

**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**ELMA DİLİMLERİNİN VAKUM İMPREGNASYON
ÖN İŞLEMİ SONRASI OHMİK ISITMA YÖNTEMİ
İLE KURUTULMASI**

Tuğba YAMAN

Danışman: Prof. Dr. Yusuf YILMAZ

BURDUR, 2025

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca **Doktora Tezi** olarak sunduğum “**Elma Dilimlerinin Vakum İmpregnasyon Ön İşlemi Sonrası Ohmik Isıtma Yöntemi İle Kurutulması**” başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,

bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

03/07/2025

(İmza)

Tuğba YAMAN

ÖNSÖZ

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışmanım **Prof. Dr. Yusuf YILMAZ**'a teşekkürlerimi sunarım. Karşılaştığım her zorlukta bilgileri ile daima yanımda olan tez izleme jüri üyelerim Prof. Dr. Erkan KARACABEY ile Dr. Öğretim Üyesi Melike BARAN EKİNCİ'ye, teknik destek sunan Prof. Dr. Tayyar GÜNGÖR'e ve tez aşamasında yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora eğitimim süresince YÖK 100/2000 Doktora Burs Projesi 'Yenilikçi Gıda Teknolojileri ve Gıda Biyoteknolojisi' alanında bursiyer statüsünde desteklenmeme olanak sağlayan Yüksek Öğretim Kurumu'na ve ayrıca TÜBİTAK 2211 A Genel Doktora Programı'nda bursiyer olarak beni destekleyen Türkiye Bilimsel Araştırmalar Kurumu'na teşekkür ederim. Tez çalışmamda elma tedarik etmek suretiyle destek olan Özbay Atmosfer Kontrollü Soğuk Hava Tesisi'ne (Isparta) de ayrıca teşekkür ederim.

Biricik eşim Hasan YAMAN ve canım oğlum Furkan Enes YAMAN, iyi günümde kötü günümde her daim yanımda oldunuz, iyi ki varsınız, iyi ki canımsınız. Sizi çok seviyorum herşey için teşekkürler. Son olarak canım aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Biricik eşim, oğlum ve sevgili aileme ithafen...

Temmuz, 2025

Tuğba YAMAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
ÖZET	xxv
ABSTRACT.....	xxvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Granny Smith Elma ve Özellikleri	5
2.2. Kurutma.....	6
2.2.1. Gıdaların Kurutulmasının Önemi	7
2.2.2. Gıda Kurutma Kinetiği ve Kuruma Sürecine Ait Periyotlar	8
2.2.3. Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler	11
2.2.3.1. Kurutma Havaının Sıcaklığı.....	11
2.2.3.2. Kurutma Havaının Bağıl Nemi.....	12
2.2.3.3. Kurutma Havaının Hızı	12
2.2.3.4. Kurutulacak Gıdanın Kimyasal Özellikleri	13
2.2.3.5. Kurutulacak Ürünün Fiziksel Özellikleri.....	13
2.2.3.6. Kurutulacak Ürün Miktarı.....	14
2.2.3.7. Kurutma Sırasında Ürünün Karıştırılması	14
2.2.3.8. Kurutma Ortamı Atmosfer Basıncı.....	14
2.2.4. Başlıca Gıda Kurutma Yöntemleri	14
2.2.4.1. Sıcak Hava ile Kurutma	16
2.2.4.2. Kabin Tipi Kurutucular	17
2.2.4.3. Tünel Tipi Kurutucular	18
2.2.4.4. Bant Tipi Kurutucular	18
2.2.4.5. Akışkan Yatak Kurutucular	18
2.2.4.6. Sandık Tipi Kurutucular	19
2.2.4.7. Püskürtmeli Kurutucular	19
2.2.4.8. Vakum Altında Kurutma.....	20
2.2.4.9. Mikrodalga Kurutma.....	20
2.2.4.10. Dondurarak Kurutma	21
2.3. Rehidrasyon.....	22
2.4. Vakum İmpregnasyon İşlemi ve Etkileyen Faktörler	22
2.4.1. Hammaddenin Yapısı, Şekli ve Büyüklüğü.....	24
2.4.2. Çözelti Türü	25
2.4.3. Çözeltinin Konsantrasyonu ve Sıcaklığı.....	25
2.4.4. Vakum Düzeyi ve Süresi	25
2.4.5. Atmosferik Basıncı Restorasyonu ve Süresi.....	26
2.5. Ohmik Isıtma.....	26
2.5.1. Tarihsel Gelişimi	27
2.5.2. Çalışma Prensibi ve Sistem Elemanları.....	28
2.5.3. Ohmik Isıtma İşlemini Etkileyen Faktörler	31
2.5.3.1. Elektriksel İletkenlik.....	31
2.5.3.2. Elektriksel Alan Kuvveti.....	32

2.5.3.3. Partikül Büyüklüğü ve Konsantrasyonu	32
2.5.3.4. Alternatif Akım Frekansı ve Dalga Boyu	32
2.5.3.5. İyonik Konsantrasyon	33
2.5.3.6. Enerji Verimliliği	33
2.5.4. İşlemin Olumlu ve Olumsuz Yönleri	33
2.5.5. Gıdalarda Uygulama Alanları	35
2.5.5.1. Evaporasyon	35
2.5.5.2. Ekstraksiyon ve Hidrodestilasyon	37
2.5.5.3. Haşlama	39
2.5.5.4. Çözündürme	40
2.5.5.5. Mikrobiyal İnaktivasyon	41
2.5.5.6. Enzim İnaktivasyonu	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM	43
3.1. Materyal	43
3.2. Yöntem	43
3.2.1. Elektrik İletkenliğinin Belirlenmesi	43
3.2.2. Elektriksel İletkenliğin Optimizasyonu	43
3.2.3. Ohmik Isıtmalı Ön Kurutma İşleminin Optimizasyonu	45
3.2.4. Vakum Altında Ohmik Isıtmalı Ön Kurutmada Basıncın Belirlenmesi	46
3.2.5. Vakum İmpregnasyon İşlemi	47
3.2.6. Kurutma Yöntemleri	48
3.2.6.1. Konvektif Kurutma	48
3.2.6.2. Atmosfer Basıncında Ohmik Ön Kurutmalı Konvektif Kurutma	48
3.2.6.3. Vakum Altında Ohmik Ön Kurutmalı Konvektif Kurutma	50
3.2.7. Kurutma Kinetiğinin Belirlenmesi	51
3.2.7.1. Nem İçeriği	51
3.2.7.2. Kurutma Hızı	52
3.2.7.3. Nem Oranı	52
3.2.7.4. Matematiksel Modelleme	52
3.2.7.5. Efektif Difüzyon Katsayısı	53
3.2.7.6. Aktivasyon Enerjisi	54
3.2.8. Rehidrasyon Kinetiğinin Belirlenmesi	54
3.2.8.1. Rehidrasyon Oranı, Rehidrasyon Kapasitesi ve Hacimsel Büzüşme Oranı	54
3.2.8.2. Matematiksel Modelleme	56
3.2.9. Elma Dilimlerinde Gerçekleştirilen Analizler	57
3.2.9.1. Suda Çözünür Kurumadde Tayini	57
3.2.9.2. pH	57
3.2.9.3. Titrasyon Asitliği	57
3.2.9.4. Kuru Madde İçeriği	58
3.2.9.5. Tekstür Analizleri	58
3.2.9.6. Antioksidan Kapasite ve Toplam Fenolik Madde İçeriği	58
3.2.9.7. Kül Tayini	59
3.2.9.8. Renk Analizleri	59
3.2.9.9. Su Aktivitesi	61
3.2.9.10. Morfolojik Yapının Tespiti	61
3.2.9.11. Metal Migrasyon Analizleri	61
3.2.9.12. Termogravimetrik Analizler	62
3.2.9.13. Diferansiyel Taramalı Kalorimetrik Analizler	62
3.2.9.14. Enerji Analizleri	62

3.2.10. İstatistiksel Analizler.....	63
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	65
4.1. Vakum İmpregnasyon İşlemiyle Elektriksel İletkenliğin Optimizasyonu	65
4.2. Ohmik Isıtmalı Ön Kurutma İşleminin Optimizasyonu.....	67
4.2.1. Atmosfer Basıncı Altında Ohmik Isıtmalı Ön Kurutma.....	68
4.2.2. Vakum Altında Ohmik Isıtmalı Ön Kurutma	72
4.3. Elma Dilimlerine Ait Kurutma Kinetiği Bulguları	77
4.3.1. Elma Dilimlerinin Nem İçeriğinin Kurutma Sırasındaki Değişimi.....	77
4.3.2. Elma Dilimlerine Ait Kuruma Hızları	83
4.3.3. Kuruma Kinetiğine Ait İnce Tabaka Kuruma Modelleri.....	89
4.3.4. Efektif Difüzyon Katsayısı	114
4.4. Kurutulmuş Elma Dilimlerinde Rehidrasyon Kinetiği.....	119
4.4.1. Rehidrasyon Oranı, Hacimsel Büzüşme Oranı ve Rehidrasyon Kapasitesi	119
4.4.2. Rehidrasyon Kinetiğinin Matematiksel Modellenmesi	133
4.4.2.1. Peleg Modeli	133
4.4.2.2. Weibull Modeli	142
4.4.2.3. Birinci Dereceden Kinetik Model	150
4.5. Taze Elmalara Ait Bulgular.....	159
4.5.1. Suda Çözünür Kurumadde İçeriği	159
4.5.2. pH ve Titrasyon Asitliği Değerleri	159
4.6. Kurutulmuş Elma Dilimlerine Bulgular	160
4.6.1. Toplam Kuru Madde İçeriği	160
4.6.2. Tekstür Analizleri	163
4.6.3. Toplam Fenolik Madde İçeriği ve Antioksidan Kapasite Değerleri.....	168
4.6.4. Renk Analizleri.....	174
4.6.5. Su Aktivitesi Değerleri	189
4.6.6. Kül İçeriği.....	191
4.6.7. Morfolojik Yapı Analizleri	195
4.6.8. Metal Migrasyon Analizleri.....	197
4.6.9. Termogravimetrik Analizler	197
4.6.10. Diferansiyel Taramalı Kalorimetrik Analizler.....	201
4.6.11. Enerji Analizleri.....	206
5. SONUÇLAR	211
6. KAYNAKLAR.....	213
7. EKLER.....	236

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Basit bir vakum impregnasyon sistemini oluşturan kısımlar (A: Vakum regülatörü, B: İmpregnasyon hücresi, C: Vakum pompası).....	24
Şekil 2.2. Ohmik ısıtmanın şematik gösterimi (Kaya ve İçier, 2019).....	27
Şekil 2.3. Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma sistemine ait şematik gösterim.....	30
Şekil 2.4. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma sistemine ait şematik gösterim ...	30
Şekil 3.1. ‘Granny Smith’ cinsi elmanın görüntüsü.....	43
Şekil 3.2. Standart atmosferik basınç altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi için optimizasyon denemesine ait görsel.....	45
Şekil 3.3. Vakum altında ohmik ön kurutma işlemi için vakum düzeyinin belirlenmesi ve sistem elemanlarının görüntüsü (A: Bilgisayar, B: Güç kaynağı, C: Vakum kabini, D: Vakum regülatörü, E: Vakum kabinine entegre pompa). 47	47
Şekil 3.4. Vakum impregnasyon işleminin uygulanmasına ait görsel	48
Şekil 3.5. Standart atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin uygulanmasına ait görsel.....	49
Şekil 3.6. Ohmik ısıtmalı ön kurutma uygulanan elma dilimlerinin ve kullanılan elektrotların şematik gösterimi.....	50
Şekil 3.7. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin şematik gösterimi.....	51
Şekil 3.8. CIELAB renk uzayının şematik görüntüsü (Çakır, 2015).....	60
Şekil 4.1. Altı farklı yöntemle 50°C’de kurutulan elma dilimlerinin başlangıç ortalama nem içeriklerinin zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.).....	78
Şekil 4.2. Altı farklı yöntemle 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin başlangıç ortalama nem içeriklerinin zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.).....	80
Şekil 4.3. Altı farklı yöntemle 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin başlangıç ortalama nem içeriklerinin zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel	

- kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)..... 82
- Şekil 4.4.** Altı farklı yöntemle 50°C’de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızlarının zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 84
- Şekil 4.5.** Altı farklı yöntemle 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızlarının zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 86
- Şekil 4.6.** Altı farklı yöntemle 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızlarının zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 88
- Şekil 4.7.** Farklı yöntemlerle 50°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranlarının zamana bağlı olarak değişimi: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (AOK) işlemi takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (VOK) işlemi takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi 94
- Şekil 4.8.** Farklı yöntemlerle 50°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları ile deneysel nem oranı arasındaki uyum: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (AOK) işlemi takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e)

Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (VOK) işlemini takiben
KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi 96

Şekil 4.9. Farklı yöntemlerle 60°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları zamana bağlı olarak değişimi: (a) Konveksiyonel kurutma yöntemi (KK), (b) Elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin (Vİ) KK yöntemiyle kurutma (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (AOK) sonrasında KK yöntemi (AOK+KK), (d) Elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin (Vİ) AOK ve KK yöntemleriyle kurutma (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (VOK) sonrasında KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi 102

Şekil 4.10. Farklı yöntemle 60°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları ile deneysel nem oranı arasındaki uyum: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi 104

Şekil 4.11. Farklı yöntemlerle 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları zamana bağlı olarak değişimi: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi 109

Şekil 4.12. Farklı yöntemlerle 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları ile deneysel nem oranı arasındaki uyum:

(a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi 111

şekil 4.13. Altı farklı kurutma yöntemi ile (a) 50°C, (b) 60°C ve (c) 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin nem oranlarının doğal logaritmalarının (Ln) zamana bağlı değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 115

şekil 4.14. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (a) 50, (b) 60 ve (c) 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon süresine bağlı nem içeriğindeki değişim (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 121

şekil 4.15. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulan elma dilimlerinin hacimsel büzüşme oranlarındaki değişim (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 124

şekil 4.16. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon kapasite değerlerindeki değişim (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 125

şekil 4.17. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon oranı değerlerindeki değişim (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 127

Şekil 4.18. Farklı yöntemlerle 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK) 137

Şekil 4.19. Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK) 139

Şekil 4.20. Farklı yöntemlerle 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK) 141

Şekil 4.21. Farklı yöntemlerle 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK) 145

Şekil 4.22. Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum

grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK) 147

Şekil 4.23. Farklı yöntemlerle 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK) 149

Şekil 4.24. Farklı yöntemlerle 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Kinetik Model’e ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK) 154

Şekil 4.25. Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Kinetik Model’e ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK) 156

Şekil 4.26. Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Kinetik Model’e ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon

(Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)	158
Şekil 4.27. Altı farklı kurutma yöntemiyle (A) 50°C, (B) 60°C ve (C) 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin termal stabiliteleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.).....	199
Şekil 4.28. Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sonrasında üç farklı yöntemle kurutulan elma dilimlerinin diferansiyel taramalı kalorimetrik analiz sırasında ısı akış özelliğinin sıcaklıkla değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)	202
Şekil 4.29. Üç farklı yöntemle kurutulan elma dilimlerinin diferansiyel taramalı kalorimetrik analiz sırasında ısı akış özelliğinin sıcaklıkla değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)	203
EK 1 – Şekil 7.1. Vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sırasında vakum düzeyi ile işlem süresinin elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik artış değerlerine (%) etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi.....	236
EK 2 – Şekil 7.2. Taze elma dilimleri (a) ile vakum impregnasyon (Vİ) işlemi uygulanan elma dilimlerinde (b) atmosferik basınç altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma (AOK) işlemi sırasında süreye bağlı olarak gerçekleşen ağırlık kaybı (%).....	236
EK 3 – Şekil 7.3. Atmosferik basınç altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma (AOK) işlemine maruz bırakılan taze elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi	237
EK 4 – Şekil 7.4. Vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sonrasında atmosferik basınç altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma (AOK) işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi.....	237

EK 5 – Şekil 7.5. Taze elma dilimleri (a) ile vakum impregnasyon (Vİ) işlemi uygulanan elma dilimlerinde (b) vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemi sırasında süreye bağlı olarak gerçekleşen ağırlık kaybı (%)	238
EK 6 – Şekil 7.6. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemine maruz bırakılan taze elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi.....	238
EK 7 – Şekil 7.7. Vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sonrasında vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi.....	239
EK 26 – Şekil 7.8. Farklı kurutma yöntemleri ile 50°C’de kurutulan elma dilimlerinin SEM görüntüleri.....	246
EK 27 – Şekil 7.9. Farklı kurutma yöntemleri ile 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin SEM görüntüleri.....	247
EK 28 – Şekil 7.10. Farklı kurutma yöntemleri ile 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin SEM görüntüleri.....	248

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Granny Smith elma türünün besin değeri (100 g)	5
Çizelge 2.2. Kurutma yöntemlerinin sınıflandırılması (İsaeva, 2007).....	6
Çizelge 2.3. Kurutmanın avantaj ve dezavantajları	8
Çizelge 2.4. Günümüzde en çok kullanılan kurutucu tipleri (Majumdar, 2007)	16
Çizelge 3.1. Elektriksel iletkenliğin optimizasyonunda yüzey yanıt metodolojisi tasarımında kullanılan bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri	44
Çizelge 3.2. Ohmik ısıtma destekli ön kurutma işlemi için yüzey yanıt metodolojisi tasarımında kullanılan bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri	46
Çizelge 3.3. Kurutma kinetiğinin matematiksel modellenmesinde kullanılan ince tabaka kurutma kinetiği modelleri	53
Çizelge 4.1. Elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik değerlerinin vakum impregnasyon teknikleriyle optimizasyonunda kullanılan merkezi karma tasarıma ait faktörler ve seviyeleri ile yanıt değişkeni olarak elma dilimlerinin iletkenlik artışı değerleri.....	65
Çizelge 4.2. Vakum impregnasyon teknikleriyle elma dilimlerinin elektriksel iletkenliklerinin artırılmasına yönelik gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri	66
Çizelge 4.3. Optimum koşullarda vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle elektriksel iletkenliği artırılmış elma dilimlerinin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemiyle en fazla ağırlık kaybı vermek üzere kullanılan merkezi karma tasarımına ait faktörler ve seviyeleri ile “yanıt” olarak kullanılan ağırlık kayıpları	68
Çizelge 4.4. Elma dilimlerinin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması amacıyla kullanılan merkezi karma deneme desenindeki faktörlerin dilimlerin ağırlık kaybı üzerine etkisine ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri ($p>0,05$ değerine sahip faktörler dahil edilmemiştir.).....	69
Çizelge 4.5. Elektriksel iletkenlik değeri vakum impregnasyon tekniği ile maksimize edilmiş elma dilimlerinin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması amacıyla kullanılan merkezi karma deneme desenindeki	

faktörlerin dilimlerin ağırlık kaybı üzerine etkisine ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri ($p>0,05$ değerine sahip faktörler dahil edilmemiştir.).....	71
Çizelge 4.6. Optimum koşullarda vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle elektriksel iletkenliği arttırılmış elma dilimlerinin vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemiyle en fazla ağırlık kaybı vermek üzere kullanılan merkezi karma tasarımına ait faktörler ve seviyeleri ile “yanıt” olarak kullanılan ağırlık kayıpları	73
Çizelge 4.7. Elma dilimlerinin vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması amacıyla kullanılan merkezi karma deneme desenindeki faktörlerin dilimlerin ağırlık kaybı üzerine etkisine ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri ($p>0,05$ değerine sahip faktörler dahil edilmemiştir.)	74
Çizelge 4.8. Elektriksel iletkenlik değeri vakum impregnasyon tekniği ile maksimize edilmiş elma dilimlerinin vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması amacıyla kullanılan merkezi karma deneme desenindeki faktörlerin dilimlerin ağırlık kaybı üzerine etkisine ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri ($p>0,05$ değerine sahip faktörler dahil edilmemiştir.).....	75
Çizelge 4.9. Altı farklı yöntemle 50°C’de kurutulan elma dilimlerinden elde edilen nem oranı değerlerine ait deneysel bulguların doğrusal olmayan regresyon analizi ile teorik ince tabaka kuruma modellerine uyumu (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.).....	91
Çizelge 4.10. Altı farklı yöntemle 60°C’de kurutulan elma dilimlerinden elde edilen nem oranı değerlerine ait deneysel bulguların doğrusal olmayan regresyon analizi ile teorik ince tabaka kuruma modellerine uyumu (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)	99
Çizelge 4.11. Altı farklı yöntemle 70°C’de kurutulan elma dilimlerinden elde edilen nem oranı değerlerine ait deneysel bulguların doğrusal olmayan regresyon analizi ile teorik ince tabaka kuruma modellerine uyumu (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)	106

- Çizelge 4.12.** Altı farklı yöntemle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerine ait efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.) 116
- Çizelge 4.13.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon kapasitesi (RK), rehidrasyon oranı (RO) ve hacimsel büzüşme oranı (HBO) üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9) .. 130
- Çizelge 4.14.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon kapasitesi (RK), rehidrasyon oranı (RO) ve hacimsel büzüşme oranı (HBO) üzerine kurutma sıcaklığı ile kurutma yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6) 131
- Çizelge 4.15.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin hacimsel büzüşme oranı (HBO) üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)..... 133
- Çizelge 4.16.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analiziyle Peleg kinetik modele göre hesaplanan rehidrasyon hız sabiti değerlerindeki değişim ve modele uyum parametreleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Elektriksel iletkenliğin artışının hedeflendiği vakum impregnasyon işlemi, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) 135
- Çizelge 4.17.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analiziyle Weibull kinetik modele göre hesaplanan rehidrasyon hız sabiti değerlerindeki değişim ve modele uyum parametreleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Elektriksel iletkenliğin artışının hedeflendiği vakum impregnasyon işlemi, AOK: Atmosfer basıncı altında

ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma)	144
Çizelge 4.18. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analiziyle Birinci Dereceden Kinetik Model'e göre hesaplanan rehidrasyon hız sabiti değerlerindeki değişim ve modele uyum parametreleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Elektriksel iletkenliğin artışının hedeflendiği vakum impregnasyon işlemi, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma)	152
Çizelge 4.19. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam kurumadde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3)	162
Çizelge 4.20. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kurumadde içeriği üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)	163
Çizelge 4.21. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile kurutma yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6)	164
Çizelge 4.22. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği değerleri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9).....	166
Çizelge 4.23. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve	

yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3).....	167
Çizelge 4.24. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin delme sertliği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)	168
Çizelge 4.25. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam fenolik madde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)	169
Çizelge 4.26. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam fenolik madde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ile kurutma yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6)	170
Çizelge 4.27. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam fenolik madde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3)	171
Çizelge 4.28. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin antioksidan aktivite değerleri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9).....	173
Çizelge 4.29. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin CIE a* (kırmızı-yeşil) renk değeri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6).....	175

- Çizelge 4.30.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin CIE a* (kırmızı-yeşil) renk değeri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)..... 176
- Çizelge 4.31.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin CIE b* (sarı-mavi) renk değeri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=6) .. 177
- Çizelge 4.32.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin toplam renk değişimi (ΔE^*), renk doygunluğu değişimi (ΔC^*), kroma ve hue açısı değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6) 179
- Çizelge 4.33.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin toplam renk değişimi (ΔE^*), renk doygunluğu değişimi (ΔC^*), kroma ve hue açısı değerleri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)..... 180
- Çizelge 4.34.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin renk doygunluğu değişimi (ΔC^*) üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3) 182
- Çizelge 4.35.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin hue açısı değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=6) .. 183
- Çizelge 4.36.** Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin hue açısı değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik

ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3).....	185
Çizelge 4.37. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin esmerleşme indeksi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)	187
Çizelge 4.38. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin esmerleşme indeksi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6).....	188
Çizelge 4.39. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin su aktivitesi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3).....	190
Çizelge 4.40. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kül içeriği üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9).....	192
Çizelge 4.41. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin esmerleşme indeksi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)	193
Çizelge 4.42. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kül içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3)	194
Çizelge 4.43. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerine ait camsı geçiş sıcaklığı ve entalpi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon,	

AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)	204
Çizelge 4.44. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimleri için özgül nem çekme oranı (SMER), özgül enerji tüketimi (SEC), birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli olan enerji miktarı (MER) ve toplam enerji tüketimi üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9) ..	207
Çizelge 4.45. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimleri için özgül nem çekme oranına (SMER), özgül enerji tüketimine (SEC) ve toplam enerji tüketimi üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma) (n=6)	208
Çizelge 4.46. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimleri için özgül enerji tüketimi (SEC), birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli olan enerji miktarı (MER) ve toplam enerji tüketimi üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma) (n=9)	209
EK 8 – Çizelge 7.1. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin hacimsel büzüşme oranı değerlerine ait varyans analiz tablosu	239
EK 9 - Çizelge 7.2. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon kapasitesine değerlerine ait varyans analiz tablosu	240
EK 10 – Çizelge 7.3. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon oranı değerlerine ait varyans analiz tablosu	240
EK 11 – Çizelge 7.4. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin toplam kuru madde içeriğine ait varyans analiz tablosu	240
EK 12 – Çizelge 7.5. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kesme sertliği değerlerine ait varyans analiz tablosu	241
EK 13 – Çizelge 7.6. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin delme sertliği değerlerine ait varyans analiz tablosu	241

EK 14 – Çizelge 7.7. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin antioksidan aktivite değerlerine ait varyans analiz tablosu	241
EK 15 – Çizelge 7.8. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin toplam fenolik madde içeriğine ait varyans analiz tablosu	242
EK 16 – Çizelge 7.9. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin CIE L* (parlaklık) değerine ait varyans analiz tablosu.....	242
EK 17 – Çizelge 7.10. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin CIE a* (kırmızı/yeşil) değerine ait varyans analiz tablosu	242
EK 18 – Çizelge 7.11. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin CIE b* (sarı/mavi) değerine ait varyans analiz tablosu.....	243
EK 19 – Çizelge 7.12. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin toplam renk farkı (ΔE^*) değerine ait varyans analiz tablosu ..	243
EK 20 – Çizelge 7.13. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kroma (C*) renk değerine ait varyans analiz tablosu	243
EK 21 – Çizelge 7.14. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin hue açısı değerlerine ait varyans analiz tablosu	244
EK 22 - Çizelge 7.15. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin esmerleşme değerlerine (BI) ait varyans analiz tablosu	244
EK 23 – Çizelge 7.16. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kroma farkı (ΔC^*) değerlerine ait varyans analiz tablosu.....	244
EK 24 – Çizelge 7.17. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin su aktivitesi değerlerine ait varyans analiz tablosu	245
EK 25 – Çizelge 7.18. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kül içeriğine ait varyans analiz tablosu	245
EK 29 – Çizelge 7.19. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin, kurutma sırasında özgül nem çekme oranına (SMER) ait ANOVA tablosu.....	249
EK 30 – Çizelge 7.20. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin, kurutma sırasında özgül enerji tüketimine (SEC) ait varyans analiz tablosu.....	249
EK 31 – Çizelge 7.21. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kurutma sırasında, birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli enerji miktarına (MER) ait varyans analiz tablosu	249

EK 32 – Çizelge 7.22. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kurutulması için gerekli olan toplam enerji miktarına ait varyans analiz tablosu.....	250
--	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AK	: Antioksidan Kapasite
ABTS	: 2,2'-Azino-bis(3-etilbenzotiazolin-6-sulfonik asit
AC	: Alternatif akım
ANOVA	: Varyans Analizi
AOK	: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma
BI	: Esmerleşme İndeksi
BİLTEKMER	: Bilimsel ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
C*	: Kroma
CCD	: Merkezi Karma (Kompozite) Tasarım
CI	: Güven Aralığı
CIE	: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
D_{eff}	: Efektif diffüzyon katsayısı
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
E_a	: Aktivasyon enerjisi
FBE	: Fen Bilimleri Enstitüsü
GAE	: Gallik Asit Eşdeğeri
HBO	: Hacimsel Büzüşme Oranı
I	: Akım
k₀	: Arrhenius frekans faktörü
KH	: Kurutma hızı
KK	: Konveksiyonel Kurutma
KM	: Kuru madde
LOD	: Dedeksiyon Limiti
M	: Ağırlık
MAE	: Malik Asit Eşdeğeri
MAKÜ	: Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
MER	: Birim miktarda suyu uzaklaştırabilmek için gerekli olan enerji
MR	: Nem Oranı
PI	: Tahmin Aralığı
R	: Gaz sabiti
R²	: Determinasyon katsayısı
RK	: Rehidrasyon Kapasitesi

RMSE	: Hata kareler ortalamasının karekökü
RO	: Rehidrasyon Oranı
RSM	: Yanıt Yüzey Yöntemi
SEC	: Özgül Enerji Tüketimi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopisi
SMER	: Özgül Nem Çekme Oranı
T	: Mutlak sıcaklık
TÇKM	: Toplam Çözünür Kuru Madde
TE	: Trolox® Eşdeğeri
TFMİ	: Toplam Fenolik Madde İçeriği
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı
TGA	: Termogravimenterik analiz
USDA	: Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı
US-FDA	: Birleşik Devletler-Gıda ve İlaç İdaresi
V	: Volt veya Voltaj
Vİ	: Vakum İmpregnasyon
VOK	: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma
YETEM	: Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi
ΔC*	: Kroma farkı
ΔE*	: Toplam renk farkı
Ω	: Direnç
α	: Weibull modelinin şekil parametresi
β	: Weibull modelinin hız parametresi
λ	: Dalga boyu
χ²	: Ki-kare

ÖZET

Doktora Tezi

Elma Dilimlerinin Vakum İmpregnasyon Ön İşlemi Sonrası Ohmik Isıtma Yöntemi ile Kurutulması

Tuğba YAMAN

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yusuf YILMAZ

Temmuz, 2025

Çalışmada, elma dilimlerinin kurutulmasında farklı ön işlem ve kurutma yöntemlerinin etkileri, üç farklı sıcaklık (50, 60 ve 70°C) altında belirlenmiştir. İlk aşamada ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma yapılacak dilimlerin elektriksel iletkenliğinin artırılmasında vakum impregnasyon (Vİ) işlemi optimize edilmiştir. Daha sonra dilimler konvektif kurutma (KK), Vİ işlemi sonrası KK (Vİ+KK), atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) sonrası KK, vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) sonrası KK (VOK+KK), Vİ işlemi sonrasında AOK+KK yöntemiyle kurutma ve (Vİ+AOK+KK) ile Vİ işlemi sonrasında AOK+KK yöntemiyle kurutma (Vİ+VOK+KK) ile kurutulmuştur. Kuruma davranışı ince tabaka kurutma modelleriyle incelenen dilimler için Page ve Wang & Singh modelleri 50°C’de, diğer iki sıcaklıkta ise Wang & Singh modeli daha iyi uyum sağlamıştır. Etkin difüzyon katsayısı $1,187 \times 10^{-8}$ - $4,264 \times 10^{-8}$ m²/s aralığında, aktivasyon enerjisi ise 10,48-54,20 kJ/mol aralığında değişmiştir. Özgül nem çekme oranı en düşük 70°C’de KK yönteminde ($0,20 \times 10^{-2}$ kg su/kWh) iken aynı yöntemde 50°C’de en yüksek değer ($3,50 \times 10^{-2}$ kg su/kWh) belirlenmiştir. Özgül enerji tüketimi 50°C’de KK yönteminde (298,40 kWh/kg su) en düşük iken 50°C’de AOK+KK yönteminde (446,80 kWh/kg su) en yüksek bulunmuştur. Toplam enerji tüketimi AOK+KK yönteminde en düşük (0,96 kWh) iken Vİ+VOK+KK yönteminde en yüksek (1,77 kWh) belirlenmiştir. Kurutulmuş dilimlerin delme sertliği 17,42-37,58 N aralığında, toplam fenolik madde içeriği ise 201,85-83,27 mg GAE/100 g km aralığında değişmiştir. En düşük camsı geçiş sıcaklığı 70°C’de Vİ+KK yönteminde (-33,59°C), en yüksek değer 70°C’de KK yönteminde (-11,57°C) bulunmuştur. Bulgular, Vİ işleminin ürün matrisinde daha açık bir yapısal gevşemeye yol açtığını, KK yönteminin ise daha stabil bir yapı koruduğunu göstermiştir. Sonuçlar, ohmik ısıtmalı ön kurutma ve Vİ uygulamalarının elma dilimlerinin kurutma kinetiği, enerji tüketimi, fonksiyonel özellikleri ve mikroyapısal stabiliteleri üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Özellikle düşük sıcaklık ve kombinasyon ön işlemleri, ürün kalitesinin korunması ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: ohmik ısıtma, vakum impregnasyon, kurutma, vakum, elma, enerji

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

Dehydration of Apple Slices Using Ohmic Heating After Vacuum Impregnation Pre-Treatment

Tuğba YAMAN

Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Food Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Yusuf YILMAZ

July, 2025

In the study, the effects of different pre-treatment and drying methods on the drying of apple slices were determined at three different temperatures (50, 60, and 70°C). In the first stage, the vacuum impregnation (VI) process was optimized to enhance the electrical conductivity of the slices to be pre-dried with an ohmic heating system. Subsequently, the slices were dried using the following methods: convective drying (CD), CD after VI pretreatment (VI+CD), CD after ohmic pre-drying at atmospheric pressure (OPD+CD), CD after ohmic pre-drying under vacuum pressure (VOPD+CD), AOPD+CD after VI pretreatment (VI+AOPD+CD), and VOPD+CD after VI pretreatment (VI+VOPD+CD). For the slices, whose drying behavior was analyzed using thin-layer drying models, the Page and Wang & Singh models provided a better fit at 50°C, whereas the Wang & Singh model showed better compatibility at the other two temperatures. The effective diffusion coefficient ranged from 1.187×10^{-8} to 4.264×10^{-8} m²/s, while the activation energy varied between 10.48–54.20 kJ/mol. The specific moisture extraction ratio was the lowest at 70°C in the CD method (0.20×10^{-2} kg water/kWh), while the highest value was found at 50°C using the same drying method (3.50×10^{-2} kg water/kWh). Specific energy consumption was the lowest at 50°C with the CD method (298.40 kWh/kg water) and the highest at 50°C with the OPD+CD method (446.80 kWh/kg water). Total energy consumption was the lowest in the OPD+CD method (0.96 kWh) and the highest in the VI+VOPD+CD method (1.77 kWh). The puncture hardness of the dried slices ranged from 17.42 to 37.58 N, while the total phenolic content varied between 201.85–83.27 mg GAE/100 g dry matter. The lowest glass transition temperature was observed at 70°C in the VI+CD method (-33.59°C), while the highest value was found at 70°C using the CD method (-11.57°C). These results indicated that the VI process led to a more pronounced structural relaxation in the product matrix, whereas the CD method preserved a more stable structure. Results demonstrated that ohmic pre-drying and VI applications had significant effects on the drying kinetics, energy consumption, functional properties, and microstructural stability of apple slices. Interestingly, low-temperature and combination pretreatments provided significant advantages in terms of product quality preservation and energy efficiency.

Keywords: ohmic heating, vacuum impregnation, drying, vacuum, apple, energy

GİRİŞ

Ilıman iklim meyvelerinin başında gelen elma, gülgiller familyasından kültüre alınmıştır. Rengi, kokusu ve lezzetli olması nedeni ile en sevilen meyveler arasında yer almaktadır. Dünya’da 6500’den fazla elma çeşidi mevcuttur ve bunlardan 460 tanesi Türkiye’de yer almaktadır (Uzundumlu vd., 2009). Yaklaşık bileşimi %85,0 su, %11,0 karbonhidrat, %2,0 diyet lif, %0,6 yağ, %0,5 organik asit ve %0,3 protein olan elma meyvesi malik asit bakımından zengindir. Elma ayrıca kafeik ve klorojenik fenolik asitleri ve vitaminleri de içermektedir (Van der Sluis, 2005).

Türkiye, bulunduğu coğrafi konumu sebebi ile meyve çeşidi bakımından oldukça zengindir ve dolayısı ile meyve üretim sektöründe önemli ülkeler arasında yer almaktadır. Yetiştirilen meyvelerin bir bölümü taze olarak tüketilirken kalan kısmı çeşitli yöntemlerle işlenmektedir (Tarhan vd., 2009). 2017 yılında 865,6 milyon ton olan dünya meyve üretiminin %2,67’lik bölümü Türkiye tarafından karşılanmıştır. Bu üretim payı Türkiye’yi, Çin, Hindistan, Brezilya ve ABD’nin ardından beşinci sıraya yerleştirmiştir. Elma, dünyada ve Türkiye’de en fazla üretimi yapılan meyvelerden olup ülkemiz tarımı ve ekonomisinde önemli bir yere sahiptir. Türkiye’nin 2019 yılında 26,3 milyon ton olan meyve üretiminin %13,8’lik bölümünü (3,7 milyon ton) elma üretimi oluşturmuştur (Özçatalbaş vd., 2009; Bayav ve Karlı, 2020). Türkiye’de ticari öneme sahip olan elma çeşitleri arasında yer alan Granny Smith, gevrek, ekşi ve sulu bir elma çeşididir (Atay vd., 2010). Granny Smith cinsi elmalar, aromatik bileşen konsantrasyonu düşük olduğundan dolayı sadece ekşi tada sahiplerdir. Etilen üretimi düşüktür ve düşük esmerleşme potansiyeline sahip olduklarından dolayı muhafaza edilmeleri kolaydır (Abbott vd., 2004).

Ülkemiz, elmanın anavatanı sınırları içerisinde yer almaktadır ve coğrafi konumu itibariyle önemli pazar konumundaki ülkelere yakındır. Bu durum, elma üretimi ve bu ülkelere yönelik elma ihracatında avantaj sağlamaktadır (Özçatalbaş vd., 2009; Bashmihov, 2016). Ayrıca, ülkemizde en sık yetiştirilen meyve çeşitlerinden biri olan elmanın beslenme ve sağlık ile alakalı potansiyel faydalarının bilinmesi bu gıda mamulünün tüketimini teşvik etmektedir. Elma, taze olarak tüketilebildiği gibi meyve suyu, sirke, marmelat, elma kurusu, şarap, tatlı gibi yiyecek ve içeceklerde kullanılarak/dahil edilerek veya kozmetik endüstrisi gibi farklı alanlarda kullanım alanı bulabilmektedir (Özçatalbaş vd., 2009). Tüketicilerin gıdaların sağlık üzerindeki etkisi hakkındaki farkındalıkları, fonksiyonel gıdalara olan talebin artmasına

katkıdabulunmaktadır (Tripathi ve Giri, 2014). Ekstra kalori, şeker ve yağ içermeyen, tüketimi kolay olan ve tüketilmeden önce herhangi bir hazırlık gerektirmeyen kurutulmuş çıtır atıştırılmalıkların günümüz piyasasında tercih edilirliliği yüksektir. Günümüzde popüler olan atıştırılmalıklara önemli bir alternatif, kurutulmuş elmadır (Afzaal vd., 2020). Kuru meyve ve sebzelere olan merakın artması, kuru elma üretiminde ve ticaretindeki artışları da beraberinde getirmiştir. Ülkemizde elma kuru su ihracatı yapılmakta; ihracat miktarı yıllar içerisinde artış göstermektedir. 2019-2020 yılları arasındaki (12 aylık) veriler incelendiğinde ülkemiz genelinde elma kuru su ihracatının 5 bin ton olduğu ve bir önceki senelik dilime kıyasla %28,40 arttığı belirtilmiştir (Anonim, 2020).

ABD'deki “Kurutulmuş Elma Kalite Dereceleri İçin Birleşik Devletler Standartları”na (20 FR 7095) (USDA, 1955) göre kuru elmalar, sağlam ve olgun elmalardan yıkama, ayırma, budama, soyma, çekirdek alma ve dilimler halinde kesme yoluyla hazırlanan elma dilimleri, yarı kuru bir doku elde etmek için nemin büyük kısmını uzaklaştırmak için kurutulur. Ürün, renk bozulmasını geciktirmek için kükürtlenebilir. Bu standarda göre, kuru elmaların her üç kalite derecesi (A, B ve C) için, kurutulmuş ürünün nem içeriği ağırlıkça %24'ten fazla olmamalıdır.

Taze meyve sebzeler %80-95 oranında su içermekte olup, su içeriğinin %10-20'ye düşürülmesi işlemi, “kurutma” olarak adlandırılmakta ve bu işlemle birlikte üründe meydana gelen biyokimyasal reaksiyonlar ve mikroorganizma gelişimi yavaşlamakta veya durma noktasına gelmektedir (Aktaş vd., 2013). Kurutma sırasında ürünün duyu sal özellikleri ile besin değ erinde meydana gelen değ iş ikliklerin en az seviyede olması istenmekte, kurutulan ürünün rehidrasyon yeteneğ inin ise oldukça üst seviyede olması beklenmektedir (Çınar, 2009). Gıdaların kurutulması ile birlikte ürünün nakliye maliyeti hem azalmakta hem de taze ürünün taşınmasına kıyasla kurutulmuş ürünlerin taşınması daha kolay gerçekleştirilmektedir. Kurutulmuş ürünün raf ömrü taze ürüne göre daha uzun olup kurutulmuş üründe ambalajdan doğ an hatalar nedeni ile meydana gelen gıda bozulmaları en az dü zeye inmekte ve ayrıca kurutma ile birlikte aynı hacme sahip kurutulmuş ürün ambalajda daha az yer kaplamaktadır (Anonim, 2014).

Geleneksel (güneş altında), endüstriyel (tün el tipi, akış kan yataklı, püskürtmeli, döner tamburlu ve mikrodalga kurutucular) ve vakum altında kurutma (vakum kurutucu, raflı kurutucu ve dondurarak kurutma) olmak üzere üç tip kurutma yöntemi olmasına rağmen (Tripathy ve Kumar, 2009), geleneksel kurutma ucuz ve pratik olmasından dolayı dünya genelinde en çok kullanılan kurutma yöntemidir (Cemeroğ lu, 2013). Ancak geleneksel kurutma yönteminin; mevcut iklime göre uzun süren kurutma işlemi, uzun

süren kurutma işlemine bağlı olarak üründe istenmeyen değişimlere yol açabilecek olması, homojen olmayan su içerikli ürün eldesi, ürünün, yabancı madde bulaşmasına açık olması, kurutma için büyük yerlere ihtiyaç duyulması ile doğrudan güneş ışınlarına maruz kalmasından dolayı üründe vitamin ve aroma kayıplarının meydana gelmesi gibi bazı dezavantajları vardır (Adow vd., 1997; Midilli vd., 2002; Ertekin ve Yıldız, 2004; Aghbashlo vd., 2010). Geleneksel kurutma yönteminin bahsi geçen dezavantajları ve endüstriyel kurutmanın (özellikle de konvektif ısıtma ile kurutmanın) yüksek enerji maliyetlerinden dolayı, alternatif olarak kullanılabilecek yeni ve yenilikçi teknolojilerin araştırılması son yıllarda hız kazanmıştır. Yeni yöntemlerle, daha az işlem görmüş olan güvenli gıdayı tüketiciye ulaştırmak ana hedeflerden bir tanesidir.

“Direnc ısıtma” ve “elektro-ısıtma” olarak da tanımlanan ohmik ısıtmanın temeli Joule Yasası’na dayanmaktadır. Bir elektrik devresinde direncin üzerinden geçen elektrik akımının oluşturduğu ısıyı (enerjiyi) tanımlayan bu yasaya göre bir iletkenin akım geçtiğinde, iletken ısınır ve bu ısı, geçen akımın karesi, devrenin direnci ve geçen süreyle doğru orantılıdır (İçier ve Yıldız, 2005). Ohmik ısıtmada gıda ile temas halinde bulunan elektrotlardan 0-2 dakika süreyle 50-60 Hz frekansta 0-400 V elektriksel alternatif akım geçirilerek gıdanın ısınması sağlanmakta ve işlem sırasında elektrik enerjisi, termal ısıya dönüşmektedir (Demirdöven ve Baysal, 2008). Bu yöntemde kısa sürede ısıtma sağlanmasının yanı sıra, gıda bileşenlerindeki kayıplar en az düzeye indirilmektedir (İçier ve Yıldız, 2005; Demirdöven ve Baysal, 2008; Seyhun vd., 2008; İncedayı vd., 2009; Akkara ve Kayaardı, 2014; Kaya ve İçier, 2019).

