (Moisture ratio, MR) zamana bağlı değişimi

Ürünlerdeki nem oranı azaldıkça, içyapıdaki nemin hareketi yavaşlamış ve yüzeye ulaşması zorlaşmıştır. Bu durum, kuruma süresinin uzamasına ve kuruma hızının belirgin şekilde azalmasına neden olmuştur. Elde edilen grafikler, bu eğilimi destekler nitelikte sonuçlar ortaya koymuştur.

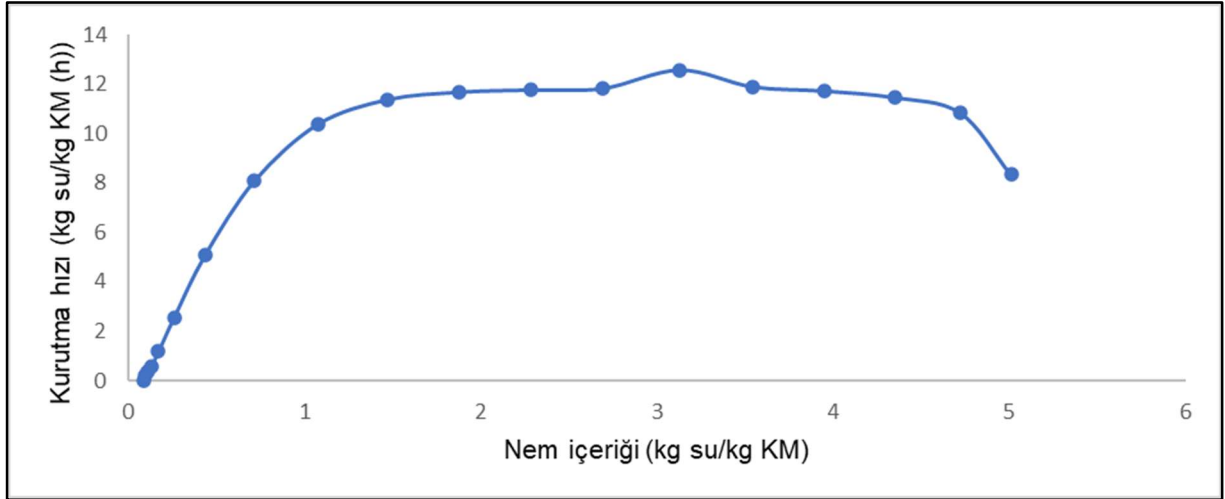
Washington Navel portakal dilimlerinin kurutulmasında, en kısa kuruma süresi 45 dakika ile vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi için tespit edilmiştir. Buna karşılık, tepsili kurutucuda gerçekleştirilen kurutma işleminin 218 dakika sürdüğü belirlenmiştir. Kurutma hızı açısından değerlendirildiğinde, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi ile kurutulan örneklerde ortalama kuruma hızı 7.25 kg H₂O/kg kurumadde·saat olarak hesaplanmıştır. Tepsili kurutma yönteminde ise bu değer 1.48 kg H₂O/kg kurumadde·saat olarak belirlenmiştir. Bu veriler, vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin hem daha kısa sürede tamamlandığını hem de daha yüksek kurutma hızına sahip olduğunu göstermiştir.

Nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) değerleri, eşitlik (3.6) ve (3.7) kullanılarak hesaplanmıştır. D_{eff} , örnek içerisindeki nemin göç hızını ifade etmekte olup, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi

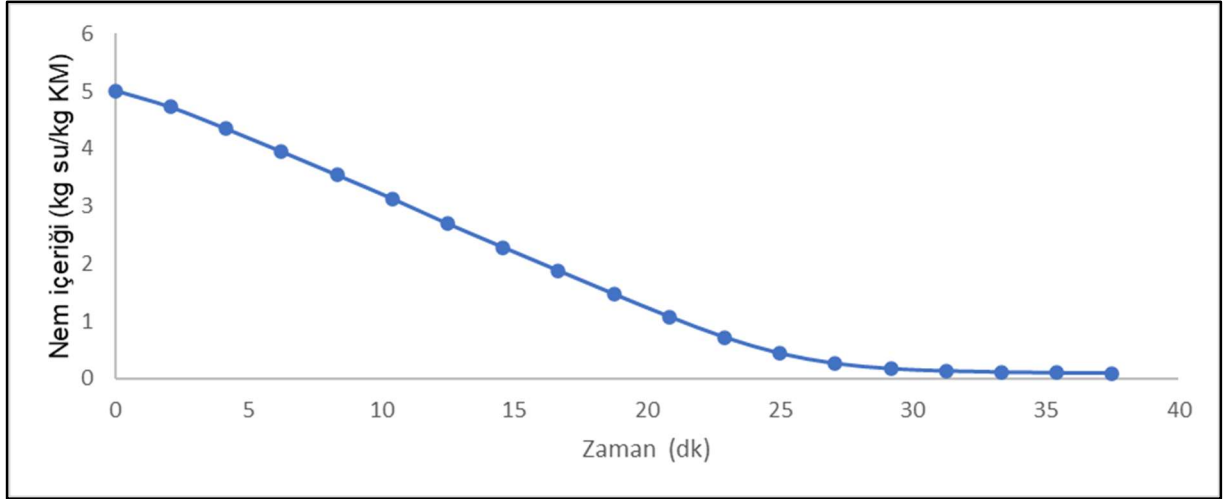
için Washington Navel portakalında $8.38 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Bu değer, tepsili kurutma yöntemine ait $1.49 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 'lik Deff değerinin yaklaşık altı katı olarak tespit edilmiştir. Nem difüzyon katsayısının kurutma yöntemlerine göre farklılık göstermesi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Bu sonuç, vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin tepsili kurutmaya kıyasla daha hızlı bir kütle transferine ve daha yüksek bir kuruma hızına (DR) sahip olduğunu doğrulamıştır.

Vakumlu mikrodalga kurutma işlemi sırasında, nem içeriği arttıkça kuruma hızında artış gözlemlenmiştir. Kuruma hızının yaklaşık 3.0–3.2 kg su/kg KM aralığında maksimum seviyeye ulaştığı belirlenmiştir (Şekil 4.31.). Nem içeriği 5 kg su/kg KM değerine yaklaştığında kuruma hızının düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, nem içeriği azaldıkça difüzyon kontrollü kurutma evresine geçildiğini göstermiştir.

Kurutma süreci boyunca nem içeriği sürekli olarak azalmış ve yaklaşık 35. dakikada sabitlenmiştir. Bu sonuç, vakumlu mikrodalga kurutucunun yüksek verimli nem uzaklaştırma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Kurutma süresince nemin büyük bir kısmının ilk 25 dakika içerisinde giderildiği belirlenmiştir (Şekil 4.32.).



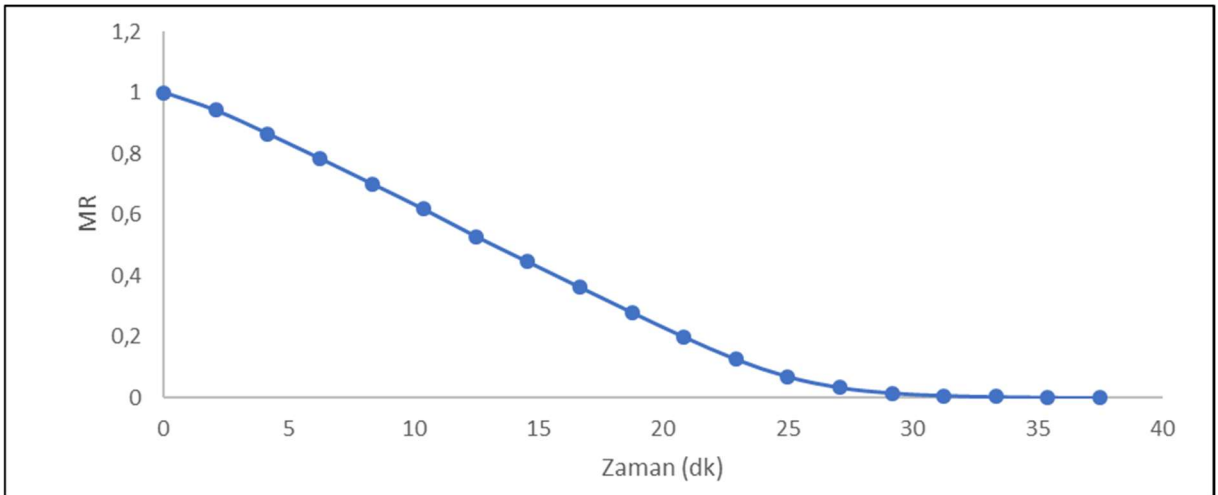
Şekil 4.31. Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait kurutma hızının nem içeriğine bağlı değişimi



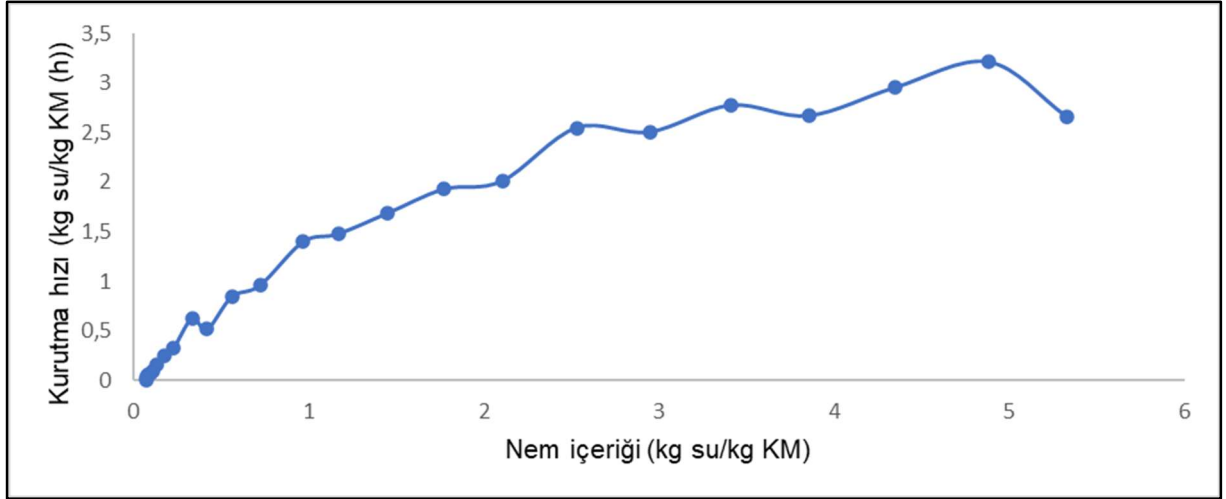
Şekil 4.32. Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait nem içeriğinin zamana bağlı değişimi

Kuruma hızının nem içeriği arttıkça düzenli olarak artış gösterdiği ve 5 kg su/kg KM seviyesine yaklaşıldığında maksimum değere ulaştığı tespit edilmiştir. Ancak vakumlu mikrodalga yöntemiyle karşılaştırıldığında, kuruma hızının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, tepsili kurutma yönteminde ısı transfer verimliliğinin sınırlı olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 4.34.).

MR değerlerinde zamana bağlı olarak sürekli bir azalma gözlemlenmiştir. Yaklaşık 30. dakikada MR değeri 0.05 seviyesine yaklaşmıştır. Bu durum, ürünün denge nemine ulaştığını ve kurutma işleminin büyük ölçüde tamamlandığını göstermiştir (Şekil 4.33.).

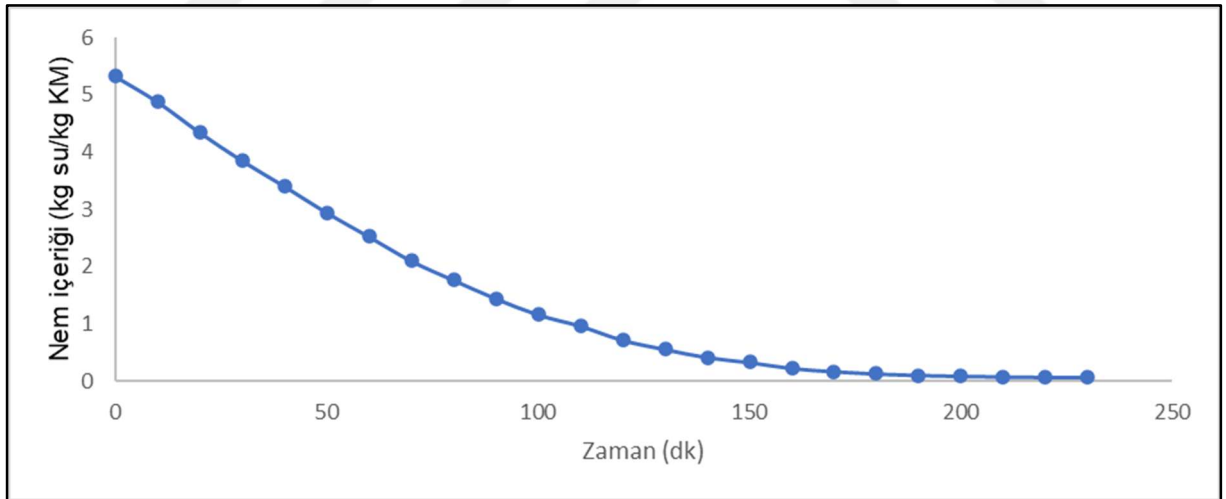


Şekil 4.33. Vakumlu mikrodalga kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait nem oranının (Moisture ratio, MR) zamana bağlı değişimi



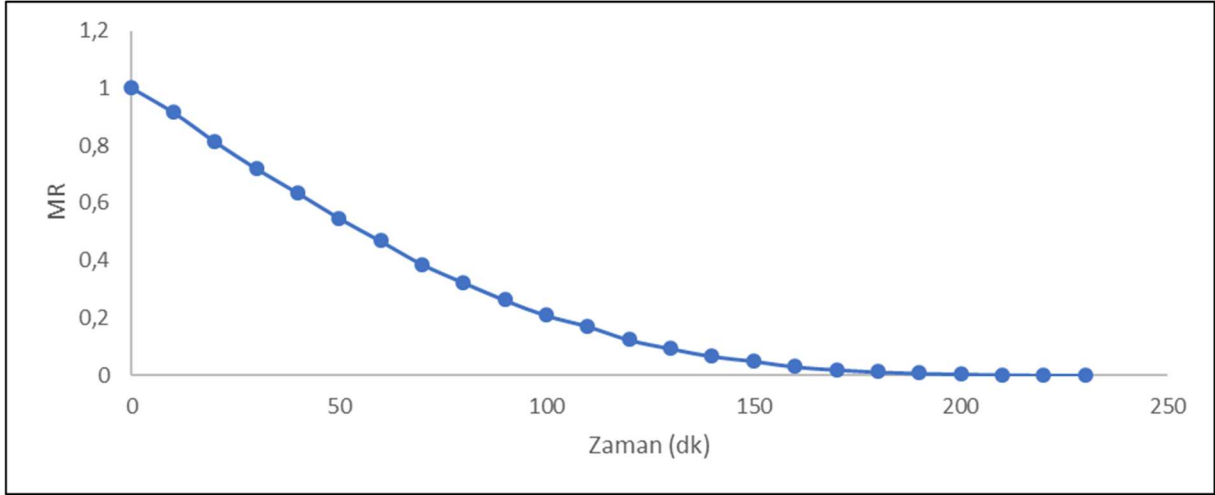
Şekil 4.34. Tepsili kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait kuruma hızının nem içeriğine bağlı değişimi

Nem içeriğinin kurutma süresi boyunca düzenli olarak azaldığı ve yaklaşık 220. dakikada sabit bir seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, tepsili kurutma işleminin daha uzun sürede tamamlandığını ve nemin uzaklaştırılmasının daha yavaş gerçekleştiğini ortaya koymuştur (Şekil 4.35.).