Vakum impregnasyon (Vİ) işlemi, meyve ve sebzelerin gözenekli yapılarının beslenme açısından önemli bileşenler ile zenginleştirilmesi ve fonksiyonel açıdan zengin ürünlerin geliştirilmesinde kullanılan önemli bir teknoloji olarak bilinmektedir (Castagnini vd., 2015; Mao vd., 2017). Bu işlem, ozmotik dehidrasyonun vakum altında gerçekleştirilmesi işlemidir. Böylece ozmotik dehidrasyon işleminin verimliliğinin artmasının yanı sıra, işlem süresinin kısalması bu yöntemin avantajlarından bir tanesidir (Fito ve Chiralt, 2000). İşlem sırasında gıdalarda doku hasarını minimum seviyeye indirmesi, ürünün rengini, aroma ve lezzetini koruması, gıdalardaki ısıya hassas bileşenlerin korunmasında etkili olması bu yöntemi önemli kılmaktadır (Karacaoğlu vd., 2016).

Vakum impregnasyon işlemi genellikle tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmakta olup (Moreno vd., 2011a) kurutma işlemi öncesi uygulanan ön işlemlerden bir tanesidir. Kurutma öncesi uygulanan bu ön işlem ile ozmotik dehidrasyon

hızlanmaktadır. Vİ, kurutma işlemine maruz bırakılan meyve ve sebzelerin duyuşal, fiziksel ve fonksiyonel özelliklerini geliştirmek amacı ile uygulanmakla birlikte, ürün maliyetini de azaltmaktadır (Moreno vd., 2011a; Silva vd., 2014). Uygulama ile birlikte gözenekli dokunun içerisine su geçişı kontrollü biçimde sağlanmaktadır ve bu durum ürünün yapısal bütünlüğünü etkilememektedir (Fito, 1994).

Ülkemizde elma dilimlerinin farklı kurutma yöntemleri ile kurutulmasına dair çalışmalar mevcuttur ve bu çalışmalar tezin ilerleyen bölümlerinde sunulmaktadır. Ancak meyve ve sebze gibi katı gıdaların elektriksel iletkenliğini arttırmak için Vİ işleminin uygulandığı ve mevcut kurutma zamanını kısaltmak için, Vİ yönteminin atmosfer basıncı altında ve vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi ile entegre edildiğı çalışmalara rastlanmamıştır. Bu doktora tez çalışmasında elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini arttırmak için Vİ işleminden yararlanılmış ve bu işlem homojen bir ön kurutma sağlamak ve kurutma süresini minimum düzeye indirmek için atmosfer ve vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi ile kombine edilmiştir. Ön kurutma sonucunda belli bir nem seviyesine ulaşılmış olup kurutma işlemine konveksiyonel kurutucuda devam edilmiştir. Bu bağlamda Vİ işlemi ünitesi ile atmosfer ve vakum altında ön kurutma işleminin uygulanabilmesi için sistem tasarımı yapılmış ve (i) Vİ işlemlı (239 mbar basınçta 30 dakika) ve Vİ işlemsiz elma dilimlerinde 50, 60 ve 70°C’de konveksiyonel kurutma, (ii) Vİ işlemlı ve Vİ işlemsiz elma dilimlerinde atmosfer basıncı altında maksimum ağırlık kaybının oluşacağı optimum kombinasyonda (impregne edilmeyen elma dilimleri için 90 V’ta 22 dakika ve 59°C sıcaklıkta, impregne edilen elma dilimleri için 87 V’ta 26 dakika ve 66°C sıcaklıkta) ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi sonrasında 50, 60 ve 70°C’de konveksiyonel kurutma, (iii) vakum impregnasyonlu ve impregnasyonsuz elma dilimlerinde vakum altında optimum kombinasyonda (impregne edilen elma dilimleri için 89 V’ta 22 dakika ve 59°C sıcaklıkta, impregne edilmeyen elma dilimleri için 87 V’ta 26 dakika ve 66°C sıcaklıkta) ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi sonrasında 50, 60 ve 70°C’de konveksiyonel kurutma olacak şekilde entegre işlemler uygulanmıştır. Uygulanan bu işlemlerin elma dilimlerinin bazı kalite özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Her uygulama sonucunda elma dilimleri için kuruma süresi ve enerji tüketimi değerlendirilmiştir. Uygulamaların, elma dilimlerinin tekstürel özelliklerinin yanı sıra kuru madde ve kül içeriğı ile renk, su aktivitesi, rehidrasyon oranı (RO) ve rehidrasyon kapasitesi (RK) gibi bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisi belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Granny Smith Elma ve Özellikleri

Kökeni Avusturalya'ya dayanan Granny Smith elma türü melez bir türdür. Tam verimi sağlamak için aşılama yapılarak varyasyonları oluşturulmuş olup (Symons, 2007) kabuk rengi yeşil, et rengi ise yeşilden beyaza doğru ya da yeşilimsi sarıdır. Şekil olarak kısa yuvarlak-konik ve orta büyüklükte bir elma türüdür. Lezzet olarak yüksek kalitede bir elma türü, duyuşal olarak ise lezzeti keskin/ferahlatıcı olarak değerlendirilmektedir. Depolama sırasında diğer elma çeşitlerine göre daha stabildir ve uygun depolama koşullarında bir sene boyunca kalitesini kaybetmeden muhafaza edilebilmektedir (Hall ve Scote, 1961). Granny Smith elmalar, elma çeşitleri arasında yüksek antioksidan ve fenol konsantrasyonuna sahiptir. İçerdikleri flavonoidler, siyanidin ve epikateşin sayesinde cildi güzelleştirmelerinin yanı sıra, düşük kalorili olması, diyet lifi ve potasyum içeriğinin yüksek olması nedeniyle, sağlıklı beslenme açısından diyet listelerinde önerilen bir meyve çeşididir (Dixon, 1998; Coffinan, 2013). Granny Smith elmanın besin değeri (100 g'da) Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Granny Smith elma türünün besin değeri (100 g)

Besin Ögesi	Miktarı (mg)
Karbonhidratlar	13810
Şeker	10390
Diyet Lifi	2400
Yağ	170
Protein	260
Vitaminler	
Thiamin (B1)	0,017
Riboflavin (B2)	0,026
Niasin (B3)	0,091
Pantotenik asit (B5)	0,006
Piridoksin (B6)	0,041
Folat (B9)	0,003
Vitamin C	4,600
Mineraller	
Kalsiyum	6,00
Demir	0,12
Magnezyum	5,00
Fosfor	11,00
Potasyum	107,00
Çinko	0,04

2.2. Kurutma

Kurutma, meyve ve sebzelerin en eski muhafaza yöntemlerinden birisidir. Ürünlerin kurutulmasındaki amaç, ürünün su aktivitesini belli bir değerin altında tutarak, ürünü mikrobiyal, kimyasal ve enzimatik bozulmalara karşı dayanımını arttırarak, meydana gelebilecek kalite kayıplarını önlemektir (Geankoplis, 1993; Gunasekaran, 1999; Ünlütürk ve Turantaş, 1999). Kuru ürünlerin yüksek gelir getirmesinden dolayı da günümüzde uygulanan bir muhafaza tekniğidir. Kurutma yöntemleri kendi içerisinde önce iki ana gruba, her bir grupta kendi arasında üç ayrı kategoriye göre sınıflandırılmış olup bu sınıflandırma Çizelge 2.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Kurutma yöntemlerinin sınıflandırılması (İsaeva, 2007)

Isı Transfer Şekline Göre	Güneş Enerjisinin Kullanım Şekline Göre
✓ Konveksiyon	✓ Doğal Sistemler
✓ Kondüksiyon	✓ Pasif Sistemler
✓ Radyasyon	✓ Aktif Sistemler

Kurutulacak ürüne ısı iletimi; konveksiyonlu kurutmada taşınım yolu ile, kondüksiyonlu kurutmada iletim yolu ile, ısıma yolu ile kurutmada ise ışıma yolu ile iletilmektedir. Doğal sistemlerde ise ürün doğrudan güneş altında kurutulmaktadır. Pasif sistemlerde kurutmada sisteme ek enerji verilmez iken, aktif sistemlerde kurutmada ise sisteme ek enerji verilmektedir (İsaeva, 2007).

Son üründe istenilen özellikler, en az kalite kaybı en iyi rehidrasyon yeteneği ve ekonomik koşullar, farklı kurutucu tiplerinin tasarlanmasına neden olmuştur. Doğal kurutmada güneş enerjisinden yararlanılmakta olup, güneş enerjisinin kullanıldığı kurutucular arasında; sera tipi, tünel tipi, zorunlu hava akışlı ve entegre kurutucular yer alırken, yapay kurutmada ise; kabin tipi, tünel tipi, konveyör tipi, akışkan yatak tipi, püskürtmeli tip, valsli tip, ozmotik dehidrasyonlu kurutucular, mikrodalgalı kurutucular, dondurarak kurutma yapan kurutucular ve vakumlu kurutucular yer almaktadır (Cemeroğlu vd., 2003).

Kurutma havasının nitelikleri iyi bir kurutmanın sağlanması açısından büyük önem taşır (İsaeva, 2007). Kurutmanın istenilen nitelikte olabilmesi için, kurutulacak ürünün şekli ve boyutu, ürünün kurutma ortamındaki konumu ile fiziksel ve kimyasal yapısı gibi faktörler kontrol altına alınabilmelidir. Bunun yanı sıra uygulanacak kurutma yöntemi ve kurutma sırasında uygulanan ön işlemler de kurutmayı etkileyen faktörler arasında yer almaktadır (Evranuz, 1988).

2.2.1. Gıdaların Kurutulmasının Önemi

Meyve sebzeler yüksek oranda su içerdiklerinden dolayı hasattan sonra, kalitesi değişmeden muhafaza edilmesi sırasında önemli sorunlar meydana gelmektedir. Bu sorunların yol açacağı olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için meyve ve sebzelere çeşitli koruma yöntemleri uygulanmaktadır. Koruma yöntemleri arasında kurutma işlemi önemli bir yer tutmaktadır. Meyve ve sebzelerin kalite değişimini minimuma indirerek muhafaza edebilmenin yanı sıra, üretildikleri bölgelerde kullanımı veya üretilmedikleri bölgelerde de tüketilebilmeleri için de kurutma gibi yöntemlerin uygulanması oldukça önemlidir. Kurutma üründeki nem miktarını belirli bir seviyeye getirmek için (%1-15) yapılan bir muhafaza tekniğidir. Kurutmayla, üründeki nem seviyesi belli bir düzeyin altına indirilerek olası kimyasal ve enzimatik reaksiyonların önlenmesi veya durdurulması hedeflenmektedir. Kurutma işleminin ilk kez 18. yüzyılda başladığı, savaşlarla birlikte geliştiği bildirilmektedir. Kırım Savaşı'nda süvarilerin kurutulmuş meyve sebzeler ile beslendikleri, aynı şekilde Birinci Dünya Savaşı'nda yaklaşık 4,5 bin ton kurutulmuş sebzelerin ABD'den savaş alanına gemiler ile gönderdiği bilinmektedir (Saldamlı ve Saldamlı, 2004). Bu durum, kurutmacılığın tanınması ve gelişmesinde askeri amaç için kullanımının büyük rolü olduğunu göstermektedir (Vega-Mercado, 2001).

Dünyada kurutulmuş ürün üretimi her geçen gün artmakta ve ilk sırayı 298 bin ton kurutulmuş ürün üretmekte olan ABD almaktadır. Türkiye de 190 bin ton kurutulmuş ürün üretimi ile önemli bir yere sahiptir. Kurutulmuş ürünler Türkiye pazarında yaş ürünlere göre bir alternatif olmuştur. Kurutulmuş ürünler gelirimizin %80'ini oluşturmakla birlikte, kurutulmuş ürünlerin %63'ü ihraç edilmektedir. Kurutulmuş ürünler kurutulmuş olarak tüketilmenin yanı sıra hazır çorba, bebek maması gibi ürünlerin yapımında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Erbay ve Küçüköner, 2008).

Her ne kadar gıda en eski gıda koruma yöntemlerinden biri de olsa, kurutmanın bazı avantaj ve dezavantajları da vardır. Kurutmanın avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Kurutmanın avantaj ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
▪ Kurutulmuş ürünün taşıma maliyeti %70-80 oranında azalmaktadır.	▪ Sağlık açısından önemli bileşenlerde (C vitamini vb.) değişim meydana gelebilir.
▪ Kurutulmuş ürünü taşımak daha kolaydır.	▪ Yüksek sıcaklıkta yapılan kurutma işleminde proteinler denatüre olabilir.
▪ Aynı hacme daha fazla kurutulmuş ürün yerleştirilebilir.	▪ Kurutma veya muhafaza sırasında enzimatik reaksiyonlar meydana gelebilir.
▪ Kurutulmuş ürünün yaş ürüne göre raf ömrü daha uzundur.	
▪ Ambalaj hatalarından dolayı ürünün bozulma riski daha azdır.	

2.2.2. Gıda Kurutma Kinetiği ve Kuruma Sürecine Ait Periyotlar

Gıdanın kurutma kinetiği incelenirken ürünün nemi ile kuruma süresi, kuruma süresi ile kuruma hızı, kuruma hızı ile ürünün nemi ve kuruma sıcaklığı ile ürünün nemi arasındaki ilişki dikkate alınmaktadır. Gıdanın kuruma süreci (i) ürünün ısınma periyodu, (ii) sabit hızda kuruma periyodu ve (iii) azalan hızda kuruma periyodu olmak üzere üç periyotta gerçekleşmektedir (Baker, 1997; Yağcıoğlu, 1999).

Ürünün ısınma periyodu kuruma sürecinin ilk evresidir. Bu evrede ürünün yüzey sıcaklığı hızla yükselir. Kuruma hızı artar ve periyodun sonunda en yüksek değerine ulaşır. Denge sıcaklığına ulaşana kadar sürmesinden dolayı bu periyot tüm kuruma süresince kıyaslandığında en kısa süren periyottur ve genellikle dikkate alınmaz ve kuruma eğrilerinde gösterilmez (Yağcıoğlu, 1999). Bu periyotun sonunda sabit kuruma evresi başlamaktadır.

Sabit hızda kuruma periyodunda kütle transferi gıdanın yüzeyinden buharlaşma yolu ile olmaktadır. Üründen yüzeye hareket eden su miktarı buharlaşan su miktarına eşit olduğu müddetçe ürünün yüzeyi ıslak kalacak, ürünün yüzeyi ıslak kaldıkça yüzey sıcaklığı sabit kalarak (buharlaşma için kullanılacak ısının tümü buharlaşma gizli ısısı olarak kullanıldığından bu ısı ürünü ısıtmaz ve buharlaşma süresince yüzey sıcaklığı sabit kalır) yaş termometre sıcaklığına eşit olur (Garacar, 1995). Bu periyotta suyun yüzeye iletim hızı ile yüzeyden buharlaşma hızı birbirine eşittir (Yağcıoğlu, 1999). Üründe bulunan serbest su bu periyotta üründen uzaklaştırılmaktadır ve bu periyot boyunca birim zamandaki uzaklaşan su miktarı sabit kalmaktadır (Cemeroğlu ve Acar, 1986).

Sabit hızla kuruma periyodu boyunca, suyun ürün yüzeyine, kılcal borucuklar, ozmotik basınç, büzülme sebebi ile oluşan sıkıştırma basıncı gibi etkilere bağlı olarak sıvı

halde taşındığı kabul edilmektedir (Cemeroğlu, 2013). Su ürününün iç kısımlarından yüzeye doğru taşınmakta ve bundan dolayı iç katmanlardaki su miktarı giderek azalmaktadır. Böylece tabakalar arasındaki konsantrasyon farkının azalması hareket eden su miktarının da azalmasına neden olmaktadır. Ortaya çıkan bu yeni durum nedeniyle, kurumakta olan ürünün yüzeyinden birim zamanda buharlaşarak ayrılan su iç kısımlardan taşınan suya eşit olamaz (Yağcıoğlu 1999).

Bu periyot ürün içindeki suyun yüzeye ulaşma hızı, yüzeydeki buharlaşmayı karşıladığı sürece devam eder. Üründeki su miktarı azaldıkça geride kalan suyu gıdaya bağlayan kuvvet artmakta ve serbest su miktarı azalmaktadır. Bu nedenle, gıdadaki su oranı belli bir düzeye inince bu periyot sona erer ve ardından azalan hızda kuruma periyodu başlar. Kuruma hızındaki değişimin meydana geldiği bu andaki gıdanın nem düzeyine “kritik nem”, kuruma hızının değiştiği bu noktaya da “dönme noktası” denir (Cemeroğlu, 2013). Özellikle meyve sebzelerin kurutulması sırasında birden fazla dönme noktası oluşabilmektedir. Kritik nem, kurutulacak ürüne göre farklılık göstermekte olup, ürünün bileşimi ile ilişkili bir değerdir. Ancak bir genelleme yapmak gerekirse, birçok gıdanın kritik nemi, bu gıdanın %58-65 nemli hava ile dengeye ulaştığı zaman içerdiği su miktarına eşittir (Cemeroğlu ve Acar, 1986).

Azalan hızda kuruma periyodunda ürünün içindeki suyun azalmasından dolayı, yüzeye iletilen su miktarı yüzeyden buharlaşan su miktarından az olur ve bu durum ürün yüzeyinde kuru bölgelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Kuru bölgelerin artması ile gıda ısınmaya, yüzey sıcaklığı kurutma havasının yaş termometre sıcaklığının üzerine çıkmaya başlar (Cemeroğlu, 2013). Yüzeyden iç kısımlara doğru meydana gelen sıcaklık artışının etkisiyle nem, ürünün içinde buharlaşmaya ve yüzeye gaz difüzyonu yoluyla ulaşmaya başlar. Kurumanın ilerleyen sürecinde, ürünün nem içeriği azaldıkça, suyun yüzeye ulaşmasında içsel buhar difüzyonunun önemi artmaktadır (Yağcıoğlu 1999). Bu periyotta, kuruma hızı üründe kalan nem düzeyine bağlı olarak lineer bir şekilde azalır, üründeki nem belli bir düzeye gelince kuruma hızı sıfıra düşer ve kuruma olayı biter. Ürün denge nemine ulaşır. Bu durumda gıdanın içerdiği su oranına, o koşullardaki “denge bağıl nemi” denir (Cemeroğlu ve Acar, 1986).

Kurutma ortamının koşulları kuruma süresi üzerinde, ürünün şekli ve türünden daha çok etkilidir (Cemeroğlu, 2013). Azalan kuruma periyodunda ürünün nem seviyesi belirli bir düzeyin altına indiğinde kuruma işlemi zorlaşmakta ve kuruma süresi azalmaktadır (Cemeroğlu ve Acar, 1986; Yağcıoğlu, 1999). Azalan hızda kuruma periyodu sırasında, kuruma hızının ve süresinin belirlenmesi, sabit hızda kuruma evresine göre daha zor

olacağından dolayı bu evrede, ürün içindeki ısı ve kütle difüzyonunun da birlikte ele alınması gerekmektedir (Yağcıoğlu, 1999).

Kuruma olayını incelemek maksadıyla teorik ve deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematiksel modellerden yararlanılabilmektedir (Donald vd., 1973). Azalan hızda kurutma periyoduyla ilgili teorik ve yarı teorik kuruma modellerinin geliştirilmesi sürecinde, işlemleri daha kolay hale getirmek için, aşağıdaki bazı ön kabuller yapılmıştır (Yağcıoğlu, 1999):

- Materyalin bünyesindeki nem dağılımı tek düzedir.
- Kuruma, madde içindeki nemin, su ve buhar fazında difüzyonu sonucu oluşur.
- Difüzyon, nem farkı, sıcaklık farkı, buhar basınçları farkı ve yoğunluk farkı gibi etkenlere bağlıdır.
- Kurutma havasının özellikleri (sıcaklık, hız, bağıl nem) kuruma süresince değişmez.
- Ürün ince bir tabaka şeklinde serilir.

Meyve ve sebze kurutması genellikle azalan hızda gerçekleşmektedir. Azalan hızda kuruma periyodunda kuruma hızı iki yolla formüle edilebilmektedir (i) geleneksel yaklaşım (ampirik) ve (ii) kuramsal yaklaşım (Demiray, 2015).

Azalan hızda kuruma periyodundaki kuruma hızı, ürünün büyüklüğüne ve şekline önemli derecede bağlıdır (Cemeroğlu, 2013). Bundan dolayı geleneksel yaklaşım sınırlı bir sonuç vereceğinden, genellikle kuramsal yaklaşımın sonuç vermediği yerlerde tercih edilmelidir (Cemeroğlu, 2013). Kuramsal yaklaşımda önemli olan, kurutulması istenilen ürünün yapısal özellikleri doğru bir şekilde ölçülmek, elde edilen bu değerleri kurutma hızının hesabında kullanmaktır (Demiray, 2015). Başlıca özelliği, kurutulması istenen gıdanın iç yapısal özelliklerini doğru olarak ölçmek ve elde edilen bu değerleri kurutma hızı hesaplamalarında kullanmaktır (Demiray, 2015). Bu gibi kurutma mekanizmalarının yardımıyla azalan hızda kuruma periyodunda oluşan kuruma olayını açıklamak için çeşitli modeller geliştirilmiştir.

Azalan hızda kuruma periyodu sırasında ürünün içinde oluşan nem iletimi, Newton'un Soğuma Yasası'na benzetilerek açıklanmaya çalışılmıştır. Bu yasa, cisim ile çevre arasındaki sıcaklık farkının çok büyük olmaması şartıyla, sıcaklığı değişmez kabul edilen bir ortam içine konulan bir cismin sıcaklığındaki değişim miktarının, cisim ve çevre sıcaklıkları arasındaki farkla orantılı olduğunu belirtmektedir. Nem içeriği değişmez kabul edilen bir ortam içinde bulunan herhangi bir ürünün neminde meydana

gelen değişim Denklem 2.1 ve 2.2’de gösterildiği gibi elde edilebilir (Donalds vd., 1973; Bayhan, 2011). Denklem 2.2’teki diferansiyel eşitliğin çözümlü Denklem 2.3’te verilmiştir.

$$\frac{dM}{dt} = k (M - M_e) \quad (2.1)$$

$$\frac{dM}{M - M_e} = h. dt \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’nin çözümlünden Denklem 2.3 elde edilmiştir.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = a \exp(-kt) \quad (2.3)$$

Burada k: Kuruma hızı sabitini, MR: Nem oranını (boyutsuz), M_e : Denge anındaki nem içeriğini, M_i : Başlangıçtaki nem içeriğini, a: Kurutma boyutsuz sabitini ve t: Kuruma zamanını göstermektedir.

2.2.3. Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler

Kurutmanın gerçekteşebilmesi için öncelikle ürüne ısı verilmesi daha sonra üründen suyun uzaklaştırılması gerekmektedir. Kuruma olayı bir ısı-kütle transferi olduğundan, kuruma hızı, ısı ve kütle transferine doğrudan etki eden faktörler tarafından kontrol edilmektedir. Kuruma hızına etki eden faktörleri incelerken, kurutma ortamındaki hava ile ilgili olarak havanın sıcaklığı, bağlı nemi, havanın hareket hızı ve hareket yönü dikkate alınmalıdır (Ayan, 2010). Kurutulacak ürün ile ilgili olarak ürünün nem miktarı (başlangıç ve sonuç nemleri), boyutları ve buharlaşma yüzeyi genişliği önemli faktörler arasında iken kurutma ekipmanı ile ilgili olarak yapı malzemesinin türü ve özgül ısısı, kurutma cihazının ısı yalıtım durumu, kapasitesi ve boyutları, kurutma yöntemi ve çevre iklimi koşulları etkili faktörler olarak öne çıkmaktadır (Evranoz, 1998; Cemeroğlu ve Acar, 1986).

2.2.3.1. Kurutma Havaının Sıcaklığı

Kurutma hızını etkileyen en önemli faktörlerden birisi kurutma sıcaklığıdır. Yaş ve kuru termometre sıcaklıklarındaki fark büyüdükçe kuruma hızında artış gözlemlenmektedir. Bu orantılı artış kuruma başlangıcında çok belirgin olsa da ilerleyen sürelerde yaş ve kuru termometre sıcaklıklarındaki fark artmış olsa dahi kuruma hızındaki artış aynı oranda olmamaktadır (Güner, 1991; Bayhan, 2011).

Kurutmada hava sıcaklığının artması ile havanın içerisinde su buharı tutma özelliği de artmaktadır ve bu durum, iç kısımlardan yüzeylere doğru ısı transfer hızının artmasına neden olmaktadır. Böylece yüksek buharlaşma hızı oluşur ve kurutmanın süresi kısılır.

Kurutma sıcaklığının istenildiği kadar yüksek sıcaklıklara çıkarılması gıdalar için uygun değildir. Çünkü her gıdanın kurutulabileceği optimum bir sıcaklık derecesi vardır. Kurutma sıcaklığı bu derecelerin üzerinde bir değere çıkarıldığı zaman üründe çatlama, renk değişmesi ve büzüşme gibi kurutma kusurları ve kalite kayıpları meydana gelebilmektedir. Ürün kurutma sıcaklığının altında bir sıcaklıkta kurutulur ise, kurutulan ürünün kalitesi yüksek olsa bile kuruma süresi uzamaktır. Bu nedenle yapılan kurutma işlemlerinde kuruma süresi ve kuruma kalitesi dikkate alınarak en uygun sıcaklıkta kurutma yapılması önerilir (Bayhan, 2011).

2.2.3.2. Kurutma Havaının Bağlı Nemi

Meyve ve sebzeler genellikle ortam havasıyla veya ortam havaının ısıtılmasıyla elde edilen sıcak hava ile kurutulmaktadır. Kullanılan sıcak hava, kuru hava ve su buharı karışımı olarak ele alınır ve kuru havanın moleküler ağırlığı 28,97 g/mol olup belirli oranlarda azot, oksijen, argon ve karbondioksit gibi gazların karışımından oluşmaktadır (Cemeroğlu, 2013). Genellikle, kurutma işleminde kullanılan havanın içinde ağırlık olarak 1/10 oranında su buharı bulunmaktadır ve bu orandaki herhangi bir değişim kurutmada kullanılan havanın özelliklerinin değişmesine neden olabilmektedir (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.3.3. Kurutma Havaının Hızı

Kurutmanın uygun şekilde yapılabilmesi için kurutma havaının hızı da oldukça önemlidir. Hava hızı arttıkça kuruma hızı da artmaktadır. Kurutma sırasında, ürün yüzeyinde daima durgun bir buhar filmi oluşur ki, bu filmin oluşması önlenir veya uzaklaştırılması sağlanırsa su daha hızlı buharlaşmaktadır (Cemeroğlu, 2013). Kurutma havaının hızı bu buhar filminin ortamdan uzaklaşmasını sağlayarak kuruma hızını arttırıcı etkide bulunmaktadır. Ancak bu etki belli bir hava hızına ulaşıncaya kadar görülür ve genellikle 5 m/s'den fazla bir hava hızının kuruma hızı üzerine etki etmediği saptanmıştır (Cemeroğlu ve Acar, 1986). Kurutma sırasında kullanılan hava hızının aşırı yüksek olması ürünün dış kısımlarını kurutacağından dolayı iç kısımdan yüzeye su transferinde bozulmalar meydana gelmektedir. Kurutma havası hızının istenilen seviyede olmaması durumunda ise gıda yüzeyindeki nemin uzaklaştırılmasında sorunlar yaşanmakta ve kurutma sağlıklı bir şekilde gerçekleşmemektedir. Bu nedenlerden dolayı, kurutma havaının hızının istenilen seviyede olması oldukça önemlidir ve deneysel olarak araştırılması ürün kurutulmasına önemli katkılar sağlamaktadır (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.3.4. Kurutulacak Gıdanın Kimyasal Özellikleri

Kurutulacak ürünün kimyasal özellikleri ürünün kuruma hızına önemli derecede etki etmektedir. Ürün içeriğinde bulunan tuz, şeker gibi küçük moleküllü ve üründe çözünmüş halde bulunan kimyasal bileşenler ürünün su buhar basıncını etkilediğinden dolayı kurutma hızını önemli ölçüde değiştirmektedir (Cemeroğlu vd., 2003). Küçük, moleküllü çözünmüş maddelerce zengin bir gıdanın, bu maddelerce daha fakir olan gıdaya göre daha zor kuruduğu görülmektedir. Çözünmüş bu maddeler, suyun buhar basıncını düşürdüğünden dolayı suyun buharlaşmasını güçleştirmektedir (Cemeroğlu, 2013). Aynı şekilde ürünün yağ içeriği bakımından zengin olması kuruma hızını sınırlayan önemli bir faktördür. Yağın sürekli faz olduğu bir emülsiyonda, su damlacıkları yağ tarafından izole edileceğinden, buharlaşarak suyun uzaklaşması oldukça güç olmaktadır. Serbest suyun üründen uzaklaşması oldukça kolay iken nişasta, pektin ve diğer gam maddelerince oluşturulan kolloidal jel içinde tutulan suyun üründen uzaklaştırılması oldukça zordur ve bu durum nişasta ve pektince zengin ürünlerin kurutulmasını zorlaştırmaktadır. En zor uzaklaştırılan su ise, bağlı sudur (Cemeroğlu ve Acar, 1986).

2.2.3.5. Kurutulacak Ürünün Fiziksel Özellikleri

Kurutulacak olan ürünün fiziksel yapısı ve kurutma yapılacak ürünün kurutma sırasında bütün veya dilimlenmiş olması kurutma hızına etki eden diğer fiziksel faktörlerdendir (Cemeroğlu vd., 2003). Kurutma yapılacak meyve ve sebzelerin olgun, sağlam, yarasız ve beresiz olması, çürük olmaması ve böcek yeniği bulunmaması, renginin ve tadının tam olgunlaşmış olması istenmektedir (Anonim, 2008).

Kurutulacak ürünün boyutu, ısı iletimini etkileyeceğinden dolayı kurutma hızını etkilemektedir. Ürünün yüzey alanı ne kadar büyük olur ise ısı iletimi o derece iyi gerçekleşmekte ve ürün daha kısa zamanda kurutulabilmektedir. Kuruma hızı ürünün yüzey alanı ile doğru orantılı iken, ürünün kalınlığı ile ters orantılıdır (Yağcıoğlu, 1999). Kurutma hızını artırmak için kurutulacak ürün küçük parçalara ayrılmalı veya dilimlenmelidir. Bu sayede, kurutulacak ürünün yüzey alanı artırılarak daha fazla su buharlaşması sağlanmakta ve kurutma hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Kurutulacak ürün çok küçük parçalara ayrılır ise yanmalar meydana gelebilir ve bu nedenle ürün için en uygun dilim kalınlığı belirlendikten sonra kurutma işlemi gerçekleştirilmelidir (Cemeroğlu ve Acar, 1986; Yağcıoğlu, 1999).

2.2.3.6. Kurutulacak Ürün Miktarı

Kurutucuya yerleştirilen ürün miktarı ısı transferini, hava akımı geçişini ve ortamdan nemin uzaklaştırılmasını büyük ölçüde etkilemektedir. Kurutucuya gereğinden fazla ürün yerleştirilmesi, altta kalan ürünlerin kurumama ihtimalini ortaya çıkarmaktadır. Kurutucuya gereğinden az ürün konulduğunda ise de sisteme gereğinden fazla enerji verileceğinden dolayı gereksiz enerji sarfiyatının meydana gelmesinin yanı sıra fazla enerjiden dolayı üründe yanma meydana gelebilmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı sağlıklı bir kurumanın sağlanabilmesi için kurutucuya yerleştirilmesi gereken ürün miktarının doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir (Cemeroğlu ve Acar, 1986).

2.2.3.7. Kurutma Sırasında Ürünün Karıştırılması

Kurutulacak ürünün yerleştirildiği raf veya tepsilerin sürekli veya ara sıra yerlerinin değiştirilmesi, ürünlerin hava ile temas edeceği yüzeylerin değişmesi anlamına gelmektedir. Bu durum ısı transferini 1,5-2,0 kat arttırarak daha hızlı bir kuruma sağlamaktadır. Benzer bir uygulama kurutma havasının hızı, ürünün havada asılı kalması için gerekli kritik hız değerine kadar yükseltilerek, kurutulan gıdanın hava içinde adeta yüzdüğü ‘akışkan yatak’ uygulaması şeklinde de yapılabilmektedir (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.3.8. Kurutma Ortamı Atmosfer Basıncı

Su, standart atmosfer basıncı (101,325 kPa) altında 100°C’de kaynamaktadır. Ortam basıncı düşürüldüğünde suyun daha düşük sıcaklıklarda kaynaması mümkün hale gelmektedir. Ürün standart atmosfer basıncından daha düşük bir basınç altından kurutulur ise, ürün içindeki su daha düşük sıcaklıklarda buharlaştırılabilir ve bu durum, kuruma hızının artmasına ve ürünün daha kısa sürede kurummasına olanak sağlar (Cemeroğlu, 2013). Düşük basınçta kurutma, sıcaktan etkilenen ürünlerin kurutulmasında büyük önem arz etmektedir (Saldamlı ve Saldamlı, 1990). Kuruma hızının bu yöntem ile arttırılması, oldukça pahalı vakum düzeneklerine gerek duyulması ve fazla güç tüketimleri nedeniyle pazar değeri yüksek ürünlerde sınırlı olarak kullanılmaktadır (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.4. Başlıca Gıda Kurutma Yöntemleri

Meyve ve sebzelerin kurutulmasında temel olarak üç farklı kurutma yöntemi kullanılmaktadır; (i) doğal kurutma (gölgede veya güneş altında), (ii) normal atmosfer koşullarında kesikli (raflı ve kule tipi kurutucularla) ve sürekli (taşıyıcı bantlı tünel, akışkan yataklı, püskürtmeli, döner tamburlu ve mikrodalga kurutucularla) kurutma ve

(iii) vakum altında kurutma (vakum kurutucu, raflı/döner tamburlu kurutucu ve dondurarak kurutma) (Tripathy ve Kumar, 2009).

Doğal ve sıcak havalı kurutucularla kurutma düşük işletme giderleri nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılır. Doğal kurutma işleminde kurutma genellikle doğada güneş ışığı altında kendiliğinden gerçekleşmekte ve “solar kurutma” bilinen en eski yöntemlerdendir. Örneğin baklagiller ve tahıllar tarlada güneş ışığı altında kendiliğinden kurumakta ve dayanıklı hale gelmektedir. Güneş altında kurutmada ürünün nem içeriğinin azalmasıyla kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonların hızının düşmesine olanak sağlamış olsa da kurutma işlemi için güneş ışığına ihtiyaç duyulması nedeniyle kurutmanın her zaman ve her yerde bu şekilde sağlanması olanaksız olabilmektedir (Yaldız vd., 2001; Cemeroğlu vd., 2003; Sacilik ve Elicin, 2006). Bunun yanında, her ürün güneşte kurutmaya uygun olmayabilir (Lahtasni vd., 2004).

Güneş ışığı altında kurutma işlemi her ne kadar en eski kurutma yöntemlerinden biri olsa da yukarıda belirtilen dezavantajları yanında ürünlerin yağmur, toz, toprak ve böcek gibi dış etkenlere maruz kalması ürünlerde kalite kaybını arttırmakta ve bazen ürünlerin tüketilemeyecek duruma gelmesine sebep olabilmektedir (Cemeroğlu, 2013). Ürünlerde meydana gelen bu kalite kayıpları, uluslararası pazarlarda önemli sorunlara neden olabilmektedir (Yaldız vd., 2001; Lahtasni vd., 2004; Sacilik ve Elicin, 2006). Ayrıca doğal kurutma yöntemi ile pazarın talep ettiği yüksek kalite ve standartlara ulaşmak ve büyük miktarlardaki ürünü işlemek her zaman mümkün olamamaktadır (Soysal ve Öztekin, 2001).

Güneşte veya gölgede kurutma işlemi en ekonomik kurutma yöntemlerinden olmasının yanında, belirtilen olumsuzluklarından dolayı farklı kurutma yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Düşük basınç altında ve mikrodalgalı kurutma sistemleri üzerinde en çok araştırma yapılan teknikler arasındadır. Çok değişik kurutma yöntemlerine ve sanayideki özel isteklere bağlı olarak 400’den fazla kurutucu imal edilmiş olup, bunlardan 50 kurutucu tipi ticari olarak kullanılır durumdadır (Majumdar, 2007). Günümüzde yaygın olarak kullanılan kurutucu tipleri Çizelge 2.4’te özetlenmiştir.

Çizelge 2.4. Günümüzde en çok kullanılan kurutucu tipleri (Majumdar, 2007)

Çalışma Kriteri	Kurutucu Tipi
Kurutucunun çalışma şekli	Kesikli, sürekli*
Kurutma ortamının ısı transfer şekli	Konveksiyon*, kondüksiyon, radyasyon, elektromagnetik alan, kombine
Kurutulacak ürünün konumu	Durgun, hareketli, titreşimli, dağıtılmış
Kurutulacak ürünün fiziksel durumu	Katı, sıvı, pelte, öğütülmüş, cips, sürekli tabaka
Kurutucu basıncı	Vakum, atmosferik
Kurutucu akışkan	Hava*, süper ısıtılmış buhar, uçucu gazlar
Kurutma sıcaklığı	Kaynama noktasının altında*, kaynama noktasının üzerinde, donma noktasının altında
Kurutulacak ürün ve kurutucu akışkanın birbirine göre relatif hareketi	Paralel, karşı, karışık, çapraz akışlı
Kurutma aşaması	Tek aşama*, çok aşama
Kuruma süresi	Kısa (<1 dakika, orta (1-30 dakika), uzun (>30 dakika)

*En yaygın olarak kullanılan kurutucu tipleri

Meyve sebzeler kurutulmadan önce daha sağlıklı bir kurutma gerçekleşmesi için bir takım ön işlemde geçirilmektedir. Bu ön işlemler ürünün nemini hızlı kaybetmesini, üründeki renk değişimlerinin en aza indirilmesini, ürün tat ve dokusunun yanı sıra üründe bulunan bazı etken maddelerin korunmasını sağlayan işlemlerdir. Ürünün yıkanması üründe bulunan toz, toprak, çamur ve mikroorganizma gibi ürünün kalitesini olumsuz etkileyen faktörlerden ürünü korumak amacıyla yapılan bir ön işlemdir. Yıkamadan sonra hijyenik kalitesini arttırmak amacıyla kurutulacak ürüne durulama işlemi yapılmaktadır. Ayıklama işleminde ise, ürünün içindeki yabancı maddeler uzaklaştırılır. Bazı ürünlerin kabuklarının temizlenerek kurutulması gerektiği için kabuk soyma basamağı önemlidir. Doğrama ya da dilimleme yüzey alanının artırılması için gereklidir. Bu tür işlemler kurutmanın doğru yapılması için ürüne uygulanan ön işlemlerdir (Anonim, 2008).

2.2.4.1. Sıcak Hava ile Kurutma

Meyve sebze kurutulmasında kullanılan kurutucular ürünün özelliklerine uygun olmalıdır. Farklı ürünlerin kurutulması için değişik türde çok farklı kurutucu sistemler geliştirilmiştir. Bu kurutucular kurutma ortamına verdikleri ısı enerjisini taşıma şekillerine göre konveksiyonlu, kondüksiyonlu ve ısımalı kurutma olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Yağcıoğlu, 1999). Konveksiyonlu kurutmada, ısının ortamdan ürüne taşınması konveksiyon (taşınım) yoluyla gerçekleşmektedir. İstenilen sıcaklığa kadar ısıtılan hava fanlar yardımı ile kurutulacak ürüne ya doğrudan üzerine verilmekte ya da içinden geçirilmekte olup, ortam ile kurutulacak ürün arasında ısı alışverişi olmaktadır. Kondüksiyonlu kurutmada ise kurutulacak ürüne ısı enerjisi ısıtılmış yüzeyden kondüksiyon (iletim) yoluyla aktarılmaktadır. Kurutulan ürüne iletilen ısı, sıcak

yüzeye değen yaş materyalin ısı iletim özelliklerine (kondüktivitesine) ve sıcak yüzeyin ısı iletim katsayısına bağlıdır. Son olarak ışınlama kurutmada, kurutma için gerekli ısı enerjisi yaş materyale, elektromanyetik radyasyon (ısıma) yöntemi ile iletilmektedir. Bu ışınlara, içinden geçtikleri ortamı ısıtmaz ancak kendilerini absorbe eden (soğuran) cisimleri ısıtmaktadırlar.

Sıcak havalı kurutucular, havanın gıdadan geçirilmesi tipine göre (i) paralel, (ii) ters, (iii) doğru ve (iv) çapraz akışlı olmak üzere kendi aralarında sınıflandırılmakta olup havanın elektriksel yöntemle ısıtıldığı bu kurutucular düşük sıcaklığa gereksinim duyulan gıdaların kurutulmasında tercih edilmektedirler (Saldamlı ve Saldamlı, 2004). Kurutucular kabin tipi, tünel tipi, akışkan yataklı ve döner tipli kurutucular olarak da gruplara ayrılabilir. Kurutucu tipinin seçimi sırasında kurutulacak ürünün özellikleri kurutmanın yapılacağı mevsim, kurutma süresi, iş gücü ve enerji gereksinimi ile işletmede kurutucu için ayrılacak yer dikkate alınarak seçilebilmektedir (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.4.2. Kabin Tipi Kurutucular

Sıcak havalı kurutuculardan olan kabin tipi kurutucularda, kurutulacak meyve ve sebzeler bütün, dilimlenmiş veya püre halinde ızgaralı, delikli kerevetlere (şilte) ya da düz tavalara ince bir tabaka oluşturacak şekilde yerleştirilmekte ve bu kerevet ya da tavalara da kabin içine koyulmaktadır. Belirli bir yerden kabin içine verilen sıcak hava, kerevetler arasında dolaşmakta ve buharla doymuş hava belirli bir kanaldan dışarıya atılmaktadır (Saldamlı ve Saldamlı, 2004). Havanın sirküle ettirildiği tiplerde önce havanın üründen yüklendiği nemin bir silikajel yastığından ya da bir yoğunlaştırıcıdan (kondenser) geçirilerek alınması ve havanın tekrar ısıtıcıya gönderilmesi gerekmektedir (Cemeroğlu, 2013). Havanın tek kullanımdan sonra dışarı atıldığı tiplerde çıkış kanalının taze hava emiş kanalından uzakta olması gerekmektedir. Aksi halde atılan nemli hava, taze hava emiş kanalında emilecek ve kuruma verimi düşecektir (Yağcıoğlu, 1999).

Kabin tipi kurutucular çok taneli ve dilimlenerek kurutulacak ürünler için uygundur (Olgun ve Rzayev, 2000). Bu tip kurutucularda havanın hızı, sıcaklığı ve nemi kerevetlerin her yerinde aynı düzeyde olmadığından dolayı kerevetlerin her noktasında kuruma hızı da aynı değildir. Hava akışının yönü değiştirilerek bu durum önlenmektedir (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.4.3. Tünel Tipi Kurutucular

Tünel tipi kurutucular, gıda ürünlerini kurutmak için kullanılan endüstriyel ölçekli ekipmanlardır. Bu kurutucular, büyük miktarlarda gıda maddesinin verimli bir şekilde kurutulmasını sağlamakta ve genellikle meyve, sebze, et ve balık gibi ürünlerin kurutulmasında kullanılmaktadır. Bu sistemler, uzun ve dar bir tünel şeklinde tasarlanmıştır. Tünelin bir ucundan ürünler yüklenmekte ve diğer ucundan kurutulmuş olarak çıkmaktadır. Ürünlerin kurutucuya giriş ve çıkışlarında sıcaklık kayıplarını önlemek amacıyla gerekli önlemler alınmalıdır (Güngör ve Özbalta, 1997). Genellikle raf veya tavalara üzerine yerleştirilen ürünler, raylı arabalara aralarında boşluklar kalacak şekilde istiflenmektedir. Ürünler, tünelin içinden bir konveyör bant veya bu tepsi sistemi üzerinde taşınmakta olup, bu tasarım, ürünlerin kurutma süresi boyunca tünel boyunca hareket etmesini sağlamaktadır. Hava akış yönü kurutulacak ürüne paralel, zıt veya her iki şekilde olabilmektedir (Saldamlı ve Saldamlı, 2004).

2.2.4.4. Bant Tipi Kurutucular

Ürünlerin bir bant üzerinde taşınarak kurutulmasını sağlayan bant tipi kurutucular, meyve, sebze, tahıl, et ve balık gibi çeşitli gıda ürünlerinin yanı sıra kimyasal ve farmasötik ürünlerin kurutulmasında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip kurutucular, genellikle yatay bir konveyör bant sistemi üzerine inşa edilmekte ve ürünler, bu bant üzerinde kurutma odası boyunca taşınmaktadır. Bant üzerinde hareket eden ürünlerin üzerine sıcak hava üflenmesiyle kurutma gerçekleştirilmektedir. Hava bantlara paralel ya da dik yönde verilebilmektedir (Adedeji vd., 2008). Ürünlerin daha etkili bir şekilde kurutulması için çok katmanlı bant sistemleri de vardır. Önemli özelliklerinden biri prosesin kolay ayarlanması ve ürünlerin zedelenmeden kurutulabilmesidir (Saldamlı ve Saldamlı, 2004). Sürekli çalışan ve ürüne doğrudan temas eden bant tipi kurutucular, yüksek verimlilik sunması nedeniyle endüstriyel kurutma işlemlerinde yaygın bir tercih haline gelmiştir.

2.2.4.5. Akışkan Yatak Kurutucular

Akışkan yatak kurutucuları, özellikle granül, toz veya küçük parçacık formundaki gıdaların kurutulmasında etkilidir. Bant tipi kurutucuların geliştirilmiş halidir. Ürünün kurutulacağı bölüm bir tekneye benzemektedir. Kurutma işlemi sırasında, katı parçacıklar bir hava veya gaz akışı ile süspansiyon haline getirilmektedir. Parçacıkların bir sıvı gibi davranmasını sağlayan bu işlem nedeniyle sistem “akışkan yatak” olarak adlandırılır. Bu

tip kurutucularda 135°C sıcaklığa çıkılabildiği için özellikle sebzeler çok kısa sürede kurutulabilmektedir (Saldamlı ve Saldamlı, 2004). Parçacıkların etrafında sürekli hareket eden sıcak hava veya gaz sayesinde yüksek ısı transferi sağlanmaktadır. Bu sayede, parçacıkların hızlı ve homojen bir şekilde kuruması mümkün olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta meyvelerin öz suyunu salıp birbirine yapışma riski olacağından dolayı bu kurutucu tipi meyve kurutmak için uygun değildir (Cemeroğlu ve Acar, 1986). Akışkan yatak kurutucular, homojen kurutma ve yüksek verimlilik sağladıkları için endüstriyel kurutma işlemlerinde sıklıkla kullanılır. Gıda, kimya, ilaç ve tarım endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmakta olan bu tip kurutucular, özellikle toz halindeki gıda ürünleri, kimyasal maddeler ve farmasötik bileşenlerin kurutulmasında da tercih edilir.

2.2.4.6. Sandık Tipi Kurutucular

Genellikle küçük ölçekli kurutma işlemleri için kullanılan sandık tipi kurutucular, basit ve etkili bir kurutma sağlamaktadır. Çeşitli gıda ürünlerinin yanı sıra bitkisel ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında da kullanılır. Belirli seviyede nemin (%10-15) altına kadar kurutulmuş ürünlerin nemini daha alt seviyeye (%3-6) indirmek için kullanılmaktadır (Cemeroğlu, 2013). Genellikle ahşap veya metalden yapılmış bir sandık veya dolap şeklinde olan bu tip kurutucular içerisinde raf veya tepsiler bulunmaktadır. Bu tepsilere kurutulacak ürünler yerleştirilmekte ve kurutma işlemi, sandığın içinden geçen sıcak hava akışı ile gerçekleştirilmektedir. Bu tip kurutucularda hava sıcaklığı ve havanın nemi uygun seçilmelidir. Genel olarak 40-45°C arası sıcaklıklar kullanılmaktadır (Saldamlı ve Saldamlı, 1990). Basit tasarımları ve düşük maliyetleri nedeniyle küçük ölçekli üreticiler tarafından meyve, sebze, otlar, baharatlar ve diğer tarımsal ürünlerin kurutulmasında yaygın olarak kullanılan bu kurutucular oldukça ekonomiktir.

2.2.4.7. Püskürtmeli Kurutucular

Püskürtmeli kurutucular, sıvı veya bulamaç formundaki gıdaların hızlı ve verimli bir şekilde kurutulması amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle süt tozu ve çözünebilir kahve ve kahve kreması gibi ürünlerin üretiminde yaygın olarak uygulama alanı bulan bu işlem, sıvı veya bulamaç halindeki gıdanın bir atomizer veya püskürtme nozulu vasıta ile çok ince damlacıklar halinde püskürtülmesiyle başlamaktadır. Püskürtülen damlacıklar, kurutma odasına giren sıcak hava akışı ile temas etmekte ve sıcak hava, damlacıkların içindeki nemi hızla buharlaştırarak katı partiküller haline gelmelerini sağlamaktadır (Cemeroğlu, 2013). Kurutulacak ürünler homojen olmalıdır ve yüksek yüzey alanı ve

hızlı ısı transferi sayesinde kurutma işlemi genellikle 5-15 saniye içerisinde gerçekleşmektedir (Saldamlı ve Saldamlı, 2004). İşlem sonunda elde edilen ürün, genellikle ince toz veya granül formundadır. Hızlı ve verimli kurutma kapasiteleri sayesinde püskürtmeli kurutucular, gıda, kimya, ilaç ve kozmetik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmakta ve özellikle ısıya duyarlı ürünlerin kurutulmasında tercih edilmektedir (Güngör ve Özbalta, 1997).

2.2.4.8. Vakum Altında Kurutma

Vakum altında kurutma işlemi, düşük basınç ortamında gerçekleştirilmektedir. Standart atmosfer basıncının altında bir basınç ortamı sağlayan vakumlu kurutucular, suyun ve diğer uçucu bileşenlerin daha düşük sıcaklıklarda buharlaşmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle ısıya duyarlı ürünlerin kurutulmasında sıklıkla tercih edilmektedir. Vakum altında kurutma yönteminde, diğer kurutma yöntemlerine göre daha hızlı bir kuruma gerçekleşmektedir (Erbay ve Küçüköner, 2008). Yüksek sıcaklıkta hızla kuruma nedeniyle yüzeyi çabuk kuruyarak sertleşen ve bu nedenle iç katmanlardan yüzeye nem difüzyonu engellendiği için ortası nemli kalan ürünlerin kurutulmasına da uygundur (Yağcıoğlu, 1999). Vakumlu kurutucular, tepsi tipi, tambur tipi veya dondurarak kurutma gibi farklı tasarımlarda olabilmektedir. Düşük sıcaklıkta kurutma, enerji tasarrufu sağlamak ve ürünlerin besin değerleri ve kalite özelliklerinin korumasına yardımcı olmaktadır. Vakum altında uygulanan kurutmada hava olmadığı için renk kaybı ve kolaylıkla okside olabilen bileşiklerin kayıpları daha az düzeydedir (Saldamlı ve Saldamlı, 2004). Ancak, vakumlu kurutucular dış basınca dayanıklı sağlam ve sızdırmaz bir vakum hücresi ile vakum sağlayacak düzeneklere ihtiyaç duyması sebebi ile pahalı düzeneklerdir (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.4.9. Mikrodalga Kurutma

Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır ve görünür ışık ile radyo dalgaları arasında yer almaktadır. Dalga boyları 1 mm – 1 m arasında ve frekansları 300 MHz – 300 GHz arasında değişmekte olan mikrodalgaların ısıtma frekansları endüstriyel, bilimsel ve tıbbi kullanımlar için belirlenmiştir (Baysal vd., 2011). Mikrodalga hacimsel ısıtma sağlayan di-elektrik ısıtma yöntemleri arasındadır.

Su molekülündeki oksijen atomu, hidrojen atomlarına göre daha elektronegatif olduğu için, elektronları kendine doğru çekmekte ve bu da oksijen tarafında kısmi negatif yük, hidrojen tarafında ise kısmi pozitif yük oluşmasına neden olmaktadır (Baysal vd.,

2011). Ortamdaki mikrodalga enerjisi varlığında, bu dipol moleküller hızlı bir şekilde dönmekte ve bu da gıdaların içindeki su moleküllerinin doğrudan ısıtmasıyla sonuçlanmaktadır (Baysal vd., 2011). Mikrodalgalı kurutucularda bu, suyun buharlaşmasına ve malzemenin kurumasına neden olmaktadır. Mikrodalga enerjisi, malzemenin iç kısmına doğrudan nüfuz ederek hızlı bir kurutma sağlamaktadır. Özellikle kalın veya yoğun malzemelerin kurutulmasında bu önemli bir avantajdır. Isının ürün içinde oluşması, mikrodalgaların ürün penetrasyonunun fazla olması ve su molekülleri tarafından absorbe edilmesinden dolayı, geleneksel yöntemden daha kısa sürede ürünler istenilen sıcaklık seviyesine getirilebilmektedir (Ramesh vd., 2002). Böylece, geleneksel yöntemlerden daha hızlı ısınma sağlanırken, kurutma için enerji gereksinimi düşük ve enerji verimi yüksek olmaktadır. Mikrodalgalı kurutucular, çevreyi ısıtmadığı için enerji verimliliği açısından avantajlıdır. Ayrıca ekipmanlarının kolay temizlenebilmesi, az yer kaplaması, ambalajlı gıdalara da uygulanabilir olması ve besin değerini korumasından dolayı geleneksel yöntemlere alternatif bir yöntemdir (Başkaya Sezer ve Demirdöven, 2015). Mikrodalgalar gıda endüstrisinde pastörizasyon, sterilizasyon, buz çözme, kurutma, pişirme ve ısıtma gibi pek çok işlemde değişik amaçlarla kullanılabilmektedir. Gıdaların mikrodalga ısıtılmasına frekans, mikrodalga gücü, ısıtma hızı, sıcaklık, gıdanın kütlesi, su içeriği, yoğunluk, fiziksel geometri, elektriksel iletkenlik, di-elektrik ve termal özellikler etki etmektedir (Konak vd., 2009).

2.2.4.10. Dondurarak Kurutma

“Liyofilizasyon” olarak da bilinen dondurarak kurutma, ısıya duyarlı ve hassas olan gıda, biyolojik materyal ve ilaç gibi ürünlerin su içeriğini azaltmak için tercih edilen önemli bir kurutma yöntemidir (Saldamlı ve Saldamlı, 2004). İşlemde gıda ürünü önce düşük sıcaklıklarda dondurularak içerdiği suyun katı hale (buz) geçmesi sağlanmaktadır. Donmuş haldeki kurutulacak ürün düşük basınçlı bir ortama (vakum) yerleştirilmekte ve bu aşamada, buz doğrudan gaz haline (su buharı) geçmektedir. “Süblimasyon” olarak adlandırılan bu aşamada ürünün içindeki suyun büyük bir kısmı uzaklaştırılmaktadır (Cemeroğlu, 2013). Süblimasyon sonunda, ürünün içinde kalan bağlı su molekülleri de genellikle biraz daha yüksek sıcaklıklarda uzaklaştırılmaktadır. Ürünlerin besin değerlerini, tatlarını, renklerini ve yapısal bütünlüklerini koruyan dondurarak kurutma, diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadır ve suyun ürün yapısında sıvı halde bulunmamasından dolayı en kaliteli ürün bu yöntemle elde edilen ürün olmaktadır (Ratti, 2001; Asami, 2003). Dondurularak kurutulan üründe tat ve

aroma kayıpları en az düzeyde olmaktadır. Dondurarak kurutulmuş ürünler, düşük nem içeriği nedeniyle uzun süre saklanabilir ve bozulmaya karşı dirençlidir. Dondurarak kurutma, özellikle yüksek kaliteli ve hassas ürünlerin kurutulmasında etkili bir yöntem olup, ürünlerin özelliklerini koruyarak uzun süreli saklama imkânı sunmaktadır. Dondurarak kurutma sırasında ürünün gözenek yapısı değişmediğinden dolayı bu ürüne tekrar su verildiğinde suyu içine alabilmekte ve rehidrasyon yeteneği iyi olan ürünler elde edilmektedir (Cemeroğlu, 2013). Kurutma süresinin uzun olması, gerekli ekipmanın pahalı olması ile enerji maliyetlerinin yüksek olması bu yöntemin yaygın bir şekilde kullanımını sınırlandırmaktadır (Huang vd., 2009).

2.3. Rehidrasyon

Rehidrasyon kurutulmuş bir ürünün kurutma ile kaybettiği suyu tekrar geri alabilme kapasitesidir. Kurutma sırasında meydana gelen kimyasal ve yapısal değişimler, kurutma koşulları, kurutma öncesi uygulanan ön işlemler ve ürün kompozisyonu rehidrasyonu etkileyen önemli faktörlerdendir (Cemeroğlu, 2013). Kurutma sırasında yapısal bozulmalar ne kadar az ise rehidrasyon da o kadar iyi olmaktadır (Marques vd., 2009). Kurutulan ürünlerin rehidrasyon sırasında su alma eğilimlerinin yüksek olması istenmektedir. Su alma yeteneğinin yüksek olması, kurutulmuş gıdanın kullanıldığı yerlerde aromasını dışa vermesi açısından önem arz etmekte olup, yapılan çalışmalarda rehidrasyon parametresinin, uygulanan ön işlemlerden ve örnek bileşiminden etkilendiği, fiziksel ve kimyasal değişim gösterdiği belirtilmektedir (Doymaz, 2004).

2.4. Vakum İmpregnasyon İşlemi ve Etkileyen Faktörler

Vakum impregnasyon işlemi, ozmotik dehidrasyon işlemini hızlandıran bir teknolojidir. Ozmotik dehidrasyon, ozmotik çözelti içerisinde bitki dokusundan suyun belli oranlarda uzaklaştırılması için kullanılan yaygın bir yöntemdir ve dondurma, dondurarak kurutma, mikrodalga kurutma, havalı kurutma, vakumlu kurutma gibi koruma yöntemlerine tabi tutulan meyve-sebzelere besinsel, duyu ve fonksiyonel özelliklerini geliştirmek ve bütünlüklerini korumak için uygulanan ön işlemdir (Silva vd., 2014).

Vakum impregnasyon işlemi, meyve ve sebzelerin gözenekli yapılarının beslenme açısından önemli bileşenler ile zenginleştirilmesi ve fonksiyonel açıdan zengin ürünlerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır (Castagnini vd., 2015; Mao vd., 2017). Vakum altında gerçekleştirilen ozmotik dehidrasyon işlemi verimliliğin artırılmasının yanı sıra, işlem süresinin kısalması gibi değişik avantajlar sunmaktadır (Fito ve Chiralt, 2000). İşlem

sırasında gıdalarda doku hasarını en az seviyeye indirmesi, ürünün rengini, aroma ve lezzetini koruması, gıdalardaki ısıya hassas bileşenlerin korunmasında etkili olması bu yöntemi önemli kılmaktadır (Karacaoğlu vd., 2016). İşlemin başarılı olması için meyve sebzenin gözenek yapısı, çeşidi, yüzey alanı, kalınlığı, şekli, uygulanan vakum ve uygulama süresi, vakum sonrası restorasyon süresi, impregnasyon çözeltisinin konsantrasyonu (izotonik, hipertonic veya hipotonik), viskozitesi, sıcaklığı, çözeltide kullanılan çözgenin çeşidi ve moleküler ağırlığı, karıştırma işlemi ve çözelti/gıda oranı önemlidir (Martinez-Monzo vd., 1998; Salvatori vd., 1998; Tappi vd., 2016).

Vakum impregnasyon işlemi genellikle tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmakta olup (Moreno vd., 2011a), kurutma öncesi uygulanan ön işlemlerden bir tanesidir. Bu ön işlem ile ozmotik dehidrasyon hızlanmaktadır. İşlem, kurutma işlemine maruz bırakılan meyve ve sebzelerin duysal, fiziksel ve fonksiyonel özelliklerini geliştirmek amacı ile uygulanmakla birlikte, ürün maliyetini de azaltmaktadır (Moreno vd., 2011a; Silva vd., 2014). Uygulama ile gözenekli dokunun içerisine su geçişi kontrollü biçimde sağlanmaktadır ve bu durum ürünün yapısal bütünlüğünü etkilememektedir (Fito, 1994).

İşlem sırasında meyve dokusunun yumuşamasını önlemek amacı ile kalsiyum tuzları kullanılabilmektedir. Kalsiyum tuzları, dokuda bulunan pektin ile çapraz bağ oluşturarak meyve sebzenin yumuşamasını engeller (Yılmaz ve Bilek, 2017). Kalsiyum, doku sertliğini korumasının yanı sıra iyi bir elektrik ileticidir (Anonim, 2021). Kalsiyum tuzları sulu çözeltilerde iyonlarına ayrılabilmekte ve bu da onların elektriği iletmesinde önemli rol oynamaktadırlar. Vİ çözeltilerinde kalsiyum tuzu olarak, kalsiyum glukonat, kalsiyum klorür, kalsiyum laktat ve kalsiyum kazeinat kullanılmaktadır. Üründe tat değişikliğine neden olmamasından dolayı, çoğunlukla kalsiyum laktat kullanımı tercih edilmektedir (Yılmaz ve Bilek, 2017). Moreno vd. (2011b) armutların ozmotik dehidrasyonunu hem atmosferik basınçta hem de vakum impregnasyon işlemiyle 30, 40 ve 50°C sıcaklıkta gerçekleştirmiştir. Bu sıcaklıklara ulaşmak için, impregnasyon sıvısının ısıtılması amacıyla ohmik ısıtma kullanılmıştır. Vİ işleminde impregnasyon sıvısı (65°Brix sakaroz çözeltisinde potasyum sorbat ve CaCl_2 (Vİ sıvısına uygulanan ohmik ısıtma sırasında sıvının elektriksel iletkenliğini arttırmak ve bitki doku sertliğini korumak için kullanılmıştır.) ısıtılmış ve 50 mbar basınçta 5 dakikalık vakum uygulanmıştır. Atmosferik basınçta ise konvansiyonel ısıtma ile impregnasyon sıvısı ısıtılmıştır. Toplamda 5 saat ozmotik dehidrasyon sonunda ürünlerdeki bazı özellikler belirlenmiştir. Benzer şekilde bir başka çalışmada da (Moreno vd., 2012) çileklerin 3 saat boyunca

ozmotik dehidrasyonunda, Vİ sıvısının 30°C sıcaklığa ısıtılmasında ohmik ısıtmadan yararlanılmıştır. İmpregnasyon sıvısının (65°Brix sakaroz çözeltisinde potasyum sorbat ve CaCl_2) elektriksel iletkenliğini arttırmak ve çileklerin doku sertliğini korumak amacı için yine CaCl_2 kullanmışlardır.

Moreno vd. (2016) folik asitçe zenginleştirilmiş elma cipsi üretiminde, üç farklı sıcaklıkta (30, 40 ve 50°C) Vİ işlemi uygulamak için impregnasyon sıvısını (elma suyu, folik asit, CaCl_2 ve potasyum sorbat) ısıtmak için ohmik ısıtmayı kullanmışlar ve elma dilimleri (5mm) 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda 1,5 m/s hava akış hızında konvektif bir etüvde farklı sürelerde kurutulmuştur. Bu çalışmada, Vİ işlemi esnasında, impregnasyon sıvısı ohmik ısıtmayla ısıtılmış, vakum 5 kPa basınçta 5 dakika süre ile uygulanmış ve CaCl_2 impregnasyon sıvısının ohmik ısıtma sırasında elektriksel iletkenliğini arttırmak ve elmaların doku sertliğini korumak amacıyla kullanılmıştır.

Vakum impregnasyon işlemi ürüne bir impregnasyon hücresi içerisinde uygulanmakta ve bir vakum regülatörü tarafından vakum seviyesi ayarlanmaktadır. Basit bir Vİ sistemini oluşturan kısımlar Şekil 2.1’de sunulmaktadır.



Şekil 2.1. Basit bir vakum impregnasyon sistemini oluşturan kısımlar (A: Vakum regülatörü, B: İmpregnasyon hücresi, C: Vakum pompası)

Hammaddenin yapısı, şekli ve büyüklüğü, impregnasyon çözeltisinin türü, sıcaklığı ve konsantrasyonu, vakum ve süresinin yanında atmosfer basıncı ve süresi Vİ işlemini etkileyen faktörler arasında yer almaktadır (Fito ve Chiralt, 2000).

2.4.1. Hammaddenin Yapısı, Şekli ve Büyüklüğü

Vakum impregnasyonu işleminin meyve işleme süreçlerindeki etkinliğini inceleyen çalışmalar, meyve türünün, şeklinin ve boyutunun işleme sonucuna olan etkisini vurgulamaktadır. Moraga vd. (2009) çilekler üzerine uyguladıkları Vİ işleminde çilekleri 35 mm ile 50 mm arasındaki boyutlarda kestiklerinde en iyi sonucu elde ettiklerini

bildirmişlerdir. Talens vd. (2002) kivi meyveleri üzerine uyguladıkları Vİ işleminde meyve dilimlerini 40 mm boyutunda kestiklerinde maksimum sonuç elde etmişlerdir. Boyut özelliğinin yanı sıra gözenek boyutu iri olan gıdaların Vİ işlemine daha elverişli olduğu bildirilmiştir.

2.4.2. Çözelti Türü

İzotonik (hücre içi ve dışının konsantrasyonu eşit), hipotonik (hücre dışı konsantrasyonu hücre içi konsantrasyonundan az) ve hipertonic (hücre dışı konsantrasyonu hücre içi konsantrasyonundan fazla) olmak üzere Vİ işleminde 3 farklı çözelti türü kullanılabilmektedir (Fito ve Chiralt, 2000).

2.4.3. Çözeltinin Konsantrasyonu ve Sıcaklığı

Vakum impregnasyon çözeltisi hazırlanırken duysal özellikleri ve çözünürlüğü iyi olan, toksik olmayan, düşük maliyetli çözücü ve çözünen seçilmelidir. İmpregnasyon çözeltisi için uygun sıcaklık örnek bileşimine bağı olarak 20-50°C arasında olabilmektedir (Silva vd., 2014). Barat vd. (2001) elma dilimlerine 30, 40 ve 50°C’de 25-65°Brix sakaroz çözeltisiyle Vİ işlemi uyguladıkları çalışmada 40°C’deki impregnasyon çözeltisinin daha uygun olduğunu saptamışlardır. Moiera ve Sereno (2001) 25°C sıcaklıkta şeker çözeltilerinin elma dilimleri üzerine etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak ürünlerin nem içeriğinde, örnek ağırlığında ve hacminde değişimler olduğunu gözlemlemişlerdir. Vİ işlemi sırasında yüksek sıcaklık uygulamak ozmotik dehidrasyon sürecini hızlandırırken örneklerin renk, doku ve lezzet profilleri üzerinde olumsuz etkiler yapabileceği gözlemlenmiştir. Vİ çözeltisinin bileşiminde nişasta şurubu, sakaroz, gliserol, monosodyum glutamat, tuz, glikoz, laktoz ve maltodekstrin gibi maddeler ve bu maddelerin kombinasyonları kullanılmaktadır (Fito ve Chiralt, 2000).

2.4.4. Vakum Düzeyi ve Süresi

Farklı meyve türlerinde Vİ işleminin çeşitli basınç ve süre koşulları altındaki etkisi, meyve işleme teknolojilerinde önemli bir araştırma konusudur. Andres vd. (2001) elma dilimleri üzerine Vİ işleminin etkisini araştırmış ve elma dilimi gözeneklerinden tüm sıvının absorbe edilmesi için 400 mbar’lık bir vakumun yeterli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Mujica-Paz vd. (2003) izotonik bir solüsyon hazırlayarak mango, elma, papaya, muz, şeftali ve kavun dilimlerinde farklı basınç (135-674 mbar) ve farklı sürelerin (3-45 dakika) etkilerini incelemişlerdir. Elma için 674 mbar ve 50°Brix uygun bulunurken, kavun için 593 mbar ve 57°Brix uygun bulunmuştur. Basınç ve sürelerin tüm

meyve dilimleri üzerine önemli etkiye sahip olduğunu ve genellikle daha yüksek vakumda impregnasyon çözelti hacminin arttığını gözlemlemiştir.

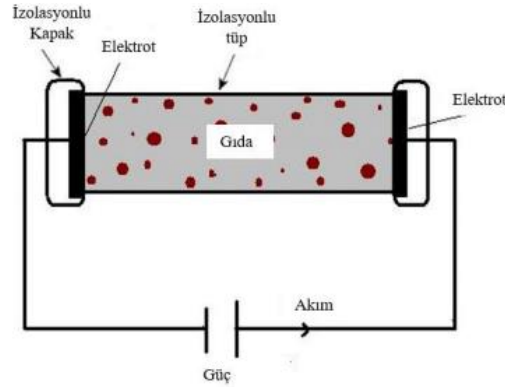
2.4.5. Atmosferik Basınç Restorasyonu ve Süresi

Atmosferik basınç restorasyonu, vakum işlemi sonrasında sistemi tekrar standart atmosfer basıncına döndürme sürecidir. Vİ gibi işlemlerde, ürünün içindeki hava boşlukları vakum altında çıkarılır ve ardından standart atmosferik basınç geri getirildiğinde, ürünün içine sıvı veya gaz gibi istenilen maddeler daha etkili bir şekilde nüfuz eder. Bu süreç, ürünün dokusal ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılır. Atmosferik basınç restorasyonu, vakum işleminin ardından ürünün stabilizasyonunu ve istenilen özelliklerin elde edilmesini sağlar. Vİ işleminde, basınç değişikliklerinin ve uygulama sürelerinin optimize edilmesi, meyve dokusunun istenilen özelliklere ulaşmasında kritik bir rol oynayabilmektedir. Guillemine vd. (2008) elma küpleri üzerine yaptıkları çalışmada, Vİ uygulamasının ardından uygulanan 10 saniyelik atmosfer basıncı restorasyonu ve sonrasında tekrar 2,5 dakikalık Vİ uygulamasının daha iyi olduğunu rapor etmiştir.

2.5. Ohmik Isıtma

“Direnç ısıtma” ve “elektro-ısıtma” olarak da tanımlanan ohmik ısıtmanın temeli Joule Yasası’na dayanmaktadır. Ohmik ısıtmada gıda ile temas halinde bulunan elektrotlardan 0-2 dakika süreyle 50-60 Hz frekansta 0-400 V elektriksel alternatif akım geçirilerek gıdanın ısınması sağlanmaktadır (Kaya ve İçier, 2019). Ohmik ısıtmada elektrik enerjisi, termal enerjiye dönüşmektedir. Yöntemin diğer elektriksel ısıl işlem yöntemlerinden temel farkı, gıda ile temas eden elektrotları içermesi, uygulanan frekans ve dalga şekliyle ilgilidir (Sun, 2006). Bu yöntemde kısa sürede ısıtma sağlanmasının yanı sıra, gıda bileşenlerindeki kayıplar en az düzeye indirilmektedir (Skudder, 1989; Sastry, 1992; İçier, 2003; İçier ve Yıldız, 2005; Demirdöven ve Baysal, 2008; Seyhun vd., 2008; Bozkurt, 2009; İncedayı vd., 2009; Bozkurt ve İçier, 2010; Akkara ve Kayaardı, 2014). Geleneksel yöntemlerde, gıda içerisindeki belirli kalınlığa sahip partikül fazı, sıvı faza kıyasla daha yavaş ısınmakta ve bundan dolayı gıdanın homojen olarak ısıtılması işlem süresi boyunca her iki fazda da gerçekleşmeyebilir. Ohmik ısıtmada sıvı ve partikül fazın iyonik bileşimi uygun elektriksel iletkenliğe sahip olacak şekilde ayarlanabilirse gıdada yer alan bu iki fazın daha hızlı ve homojen ısıtılması sağlanabilir.

(Richardson, 2001; Güler-Dal, 2023). Ohmik ısıtmanın şematik gösterimi Şekil 2.2’de yer almaktadır.



Şekil 2.2. Ohmik ısıtmanın şematik gösterimi (Kaya ve İçier, 2019)

Ohmik ısıtmanın etkinliği, gıdanın elektriksel iletkenliğine, sistemin tasarımına, ısıtma süresine, gıda içerisindeki katı-sıvı hareketine ve ohmik ısıtma sırasında uygulanan voltaj gradyanına bağlıdır (Demirdöven ve Baysal, 2008; Kaya ve İçier, 2019). Gıdaların elektriksel iletkenlikleri gıdanın bileşenlerine (iyonik bileşenler ısıyı kolay iletmektedir) ve fiziksel yapısına göre farklılık göstermektedir. Elektriksel iletkenliği yüksek olan gıdalar daha hızlı ısınmaktadır ve bundan dolayı ohmik ısıtma uygulanan ürünün elektriksel iletkenliği mutlaka bilinmelidir. Artan voltaj gradyanına bağlı olarak da ulaşılmak istenen sıcaklığa varılması için gerekli süre kısalmaktadır (Demirdöven ve Baysal, 2008; Seyhun vd., 2008; Akkara ve Kayaardı, 2014; Kaya ve İçier, 2019).

Ohmik ısıtma işlemi ile ön ısıtma, ısıtma, haşlama, pişirme, çözündürme, pastörizasyon, sterilizasyon, ekstraksiyon, evaporasyon, kurutma, fermentasyon, mikrobiyolojik ve enzimatik inaktivasyon gibi işlemlerde uygulanabilmektedir (Demirdöven ve Baysal, 2008; Kaya ve İçier, 2009; Turgut vd., 2021). Hızlı ve homojen bir yöntem olan ohmik ısıtma, meyve suyunda, puding, çorba, sos, sıvı yumurta ürünlerinde, bira ve şarapta ürünün duyu özelliklerini bozmadan kullanılabilmektedir (İçier ve Yıldız, 2005).

2.5.1. Tarihsel Gelişimi

Ohmik ısıtma ile ilgili çalışmalar 1930 yılında başlamış olsa bile o günün şartlarından dolayı bir ilerleme kaydedilmemiştir. Gıda endüstrisinde ohmik ısıtma ile ilgili ilk çalışma 1987 yılında Stirling tarafından gerçekleştirilmiş olup teknolojinin ilerlemesi ile 1990 yılında patentli bir sistem geliştirilerek ohmik ısıtma, alternatif bir

ısıtma yöntemi olarak endüstriye kazandırılmıştır. Diğer önemli bir adım ise 1993'te yılında ve Birleşik Devletler Gıda ve İlaç İdaresi'nin (US-FDA) stabil düşük asitli gıdaların ortam sıcaklığında işlenmesi için onay vermesi olmuştur (Ruan vd., 2001; Sun, 2014). Bir takım optimizasyon ve patent çalışmaları sonrasında 2000 yılından itibaren de sürekli sistemlerdeki sıcaklık kontrolleri ve işlem parametreleri ile ohmik ısıtmanın gıda kalitesi üzerine etkisini araştıran çalışmalar artmıştır (Ruan vd., 2001). ABD İngiltere İtalya ve Japonya gibi ülkelerde ohmik ısıtmanın avantajları değerlendirilmiş olup, meyve suyu, süt ve tüketime hazır gıda üreticileri, ısıtma veya pastörizasyon sistemlerinde ohmik ısıtma tekniğini kullanmaya başlamışlardır (Raun vd., 2001; Piette vd., 2004; Lyng vd., 2019).

2.5.2. Çalışma Prensibi ve Sistem Elemanları

Ohmik ısıtma sistemi gıda materyalinin içinden alternatif akım geçirilmek sureti ile ürünün ısınmasını sağlayan bir sistemdir (Eroğlu vd., 2011; Sun, 2014). Sıvı gıdalarda elektriksel direnç yüksek olduğundan ohmik ısıtma ile hızlı ve homojen ısıtma sağlanmaktadır. Gıdanın elektrik akımına gösterdiği direnç sayesinde elektrik enerjisi ısı enerjisine dönüşmekte ve gıda ısınmaktadır. Ohmik ısıtma geleneksel ısıtmaya göre daha kısa sürede ısıtma sağlar, sıcak yüzeylerle teması azaltır ve sıcaklık gradyanlarını en aza indirmeye yardımcı olur (Sastry ve Barach, 2000; Bozkurt, 2009; Bhattacharya, 2014). Ohmik ısıtma işlemini etkileyen faktörler arasında gıda ve ohmik ısıtma sisteminin özellikleri bulunmaktadır. Gıdanın elektriksel iletkenliği, termofiziksel ve reolojik özellikleri gibi ürün parametreleri gıdaya ait faktörler iken, frekans, elektrot malzemesi, akım ve voltaj gibi değişkenler ise ohmik ısıtma sistemine bağlı olan faktörlerdir (Richa vd., 2017).

Bir elektrik devresinin işleyebilmesi için, gerilim (voltaj), amper ve direnç gibi üç fiziksel elemana ihtiyaç duyulmaktadır. Dirençli elemanlar içeren devrelere uygulanan bu üç temel elektrik kavramı arasındaki matematiksel ilişki elektriğin en önemli temel yasalarından biridir ve Ohm Yasası olarak bilinmektedir (Denklem 2.4). Denklemdeki V gerilimi (V), I: akımı (A) ve R: direnci (Ω) temsil etmektedir (Lyng vd., 2019).

$$V=I \times R \quad (2.4)$$

Elektrik enerjisi, herhangi bir ısı kaybı olmadan doğrudan ısıya dönüştürülebildiğinden, malzemenin ısınmasına neden olan iç enerjinin üretimi için kullanılabilmekte ve ısı üretim hızı, malzemenin elektrik alan kuvveti ve elektrik iletkenliğinin karesi ile doğru orantılı olmaktadır (Palaniappan ve Sastry, 1991; Zheng ve

Sun, 2005; Richa vd., 2017). Ohmik ısıtmada genellikle 50-60 Hz alternatif akım kullanılmakta olup 1 MHz'a varan yüksek frekans seviyelerinin (>1 kHz) uygulandığı çalışmalar da mevcuttur (Shynkaryk vd., 2010; Jin vd., 2020; Khue vd., 2020).

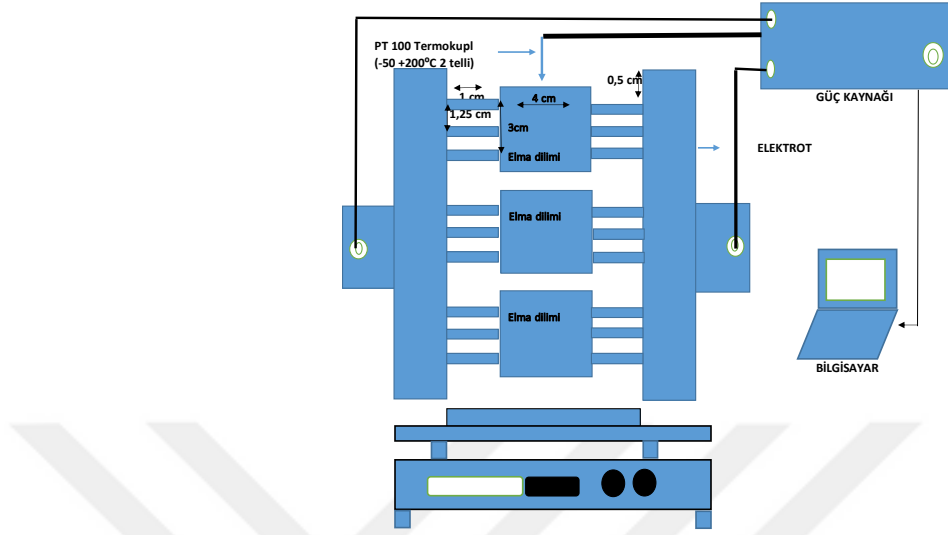
Ohmik ısıtmanın prensibi, gıdanın bir elektrik devresindeki bir sistem elemanı olarak görülmesi olup, gıdanın içinden geçen alternatif akım ile gıdanın içerisinde ısı üretilmesini dolayısı ile gıdanın doğrudan ısınmasını sağlamaktır. Gıdaların ısınma hızı elektrik voltaj gradyanı ve gıdanın elektriksel iletkenliği ile doğrudan ilgilidir. Ticari amaçlar için kullanılan ohmik ısıtma sistemlerinde son ürün sıcaklığını belirlemek için voltaj ayarlanmalı ve otomatik olarak kontrol edilmelidir (Ruan vd., 2001; Zheng ve Sun, 2005).

Ohmik ısıtmada ısı enerjisi üretimi voltaj gradyanı ve gıdanın elektriksel iletkenliğine bağlıdır (Pathare ve Roskilly, 2016). Elektriksel iletkenlik, ısınma hızı ve ohmik ısıtma işlemlerinde ana parametredir. Gıdaların elektriksel iletkenliği genellikle su içeriği ve sıcaklık ile artmakta olup, bu durum yüksek sıcaklıklarda artan iyon hareketliliğinden kaynaklanmaktadır ve bu da ohmik ısıtma işlemini daha işlevsel bir hale getirmektedir (Sun, 2014). Ohmik ısıtmanın hızı elektriksel iletkenlik ile doğrudan ilişkilidir (Palaniappan ve Sastry, 1991). Gıdada tuz konsantrasyonunun artması da gıdanın elektriksel iletkenliğini arttırmaktadır. Bu bağlamda, ohmik ısıtma uygulanacak gıdanın elektriksel iletkenliği bilinmeli ve uygun bir sonuç elde etmek için farklı yöntemler kullanılarak elektriksel iletkenliği ayarlanmalıdır (Ruan vd., 2001). Ohmik ısıtma sisteminde ısıtma hızı, elektriksel iletkenlik ve elektrik alan şiddetinin karesi ile doğru orantılıdır ve elektrik alan şiddeti, elektrot aralığı veya uygulanan gerilimin ayarlanması ile değiştirilebilmektedir (Palaniappan ve Sastry, 1991; Zheng ve Sun, 2005).

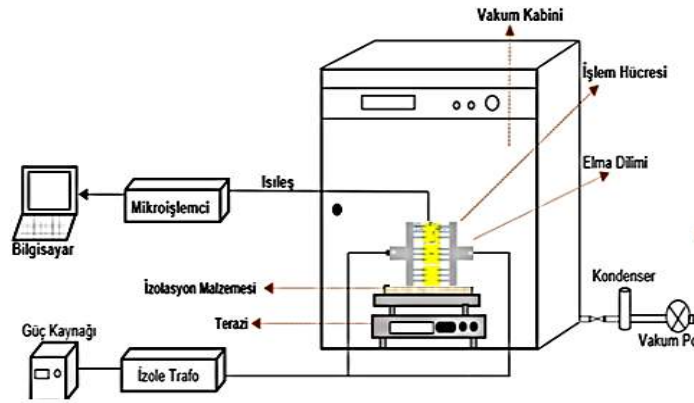
Sıvı ve parçacıklı bir gıda karışımında iki fazın elektriksel iletkenliği birbirine benzer ise iki fazda da aynı şekilde ısı üretimi gerçekleşmekte, aksi durumlarda katı fazda ısı üretimi sıvı fazla göre daha hızlı olmaktadır (Ruan vd., 2001; Zheng ve Sun, 2005; Sarang ve Sastry, 2008).

Genel olarak bir ohmik ısıtma düzeneği, güç kaynağı, mikroişlemci, bilgisayar, elektrotlar ve ısıtma hücresinden oluşmaktadır (Gahavian ve Farahnaky, 2018). Güç kaynağı istenilen gerilimin oluşturulmasını ve sisteme iletilmesini gerçekleştirmektedir. Güvenlik amacı ile kullanılan ısıtma hücresi yalıtkan bir malzemeden yapılmalıdır. Kullanılan elektrotlar ise gıdaya temas halinde olmalı ve kalıntı bırakmayan malzemeden yapılmış olmalıdır (Çokgezme ve İçier, 2016; Gahavian ve Farahnaky, 2018). Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutmanın sistem elamanlarının şematik gösterimine

Şekil 2.3'te, bu sisteme vakum kabini eklenerek tasarlanan vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemine ait sistem elemanlarının şematik gösterimine Şekil 2.4'te yer verilmiştir.



Şekil 2.3. Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma sistemine ait şematik gösterim



Şekil 2.4. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma sistemine ait şematik gösterim

Ohmik ısıtmada elektrot tasarımı oldukça önemlidir. Elektrot malzemesi ve elektrot kalınlığı ohmik ısıtmanın istenilen düzeyde gerçekleşmesi için önem arz etmektedir. Elektrotlar ne kadar kalınsa ürün içine ısı iletimi o kadar zor olmaktadır ve bunun nedeni daha yüksek kütle, daha düşük elektrik direncidir (Çokgezme ve İçier, 2016; Gahavian ve Farahnaky, 2018). Elektrot olarak kullanılan malzeme de ohmik ısıtma sürecini etkileyebilir. Titanyum elektrotlar, elektrotların yüzeyinde aynı kalınlıktaki paslanmaz çelik elektrotlardan daha yüksek bir ısıtma sıcaklığına sahiptir ve alüminyum elektrotlar

elektrolize olma eğiliminde olduğu için malzemede kirlenme (kontaminasyon) olasılığı artar (Indiarto ve Rezaharsanto, 2020). En iyi malzemelerden biri olan titanyum elektrotlar elektrolize dayanıklı olup optimum bir ısıtma oranı sunar ve bundan dolayı yaygın olarak kullanılırlar (Indiarto ve Rezaharsanto, 2020).

2.5.3. Ohmik Isıtma İşlemini Etkileyen Faktörler

Gıdalarda ohmik ısıtmanın verimliliğini etkileyen temel faktörler elektriksel iletkenlik, elektriksel alan kuvveti, partikül boyutu ve konsantrasyonu, iyonik konsantrasyon ve enerji verimliliğidir (Kaur ve Singh, 2016).

2.5.3.1. Elektriksel İletkenlik

Ohmik ısıtmayı etkileyen faktörlerden en önemlisi ürünün elektriksel iletkenliğidir. Gıdaların içerisinde olduğu tarımsal ürünlerin elektriksel iletkenliğinin bağlı olduğu faktörler arasında sıcaklık, uygulanan voltaj gradyanı, gıdanın mikroyapısı, frekans ve partikül boyutu sayılabilir ki, elektrolit konsantrasyonu da meyve ve sebzelerdeki ohmik ısınma oranını ve dolayısıyla meyve ve sebzelerin elektriksel iletkenliğini doğrudan etkileyebilir (Sastry, 1992; Kaur ve Singh, 2016; Lyng vd., 2019). Ohmik ısıtma hızının sıcaklık, voltaj gradyanı ve iyonik bileşen konsantrasyonu ile doğrusal olarak arttığı, partikül boyutu, frekans ve ısıtma hızındaki artışla azaldığı belirtilmektedir (Banti, 2020). Gıdaların elektriksel iletkenliğinin, ürünün sıcaklık, nem içeriği ve iyon içeriği ile arttığı tespit edilmiştir (Castro vd., 2003). Elma, ananas, armut, çilek ve şeftali gibi taze meyvelerin elektriksel iletkenliklerinin 0,05 ila 1,20 S/m aralığında olduğunu bildirmiştir (Assiry vd., 2010; Nguyen vd., 2013). Literatürde tarımsal ürünlerde kuru madde içeriğinin ve şekerin artmasıyla ürünün elektriksel iletkenliğinin azaldığı ve yeni ohmik ısıtıcı tasarımları için bunun önemli olabileceği rapor edilmiştir (İçier ve Ilıcalı, 2004).

Sun vd. (2014) tarafından (i) yeterli elektriksel iletkenlik düzeyi ($>0,050$ S/m) (yumurta, yoğurt, sütlü tatlılar, meyve suları gibi), (ii) yüksek elektrik alan kuvveti gerektiren düşük iletkenlik düzeyi ($0,005 < 0,050$ S/m) (margarin ve reçeller gibi) ve (iii) çok yüksek elektrik alan gerektiren ve ohmik ısıtma uygulaması genellikle zor olan düşük iletkenlik düzeyi ($>0,050$ S/m) (donmuş gıdalar, yağ şurup, likör gibi ürünleri kapsayan) olmak üzere üç elektriksel iletkenlik sınıfı belirlenmiştir.

2.5.3.2. Elektriksel Alan Kuvveti

Elektriksel alan kuvveti, bir elektrik alanı içinde bulunan yüklü bir parçacık üzerine etki eden kuvvettir. Elektriksel alan kuvveti, yüklü parçacığın elektrik alan içinde nasıl hareket edeceğini belirler ve bu kuvvet, parçacığın elektrik alanın yönüne göre hızlanmasına veya yavaşlamasına neden olabilir. Elektriksel alan kuvveti arttıkça, daha yüksek elektriksel iletkenliğine ulaşılmaktadır. Elektriksel iletkenliğin yükselmesi daha hızlı bir ısınma sağlanması demektir (Kaur ve Singh, 2016). Elektriksel alan, elektrotlar arası mesafenin ya da uygulanan gerilimin ayarlanması ile değiştirilebilir (Silva vd., 2017).