Şekil 4.35. Tepsili kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait nem içeriğinin zamana bağlı değişimi

MR değerlerinin zamanla kademeli olarak azaldığı ve 200. dakikadan sonra 0.05 seviyelerine yaklaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, kurutma işleminin son aşamasına geçildiğini ve ürünün denge nemine ulaştığını göstermiştir. Tepsili kurutucuda kurutulan örneklerde nem uzaklaştırma sürecinin daha uzun sürdüğü belirlenmiştir (Şekil 4.36.).



Şekil 4.36. Tepsili kurutucuda kurutulan Valencia portakal dilimlerine ait nem oranının (Moisture ratio, MR) zamana bağlı değişimi

Valencia portakal dilimlerinin kurutulmasında en kısa kuruma süresi, 35 dakika ile vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi için tespit edilmiştir. Buna karşılık, tepsili kurutucuda gerçekleştirilen kurutma işleminin 145 dakika sürdüğü belirlenmiştir. Kurutma hızı değerlendirildiğinde, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle kurutulan örneklerde ortalama kuruma hızı 8.60 kg H₂O/kg kurumadde·saat olarak hesaplanmıştır. Tepsili kurutma yöntemiyle kurutulan örneklerde ise bu değer 2.06 kg H₂O/kg kurumadde·saat olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin hem daha kısa sürede tamamlandığını hem de daha yüksek kurutma hızına sahip olduğunu göstermektedir.

Valencia portakal dilimlerinin kurutulmasında kullanılan farklı kurutma yöntemlerine ait nem difüzyon katsayısı (Deff) değerleri, eşitlik (3.6) ve (3.7) yardımıyla hesaplanmıştır (Tablo 4.35.). Deff, ürün içerisindeki nemin difüzyon yoluyla taşınım hızını ifade etmektedir. Hesaplanan sonuçlara göre, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi için Deff değeri 1.07×10^{-9} m²/s olarak belirlenmiştir. Bu değer, tepsili kurutma yöntemi için hesaplanan 1.49×10^{-10} m²/s değerinin yaklaşık yedi katıdır. Nem difüzyon katsayısı açısından farklı kurutma yöntemleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunduğu tespit edilmiştir ($p < 0.05$). Bu sonuç, vakumlu mikrodalga kurutma yönteminin daha hızlı kütle transferi sağladığını ve tepsili kurutmaya kıyasla daha etkin bir kurutma süreci gerçekleştirdiğini ortaya koymuştur.

Tüm örnekler bir arada değerlendirilerek kurutma yöntemlerine ilişkin istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, kurutma yöntemleri arasında istatistiksel

açından anlamlı fark olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). Özellikle, kurutma yöntemlerinin nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) üzerine etkisinin anlamlı olduğu tespit edilmiştir ($p<0.05$). Bu bulgular, kullanılan kurutma yöntemlerinin kütle transfer süreçlerini farklı düzeylerde etkilediğini ortaya koymaktadır. Nem difüzyon katsayısına ilişkin tek yönlü varyans analizi (One-Way ANOVA) sonuçları Ek I'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 4.35. Farklı kurutma yöntemi ile kurutulan Washington Navel ve Valencia Portakal dilimlerine ait nem difüzyon katsayıları

Nem Difüzyon Katsayısı	Portakal Çeşitleri ve Kurutma Yöntemleri			
	Washington Navel		Valencia	
	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu	Vakumlu Mikrodalga Kurutucu	Tepsili Kurutucu
$D_{eff}(m^2/s)$	8.38×10^{-10b}	1.49×10^{-10c}	1.07×10^{-9a}	1.49×10^{-10c}

Aynı satırda yer alan ve farklı harflerle (a, b, c) gösterilen ortalamalar, değerler arasında $p \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları bulunmaktadır.

Tablo 4.36. ve Tablo 4.37., on farklı kurutma modeline ait hesaplanan istatistiksel değerlendirme parametrelerini göstermektedir. Bu tablolar kapsamında, düşük RMSE (Root Mean Square Error) ve ki-kare (χ^2) değerleri ile birlikte yüksek R^2 (determinasyon katsayısı) değerleri, ilgili modellerin deneysel kurutma verilerine yüksek düzeyde uyum sağladığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, modellerin hem doğruluk hem de öngörü performansı açısından güvenilir olduğunu göstermektedir.

Washington Navel ve Valencia portakal çeşitlerine ait farklı kurutma yöntemleriyle elde edilen kuruma verileri, on farklı matematiksel kurutma modeline uygulanarak analiz edilmiştir. Her bir modelin performansı, determinasyon katsayısı (R^2), ortalama kare hata kökü (RMSE) ve ki-kare hata (χ^2) gibi istatistiksel parametreler dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, Washington Navel portakal dilimlerinin vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle modellenmesinde en iyi uyumun Page modeli tarafından sağlandığı tespit edilmiştir. Bu model için hesaplanan R^2 değeri 0.998, RMSE değeri 0.01626 ve χ^2 değeri 0.00029 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, Page modelinin deneysel verilere yüksek düzeyde uyum gösterdiğini ortaya koymuştur.

Tablo 4.36. Washington Navel Portakalın Vakumlu Mikrodalga Kurutma ve Tepsili Kurutma yöntemleri için on farklı kurutma modeline ait istatistiksel değerler.

Model	Sabitler ve Katsayılar	Tepsili Kurutma	Vakumlu Mikrodalga Kurutma
Lewis (Newton) MR=exp(-k*t)	k	0.015	0.061
	X^2	0.00276	0.00565
	RMSE	0.05140	0.07336
	R^2	0.974	0.952
Page MR=exp(-k*t^n)	k	0.03	0.011
	X^2	0.109972	0.00029
	RMSE	0.317503	0.01626
	R^2	0.998	0.998
Henderson ve Pabis MR=a*exp(-k*t)	k	0.016	0.067
	a	1.09	1.119
	X^2	0.00203	0.00426
	RMSE	0.04318	0.06205
Modifiye Henderson ve Pabis MR=a*exp(-k*t)+b*exp(-g*t)+c*exp(-h*t)	R^2	0.981	0.966
	k	0.016	0.067
	a	0.253	0.376
	g	0.016	0.067
	b	0.438	0.358
	h	0.016	0.067
	c	0.399	0.385
	X^2	0.00249	0.00539
Logaritmik MR=a*exp(-k*t)+c	RMSE	0.04318	0.06205
	R^2	0.981	0.966
	k	0.012	0.046
	a	1.158	1.253
	c	-0.106	-0.182
İki terimli MR=a*exp(-k*t)+b*exp(-c*t)	X^2	0.00086	0.00167
	RMSE	0.02751	0.03788
	R^2	0.994	0.987
	k	0.016	0.067
	a	0.543	0.559
İki terimli Üstel MR=a*exp(-k*t)+(1-a)*exp(-k*a*t)	c	0.016	0.067
	b	0.547	0.560
	X^2	0.0022376	0.004756
	RMSE	0.0431818	0.062048
	R^2	0.981	0.966
Difüzyon Yaklaşımı MR=a*exp(-k*t)+(1-a)*exp(-k*b*t)	k	37.786	0.094
	a	0.000392	2.033
	X^2	0.00288	0.00095
	RMSE	0.05138	0.02931
	R^2	0.974	0.992
Verma MR=a*exp(-k*t)+(1-a)*exp(-g*t)	k	0.028	0.126
	a	-57.847	-77.718
	b	0.986	0.987
	X^2	0.00028	0.00074
	RMSE	0.01578	0.02515
Wang ve Singh MR=1+a*t+b*t^2	R^2	0.998	0.994
	k	0.028	0.125
	a	-245.726	-169.004
	g	0.028	0.125
	X^2	0.02988	0.04604
	RMSE	0.16169	0.19866
	R^2	0.998	0.994
	a	-0.01	-0.043
	$b \times 10^{-5}$	2.716	46.60
	X^2	0.36266	0.20613
	RMSE	0.57658	0.43185
	R^2	0.998	0.994

Tablo 4.37. Valencia Portakalın Vakumlu Mikrodalga Kurutma ve Tepsili Kurutma yöntemleri için on farklı kurutma modeline ait istatistiksel değerler.

Model	Sabitler ve Katsayılar	Tepsili Kurutma	Vakumlu Mikrodalga Kurutma
Lewis (Newton) MR=exp(-k*t)	k	0.021	0.068
	X^2	0.00303	0.00967
	RMSE	0.05383	0.09573
	R^2	0.972	0.924
Page MR=exp(-k*t^n)	k	0.004	0.008
	X^2	0.00091	0.00085
	RMSE	0.0288	0.0276
	R^2	0.998	0.994
Henderson ve Pabis MR=a*exp(-k*t)	k	0.023	0.076
	a	1.09	1.119
	X^2	0.00227	0.00766
	RMSE	0.04551	0.08279
	R^2	0.980	0.944
Modifiye Henderson ve Pabis MR=a*exp(-k*t)+b*exp(-g*t)+c*exp(-h*t)	k	0.023	0.076
	a	0.304	0.378
	g	0.023	0.076
	b	0.487	0.391
	h	0.023	0.076
	c	0.300	0.370
	X^2	0.00280	0.00994
	RMSE	0.04552	0.08245
	R^2	0.980	0.944
Logaritmik MR=a*exp(-k*t)+c	k	0.017	0.039
	a	1.172	1.487
	c	-0.122	-0.417
	X^2	0.00080	0.00236
	RMSE	0.02630	0.04457
	R^2	0.994	0.984
İki terimli MR=a*exp(-k*t)+b*exp(-c*t)	k	0.023	0.076
	a	0.55	0.571
	c	0.023	0.076
	b	0.540	0.567
	X^2	0.0025075	0.008609
	RMSE	0.04551278	0.08244
	R^2	0.980	0.944
İki terimli Üstel MR=a*exp(-k*t)+(1-a)*exp(-k*a*t)	k	49.300	0.110
	a	0.000432	2.104
	X^2	0.00316	0.00242
	RMSE	0.05374	0.04651
	R^2	0.972	0.982
Difüzyon Yaklaşımı MR=a*exp(-k*t)+(1-a)*exp(-k*b*t)	k	0.041	0.149
	a	-51.542	-93.101
	b	0.984	0.988
	X^2	0.00039	0.00205
	RMSE	0.01851	0.04156
	R^2	0.997	0.986
Verma MR=a*exp(-k*t)+(1-a)*exp(-g*t)	k	0.04	0.149
	a	-143.229	-178
	g	0.04	0.148
	X^2	0.03097	0.00239
	RMSE	0.16412	0.04483
	R^2	0.997	0.986
Wang ve Singh MR=1+a*t+b*t^2	a	-0.015	-0.047
	$b \times 10^{-5}$	5.70	51.00
	X^2	0.36317	0.07071
	RMSE	0.57584	0.25154
	R^2	0.999	0.984

Öte yandan, aynı çeşide ait tepsili kurutma yöntemiyle elde edilen kuruma verileri için en uygun modelin Logaritmik model olduğu belirlenmiştir. Bu modelin performans kriterleri $R^2 = 0.994$,

RMSE = 0.02751 ve $\chi^2 = 0.00086$ olarak hesaplanmıştır. İlgili değerler, Logaritmik modelin tepsili kurutma verilerini başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Valencia portakalına yönelik yapılan modelleme çalışmalarında, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemiyle elde edilen verilerin matematiksel temsilde en yüksek uyumun Page modeli tarafından sağlandığı belirlenmiştir. İlgili model için determinasyon katsayısı (R^2) 0.994, ortalama kare hata kökü (RMSE) 0.0276 ve ki-kare hata (χ^2) 0.00085 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, Page modelinin vakumlu mikrodalga kurutma verilerini yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir.

Buna karşılık, tepsili kurutma yöntemiyle kurutulan Valencia portakalı örneklerinde en uygun modelin Difüzyon Yaklaşımı modeli olduğu tespit edilmiştir. Bu modelde $R^2 = 0.997$, RMSE= 0.01851 ve $\chi^2 = 0.00039$ olarak hesaplanmış olup, deneysel verilerle oldukça güçlü bir uyum sağladığı belirlenmiştir.

Elde edilen bu bulgular, kurutma yöntemi ve portakal çeşidine bağlı olarak model uyumlarının farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda, farklı kurutma yöntemleri altında Washington Navel ve Valencia portakalı için en uygun model performansları Tablo 4.38'de özetlenmiştir.

Tablo 4.38. Washington Navel ve Valencia portakalları için en iyi uyum sağlayan kurutma modelleri

Portakal Çeşidi	Kurutma Yöntemi	En İyi Model	R^2	RMSE	χ^2
Washington Navel	Vakumlu Mikrodalga	Page	0.998	0.01626	0.00029
Washington Navel	Tepsili Kurutma	Logaritmik	0.994	0.02751	0.00086
Valencia	Vakumlu Mikrodalga	Page	0.994	0.0276	0.00085
Valencia	Tepsili Kurutma	Difüzyon Yaklaşımı	0.997	0.01851	0.00039

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve uygulanan kurutma modelleri doğrultusunda yapılan değerlendirmeler, kurutma sürecinin tamamının azalan hız döneminde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu süreçte, iç difüzyonun suyun taşınımında temel sınırlayıcı mekanizma olduğu belirlenmiştir. Ürünlerin nem içeriği azaldıkça, iç yapıdaki suyun yüzeye taşınması zorlaşmakta; bu da kuruma hızının düşmesine ve kurutma süresinin uzamasına neden

olmaktadır. Bu durum, hem kurutma kinetiğini hem de matematiksel model performanslarını doğrudan etkilemektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Washington Navel ve Valencia portakal çeşitleri vakumlu mikrodalga (VMD) ve konvansiyonel tepsili kurutma yöntemleri ile kurutulmuş, kurutma parametreleri Yanıt Yüzey Metodu (RSM) kullanılarak optimize edilmiş ve elde edilen ürünlerde rehidrasyon kapasitesi, renk özellikleri, nem içeriği, su aktivitesi, pH, toplam asitlik, toplam fenolik madde, toplam karotenoid, antioksidan aktivite (DPPH), HMF, fenolik ve karotenoid bileşen profili ile şeker ve organik asit dağılımı gibi pek çok kalite parametresi değerlendirilmiştir. Ayrıca, kurutma kinetikleri matematiksel modellerle tanımlanarak en uygun kurutma modeli belirlenmiştir.

Vakumlu mikrodalga kurutma için işlem parametreleri olarak Güç: 4 kW, Sıcaklık: 60 °C, Dilim Kalınlığı: 2 mm Washington Navel portakal dilimi için, Güç: 4 kW, Sıcaklık: 80 °C, Dilim Kalınlığı: 2.2 mm Valencia portakal dilimi için optimum olarak belirlenmiştir. Tepsili kurutma yöntemi işlem parametreleri olarak ise Hava Hızı: 1.56 m/s, Sıcaklık: 78 °C, Dilim Kalınlığı: 2.3 mm Washington Navel portakal dilimi için, Hava Hızı: 1.8 m/s, Sıcaklık: 80 °C, Dilim Kalınlığı: 2 mm Valencia portakal dilimi için optimum olarak belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıda belirtilen sonuç ve öneriler sunulmuştur.

- **Kurutma Süresi ve Verim:** VMD yöntemi, tepsili kurutmaya göre kuruma süresini yaklaşık 4–5 kat kısaltarak her iki çeşitte de anlamlı bir zaman avantajı sağlamış ve bu sayede enerji ve zaman açısından daha verimli bir alternatif olduğunu ortaya koymuştur.
- **Kurutma Kinetiği:** Vakumlu mikrodalga kurutmada elde edilen nem difüzyon katsayısı (Deff) değeri, tepsili kurutma yöntemine göre her iki portakal çeşidinde yaklaşık altı kat daha yüksek bulunmuş, bu da daha hızlı kütle transferi ve kuruma hızını doğrulamıştır. Yapılan kurutma modellemeleri sonucunda, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi için her iki portakal çeşidinde Page modeli, tepsili kurutma için ise Valencia’da Difüzyon Yaklaşımı ve genel olarak Logaritmik model en iyi uyumu göstermiştir. Kurutma sürecinin tasarımı ve kontrolü açısından bu

modelleme ve optimizasyon yaklaşımı hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda referans niteliğinde değerlendirilmelidir.

- **Rehidrasyon Kapasitesi:** VMD ile kurutulan örneklerde daha yüksek rehidrasyon kapasitesi elde edilmiştir. Bu durum, mikrodalga enerjisinin hücre yapısında daha az zarar oluşturmaya ilişkin ilişkilendirilmiştir. Genel olarak, vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi, her iki portakal çeşidi için de rehidrasyon kapasitesi yönünden avantajlı bir teknik olarak öne çıkmıştır. Ancak Washington Navel çeşidinde bu avantaj istatistiksel olarak daha belirgin olup, tepsili kurutmanın bu çeşitte yapısal bütünlüğü daha fazla bozduğu anlaşılmıştır. Bu farklılıklar, portakal çeşitlerinin kurutma yöntemlerine verdiği hücresel tepkilerin değişken olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek rehidrasyon kapasitesi hedeflenen ürünlerde Washington Navel için vakumlu mikrodalga kurutma tercih edilmeli, daha yapısal dirençli olan Valencia ise farklı kurutma tekniklerine uygun bir alternatif olarak değerlendirilmeli; kurutma yöntemi seçimi portakal çeşidine göre yapılmalıdır.
- **Renk Stabilitesi:** Washington Navel ve Valencia portakal çeşitlerinin renk parametreleri, uygulanan kurutma yöntemlerine bağlı olarak istatistiksel açıdan anlamlı değişiklikler göstermiştir. Vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi, tepsili kurutmaya kıyasla daha düşük ΔE ve ΔC değerleri ile renk farkını ve renk canlılığı kaybını minimize etmiş, renk korunumunda üstün bir performans sergilemiştir. Özellikle b^* renk parametresine göre VMD yönteminin ürünlerde daha az renk kaybına neden olduğu ve renk yoğunluğunu daha iyi koruduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Valencia çeşidinde, b^* ve kromatiklik farkı (ΔC) değerlerinde gözlenen yüksek değişim, bu çeşidin renk stabilitesi açısından tepsili kurutmaya karşı daha hassas olduğunu ortaya koymuştur. Renk kalitesinin önemli olduğu ürünlerde vakumlu mikrodalga kurutma tercih edilmeli; Valencia çeşidinin renk parametrelerindeki hassasiyeti göz önünde bulundurularak bu çeşide özel optimize kurutma profilleri geliştirilmeli ve gelecekteki çalışmalarda renk değişimleri karotenoid bozunumu ve Maillard reaksiyonları açısından kimyasal analizlerle detaylandırılmalıdır.
- **Biyoaktif Bileşenlerin Korunumu:** VMD yöntemi ile kurutulan portakal dilimlerinde, toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerlerinin daha yüksek

olduğu belirlenmiştir. Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde uygulanan VMD ve tepsili kurutma yöntemleri, toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite üzerinde istatistiksel olarak anlamlı azalmalar oluşturmıştır. Taze örneklerde yüksek düzeyde bulunan bu biyoaktif bileşikler, özellikle tepsili kurutma yöntemiyle daha fazla kayba uğramıştır. Vakumlu mikrodalga kurutma ise daha kısa sürede ve düşük oksijenli ortamda gerçekleşmesi sayesinde fenolik bileşenlerin ve antioksidan kapasitenin korunmasında daha etkin bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Ayrıca Washington Navel çeşidi, başlangıçta daha yüksek fenolik içeriğe ve antioksidan kapasiteye sahip olup, bu üstünlüğünü kurutma sonrası da görece olarak koruyabilmiştir. Bu bulgular, kurutma teknolojisinin seçiminde hem meyve çeşidinin hem de hedeflenen fonksiyonel özelliklerin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Fonksiyonel bileşiklerin korunmasını hedefleyen uygulamalarda vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi tercih edilmelidir.

- **Fenolik Bileşenlere Etkisi:** Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde uygulanan kurutma yöntemleri, fenolik bileşik profili üzerinde bileşene özgü değişimlere yol açmıştır. Özellikle hidroksisinamik asitler, flavanonlar ve flavan-3-oller kurutma sırasında önemli ölçüde azalmış, bazı hidroksibenzoik asitlerde ise bağlı formlardan serbestleşmeye bağlı artışlar gözlemlendiği düşünülmektedir. Vakumlu mikrodalga kurutma, tepsili kurutmaya kıyasla bazı fenolik bileşenlerin korunmasında ve serbest hale geçmesinde daha avantajlı bulunmuş; fenolik yapıların korunumu ve biyoyararlılığı açısından tercih edilebilir bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Fenolik bileşiklerin korunumu ve biyoyararlılığının artırılması amacıyla vakumlu mikrodalga kurutma yöntemi tercih edilmeli; kurutma parametreleri hedef fenolik bileşiklerin stabilitesine göre optimize edilmeli ve kurutma sonrası bileşiklerin serbest/bağlı form dönüşümleri detaylı şekilde araştırılmalıdır.
- **Organik Asit Profiline ve Toplam Asitliğe Etkisi:** Araştırma sonuçları, hem Washington Navel hem de Valencia portakal dilimlerinde vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) uygulamasının tepsili kurutmaya kıyasla askorbik asit ve diğer başlıca organik asitlerin korunmasında belirgin avantaj sağladığını ortaya koymuştur; örneğin VMD ile C vitamini kaybı %44–54 aralığında sınırlı kalırken,

tepsili kurutmada bu oran %59–71’e yükselmiştir. Her iki meyvede de baskın organik asit olan sitrik asit açısından azalma tepsili kurutma yöntemiyle meydana gelmiştir. Toplam asitlik (TA) değeri her iki portakal çeşidinde kurutma sonrası azalmış, ancak Valencia çeşidinde VMD yöntemiyle asidik yapının daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, organik asitlerin korunmasında hem portakal çeşidinin hem de kurutma yönteminin önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Tepsili kurutma, bazı durumlarda daha iyi yüzey kuruması sağlayarak iç dokudaki asitlerin korunmasına katkı sunabilir; fakat yüksek sıcaklık, malik ve sitrik asit gibi bileşenlerde parçalanma riskini artırabilir.

- **Diğer Kalite Parametrelerine Etkisi:** Washington Navel ve Valencia portakal dilimlerinde uygulanan vakumlu mikrodalga (VMD) ve tepsili kurutma yöntemleri, ürün kalitesini farklı açılardan etkilemiştir. Tepsili kurutma, her iki portakal çeşidinde daha düşük su aktivitesi ve nem içeriği sağlayarak mikrobiyal stabilite açısından avantaj sunarken, vakumlu mikrodalga kurutmanın da sonuçlar dikkate alındığında bu açıdan katkı sağladığı ve raf ömrünü desteklediği dikkate alınmalıdır. Ancak bu tepsili kurutma yöntemiyle kurutulan örneklerde HMF (5-hidroksimetilfurfural) seviyeleri anlamlı şekilde artmış, daha yoğun Maillard reaksiyonları ve uzun süreli ısı işlem nedeniyle karotenoidde daha fazla kayıp meydana gelmiştir. Vakumlu mikrodalga kurutma ise daha kısa sürede işlem görmesi sayesinde ürünün ısıl maruziyetini azaltmış, HMF oluşumunu sınırlamış ve karotenoid pigmentlerini daha iyi korumuştur. Toplam karotenoid içeriğindeki bu avantaj istatistiksel olarak anlamlı olmasa da kalite eğilimi VMD lehine olmuştur. Sonuç olarak, kurutma yöntemi seçiminde hem hedeflenen kalite parametresi hem de portakal çeşidinin ısıl işleme karşı duyarlılığı dikkate alınmalı; mikrobiyal güvenlik, besin ögesi korunumu ve işlem verimliliği gibi unsurlar birlikte değerlendirilmelidir.
- Endüstriyel uygulamalarda, hedeflenen ürün profiline göre (tat dengesi, renk, raf ömrü) uygun kurutma yöntemi ve koşulları seçilmeli; özellikle karotenoid ve fenolik stabilitesini koruyacak şekilde orta-düşük sıcaklık ve kısa süreli teknolojiler tercih edilmelidir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, vakumlu mikrodalga kurutma (VMD) yöntemi; daha kısa kurutma süresi, yüksek rehidrasyon kapasitesi, renk stabilitesi, biyoaktif bileşenlerin korunumu ve daha düşük HMF oluşumu gibi birçok kalite parametresi açısından konvansiyonel tepsili kurutmaya kıyasla üstün performans sergilemiştir. Özellikle Washington Navel çeşidinde, VMD yöntemiyle daha yüksek ürün kalitesi elde edilirken, Valencia çeşidi, her iki kurutma yöntemine karşı daha yüksek doku stabilitesi sergilemiş ve yapısal bütünlüğünü daha iyi koruyabilmiştir. Bu durum, kurutma teknolojisinin seçiminin sadece hedeflenen kalite kriterlerine değil, aynı zamanda işlenen meyve çeşidinin hücresel ve kimyasal özelliklerine göre de optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak, portakal dilimlerinin endüstriyel kurutulmasında fonksiyonel kalite, yapısal bütünlük ve ürün stabilitesinin sağlanması için kurutma yöntemi ve işlem parametrelerinin meyve çeşidine özgü olarak belirlenmesi; ayrıca fenolik ve karotenoid bileşiklerin korunmasına yönelik yeni nesil düşük sıcaklık-temelli teknolojilere öncelik verilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Adali, A. (2022). Vakum mikrodalga kurutucu ile kurutulan Sultaniye çeşidi üzümünün depolama boyunca kalite değişimlerinin belirlenmesi [Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. İzmir, Türkiye
- Afrin, S. M., Acharjee, A., & Sit, N. (2022). Convective drying of orange pomace at different temperatures and characterization of the obtained powders. *Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 1040–1052. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05108-2>
- AOAC. (1995). *Official Method for Moisture, Method No. 925.10*.
- Aygören, E. (2021). *Ürün Raporu Turunçgiller 2021*.
- Aygören, E. (2024). *Turunçgiller ürün raporu 2024*.
- Berk, Z. (2016). Introduction: history, production, trade, and utilization. In *Citrus Fruit Processing* (pp. 1–8). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803133-9.00001-1>
- Bingöl, G. (2010). *Gıda işlemede kurutma teknolojilerinin temel ilkeleri* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İstanbul Sanayi Odası.
- Bozkır, H. (2020). Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), 1–12. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13485>
- Bozkır, H., Tekgül, Y., & Erten, E. S. (2020). Effects of tray drying, vacuum infrared drying, and vacuum microwave drying techniques on quality characteristics and aroma profile of orange peels. *Journal of Food Process Engineering*, 44(1), e13611. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13611>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Calín-Sánchez, Á., Kharaghani, A., Lech, K., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Tsotsas, E. (2015). Drying kinetics and microstructural and sensory properties of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as affected by drying method. *Food and Bioprocess Technology*, 8(1), 63–74. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1383-x>
- Calín-Sánchez, Á., Kharaghani, A., Adam Figiel, L. L., Cano-Lamadrid, M., Masztalerz, K., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Figiel, A. (2020). Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables and Aromatic Herbs. *Foods*, 9, 1261. <https://doi.org/doi:10.3390/foods9091261>

- Carley, K. M., Kamneva, N. Y., & Reminga, J. (2004). Response Surface Methodology: CASOS Technical Report. *Network*, 2(October), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/wics.73>
- Carrín, M. E., & Crapiste, G. H. (2009). Convective drying of foods. In C. Ratti (Ed.), *Advances in Food Dehydration* (pp. 123–152). CRC Press.
- Cebadera-Miranda, L., Morales, P., & Cámara, M. (2020). Bioactive compounds in oranges from the Mediterranean climate area. In *The Mediterranean Diet* (Second Edi). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818649-7.00027-8>
- Cui, Z.-W., Li, C.-Y., Song, C.-F., & Song, Y. (2008). Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips. *Drying Technology*, 26(12), 1517–1523. <https://doi.org/10.1080/07373930802463960>
- Cui, Z.-W., Xu, S.-Y., & Sun, D.-W. (2004a). Effect of microwave-vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. *Drying Technology*, 22(3), 563–575. <https://doi.org/10.1081/DRT-120030001>
- Cui, Z.-W., Xu, S.-Y., & Sun, D.-W. (2004b). Microwave–vacuum drying kinetics of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 65, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.008>
- Çetin, N. (2019). Kurutma koşullarının elma ve portakalda renk özelliklerine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 463–470. <https://doi.org/10.31590/ejosat.626203>
- Çetin, N. (2022). Prediction of moisture ratio and drying rate of orange slices using machine learning approaches. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), 1–20. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17011>
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., & Basak, T. (2013). Microwave food processing-A review. *Food Research International*, 52(1), 243–261. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.033>
- Chen, Y., Barzee, T. J., Zhang, R., & Pan, Z. (2019). Citrus. In *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00009-5>
- Chizoba Ekezie, F. G., Sun, D. W., Han, Z., & Cheng, J. H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science and Technology*, 67, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.014>
- Clary, C. D., Mejia-Meza, E., Wang, S., & Petrucci, V. E. (2007). Improving grape quality using microwave vacuum drying associated with temperature control. *Journal of Food*