2.5.3.3. Partikül Büyüklüğü ve Konsantrasyonu

Ohmik ısıtmayı etkileyen bir diğer faktör de partikül büyüklüğüdür. Ohmik ısıtmanın homojen ve etkili bir biçimde gerçekleşebilmesi için gıdanın boyutu, şekli ve konsantrasyonu da dahil olmak üzere üç özelliğine dikkat edilmesi gerekmektedir (Chen, 2015). Parçacıklı gıdaların ohmik ısıtma tekniği ile ısıtılması sırasında parçacıkların boyutu ve elektriksel iletkenliklerinin bilinmesi uygulama açısından büyük önem taşımaktadır. Küçük parçacıklardan (5 mm'den az) oluşan emülsiyonlar veya kolloid içeren parçacıkların elektriksel iletkenliği dikkate alınmayabilir; ancak daha büyük (15-25 mm) partikül içeren gıdalar için iki fazın özelliklerinin bilinmesi ohmik ısıtma işlemi için önemlidir (Silva vd., 2017).

Ohmik ısıtma sırasında ürünün konsantrasyonu da ısıtma verimliliğini etkilemektedir. Ürün konsantrasyonunun artışı iyonik hareketliliğin yavaşlanmasına neden olur ve bu durum elektriksel iletkenliği düşürür. Bundan dolayı yüksek yoğunluklu ve yüksek özgül ısılara sahip ürünler daha yavaş ısınmaktadır. Aynı şekilde yüksek viskoziteli akışkanlar düşük viskoziteli olanlara göre daha hızlı ısınabilmektedirler (Silva vd., 2017).

2.5.3.4. Alternatif Akım Frekansı ve Dalga Boyu

Alternatif akım (AC), elektrik yüklerinin yönünün ve büyüklüğünün periyodik olarak değiştiği bir elektrik akımı türüdür. Bu, akımın belirli bir frekansta ileri ve geri hareket ettiği anlamına gelmektedir. AC frekansı, ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, frekans ABD'de 60 Hz iken Avrupa'da 50 Hz'dir. AC, genellikle sinüs dalgası şeklinde temsil edilmektedir, ancak üçgen veya kare dalga gibi farklı dalga biçimlerinde de olabilir. Akımın bir tam döngüsünü tamamladığı mesafeyi

ifade eden AC dalga boyu, genellikle sinüs dalgası şeklinde olan AC dalgasının bir tepe noktasından bir sonraki aynı fazdaki tepe noktasına kadar olan mesafeye karşılık gelmektedir. Frekans ve dalga hızı ile ilişkili olan dalga boyu Denklem 2.5 ile hesaplanabilmektedir:

$$\text{Dalga boyu } (\lambda) = \frac{v}{f} \quad (2.5)$$

Burada λ dalga boyunu, v dalganın yayılma hızını (genellikle ışık hızı, 3×10^8 m/s, elektrik dalgaları için), ve f dalganın frekansını (Hz) ifade etmektedir.

Ohmik ısıtma işlemi sırasında uygulanan alternatif akımın frekans ve dalga boyu, ısıtma verimliliği ve kaliteyi etkilemektedir (Sakr ve Liu, 2014; Silva vd., 2017). Ohmik ısıtma esnasında alternatif akımın frekansını ve boyutunu değiştirmek ısı kütle transferini ve gıdanın özelliklerini etkilemekte ve dolayısıyla bu iki parametrenin ohmik ısıtma üzerine etkilerini takip etmek önemli olmaktadır (Silva vd., 2017).

2.5.3.5. İyonik Konsantrasyon

İyonik konsantrasyon, ohmik ısıtmada elektrik akımının iletkenliğini ve üretilen ısı miktarını belirleyen temel faktörlerden biridir. Bir çözeltideki iyonların toplam miktarı ne kadar fazlaysa, çözeltinin elektriksel iletkenliği o kadar yüksektir; bu da belirli bir voltajda daha fazla akım geçişine ve daha fazla ısının üretilmesine yol açar. İyonik konsantrasyonun artması elektriksel iletkenliği artıracığından dolayı ohmik ısıtmayı olumlu yönde etkiler. İyonik konsantrasyon ürün konsantrasyonu ile ters orantılı olup, ürün konsantrasyonu artışıyla iyonik hareket yavaşlamakta ve bu durum da ohmik ısıtmanın yavaşlamasına neden olmaktadır (Silva vd., 2017).

2.5.3.6. Enerji Verimliliği

Ohmik ısıtma işleminde ısı enerjisi ürün içerisinde oluşmakta ve bu da elektrik enerjisinin %90 oranında ısı enerjisine dönüşmesine neden olmakta ve böylece enerji verimliliği sağlanmaktadır (Kutlu vd., 2017).

2.5.4. İşlemin Olumlu ve Olumsuz Yönleri

Ohmik ısıtmanın bilinen olumlu yönleri (Demirdöven ve Baysal, 2008; Seyhun vd., 2008; İncedayı vd., 2009; Akkara ve Kayaardı, 2014; Cappato vd., 2016; Kutlu vd., 2017; Gavahian ve Farahnaky, 2018; Kaya ve İçier, 2019) aşağıda özetlenmiştir:

- Ohmik ısıtma hacimsel bir ısıtma olduğu için homojen bir ısıtma sağlanmakta ve işlem daha hızlı gerçekleşmektedir.
- Üründeki önemli bileşenlerde ve ürünün duyuşal özelliklerindeki kayıplar en az düzeydedir.
- Isı enerjisi doğrudan ürünün içinde üretilmekte ve bundan dolayı farklı bir ısı transfer yüzeyine ihtiyaç duyulmamaktadır. Elektrik enerjisinin %90'ı ısı enerjisine dönüştüğü için enerji verimliliği sağlanmaktadır.
- Ürün yüzeyinde fazla ısınan bölgelerin oluşmamasından dolayı ısıya hassas olan ürünlerde de kullanımı mümkündür.
- Parçacık içeren ürünlerde de kullanılabilir. Ürünün katı ve sıvı fazı aynı anda ısınabilmektedir.
- Kontrolü kolaydır ve akım kesildiği anda ısı transferi durmaktadır.
- Karıştırma işlemine gerek duyulmamaktadır.
- Çevre dostu bir sistem olduğu için yeşil teknoloji olarak adlandırılmaktadır.
- Katı ve sıvı bileşenlerin elektriksel iletkenlikleri ayarlandığında, katı partiküllerin sıvıya göre daha hızlı ısınması sağlanabilmektedir.
- Ekipman kullanımı pratiktir.

Tüm bu avantajların yanında, ohmik ısıtmanın yeni bir teknik olması nedeniyle aşağıda sıralanan bazı olumsuzlukları da vardır (Sakr ve Liu, 2014; Tola vd., 2014; Çokçezme ve İçier, 2016; Kaur ve Sing, 2016; Cappato vd., 2017; Gavahian ve Farahnaky, 2018):

- Farklı gıdalar farklı elektriksel iletkenliklere sahip olduğu için, ürüne göre sistem parametrelerinin yapılandırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Gıda bileşenlerinin elektriksel özelliklerindeki değişkenlik, ürünün pişme kalitesini etkilemektedir.
- Sıvı matrisle elektrotların temas halinde olması gerekmektedir. Aksi takdirde alternatif akım etkin bir şekilde ürüne iletilmediğinde üründe homojen ve hızlı bir ısı artışı sağlanamamaktadır.
- Uygun niteliklere sahip elektrot malzemesinin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Aksi takdirde elektrotlarda oluşan korozyon nedeniyle ürüne metal iyonu geçişleri gerçekleşerek toksik etkilere sebep olabilmektedir.

- Sistemi izlemek ve sürekli kontrol etmek gerekmektedir. Genel olarak güç kaynağı, ısıtma hücresi, elektrotlar, mikroişlemci ve bilgisayardan meydana gelen ohmik ısıtma destekli bir evaporasyon sisteminde kullanılan güç kaynağının kapasitesi, ihtiyaç duyulan voltaj gradyanlarına ve gerçekleştirilecek işleme göre değişiklik göstermektedir. Güvenli bir işlem yapılabilmesi için gıda maddesinin içerisinde bulunduğu bölüm olan ısıtma hücresinin yalıtkan bir malzemeden yapılmış olması gerekmektedir.
- İşlem sırasında gıda maddesi ve elektrik iletim hattı arasında bulunan ve gıdayla direkt temas halinde bulunan elektrotlar da yüksek iletkenliğe sahip, üründe kalıntı bırakmayan malzemelerin seçimi oldukça önemlidir.

Ohmik ısıtmanın direkt olarak işlem veya ön işlem seviyesinde çok sayıda uygulama alanı mevcuttur. Ohmik ısıtma sistemlerinin gıda teknolojisi alanında uygulanmasına ait farklı çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

2.5.5. Gıdalarda Uygulama Alanları

Ohmik ısıtma işlemi ile ön ısıtma, ısıtma, haşlama, pişirme, çözündürme, pastörizasyon, sterilizasyon, ekstraksiyon, evaporasyon, kurutma, fermentasyon, mikrobiyolojik ve enzimatik inaktivasyon gibi işlemlerde uygulanabilmektedir (Demirdöven ve Baysal, 2008; Kaya ve İçier, 2009). Hızlı ve homojen bir yöntem olan ohmik ısıtma, meyve suyunda, puding, çorba, sos, sıvı yumurta ürünlerinde, bira ve şarapta ürünün duyuşal özelliklerini bozmadan kullanılabilir (İçier ve Yıldız, 2005).

2.5.5.1. Evaporasyon

Gıda endüstrisinde sıvı ürünleri konsantre haline getirebilmek için evaporasyon (buharlaştırma) tekniğı kullanılmaktadır. Konsantrasyon işleminde ürüne ısı uygulanarak ürünlerdeki serbest suyun bir kısmının uzaklaştırılması hedef alınmıştır. Böylece evaporasyon işlemiyle su aktivitesi azaltılan ürün, mikrobiyal bozulmalara karşı daha dayanıklı hale getirilmiş olmaktadır. Aynı zamanda ürünün konsantreye işlenmesi sırasında hacminin azalması paketlenme, taşıma ve depolama maliyetlerinin azalmasında önemlidir. Ancak ısıya duyarlı gıdaların konsantreye işlenmesi sırasında renk, aroma, tat ve besin değeri kayıpları yaşanabilmektedir. Endüstride vakum evaporasyon işlemi uygulanarak bu olumsuzlukların önüne geçilmesi sağlanmaktadır. (Sabancı ve İçier, 2017).

Evaporasyon uygulamalarının uzun sürelerde gerçekleşmesi hem zaman hem de enerji kayıplarına neden olmakta ve bu nedenle maliyetler artmaktadır. Gıda endüstrisinde evaporasyon sürelerini azaltarak etkin bir işlem gerçekleştirebilmek için yapılan alternatif uygulamalardan biri de evaporasyon sisteminin ısı ünitesinde ohmik sistemlerin kullanılmasıdır. Yapılan çalışmalar, ohmik ısıtma destekli evaporasyon ünitelerinin, işlem sürelerini kısalttığını ve verim artışı sağladığını ortaya koymuştur (Çokgezme vd., 2017; İçier vd., 2017).

Hosainpour vd. (2012), domates salçasında ohmik ısıtmalı kurutma ön işleminin, domates salçasında nem oranı, kuruma süresi, kuruma hızı, enerji tüketimi ve kuruma verimliliği üzerine etkisini incelemişler; geleneksel kurutma yöntemi ile kıyaslamışlardır. Ohmik ısıtmalı kurutma ön işlemi 50 Hz frekansta 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 V/cm voltaj gradyanında uygulanırken geleneksel kurutma işlemi 105°C’de 0,1 m/s hava hızında gerçekleştirilmiştir. Ohmik ısıtmalı kurutma işlemi yapılan domates salçalarında nem oranının %90’dan %70’e düşmesinin daha kısa sürede gerçekleştiğini ve ohmik ısıtmalı kurutma ön işlemi uygulamasıyla enerji tüketiminde azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Darvishi vd. (2015) domates suyunun su içeriği 9,3’ten 2,3 kg su/ kg kuru maddeye ulaşınca kadar ürüne 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 V/cm aralığındaki voltaj gradyanları uygulayarak ürünü konsantre etmişlerdir. Kuru madde içeriği ve voltaj gradyanının artmasına bağlı olarak enerji verimliliğinin arttığını bildirmişlerdir.

Sabancı ve İçier (2020) vişne suyunu konsantre etmek amacıyla 10, 12 ve 14 V/cm voltaj gradyanlarında kullandıkları “ohmik ısıtma destekli vakum evaporasyon” işleminde, vişne suyunu %65 toplam çözünür kuru madde (TÇKM) içeriğine kadar konsantre edebilmişlerdir. Ohmik ısıtmanın vakum evaporasyona katkısının, buharlaşma sürecinin ekserji verimliliği açısından performansını arttırdığı ve sistemin iyileştirme gereksinimini azalttığı şeklinde olduğunu rapor etmişlerdir. Aynı sistemi kullanarak İçier vd. (2017) üç farklı (7,5, 10,0 ve 12,5 V/cm) voltaj gradyanı ve 180 mmHg mutlak basınçta nar suyunu %40 TÇKM’ye ulaşınca kadar konsantre etmişlerdir. Nar suyu için 7,5, 10,0 ve 12,5 V/cm voltaj gradyanlarında toplam buharlaşma süreleri sırasıyla 152, 78 ve 53 dakika olarak rapor edilmiştir. Ohmik ısıtma ile nar suyunun konsantrasyon süresi geleneksel buharlaştırmaya göre önemli düzeyde (~%56) kısalmıştır. Elektriksel iletkenlik değerleri 7,5 V/cm için %25 TÇKM’ye ve 10,0 V/cm için %35 TÇKM’ye kadar artmış, sonrasında ise azalan bir model gösterirken, 12,5 V/cm’de buharlaştırma işlemi sırasında sabit bir değerde ($0,55 \pm 0,01$ S/m) kalmıştır. Araştırmacılar, ohmik ısıtmanın

geleneksel vakum evaporasyon sistemlerine entegrasyonu ile enerji veriminin yüksek olacağını ve kalitesi yüksek meyve suyu konsantresi üretimine olanak verebileceğini göstermişlerdir.

Sabancı ve İçier (2017) tarafından yapılan bir çalışmada ohmik ısıtım ile konveksiyonel evaporasyon işlemlerini karşılaştırılmıştır. Vişne suyu 65°C'ye kadar ısıtılmış ve sabit basınç altında %40 TÇKM değerine ulaşmaya kadar konsantre edilerek elektriksel iletkenlikleri incelenmiştir. Vişne suyunun 65°C'ye ısıtılma sürenin ohmik destekli sistemle daha kısa sürede gerçekleştiği bildirilmiştir. Başka bir çalışmada ise Sabancı vd. (2018) vakum altında ohmik ısıtım ile evaporasyonla 25 kPa basınç 7,5, 10,0 ve 12,5 V/cm voltaj gradyanı kullanarak nar suyunu %40 TÇKM içerene kadar konsantre etmişlerdir. Vakum altındaki işlemde nar suyunun hidroksimetil furfural içeriğinin, ohmik ısıtım diğer sisteme göre daha fazla olduğunu, ayrıca ohmik ısıtım vakum altındaki evaporasyon işleminde toplam monomerik antosiyanin, toplam fenolik madde içeriği ve antioksidan aktivite değerlerinin daha iyi korunduğunu tespit etmişlerdir.

2.5.5.2. Ekstraksiyon ve Hidrodestilasyon

Ekstraksiyon, gıda proseslerinde katı ya da sıvı fazda bulunan bir veya birden daha fazla sayıdaki değerli bileşiğin farklı çözünürlük özelliklerinden yararlanılarak diğer bir sıvı faza alınması olarak tanımlanmaktadır (Nakilcioğlu ve Ötleş, 2014; Kutlu vd., 2017). Gıda sanayinde önemli bir basamak olan ekstraksiyon işlemleri genellikle çözgen ekstraksiyon yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Ancak bu konvansiyonel ekstraksiyonda solvent kullanılması ve sürenin uzun olması gibi dezavantajlardan dolayı gıda endüstrisinde alternatif yöntemler araştırılmaktadır (Kutlu vd., 2017). Alternatif yöntemlerden biri olan ohmik ısıtım destekli ekstraksiyon düzeneklerinde gıda bileşenlerinin ekstraksiyonu konvansiyonel yöntemle kıyasla çok daha kısa sürelerde, daha yüksek verim ve kalitede gerçekleştirilebilmektedir (Loypima vd., 2015; Pereira vd., 2016; Saberian vd., 2017). Ohmik ısıtım destekli ekstraksiyon düzeneklerinde ohmik ısıtım sistemi ısı kaynağı olarak işlev görmesinin yanı sıra, uyguladığı elektrik alan sayesinde hücresel dokularda “elektroporasyona” neden olarak biyoaktif bileşenlerin daha iyi ekstrakte edilmesine imkân tanır (Loypima vd., 2015; Pereira vd., 2016).

Boldaji vd. (2015) standart atmosferik basınç altında domates salçasına nem içeriği kuru bazda %9,33'ten 2,20'ye düşene kadar ohmik ısıtım işlemi (6-14 V/cm) uygulamıştır. Salça örneklerinde ısı üretim hızı, numunenin ısıtım ve buharlaştırma

işlemleri sırasında değişen voltaj gradyanına ve elektriksel iletkenliğe bağlı olarak değişmiştir. Üründe suyun buharlaştırılmasıyla artan konsantrasyon sayesinde elektrik iletkenliğinin ve ısı üretim hızının arttığını bildirmiştir.

Ohmik ısıtmanın yenilikçi uygulama alanlarından bir tanesi de ohmik ısıtma destekli hidrodestilasyon sistemleridir. Hidrodestilasyon, bitkisel materyallerden uçucu yağların ve diğer bileşenlerin ekstrakte edilmesi amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu süreç, su buharı veya kaynar su kullanılarak gerçekleştirilmekte ve genellikle aromatik bitkilerden esansiyel yağların çıkarılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ohmik ısıtmanın hacimsel ısıtma özelliğinin damıtma düzeneklerine uygulanmasıyla elde edilen bu sistemde destilasyon işleminin daha kısa süreler içerisinde, enerjiden de tasarruf sağlayarak gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır (Gavahian vd., 2015; Hashemi vd., 2017). Ohmik destekli bir hidrodestilasyon ünitesinde geleneksel ısıtıcı yerine ohmik ısıtma düzeneği kullanılmasından dolayı daha iyi bir proses kontrolü sağlanmakta, damıtma maliyetleri ve süresi azaltılmaktadır (Gavahian ve Farahnaky, 2018).

Son yıllarda, farklı bitkilerden antioksidanlar ve esansiyel yağların elde edilmesinde çevreci ve verimli yöntemlerin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırmalar artmıştır. Bu bağlamda, ohmik ısıtma destekli hidrodestilasyon sistemleri, enerji ve zaman tasarrufu sağlamasıyla dikkat çekmektedir. Hashemi vd. (2017) gıdalardan antioksidanların ve esansiyel yağların eldesinde ohmik destekli hidrodestilasyon sistemlerinin daha çevreci bir yöntem olduğunu ifade etmiştir. Gavahian vd. (2015) nane örneğinden ohmik ısıtma destekli hidrodestilasyon yöntemi ile esansiyel yağların ekstraksiyonunda, enerjiden yaklaşık %80 ve zamandan %75 tasarruf sağladıklarını rapor etmişlerdir. Manouchehri vd. (2018) Şam gülünden (*Rosa damascena* Mill) esansiyel yağ eldesinde esansiyel yağ verimi açısından ohmik destekli hidrodestilasyon, destilasyon ve mikrodalga destekli hidrodestilasyon yöntemini karşılaştırmıştır. En yüksek verimi mikrodalga destekli hidrodestilasyon yönteminde elde ettiklerini bildirirken, ohmik ısıtma destekli hidrodestilasyonda verimin %0,047 olduğunu bildirmiştir. Gavahian vd. (2018) Tayvan limon otu bitkisinden esansiyel yağ eldesinde hidrodestilasyon ve ohmik ısıtma destekli hidrodestilasyon yöntemlerine ait toplam ekstraksiyon sürelerini sırasıyla 99,7 ve 41,3 dakika olacak şekilde uygulamışlar ve bu süreler sonunda esansiyel yağ asidi verimlerini her iki yöntem için de %1,5 olarak belirlemişlerdir. Esansiyel yağ asidi eldesi için tüketilen enerji miktarı hidrodestilasyon için 2,77 kWh/mL olurken ohmik ısıtma destekli yöntem için 0,57 kWh/mL olarak tespit edilmiştir. Gavahian ve Chu (2018), lavantadan esansiyel yağ asidi eldesinde buhar destilasyonu ve ohmik ısıtma destekli

buhar destilasyonu yöntemlerini kullanmışlardır. Aynı verimi (%3,3-3,8) sağlamak için buhar destilasyonunda 112,7 dakika ve ohmik destekli buhar destilasyonunda 50,3 dakika ekstraksiyon süresi uygulamışlardır. Bu süreler sonunda tüketilen enerji miktarlarını buhar ve ohmik ısıtma destekli buhar destilasyonu yöntemleri için sırasıyla 0,4 ve 0,9 kWh/mL olarak rapor etmişlerdir. Ohmik ısıtma destekli yöntemle elde edilen lavanta esansiyel yağının temel bileşenlerinin, diğer yöntemle elde edilene göre değişmediği ve miktarının olumsuz etkilenmediği bildirilmiştir. Her iki destilasyon yönteminde linalol, 1,8-sineol ve kamfor temel bileşenler olarak belirlemiştir. Tavakolpour vd. (2017), ohmik ısıtma ve/veya ultrasonikasyon işlemleriyle desteklenmiş hidrodestilasyon işleminin *Thymus daenensis* bitkisinden esansiyel yağ eldesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Ohmik ısıtmalı sistemde farklı 100, 150 ve 200 V voltaj değerlerini kullanmışlardır. Yüksek voltaj uygulaması ile üretilen esansiyel yağlarda timol ve α -terpinen bileşenlerinin daha fazla pik alanına sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Gavahian vd. (2011) ise kekik bitkisinden esansiyel yağ asidi eldesinde ohmik ısıtma destekli hidrodestilasyon uygulamasının hidrodestilasyon yöntemine alternatif olduğunu, yüksek ısınma oranı, ani kaynama ve kısa ekstraksiyon süresi sağladığını bildirmişlerdir. Yine kekik bitkisi ile yapılan başka bir çalışmada (Gavahian vd., 2012) ohmik ısıtma destekli hidrodestilasyon sisteminin esansiyel yağın kimyasal bileşimini veya fiziksel özelliklerini olumsuz etkilenmediği, ohmik ısıtma destekli işlemin yeşil ekstraksiyon teknolojisi olarak ifade edilebileceği rapor edilmiştir. Gavahian vd. (2013) mersin bitkisinden esansiyel yağ elde edilirken ohmik ısıtma destekli hidrodestilasyon ve hidrodestilasyon yöntemi kullanılarak yaptıkları bir çalışmada, ohmik ısıtma destekli sistemle ekstraksiyon işlemini diğer yöntemden daha hızlı olduğunu ve yağ verimini etkilemediğini bildirmişlerdir. Her iki yöntemle elde edilen esansiyel yağın majör bileşeninin 1,8-sineol olduğu belirlenmiştir. Hashemi vd. (2016) mısır anason bitkisinden esansiyel yağ asidi eldesinde ultrasonik destekli ohmik ısıtmalı hidrodestilasyon sisteminin, destilasyon süresi ve gerekli enerjiyi azalttığını; ürünün kalitesini ve antioksidan aktivitesini geliştirdiğini belirtmişlerdir.

2.5.5.3. Haşlama

Gıda işleme süreçlerinde haşlama, meyve ve sebzelerin kalitesini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Pek çok meyve ve sebzenin işlenmesinde haşlama işlemi önemli bir yer tutmaktadır. İşlemin gıdanın kalitesinin artırılmasına yönelik mikrobiyal veya enzimatik (polifenoloksidaz ve peroksidaz gibi) inaktivasyon veya

tahribat, iyileştirilmiş kurutma özellikleri, doku içindeki gazın, pestisit ve toksik bileşenlerin, kötü tat veya bulanıklığın giderilmesi ve indirgeyici şekerlerin uzaklaştırılması gibi farklı etkileri bulunmaktadır (Sun, 2014; Gomes vd., 2018; Soghani vd., 2018).

Gıda işleme teknolojilerinde yenilikçi yaklaşımlar hem kaliteyi artırmak hem de enerji verimliliğini sağlamak amacıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kapsamda, haşlama amacıyla kullanılabilen ohmik ısıtma yöntemi, geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve etkili sonuçlar sunabilecek niteliktedir. Gomes vd. (2018), kabakların haşlanmasında ohmik ısıtma ve geleneksel haşlama gibi farklı iki yöntem kullanmışlar ve ohmik ısıtmanın peroksidaz enzimini daha hızlı bir şekilde inaktive ettiğini bildirmişlerdir. Kabağın renk değişiminde her iki yöntem de benzer değişiklikler meydana getirmiştir. Sonuçlar, ohmik ısıtma yönteminin istenmeyen enzimleri inaktive etmede ve gıda rengini korumada etkili olduğunu göstermiştir. Soghani vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada ise mantar numunelerine ohmik ısıtmalı haşlama işlemi uygulanmıştır. Ohmik ısıtmalı işlemde haşlama süresi ve voltajının, haşlama işlemi sırasında kütle kaybı, ısı transferi, elektriksel iletkenlik değişimleri ve enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Yüksek voltaj değerlerinde haşlanmış mantarların haşlanmamış olanlara göre daha hızlı kuruduğu bildirilmiştir.

2.5.5.4. Çözündürme

Dondurma işlemi gıdaların muhafazasında yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmasına karşın dondurulmuş ürünlerin çözündürülmesi sürecinde özellikle geleneksel ısıtma uygulamaları yöntemleri kullanıldığında birçok problemle karşılaşabilmektedir. Çözündürme sırasında ürünün mikrobiyal güvenliğini sağlamak amacıyla hızlı ve homojen bir sıcaklık artışıyla, bölgesel sıcaklık artışlarının önlenmesi hedeflenmektedir. Konvansiyonel ısıtma yöntemleriyle çözündürmede bu koşulların sağlanmasının zor olması ohmik ısıtmalı çözündürme yöntemini alternatif bir yöntem haline getirmiştir. Ohmik ısıtma sistemlerinde ısının hacimsel, tekdüze ve hızlı bir biçimde artışı çözündürme işleminde tercih nedeni olmasını sağlamakta olup çözündürme prosesinde elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşüm oranı %90'ın üzerinde olduğu bildirilmektedir (Ghnimi vd., 2008).

Balpetek ve Gürbüz (2015) donmuş eti çözündürmek için ohmik ısıtma yöntemini kullandıkları çalışmalarında, ohmik ısıtma ile çözündürme yönteminin geleneksel yöntemle kıyasla daha kısa sürede ve daha az ağırlık kaybıyla gerçekleştiğini

bildirmişlerdir. Ancak ohmik ısıtma sistemlerinde homojen ısınmanın meydana gelebilmesi için donmuş ürünün elektrotlarla temasının işlem süresince gerçekleşmesi zorunluluğu vardır. Çözündürme sırasında elektrotlarla temasın sürekliliğini sağlamak ve iletken ortam oluşturmak amacıyla araştırmacılar su ya da tuzlu su kullanmış ve bu fazlar içerisinde ürünü çözülmüşlerdir (Çokgezme ve İçier, 2016; İçier vd., 2016; Liu vd., 2017). İçier vd. (2016) dondurulmuş patates küplerinin çözündürülmesine yönelik yaptıkları bir çalışmada, seçilen çözelti ile gıdanın elektriksel iletkenliği arasındaki bağlantının önemi ve buna yönelik olarak parametrelerin optimize edilmesiyle etkin bir çözündürme işleminin gerçekleştirilebileceği vurgulamışlardır.

2.5.5.5. Mikrobiyal İnaktivasyon

Gıdaların muhafazası için kullanılan ısıya dayalı mikrobiyal inaktivasyon yöntemleri ürünün renk, lezzet ve besin değerleri gibi kalite özelliklerinde kayıplar meydana getirebilmektedir (Cho vd., 2017). Ancak günümüzde tüketicinin minimal işlenmiş, besin değeri yüksek ve güvenilir gıdaya olan talebi gün geçtikçe artmaktadır (Kim ve Kang, 2017). Bu nedenle kalite kaybını en düşük düzeye indiren inaktivasyon yöntemleri araştırılmaktadır. Ohmik ısıtma, geleneksel ısıya dayalı mikrobiyal inaktivasyon mekanizmalarına alternatif bir yöntem olup, hacimsel ve hızlı bir ısıtma ile etkin bir mikrobiyal inaktivasyon sağlayabilmektedir (Park ve Kang, 2013; Yıldız-Turp vd., 2013; Cappato vd., 2017; Cho vd., 2017). Ohmik ısıtma mikrobiyal inaktivasyon mekanizması üzerine termal etki göstermekle birlikte, sistemde kullanılan alternatif akım mikroorganizmaların hücre zarlarında gözenek oluşturmak suretiyle (elektroporasyon) termal olmayan etkiler de göstermektedir (Jeager vd., 2016). Elektriksel akıma maruz bırakılan gıdadaki mikrobiyal hücreler üzerinde yük birikimi gerçekleşir ve bu yük birikimi membran geçirgenliğinin artmasına, hücre zarında gözenek oluşması yoluyla ısı direncin azalmasına neden olmaktadır (Yıldız-Turp vd., 2013; Cappato vd., 2017).

Ohmik ısıtmanın mikrobiyal inaktivasyon üzerindeki etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar, bu yöntemin verimliliğini ve avantajlarını ortaya koymaktadır. Park ve Kang (2013) tarafından yapılan bir çalışmada mikrobiyal inaktivasyon üzerine ohmik ısıtmanın elektroporasyon etkisini incelenmiş ve bulgular, yöntemin ısı ve elektroporasyon etkisiyle birlikte mikrobiyal inaktivasyonu çok daha kısa sürelerde ve daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirebileceğini göstermiştir. Park ve Kang (2017) ise elma sularında mikrobiyal inaktivasyon amaçlı uygulanan ohmik ısıtma yönteminin optimum koşullarını belirledikleri bir çalışmada, uygun voltaj gradyanlarında uygulanan ohmik ısıtma ile etkin

bir mikrobiyal inaktivasyon sağlanabildiğini, ürünün besinsel ve duyu özelliklerinin büyük ölçülerde korunabildiğini ve ekonomik yönden de sağlanabildiğini bildirmişlerdir. Cho vd. (2017) kırmızı biber salçasını pastörize etmek için ohmik ısıtma yöntemini kullanmışlar ve bu yöntemle mikrobiyal inaktivasyonun konvansiyonel yöntemle göre daha kısa sürelerde sağlandığını bildirmişlerdir. Ek olarak, yüksek viskoziteli ürünlerin ısı temelli sterilizasyonu için enerji verimliliği sağlaması açısından da ohmik ısıtma yönteminin daha uygun olabileceğini rapor etmişlerdir.

2.5.5.6. Enzim İnaktivasyonu

Bazı enzimler, gıdalarda kötü koku oluşumuna, renk ve lezzet kayıplarına, tekstürel yapıda değişikliğine neden olabilmekte ve bundan dolayı farklı işleme teknikleriyle gıdalardaki enzim faaliyetlerinin kontrol altına alınması gerekmektedir. Gıdalarda enzim inaktivasyonu için ısı işleme dayalı geleneksel yöntemlerin kullanımı yaygındır (Demirdöven ve Baysal, 2014). Ancak ısı işleme uygulamaları enzimleri inaktive etmesinin yanı sıra gıdanın kalite özelliklerini de etkilemekte ve bundan dolayı alternatif uygulamaların ürün kalitesi üzerine etkileri araştırılmaktadır. Alternatif yöntemlerden biri olan ohmik ısıtmanın, kısa sürelerde etkin bir ısınma gerçekleştirilmesi nedeniyle enzim inaktivasyonunu sağladığı, aynı zamanda da gıdanın kalite parametrelerini önemli düzeyde koruduğu bildirilmiştir (Jakob vd., 2010; Demirdöven ve Baysal, 2014; Makroo vd., 2016).

Ohmik ısıtma yöntemi, gıda ürünlerinde enzim inaktivasyonu sağlarken ürün kalitesini koruma potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Demirdöven ve Baysal (2014) portakal suyu üretiminde acılaşmaya neden olmak suretiyle ürün kalitesi ve tazeliğini azaltan pektin metil esteraz enzimini inaktive etmeye yönelik yaptıkları çalışmada, ohmik ısıtma yöntemi ile bu enzimin %96 oranında inaktive edilebildiğini ve bu sırada ürünün askorbik asit içeriğinin, konvansiyonel yöntemle göre daha iyi korunduğunu bildirmişlerdir. Makroo vd. (2016) ise domates sularına enzim inaktivasyonu amaçlı uygulanan ohmik ısıtma işleminin, ürünün fizikokimyasal karakteristikleri üzerine etkisini incelediği çalışmada, konvansiyonel yöntemle kıyasla ohmik ısıtma yöntemiyle enzim inaktivasyonunun daha kısa sürelerde gerçekleştiğini ve ürünün fizikokimyasal özelliklerinin daha iyi korunduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, Saxena vd. (2016) ohmik ısıtmanın şeker kamışı suyunun bileşimindeki polifenol oksidaz enziminin aktivitesinde etkili bir azalış sağladığını tespit etmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Elma kurutma ve ön kurutma işlemlerinde kabukları soyulmuş ve boyutları yaklaşık 40×50×10 mm olacak şekline dilimlenerek ayarlanmış ‘Granny Smith’ cinsi olgun elmalar (*Malus domestica*) kullanılmıştır. Denemelerde kullanılan tüm elmalar aynı bahçenin ürünleri olarak Isparta ilinin Eğirdir ilçesindeki bir üretici (Özbay Atmosfer Kontrollü Soğuk Hava Tesisi, Isparta, Türkiye) tarafından bağışlanmıştır. Hazırlanan elma dilimleri işlem öncesi enzimatik kararmanın önüne geçmek amacıyla %0,3'lük (w/v) sitrik asit çözeltisinde kısa süreli olarak bekletilmiş ve kaba filtre kâğıdı üzerine koyulmak suretiyle dilimler çözeltiden ayrılmıştır (Yıldız ve Gökayaz, 2019). Tez çalışması kapsamında kullanılan ‘Granny Smith’ elma cinsine ait görsel Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. ‘Granny Smith’ cinsi elmanın görüntüsü

3.2. Yöntem

Doktora tez çalışmasında kullanılan tüm yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

3.2.1. Elektrik İletkenliğinin Belirlenmesi

Elektriksel iletkenliğin belirlenmesinde elma dilimleri paslanmaz çelik bir rende kullanılarak rendelenmiş ve meyve suyu tülbent yardımı ile süzülmüştür. Süzüntü 20 mL’lik beherlere aktarılarak Apera marka iletkenlik ölçer (EC850, Apera Instruments, Columbus, OH, ABD) kullanılarak iletkenlik değerleri 20±2°C sıcaklıkta belirlenmiştir.

3.2.2. Elektriksel İletkenliğin Optimizasyonu

Ohmik ısıtma sistemiyle ön kurutma işlemine maruz bırakılacak elma dilimleri, elektriksel iletkenliğinin artırılması amacı ile Vİ işlemine tabi tutulmuştur. Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliklerinin optimizasyonu işleminde; bir ürünü veya süreci geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için, yanıtlar ve bağımsız değişkenler

arasındaki ilişkiyi belirleyen, deneysel bir tasarım olan yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılmıştır (Myers ve Montgomery, 2002). Elektriksel iletkenliği etkileyen birçok etken olabilmekte ancak bağımsız değişken sayısı arttıkça kurulacak matematiksel model karmaşık hale gelmekte ve model üzerinde yapılacak optimizasyon işlemi güçleşmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı elektriksel iletkenliği etkileyen en önemli üç bağımsız değişken (vakum, süre ve CaCl_2 konsantrasyonu) üzerinde durulmuş ve Vİ işleminin en yüksek elektriksel iletkenliği verecek şekilde optimize edilmesi işleminde bağımsız değişken olarak, süre (10-30 dakika), basınç (100-300 mbar) ve impregnasyon çözeltisi içerisine ilave edilecek olan CaCl_2 miktarı (1-3 g/100 mL) seçilmiş olup, bu değerler yapılan ön denemeler sonucunda belirlenmiştir. Bağımlı değişkenin elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik değerlerinin olduğu çalışmada, belirlenen bu değerlerin alt-üst sınırları, etki faktörleri belirlenmiş, Design-Expert® yazılım paketinde (Sürüm 12.0.3.0, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, ABD) RSM yönteminin içerisinde yer alan Merkezi Karma (Kompozit) Tasarım'dan (Central Composite Design, CCD) yararlanılarak bir deneme deseni elde edilmiştir. Elde edilen deneme desenine göre denemeler yapılmış ve yine aynı programa elde edilen elektriksel iletkenlik değerleri (% değişim) girilerek elektriksel iletkenliğin en üst seviyede (maksimize) olduğu optimum koşullar belirlenmiştir. Bu aşamadan sonraki ön kurutma ve kurutma işlemlerinde, maksimum elektriksel iletkenliğe sahip olacak şekilde optimum koşullarda Vİ işlemine maruz bırakılan elma dilimleri kullanılmıştır.

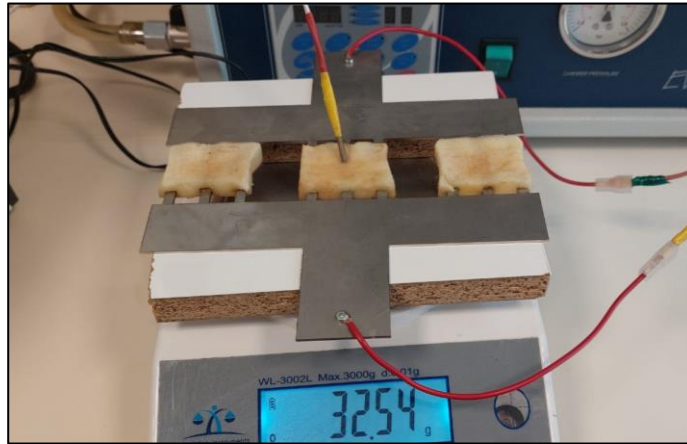
RSM tasarımında kullanılan bağımsız değişkenlere ait kodlanmış faktör sayıları ve gerçek değerler Çizelge 3.1'de sunulmuş olup tasarıma ait bağımlı değişken elektriksel iletkenlik değeridir. Modelden elde edilen verilerin deneysel verilerle uyumluluğuna, model regresyon katsayısı (R^2), düzeltilmiş (adjusted) R^2 , tahmini (predicted) R^2 ve yeterli kesinlik (Adeq. Precision) değerleri göz önünde bulundurularak karar verilmiştir (Myers ve Montgomery, 2002).

Çizelge 3.1. Elektriksel iletkenliğin optimizasyonunda yüzey yanıt metodolojisi tasarımında kullanılan bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri

Bağımsız Değişken	Kodlanmış Faktör Sayısı		
	-1,6817	0	1,6817
	Gerçek Değer		
Faktör A: Vakum (mbar)	100	200	300
Faktör B: İşlem Süresi (dakika)	10	20	30
Faktör C: CaCl_2 Konsantrasyonu (g/100 mL)	1	2	3

3.2.3. Ohmik Isıtmalı Ön Kurutma İşleminin Optimizasyonu

Ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin etkinliğinin arttırmak amacıyla öncelikle elma dilimlerinde en yüksek ağırlık kaybını oluşturacak şekilde uygulanacak voltaj, süre ve sıcaklık kombinasyonları optimize edilmiş ve araştırmanın devamındaki denemeler bu optimum değerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işleminde, yanıt yüzey metodolojisi kullanılmıştır. Bağımlı değişken olan ağırlık kaybı (%) değerinin maksimum olması amacıyla ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin optimizasyonunda bağımsız değişken olarak voltaj (50-100 V aralığında), sıcaklık (50 ve 70°C aralığında) ve işlem süresi (10-30 dakika aralığında) seçilmiş olup, bu değerler ön denemeler sonucunda belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlerin alt-üst sınırları ve etki faktörleri belirlenmiş, Design-Expert® yazılım paketinde (Sürüm 12.0.3.0, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, ABD) RSM yönteminin içerisinde yer alan CCD'den yararlanılarak bir deneme deseni elde edilmiştir. Elde edilen desene göre denemeler yapılmış ve yine aynı programa ön kurutma işlemi sırasında elma dilimlerinde gerçekleşen ağırlık kaybı (%) verileri girilerek, maksimum ağırlık kaybı elde edilecek şekilde optimum koşullar belirlenmiştir. Bu aşamadan sonraki ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinde, belirlenen optimum koşullar kullanılarak elma dilimleri ön kurutma işlemine maruz bırakılmıştır. Standart atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Benzer bir optimizasyon işlemi vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemi için de vakum kabini kullanılarak düşük basınç altında gerçekleştirilmiştir. Hem standart atmosferik basınç hem de vakum altındaki ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinde impregnasyonlu ve impregnasyonsuz elma dilimleri kullanılmış ve her bir ön kurutma yöntemi için optimizasyon işlemi ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Standart atmosferik basınç altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi için optimizasyon denemesine ait görsel

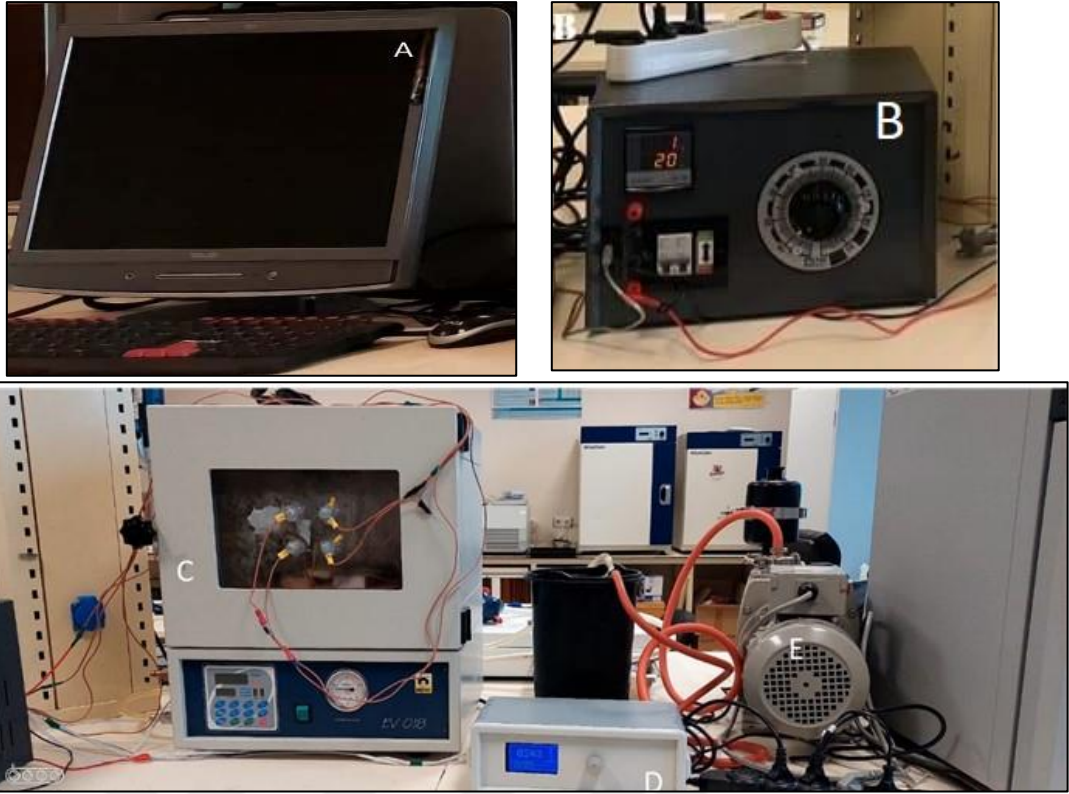
RSM tasarımında kullanılacak bağımsız değişkenler, kodlanmış faktör sayıları ve gerçek değerler Çizelge 3.2’de sunulmuş olup ağırlık kaybı (%) bağımlı değişkendir. Modelden elde edilen verilerin deneysel verilerle uyumluluğuna, model regresyon katsayısı, düzeltilmiş R^2 , tahmini R^2 ve yeterli kesinlik değerleri göz önünde bulundurularak karar verilmiştir (Myers ve Montgomery, 2002).