- Science*, 72(1), E023–E028. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00234.x>
- Clary, C. D., Wang, S. J., & Petrucci, V. E. (2005). Fixed and incremental levels of microwave power application on drying grapes under vacuum. *Journal of Food Science*, 70(5), 344–349.
- Dash, K. K., Shangpliang, H., Bhagya Raj, G. V. S., Chakraborty, S., & Sahu, J. K. (2021). Influence of microwave-vacuum drying process parameters on phytochemical properties of sohiong (*Prunus nepalensis*) fruit. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, e15290. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15290>
- Delfiya, D. S. A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P., & Pandiselvam, R. (2022). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 45(6), 1–19. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13810>
- Derose, J. S., Nagamaniammai, G., Daradkeh, G., Qoronfleh, W. M., & Al-Mahrizi, M. (2021). Impact of the drying techniques on the functional properties of *Citrus sinensis* (sweet orange) fruit – a review. *International Journal of Nutrition Pharmacology Neurological Diseases*, 11(3), 181–188. https://doi.org/10.4103/ijnpnd.ijnpnd_14_21
- Duarte-Correa, Y., Granda-Restrepo, D., Cortés, M., & Vega-Castro, O. (2020). Potato snacks added with active components: Effects of the vacuum impregnation and drying processes. *Journal of Food Science and Technology*, 57(4), 1523–1534. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04188-5>
- Erdem, T., Özlüoymak, Ö. B., & Kızıldağ, N. (2018). Color change analysis of dried orange slices during hot air drying. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(9), 6064–6072.
- Eryılmaz, D. Z. (2020). Portakal Yetiştiriciliği. *T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Md. Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü*, 37.
- Etebu, E., & Nwauzoma, A. B. (2014). A review on sweet orange (*citrus sinensis* L Osbeck) health, diseases and management. *American Journal of Research Communication*, 2(2), 33–70.
- FAO. 2021. (2020). Citrus Fruit Statistical Compendium 2020. In *FAO. Rome*. <https://doi.org/10.5860/choice.36-2167>
- Gama, J. J. T., & Sylos, C. M. (2005). Major carotenoid composition of Brazilian Valencia orange juice: Identification and quantification by HPLC. *Food Research International*, 38, 899–903. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.03.008>
- Giri, S. K., & Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried button mushrooms. *Journal of Food*

- Engineering*, 78(2), 512–521. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.021>
- González-Cavieres, L., Pérez-Won, M., Tabilo-Munizaga, G., Jara-Quijada, E., Díaz-Álvarez, R., & Lemus-Mondaca, R. (2021). Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products. *Trends in Food Science and Technology*, 116(April), 626–638. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.005>
- González-Gómez, D., Lozano, M., Fernández-León, M. F., Bernalte, M. J., Ayuso, M. C., & Rodríguez, A. B. (2010). Sweet cherry phytochemicals: Identification and characterization by HPLC–DAD/ESI-MS in six sweet-cherry cultivars grown in Valle del Jerte (Spain). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(6), 533–539. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.02.008>
- Guclu, G., Polat, S., Kelebek, H., Capanoglu, E., & Selli, S. (2022). Elucidation of the impact of four different drying methods on the phenolics, volatiles, and color properties of the peels of four types of citrus fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(13), 6036–6046. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11956>
- Guiné, R. P. F., & Lima, M. J. (2020). Study of the drying kinetics and calculation of mass transfer properties in hot air drying of *Cynara cardunculus*. *Open Agriculture*, 5(1), 740–750. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0062>
- Günaydın, S., Sağlam, C., & Çetin, N. (2022). Tarımsal Ürünlerin Kurutulmasında Kullanılan Kurutma Yöntemleri. *Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi*, 5(1), 30–45. <https://doi.org/10.55257/ethabd.1096697>
- Güngör, A. (2013, April 17–20). Sebze ve meyve kurutmada kullanılan kurutucular ve kurutma teknolojileri [Conference presentation]. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye.
- Hasan, M. U., Malik, A. U., Ali, S., Imtiaz, A., Munir, A., Amjad, W., & Anwar, R. (2019). Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12), 1–15. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14280>
- Hashemi, S. J., & Nedamani, A. R. (2022). Combination of numerical simulation and RSM to study the process factors on orange slices shrinkage. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 5(1), 53–68. <https://doi.org/10.22077/jhpr.2021.4464.1225>
- Hegde, P., Agrawal, P., & Gupta, P. K. (2015). Isolation and optimization of polyphenols from the peels of orange fruit. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 8(3), 463–468.

- Hu, Q.-G., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Xiao, G.-N., & Sun, J.-C. (2006). Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 977–982. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.025>
- IFU. (2015). *Method of Analysis Determination of pH Value* (Vol. 11, Issue 11).
- IFU. (2017a). *Method of Analysis No. 08 (rev 2017) Determination of soluble solids* (Vol. 08, Issue 08).
- IFU. (2017b). *Method of Analysis No. 3 Titratable Acidity*. 3(3), 1–7.
- Indiarto, R., Hodizah Asyifaa, A., Citra Angiputri Adiningsih, F., Almira Aulia, G., & Rahmalia Achmad, S. (2021). Conventional And Advanced Food-Drying Technology: A Current Review Article in. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 10(01), 1. www.ijstr.org
- Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 08(02), 27–48. <https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003>
- Işık, Ö. (2008). Pastörizasyon sıcaklığının Kozan Yerlisi ve Hamlin portakallarından üretilen meyve sularının kalitesi üzerine etkisi [Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı]. Adana, Türkiye.
- Jiang, N., Liu, C., Li, D., Zhang, Z., Liu, C., Wang, D., Niu, L., & Zhang, M. (2017). Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption. *LWT - Food Science and Technology*, 82(May), 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.015>
- Kafa, G., Canihoş, E., Uzun, A., Turgutoğlu, E., Canan, İ., & Öztıp, A. (2010). Turunçgil Yetiştiriciliği. In G. Kafa & E. Canihoş (Eds.), *Önemli Turunçgil Tür Ve Çeşirleri* (1st ed., pp. 138–140). T.C. Tarım ve Köyşleri Bakanlığı Yayın Dairesi Bşk. Çiftçi Eğitim (YAYÇEP).
- Karaaslan, S., & Erdem, T. (2014). Mathematical Modelling of Orange Slices during Microwave, Convection, Combined Microwave and Convection Drying. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi-Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 1(2), 143–149.
- Kaynarca, G. B., & Aşkın, B. (2020). Portakal kabuğunun farklı yöntemlerle kurutulması ve bazı teknolojik özelliklerinin incelenmesi [Drying of orange peel with different methods and investigation of some technological properties]. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri*

- Enstitüsü Dergisi*, 10(4), 2604–2617. <https://doi.org/10.21597/jist.685821>
- Karacabey, E., Aktas, T., Taseri, L., & Uysal Seçkin, G. (2020). Examination of different drying methods in sultana seedless grapes in terms of drying kinetics, energy consumption and product quality. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 17(1), 53–65. <https://doi.org/10.33462/jotaf.578962>
- Kelebek, H., & Selli, S. (2011). Determination of volatile, phenolic, organic acid and sugar components in a Turkish cv. Dortyol (*Citrus sinensis* L. Osbeck) orange juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(10), 1855–1862. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4396>
- Kian-Pour, N., & Karatas, S. (2019). Impact of different geometric shapes on drying kinetics and textural characteristics of apples at temperatures above 100 °C. *Heat and Mass Transfer*, 55(12), 3721–3732. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02691-1>
- Kian-Pour, N. (2020). Fundamental Drying Techniques Applied in. *International Journal of Food Engineering Research (IJFER)*, 35(April 2020), 35–63. <https://doi.org/10.17932/IAU.IJFER.2015.003/ijfer>
- Kilic, M., Sahin, M., Hassan, A., & Ullah, A. (2024). Preservation of fruits through drying—A comprehensive review of experiments and modeling approaches. *Journal of Food Process Engineering*, 47(3), 1–24. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14568>
- Koç, B., & Kaymak-Ertekin, F. (2009). Response Surface Methodology and Food Processing Applications. *Gıda*, 20(3), 1–8.
- Kovacı, T., Dikmen, E., & Şencan Şahin, A. (2018). Kurutma Sistemleri, Enerji Tüketimleri ve Ürün Kalitesine Etkileri ve Örnek Sistem Tasarımı. *Teknik Bilimler Dergisi*, 8(2), 25–39.
- Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (2001). Structural properties of dehydrated products during rehydration. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(5), 529–538. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00483.x>
- Kruma, Z., Galoburda, R., Sabovics, M., Gramatina, I., Skudra, I., & Dabina-Bicka, I. (2011). Aroma composition of microwave vacuum dried dill (*Anethum graveolens* L.) stems. *Procedia Food Science*, 1, 1338–1343. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.198>
- Kutlu, N., İşci, A., & Demirkol, Ö. Ş. (2015). Gıdalarda İnce Tabaka Kurutma Modelleri. *Gıda*, 40(1), 39–46. <https://doi.org/10.15237/gida.GD14031>
- Lai, C., Liang, Y., Zhang, L., Huang, J., Kaliaperumal, K., Jiang, Y., & Zhang, J. (2022). Variations of bioactive phytochemicals and antioxidant capacity of navel orange peel in

- response to different drying methods. *Antioxidants*, 11(8), 1543.
<https://doi.org/10.3390/antiox11081543>
- Lei, Y., Chen, J., Zhang, Z., & Deng, X. (2022). Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. *Food Science and Technology (Campinas)*, 42, e37020. <https://doi.org/10.1590/fst.37020>
- Leusink, G. J., Kitts, D. D., Yaghmaee, P., & Durance, T. (2010). Retention of antioxidant capacity of vacuum-microwave-dried cranberries. *Journal of Food Science*, 75(3), C311–C316. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01563.x>
- Lewicki, P. P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science and Technology*, 17(4), 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.012>
- Li, Q., Pan, X., Fan, W., Zhou, Y., Liu, Y., Yu, W., ... Li, W. (2024). Drying kinetics and quality characteristics of *Exocarpium citreic grandis* slices with hot air, vacuum, and microwave vacuum dryers. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 24, 1363–1377. <https://doi.org/10.3233/JCM-247143>
- Li, X., Zhao, S., Ning, Z., Zeng, H., Shu, Y., Tao, O., Xiao, C., Lu, C., & Liu, Y. (2015). Citrus fruits as a treasure trove of active natural metabolites that potentially provide benefits for human health. *Chemistry Central Journal*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13065-015-0145-9>
- Lin, T. M., Durance, T. D., & Scaman, C. H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31(2), 111–117.
[https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(98\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(98)00070-2)
- Ma, G., Zhang, L., Sugiura, M., & Kato, M. (2020). Citrus and health. In *The Genus Citrus*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00024-3>
- Mamma, D., & Christakopoulos, P. (2014). Biotransformation of Citrus By-Products into Value Added Products. *Waste and Biomass Valorization*, 5(4), 529–549.
<https://doi.org/10.1007/s12649-013-9250-y>
- Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2007). Review: analysis of carotenoids in orange juice. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(7), 638–649.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2007.04.006>
- Mujumdar, A. S. (Ed.). (2006). *Principles, classification and selection of dryers*. In *Handbook of Industrial Drying* (3rd ed., Vol. I, pp. 1–29). CRC Press.
- Mujumdar, A. S., & Law, C. L. (2010). Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. *Food and Bioprocess Technology*, 3(6), 843–852.

- <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0353-1>
- Mugi, V. R., & Chandramohan, V. P. (2021). Shrinkage, effective diffusion coefficient, surface transfer coefficients and their factors during solar drying of food products – A review. *Solar Energy*, 229, 84–101. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.042>
- Muyonga, J. H., Natocho, J., Kigozi, J., Baidhe, E., & Nansereko, S. (2021). Drying behaviour and optimization of drying conditions of pineapple puree and slices using refractance window drying technology. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05302-2>
- Naczek, M., & Shahidi, F. (2004). Extraction and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A*, 1054, 95–111. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.08.059>
- Nahimana, H., & Zhang, M. (2011). Shrinkage and color change during microwave vacuum drying of carrot. *Drying Technology*, 29, 836–847. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.573753>
- New World Encyclopedia. (2021). Orange (fruit). In *New World Encyclopedia*. Retrieved May 12, 2021, from [https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Orange_\(fruit\)#Overview](https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Orange_(fruit)#Overview)
- Nieto, G., Fernández-lópez, J., Pérez-álvarez, J. A., Peñalver, R., Ros, G., & Viuda-martos, M. (2021). Valorization of citrus co-products: Recovery of bioactive compounds and application in meat and meat products. *Plants*, 10(6), 1–22. <https://doi.org/10.3390/plants10061069>
- Nowacka, M., Dadan, M., & Tylewicz, U. (2023). Drying Technologies in Food Processing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(19), 1–6. <https://doi.org/10.3390/app131910597>
- Nowacka, M., Matys, A., & Witrowa-Rajchert, D. (2024). Innovative Technologies for Improving the Sustainability of the Food Drying Industry. *Current Food Science and Technology Reports*, 2(2), 231–239. <https://doi.org/10.1007/s43555-024-00026-8>
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599–618. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2017). Color change kinetics and total carotenoid content of pumpkin as affected by drying temperature. *Italian Journal of Food Science*, 29(1), 1–18. <https://doi.org/10.14674/1120-1770>
- Orsat, V., Raghavan, G. S. V., & Krishnaswamy, K. (2017). Microwave technology for food