Çizelge 3.2. Ohmik ısıtma destekli ön kurutma işlemi için yüzey yanıt metodolojisi tasarımıda kullanılan bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri

Bağımsız Değişken	Kodlanmış Faktör Sayısı		
	-1,6817	0	1,6817
	Gerçek Değer		
Faktör A: Voltaj (V)	50	75	100
Faktör B: Sıcaklık (°C)	50	60	70
Faktör C: Süre (dakika)	10	20	30

3.2.4. Vakum Altında Ohmik Isıtmalı Ön Kurutmada Basıncın Belirlenmesi

Elma dilimlerinin yaklaşık 200 mbar sabit basınç altında (suyun kaynama sıcaklığına karşılık gelen sıcaklık 60°C) ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemine tabi tutulması planlanmıştır. Vakum düzeyinin ayarlandığı ve daha sonra vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutmanın gerçekleştirildiği düzenek, Gıda Mühendisliği Laboratuvarı’nda bulunan vakumlu bir etüv modifiye edilerek tasarlanmıştır. Sıcaklığın 60°C’de sabit tutulmasının sebebi, ürün içerisinde aşırı ısınmanın ve böylece ürünün yanması veya aşırı kararması sorunun önüne geçilmesidir. Ancak 200 mbar basınç altında ohmik ısıtmanın uygulanmasıyla, tez çalışmasında ön kurutma sıcaklıkları olarak belirlenen 60 ve 70°C’lere ulaşılması mümkün olmamıştır. Gerçekleştirilen ön denemeler sonunda vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutmanın 578 mbar basınç altında (suyun kaynama sıcaklığı 85°C) yapılmasının uygulamada daha uygun olacağına karar verilmiştir. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi için vakum düzeyinin belirlenmesi ve sistem elemanlarının görüntüsü Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Vakum altında ohmik ön kurutma işlemi için vakum düzeyinin belirlenmesi ve sistem elemanlarının görüntüsü (A: Bilgisayar, B: Güç kaynağı, C: Vakum kabini, D: Vakum regülatörü, E: Vakum kabinine entegre pompa).

3.2.5. Vakum İmpregnasyon İşlemi

Bu işlem öncesinde Vİ çözeltisi hazırlanmıştır. Çözelti %32,5 dekstroz, %16,0 sakaroz, %1,0 askorbik asit (koruyucu amaçlı), CaCl_2 (elektriksel iletkenliği arttırmak için) içerecek şekilde hazırlanmıştır. İlave edilecek olan CaCl_2 oranı 1-3g/100 mL aralığında belirlenmiş olup en yüksek elektriksel iletkenlik değerini verebilecek nihai konsantrasyon, tezin ileriki aşamalarında sunulan optimizasyon çalışmasıyla belirlenmiştir.

Vakum impregnasyon ön işleminin uygulanmasında, $40 \times 50 \times 10$ mm boyutlarındaki elma dilimleri vakum kabına (Rv-261, Re-Va® Tıbbi Cihaz San. ve Tic. Ltd. Şti., İzmir, Türkiye) yerleştirilmiş ve elmaların şurup içinde kalmasını sağlamak amacı ile elmaların üzerine galvaniz bir tel ve ağırlık koyularak, elma dilimlerinin üzerine yaklaşık 1:4 (w/v) oranında impregnasyon çözeltisi ilave edilmiştir. Design-Expert® paket programında (Sürüm 12.0.3.0, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, ABD) sunulan deneme desenindeki basınç (mbar), süre (dakika) ve impregnasyon çözeltisine ilave edilecek CaCl_2 konsantrasyonu (g/100 mL) kombinasyonlarına göre Vİ işlemi uygulanmıştır. Her bir

deneme için 4 farklı elma ve bu elmalardan elde edilen 16 adet elma dilimi kullanılmıştır. İşlem 40°C sıcaklıkta uygulanmış ve işlem sonrasında örnekler süzülerek çözeltiden ayrılmıştır (Karacaoğlu, 2017). Vİ işleminin uygulanmasına ait görsel Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Vakum impregnasyon işleminin uygulanmasına ait görsel

3.2.6. Kurutma Yöntemleri

Tez çalışması kapsamında elma dilimleri 3 farklı kurutma yöntemiyle kurutulmuş ve bu yöntemlerden elde edilen elma örneklerinin bazı özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu üç farklı kurutma yönteminin yanı sıra, elma dilimleri ya doğrudan ya da elektriksel iletkenlikleri Vİ işlemiyle artırılmış şekilde standart atmosfer basıncı veya vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi sonrasında yine bu üç farklı yöntemle kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutma yöntemleriyle ilgili detaylar aşağıda sunulmuştur.

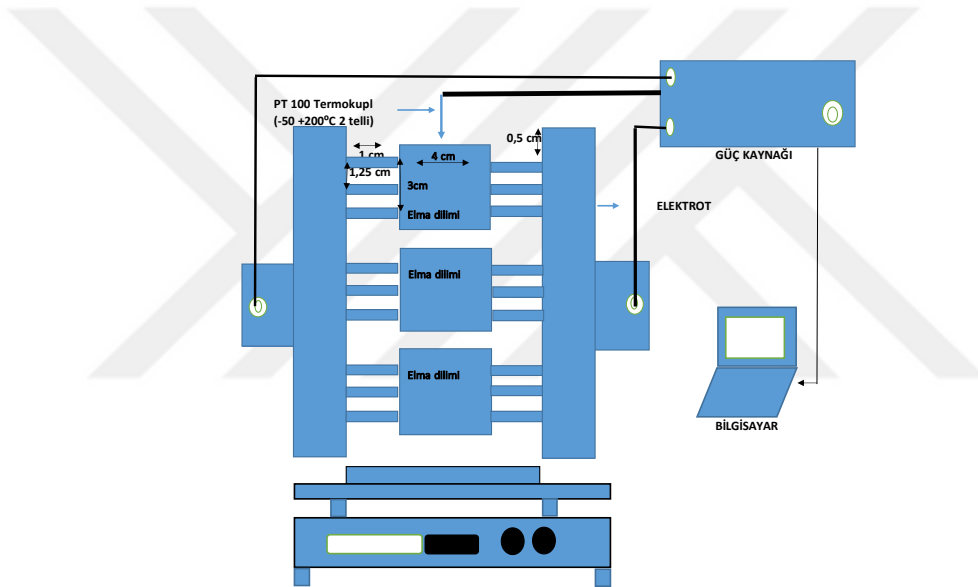
3.2.6.1. Konvektif Kurutma

Elma dilimleri 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda doğal konveksiyonlu bir etüv (Wisecube, Daihan Scientific Co. Ltd., Seul, Güney Kore) kullanılarak, dilimleri nem içeriği yaş ağırlık (ya) bazında 15 g/100 g düzeyine ulaşana kadar kurutulmuştur. Tüm denemeler 3 tekrerrör olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu kurutma işlemi hem taze hem de Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği artırılmış elma dilimlerine uygulanmıştır.

3.2.6.2. Atmosfer Basıncında Ohmik Ön Kurutmalı Konvektif Kurutma

Ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi hem standart atmosfer hem de vakum altında gerçekleştirilmiştir. Standart atmosfer basıncındaki işlemde ohmik ısıtma düzeneğini oluşturan elektrotlar, elektrik izoleli ısıleş ve analitik terazi gibi ekipmanlar vakum

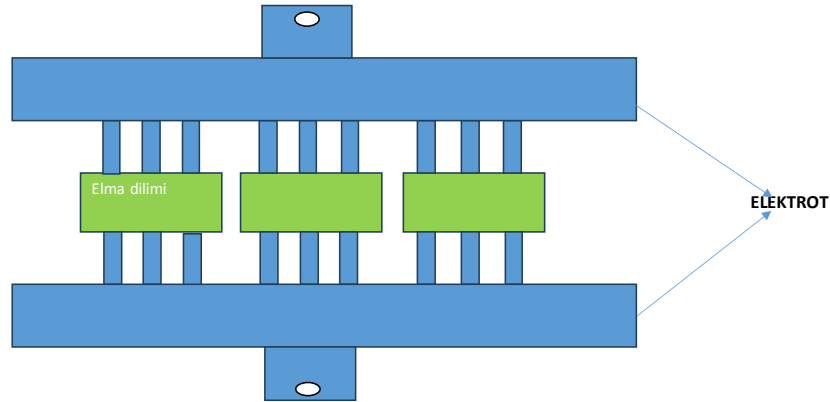
kabininden çıkarılarak laboratuvar tezgâhı üzerine yerleştirilerek denemeler gerçekleştirilmiştir. Elma dilimlerinin kurutulması aşamasında en yüksek ağırlık kaybını verecek şekilde optimize edilen voltaj, süre ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Bu değerler, Vİ işlemine maruz bırakılmayan elma dilimleri için 90 V, 22 min ve 59°C iken maruz bırakılan elma dilimleri için 87 V, 26 min ve 66°C olarak belirlenmiştir. Ohmik ısıtmayla belli bir nem düzeyine ulaşan elma dilimleri konvektif bir etüve (Wisecube, Daihan Scientific Co. Ltd., Seul, Güney Kore) alınarak 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda nem içeriği 15 g/100 g ya düzeyine ulaşana kadar kurutulmaya devam edilmiştir. Tüm denemeler 3 tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Standart atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma düzeneğindeki elma dilimleri, elektrotlar, elektrik izoleli ısıleş ve analitik teraziye ait görsel Şekil 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.5. Standart atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin uygulanmasına ait görsel

Ohmik ısıtmalı ön kurutma düzeneği gerekli finansal ve teknik desteğin alınması sonrasında, Burdur MAKÜ Gıda Mühendisliği Bölümü Araştırma Laboratuvarı'na kurulmuştur. Kullanılan varyak (Reksan Enerji Regülatör Pano ve İnşaat San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye) 220 V giriş voltajı, 0-250 V çıkış voltajı, 2000 W güç ve 50 Hz frekans değerlerine sahiptir. Ohmik ısıtma işlemi gıdanın içerisinden geçecek akımı sağlayan iki adet çıkarılabilir yuvarlak uçlu (3 yuvarlak uca 1 elma dilimi girecek şekilde tasarlanmıştır) paslanmaz çelik (316) elektrot plaka (50×150×2 mm, genişlik×uzunluk×kalınlık) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Sistemdeki her iki elektrot elektrik güç kaynağına bağlanarak gıdaya elektrik iletimi için yüzeysel temas sağlamıştır. Ohmik ısıtmalı ön kurutma sırasında elma dilimlerinin sıcaklık ölçümünde PT 100 tipi ısıleş (Tetcis Ltd. Şti., Ankara, Türkiye)

kullanılmış ve sıcaklıklar süreye karşı bilgisayara kaydedilmiştir. Atmosfer basıncı ve vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminde kullanılan elektrotların şematik gösterimi Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

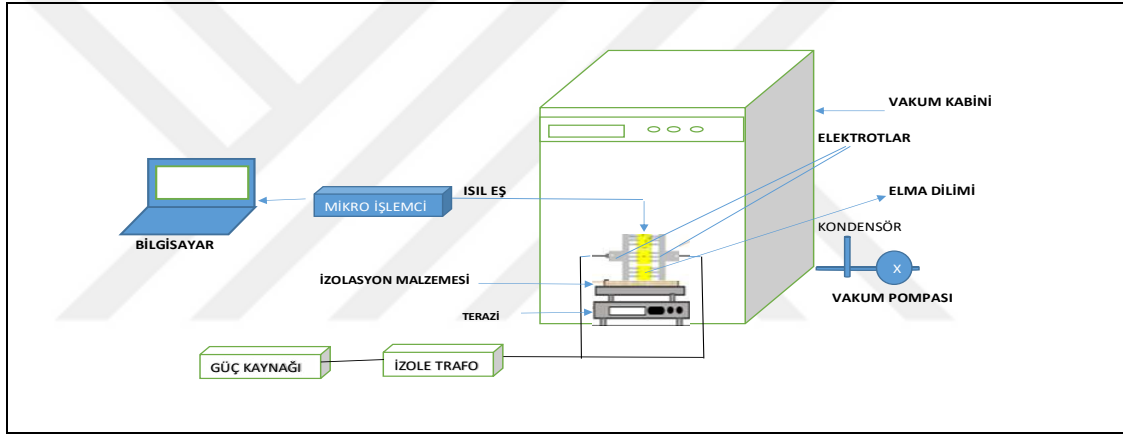


Şekil 3.6. Ohmik ısıtmalı ön kurutma uygulanan elma dilimlerinin ve kullanılan elektrotların şematik gösterimi

3.2.6.3. Vakum Altında Ohmik Ön Kurutmalı Konvektif Kurutma

Elma dilimleri, saf suyun kaynama noktası olan 85°C sıcaklığa karşılık gelen 578 mbar sabit vakum altında RSM yöntemi ile belirlenen optimum süre, sıcaklık ve voltaj kombinasyonunda, Burdur MAKÜ Gıda Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı’nda bulunan ve ohmik ısıtma gerçekleştirilebilecek şekilde modifiye edilen vakum kabini (Nüve EV018 Vakumlu Fırın, Nüve Sanayi Malzemeleri İmalat ve Ticaret A.Ş., Ankara, Türkiye) kullanılarak ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutmada en yüksek ağırlık kaybını verecek optimum voltaj, süre ve sıcaklık kombinasyonları, Vİ işlemine maruz bırakılan dilimleri için 89 V, 22 min ve 59°C iken maruz bırakılmayan elma dilimleri için 87 V, 26 min ve 66°C olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bu aşamasında elma dilimlerinin nem içeriklerinin ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemiyle belli seviyelere düşürülmüştür. Ohmik ısıtma uygulamasıyla elmaların nem içeriğinin azalmış ve bu azalmayla birlikte elmaların elektriksel iletkenlik değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Bu da beraberinde yavaşlayan buharlaşma ile kendini göstermiştir. Belli bir nem değerinden sonra elma dilimlerinden akım geçişi tamamen durmuştur. Ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi tamamlandıktan sonra elma dilimleri konvektif bir etüve (Wisecube, Daihan Scientific Co. Ltd., Seul, Güney Kore) alınarak, nem içeriği 15 g/100 g ya düzeyine ulaşana kadar 50, 60 ve 70°C’ler’de kurutmaya devam edilmiştir.

Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi sırasında vakum kabininin ısıtma fonksiyonu kapalı halde tutulmuştur. Elma dilimleri sadece ohmik ısıtıcı ile ısıtılmış ve ortam vakum düzeyi 578 mbar'a ayarlanarak sistemine entegre edilen bir ısıtıcı ile ürün sıcaklığının ayarlanan seviyelerin üzerine çıkmaması sağlanmıştır. Sıcaklık 85°C'nin üzerine çıkınca sistem elektrik akımını kesmiş ve böylece, ürünün yüksek sıcaklık altında yanmasının veya kararmasının önüne geçilmiştir. Ohmik ısıtmalı ön kurutma sistemine vakumlu etüv eklenerek sistem Şekil 3.7'de gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi, 20-24 m³/saat pompalama hızı ve 0,75 kW motor gücüne sahip vakum pompası (MVP 24, Woosung Vacuum Co. Ltd, Jeju, Güney Kore) kullanılarak sabit vakum altında (578 mbar) gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda belirlenen sıcaklık özel olarak imal edilmiş elektrik izoleli ısıtıcı (Tetcis Ltd. Şti., Ankara, Türkiye) kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 3.7. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin şematik gösterimi

3.2.7. Kurutma Kinetiğinin Belirlenmesi

3.2.7.1. Nem İçeriği

Farklı yöntemlerle kurutulan elma dilimlerinin nem içerikleri (M_t) Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır (Maskan, 2001).

$$M_t = \frac{m - KM}{KM} \quad (3.1)$$

Buradaki M_t : Herhangi bir t anındaki nem içeriğini (g su/ g km), m : Numune ağırlığını (g) ve KM : Numunenin içerdiği kuru madde miktarını (g) göstermektedir.

3.2.7.2. Kurutma Hızı

Farklı yöntemlerle kurutulan elma dilimlerinin kurutma hızları (KH) Denklem 3.2'ye göre hesaplanmıştır (Maskan, 2001).

$$KH (g su / h) = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3.2)$$

Burada M_{t+dt} : t+dt anındaki nem içeriğini (g su/ g km), M_t : Herhangi bir t anındaki nem içeriğini (g su/ g km) ve t: Kuruma süresini (h) ifade etmektedir.

3.2.7.3. Nem Oranı

Farklı yöntemlerle kurutulan elma dilimlerinin nem oranları (MR) Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır (Maskan, 2001).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.3)$$

Burada MR: Nem oranını (birimsiz), M_t : Herhangi bir t anındaki nem içeriğini (g su/ g km), M_e : Denge anındaki nem içeriğini (g su/ g km) ve M_0 : Başlangıçtaki nem içeriğini (g su/ g km) ifade etmektedir.

3.2.7.4. Matematiksel Modelleme

Matematiksel modelleme kurutma için önem arz etmektedir. Matematiksel modelleme ürünün kurutulması için optimum koşulların belirlenmesi ve sonrasında uygun kurutma yapılabilmesi amacıyla kurutma ekipmanlarının tasarlanmasına imkân sağlamaktadır. Farklı işlemlere maruz bırakılmış elma dilimlerinin farklı yöntemlerle kurutulması sırasındaki kuruma hızları ve nem oranı değerleri deneysel kurutma verileri oluşturmak amacıyla hesaplanmıştır. Farklı kurutma yöntemleriyle kurutulan elma dilimlerinin kuruma kinetiğinin matematiksel modellenmesi amacıyla Çizelge 3.3'teki ince tabaka kurutma modelleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Kurutma kinetiğinin matematiksel modellenmesinde kullanılan ince tabaka kurutma kinetiği modelleri

Model İsmi	Model Denklemleri*	Kaynaklar
Henderson ve Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Bengston vd. (1998)
Logaritmik	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + ct$	Ertekin ve Yıldız (2001)
Jena - Das	$MR = k \cdot \exp(-h \cdot t + j(t^{0.5}) + m)$	Jena ve Das (2007)
Midilli ve Küçük	$MR = h \cdot \exp(-j \cdot t^k) + (m \cdot t)$	Midilli vd. (2002)
Wang ve Singh	$MR = 1 + k \cdot t + h \cdot t^2$	Wang- Singh (1978)
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	Page (1949)
Lewis - Newton	$MR = \exp(-k \cdot t)$	Lewis (1921)

*a, c, h, k, n, j ve m model katsayılarını, MR ise nem oranını ifade etmektedir.

3.2.7.5. Efektif Difüzyon Katsayısı

Fick'in İkinci Yasası, difüzyon süreçlerini tanımlamak için kullanılır ve özellikle kurutma işlemlerinde nemin ürünlerden uzaklaşmasını açıklamada önemlidir. Bu yasa, bir maddenin konsantrasyon gradyanına bağlı olarak nasıl yayıldığını açıklar ve zamanla değişen difüzyon süreçlerini modellemek için kullanılır (Denklem 3.4) (Doğantürk, 2016).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 C \quad (3.4)$$

Burada C: konsantrasyonu, t: zaman değişkenini, D_{eff} : difüzyon katsayısını ve ∇^2 : Laplace operatörü olup uzaysal değişimleri temsil eder.

Bu denklem, bir maddenin zamanla nasıl yayıldığını ve konsantrasyonunun nasıl değiştiğini gösterir. Kurutma işlemlerinde, bu yasa, ürünlerden nemin nasıl uzaklaştığını ve bu sürecin zamanla nasıl değiştiğini anlamak için kullanılır. Özellikle, nemin uzaklaşma hızı ve yayılan alan miktarı gibi parametreler bu yasa ile modellenilebilir. Efektif difüzyon katsayısı değeri hesaplanırken, ürünün dokusunun korunduğu ve nemin yalnızca difüzyon yolu ile ortamdan uzaklaştığı varsayılmaktadır. Difüzyon katsayısı değeri Denklem 3.5 ve 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır (Crank, 1975; Türker ve İşleroğlu, 2017).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (3.5)$$

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (3.6)$$

Burada D_{eff} : Efektif difüzyon değerini (m^2/s), L: Ürünün dilim kalınlığının yarısını (m) ve t: Ürünün kuruma süresini (dakika) göstermektedir.

3.2.7.6. Aktivasyon Enerjisi

Kimyasal bir reaksiyonun başlaması için gerekli olan minimum enerji miktarını ifade eden aktivasyon enerjisi, bir reaksiyonun hızını etkileyen önemli bir faktördür. Düşük aktivasyon enerjisine sahip reaksiyonlar genellikle daha hızlı gerçekleşirken, yüksek aktivasyon enerjisine sahip reaksiyonlar daha yavaş gerçekleşir. Bu kavram, Arrhenius eşitliği gibi matematiksel modellerle de ifade edilebilir ve kurutmanın sıcaklığa bağımlılık düzeyi aktivasyon enerjisi hesaplanarak belirlenir (Cemeroğlu, 2013). Doktora tez kapsamında, aktivasyon enerjisinin hesaplanması için yararlanılan Arrhenius eşitliği Denklem 3.7’de gösterilmiştir (Doğantürk, 2016).

$$k = k_0 \exp^{-E_a/RT} \quad (3.7)$$

Burada k: kinetik sabitini (h^{-1}), k_0 : Arrhenius sabiti veya frekans faktörünü, R: Gaz sabiti ($8,3143 \text{ kJ.mol.K}^{-1}$), E_a : Aktivasyon enerji değerini (kJ.mol^{-1}) ve T: Kurutma havasının mutlak sıcaklığını (K) göstermektedir.

Arrhenius Denklemi’nin doğal logaritması alındığında Denklem 3.8 elde edilir.

$$\ln k = \ln k_0 - \left(\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T} \quad (3.8)$$

Bu denklemden yararlanılarak $1/T$ ’ye karşı $\ln k$ grafiği çizilmiştir. Elde edilen doğrunun eğiminden yararlanılarak ve Denklem 3.9 kullanılarak aktivasyon enerjisi (E_a) hesaplanmıştır.

$$E_a = -\text{eğim} (R) \quad (3.9)$$

3.2.8. Rehidrasyon Kinetiğinin Belirlenmesi

3.2.8.1. Rehidrasyon Oranı, Rehidrasyon Kapasitesi ve Hacimsel Büzüşme Oranı

Kurutulan ürünlerin rehidrasyon sırasında su alma eğilimlerinin yüksek olması istenmektedir. Su alma yeteneğinin yüksek olması, kurutulmuş gıdanın kullanıldığı yerlerde aromasını dışa vermesi açısından önem arz etmekte olup, yapılan çalışmalarda rehidrasyon parametresinin, uygulanan ön işlemlerden ve örnek bileşiminden etkilendiği, fiziksel ve kimyasal değişim gösterdiği belirtilmektedir (Doymaz, 2004). Doktora tez çalışmasında farklı muameleler sonrasında 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulmuş elma dilimleri yine 50, 60 ve 70°C sıcaklıklardaki su banyosunda (Daihan Scientific Co. Ltd.,

WiseBath, Gang-Won-Do, Güney Kore) rehidrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu amaçla, yaklaşık 3 g kurutulmuş elma örneği, içerisinde 150 mL distile su bulunan bir behere koyulmuş ve sabit sıcaklıktaki su banyosunda rehidrasyonun gerçekleştirilmesi için 10 saat bekletilmiştir. Örnekler birer saat aralıklarla su banyosundan çıkartılmış, üzerindeki fazla suyun giderilmesi amacı ile filtre kâğıdı üzerinde yaklaşık 30 saniye bekletilmiş ve tartılmıştır. Örneklerin rehidrasyon kapasitesi (RK) Denklem 3.10 (Ertekin ve Yıldız, 2004), rehidrasyon oranı (RO) ise Denklem 3.11 (Chen vd., 2017) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RK (\%) = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) * 100 \quad (3.10)$$

Buradaki RK: Rehidrasyon kapasitesini (%), M_2 : Herhangi bir t süresindeki örneğin ağırlığını (g) ve M_1 : Başlangıçtaki örnek ağırlığını (g) ifade etmektedir.

$$RO = \frac{M_2}{M_1} \quad (3.11)$$

Buradaki RO: Rehidrasyon oranını, M_2 : Herhangi bir t süresindeki örneğin ağırlığını (g) ve M_1 : Başlangıçtaki örnek ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Elma dilimlerinin hacimsel büzüşme oranının (HBO) belirlenmesi için hacmi bilinen cam boncuklar (çap 2 mm) (Merck, Darmstadt, Almanya) kullanılmıştır. 250 mL hacmindeki bir mezür yarıya kadar cam boncuklarla doldurulmuş ve üzerine yaş veya kurutulmuş elma dilimleri konulmuştur. Kalan boş kısım tekrar boncuk ile doldurularak, boşlukların tam olarak kapanması için mezürler laboratuvar tezgahına 10 defa hafif sertlikte vurulmuştur. Boncukla mezürün boş yerleri tamamen doldurulduktan sonra taşan boncuk ağırlığı belirlenmiştir. Bu sayede kurutulmuş ve yaş elma dilimlerinin hacmi cm^3 cinsinden belirlenmiş ve yüzde olarak büzüşme oranları hesaplanmıştır (Henríquez vd., 2014). Büzüşme oranı için Denklem 3.12 kullanılmıştır.

$$HBO = \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1} \right) * 100 \quad (3.12)$$

Burada HBO: Büzüşme oranını (%), V_1 : İlk hacmi (cm^3) ve V_2 : Son hacmi (cm^3) ifade etmektedir.

3.2.8.2. Matematiksel Modelleme

Deneysel veriler kullanılarak, rehidrasyon kinetiği Peleg, Weibull ve Birinci Dereceden Model ile belirlenmiştir (Peleg, 1988; Kiranaudis vd., 1992). Model katsayılarını hesaplamak için Microsoft Excel® programı (Microsoft Corporation, Redmond, WA, ABD) kullanılmıştır. Yapılan deneylere en uygun modeli bulmak için hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE, model uygunluğu açısından 0'a yakın olması istenir) ve ki-kare (χ^2 , model uygunluğu açısından 0'a yakın olması istenir) değerleri hesaplanmıştır (Doymaz, 2004). Uygunluk belirleme açısından determinasyon katsayıları (R^2 değerleri, 1'e yakın olması model uygunluğu açısından önemlidir) hesaplanmıştır.

Rehidre edilmiş elma dilimlerinin Peleg Modeli'ndeki kinetik modellenmesi Denklem 3.13'e göre hesaplanmıştır (Peleg, 1988; Ricce vd., 2016).

$$M = M_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 * t} \quad (3.13)$$

Burada M: Rehidrasyonun t süresindeki örneğin nem içeriğini (kg su/ kg kuru madde), M_0 : Rehidre edilmemiş ürünün nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), k_1 : Peleg hız sabitini (h.kg kuru madde/kg su), k_2 : Peleg kapasite sabitini (kg kuru madde/kg su) ve t: Rehidrasyon süresini (h) göstermektedir.

Rehidre edilmiş elma dilimlerinin Weibull Modeli'ndeki kinetik modellenmesi Denklem 3.14'e göre hesaplanmıştır (Ricce vd., 2016).

$$M = M_e + (M_e - M_0) \exp \left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha \right] \quad (3.14)$$

Burada M: Rehidrasyonun t süresindeki örneğin nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), M_e : Denge nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), M_0 : Rehidre edilmemiş örneğin başlangıç nem içeriğini (kg su/ kg kuru madde), t: Rehidrasyon süresini (h), α : Weibull Modeli'nin şekil parametresini ve β : Weibull Modeli'nin hız parametresini (h) ifade etmektedir.

Rehidre edilmiş elma dilimlerinin Birinci Dereceden Kinetik Model'e göre modellenmesinde Denklem 3.15 kullanılmıştır (Ricce vd., 2016).

$$M = M_e + (M_e - M_0) \exp (-kt) \quad (3.15)$$

Burada M : Rehidrasyonun t süresindeki örneğin nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), M_e : Denge nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), M_0 : Rehidre edilmemiş örneğin başlangıç nem içeriğini (kg su/ kg kuru madde), t : Rehidrasyon süresin (h) ve k : Birinci Dereceden Kinetik Model'in rehidrasyon hız sabitini (1/h) ifade etmektedir.

3.2.9. Elma Dilimlerinde Gerçekleştirilen Analizler

Taze, farklı işlemlerle ön işlenmiş ve kurutulmuş elma dilimlerinde gerçekleştirilen kimyasal, fiziksel, fizikokimyasal ve tekstürel analizler aşağıda sunulmaktadır.

3.2.9.1. Suda Çözünür Kurumadde Tayini

Taze elma örneklerinin suda çözünür kuru madde içerikleri ($^{\circ}\text{Brix}$) Cemeroğlu (2013)'de belirtilen metoda göre dijital bir refraktometre (PAL-3, Atago Inc., Tokyo, Japonya) kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla taze elmalar bir paslanmaz çelik rende ile rendelenerek püre haline getirilmiş, ardından çift katlı bir tülbent kullanılarak berrak suları çıkartılmıştır. Berrak meyve suyundan refraktometreye birkaç damla damlatılarak örneklerin $^{\circ}\text{Brix}$ değerleri doğrudan oda sıcaklığında belirlenmiştir.

3.2.9.2. pH

Taze elma dilimleri öncelikle bir rende ile rendelenerek püre haline getirilmiş ve pürelerin pH değeri 20°C 'de Jenco 6173 model bir pH metre (Jenco Instruments, Taipei, Tayvan) kullanılarak belirlenmiştir (AOAC, 2002).

3.2.9.3. Titrasyon Asitliği

Meyve ürünlerinde olgunluk kriteri olarak $^{\circ}\text{Brix}/\text{Asitlik}$ oranı yaygın olarak kullanılan bir parametredir (Cemeroğlu, 2007). Bu nedenle, denemelerde kullanılacak taze elmaların olgunluk düzeyinin belirlenmesi için titrasyon asitliği tayini gerçekleştirilmiştir. Öncelikle taze elma dilimleri püre haline getirilerek bir tülbent ile püre sıkılarak meyve suyu çıkarılmıştır. Elde edilen bu elma suyunun titrasyon asitliği belirlenmesinde, belirli bir hacimdeki elma suyu (5-10 mL) 0,1N sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile fenolftalein indikatörü eşliğinde (pH 8,1 oluncaya dek) titrasyona tabi tutulmuş ve titrasyon asitliği yüzde malik asit cinsinden (g/100 mL) hesaplanmıştır (Cemeroğlu, 2007).

3.2.9.4. Kuru Madde İçeriği

Taze ve kurutulmuş elma örneklerinin kuru madde (veya nem) içeriği, örneklerin doğal konvektif bir etüvde 60°C’de sabit ağırlığına ulaşıncaya kadar kurutulması ile gravimetrik olarak belirlenmiştir (Cemeroğlu, 2007).

3.2.9.5. Tekstür Analizleri

Taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin kesme sertliği Shimadzu marka tekstür analiz cihazına (EZ-LX Long Stroke, Shimadzu, Kyoto, Japonya) takılan “bıçak kesme aparatı” (“Blade Shear Jig”, Shimadzu, Kyoto, Japonya) ile belirlenmiştir. rn yüzeyini kesmek için gerekli maksimum kuvvet (N) ve enerji (Joule) değerleri belirlenmiş ve elma dilimlerine uygulanan farklı işlemlerin kesme sertliği üzerine etkileri karşılaştırılmıştır. Taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin delme sertliği ise aynı cihaza takılan ve delici silindir çapı 5 mm olan “iğne aparatı” (“Needle Jig”, Shimadzu, Kyoto, Japonya) ile belirlenmiştir. rn yüzeyini delmek için gerekli maksimum kuvvet (N) değerleri belirlenmiş ve elma dilimlerine uygulanan farklı işlemlerin delme sertliği üzerine etkileri karşılaştırılmıştır.

3.2.9.6. Antioksidan Kapasite ve Toplam Fenolik Madde İçeriği

Elma dilimi örneklerinde AK ve TFMİ değerlerinin belirlenmesinde, biyoaktif özelliğe sahip bileşenlerin ayrıştırılması amacıyla öncelikle ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Gölcük vd., 2020). Elde edilen ekstrakt, her iki denemede de kullanılmıştır. Ekstraktların hazırlanmasında kurutulmuş (veya taze) rnekler (2-5 g) sulu etanol (40 mL, hacmen %70 etil alkol) ile karıştırılmıştır. Karışım homojenizerden (WiseTis HG-15D, Daihan Scientific Co. Ltd., Seul, Güney Kore) geçirilmiş ve ardından 30 dakika boyunca 200 rpm’de orbital karıştırıcıda (Widhshake, Daihan Scientific Co. Ltd., Seul, Güney Kore) alkalanmıştır. Daha sonra, hazırlanan çözelti ölçü balonuna (balon joje) (50 mL) dikkatli bir şekilde alınarak, ölçü balonu hacim çizgisine kadar sulu etanol (hacmen %70 etil alkol) ile tamamlanmıştır. İyice çalkalanan karışımdan belli bir hacim (yaklaşık 2 mL) Eppendorf® tüplerine aktararak berrak bir st fazın (süpernatant) eldesi amacıyla beş dakika boyunca 12.225xg kuvvette mikrosantrifüj (WiseSpin CF-10, Daihan Scientific Co. Ltd., Seul, Güney Kore) işlemine maruz bırakılmıştır. Elde edilen süpernatant aşağıda belirtilen iki analizde kullanılmıştır.

Elma dilimlerinin AK değerleri 2,2’-azino-bis(3-etilbenzotiazolin-6-sulfonik asit (ABTS) kimyasal maddesinin kullanıldığı yöntemle belirlenmiştir. Reaksiyon sonucu

harcanan ABTS^{•+} miktarı, Trolox® eşdeğeri (TE) olarak hesaplanmış ve sonuç “Trolox® Eşdeğeri Antioksidan Kapasitesi” (TEAC) olarak ifade edilmiştir (Re vd., 1999). ABTS, konsantrasyonu 7,00 mM olacak şekilde suda çözündürülüp, 2,45 mM’lık potasyum persülfat ile aynı hacimde karıştırıldıktan sonra karışım yaklaşık 12-16 saat koyu mavi renk oluşana kadar oda sıcaklığında tutulmuş; elde edilen stok çözeltinin absorbans değeri 734 nm dalga boyunda yaklaşık 1,20 olacak şekilde kromatografik saflıktaki metanol çözeltisiyle seyreltilmiştir (çalışma çözeltisi). Ardından, daha önce hazırlanan süpernatanttan 0,150 mL alınıp 2,850 mL ABTS çalışma çözeltisi eklenerek, karışım karanlık ortamda 30 dakika bekletilmiştir. Bekletme sonunda çözeltilerin absorbans değerleri 734 nm dalga boyunda spektrofotometrede (Optizen Pop, Mecasys Co., Ltd., Daejeon, Güney Kore) belirlenmiştir. Doğrusal kalibrasyon eğrisi farklı konsantrasyonlardaki Trolox® çözeltisi ile elde edilmiş olup, sonuçlar 100 g km başına µmol TE olarak ifade edilmiştir.

Örneklerin TFMİ değerlerinin belirlenmesi amacıyla “Micro-adapted Folin-Ciocalteu Yöntemi” kullanılmıştır (Cemeroğlu, 2007). Hazırlanan ekstraktan 0,5 mL alınarak test tüplerine yerleştirilerek, her bir tüpe 2,5 mL Folin-Ciocalteu reaktifi (Sigma-Aldrich, St. Louis, Missouri, ABD) ilave edilmiştir. Reaksiyon başladıktan 3 dakika sonra 2,0 mL sodyum bi-karbonat (%20’lik Na₂CO₃, Riedel-de Haen, Darmstadt, Almanya) çözeltisi eklenerek karıştırılmış ve 2 saat karanlık ortamda bekletilmiştir. Süre sonunda örneklerin absorbans değerleri spektrofotometrede (Optizen Pop, Mecasys Co., Ltd., Daejeon, Güney Kore) 760 nm dalga boyunda belirlenmiş (Cemeroğlu, 2007) ve sonuçlar 100 g kuru madde başına mg GAE olarak ifade edilmiştir.

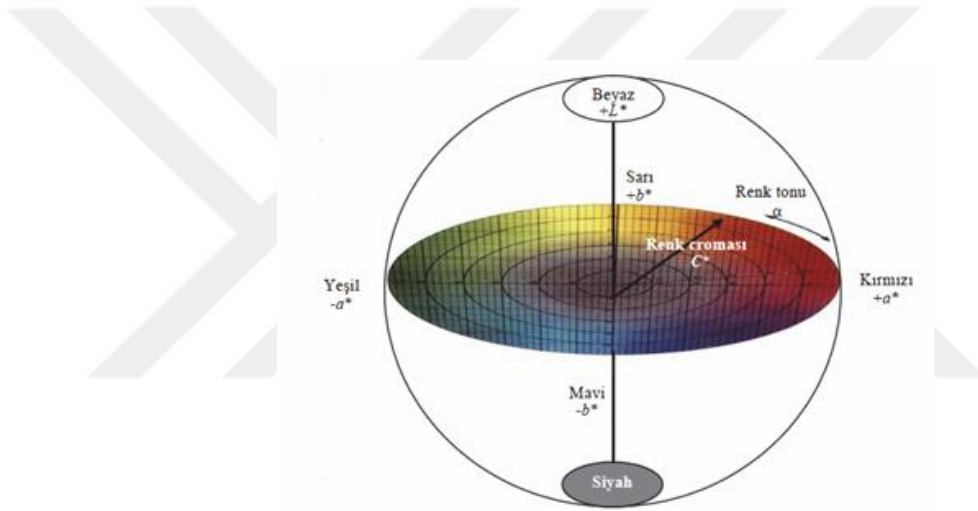
3.2.9.7. Kül Tayini

Örneklerin kül içeriğinin (%) belirlenmesinde, toplam kuru madde tayini amacıyla kurutulan örnekler tartılarak krozeler içerisine alınmış, kül fırınında kademeli olarak 650°C sıcaklıkta örnek rengi gri-beyaza dönünceye kadar (18-24 saat) yakılmıştır. Yakma sonrasında krozelerde kalan kül ağırlığı, yakma öncesi kuru örnek ağırlığına oranlanarak kurutulmuş elma dilimlerinin kül içerikleri kuru madde esasına göre hesaplanmıştır (AOAC Metot 950.46B, 1990).

3.2.9.8. Renk Analizleri

Elma örneklerinin renk ölçümlerinde Konica Minolta marka bir kolorimetre cihazı (CR400, Tokyo, Japonya) kullanılmıştır. Taze ve kurutulmuş elma dilimlerinde renk

ölçümleri 3 tekerrür ve 3 paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Gölcük vd., 2020). Cihaz kullanım öncesinde üreticisi tarafından sağlanan beyaz standart levha kullanılarak kalibre edilmiş ve sonra elma dilimlerinin yüzeyine ait renk özellikleri “Uluslararası Aydınlatma Komisyonu” (Commission Internationale de l’Éclairage, CIE) renk uzayı (CIELAB) kullanılarak belirlenmiştir. Bu skaladaki L^* (siyahtan beyaza doğru değişen) eksenini aydınlık/açıklık değerini vermekte ve değerler 0 ile 100 arasında değişmektedir. Skaladaki a^* değeri kırmızı-yeşil renkleri ifade etmekte olup ölçülen değer pozitif ise kırmızı renk, negatif ise yeşil renk tonlarına karşılık gelmektedir. Skaladaki son parametre olan b^* değeri ise sarı-mavi rengi ifade etmekte olup ölçülen değer pozitif ise sarı renk, negatif ise mavi renk tonunu ifade etmektedir. CIELAB uzayının şematik gösterimi Şekil 3.8’de sunulmaktadır.



Şekil 3.8. CIELAB renk uzayının şematik görüntüsü (Çakır, 2015)

CIELAB renk uzayındaki L^* , a^* ve b^* değerleri belirlenerek, toplam renk farkı (ΔE^*), kroma farkı (ΔC^*), kroma (C^*) ve hue açısı ($^\circ$) gibi diğer renk özellikleri sırasıyla Denklem 3.16, 17, 18 ve 19 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3.16)$$

$$\text{Hue Açısı (rad)} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (3.17)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^{*2}) + (\Delta a^{*2}) + (\Delta b^{*2})} \quad (3.18)$$

$$\Delta C^* = \sqrt{(\Delta a^{*2}) + (\Delta b^{*2})} \quad (3.19)$$

Ayrıca, farklı kurutma işlemlerinin elma dilimlerinin yüzeyinde meydana getirdiği renk kararmasını belirlemek amacıyla esmerleşme indeks (BI) değeri Moreno vd. (2016)'nın rapor ettiği yönteme göre belirlenmiştir. Bu amaçla, önce CIELAB renk değerleri kullanılarak x parametresi (Denklem 3.20) hesaplanmış ve daha sonra bu parametreye bağlı olarak BI değeri belirlenmiştir (Denklem 3.21).

$$x = \frac{(a^* + 1,75 \cdot L^*)}{(5,645 \cdot L^* + a^* - 0,3012 \cdot b^*)} \quad (3.20)$$

$$BI = \frac{(100 \cdot (x - 0,31))}{0,17} \quad (3.19)$$

3.2.9.9. Su Aktivitesi

Özellikle kurutulmuş gıda ürünlerinin mikrobiyal stabilitesi, raf ömrü ve kalite kontrolü açısından kritik bir faktör olan su aktivite değerinin belirlenmesinde, taze ve kurutma işlemi tamamlanan örnekler öncelikle keskin bir bıçak yardımıyla iyice parçalanarak homojenize edilmiştir. Bu örneklerin su aktivitesi değerleri $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de Testo 645 model su aktivite cihazı (Testo Inc., Lenzkirch, Almanya) kullanılarak tespit edilmiştir.

3.2.9.10. Morfolojik Yapının Tespiti

Elektron ışınları kullanarak numunenin yüzeyini taramak suretiyle elde edilen sinyalleri analiz ederek detaylı görüntüler oluşturan SEM tekniği, ürünün yüzey pürüzlülüğü ve yüzey alanındaki değişimler hakkında detaylı bilgiler verebilmektedir (Memiş, 2017). Elma dilimlerinin yüzey morfolojisini belirlemek amacı ile yapılan SEM analizleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM) (Isparta, Türkiye) bünyesinde bulunan yayınlımlı elektron kaynaklı (FEG) bir SEM cihazı (FEG 250, FEI Quanta, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Massachusetts, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler 60 kV'da 100, 250, 500 ve 1000 kat büyütülmüştür. Örnekler kaplama yapılmamış ve elektriksel iletkenlik, cihazın düşük vakum modu ile sağlanmıştır.

3.2.9.11. Metal Migrasyon Analizleri

Ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemi sırasında paslanmaz çelik elektrotlardan ürüne (olası) metal migrasyonu kurutulmuş elma örneklerinde test edilmiş ve bu analizler Bilimsel ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (MAKÜ BİLTEKMER) alt yapısı

kullanılarak, hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 650°C sıcaklıkta yaklaşık 18-24 saat kül haline getirilmiş kuru elma dilimi örneklerinden yaklaşık 0,50 g kül teflon bir kap içerisine yerleştirilmiş ve üzerine 9 mL nitrik asit (HNO_3) (%65'lik) ve 3 mL hidroklorik asit (HCl) (%30'luk) ilave edilip mikrodalga yakma sisteminde (Milestone Start D, Milestone Srl, Sorisole, Bergamo, İtalya) iki aşamalı sıcaklık programı kullanılarak (ilk aşamada sıcaklık 15 dakikada 150°C'ye çıkarılmış ve ikinci aşamada 150°C'de 15 dakika bekletilmek suretiyle) yakılmıştır (Nobrega vd., 2012). Yakma sisteminin soğumasının ardından sıvı berrak numuneler 50 mL'lik kapaklı santrifüj tüplerine aktarılmış ve son hacim 50 mL olacak şekilde ultra saf su ile seyreltilmiştir. Elde edilen çözeltilerdeki mineral madde tayini (Öğüt vd., 2016) indüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektroskopisi (Optima 8000, Perkin Elmer, Waltham, Massachusetts, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.9.12. Termogravimetrik Analizler

Elma dilimlerinin camsı geçiş sıcaklıklarının belirlenmesinde MAKÜ BİLTEKMER'de bulunan TGA cihazı (Hitachi Extar, SII TG/DTA 7200 Model, Tokyo, Japonya) kullanılmıştır. Analizlerde 3-10 mg numune kullanılmış ve sıcaklık dakikada 10°C olacak şekilde 25°C'den 900°C'ye kadar yükseltilerek ölçümler alınmıştır. Ölçümler azot gazı altında gerçekleştirilmiştir.