- processing: An overview of current and future applications. In *The Microwave Processing of Foods: Second Edition* (Second Edi). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00005-X>
- Özcan, P. D. M. (2020). Turunçgil Ve Çay Yetiştiriciliği Ders Notu. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü Samsun*, 105.
- Özcan-Sonor, G., Özkan-Karabacak, A., Tamer, C. E., & Çopur, D. U. (2019). The effect of hot air, vacuum and microwave drying on drying characteristics, rehydration capacity, color, total phenolic content and antioxidant capacity of kumquat (*Citrus japonica*). *Food Science and Technology (Campinas)*, 39(2), 475–484. <https://doi.org/10.1590/fst.34417>
- Pappas, C., Tsami, E., & Marinos-Kouris, D. (1999). The effect of process conditions on the drying kinetics and rehydration characteristics of some microwave-vacuum dehydrated fruits. *Drying Technology*, 17(1–2), 158–174.
<https://doi.org/10.1080/07373939908917523>
- Pehlivanoglu, H., & Aksoy, A. (2021, March 18–21). Meyve ve sebzelerin kurutulmasında uygulanan modern yöntemler [Novel methods applied in drying fruits and vegetables]. Paper presented at the 4th International Nowruz Conference on Scientific Research, Karabagh, Azerbaijan.
- Phuon, V., Ramos, I. N., Brandão, T. R. S., & Silva, C. L. M. (2022). Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, 45(7), e13794. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13794>
- Polatcı, H., & Tasova, M. (2020). Sicaklik Kontrollü Mikrodalga Kurut Geliştirilmesi Ve Portakal Kurutma Performansini Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 131–138. <https://doi.org/10.21923/jesd.502465>
- Pu, Y.-Y., Zhao, M., O'Donnell, C., & Sun, D.-W. (2018). Nondestructive quality evaluation of banana slices during microwave vacuum drying using spectral and imaging techniques. *Drying Technology*, 36(13), 1542–1553.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1415929>
- Rafiee, S., Sharifi, M., Keyhani, A., Omid, M., Jafari, A., Mohtasebi, S. S., & Mobli, H. (2010). Modeling effective moisture diffusivity of orange slice (Thompson Cv.). *International Journal of Food Properties*, 13(1), 32–40.
<https://doi.org/10.1080/10942910802144345>
- Raj, B., & Dash, K. K. (2020). Microwave vacuum drying of dragon fruit slice: Artificial neural network modelling, genetic algorithm optimization, and kinetics study. *Computers*

- and Electronics in Agriculture*, 178, 105814.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105814>
- Ratti, C. & Mujumdar, A. S. (2006). *Infrared drying*. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (3rd ed., s. 423–436). CRC Press.
- Razola-Díaz, M. d. C., Verardo, V., Gómez-Caravaca, A. M., García-Villanova, B., & Guerra-Hernández, E. J. (2023). Mathematical modelling of convective drying of orange by-product and its influence on phenolic compounds and ascorbic acid content, and its antioxidant activity. *Foods*, 12, 500. <https://doi.org/10.3390/foods12030500>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Roppolo, P., Culmone, A., Passafiume, R., Pirrone, A., Tinebra, I., Gugino, I., Monte, M., Naselli, V., Francesca, N., Gaglio, R., Pasquale, C. De, Todaro, A., & Farina, V. (2025). *Effect of Hot Air-Drying Technique on the Quality and Stability of Blood Orange Slices in Modified Atmosphere Packaging*. 1–18.
- Roussos, P. A. (2016). Orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). In *Nutritional Composition of Fruit Cultivars* (pp. 469–496). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00020-9>
- Ruíz Díaz, G., Martínez-Monzó, J., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4(2), 203–209. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(03\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00016-X)
- S.Ladaniya, M. (2008). Fruit Biochemistry. In *Citrus Fruit: Biology, Technology and Evaluation* (pp. 127–178). Elsevier Inc.
- Sabarez, H. T. (2015). Modelling of drying processes for food materials. In *Modeling Food Processing Operations*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-284-6.00004-0>
- Sagar, V. R., & Suresh Kumar, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(1), 15–26. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0010-8>
- Sari, M., Sonmez, N. K., & Kurklu, A. (2005). Determination of seasonal variations in solar energy utilization by the leaves of Washington navel orange trees (*Citrus sinensis* L.

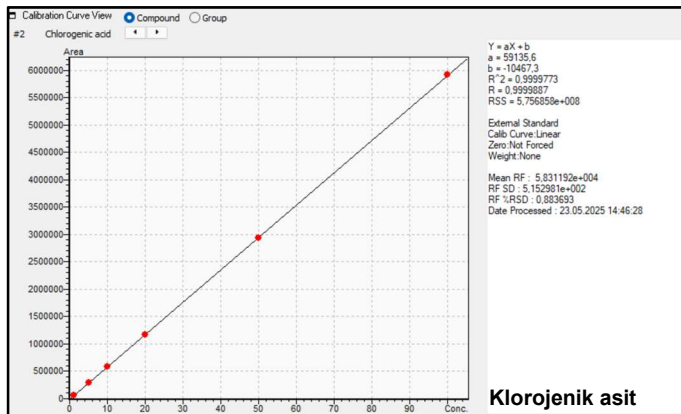
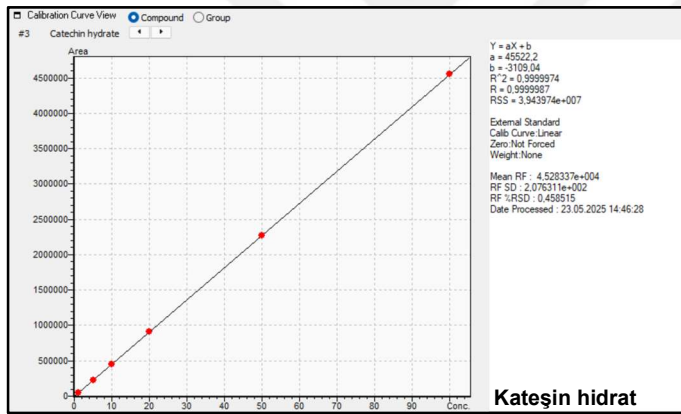
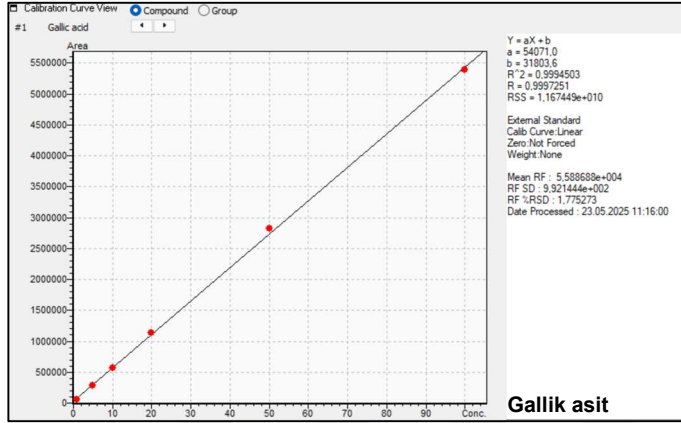
- Osbeck). *International Journal of Remote Sensing*, 26(15), 3295–3307.
<https://doi.org/10.1080/01431160500104137>
- Scaman, C. H., Durance, T. D., Drummond, L., & Sun, D.-W. (2014). Combined Microwave Vacuum Drying. *Emerging Technologies for Food Processing*, 427–445.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-411479-1.00023-1>
- Schiffmann, R. F. (2006). *Microwave and dielectric drying*. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (3rd ed., s. 286–307). Taylor & Francis Group.
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects - A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 820–897. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.018>
- Sham, P. W. Y., Scaman, C. H., & Durance, T. D. (2001). Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety. *Journal of Food Science*, 66(9), 1341–1347.
- Shukla, S., Tripathi, M., & Kumar, A. (2018). Effects of combined osmotic drying methods on quality characteristics of orange slice. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 4(6), 350–356. Retrieved from
- Süfer, Ö. (2018). *Nar tanelerinin mikrodalga-vakum kurutma tekniği kullanılarak kurutulması işleminin incelenmesi* [Yayımlanmamış doktora tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Mersin, Türkiye.
- Süfer, Ö., Çalışkan Koç, G., Öztekin, S., Özkan Karabacak, A., Su, D., Wang, D., Eroğlu, S., Durgut Malçok, S., Uslu, Ü. H., Adal, S., Jeevarathinam, G., Ramniwas, S., Rustagi, S., & Pandiselvam, R. (2024). Evaluation of the Effect of Sustainable Drying Techniques and Intensification Technologies on Color Profile of Dehydrated Fruits and Vegetables. In *Food and Bioprocess Technology* (Issue 0123456789).
<https://doi.org/10.1007/s11947-024-03599-3>
- Tan, G. (2020). Gıda endüstrisinde kullanılan kurutma sistemleri [Drying systems used in the food industry]. TMMOB Gıda Mühendisleri Odası.
- Tekgül, Y., & Baysal, T. (2019). Optimization of process conditions for vacuum microwave drying of lemon peel by response surface methodology: Quality characteristics and volatile compounds. *Journal of Food Process Engineering*, 42, e13080.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13080>
- Tetra Pak. (2004). The Orange Book. In *Tetra Pak Processing Systems AB SE-221 86 Lund, Sweden*. www.tetrapak.com (Issue 1).

- Tetra Pak. (2021). *The Orange Fruit and It's products*. Orange Book. Retrieved May 12, 2021, from <https://orangebook.tetrapak.com/chapter/orange-fruit-and-its-products>
- Therdthai, N., & Zhou, W. (2009). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*, 91(3), 482–489. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.09.031>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Effects of different drying methods on the physicochemical properties of pomegranate leather (pestil). *LWT – Food Science and Technology*, 80, 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.035>
- Topuz, A., Topakci, M., Canakci, M., Akinci, I., & Ozdemir, F. (2005). Physical and nutritional properties of four orange varieties. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 519–523. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.024>
- TUİK. (2020). *Meyve ürünleri , içecek ve baharat bitkileri üretim miktarları , 2020*.
- TUİK. (2024). *Meyve ürünleri , içecek ve baharat bitkileri üretim miktarları , 2024*.
- Tuncer, A. D., Güler, H. O., & Usta, H. (2020). Pomelo (*Citrus Maxima*) Kabuğu Kuruma Karakteristiğinin Modellenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, January*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.616497>
- Vega-Mercado, H., Marcela Góngora-Nieto, M., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 271–289. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00224-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00224-7)
- Yin, X., Jiao, S., Sun, Z., Qiu, G., Tu, K., Peng, J., & Pan, L. (2019). Two-step drying based on air jet impingement and microwave vacuum for apple slices. *Journal of Food Process Engineering*, 42, e13142. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13142>
- Wang, S., Yang, C., Tu, H., Zhou, J., Liu, X., Cheng, Y., Luo, J., Deng, X., Zhang, H., & Xu, J. (2017). Characterization and Metabolic Diversity of Flavonoids in Citrus Species. *Scientific Reports*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10970-2>
- Wardhani, N. S. K., Amanda, N., & Sari, A. R. (2022). Microwave Vacuum Drying on Fruit: A Review. *Proceedings of the 2nd International Conference on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021)*, 19(ICoSIA 2021), 309–316. <https://doi.org/10.2991/absr.k.220305.047>
- Wojdyło, A., Figiel, A., Lech, K., Nowicka, P., & Oszmiański, J. (2014). Effect of convective and vacuum–microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 829–841. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1130-8>

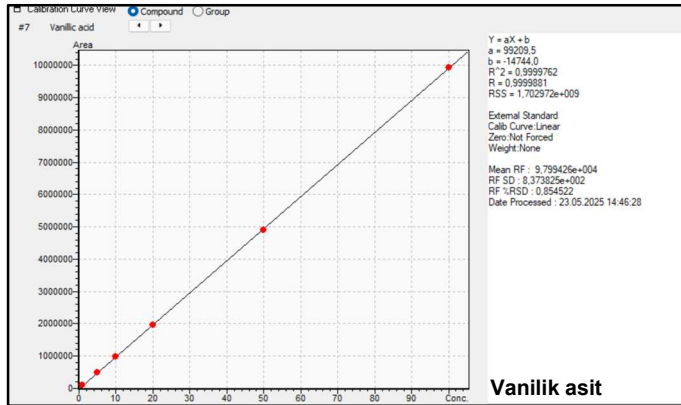
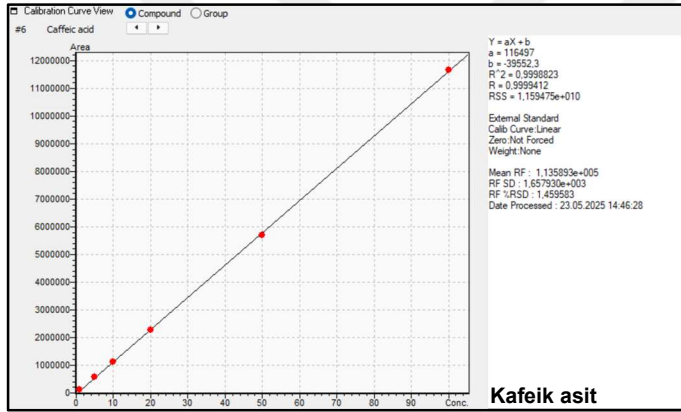
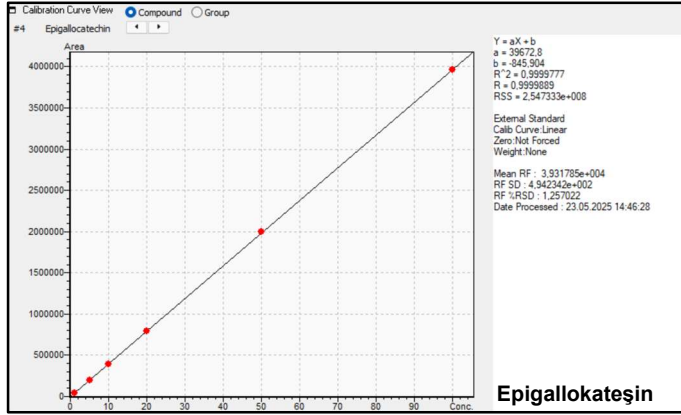
- Wu, G. A., Terol, J., Ibanez, V., López-García, A., Pérez-Román, E., Borredá, C., Domingo, C., Tadeo, F. R., Carbonell-Caballero, J., Alonso, R., Curk, F., Du, D., Ollitrault, P., Roose, M. L., Dopazo, J., Gmitter, F. G., Rokhsar, D. S., & Talon, M. (2018). Genomics of the origin and evolution of Citrus. *Nature*, 554(7692), 311–316. <https://doi.org/10.1038/nature25447>
- Xu, Q., Chen, L. L., Ruan, X., Chen, D., Zhu, A., Chen, C., Bertrand, D., Jiao, W. B., Hao, B. H., Lyon, M. P., Chen, J., Gao, S., Xing, F., Lan, H., Chang, J. W., Ge, X., Lei, Y., Hu, Q., Miao, Y., ... Ruan, Y. (2013). The draft genome of sweet orange (*Citrus sinensis*). *Nature Genetics*, 45(1), 59–66. <https://doi.org/10.1038/ng.2472>
- Xu, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Zhou, L.-Q., & Sun, J.-C. (2004). Studies on hot air and microwave vacuum drying of wild cabbage. *Drying Technology*, 22(9), 2201–2209. <https://doi.org/10.1081/LDRT-200034275>
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S., & Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 17(10), 524–534. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.011>
- Zhao, Y., Zhu, H., Xu, J., Zhuang, W., Zheng, B., Lo, Y. M., Huang, Z., & Tian, Y. (2021). Microwave vacuum drying of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds: Effects of ultrasonic pretreatment on color, antioxidant activity, and rehydration capacity. *LWT – Food Science and Technology*, 149, 111603. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111603>
- Zhou, Y.-H., Staniszewska, I., Liu, Z.-L., Zielinska, D., Xiao, H.-W., Pan, Z., Nowak, K. W., & Zielinska, M. (2021). Microwave-vacuum-assisted drying of pretreated cranberries: Drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*, 146, 111464. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111464>