3.2.9.13. Diferansiyel Taramalı Kalorimetrik Analizler

Elma dilimlerinin termal geçiş sıcaklıklarının belirlenmesinde MAKÜ BİLTEKMER'de bulunan DSC cihazı (400 Model, Perkin Elmer, Waltham, Massachusetts, ABD) kullanılmıştır. Analizlerde 3-10 mg numune kullanılmış ve sıcaklık dakikada 10°C olmak üzere -50°C'den 400°C'ye kadar yükseltilerek ölçümler alınmıştır. Ölçümler azot gazı altında gerçekleştirilmiştir.

3.2.9.14. Enerji Analizleri

Elma dilimlerinin kurutulması işleminde ohmik ısıtmalı ön kurutma ile ilgili enerji tüketimi kapalı çevrim mikroişlemci denetimli güç denetim sistemi kullanılarak, yaklaşık 2 saniye aralıklar ile sistemden geçen akım (A) ve uygulanan voltaj (V) değerleri ölçüldükten sonra Denklem 22 kullanılarak hesaplanmıştır. Kurutma sırasındaki tüketilen enerji miktarını tespit edebilmek için (kWh) ise priz tipi wattmetre (TT-Technic, PMG-1, Pekin, Çin) kullanılmıştır.

$$Sarfedilen Enerji (kWh) = \sum VI\Delta t \quad (3.22)$$

Burada V: Voltajı (volt), I: Akımı (A) ve Δt : Zamanı (s) ifade etmektedir.

Kurutma denemeleri sırasında saatte bir alınan tartımlar sonucu elmanın anlık nem içeriği belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak özgül nem çekme oranı (SMER), birim miktarda suyu uzaklaştırabilmek için gerekli olan enerji (MER), özgül enerji tüketimi (SEC) ve toplam enerji tüketimi (sarfedilen enerji) değerleri sırasıyla Denklem 3.23, 3.24 ve 3.25 kullanılarak hesaplanmıştır (Jindarat vd., 2011).

$$SMER = \frac{\text{Kurutma işleminde uzaklaşan nem miktarı (kg su)}}{\text{Kurutucunun tükettiği enerji (kwh)}} \quad (3.23)$$

$$MER = \frac{\text{Kurutma işleminde uzaklaştırılan nem miktarı (kg su)}}{\text{Kurutma süresi (h)}} \quad (3.24)$$

$$SEC = \frac{\text{Sisteme giren toplam enerji (kwh)}}{\text{Kurutma işleminde uzaklaştırılan nem miktarı (kg su)}} \quad (3.25)$$

3.2.10. İstatistiksel Analizler

Tüm denemeler en az 3 tekerrür ve analizler 2 paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler SAS System for Windows 9.0 (SAS Institute Inc., Carry, Kuzey Karolina, ABD) paket programı kullanılarak varyans analizine (ANOVA) tabi tutulmuştur. Ortalamalar arasındaki farklılıkların karşılaştırılmasında Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi kullanılmıştır. Elma dilimlerindeki en yüksek elektriksel iletkenliğin belirlendiği vakum impregnasyon ile maksimum ağırlık kaybının belirlendiği, atmosferik basınç ve vakum altındaki ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinde ait optimizasyon çalışmalarında Design-Expert® yazılım paketi (Sürüm 12.0.3.0, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, Minnesota, ABD) ve bu yazılımdaki RSM yöntemindeki Merkezi Karma Tasarım kullanılmıştır. Kurutma kinetiğinin matematiksel modellenmesine ait çalışmalarda ise “Sigma Plot Version 12.00” paket programı kullanılmıştır. Rehidrasyon verilerinin modellenmesinde Microsoft Excel® programından yararlanılmıştır. Kurutma kinetiği verileriyle elde edilen matematiksel modellerin uygunluklarında RMSE ve χ^2 değerleri sırasıyla Denklem 3.25 ve 3.26 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{tahmini,i} - M_{deneysel,i})^2\right]} \quad (3.26)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{tahmini,i})^2}{N-n} \quad (3.27)$$

Burada $M_{tahmini, i}$: Deneysel verilerden elde edilen tahminlenmiş nem miktarını (kg su/ kg kuru madde), $M_{deneysel, i}$: Yapılan deney sonucunda elde edilen nem miktarını (kg su/ kg kuru madde), N: Gözlem sayısını ve n: Modeldeki katsayı sayısı ifade etmektedir. Model uygunluğu açısından RMSE ve ki kare değerlerinin 0'a yakın olması istenmektedir (Doymaz, 2004).

Bulguların yorumlanması ve değerlendirilmesi aşamasında bir yapay zekâ modeli olan ChatGPT-4o'dan (OpenAI, L.L.C., San Francisco, Kaliforniya, ABD) yararlanılmıştır.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Konveksiyonel kurutma (KK), Vİ işlemi sonrası konveksiyonel kurutma (Vİ+KK), atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK), atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi sonrasında konveksiyonel kurutma (AOK+KK), Vİ işlemi ve atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma sonrası konveksiyonel kurutma (AOK+Vİ+KK), vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK), vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi sonrasında konveksiyonel kurutma (VOK+KK) ve Vİ işlemi ve vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma sonrası konveksiyonel kurutma (VOK+Vİ+KK) işlemlerinin kurutulan elmaların bazı özelliklerine etkisi bu çalışmada araştırılmıştır. Verilerin uygunluğunun yorumlanmasında R^2 , düzeltilmiş R^2 , RMSE ve χ^2 değerlerinden yararlanılmasının yanı sıra kinetik modelleme uygunluğunun belirlenmesinde model katsayılarının sayısı da dikkate alınmıştır.

4.1. Vakum İmpregnasyon İşlemiyle Elektriksel İletkenliğin Optimizasyonu

Vakum impregnasyon işlemiyle elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik değerinin düzenlenmesi amacıyla kullanılan optimizasyon çalışmasında, Çizelge 4.1’de verilen CCD tasarıma ait deneme koşulları kullanılmıştır. Çalışmada “yanıt” değişkeni olarak kullanılan elmaların elektriksel iletkenlik değerlerindeki artış oranları da bu çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik değerlerinin vakum impregnasyon tekniğiyle optimizasyonunda kullanılan merkezi karma tasarıma ait faktörler ve seviyeleri ile yanıt değişkeni olarak elma dilimlerinin iletkenlik artışı değerleri

Standart Sırası	Deneme Sırası	Basıncı (mbar)	Süre (dakika)	CaCl ₂ Konsantrasyonu (g/100 mL)	İletkenlik Artışı (%)
3	1	140,54	25,95	1,41	72,28
19	2	200,00	20,00	2,00	108,11
11	3	200,00	10,00	2,00	101,11
12	4	200,00	30,00	2,00	113,11
18	5	200,00	20,00	2,00	117,24
14	6	200,00	20,00	3,00	126,72
6	7	259,46	14,05	2,60	114,86
8	8	259,46	25,95	2,60	143,54
13	9	200,00	20,00	1,00	53,01
4	10	259,46	25,95	1,41	86,13
1	11	140,54	14,05	1,41	85,58
15	12	200,00	20,00	2,00	105,19
16	13	200,00	20,00	2,00	109,57
17	14	200,00	20,00	2,00	117,46
7	15	140,54	25,95	2,60	123,14
9	16	100,00	20,00	2,00	64,42
2	17	259,46	14,05	1,41	86,94
10	18	300,00	20,00	2,00	108,82
5	19	140,54	14,05	2,60	90,88

Deneme tasarımı elma dilimlerine uygulanan üç farklı faktörün (vakum, işlem süresi ve CaCl_2 konsantrasyonu), dilimlerin elektriksel iletkenliklerindeki artışa (%) etkileri incelenmiştir. VI işleminde uygulanan vakum (A olarak kodlanmış faktör), iletkenlik artışını pozitif yönde etkilemiş ancak kuadratik etkisi nedeniyle belirli bir noktadan sonra bu artış, azalma eğilimi göstermiştir ($p<0,05$) (Çizelge 4.2). VI işlem süresi (B olarak kodlanmış faktör) artışı, iletkenlik artışını negatif yönde etkilemiştir ($p<0,05$). CaCl_2 konsantrasyonu (C olarak kodlanmış faktör), elma dilimlerinin iletkenlik değerindeki artış oranı üzerinde en belirgin etkiye sahip olmuş ve başlangıçta pozitif bir etki gösterirken belirli bir noktadan sonra azalmıştır ($p<0,05$). Ayrıca, işlem süresi ve CaCl_2 konsantrasyonu arasındaki etkileşim de iletkenlik artışı üzerinde pozitif ve anlamlı bir etki sağlamıştır. Bu bulgular, her bir faktörün ve etkileşimin elektriksel iletkenlik üzerindeki rolünü ve önemini vurgulamaktadır.

Çizelge 4.2. Vakum impregnasyon tekniğiyle elma dilimlerinin elektriksel iletkenliklerinin artırılmasına yönelik gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri

İndirgenmiş Kuadratik Model		P Değerleri	
R ²	0,932	A: Basınç (mbar)	0,0003
		B: Süre (min)	0,0258
Düzeltilmiş R ² (Adjusted R ²)	0,899	C: CaCl ₂ (g/100mL)	<0,0001
		Süre×CaCl ₂	0,0032
Tahmin Edilen R ² (Predicted R ²)	0,777	(CaCl ₂) ²	0,0076
		(Basınç) ²	0,0025
Model Uyumsuzluğu (Lack of fit)		0,261	
İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Kodlanmış Faktörler)		İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Gerçek Faktörler)	
İletkenlik Artışı (%) = 111,18 + 9,79×A + 4,94×B + 19,4×C + 9,32×(B×C) - 7,30×A ² - 6,16×C ²		İletkenlik Artışı (%) = -50,48 + 0,99×A - 4,44×B + 49,55×C + 2,63×(B×C) - 0,002×A ² - 17,41×C ²	

Modelin uygunluğunun test edilmesi amacıyla kullanılan R^2 değerinin, verilerin eğilim yönüne dair önemli bir gösterge olarak 1'e yakın bir değer alması arzu edilmektedir (Buzrul, 2022). RSM kapsamındaki ANOVA bulgularına göre, model uyumsuzluğu değerinin 0,05'ten yüksek olması, uyumsuzluğun anlamlı olmadığını göstermektedir (Buzrul, 2022). Bu durum, modelin yüksek bir uygunluğa sahip olduğunu ve deneysel verilerin doğru bir şekilde ifade edildiğini ortaya koymaktadır. Hesaplanan R^2 ve düzeltilmiş R^2 değerleri sırasıyla 0,932 ve 0,899 olup, bu yüksek değerler, yeterli kesinlik değerinin 4'ün üzerinde (18,35) olması, model uyumsuzluğunun anlamlı olmaması, modelin p değerinin önemli oluşu ($p<0,0001$) ve faktörlerin bireysel etkisinin belirginliği (basınç için $p<0,005$, süre için $p<0,05$, CaCl_2 konsantrasyonu için $p<0,0001$)

gibi unsurlar, azalan kuadratik modelin kullanımının uygun olduğunu göstermektedir. Optimum koşul tahminlerinde, bağımsız değişkenler olan basınç, süre ve CaCl_2 konsantrasyonu ‘aralıkta (in range)’ tutulması ve yanıt değeri olan elektriksel iletkenlik artışının ‘maksimum (maximize)’ olarak hedeflenmesi öngörülmüştür. Önemlilik düzeyi, bağımsız değişkenler (basınç, süre ve CaCl_2 konsantrasyonu) ve bağımlı değişken (elektriksel iletkenlik artışı) için 3 olarak belirlenmiştir. CCD tasarımı kullanılarak kodlanmış faktörler için azalan kuadratik denklem katsayıları, gerçek ve kodlanmış faktörler açısından Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik artışının (%) maksimize edilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, ANOVA bulgularına dayanarak bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Bu optimizasyon sürecinde, optimum basınç 239 mbar, süre 30 dakika ve CaCl_2 konsantrasyonu 3 g/100 mL olarak saptanmıştır. Vİ işlemi sırasında işlem süresi ve vakum düzeyinin elma dilimlerinin elektrik iletkenlik artış değerlerine etkisi üç boyutlu bir grafik üzerinde EK 1-Şekil 7.1’de gösterilmiştir. Optimum koşullarda elma dilimlerindeki maksimum iletkenlik artışı değeri %164,35 olarak belirlenmiştir. Modelin başarısını değerlendirmek amacıyla elde edilen istatistiksel veriler arasında ‘istenilirlik’ (desirability) değeri 0,983 olarak hesaplanmıştır. Modelin tahminleri, %95 güven aralığı (Confidence Interval, CI) %143,61-185,34 ve %95 tahmin aralığı (Prediction Interval, PI) %138,48-190,47 olarak belirlenmiştir. Optimum Vİ işlem basıncı ve süresi ile CaCl_2 konsantrasyonunda yapılan denemeler sonucunda elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik artış oranı %146,31 olmuştur. Bu değer %95 PI aralığı olan %138,48-190,47 içinde yer almış ve dolayısıyla modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Bu durum, kuadratik model validasyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu doktora tez çalışmasının ilerleyen kısımlarında ohmik ısıtım ön kurutma işlemine maruz bırakılacak elma dilimlerinin iletkenlik değerlerinin maksimize edilmesinin amaçlandığı bu optimizasyon işleminde ideal koşulların belirlenmesinde kullanılan kuadratik modelin etkinliği doğrulanmıştır.

4.2. Ohmik Isıtmalı Ön Kurutma İşleminin Optimizasyonu

Tez çalışmasının bu aşamasında hem atmosfer hem de vakum altında gerçekleştirilecek ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinin, işlem sırasında maksimum ağırlık kaybını verecek şekilde optimize edilmesi amaçlanmıştır. Önceki çalışmada elektriksel iletkenlikleri Vİ işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimleri ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinde kullanılmıştır.

4.2.1. Atmosfer Basıncı Altında Ohmik Isıtmalı Ön Kurutma

Ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin optimizasyonunda kullanılan CCD'ye ait deneme koşulları ve Vİ işlemi ile atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) yönteminin (elektriksel iletkenlik değerleri maksimize edilmiş) elma dilimlerinde ağırlık kaybı üzerindeki etkileri Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Çizelgede ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminde süre, voltaj ve sıcaklık gibi faktörlerin farklı seviyelerde uygulanmasıyla elde edilen ağırlık kaybı yüzdeleri karşılaştırılmaktadır. Genel olarak, Vİ+AOK işlemi, yalnızca AOK işlemine kıyasla daha düşük ağırlık kaybı değerleriyle sonuçlanmıştır. Bu durum, Vİ işleminin elma dilimlerinin yapısal bütünlüğünü koruyarak ağırlık kaybını azalttığını göstermektedir. Ayrıca, süre, voltaj ve sıcaklık gibi parametrelerin ağırlık kaybı üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Özellikle yüksek voltaj ve sıcaklık seviyelerinde ağırlık kaybı artmıştır. Bununla birlikte, süre ve voltajın düşük olduğu bazı denemelerde ağırlık kaybı minimum seviyede kalmıştır. Örneğin, 14,05 dakika, 60,14 V ve 54,05°C'de gerçekleştirilen Deneme 9'da yalnızca AOK işleminde ağırlık kaybı %4,62 olurken, Vİ+AOK işleminde ise %5,69 olarak gerçekleşmiştir. Buna karşılık, 25,95 dakika, 89,87 V ve 65,95°C'de gerçekleştirilen Deneme 2'de AOK ağırlık kaybı %33,46, Vİ+AOK ağırlık kaybı ise %31,58 olarak belirlenmiştir. Taze elma dilimleri ile Vİ işlemi uygulandıktan sonra AOK işlemiyle ön kurutulan dilimlerin ohmik ısıtma sırasında ağırlık kayıpları (%) EK 2-Şekil 7.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Optimum koşullarda vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle elektriksel iletkenliği artırılmış elma dilimlerinin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemiyle en fazla ağırlık kaybı vermek üzere kullanılan merkezi karma tasarımına ait faktörler ve seviyeleri ile “yanıt” olarak kullanılan ağırlık kayıpları

Standart Sırası	Deneme Sırası	Süre (dakika)	Voltaj (V)	Sıcaklık (°C)	AOK Ağırlık Kaybı (%)	Vİ+AOK Ağırlık Kaybı (%)
18	1	20,00	75,00	60,00	26,13	19,77
8	2	25,95	89,87	65,95	33,46	31,58
10	3	30,00	75,00	60,00	26,20	30,85
6	4	25,95	60,14	65,95	6,06	24,40
11	5	20,00	50,00	60,00	3,74	11,43
17	6	20,00	75,00	60,00	25,04	18,31
14	7	20,00	75,00	70,00	26,97	21,80
15	8	20,00	75,00	60,00	28,24	18,82
1	9	14,05	60,14	54,05	4,62	5,69
13	10	20,00	75,00	50,00	23,70	16,82
3	11	14,05	89,87	54,05	28,46	9,64
2	12	25,95	60,14	54,05	8,55	12,99
9	13	10,00	75,00	60,00	6,67	5,76
16	14	20,00	75,00	60,00	31,27	24,17
19	15	20,00	75,00	60,00	27,81	21,00
7	16	14,05	89,87	65,95	27,13	19,32
12	17	20,00	100,00	60,00	29,40	16,00
5	18	14,05	60,14	65,95	3,42	9,53
4	19	25,95	89,87	54,05	29,82	21,25

Atmosfer basıncı altında gerçekleştirilen AOK yöntemine ait ANOVA bulguları ve kuadratik model, elma dilimlerinin ağırlık kaybı üzerinde süre (A) ve voltajın (B) önemli etkileri olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.4). Hem ohmik ısıtma işlem süresi (A) hem de uygulanan voltajın (B) ağırlık kaybı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmuştur ($p<0,05$). Özellikle voltajın etkisi ($p<0,0001$) süreye kıyasla daha belirgindir. Ayrıca, faktörlerin ikinci dereceden etkileri (A^2 ve B^2) de anlamlı bulunmuştur ($p<0,001$). R^2 değeri modelin verilerin %91,7'sini açıklayabildiğini göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 (0,894) ve tahmini R^2 (0,723) değerleri de modelin verilerle iyi bir uyum sağladığını ve tahmin gücünün yüksek olduğunu doğrulamaktadır. Model uyumsuzluğu P değeri (0,1694) ise modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir. Azalan kuadratik denklem, süre ve voltajın ağırlık kaybı üzerindeki etkilerini hem kodlanmış hem de gerçek faktörler üzerinden ifade etmektedir. Denklemden, voltajın (B) katsayısının süreye (A) göre daha yüksek olması, voltajın ağırlık kaybı üzerindeki etkisinin daha güçlü olduğunu göstermektedir. Örneğin, gerçek faktörler denklemine göre voltajdaki artışın ağırlık kaybını artırdığı, ancak süre ve voltajın ikinci dereceden etkilerinin ağırlık kaybını azalttığı görülmektedir. Bunların yanı sıra yeterli kesinlik değerinin 4'ün üzerinde (18,72) olması ve modelin önemli çıkması azalan kuadratik modelin kullanımının uygun olduğunu göstermektedir. Model katsayıları, süre ve voltajın artışının ağırlık kaybını artırdığını, ancak kuadratik terimlerin etkisiyle bu artışın belli bir noktadan sonra azaldığını göstermektedir. Sıcaklık faktörü ise modelde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamış ($p>0,05$) ve ağırlık kaybı üzerindeki etkisi önemsiz olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.4. Elma dilimlerinin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması amacıyla kullanılan merkezi karma deneme desenindeki faktörlerin dilimlerin ağırlık kaybı üzerine etkisine ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri ($p>0,05$ değerine sahip faktörler dahil edilmemiştir.)

İndirgenmiş Kuadratik Model		P Değerleri	
R^2	0,917	A: Süre (min)	0,0030
		B: Voltaj (V)	<0,0001
Düzeltilmiş R^2	0,894	A^2	0,0008
Tahmin Edilen R^2	0,723	B^2	0,0009
Model Uyumsuzluğu		0,1694	
İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Kodlanmış Faktörler)		İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Gerçek Faktörler)	
Ağırlık Kaybı % = $26,72 + 3,45 \times A + 10,21 \times B - 4,09 \times A^2 - 4,04 \times B^2$		Ağırlık Kaybı % = $-185,45 + 5,2 \times A + 3,43 \times B - 0,12 \times A^2 - 0,02 \times B^2$	

Elma dilimlerinde ağırlık kaybını (%) maksimize edecek şekilde AOK işlem koşullarının optimize edilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, elma dilimlerinde maksimum ağırlık kaybı %33,60 olarak belirlenmiştir. AOK işlemine maruz bırakılan taze elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisi üç boyutlu bir grafik üzerinde EK 3-Şekil 7.3'te gösterilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasında, optimum ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi koşulları 22 dakika, 90 V ve 59°C olarak saptanmıştır. Modelin başarısını değerlendirmek amacıyla elde edilen istatistiksel veriler arasında “istenilirlik” değeri 1 olarak hesaplanmıştır. Modele ait %95 CI %30,51-36,69 olurken %95 PI %25,34-41,87 olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda gerçekleştirilen denemede elma dilimlerinde %36,90 ağırlık kaybı belirlenmiş ve bu değer %95 PI içinde yer almasıyla modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Dolayısıyla, optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, belirlenen optimum koşullarda (22 dakika, 90 V ve 59°C) gerçekleştirilen ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemiyle elma dilimlerinin ağırlık kaybı maksimize edilmiş ve modelin validasyonu başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Vakum impregnasyon işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması (Vİ+AOK) sırasında ağırlık kaybını etkileyen faktörlerin önemini Çizelge 4.5'te sunulmuştur. ANOVA bulgularına göre, ohmik ısıtma süresi (A), kullanılan voltaj (B) ve sıcaklık (C) faktörlerinin ağırlık kaybı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri bulunmuştur ($p < 0,05$). Özellikle süre (A) faktörünün etkisi ($p < 0,0001$) diğer faktörlere göre daha belirgin olmuştur. Modelin R^2 değeri, verilerin %89,4'ünün açıklanabildiğini göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 (0,863) ve tahmini R^2 (0,774) değerleri, modelin güçlü bir uyum sağladığını ve tahmin gücünün yüksek olduğunu doğrulamaktadır. Model uyumsuzluğu P değeri (0,3680) ise modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir. Yeterli kesinlik değerinin (18,19) 4'ün üzerinde olması modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Modelin P değerinin 0,0001'den küçük olması, azalan kuadratik modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve kullanılabilirliğini doğrulamaktadır. Kuadratik denklem, süre, voltaj ve sıcaklık faktörlerinin ağırlık kaybı üzerindeki etkilerini hem kodlanmış hem de gerçek faktörler üzerinden ifade etmektedir. Denklemden, süre (A) katsayısının en yüksek olması, ağırlık kaybı üzerinde en güçlü etkiye sahip faktörün süre olduğunu göstermektedir. Voltajın (B) ikinci dereceden etkisi (B^2) ise ağırlık kaybını azaltıcı bir etki yaratmaktadır. Gerçek faktörler denklemine göre, süre, voltaj ve sıcaklık arttıkça ağırlık kaybı artmakta, ancak

voltajın ikinci dereceden etkisi bu artışı sınırlamaktadır. Uygulanan voltaja ait bu etki, belirli bir voltaj seviyesinin üstüne çıkıldığında ağırlık kaybı üzerindeki etkinin tersine döndüğünü ve bu durumda ağırlık kaybının azalmaya başladığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, vakum impregnasyon işlemiyle elektriksel iletkenliğin artırılması sonrası atmosfer basıncı altında uygulanan ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma işlemi sırasında elma dilimlerinde meydana gelen ağırlık kaybında süre, voltaj ve sıcaklık faktörlerinin kritik rol oynadığı ve bu faktörlerin optimizasyonu ile istenilen ağırlık kaybı sonuçlarına ulaşılabileceği tespit edilmiştir. Modelin yüksek uyumluluğu ve güvenilirliği, bu faktörlerin kurutma işlemi üzerinde belirleyici olduğunu ve kurutma parametrelerinin (çalışmadaki aralıklar içinde) doğru seçilmesiyle enerji verimliliği ve ürün kalitesinin iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.5. Elektriksel iletkenlik değeri vakum impregnasyon tekniği ile maksimize edilmiş elma dilimlerinin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması amacıyla kullanılan merkezi karma deneme desenindeki faktörlerin dilimlerin ağırlık kaybı üzerine etkisine ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri (p>0,05 değerine sahip faktörler dahil edilmemiştir.)

İndirgenmiş Kuadratik Model		P Değerleri	
R ²	0,894	A: Süre (min)	<0,0001
Düzeltilmiş R ²	0,863	B: Voltaj (V)	0,0020
Tahmin Edilen R ²	0,774	C: Sıcaklık (°C)	0,0007
Model Uyumsuzluğu		0,3680	
İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Kodlanmış Faktörler)		İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Gerçek Faktörler)	
Ağırlık Kaybı (%) = 19,46 + 6,46×A + 2,70×B + 3,20×C - 2,24×B ²		Ağırlık Kaybı (%) = -105,16 + 1,08×A + 1,70×B + 0,53×C - 0,01×B ²	

Vakum impregnasyon işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinde ağırlık kaybını (%) maksimize edecek şekilde atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma işlem koşullarının optimize edilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, elma dilimlerinde maksimum ağırlık kaybı %29,81 olarak belirlenmiştir. VI işlemi sonrasında AOK işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisi üç boyutlu bir grafik üzerinde EK 4-Şekil 7.4'te gösterilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasında, optimum ohmik ısıtmalı ön kurutma işlem koşulları 26 dakika, 87 V ve 66°C olarak saptanmıştır. Modelin başarısını değerlendirmek amacıyla elde edilen istatistiksel veriler arasında “istenilirlik” değeri 0,93 olarak hesaplanmıştır. Modele ait %95 CI %26,9-32,73 olurken %95 PI %23,28-36,36 olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda gerçekleştirilen denemede elma dilimlerinde %23,75

ağırlık kaybı belirlenmiş ve bu değerin %95 PI içinde yer almasıyla modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Dolayısıyla, optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği artırılmış elma dilimlerinin ağırlık kaybı, belirlenen optimum koşullarda (26 dakika, 87 V ve 66°C) gerçekleştirilen ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemiyle maksimize edilmiş ve modelin validasyonu başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Sonuç olarak Vİ işlemi, elma dilimlerinin yapısal bütünlüğünü koruyarak ağırlık kaybını azaltıcı bir etki göstermiştir. Vİ işleminin ardından uygulanan ohmik ısıtmalı ön kurutma (Vİ+AOK) işlemi, yalnızca AOK işlemine kıyasla daha düşük ağırlık kaybı değerleriyle sonuçlanmıştır (Çizelge 4.3). Vİ işlemi, elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini artırarak ohmik ısıtmalı ön kurutma sürecinin verimliliğini yükseltmiş ve ağırlık kaybını optimize etmiştir. Elma dilimlerine doğrudan ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi uygulandığında (Çizelge 4.4) ağırlık kaybı üzerinde uygulanan voltaj ve sürenin etkileri anlamlı olmuş ($p<0,05$). Vİ işlemi uygulanmış elma dilimlerinde (Çizelge 4.5) ise uygulanan voltaj, süre ve sıcaklık faktörleri ağırlık kaybı üzerinde anlamlı etkileri belirlenmiştir ($p<0,05$). Vİ işlemi, elma dilimlerinin yapısal bütünlüğünü koruyarak süre, voltaj ve sıcaklık gibi faktörlerin etkilerini optimize etmekte ve ağırlık kaybını kontrol altına almaktadır. Bu sonuçlar, vakum impregnasyon Vİ işleminin, ohmik ısıtmalı ön kurutma sürecinde elma dilimlerinin ağırlık kaybını azaltarak daha dengeli ve verimli bir kurutma süreci sağlayabileceğini göstermektedir.

4.2.2. Vakum Altında Ohmik Isıtmalı Ön Kurutma

Vakum impregnasyon işlemini takiben uygulanan VOK sonucunda elma dilimlerinde ağırlık kaybı uygulanan süre, voltaj ve sıcaklık gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermiştir (Çizelge 4.6). VOK işlemiyle elde edilen ağırlık kaybı, genellikle Vİ+VOK kombinasyonuna kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Örneğin, 30 dakika süre, 75 V voltaj ve 60°C sıcaklık koşullarında (Deneme 3) VOK ağırlık kaybı %27,90 iken, aynı koşullarda Vİ+VOK ağırlık kaybı %24,66 olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, 25,95 dakika süre, 89,87 V voltaj ve 65,95°C sıcaklıkta (Deneme 2) VOK ağırlık kaybı %26,19 iken, Vİ+VOK ağırlık kaybı %23,77 olmuştur. En düşük ağırlık kaybı ise 10 dakika süre, 75 V voltaj ve 60°C sıcaklıkta (Deneme 13) VOK için %8,44, Vİ+VOK için %7,05 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Vİ işleminin ağırlık kaybını azaltıcı bir etkisi olduğunu ve işlem parametrelerinin ağırlık kaybı üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Taze elma dilimleri ile Vİ işlemi uygulandıktan sonra VOK işlemiyle ön

kurutulan dilimlerin ohmik ısıtma sırasında ağırlık kayıpları (%) EK 5-Şekil 7.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Optimum koşullarda vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle elektriksel iletkenliği arttırılmış elma dilimlerinin vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemiyle en fazla ağırlık kaybı vermek üzere kullanılan merkezi karma tasarımına ait faktörler ve seviyeleri ile “yanıt” olarak kullanılan ağırlık kayıpları

Standart Sırası	Deneme Sırası	Süre (dakika)	Voltaj (V)	Sıcaklık (°C)	VOK Ağırlık Kaybı (%)	Vİ+VOK Ağırlık Kaybı (%)
18	1	20,00	75,00	60,00	15,16	23,58
8	2	25,95	89,87	65,95	26,19	23,77
10	3	30,00	75,00	60,00	27,90	24,66
6	4	25,95	60,14	65,95	14,09	21,03
11	5	20,00	50,00	60,00	3,07	16,48
17	6	20,00	75,00	60,00	19,96	19,97
14	7	20,00	75,00	70,00	22,54	20,20
15	8	20,00	75,00	60,00	20,15	19,24
1	9	14,05	60,14	54,05	2,43	11,48
13	10	20,00	75,00	50,00	15,57	9,75
3	11	14,05	89,87	54,05	15,39	9,30
2	12	25,95	60,14	54,05	5,90	13,26
9	13	10,00	75,00	60,00	8,44	7,05
16	14	20,00	75,00	60,00	21,80	22,46
19	15	20,00	75,00	60,00	15,69	17,60
7	16	14,05	89,87	65,95	18,79	18,31
12	17	20,00	100,00	60,00	16,63	19,23
5	18	14,05	60,14	65,95	5,68	17,74
4	19	25,95	89,87	54,05	24,02	22,27

Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi (VOK) uygulanmış elma dilimlerinin ağırlık kaybını maksimize edecek şekilde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında, süre (A faktörü), voltaj (B faktörü) ve sıcaklık (C faktörü) değişkenlerinin ağırlık kaybına etkileri azalan kuadratik model ile analiz edilmiştir (Çizelge 4.7). Elma dilimlerine uygulanan VOK işlemi sırasında “yanıt değişkeni” olarak ağırlık kaybı (%) üzerinde etkili olan ohmik ısıtma süresi, uygulanan voltaj ve sıcaklık faktörleri istatistiksel olarak anlamlı etkiler göstermiş ($p < 0,05$) ve bu faktörlerin P değerleri sırasıyla süre ve voltaj için $< 0,0001$, sıcaklık için ise 0,0130 olarak bulunmuştur. Ayrıca, voltajın ikinci dereceden etkisi (B^2) de anlamlı bulunmuştur ($p = 0,0004$). R^2 (0,900), düzeltilmiş R^2 (0,871) ve tahmini R^2 (0,763) değerleri modelin açıklayıcılığının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Model uyumsuzluğunun (0,6460) anlamlı bulunmaması, modelin deneysel verilerle uyumlu olduğuna işaret etmektedir. Azalan kuadratik modelin denklemine göre, ağırlık kaybı üzerinde en büyük etkiyi ohmik ısıtmada kullanılan voltaj faktörü göstermektedir (katsayı: 5,79). Süre (A) ve sıcaklık (C)

faktörleri de sırasıyla 4,44 ve 2,40 katsayılarıyla ağırlık kaybını artırıcı yönde etkiler yapmaktadır. Voltajın ikinci dereceden etkisi (B^2) ise negatif bir katsayıya (-3,31) sahiptir; bu da voltajın belirli bir seviyeden sonra ağırlık kaybını azaltıcı bir etki gösterebileceğini anlamına gelmektedir. Gerçek faktörlerle ifade edilen denklemde ise ağırlık kaybı, süre, voltaj ve sıcaklık artışıyla birlikte artmakta, ancak voltajın karesel etkisiyle azalmaktadır. Örneğin, voltajdaki her birim artış ağırlık kaybını yaklaşık 2,63 birim artırırken, voltajın karesel etkisi bu artışı dengeleyici bir rol oynamaktadır. Bu bulgular, VOK işlemi sırasında ağırlık kaybını optimize etmek için işlem parametrelerinin dikkatle ayarlanması gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.7. Elma dilimlerinin vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması amacıyla kullanılan merkezi karma deneme desenindeki faktörlerin dilimlerin ağırlık kaybı üzerine etkisine ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri ($p>0,05$ değerine sahip faktörler dahil edilmemiştir.)

İndirgenmiş Kuadratik Model		P Değerleri	
R^2	0,900	A: Süre (min)	<0,0001
		B: Voltaj (V)	<0,0001
Düzeltilmiş R^2	0,871	C: Sıcaklık ($^{\circ}C$)	0,0130
Tahmin Edilen R^2	0,763	B^2	0,0004
Model Uyumsuzluğu		0,6460	
İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Kodlanmış Faktörler)		İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Gerçek Faktörler)	
Ağırlık Kaybı (%) = $18,14 + 4,44 \times A + 5,79 \times B + 2,40 \times C - 3,31 \times B^2$		Ağırlık Kaybı (%) = $-131,58 + 0,74 \times A + 2,63 \times B + 0,35 \times C - 0,01 \times B^2$	

Elma dilimlerinin VOK işlemi sırasındaki ağırlık kaybını maksimize etmek üzere tasarlanan bu optimizasyon çalışmasında belirlenen kuadratik model, 26 dakika, 87 V ve $66^{\circ}C$ koşulda gerçekleştirilecek denemeyi optimum koşul olarak vermiştir. VOK işlemine maruz bırakılan taze elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisi üç boyutlu bir grafik üzerinde EK 6-Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Bu optimum koşulda elma dilimlerindeki maksimum ağırlık kaybı %21,21 olarak belirlenmiştir. Modelin başarısını değerlendirmek amacıyla elde edilen istatistiksel veriler arasında istenilirlik değeri 0,973 olarak hesaplanırken, modele ait %95 CI %21,89-32,77 ve %95 PI %18,22-36,43 olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda gerçekleştirilen denemede elma dilimlerinde %21,19 ağırlık kaybı belirlenmiş ve bu değer %95 PI aralığı içinde yer almasıyla modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Dolayısıyla, optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, belirlenen optimum koşullarda (26 dakika, 87 V ve $66^{\circ}C$) gerçekleştirilen VOK işleminde

elma dilimlerinin ağırlık kaybı maksimize edilmiş ve modelin validasyonu başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Vakum impregnasyon işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin VOK işlemi sonrasındaki ağırlık kaybını maksimize edecek şekilde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında, süre (A faktörü), voltaj (B faktörü) ve sıcaklık (C faktörü) değişkenlerinin ağırlık kaybına etkileri azalan kuadratik model ile analiz edilmiştir (Çizelge 4.8). Elma dilimlerinin VOK işlemi sırasında ağırlık kaybını etkileyen faktörlerin analizine göre, süre ($p=0,0007$) ve sıcaklık ($p=0,0002$) ağırlık kaybı üzerinde en anlamlı etkiye sahip faktörler olarak belirlenmiştir. Ohmik ısıtmada uygulanan voltajın etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamış ($p=0,0858$) olsa da, süre ve voltajın etkileşimi ($p=0,0470$) anlamlı bir etki göstermiştir. Ayrıca, sıcaklığın kuadratik etkisi ($p=0,0080$) de önemli bulunmuş, bu da sıcaklık arttıkça ağırlık kaybının doğrusal bir şekilde artmadığını, belirli bir noktadan sonra değişimin azaldığını veya tersine döndüğünü göstermektedir. Modelin R^2 , düzeltilmiş R^2 ve tahmini R^2 değerleri sırasıyla 0,855, 0,794 ve 0,712 olarak hesaplanmıştır. Modelin uyumsuzluk değeri (0,715) anlamlı bulunmamıştır ve bu, modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir. Yeterli kesinlik değeri (14,07), modelin sonuçlarının istatistiksel açıdan güvenilir olduğuna işaret etmektedir. Bulgular, modelin verilerle uyumlu olduğu ve ağırlık kaybını tahmin etmede güçlü bir performans sergilediği göstermektedir. Bu bulgular, Vİ+VOK işlemi sırasında ağırlık kaybını optimize etmek için özellikle süre ve sıcaklık faktörlerinin dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.8. Elektriksel iletkenlik değeri vakum impregnasyon tekniği ile maksimize edilmiş elma dilimlerinin vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutulması amacıyla kullanılan merkezi karma deneme desenindeki faktörlerin dilimlerin ağırlık kaybı üzerine etkisine ait ANOVA bulguları ve tasarım ölçütleri ($p>0,05$ değerine sahip faktörler dahil edilmemiştir.)

İndirgenmiş Kuadratik Model		P Değerleri	
R^2	0,855	A: Süre (min)	0,0007
		B: Voltaj (V)	0,0858
Düzeltilmiş R^2	0,794	C: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	0,0002
		A×B	0,0470
Tahmin Edilen R^2	0,712	C ²	0,0080
Model Uyumsuzluğu		0,7150	
İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Kodlanmış Faktörler)		İndirgenmiş Kuadratik Denklem Katsayıları (Gerçek Faktörler)	
Ağırlık Kaybı (%) = $19,46 + 2,98 \times A + 1,08 \times B + 3,08 \times C + 1,67 \times (A \times B) - 1,83 \times C^2$		Ağırlık Kaybı (%) = $-185,1 - 0,916 \times A - 0,305 \times B + 6,72 \times C + 0,018 \times (A \times B) - 0,051 \times C^2$	

Optimum koşul tahminlerinde, bağımsız değişkenlerin ‘aralıkta’ tutulması ve yanıt değerinin ‘maksimum’ olarak hedeflenmesi öngörülmüştür. Önemlilik düzeyi, bağımsız ve bağımlı değişkenler için 3 olarak belirlenmiştir. Vİ işlemiyle elektriksel iletkenlikleri maksimize edilen elma dilimlerinin VOK işlemi sırasındaki ağırlık kaybını maksimize etmek üzere tasarlanan bu optimizasyon çalışmasında belirlenen kuadratik model, 22 dakika, 89 V ve 59°C koşulda gerçekleştirilecek denemeyi optimum koşul olarak vermiştir. Bu optimum koşulda elma dilimlerindeki maksimum ağırlık kaybı %21,34 olarak belirlenmiştir. Vİ işlemi sonrasında VOK işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisi üç boyutlu bir grafik üzerinde EK 7-Şekil 7.7’de gösterilmiştir. Modelin başarısını değerlendirmek amacıyla elde edilen istatistiksel veriler arasında ‘istenilirlik’ değeri 1,0 olarak hesaplanmıştır. Modele ait %95 CI %19,4-23,29 ve %95 PI %16,3-26,39 olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda gerçekleştirilen denemede elma dilimlerinde %20,83 ağırlık kaybı belirlenmiş ve bu değer %95 PI aralığı içinde yer almasıyla modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Dolayısıyla, optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, belirlenen optimum koşullarda (22 dakika, 89 V ve 59°C) gerçekleştirilen VOK işleminde elma dilimlerinin ağırlık kaybı maksimize edilmiş ve modelin validasyonu başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Vakum impregnasyon işlemiyle elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğinin artırılması, ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma sürecinde ağırlık kaybı ve işlem parametreleri üzerinde önemli etkiler yaratmıştır. İlk olarak, elektriksel iletkenliğin artırılması, ohmik ısıtma sırasında elektrik akımının dilimlerden daha verimli geçmesini sağlamış ve bu durum, ısı transferini hızlandırarak işlem süresini kısaltmıştır (Demirdöven ve Baysal, 2008; Seyhun vd., 2008; Akkara ve Kayaardı, 2014; Kaya ve İçier, 2019). Çizelge 4.8’de görüldüğü üzere, süre ($p=0,0007$) ve sıcaklık ($p=0,0002$) ağırlık kaybı üzerinde en anlamlı etkiye sahip faktörlerdir. Bu, elektriksel iletkenliği artırılmış dilimlerin, sıcaklık ve süre gibi parametrelerin etkisine daha duyarlı hale geldiğini göstermektedir. Ayrıca, sıcaklığın kuadratik etkisi ($p=0,0080$), sıcaklık arttıkça ağırlık kaybının doğrusal bir şekilde artmadığını, belirli bir noktadan sonra değişimin azaldığını veya tersine döndüğünü ortaya koymaktadır.

Elektriksel iletkenliğin artırılması, voltajın etkisini de dolaylı olarak etkilemiştir. Voltajın tek başına anlamlı bir etkisi bulunmamakla birlikte ($p=0,0858$), süre ve voltajın etkileşimi ($p=0,0470$) anlamlı bulunmuştur. Bu durum, elektriksel iletkenliği artırılmış dilimlerde voltajın, süre ile değerlendirildiğinde ağırlık kaybını etkileyebileceğini

göstermektedir. Ayrıca, modelin yüksek R^2 (0,855) ve düzeltilmiş R^2 (0,794) değerleri, elektriksel iletkenliğin artırılmasının, ağırlık kaybını tahmin etmede güçlü bir model oluşturulmasını sağladığını göstermektedir.

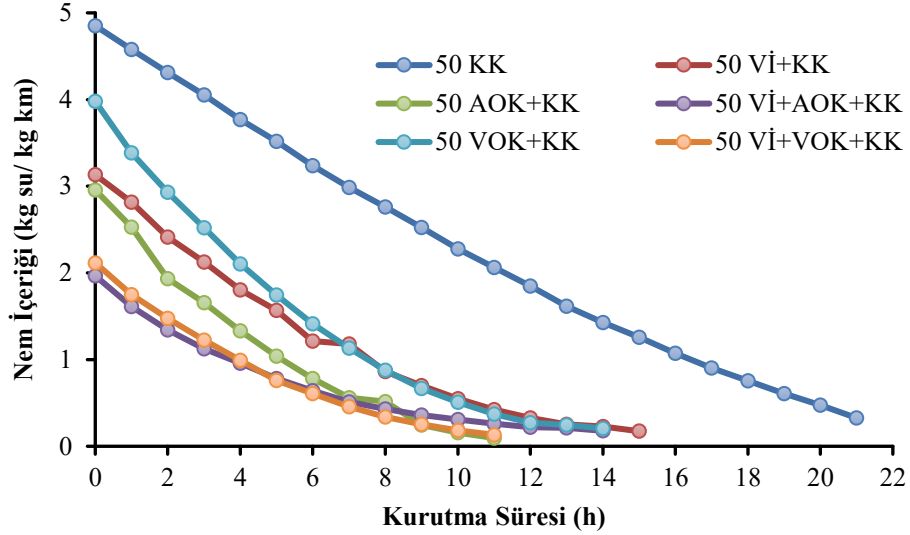
Sonuç olarak, Vİ işlemiyle elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğinin artırılması, ohmik ısıtma sürecinde enerji verimliliğini artırmış, işlem süresini optimize etmiş ve ağırlık kaybını etkileyen faktörlerin daha belirgin hale gelmesine neden olmuştur. Bu bulgular, elektriksel iletkenliğin artırılmasının hem işlem parametrelerinin kontrolü hem de ürün kalitesinin iyileştirilmesi açısından önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

4.3. Elma Dilimlerine Ait Kurutma Kinetiği Bulguları

Çalışmanın bu aşamasında, işlem görmemiş elma dilimleri ile elektriksel iletkenliği Vİ işlemiyle maksimize edilen elma dilimleri altı farklı farklı kurutma işlemleriyle (KK, Vİ+KK, AOK+KK, VOK+KK, Vİ+AOK+KK ve Vİ+VOK+KK) üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) doğal konvektif bir fırında kurutulmuş ve her bir işlem için elma dilimlerine ait kurutma kinetiği belirlenmiştir.