EKLER

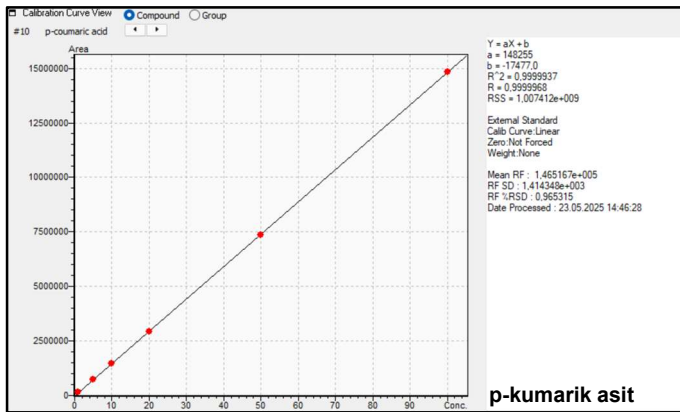
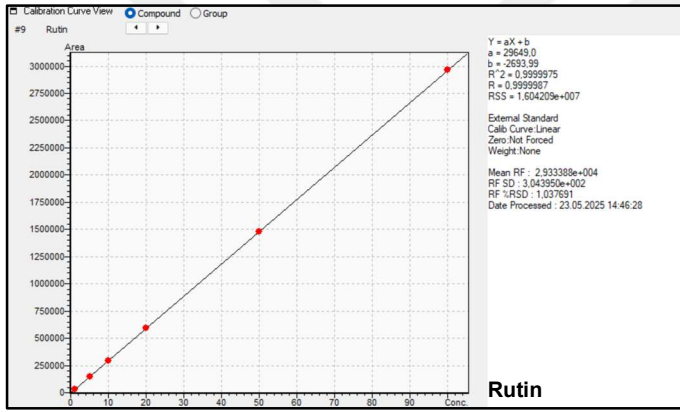
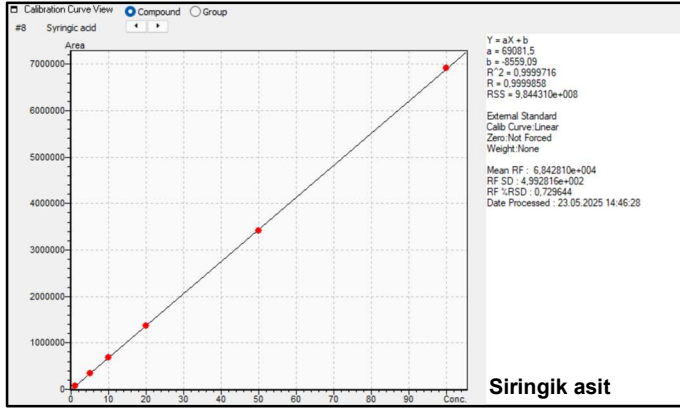
Ek A. Fenolik bileşenler kalibrasyon eğrileri



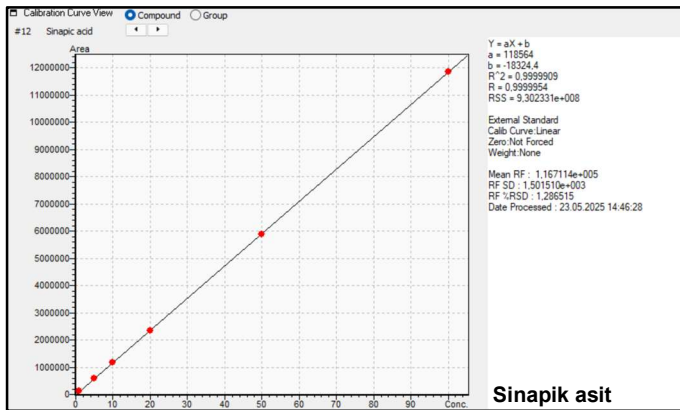
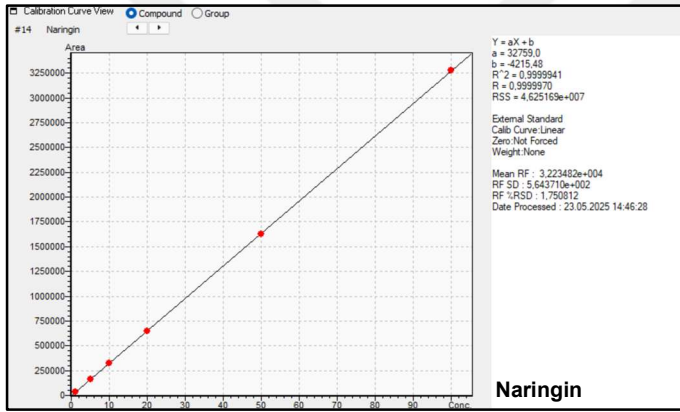
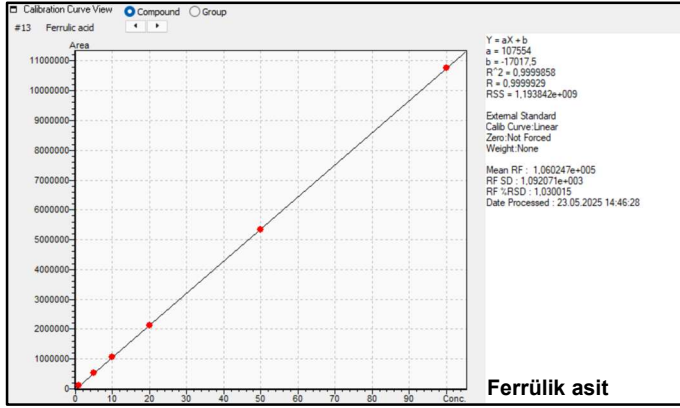
Ek A (devamı). Fenolik bileşenler kalibrasyon eğrileri



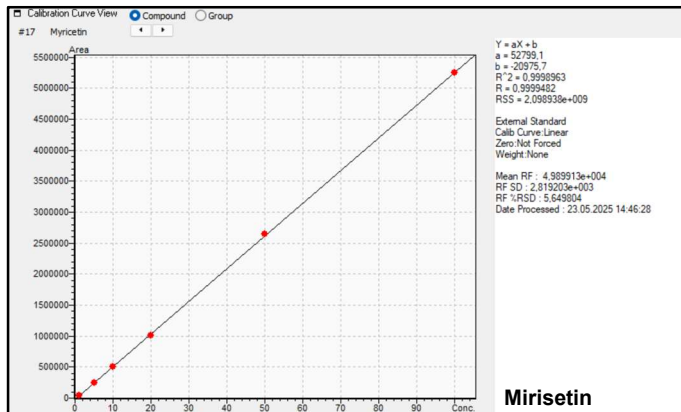
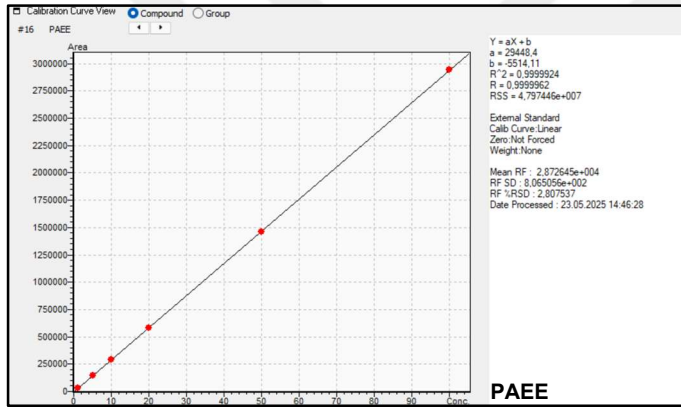
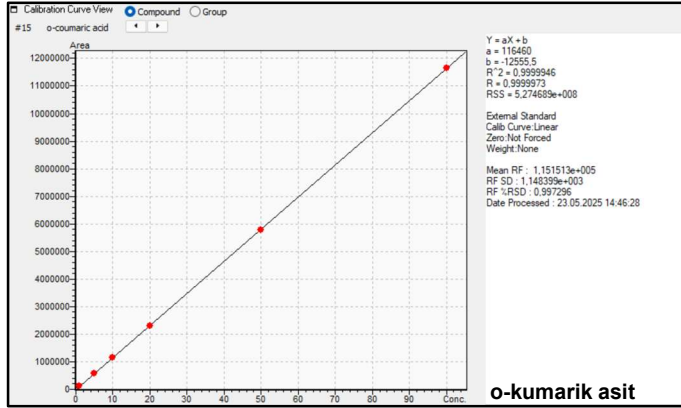
Ek A (devamı). Fenolik bileşenler kalibrasyon eğrileri



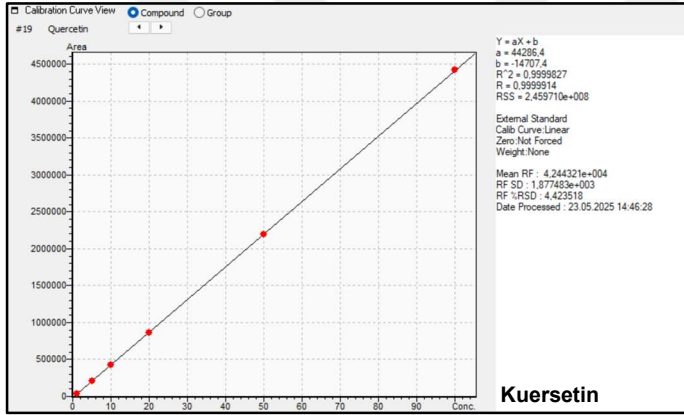
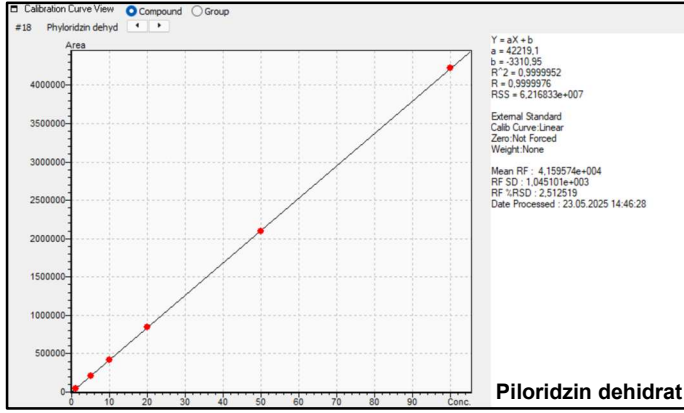
Ek A (devamı). Fenolik bileşenler kalibrasyon eğrileri



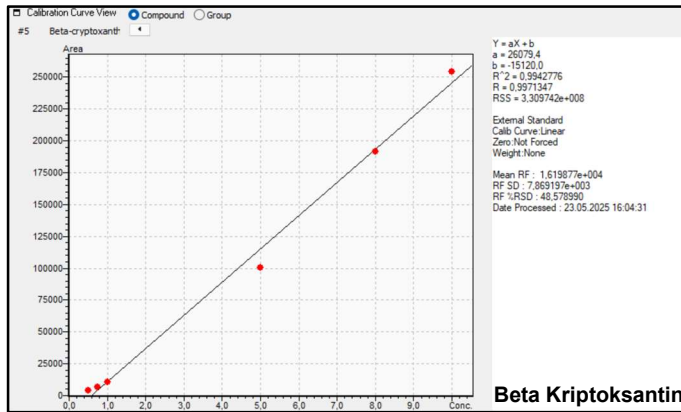
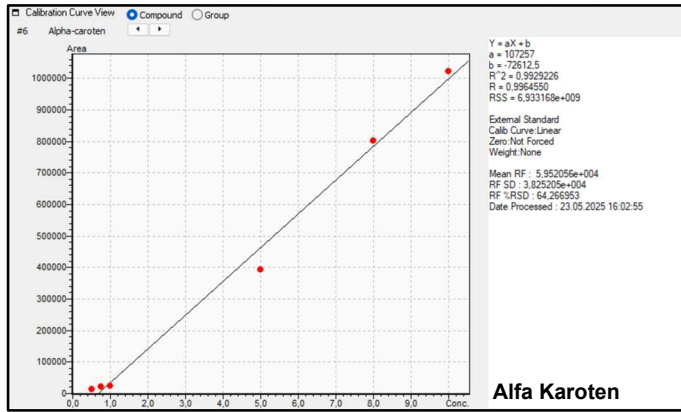
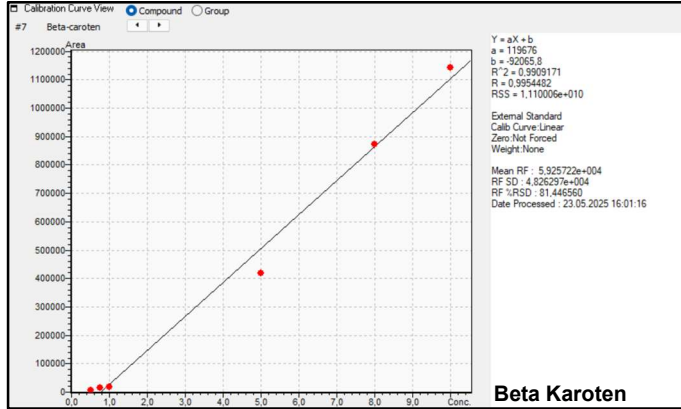
Ek A (devamı). Fenolik bileşenler kalibrasyon eğrileri



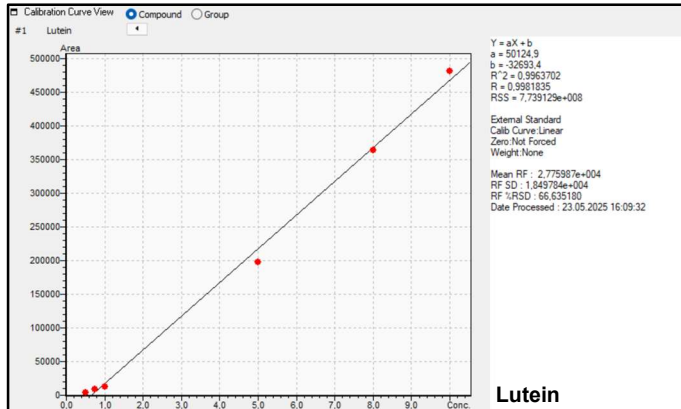
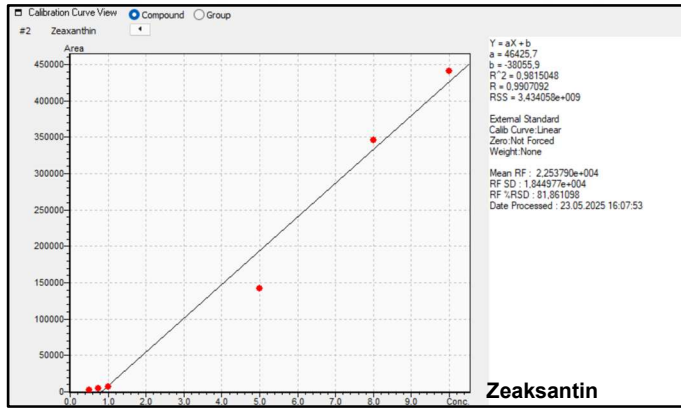
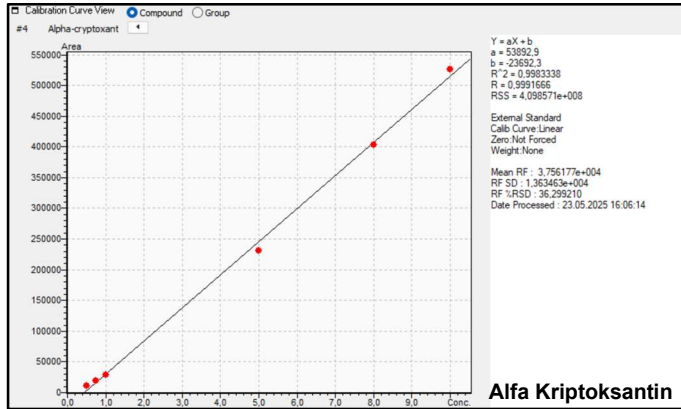
Ek A (devamı). Fenolik bileşenler kalibrasyon eğrileri



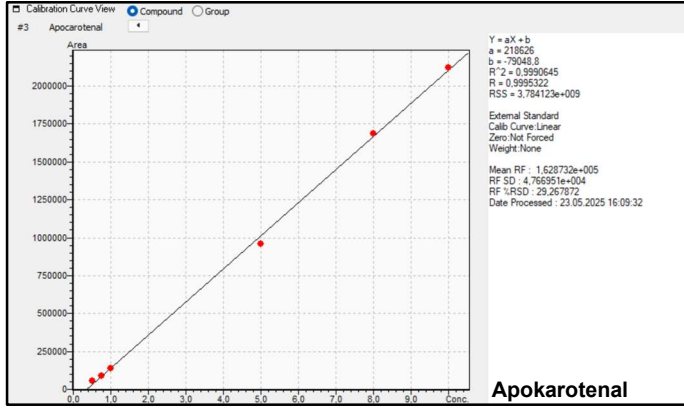
Ek B. Karotenoid bileşenler kalibrasyon eğrisi



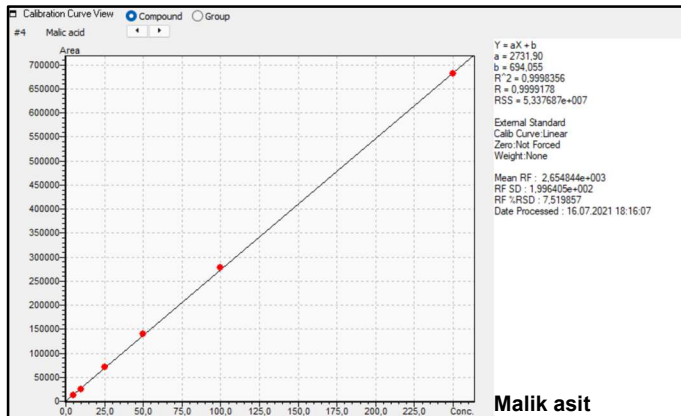
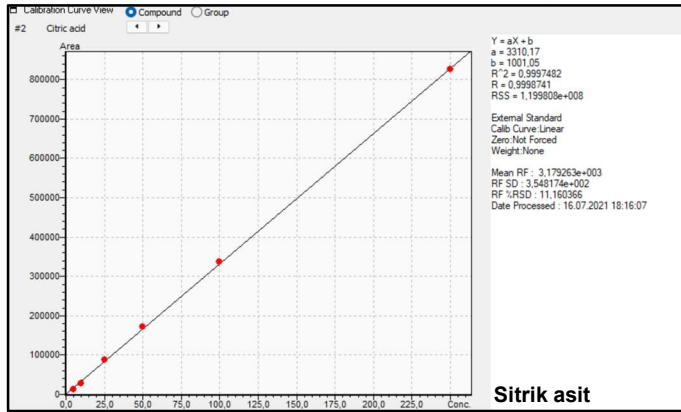
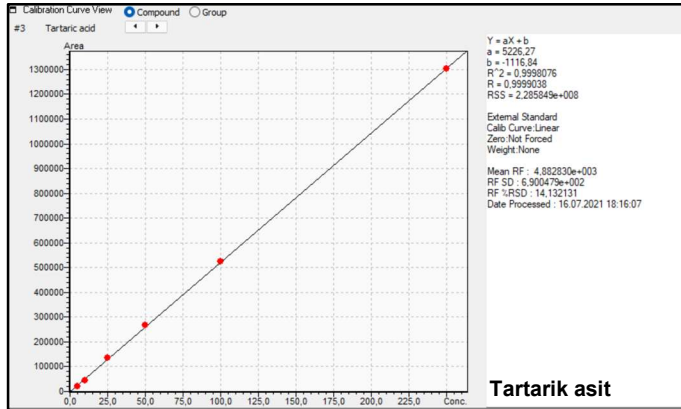
Ek B (devamı). Karotenoid bileşenler kalibrasyon eğrisi



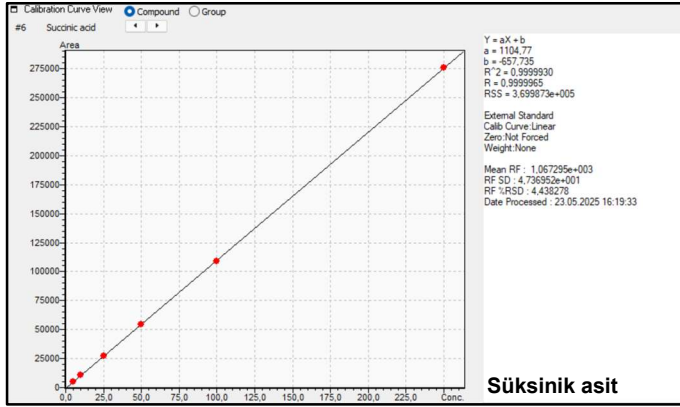
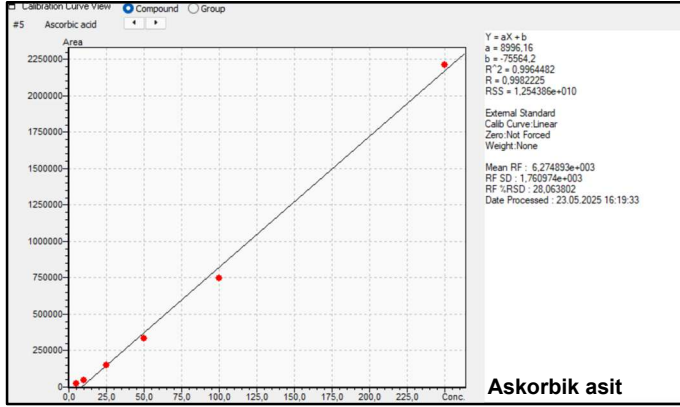
Ek B (devamı). Karotenoid bileşenler kalibrasyon eğrisi



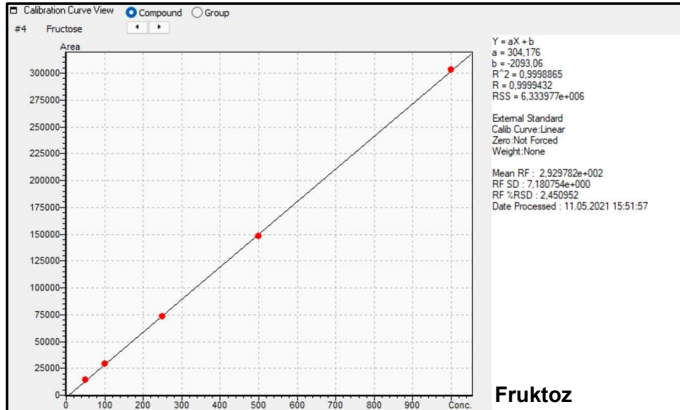
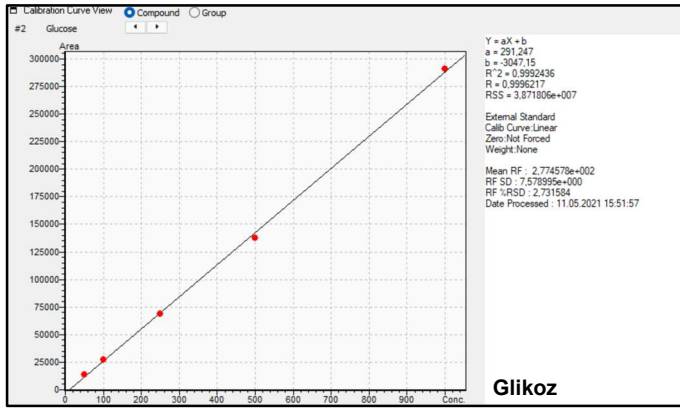
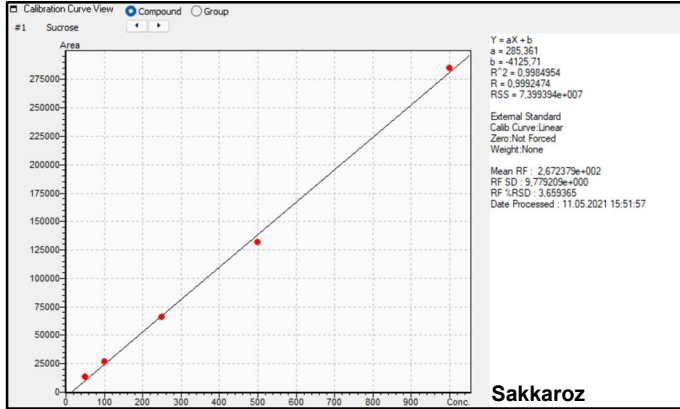
Ek C. Organik asit kalibrasyon eğrisi



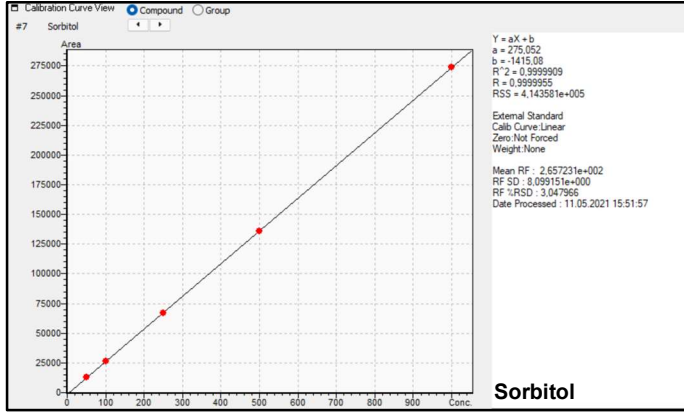
Ek C. Organik asit kalibrasyon eğrisi



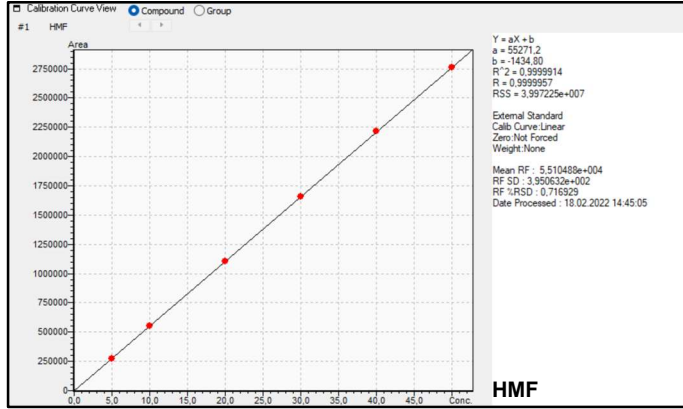
Ek D. Şeker içeriği kalibrasyon eğrisi



Ek D (devamı). Şeker içeriği kalibrasyon eğrisi



Ek E. Hidroksimetil Furfural (HMF) kalibrasyon eğrisi



Ek F. Washington Navel Vakum mikrodalga ve tepsili kurutuculardaki kurutma proseslerinin optimizasyonuna ait istatistiksel analiz sonuçları

Vakum Mikrodalga Kurutucu

→ T-Test

[DataSet2] C:\Users\Neslihan\Downloads\wn-vm kurutma hızı.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Kurutma_hızı	3	11,9888	,37872	,21865

One-Sample Test

Test Value = 12.0423

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Kurutma_hızı	-,245	2	,830	-,05347	-,9943	,8873

One-Sample Effect Sizes

	Standardizer ^a	Point Estimate	95% Confidence Interval	
			Lower	Upper
Kurutma_hızı	Cohen's d	,37872	-,141	1,013
	Hedges' correction	,67127	-,080	,572

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

Ek F (devamı).

T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Rehidrasyon_kapasitesi	3	4,7357	,10488	,06055

One-Sample Test

Test Value = 4.68499

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Rehidrasyon_kapasitesi	,837	2	,491	,05068	-,2099	,3112

One-Sample Effect Sizes

		Standardizer ^a	Point Estimate	95% Confidence Interval	
				Lower	Upper
Rehidrasyon_kapasitesi	Cohen's d	,10488	,483	-,777	1,651
	Hedges' correction	,18590	,273	-,438	,931

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

T-TEST

```

/TESTVAL=4.68499
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Rehidrasyon_kapasitesi
/ES DISPLAY(TRUE)
/CRITERIA=CI(.95).

```

Ek F (devamı).

→ T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
b_degeri	3	43,7667	,36019	,20795

One-Sample Test

Test Value = 44.3262

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
b_degeri	-2,691	2	,115	-,55953	-1,4543	,3352

One-Sample Effect Sizes

		Standardizer ^a	Point Estimate	95% Confidence Interval	
				Lower	Upper
b_degeri	Cohen's d	,36019	-1,553	-3,314	,289
	Hedges' correction	,63841	-,876	-1,870	,163

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

Ek F (devamı).

Tepsili Kurutucu

T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Kurutma_hizi	3	2,3606	,02679	,01547

One-Sample Test

Test Value = 2.38778

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Kurutma_hizi	-1,760	2	,221	-,02721	-,0938	,0393

One-Sample Effect Sizes

			Point Estimate	95% Confidence Interval	
Standardizer ^a				Lower	Upper
Kurutma_hizi	Cohen's d	,02679	-1,016	-2,417	,502
	Hedges' correction	,04748	-,573	-1,364	,283

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

T-TEST

```
/TESTVAL=37.3566  
/MISSING=ANALYSIS  
/VARIABLES=b_değeri  
/ES_DISPLAY(TRUE)  
/CRITERIA=CI(.95).
```

Ek F (devamı).