4.3.1. Elma Dilimlerinin Nem İçeriğinin Kurutma Sırasındaki Değişimi

Elma dilimlerinin altı farklı kurutma yöntemiyle kurutulması sırasındaki başlangıç ortalama nem içerikleri Denklem 3.3'e göre hesaplanmış ve altı farklı kurutma yönteminin 50°C'de kurutulan elma dilimlerinin nem içeriği üzerindeki etkisi Şekil 4.1'de sunulmuştur. KK, nem içeriğini en yavaş azaltan yöntem olurken, Vİ işlemi ile desteklenen kurutma yöntemleri, nem içeriğini daha hızlı azaltmıştır. AOK ve VOK yöntemleri, kontrol kurutmaya kıyasla daha etkili olmuş, özellikle VOK yöntemi nem içeriğini hızlı bir şekilde azaltmıştır. Vİ işleminin ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemleriyle birleştirildiği kombinasyonlar (Vİ+AOK ve Vİ+VOK), nem içeriğini en hızlı azaltan yöntemler olarak öne çıkmıştır. Özellikle Vİ+VOK kombinasyonu, en düşük nem içeriğine en kısa sürede ulaşarak kurutma süresini önemli ölçüde kısaltmıştır.



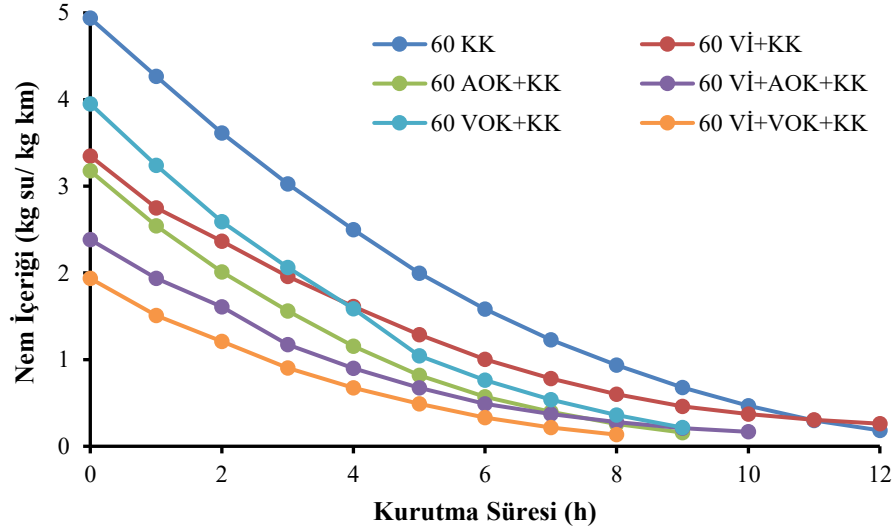
Şekil 4.1. Altı farklı yöntemle 50°C’de kurutulan elma dilimlerinin başlangıç ortalama nem içeriklerinin zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Vakum impregnasyon işlemi, elma dilimlerinin gözenekli yapısına vakum altında sıvıların nüfuz etmesini sağlayarak, kurutma sürecinde önemli avantajlar sunar (Castagnini vd., 2015; Mao vd., 2017). Bu işlem, elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini artırarak ohmik ısıtma sırasında ısının daha hızlı ve homojen bir şekilde iletilmesini sağlar. Ayrıca, Vİ işlemi, dilimlerin iç yapısındaki hava boşluklarını sıvı ile doldurduğu için kurutma sırasında oluşabilecek yapısal bozulmaları azaltır ve ürün kalitesini korur (Fito, 1994). Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, Vİ işlemi tek başına uygulandığında (yani Vİ+KK), nem içeriğini kontrol kurutmaya (KK) göre daha hızlı azaltmıştır. Bununla birlikte, Vİ işleminin ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemleriyle birleştirilmesi (örneğin, Vİ+AOK+KK veya Vİ+VOK+KK), nem içeriğinin daha hızlı azalmasını sağlamış ve kurutma süresini önemli ölçüde kısaltmıştır. Özellikle vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiğinde (Vİ+VOK+KK), en hızlı nem kaybı sağlanmış ve en düşük nem içeriğine ulaşılmıştır. Sonuç olarak, Vİ işlemi, hem kurutma hızını artırarak enerji tasarrufu sağlayabilir hem de ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyarak kaliteyi iyileştirebilir. Bu nedenle, Vİ işlemi, kurutma süreçlerinde etkili bir ön işlem olarak öne çıkmaktadır.

Ohmik ısıtmayı vakum altında gerçekleştirmek, kurutma sürecinde hem ısı transferi hem de ürün kalitesi açısından önemli avantajlar sağlayabilir. VOK işlemi, düşük basınç

ortamında suyun kaynama noktasını düşürerek, daha düşük sıcaklıklarda buharlaşmayı mümkün kılar (İçier vd, 2017). Bu durum, ürünün içindeki suyun daha hızlı bir şekilde buharlaşmasını sağlar ve kurutma süresini önemli ölçüde kısaltır. Ayrıca, vakum ortamı, oksijen miktarını azalttığı için oksidatif reaksiyonları sınırlar ve ürünün renk, tat ve besin değerinin korunmasına yardımcı olur (Sabancı ve İçier, 2020). Vakum altında ohmik ısıtma, elektriksel iletkenliği artırılmış ürünlerde daha homojen bir ısı dağılımı sağlar (Richardson, 2001). Bu, ürünün iç kısımlarında da hızlı bir şekilde ısınma ve suyun buharlaşmasını mümkün kılar. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, VOK yöntemi, nem içeriğini AOK yöntemine göre daha hızlı azaltmıştır. Ayrıca, Vİ işlemi ile birleştirildiğinde (yani VOK+Vİ+KK), en hızlı nem kaybı sağlanmış ve en düşük nem içeriğine ulaşılmıştır. Sonuç olarak, ohmik ısıtmayı vakum altında gerçekleştirmek, hem kurutma süresini kısaltarak enerji verimliliğini arttırabilir hem de ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyarak kaliteyi iyileştirebilir. Bu yöntem, özellikle hassas gıda ürünlerinin kurutulmasında etkili bir çözüm sunabilir.

Farklı kurutma yöntemlerinin 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin nem içeriği üzerindeki etkisinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. KK, nem içeriğini en yavaş azaltan yöntem olurken, Vİ işlemine maruz bırakıldıktan sonra KK yöntemiyle kurutma, nem içeriğini daha hızlı azaltmıştır. AOK+KK işlemi, kontrol kurutmaya göre daha etkili bir kurutma sağlamış, VOK+KK ise nem içeriğini daha hızlı azaltarak kurutma süresini önemli ölçüde kısaltmıştır. Vİ+AOK+KK işlemi de nem içeriğini daha hızlı azaltmış, özellikle vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiğinde (yani Vİ+VOK+KK) ise en hızlı nem kaybını sağlayarak en düşük nem içeriğine en kısa sürede ulaşmıştır. Bu sonuçlar, Vİ ve vakum altında ohmik ısıtma gibi işlemlerin kombinasyonlarının kurutma süresini kısaltarak enerji tasarrufu sağlayabileceğini ve ürün kalitesini arttırabileceğini göstermektedir.

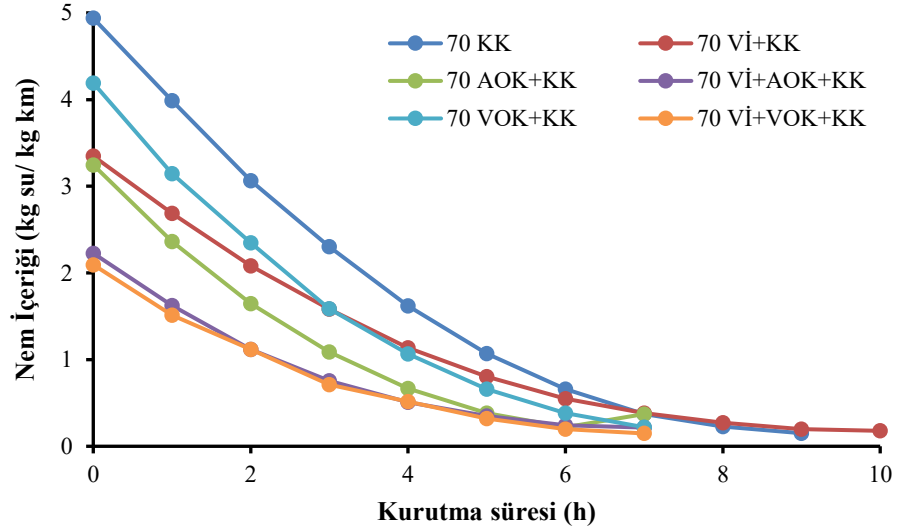


Şekil 4.2. Altı farklı yöntemle 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin başlangıç ortalama nem içeriklerinin zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Vakum impregnasyon işlemi, 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin nem içeriği üzerindeki etkisini artırarak kurutma sürecini hızlandıran önemli bir ön işlem olmuştur. Vİ işlemi sırasında, vakum altında elma dilimlerinin gözenekli yapısındaki hava boşlukları sıvı ile doldurulur (Fito, 1994). Bu durum, kurutma sırasında suyun daha kolay buharlaşmasını sağlar ve nem içeriğinin daha hızlı azalmasına katkıda bulunur (Fito, 1994). Ayrıca, Vİ işlemi, ürünün elektriksel iletkenliğini artırarak ohmik ısıtma yöntemleriyle birleştirildiğinde ısınnın daha homojen bir şekilde iletilmesine olanak tanır. Grafikte görüldüğü üzere, Vİ işlemi tek başına KK ile birleştirildiğinde (yani Vİ+KK), kontrol kurutmaya göre nem içeriğini daha hızlı azaltmıştır. Bununla birlikte, Vİ işleminin ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemleriyle birleştirilmesi (yani Vİ+AOK+KK ve Vİ+VOK+KK), nem içeriğinin daha hızlı azalmasını sağlamış ve kurutma süresini önemli ölçüde kısaltmıştır. Özellikle vakum altında ohmik ısıtma ile birleştirildiğinde (yani Vİ+VOK+KK), en hızlı nem kaybı sağlanmış ve en düşük nem içeriğine ulaşılmıştır. Sonuç olarak, 60°C’de Vİ işlemi, kurutma sürecini hızlandırarak enerji tasarrufu sağlayabilir ve ürünün fiziksel özelliklerini koruyarak kaliteyi arttırabilir. Bu etkiler, Vİ işlemini özellikle hassas gıda ürünlerinin kurutulmasında etkili bir ön işlem haline getirebilir.

Ohmik ısıtımali ön kurutma işlemini vakum altında gerçekleştirmek, 60°C’de elma dilimlerini kurutma sürecinde hem ısı transferi hem de ürün kalitesi açısından önemli avantajlar sağlayabilir. Vakum ortamı, basıncı düşürerek suyun kaynama noktasını azaltır ve buharlaşmayı daha düşük sıcaklıklarda mümkün kılar (İçier vd., 2017). Bu durum, ürünün içindeki suyun daha hızlı buharlaşmasını sağlayarak kurutma süresini önemli ölçüde kısaltır. Ayrıca, vakum ortamında oksijen miktarının azalması, oksidatif reaksiyonları sınırlandırarak ürünün renk, tat ve besin değerinin korunmasına yardımcı olur (Sabancı ve İçier, 2020). VOK+KK yöntemi, AOK+KK yöntemine kıyasla elma dilimlerinin nem içeriğini daha hızlı azaltmıştır. Vakum ortamı, ohmik ısıtma sırasında ısının ürünün iç kısımlarına daha homojen bir şekilde iletilmesini kolaylaştırmış ve suyun buharlaşma hızını artırmıştır (Richardson, 2001). Ayrıca, Vİ işlemi ile birleştirildiğinde (yani Vİ+VOK+KK), elma dilimlerinde en hızlı nem kaybını sağlamış ve en düşük nem içeriğine en kısa sürede ulaşılmıştır. Sonuç olarak, 60°C’de ohmik ısıtmayı vakum altında yapmak, kurutma süresini kısaltmak suretiyle enerji verimliliğini arttırabilir ve ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyarak kaliteyi iyileştirebilir.

Altı farklı kurutma yöntemiyle 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin nem içeriği üzerindeki etkisinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.3’te gösterilmiştir. KK, nem içeriğini en yavaş azaltan yöntem olurken, Vİ+KK yöntemi, kontrol kurutmaya göre daha hızlı bir nem kaybı sağlamıştır. AOK+KK yöntemi, elma dilimlerinde nem içeriğini daha hızlı azaltmış, VOK+KK yöntemi ise kurutma süresini daha da kısaltmıştır. Vakum impregnasyonun atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımali ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (yani Vİ+AOK+KK), elma dilimlerinde nem içeriğini daha hızlı azaltarak etkili bir kurutma sağlamış, Vİ işleminin vakum altında ohmik ısıtımali ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (yani Vİ+VOK+KK) ise elma dilimlerinde en hızlı nem kaybını sağlayarak en düşük nem içeriğine en kısa sürede ulaştırmıştır. Bu bulgular, Vİ ile vakum altında ohmik ısıtımali ön kurutma işlemlerinin kombinasyonlarının elma dilimlerinde kurutma süresini kısaltarak enerji verimliliğini arttırabileceğini ve ürün kalitesini iyileştirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.3. Altı farklı yöntemle 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin başlangıç ortalama nem içeriklerinin zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Vakum impregnasyon işleminin etkisi değerlendirilecek olursa, 70°C’de kurutma sürecini hızlandırarak elma dilimlerinin nem içeriğinin daha hızlı azalmasını sağlamış ve kurutma verimliliğini artırmıştır. Vİ işlemi KK yöntemiyle birleştirildiğinde, KK yönteminin tek başına kullanılmasına göre nem içeriğini daha hızlı azaltmıştır. Ayrıca, Vİ işlemi, ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemleriyle birleştirildiğinde (yani Vİ+AOK+KK ve Vİ+VOK+KK), nem içeriğinin daha hızlı azalmasını sağlamış ve kurutma süresini önemli ölçüde kısaltmıştır. Özellikle vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiğinde (yani Vİ+VOK+KK), en hızlı nem kaybı sağlanmış ve en düşük nem içeriğine en kısa sürede ulaşılmıştır. Bu bulgular, Vİ işleminin, kurutma sürecini hızlandırarak enerji tasarrufu sağlayabileceğini ve ürün kalitesini arttırabileceğini göstermektedir.

Ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini vakum altında gerçekleştirmek, elma dilimlerini 70°C’de kurutma sürecinde hem nem kaybını hızlandırmış hem de ürün kalitesini artırmıştır. Vakum ortamı, basıncı düşürerek suyun kaynama noktasını azaltmış ve buharlaşmayı daha düşük sıcaklıklarda mümkün kılmıştır (İçier vd., 2017). Bu durum, ürün içindeki suyun daha hızlı buharlaşmasını sağlamış ve kurutma süresini önemli ölçüde kısaltmıştır. Ayrıca, vakum ortamında oksijen miktarının azalması, oksidatif reaksiyonları sınırlandırarak ürünün renk, tat ve besin değerinin korunmasına katkıda

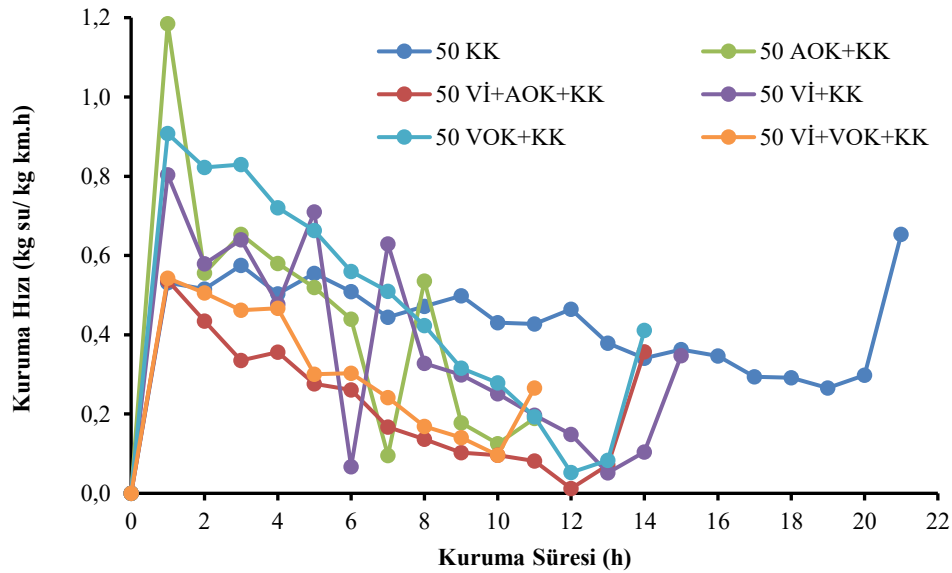
bulunmuştur (Sabancı ve İçier, 2020). Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK+KK), atmosfer basıncı altında yapılan işleme (AOK+KK) kıyasla nem içeriğini daha hızlı azaltmış ve daha kısa sürede kuruma sağlamıştır. Vİ işlemiyle birleştirildiğinde (yani Vİ+VOK+KK), en hızlı nem kaybı sağlanmış ve en düşük nem içeriğine en kısa sürede ulaşılmıştır. Bu bulgular, vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin, kurutma sürecini hızlandırarak enerji verimliliğini arttırabileceğini ve ürün kalitesini iyileştirebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, üç farklı sıcaklıkta yapılan kurutma işlemleri incelendiğinde, elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini maksimize edecek şekilde tasarlanan Vİ ile ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinin, kurutma sürecini hızlandırarak nem içeriğini azaltmada etkili olduğu görülmüştür. Vİ işlemi, ürünün gözenekli yapısındaki hava boşluklarını sıvı ile doldurarak suyun daha kolay buharlaşmasını sağlamış ve ısı transferini iyileştirmiştir. Bu etki, özellikle KK ile birleştirildiğinde nem içeriğini kontrol kurutmaya göre daha hızlı azaltmış, ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiğinde ise kurutma süresini daha da kısaltmıştır. Öte yandan, ohmik ısıtmalı ön kurutma, elektriksel iletkenlik yoluyla ürünün iç kısımlarına ısının homojen bir şekilde iletilmesini sağlamış ve suyun buharlaşma hızını artırmıştır. Vakum altında gerçekleştirilen ohmik ısıtma, atmosfer basıncı altındaki uygulamalara kıyasla daha etkili olmuş, suyun kaynama noktasını düşürerek nem içeriğini daha hızlı azaltmıştır. Özellikle Vİ işleminin vakum altında ohmik ısıtma ile birleştirildiği yöntem, her üç sıcaklıkta da en hızlı nem kaybını sağlamış ve en düşük nem içeriğine en kısa sürede ulaşmıştır. Bu bulgular, elektriksel iletkenliği maksimize edecek şekilde kullanılan Vİ ve ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinin, kurutma süresini kısaltarak enerji verimliliğini arttırabileceğini ve ürün kalitesini iyileştirebileceğini göstermektedir.

4.3.2. Elma Dilimlerine Ait Kuruma Hızları

Elma dilimlerinin altı farklı kurutma yöntemiyle kurutulması sırasındaki kuruma hızları Denklem 3.2'ye göre hesaplanmış ve altı farklı kurutma yönteminin 50°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızı üzerine etkisi Şekil 4.4'te sunulmuştur. KK yönteminin başlangıçta yüksek bir kuruma hızı sağlamış, ancak zamanla hız azalmıştır. Vİ işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması, kuruma hızını artırarak kontrol kurutmaya göre daha hızlı bir nem kaybı sağlamıştır. Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma yapılan elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (AOK+KK), kuruma hızını daha da artırmış ve kurutma süresini

kısaltmıştır. Vakum altında ohmik ısıtımali ön kurutma işlemi sonrasında uygulanan KK yöntemi (VOK+KK) ise atmosfer basıncı altındaki uygulamaya kıyasla daha yüksek bir kuruma hızı sağlamış ve daha kısa sürede etkili bir kuruma gerçekleştirmiştir (Şekil 4.4). Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilen elma dilimlerinin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımali ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+AOK+KK), kuruma hızını daha da artırmış ve etkili bir kurutma sağlamıştır. En yüksek kuruma hızı ise Vİ işleminin vakum altında ohmik ısıtımali ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+VOK+KK) ile elde edilmiştir. Bu yöntem, kurutma süresini en fazla kısaltmış ve en etkili nem kaybını sağlamıştır. Genel olarak, Vİ ve ohmik ısıtımali işlemlerinin kombinasyonu, düşük sıcaklıklarda bile kurutma hızını artırarak enerji verimliliğini ve ürün kalitesini iyileştirilebilecek nitelikte bulunmuştur.



Şekil 4.4. Altı farklı yöntemle 50°C’de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızlarının zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımali ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtımali ön kurutma işlemini göstermektedir.)

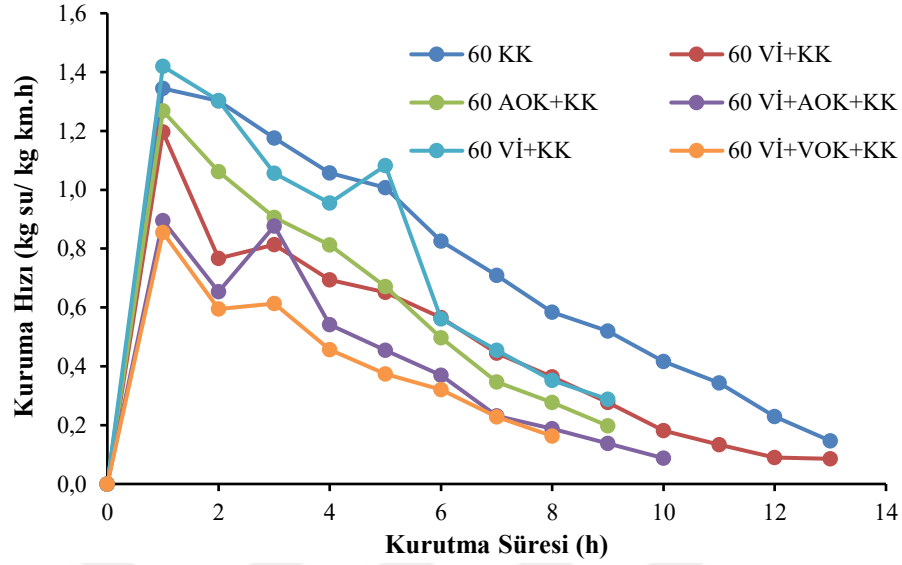
Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini maksimize edecek şekilde tasarlanan Vİ işlemi, 50°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızını artırarak kurutma sürecini hızlandırmıştır. Vİ sırasında, vakum ortamında ürünün gözenekli yapısındaki hava boşlukları sıvı ile doldurulur, bu da suyun daha kolay buharlaşmasını sağlar (Fito, 1994). Bu işlem, ısı transferini iyileştirerek kurutma sırasında suyun yüzeye daha hızlı taşınmasına olanak tanır (Fito, 1994). Vİ işleminin KK ile birleştirildiği yöntemlerde

(Vİ+KK ve Vİ+AOK+KK), kuruma hızının kontrol kurutmaya göre daha yüksek olduğu ve nem kaybının daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir. Vİ işlemi, özellikle düşük sıcaklıklarda kurutma hızını artırarak enerji tasarrufu sağlamış ve ürünün kuruma sürecini optimize etmiştir.

Ohmik ısıtmalı ön kurutmanın vakum altında gerçekleştirilmesi, elma dilimlerinin kuruma hızını önemli ölçüde artırmıştır. Vakum ortamı, basıncı düşürerek suyun kaynama noktasını azaltmış ve buharlaşmayı daha düşük sıcaklıklarda mümkün kılmıştır (İçier vd., 2017). Bu durum, ürün içindeki suyun daha hızlı buharlaşmasını sağlamış ve kurutma süresini kısaltmıştır (Sabancı ve İçier, 2020) Ayrıca, ohmik ısıtma, elektriksel iletkenlik yoluyla ürünün iç kısımlarına ısının homojen bir şekilde iletilmesini sağlayarak suyun yüzeye taşınmasını hızlandırmıştır (Richardson, 2001). Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK+KK ve Vİ+VOK+KK), atmosfer basıncı altındaki uygulamalara kıyasla daha yüksek kuruma hızları sağlamış ve en kısa sürede etkili bir kuruma gerçekleştirmiştir. Bu bulgular, vakum ortamının ve ohmik ısıtmanın sinerjik etkisinin, kurutma sürecini hızlandırarak enerji verimliliğini arttırabileceğini ve ürün kalitesini koruyabileceğini göstermektedir.

Altı farklı kurutma yönteminin 60°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızı üzerine etkisi Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Tüm yöntemlerde elma dilimlerinin kuruma hızının başlangıçta yüksek iken zamanla azaldığı görülmektedir. KK yöntemi, başlangıçta yüksek bir kuruma hızı sağlamış ancak zamanla hızda belirgin bir azalma göstermiştir. Vİ işlemi entegre edildiğinde, kuruma hızı artmış ve kontrol kurutmaya göre daha hızlı bir nem kaybı sağlanmış ve kurutma süresi kısaltılmıştır. Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK+KK) yöntemi, kuruma hızını daha da artırmış ve kurutma sürecini daha verimli hale getirmiştir. Ön kurutmanın vakum altında yapılması (VOK+KK) ise atmosfer basıncı altındaki uygulamaya (AOK+KK) kıyasla daha yüksek bir kuruma hızı sağlamış ve daha kısa sürede etkili bir kuruma gerçekleştirmiştir. Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliği Vİ işlemiyle maksimize edilmesinden sonra atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+AOK+KK), kuruma hızını daha da artırmış ve etkili bir kurutma sağlamıştır. En yüksek kuruma hızı ise Vİ işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinin vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+VOK+KK) ile elde edilmiştir. Bu yöntem, kurutma süresini en fazla kısaltmış ve en etkili nem kaybını sağlamıştır. Genel olarak, Vİ ve vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinin

kombinasyonu, 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızını artırarak enerji verimliliğini ve ürün kalitesini iyileştirebilecek nitelikte bulunmuştur.



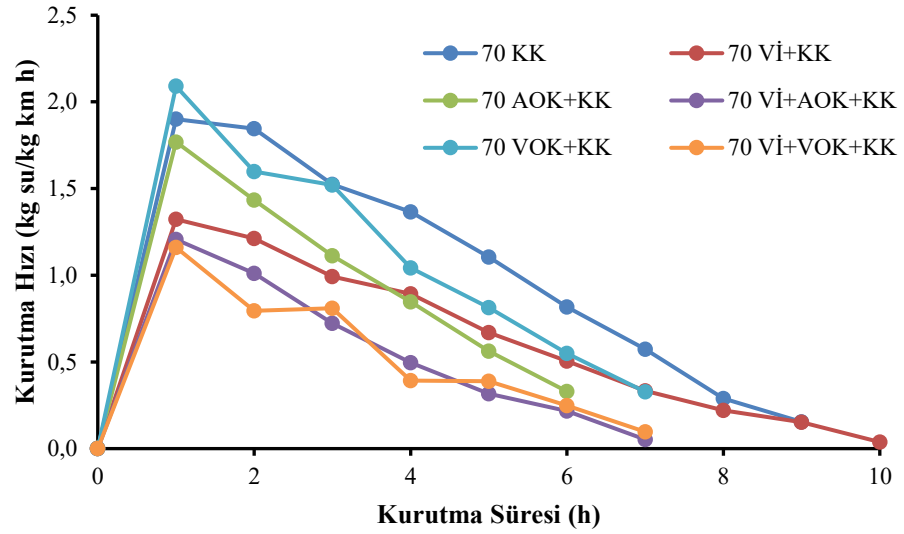
Şekil 4.5. Altı farklı yöntemle 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızlarının zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtım ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini maksimize edecek şekilde tasarlanan Vİ işlemi, 60°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızını artırarak kurutma sürecini hızlandırmıştır. Vİ işlemi sırasında, vakum ortamında ürünün gözenekli yapısındaki hava boşlukları sıvı ile doldurulur, bu da suyun daha kolay buharlaşmasını sağlar (Fito, 1994). Vİ işleminin konveksiyonel kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+KK), kontrol kurutmaya göre daha yüksek bir kuruma hızı sağlamış ve nem kaybını hızlandırmıştır. Vİ işlemi, ürünün iç yapısındaki suyun yüzeye taşınmasını kolaylaştırarak kurutma süresini kısaltmış ve düşük sıcaklıklarda bile etkili bir kuruma sağlamıştır (Sabancı ve İçier, 2020). Bu durum, enerji tasarrufu sağlarken ürün kalitesinin korunmasına da katkı sağlayabilir.

Ohmik ısıtım ön kurutmanın vakum altında gerçekleştirilmesi, 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızını önemli ölçüde artırmıştır. Vakum ortamı, basıncı düşürerek suyun kaynama noktasını azaltmış ve buharlaşmayı daha düşük sıcaklıklarda mümkün kılmıştır (İçier vd., 2017). Bu durum, ürün içindeki suyun daha hızlı buharlaşmasını sağlamış ve kurutma süresini kısaltmıştır. Vakum altında ohmik ısıtım ön kurutma (VOK+KK), atmosfer basıncı altındaki uygulamaya (AOK+KK) kıyasla daha

yüksek bir kuruma hızı sağlamış ve daha kısa sürede etkili bir kuruma gerçekleştirmiştir (Şekil 4.5). Ayrıca, Vİ işleminin vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+VOK+KK), elma dilimlerinde en yüksek kuruma hızını sağlamış ve en kısa sürede en düşük nem içeriğine ulaştırmıştır. Bu bulgular, Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma yönteminin sinerjik etkisinin, kurutma sürecini hızlandırarak enerji verimliliğini arttırabileceğini ve ürün kalitesini iyileştirebileceğini göstermektedir.

Altı farklı kurutma yönteminin 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızı üzerine etkisi Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Bu sıcaklıkta da tüm yöntemlerde elma dilimlerinin kuruma hızının başlangıçta yüksek olduğu, ancak zamanla azaldığı görülmektedir. KK yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla daha düşük bir kuruma hızı göstermiştir. Vİ işleminin kurutma sürecine dahil edilmesi (Vİ+KK), kuruma hızını artırarak kontrol kurutmaya göre daha hızlı bir nem kaybı sağlamıştır. Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK+KK), kuruma hızını daha da artırırken, vakum altındaki ön kurutma (VOK+KK), atmosfer basıncı altındaki uygulamaya kıyasla daha yüksek bir kuruma hızı sağlamış ve daha kısa sürede etkili bir kuruma gerçekleştirmiştir. Vİ işleminin atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+AOK+KK), kuruma hızını daha da artırmış, en yüksek kuruma hızı ise Vİ işleminin vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+VOK+KK) ile elde edilmiştir. Bu yöntem, kurutma süresini en fazla kısaltmış ve en etkili nem kaybını sağlamıştır. Genel olarak, vakum ve ohmik ısıtma işlemlerinin kombinasyonu, 70°C'de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızını artırarak enerji verimliliğini ve ürün kalitesini iyileştirmiştir.



Şekil 4.6. Altı farklı yöntemle 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızlarının zamana bağlı olarak değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini maksimize edecek şekilde tasarlanan Vİ işlemi, 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kuruma hızını artırarak kurutma sürecini hızlandırmıştır. Vİ sırasında, vakum ortamında ürünün gözenekli yapısındaki hava boşlukları sıvı ile doldurulur, bu da suyun daha kolay buharlaşmasını sağlar (Fito, 1994). Vİ işleminin KK ile birleştirildiği yöntem (Vİ+KK), kontrol kurutmaya göre daha yüksek bir kuruma hızı sağlamış ve nem kaybını hızlandırmıştır. Vİ işlemi, ürün içindeki suyun yüzeye taşınmasını kolaylaştırarak kurutma süresini kısaltmış ve düşük sıcaklıklarda bile etkili bir kuruma sağlamıştır. Bu durum, enerji tasarrufu sağlarken ürün kalitesinin korunmasına da katkıda bulunabilir.

Ohmik ısıtılmalı ön kurutmanın vakum altında gerçekleştirilmesi, 70°C’de elma dilimlerinin kuruma hızını önemli ölçüde artırmıştır. Vakum ortamı, basıncı düşürerek suyun kaynama noktasını azaltmış ve buharlaşmayı daha düşük sıcaklıklarda mümkün kılmıştır (İçier vd., 2017). Bu durum, ürün içindeki suyun daha hızlı buharlaşmasını sağlamış ve kurutma süresini kısaltmıştır. Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma (VOK+KK), atmosfer basıncı altındaki uygulamaya (AOK+KK) kıyasla daha yüksek bir kuruma hızı sağlamış ve daha kısa sürede etkili bir kuruma gerçekleştirmiştir (Şekil 4.6). Ayrıca, Vİ işleminin vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma ile birleştirildiği yöntem (Vİ+VOK+KK), en yüksek kuruma hızını sağlamış ve en kısa sürede en düşük nem

içeriğine ulaşmıştır. Bu bulgular, vakum ortamının ve ohmik ısıtmanın sinerjik etkisinin, kurutma sürecini hızlandırarak enerji verimliliğini arttırabileceğini ve ürün kalitesini iyileştirebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) yapılan kurutma işlemleri incelendiğinde, hem elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini maksimize edecek şekilde tasarlanan Vİ işleminin hem de ohmik ısıtmalı ön kurutmanın vakum altında yapılmasının elma dilimlerinin kuruma hızını önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Vİ işlemi, ürünün gözenekli yapısındaki hava boşluklarını sıvı ile doldurarak suyun yüzeye taşınmasını kolaylaştırmış ve kurutma sürecini hızlandırmıştır. Vİ'nin konveksiyonel kurutma ile birleştirildiği yöntemlerde, kontrol kurutmaya kıyasla daha yüksek kuruma hızları elde edilmiş ve kurutma süresi kısalmıştır. Öte yandan, ohmik ısıtmalı ön kurutmanın vakum altında yapılması, basıncı düşürerek suyun kaynama noktasını azaltmış ve buharlaşmayı daha düşük sıcaklıklarda mümkün kılmıştır. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, suyun ürün içinden yüzeye taşınmasını hızlandırarak kuruma hızını artırmış ve kurutma süresini en aza indirmiştir. Özellikle Vİ işleminin vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ile birleştirildiği yöntemler, tüm sıcaklıklarda en yüksek kuruma hızını sağlamış ve en kısa sürede etkili bir nem kaybı gerçekleştirmiştir. Bu sonuçlar, Vİ ve vakum altında ohmik ısıtmanın sinerjik etkisinin, enerji verimliliğini artırarak kurutma sürecini optimize ettiğini ve ürün kalitesini koruduğunu göstermektedir.

4.3.3. Kuruma Kinetiğine Ait İnce Tabaka Kuruma Modelleri

Altı farklı kurutma yöntemiyle 50°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kurutulması sırasında elde edilen nem oranı değerlerinin kuruma zamanı ile değişimini içeren deneysel veriler, doğrusal olmayan regresyon analizi ile sekiz ayrı ince tabaka kuruma modeline (Henderson-Pabis, Logaritmik, Jena-Das, Midilli ve Küçük, Wang ve Singh, Page ve Lewis) uygulanmış ve model katsayıları ile uyum bulguları Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Modeller arasında uygunluk belirlenirken R^2 , RMSE, χ^2 ve düzeltilmiş R^2 değerinin yanı sıra parametre sayısı da büyük önem arz etmektedir (Buzrul, 2022). Genellikle modelin matematiksel yapısında daha az parametre veya daha basit bir formülasyon varsa (örneğin, bu model veriyi daha sade bir şekilde açıklıyorsa), o model tercih sebebi olmalıdır. Bu durumun temeli “parsimony” yani sadelik ilkesine dayanmaktadır ki, benzer performans gösteren modeller arasında daha az parametrelili olanın tercih edilmesi gerekir çünkü daha karmaşık modellerde parametrelerin belirsizliği ve anlamlılığı azalabilir (Buzrul, 2022). Çizelgede sunulan her model için belirli sabitler,

uyum katsayıları (R^2 ve düzeltilmiş R^2), hata ölçütleri (RMSE ve χ^2), kurutma yöntemlerinin etkinliğini ve modellerin deneysel verilere ne kadar iyi uyduğunu değerlendirmek için önemlidir. Henderson-Pabis modeli, genel olarak tüm kurutma yöntemlerinde yüksek uyum göstermiş ve özellikle Vİ+AOK+KK kombinasyonu ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir ($R^2=0,9990$, RMSE=0,0017, $\chi^2=0,0006$). Bu durum, Vİ ve ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinin kombinasyonunun, kurutma sürecinde etkili olduğuna işaret etmektedir. Diğer yöntemlerde de bu modelin uyum katsayıları oldukça yüksek olmuştur. Logaritmik model, özellikle KK yöntemiyle en yüksek uyumu sağlamıştır ($R^2=0,9996$, RMSE=0,0024, $\chi^2=0,0003$). Bununla birlikte, diğer yöntemlerde de oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu model, kurutma sürecini açıklamada güvenilir bir seçenek olabilir. Jena-Das modeli, Vİ+AOK+KK kombinasyonu ile en iyi uyumu göstermiş ($R^2=0,9990$, RMSE=0,0017, $\chi^2=0,0006$) ancak diğer yöntemlerde uyum katsayıları biraz daha düşük bulunmuştur. Bu modelin, özellikle karmaşık kurutma yöntemlerinde daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Midilli ve Küçük modeli, tüm kurutma yöntemlerinde en yüksek uyum katsayılarını (R^2 ve düzeltilmiş R^2) ve en düşük hata ölçütlerini (RMSE ve χ^2) sağlamış ve özellikle KK yöntemiyle elde edilen sonuçlar ($R^2=0,9999$, RMSE=0,0012, $\chi^2=0,0006$) bu modelin, elma dilimlerinin kurutulması için en uygun teorik model olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, diğer yöntemlerde de bu modelin performansı oldukça yüksektir. Wang ve Singh modeli, VOK+KK kombinasyonu ile en iyi uyumu sağlamış ($R^2=0,9997$, RMSE=0,0010, $\chi^2=0,0004$) olup bu model, diğer yöntemlerde de oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Özellikle Vİ+AOK+KK kombinasyonu ile en iyi uyumu gösteren ($R^2=0,9991$, RMSE=0,0016, $\chi^2=0,0006$) Page modeli, genel olarak yüksek uyum katsayıları ve düşük hata ölçütleriyle dikkat çekmektedir. Kurutma yöntemleri arasında, bu modelin performansı oldukça tutarlı olmuştur. Son olarak, Lewis modeli, diğer modellere kıyasla daha düşük uyum katsayılarına sahip olsa da Vİ+AOK+KK kombinasyonu ile en iyi sonuçları vermiştir ($R^2=0,9989$, RMSE=0,0017, $\chi^2=0,0006$). Bu model, basit yapısı nedeniyle bazı durumlarda tercih edilebilir. Genel olarak, tüm yöntemlerde en yüksek uyumu sağlayan ve en düşük hata ölçütlerini veren Midilli ve Küçük modeli, elma dilimlerinin kurutulması için en uygun model olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, Vİ+AOK+KK kombinasyonu, birçok modelde en iyi sonuçları vermiştir. Bu durum, Vİ ve ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinin kombinasyonunun, kurutma sürecini optimize ettiğini ve nem oranını daha etkili bir şekilde düşürdüğünü göstermektedir. Bu bulgular, endüstriyel uygulamalarda

hangi kurutma yönteminin ve modelin kullanılacağına karar vermede önemli bir rehber olabilir.