T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Rehidrasyon_kapasitesi	3	4,5657	,15829	,09139

One-Sample Test

Test Value = 4.68499

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Rehidrasyon_kapasitesi	-1,306	2	,322	-,11932	-,5125	,2739

One-Sample Effect Sizes

	Standardizer ^a	Point Estimate	95% Confidence Interval	
			Lower	Upper
Rehidrasyon_kapasitesi	Cohen's d	,15829	-,754	,626
	Hedges' correction	,28057	-,425	,353

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

T-TEST

```

/TESTVAL=2.38778
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Kurutma_hizi
/ES DISPLAY(TRUE)
/CRITERIA=CI(.95).

```

Ek F (devamı).

→ T-Test

[DataSet0]

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
b_değeri	3	40,1167	2,16694	1,25108

One-Sample Test

Test Value = 37.3566

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
b_değeri	2,206	2	,158	2,76007	-2,6229	8,1430

One-Sample Effect Sizes

			Point Estimate	95% Confidence Interval	
				Lower	Upper
b_değeri	Cohen's d	2,16694	1,274	-,394	2,837
	Hedges' correction	3,84080	,719	-,222	1,601

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

Ek G. Valencia Vakum mikrodalga ve tepsili kurutuculardaki kurutma proseslerinin optimizasyonuna ait istatistiksel analiz sonuçları

Vakum mikrodalga kurutucu

T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Kurutma_hızı	3	10,5053	,42015	,24257

One-Sample Test

Test Value = 10.4962

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Kurutma_hızı	,038	2	,973	,00910	-1,0346	1,0528

One-Sample Effect Sizes

			Point Estimate	95% Confidence Interval	
Standardizer ^a				Lower	Upper
Kurutma_hızı	Cohen's d	,42015	,022	-1,113	1,151
	Hedges' correction	,74470	,012	-,628	,649

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

T-TEST

```
/TESTVAL=35.733
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=b_değeri
/ES_DISPLAY(TRUE)
/CRITERIA=CI(.95).
```

Ek G (devamı).

T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Rehidrasyon_kapasitesi	3	4,4800	,17294	,09985

One-Sample Test

Test Value = 4,74923

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Rehidrasyon_kapasitesi	-2,696	2	,114	-,26923	-,6988	,1604

One-Sample Effect Sizes

		Standardizer ^a	Point Estimate	95% Confidence Interval	
				Lower	Upper
Rehidrasyon_kapasitesi	Cohen's d	,17294	-1,557	-3,320	,288
	Hedges' correction	,30653	-,878	-1,873	,163

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

Ek G (devamı).

→ T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
b_değeri	3	35,8200	,62952	,36346

One-Sample Test

Test Value = 35.733

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
b_değeri	,239	2	,833	,08700	-1,4768	1,6508

One-Sample Effect Sizes

			Point Estimate	95% Confidence Interval	
Standardizer ^a				Lower	Upper
b_değeri	Cohen's d	,62952	,138	-1,016	1,261
	Hedges' correction	1,11580	,078	-,573	,712

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

Ek G (devamı).

Tepsili kurutucu

➔ T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Kurutma_hızı	3	2,7251	,00348	,00201

One-Sample Test

Test Value = 2.74902

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Kurutma_hızı	-11,915	2	,007	-,02392	-,0326	-,0153

One-Sample Effect Sizes

		Standardizer ^a	Point Estimate	95% Confidence Interval	
				Lower	Upper
Kurutma_hızı	Cohen's d	,00348	-6,879	-13,293	-,941
	Hedges' correction	,00616	-3,881	-7,500	-,531

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

Ek G (devamı).

➔ T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Rehidrasyon_kapasitesi	3	4,6307	,06850	,03955

One-Sample Test

Test Value = 4.73703

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Rehidrasyon_kapasitesi	-2,689	2	,115	-,10636	-,2765	,0638

One-Sample Effect Sizes

		Standardizer ^a	Point Estimate	95% Confidence Interval	
				Lower	Upper
Rehidrasyon_kapasitesi	Cohen's d	,06850	-1,553	-3,313	,290
	Hedges' correction	,12141	-,876	-1,869	,163

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

Ek G (devamı).

► T-Test

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
a_değeri	3	3,0000	,36056	,20817

One-Sample Test

Test Value = 3.01787

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
a_değeri	-,086	2	,939	-,01787	-,9135	,8778

One-Sample Effect Sizes

		Standardizer ^a	Point Estimate	95% Confidence Interval	
				Lower	Upper
a_değeri	Cohen's d	,36056	-,050	-1,176	1,089
	Hedges' correction	,63907	-,028	-,664	,614

a. The denominator used in estimating the effect sizes.

Cohen's d uses the sample standard deviation.

Hedges' correction uses the sample standard deviation, plus a correction factor.

Ek H. Washington Navel ve Valencia Vakum mikrodalga ve tepsili kurutuculardaki kurutma proseslerinin kalite parametreleri üzerine etkisine ait istatistiksel analiz sonuçları

1. Washington Navel independent T-test

→ T-Test

[DataSet1] C:\Users\Neslihan\Desktop\Tezim\4022025\Analiz Sonuçları\spss\wn veri tablosu.sav

	Gruplar	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Nem	1	9	6,92646	,343531	,114510
	2	9	5,25331	,999442	,333147
Su_aktivitesi	1	9	,41944	,021086	,007029
	2	9	,27987	,075880	,025293
Rehidrasyon_kapasitesi	1	9	4,63911	,187694	,062565
	2	9	4,45425	,177249	,059083
Delta_e	1	9	27,42403	,693245	,231082
	2	9	29,36896	,519905	,173302
Delta_c	1	9	3,85482	1,045945	,348648
	2	9	11,96280	1,231317	,410439
HMF	1	9	14,11952	2,275772	,758591
	2	9	36,80708	1,196199	,398733

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Nem	Equal variances assumed	20,713	<,001	4,750	16	<,001	1,673149	,352278	,926353	2,419944
	Equal variances not assumed			4,750	9,864	<,001	1,673149	,352278	,886759	2,459539
Su_aktivitesi	Equal variances assumed	11,353	,004	5,317	16	<,001	,139568	,026252	,083917	,195220
	Equal variances not assumed			5,317	9,228	<,001	,139568	,026252	,080406	,198731
Rehidrasyon_kapasitesi	Equal variances assumed	,023	,881	2,148	16	,047	,184857	,086053	,002433	,367281
	Equal variances not assumed			2,148	15,948	,047	,184857	,086053	,002384	,367330
Delta_e	Equal variances assumed	,526	,479	-6,733	16	<,001	-1,944928	,288846	-2,557255	-1,332601
	Equal variances not assumed			-6,733	14,836	<,001	-1,944928	,288846	-2,561181	-1,328675
Delta_c	Equal variances assumed	,642	,435	-15,056	16	<,001	-8,107982	,538531	-9,249617	-6,966347
	Equal variances not assumed			-15,056	15,592	<,001	-8,107982	,538531	-9,252049	-6,963916
HMF	Equal variances assumed	3,558	,078	-26,473	16	<,001	-22,687562	,856999	-24,504320	-20,870805
	Equal variances not assumed			-26,473	12,107	<,001	-22,687562	,856999	-24,552975	-20,822149

Ek H (devamı).

2. Valencia independent T-test

T-Test

[DataSet1]

Group Statistics

	Gruplar	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Rehidrasyon_kapasitesi	1	9	4,70348	,176907	,058969
	2	9	4,56782	,135754	,045251
Su_aktivitesi	1	9	,31525	,040317	,013439
	2	9	,30028	,019963	,006654
Delta_e	1	9	29,15828	,535991	,178664
	2	9	31,57547	,942838	,314279
Delta_c	1	9	6,58801	,658529	,219510
	2	9	13,69791	,627035	,209012
HMF	1	9	9,75499	,193960	,064653
	2	9	40,88132	1,036405	,345468
Nem	1	9	7,82834	1,264871	,421624
	2	9	6,07704	,864242	,288081

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
Rehidrasyon_kapasitesi	Equal variances assumed	,605	,448	1,825	16	,087	,135663	,074330	-,021911	,293236
	Equal variances not assumed			1,825	14,996	,088	,135663	,074330	-,022773	,294098
Su_aktivitesi	Equal variances assumed	10,142	,006	,998	16	,333	,014974	,014996	-,016817	,046764
	Equal variances not assumed			,998	11,700	,338	,014974	,014996	-,017793	,047740
Delta_e	Equal variances assumed	2,582	,128	-6,686	16	<,001	-2,417188	,361514	-3,183562	-1,650813
	Equal variances not assumed			-6,686	12,682	<,001	-2,417188	,361514	-3,200187	-1,634188
Delta_c	Equal variances assumed	,006	,941	-23,457	16	<,001	-7,109902	,303101	-7,752448	-6,467356
	Equal variances not assumed			-23,457	15,962	<,001	-7,109902	,303101	-7,752573	-6,467230
HMF	Equal variances assumed	11,685	,004	-88,561	16	<,001	-31,126333	,351466	-31,871408	-30,381258
	Equal variances not assumed			-88,561	8,560	<,001	-31,126333	,351466	-31,927683	-30,324983
Nem	Equal variances assumed	2,276	,151	3,430	16	,003	1,751302	,510644	,668786	2,833818
	Equal variances not assumed			3,430	14,133	,004	1,751302	,510644	,657046	2,845558

Ek H (devamı).

3. Washington Navel-Valencia one way ANOVA test

```
ONEWAY Su_aktivitesi Rehidrasyon_kapasitesi Delta_e Delta_c HMF BY Gruplar
/STATISTICS DESCRIPTIVES HOMOGENEITY
/MISSING ANALYSIS
/CRITERIA=CILEVEL(0.95)
/POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
```

► Oneway

Descriptives									
		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
Su_aktivitesi	1	9	,41944	,021086	,007029	,40323	,43564	,400	,449
	2	9	,27987	,075880	,025293	,22154	,33820	,187	,389
	4	9	,31525	,040317	,013439	,28426	,34624	,259	,355
	5	9	,30028	,019963	,006654	,28494	,31563	,276	,341
	Total	36	,32871	,069748	,011625	,30511	,35231	,187	,449
Rehidrasyon_kapasitesi	1	9	4,63911	,187694	,062565	4,49483	4,78338	4,421	4,971
	2	9	4,45425	,177249	,059083	4,31801	4,59050	4,183	4,680
	4	9	4,70348	,176907	,058969	4,56750	4,83947	4,516	5,031
	5	9	4,56782	,135754	,045251	4,46347	4,67217	4,351	4,734
	Total	36	4,59117	,188134	,031356	4,52751	4,65482	4,183	5,031
Delta_e	1	9	27,42403	,693245	,231082	26,89115	27,95690	26,100	28,278
	2	9	29,36896	,519905	,173302	28,96932	29,76859	28,547	30,021
	4	9	29,15828	,535991	,178664	28,74628	29,57028	28,147	29,889
	5	9	31,57547	,942838	,314279	30,85074	32,30019	29,824	32,648
	Total	36	29,38168	1,635966	,272661	28,82815	29,93521	26,100	32,648
Delta_c	1	9	3,85482	1,045945	,348648	3,05083	4,65880	2,535	5,910
	2	9	11,96280	1,231317	,410439	11,01633	12,90927	10,624	13,717
	4	9	6,58801	,658529	,219510	6,08182	7,09420	5,435	7,258
	5	9	13,69791	,627035	,209012	13,21593	14,17990	12,952	14,805
	Total	36	9,02589	4,125614	,687602	7,62998	10,42179	2,535	14,805
HMF	1	9	14,11952	2,275772	,758591	12,37021	15,86883	12,218	18,419
	2	9	36,80708	1,196199	,398733	35,88760	37,72656	34,484	37,993
	4	9	9,75499	,193960	,064653	9,60590	9,90408	9,541	10,077
	5	9	40,88132	1,036405	,345468	40,08467	41,67797	39,302	42,223
	Total	36	25,39073	13,875001	2,312500	20,69610	30,08535	9,541	42,223

Ek H (devamı).

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Su_aktivitesi	Between Groups	,104	3	,035	16,930	<,001
	Within Groups	,066	32	,002		
	Total	,170	35			
Rehidrasyon_kapasitesi	Between Groups	,308	3	,103	3,527	,026
	Within Groups	,931	32	,029		
	Total	1,239	35			
Delta_e	Between Groups	78,257	3	26,086	54,144	<,001
	Within Groups	15,417	32	,482		
	Total	93,673	35			
Delta_c	Between Groups	568,228	3	189,409	220,437	<,001
	Within Groups	27,496	32	,859		
	Total	595,724	35			
HMF	Between Groups	6676,273	3	2225,424	1152,803	<,001
	Within Groups	61,774	32	1,930		
	Total	6738,047	35			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

Su_aktivitesi

Duncan^a

		Subset for alpha = 0.05	
Gruplar	N	1	2
2	9	,27987	
5	9	,30028	
4	9	,31525	
1	9		,41944
Sig.		,127	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,000.

Rehidrasyon_kapasitesi

Duncan^a

		Subset for alpha = 0.05	
Gruplar	N	1	2
2	9	4,45425	
5	9	4,56782	4,56782
1	9		4,63911
4	9		4,70348
Sig.		,167	,120

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,000.

Ek H (devamı).

Delta_e

Duncan^a

Gruplar	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
1	9	27,42403		
4	9		29,15828	
2	9		29,36896	
5	9			31,57547
Sig.		1,000	,524	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,000.

Delta_c

Duncan^a

Gruplar	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
1	9	3,85482			
4	9		6,58801		
2	9			11,96280	
5	9				13,69791
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,000.

HMF

Duncan^a

Gruplar	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
4	9	9,75499			
1	9		14,11952		
2	9			36,80708	
5	9				40,88132
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,000.

4. Washington Navel-Valencia one way ANOVA test

Ek I. Kurutma Metotlarının Nem Difüzyon Katsayısı (D_{eff}) üzerine etkisine ait istatistiksel analiz sonuçları

➔ Oneway

[DataSet1]

Descriptives

DEF

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
1	3	.0000000008	.0000000000	.0000000000	.0000000008	.0000000009	.0000000008	.0000000009
2	3	.0000000001	.0000000000	.0000000000	.0000000001	.0000000002	.0000000001	.0000000002
3	3	.0000000011	.0000000001	.0000000001	.0000000008	.0000000013	.0000000010	.0000000012
4	3	.0000000001	.0000000000	.0000000000	.0000000001	.0000000002	.0000000001	.0000000002
Total	12	.0000000006	.0000000004	.0000000001	.0000000003	.0000000008	.0000000001	.0000000012

Tests of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
DEF	Based on Mean	3,130	3	8	,087
	Based on Median	1,600	3	8	,264
	Based on Median and with adjusted df	1,600	3	3,846	,327
	Based on trimmed mean	3,025	3	8	,094

ANOVA

DEF

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,000	3	,000	223,315	<,001
Within Groups	,000	8	,000		
Total	,000	11			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

DEF

Duncan^a

		Subset for alpha = 0.05		
Gruplar	N	1	2	3
2	3	.0000000001		
4	3	.0000000001		
1	3		.0000000008	
3	3			.0000000011
Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3,000.