Çizelge 4.9. Altı farklı yöntemle 50°C’de kurutulan elma dilimlerinden elde edilen nem oranı değerlerine ait deneysel bulguların doğrusal olmayan regresyon analizi ile teorik ince tabaka kuruma modellerine uyumu (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Model	Kurutma Yöntemi	Sabitler	R ²	Düzeltilmiş R ²	RMSE	χ ²
Henderson-Pabis	KK	a=1,077; k=0,091	0,9746	0,9733	0,0189	0,0022
	Vİ+KK	a=1,056; k=0,166	0,9884	0,9875	0,0117	0,0022
	AOK+KK	a=1,042; k=0,230	0,9880	0,9868	0,0079	0,0031
	Vİ+AOK+KK	a=0,994; k=0,184	0,9990	0,9989	0,0017	0,0006
	VOK+KK	a=1,041; k=0,188	0,9905	0,9897	0,0056	0,0021
	Vİ+VOK+KK	a=1,032; k=0,216	0,9922	0,9914	0,0059	0,0024
Logaritmik	KK	a=1,822; k=0,035; c=-0,811	0,9996	0,9996	0,0024	0,0003
	Vİ+KK	a=1,185; k=0,121; c=0,162	0,9968	0,9964	0,0063	0,0012
	AOK+KK	a=1,182; k=0,012; c=-0,174	0,9876	0,9870	0,0037	0,0015
	Vİ+AOK+KK	a=0,981; k=0,193; c=-0,018	0,9993	0,9991	0,0015	0,0006
	VOK+KK	a=1,143; k=0,142; c=-0,132	0,9978	0,9975	0,0028	0,0010
	Vİ+VOK+KK	a=1,155; k=0,160; c=-0,151	0,9990	0,9988	0,0022	0,0009
Jena-Das	KK	h=0,450; j=0,717; k=1,038; m=0,037	0,9746	0,9703	0,0199	0,0023
	Vİ+KK	h=0,487; j=0,641; k=1,026; m=0,023	0,9884	0,9884	0,0127	0,0024
	AOK+KK	h=0,519; j=0,578; k=1,019; m=0,022	0,9880	0,9835	0,0088	0,0034
	Vİ+AOK+KK	h=0,496; j=0,624; k=0,995; m=-0,001	0,9990	0,9989	0,0017	0,0006
	VOK+KK	h=0,498; j=0,620; k=1,018; m=0,022	0,9905	0,9879	0,0061	0,0023
	Vİ+VOK+KK	h=0,512; j=0,592; k=1,015; m=0,017	0,9922	0,9893	0,0066	0,0027
Midilli ve Küçük	KK	h=0,996; j=0,040; k=1,158; m=-0,009	0,9999	0,9999	0,0012	0,0006
	Vİ+KK	h=0,996; j=0,102; k=1,192; m=-0,002	0,9981	0,9976	0,0051	0,0009
	AOK+KK	h=1,003; j=0,173; k=1,059; m=-0,008	0,9977	0,9968	0,0039	0,0015
	Vİ+AOK+KK	h=0,995; j=0,183; k=1,029; m=0,002	0,9977	0,9994	0,0015	0,0005
	VOK+KK	h=0,987; j=0,123; k=1,172; m=-0,002	0,9988	0,9983	0,0022	0,0008
	Vİ+VOK+KK	h=0,994; j=0,159; k=1,104; m=-0,005	0,9993	0,9990	0,0021	0,0008
Wang ve Singh	KK	h=0,001; k=-0,060	0,9997	0,9997	0,0021	0,0002
	Vİ+KK	h=0,004; k=-0,121	0,9984	0,9983	0,0043	0,0008
	AOK+KK	h=0,007; k=-0,166	0,9965	0,9962	0,0043	0,0017
	Vİ+AOK+KK	h=0,006; k=-0,150	0,9927	0,9921	0,0046	0,0017
	VOK+KK	h=0,005; k=-0,138	0,9997	0,9997	0,0010	0,0004
	Vİ+VOK+KK	h=0,007; k=-0,162	0,9994	0,9993	0,0017	0,0007
Page	KK	n=1,376; k=0,033	0,9956	0,9954	0,0778	0,0090
	Vİ+KK	n=1,241; k=0,098	0,9977	0,9975	0,0052	0,0010
	AOK+KK	n=1,205; k=0,158	0,9953	0,9948	0,0049	0,0019
	Vİ+AOK+KK	n=0,979; k=0,193	0,9991	0,9990	0,0016	0,0006
	VOK+KK	n=1,204; k=0,126	0,9981	0,9979	0,0025	0,0009
	Vİ+VOK+KK	n=1,177; k=0,155	0,9983	0,9981	0,0028	0,0011
Lewis	KK	k=0,084	0,9643	0,9643	0,0218	0,0025
	Vİ+KK	k=0,157	0,9839	0,9839	0,0133	0,0025
	AOK+KK	k=0,221	0,9854	0,9854	0,0083	0,0032
	Vİ+AOK+KK	k=0,185	0,9989	0,9989	0,0017	0,0006
	VOK+KK	k=0,181	0,9881	0,9881	0,0060	0,0023
	Vİ+VOK+KK	k=0,209	0,9906	0,9906	0,0062	0,0025

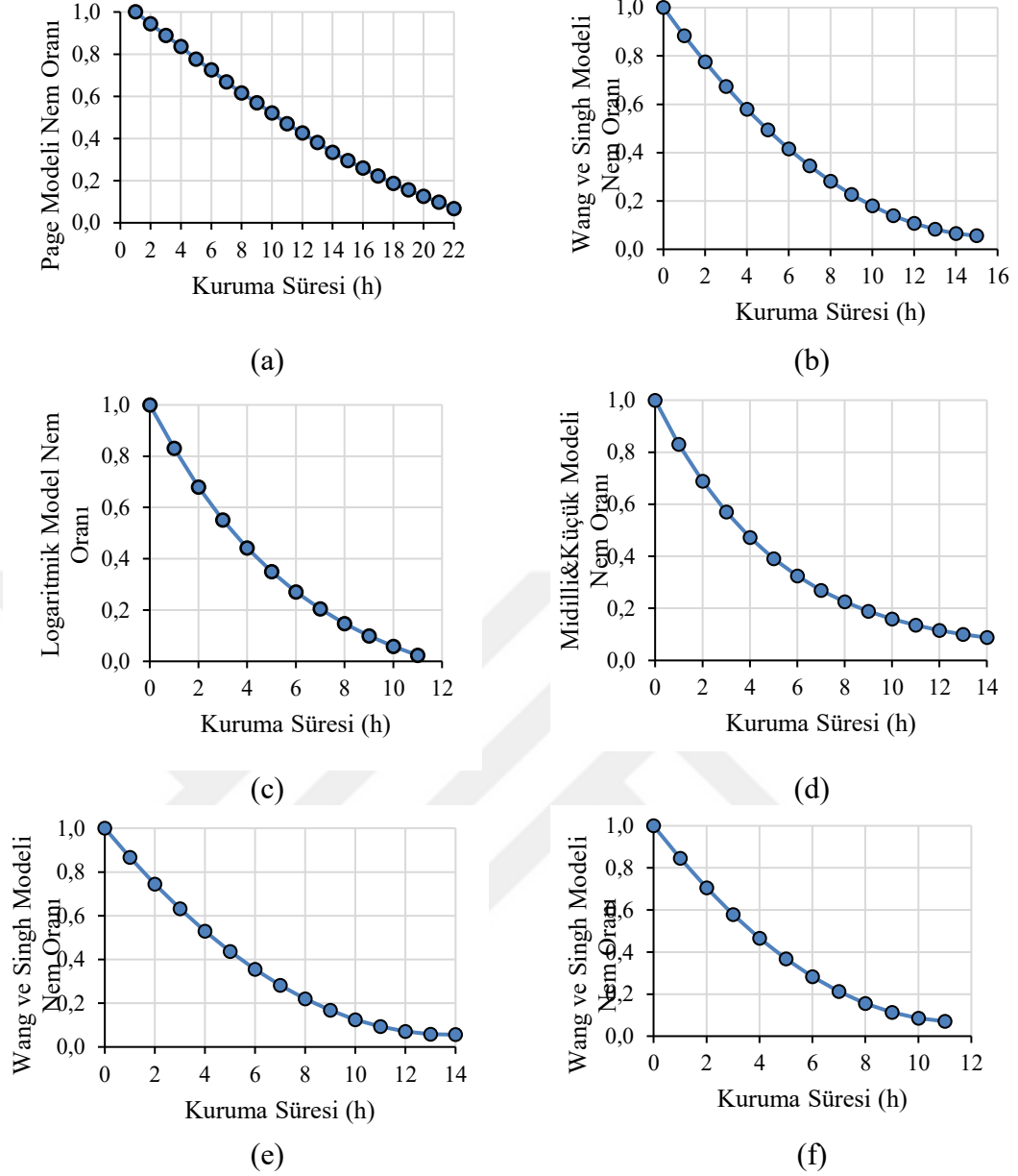
Farklı kurutma yöntemleriyle 50°C sıcaklıkta gerçekleştirilen kurutma işlemlerinde her bir yöntem için en iyi modelin seçilmesinde yalnızca uyum katsayıları (R² ve

düzeltilmiş R^2) ve hata değerleri (RMSE ve χ^2) dikkate alındığında, KK yöntemi verileri için en uygun modelin, en yüksek R^2 ve en düşük RMSE ile χ^2 değerlerine sahip olan Page modeli olduğu görülmektedir ($R^2=0,9956$; RMSE=0,0778; $\chi^2=0,009$) (Çizelge 4.9). Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işlemi sonrasında uygulan KK yöntemi için ise Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9984$; RMSE=0,0043; $\chi^2=0,0008$) en uygun model olarak belirlenmiştir. Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle (AOK) ön kurutma sonrasında uygulanan KK yöntemi için, ise Logaritmik model ($R^2=0,9876$; RMSE=0,0037; $\chi^2=0,0015$) tercih edilebilir. Vİ ve AOK işlemlerinin KK yöntemi ile kombine edildiği kurutma yöntemi için ise Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9997$; RMSE=0,0015; $\chi^2=0,0005$) en iyi sonuçları vermiştir. Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle (VOK) ön kurutma sonrasında uygulanan KK yöntemi için Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9997$; RMSE=0,0010; $\chi^2=0,0004$) en uygun model olarak belirlenmişken, bu kombinasyona dahil edilen Vİ işlemleri kurutma (Vİ+VOK+KK) için de yine Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9994$; RMSE=0,0017; $\chi^2=0,0007$) en iyi performansı göstermiştir.

Her bir kurutma yöntemi için en iyi modelin seçilmesinde yalnızca uyum katsayıları (R^2 ve düzeltilmiş R^2) ve hata değerleri (RMSE ve χ^2) değil, aynı zamanda modellerin parametre sayısının da dikkate alınması gereklidir. Daha az parametreye sahip modeller, benzer uyum katsayıları sağladığında tercih edilmelidir. Bu bağlamda, KK yöntemi için, en yüksek uyumu Midilli ve Küçük modeli sağlamıştır ($R^2=0,9999$, RMSE=0,0012, $\chi^2=0,0006$). Ancak bu model dört parametre içerirken, Wang ve Singh modeli yalnızca iki parametre ile oldukça yüksek bir uyum sağlamaktadır ($R^2=0,9997$, RMSE=0,0021, $\chi^2=0,0002$). Bu nedenle, daha az parametre ile benzer bir performans sunduğu için Wang ve Singh modeli, KK yöntemi için daha uygun bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Vİ+KK yöntemi için, Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9981$, RMSE=0,0051, $\chi^2=0,0009$) en iyi uyumu sağlamış gibi görünse de bu model dört parametre içerir. Buna karşılık, yalnızca iki parametreye sahip olan Wang ve Singh modeli, oldukça yüksek bir uyum katsayısı ($R^2=0,9984$, RMSE=0,0043, $\chi^2=0,0008$) ile daha basit bir alternatif sunmaktadır. Bu nedenle, Wang ve Singh modeli, bu yöntem için daha uygun bir seçim olabilir. Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin KK ile kombine edildiği (AOK+KK) kurutma yöntemi için, Logaritmik model ($R^2=0,9876$, RMSE=0,0037, $\chi^2=0,0015$) en iyi uyumu sağlamıştır. Ancak bu model üç parametre içerirken, yalnızca bir parametreye sahip olan Lewis modeli, kabul edilebilir bir uyum katsayısı ($R^2=0,9854$, RMSE=0,0083, $\chi^2=0,0032$) ile daha basit bir alternatif sunmaktadır. Bu nedenle,

parametre sayısı göz önüne alındığında, Lewis modeli bu yöntem için daha uygun olabilir. Vİ işlemi uygulanmış elma dilimlerinin AOK+KK kombinasyonuna entegre edildiği yöntem (Vİ+AOK+KK) için ise Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9994$, $RMSE=0,0015$, $\chi^2=0,0005$) en iyi uyumu sağlamıştır. Ancak bu model dört parametre içerirken, yalnızca iki parametreye sahip olan Henderson-Pabis modeli, oldukça yüksek bir uyum katsayısı ($R^2=0,9990$, $RMSE=0,0017$, $\chi^2=0,0006$) ile daha basit bir alternatif sunmaktadır. Bu nedenle, Henderson-Pabis modeli, bu yöntem için daha uygun bir seçim olabilir. Ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin vakum altında yapılmasıyla KK yönteminin entegre edildiği yöntem (VOK+KK) için Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9997$, $RMSE=0,0010$, $\chi^2=0,0004$) yalnızca iki parametre ile en iyi uyumu sağlamıştır. Bu nedenle, bu yöntem için en uygun model Wang ve Singh modeli'dir. Vİ+VOK+KK kombinasyonu için Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9993$, $RMSE=0,0021$, $\chi^2=0,0008$) en iyi uyumu sağlamıştır. Ancak bu model dört parametre içerirken, yalnızca iki parametreye sahip olan Wang ve Singh modeli, oldukça yüksek bir uyum katsayısı ($R^2=0,9994$, $RMSE=0,0017$, $\chi^2=0,0007$) ile daha basit bir alternatif sunmaktadır. Bu nedenle, Wang ve Singh modeli, bu yöntem için daha uygun bir seçim olabilir.

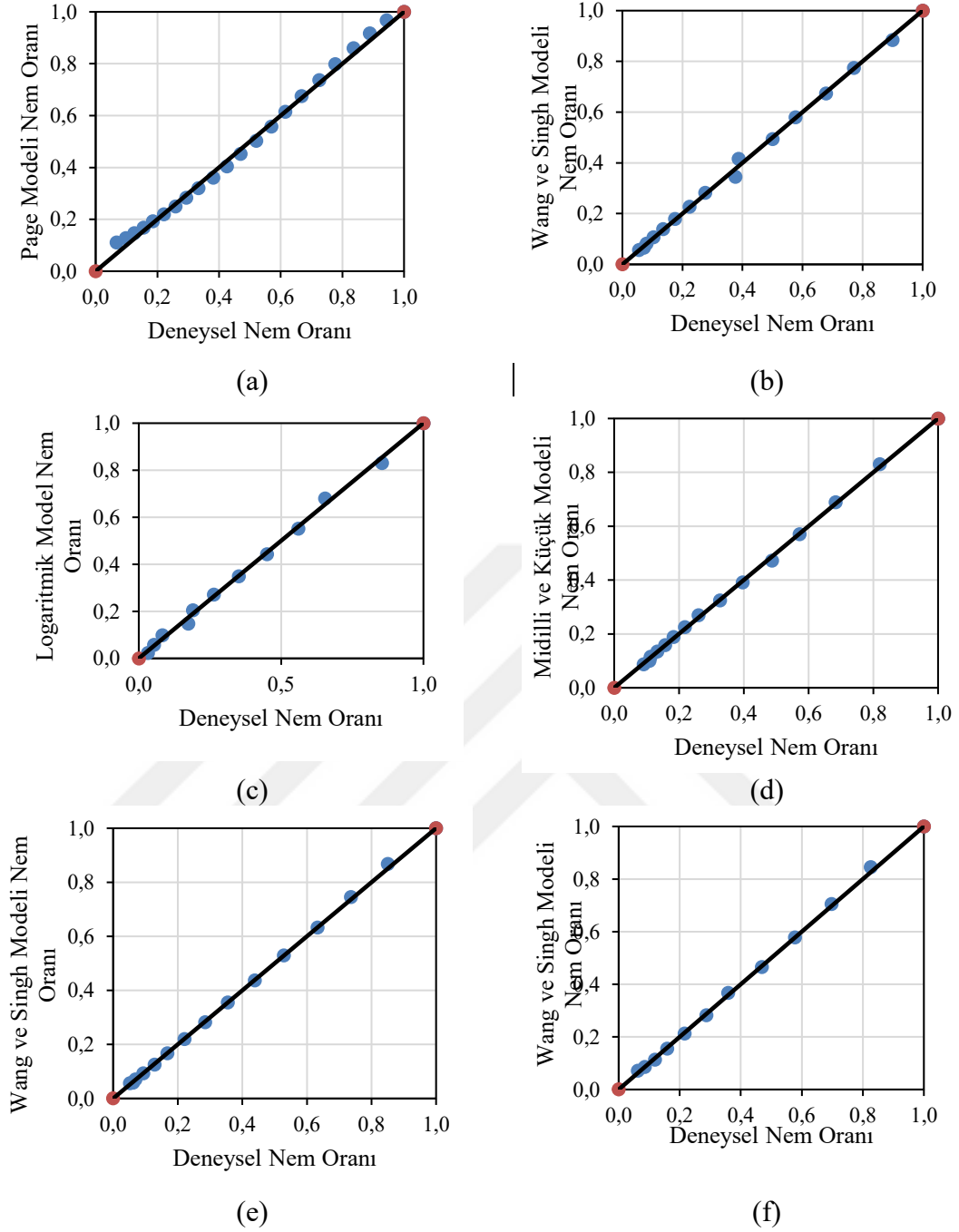
Farklı kurutma yöntemiyle elma dilimlerinin 50°C sıcaklıkta kurutulmasına ait deneysel veriler kullanılarak belirlenen en iyi ince tabaka kuruma modelleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Vİ+KK (Şekil 4.7b), VOK+KK (Şekil 4.7e) ve Vİ+VOK+KK (Şekil 4.7f) yöntemleri için Wang ve Singh modeli en iyi uyum gösterirken, KK (Şekil 4.7a) yöntemi için Page modeli ve AOK+KK (Şekil 4.7c) yöntemi için logaritmik model yüksek uyum göstermiştir. Vİ+AOK+KK (Şekil 4.7d) yöntemi için en uyumlu model Midilli ve Küçük modeli olmuştur.



Şekil 4.7. Farklı yöntemlerle 50°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen uygun modele ait nem oranlarının zamana bağlı olarak değişimi: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi

Farklı kurutma yöntemiyle elma dilimlerinin 50°C sıcaklıkta kurutulmasına ait deneysel nem oranlarıyla, belirlenen en iyi ince tabaka kuruma modeline ait nem oranları arasındaki uyum eğrileri Şekil 4.8’de verilmiştir. Vİ+KK (Şekil 4.8b), VOK+KK (Şekil 4.8e) ve Vİ+VOK+KK (Şekil 4.8f) yöntemleri için Wang ve Singh modeli en iyi uyum gösterirken, KK (Şekil 4.8a) yöntemi için Page modeli ve AOK+KK (Şekil 4.8c) yöntemi için logaritmik model yüksek uyum göstermiştir. Vİ+AOK+KK (Şekil 4.8d) yöntemi için en uyumlu model Midilli ve Küçük modeli olmuştur.





Şekil 4.8. Farklı yöntemlerle 50°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen uygun modele ait nem oranları ile deneysel nem oranı arasındaki uyum: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım sistemle ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtım sistemle ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi

Altı farklı kurutma yöntemiyle 60°C sıcaklıkta elma dilimlerinin kurutulması sırasında elde edilen nem oranı değerlerinin zamana bağlı değişimini içeren deneysel veriler, doğrusal olmayan regresyon analizi ile sekiz ayrı ince tabaka kuruma modeline (Henderson-Pabis, Logaritmik, Jena-Das, Midilli ve Küçük, Wang ve Singh, Page ve Lewis) uygulanmış ve model katsayıları ile uyum bulguları Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Midilli ve Küçük modeli genellikle tüm kurutma yöntemleri için en yüksek uyum katsayıları ($R^2=0,9987-0,9998$) ve en düşük hata değerleri ($RMSE=0,0010-0,0027$) ile en iyi performansı göstermiştir. Wang ve Singh modeli de benzer şekilde yüksek uyum katsayıları ve düşük hata değerleriyle başarılı bir performans sergilemiştir. Kurutma yöntemleri açısından modeller değerlendirildiğinde, $Vİ+VOK+KK$ kombinasyonu genellikle en iyi sonuçları sağlamış, bu kombinasyonla modellerin uyumu artmış ve hata değerleri düşmüştür. Genel olarak, Midilli ve Küçük modeli ile $Vİ+VOK+KK$ kombinasyonu elma dilimlerinin kurutulması için en uygun model ve yöntem kombinasyonu olarak öne çıkmıştır. Elma dilimlerinin 60°C sıcaklıkta kurutulmasına ait bulgulara göre Henderson-Pabis modeli için en uygun kurutma yöntemi, $Vİ+KK$ olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9953$ ve $RMSE=0,0042$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlamıştır. Ayrıca, bu yöntemdeki düşük hata değerleri ($\chi^2=0,0018$), modelin nem oranı tahmininde oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Logaritmik model için en uygun kurutma yöntemi, $Vİ+VOK+KK$ olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9995$ ve $RMSE=0,0021$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlamış ve düşük hata değerleri ($\chi^2=0,0010$) elde edilmiştir. Bu sonuçlar, logaritmik modelin bu kurutma yöntemiyle oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Jena-Das modeli için en uygun kurutma yöntemi, $Vİ+KK$ olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9953$ ve $RMSE=0,0050$ değerleriyle en iyi performansı göstermiştir. Modelin dört parametrelili yapısı göz önüne alındığında, bu yöntemdeki uyum katsayıları ve hata değerleri oldukça başarılıdır. Midilli ve Küçük modeli için en uygun kurutma yöntemi, KK olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9998$ ve $RMSE=0,0010$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlamıştır. Dört parametrelili yapısına rağmen, bu model tüm yöntemler arasında en düşük hata değerlerini sağlamış ve en iyi performansı göstermiştir. Wang ve Singh modeli için en uygun kurutma yöntemi, KK olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9999$ ve $RMSE=0,0007$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlamış ve en düşük hata değerlerini elde etmiştir. İki parametrelili yapısı sayesinde model, bu yöntemde oldukça etkili bir performans sergilemiştir. Page modeli için en uygun kurutma yöntemi, $Vİ+KK$ olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9985$ ve $RMSE=0,0024$ değerleriyle en iyi performansı göstermiştir. İki parametrelili yapısı ve

düşük hata değerleri, bu yöntemde Page modelini oldukça etkili kılmıştır. Lewis modeli için en uygun kurutma yöntemi, VI+AOK+KK olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9926$ ve $RMSE=0,0064$ değerleriyle en iyi uyumu sağlamıştır. Ancak, genel olarak Lewis modeli diğer modellere kıyasla daha düşük uyum katsayılarına sahiptir ve bu nedenle daha az tercih edilebilir. Her bir model için en uygun kurutma yöntemi, uyum katsayıları ve hata değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Wang ve Singh modeli, özellikle KK yöntemiyle en yüksek uyumu sağlamış ve iki parametrelili yapısıyla öne çıkmıştır. Bununla birlikte, Midilli ve Küçük modeli, tüm yöntemlerde yüksek uyum katsayıları ve düşük hata değerleriyle dikkat çekmiştir.



Çizelge 4.10. Altı farklı yöntemle 60°C’de kurutulan elma dilimlerinden elde edilen nem oranı değerlerine ait deneysel bulguların doğrusal olmayan regresyon analizi ile teorik ince tabaka kuruma modellerine uyumu (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Model	Kurutma Yöntemi	Sabitler	R ²	Düzeltilmiş R ²	RMSE	χ^2
Henderson-Pabis	KK	a=1,055; k=0,206	0,9858	0,9846	0,0087	0,0031
	Vİ+KK	a=1,024; k=0,204	0,9953	0,9950	0,0042	0,0018
	AOK+KK	a=1,035; k=0,274	0,9915	0,9905	0,0080	0,0036
	Vİ+AOK+KK	a=1,034; k=0,255	0,9944	0,9937	0,0059	0,0025
	VOK+KK	a=1,043; k=0,261	0,9873	0,9858	0,0094	0,0044
	Vİ+VOK+KK	a=1,025; k=0,279	0,9924	0,9914	0,0078	0,0038
Logaritmik	KK	a=1,208; k=0,141; c=-0,101	0,9989	0,9986	0,0023	0,0009
	Vİ+KK	a=1,073; k=0,176; c=-0,065	0,9978	0,9978	0,0030	0,0012
	AOK+KK	a=1,159; k=0,203; c=-1,502	0,9910	0,9988	0,0028	0,0013
	Vİ+AOK+KK	a=1,090; k=0,218; c=-0,072	0,9969	0,9961	0,0046	0,0020
	VOK+KK	a=1,217; k=0,179; c=-0,205	0,9978	0,9972	0,0042	0,0019
	Vİ+VOK+KK	a=1,173; k=0,202; c=-0,172	0,9995	0,9994	0,0021	0,0010
Jena-Das	KK	h=0,507; j=0,602; k=1,026; m=0,029	0,9858	0,9816	0,0084	0,0034
	Vİ+KK	h=0,506; j=0,603; k=1,010; m=0,014	0,9953	0,9939	0,0050	0,0020
	AOK+KK	h=0,541; j=0,534; k=1,016; m=0,018	0,9915	0,9873	0,0092	0,0041
	Vİ+AOK+KK	h=0,531; j=0,553; k=1,015; m=0,018	0,9944	0,9919	0,0067	0,0029
	VOK+KK	h=0,535; j=0,546; k=1,021; m=0,022	0,9873	0,9810	0,0109	0,0050
	Vİ+VOK+KK	h=0,544; j=0,529; k=1,012; m=0,013	0,9924	0,9879	0,0092	0,0045
Midilli ve Küçük	KK	h=0,996; j=0,128; k=1,177; m=-0,005	0,9998	0,9997	0,0010	0,0004
	Vİ+KK	h=0,998; j=0,153; k=1,146; m=-0,000	0,9987	0,9983	0,0024	0,0010
	AOK+KK	h=0,997; j=0,201; k=1,134; m=-0,005	0,9997	0,9995	0,0019	0,0008
	Vİ+AOK+KK	h=0,996; j=0,186; k=1,208; m=0,002	0,9991	0,9987	0,0027	0,0012
	VOK+KK	h=0,995; j=0,175; k=1,187; m=-0,005	0,9989	0,9984	0,0008	0,0004
	Vİ+VOK+KK	h=0,997; j=0,220; k=1,052; m=-0,010	0,9995	0,9992	0,0021	0,0010
Wang ve Singh	KK	h=0,005; k=-0,145	0,9999	0,9999	0,0007	0,0003
	Vİ+KK	h=0,007; k=-0,155	0,9986	0,9985	0,0023	0,0009
	AOK+KK	h=0,011; k=-0,202	0,9997	0,9997	0,0015	0,0007
	Vİ+AOK+KK	h=0,010; k=-0,194	0,9985	0,9983	0,0031	0,0013
	VOK+KK	h=0,010; k=-0,191	0,9993	0,9992	0,0023	0,0011
	Vİ+VOK+KK	h=0,012; k=-0,211	0,9991	0,9990	0,0026	0,0013
Page	KK	n=1,278; k=0,120	0,9981	0,9979	0,0028	0,0011
	Vİ+KK	n=1,125; k=0,160	0,9985	0,9984	0,0024	0,0010
	AOK+KK	n=1,205; k=0,197	0,9989	0,9988	0,0028	0,0013
	Vİ+AOK+KK	n=1,163; k=0,193	0,9989	0,9988	0,0026	0,0011
	VOK+KK	n=1,256; k=0,171	0,9982	0,9980	0,0036	0,0017
	Vİ+VOK+KK	n=1,171; k=0,215	0,9981	0,9978	0,0039	0,0019
Lewis	KK	k=0,195	0,9816	0,9816	0,0084	0,0034
	Vİ+KK	k=0,200	0,9945	0,9945	0,0044	0,0018
	AOK+KK	k=0,265	0,9896	0,9896	0,0083	0,0037
	Vİ+AOK+KK	k=0,247	0,9926	0,9926	0,0064	0,0028
	VOK+KK	k=0,250	0,9843	0,9843	0,0099	0,0046
	Vİ+VOK+KK	k=0,272	0,9913	0,9913	0,0078	0,0038

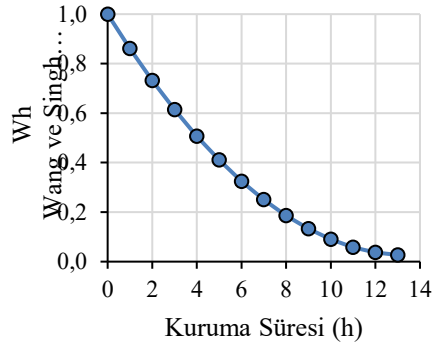
Farklı kurutma yöntemleriyle 60°C sıcaklıkta gerçekleştirilen kurutma işlemlerinde her bir yöntem için en iyi modelin seçilmesinde yalnızca uyum katsayıları (R² ve düzeltilmiş R²) ve hata değerleri (RMSE ve χ^2) dikkate alındığında, KK yöntemi için Wang ve Singh modelinin uygun olduğu görülmektedir. Bu model, en yüksek R² (0,9999) ve en düşük RMSE (0,0007) ile χ^2 (0,0003) değerlerine sahiptir. Benzer şekilde, Wang ve Singh modelinin en iyi sonuç verdiği yöntem Vİ+KK olmuştur (R²=0,9991; RMSE=0,0019; χ^2 =0,0008). Aynı şekilde, AOK+KK yönteminde de Wang ve Singh

modeli ($R^2=0,9997$; $RMSE=0,0015$; $\chi^2=0,0007$) en uygun model olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, $\dot{V}I+AOK+KK$ kombinasyonu için Page modeli ($R^2=0,9989$; $RMSE=0,0026$; $\chi^2=0,0011$) en iyi performansı gösterirken, $VOK+KK$ yöntemi için yine Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9993$; $RMSE=0,0023$; $\chi^2=0,0011$) uygun model olarak belirlenmiştir. Son olarak, $\dot{V}I+VOK+KK$ yöntemi için en iyi sonuçları veren model Logaritmik modeli olmuştur ($R^2=0,9995$; $RMSE=0,0021$; $\chi^2=0,0010$).

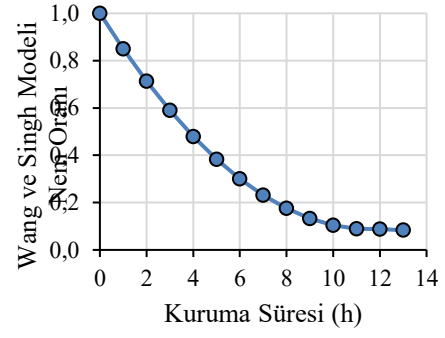
Her bir kurutma yöntemi için en iyi modelin seçilmesinde yalnızca uyum katsayıları (R^2 ve düzeltilmiş R^2) ve hata değerleri ($RMSE$ ve χ^2) değil, aynı zamanda modellerin parametre sayısı dikkate alındığında ise KK yöntemi için en yüksek uyum katsayısı Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9999$, $RMSE=0,0007$) ile elde edilmiştir. Yalnızca iki parametreye sahip olan bu model, diğer modellere kıyasla daha sade bir yapıdadır ve en iyi seçim olarak öne çıkmaktadır. Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9998$, $RMSE=0,0010$) de oldukça yüksek uyum sağlamış olsa da dört parametreye sahip olması nedeniyle ikinci sırada değerlendirilebilir. Lewis modeli ise düşük uyum katsayısı ($R^2=0,9816$) ile bu yöntem için en zayıf performansı göstermiştir. Elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik değerinin artırılması hedeflenen $\dot{V}I$ işleminin KK yöntemine eklenmesiyle ($\dot{V}I+KK$) modellerin uyumu artmış ve hata değerleri azalmıştır. Bu yöntem için de en iyi performansı Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9986$, $RMSE=0,0023$) göstermiştir. İki parametrelili yapısı nedeniyle bu model, diğer modellere göre daha avantajlıdır. Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9987$, $RMSE=0,0024$) ise yüksek uyum katsayısına rağmen dört parametrelili olması nedeniyle ikinci sırada yer almıştır. Logaritmik model ($R^2=0,9978$) de iyi bir performans sergilese de üç parametrelili yapısı nedeniyle daha az tercih edilebilir. Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işleminin KK ile kombinasyonunda ($AOK+KK$), en iyi uyum katsayısı yine Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9997$, $RMSE=0,0015$) ile elde edilmiştir. İki parametrelili yapısı sayesinde bu model, diğer modellere göre daha sade ve etkili bir seçimdir. Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9997$, $RMSE=0,0019$) benzer uyum katsayıları sağlamış olsa da dört parametrelili olması nedeniyle ikinci sırada yer almıştır. Logaritmik model ($R^2=0,9910$) ve Lewis modeli ($R^2=0,9896$) ise daha düşük uyum katsayılarıyla bu yöntem için daha az uygun modellerdir. $\dot{V}I+AOK+KK$ kombinasyonu içeren yöntemde de en iyi performansı Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9985$, $RMSE=0,0031$) göstermiştir. İki parametrelili yapısı, bu modeli diğerlerine göre daha avantajlı hale getirmiştir. Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9991$, $RMSE=0,0027$) daha yüksek uyum katsayısına sahip olsa da dört parametrelili olması nedeniyle ikinci sırada yer almıştır. Logaritmik model ($R^2=0,9969$) ve Lewis

modeli ($R^2=0,9926$) ise daha düşük uyum katsayıları ve daha fazla parametreye sahip olmaları nedeniyle daha az tercih edilebilir. Ohmik ısıtım ön kurutmanın vakum altında gerçekleştirilmesini takiben yapılan KK yöntemi (VOK+KK) için en iyi uyum katsayısı Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9993$, $RMSE=0,0023$) ile elde edilmiştir. İki parametrelili yapısı, bu modeli en uygun seçenek haline getirmiştir. Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9989$, $RMSE=0,0008$) ise benzer uyum katsayılarına rağmen dört parametrelili olması nedeniyle ikinci sırada yer almıştır. Lewis modeli ($R^2=0,9843$) ise düşük uyum katsayısı nedeniyle bu yöntem için en zayıf performansı göstermiştir. $V\dot{I}+VOK+KK$ yönteminde, Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9991$, $RMSE=0,0026$) iki parametrelili yapısıyla en uygun model olarak öne çıkmıştır. Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9995$, $RMSE=0,0021$) daha yüksek uyum katsayısına sahip olsa da dört parametrelili olması nedeniyle ikinci sırada yer almıştır. Logaritmik model ($R^2=0,9995$) de iyi bir performans sergilese de üç parametrelili yapısı nedeniyle daha az tercih edilebilir. Lewis modeli ($R^2=0,9913$) ise bu yöntem için en düşük uyumu göstermiştir. Genel olarak, her bir kurutma yöntemi için en iyi model seçimi yapılırken, uyum katsayılarının yanı sıra parametre sayısı da dikkate alındığında, $60^\circ C$ sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinde tüm yöntemler için Wang ve Singh modeli, iki parametrelili yapısı ve yüksek uyum katsayılarıyla en uygun model olarak öne çıkmıştır. Midilli ve Küçük modeli, yüksek uyum katsayıları sağlamasına rağmen dört parametrelili yapısı nedeniyle ikinci sırada yer almıştır. Kurutma yöntemleri açısından ise $V\dot{I}+VOK+KK$ yöntemi, modellerin uyumunu artırarak ve hata değerlerini düşürerek en etkili kombinasyon olarak değerlendirilmiştir.

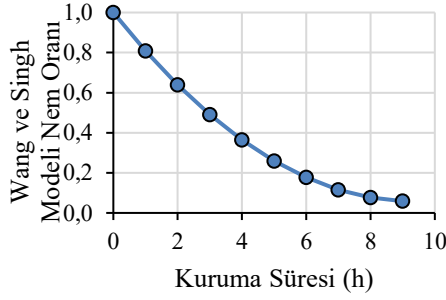
Farklı kurutma yöntemiyle elma dilimlerinin $60^\circ C$ sıcaklıkta kurutulmasına ait deneysel veriler kullanılarak belirlenen en iyi ince tabaka kuruma modelleri Şekil 4.9'da verilmiştir. KK (Şekil 4.9a), $V\dot{I}+KK$ (Şekil 4.9b), AOK+KK (Şekil 4.9c) ve VOK+KK (Şekil 4.9e) yöntemleri için Wang ve Singh modeli en iyi uyum gösterirken, $V\dot{I}+AOK+KK$ (Şekil 4.9d) yöntemi için Page modeli ve $V\dot{I}+VOK+KK$ (Şekil 4.9f) yöntemi için logaritmik model yüksek uyum göstermiştir.



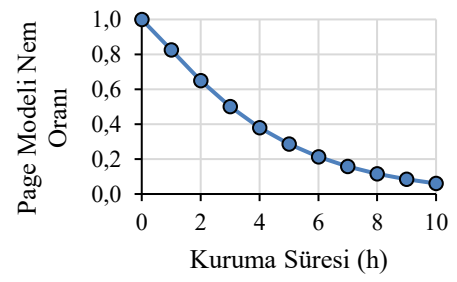
(a)



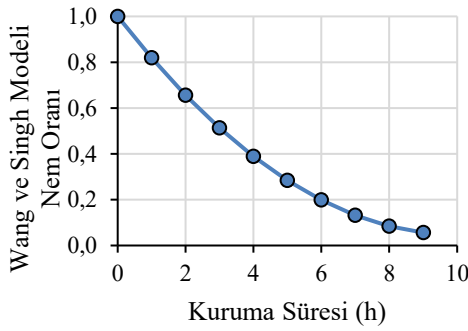
(b)



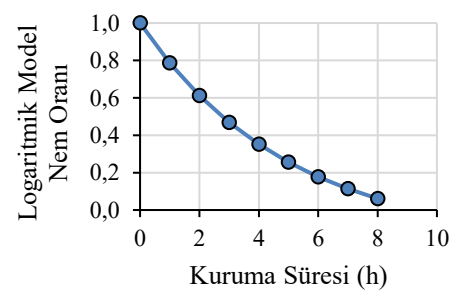
(c)



(d)



(e)



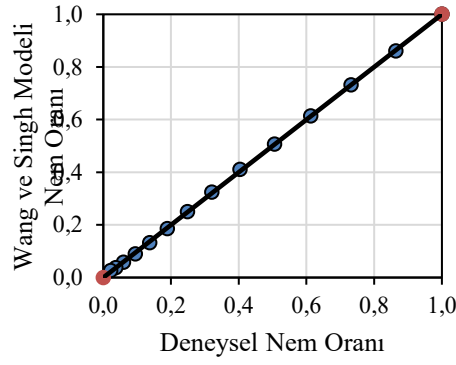
(f)

Şekil 4.9. Farklı yöntemlerle 60°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları zamana bağlı olarak değişimi: (a) Konveksiyonel kurutma yöntemi (KK), (b) Elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin (Vİ) KK yöntemiyle kurutma (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı sistemle ön kurutma (AOK) sonrasında KK yöntemi (AOK+KK), (d) Elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin (Vİ) AOK ve KK yöntemleriyle kurutma (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtılmalı sistemle ön kurutma (VOK) sonrasında KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi

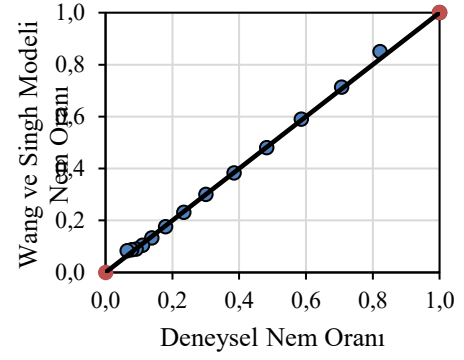
Farklı kurutma yöntemiyle elma dilimlerinin 60°C sıcaklıkta kurutulmasına ait deneysel nem oranlarıyla, belirlenen en iyi ince tabaka kuruma modeline ait nem oranları arasındaki uyum eğrileri Şekil 4.10'da verilmiştir. KK (Şekil 4.10a), Vİ+KK (Şekil 4.10b), AOK+KK (Şekil 4.10c) ve VOK+KK (Şekil 4.10e) yöntemleri için Wang ve

Singh modeli en iyi uyum gösterirken, $V\dot{I}+AOK+KK$ (Şekil 4.10d) yöntemi için Page modeli ve $V\dot{I}+VOK+KK$ (Şekil 4.10f) yöntemi için logaritmik model yüksek uyum göstermiştir.

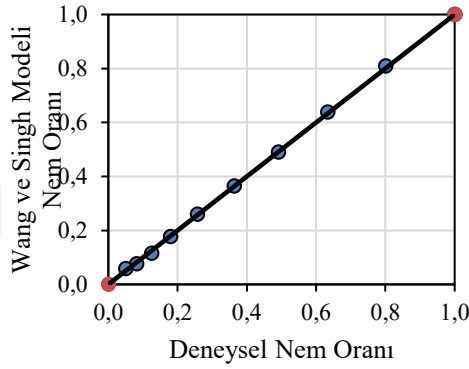




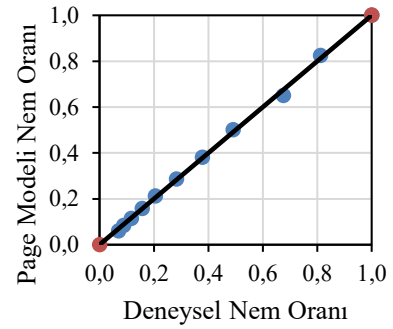
(a)



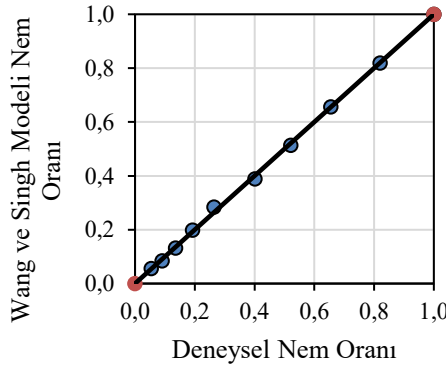
(b)



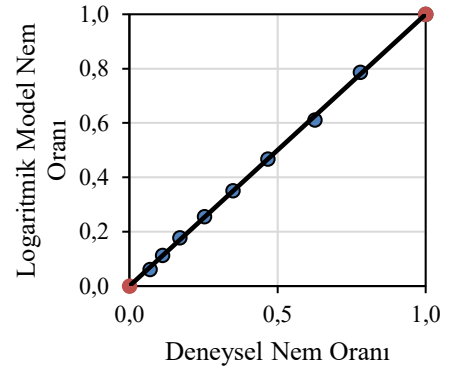
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.10. Farklı yöntemle 60°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları ile deneyisel nem oranı arasındaki uyum: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı sistemle ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi

Altı farklı kurutma yöntemiyle 70°C sıcaklıkta elma dilimlerinin kurutulması sırasında elde edilen nem oranı değerlerinin zamana bağlı değişimini içeren deneysel veriler, doğrusal olmayan regresyon analizi ile sekiz ayrı ince tabaka kuruma modeline uygulanmış ve model katsayıları ile uyum bulguları Çizelge 4.11’de sunulmuştur. Her bir model ayrı ayrı değerlendirildiğinde, Henderson ve Pabis modeli için en uygun kurutma yöntemi $V\dot{I}+AOK+KK$ olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9982$ ve $RMSE=0,0047$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlamış ve düşük hata değerleri ($\chi^2=0,0012$) elde etmiştir. Bu sonuçlar, modelin bu yöntemde oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Logaritmik model için en uygun kurutma yöntemi, $VOK+KK$ olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9989$ ve $RMSE=0,0040$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlamış ve düşük hata değerleri ($\chi^2=0,0019$) elde edilmiştir. Üç parametrelili yapısı sayesinde model, bu yöntemde oldukça etkili bir performans sergilemiştir. Jena-Das modeli için en uygun kurutma yöntemi, $V\dot{I}+AOK+KK$ olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9982$ ve $RMSE=0,0057$ değerleriyle en iyi performansı göstermiştir. Dört parametrelili yapısına rağmen, bu yöntemdeki uyum katsayıları ve hata değerleri modelin etkili olduğunu göstermektedir. Midilli ve Küçük modeli için en uygun kurutma yöntemi, $V\dot{I}+AOK+KK$ olmuştur. Bu yöntemle model, $R^2=0,9999$ ve $RMSE=0,0015$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlamış ve en düşük hata değerlerini elde etmiştir. Modelin dört parametrelili yapısına rağmen, bu yöntemdeki yüksek doğruluğu ve geniş uygulama alanını desteklemiştir. Wang ve Singh modeli için en uygun kurutma yöntemi KK olmuştur. İki parametrelili yapısı sayesinde model, $R^2=0,9998$ ve $RMSE=0,0012$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlamış ve en düşük hata değerlerini elde ederek oldukça etkili bir performans sergilemiştir. İki parametrelili Page modeli için en uygun kurutma yöntemi ise $V\dot{I}+KK$ olmuş ve model, $R^2=0,9995$ ve $RMSE=0,0019$ değerleriyle en iyi performansı göstermiştir. Diğer modellere kıyasla genellikle daha düşük uyum katsayılarına sahip olan Lewis modeli için en uygun kurutma yöntemi, $V\dot{I}+AOK+KK$ olmuş ve bu yöntemle model, $R^2=0,9979$ ve $RMSE=0,0047$ değerleriyle en iyi uyumu sağlamıştır. Genel olarak, 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için Midilli ve Küçük modeli, özellikle $V\dot{I}+AOK+KK$ yöntemi ile en yüksek uyumu sağlamış ve en düşük hata değerlerini elde etmiştir. Bununla birlikte, Wang ve Singh modeli, iki parametrelili yapısı ve yüksek uyum katsayılarıyla KK yöntemiyle öne çıkmıştır.

Çizelge 4.11. Altı farklı yöntemle 70°C’de kurutulan elma dilimlerinden elde edilen nem oranı değerlerine ait deneysel bulguların doğrusal olmayan regresyon analizi ile teorik ince tabaka kuruma modellerine uyumu (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtım ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Model	Kurutma Yöntemi	Sabitler	R ²	Düzeltilmiş R ²	RMSE	χ ²
Henderson-Pabis	KK	a=1,051; k=0,304	0,9850	0,9831	0,0089	0,0049
	Vİ+KK	a=1,037; k=0,284	0,9938	0,9931	0,0069	0,0027
	AOK+KK	a=1,022; k=0,378	0,9912	0,9898	0,0111	0,0049
	Vİ+AOK+KK	a=1,013; k=0,359	0,9982	0,9979	0,0047	0,0012
	VOK+KK	a=1,030; k=0,347	0,9991	0,9897	0,0106	0,0050
	Vİ+VOK+KK	a=1,017; k=0,358	0,9963	0,9957	0,0069	0,0031
Logaritmik	KK	a=1,189; k=0,216; c=-0,169	0,9968	0,9959	0,0049	0,0024
	Vİ+KK	a=1,091; k=0,241; c=-0,072	0,9972	0,9965	0,0035	0,0014
	AOK+KK	a=1,045; k=0,352; c=-0,030	0,9918	0,9885	0,0117	0,0052
	Vİ+AOK+KK	a=1,022; k=0,351; c=-0,011	0,9983	0,9976	0,0050	0,0013
	VOK+KK	a=1,164; k=0,255; c=-0,157	0,9989	0,9985	0,0040	0,0019
	Vİ+VOK+KK	a=1,073; k=0,308; c=-0,068	0,9985	0,9979	0,0048	0,0022
Jena-Das	KK	h=0,556; j=0,504; k=1,023; m=0,027	0,9850	0,9775	0,0115	0,0057
	Vİ+KK	h=0,546; j=0,524; k=1,016; m=0,020	0,9938	0,9911	0,0078	0,0031
	AOK+KK	h=0,593; j=0,430; k=1,009; m=0,012	0,9912	0,9847	0,0135	0,0060
	Vİ+AOK+KK	h=0,584; j=0,449; k=1,005; m=0,008	0,9982	0,9969	0,0057	0,0015
	VOK+KK	h=0,577; j=0,461; k=1,014; m=0,116	0,9911	0,9845	0,0130	0,0061
	Vİ+VOK+KK	h=0,583; j=0,450; k=1,008; m=0,010	0,9963	0,9936	0,0085	0,0039
Midilli & Küçük	KK	h=0,995; j=0,192; k=1,254; m=-0,003	0,9994	0,9990	0,0024	0,0012
	Vİ+KK	h=0,996; j=0,204; k=1,214; m=0,001	0,9996	0,9994	0,0020	0,0008
	AOK+KK	h=0,995; j=0,301; k=1,270; m=0,008	0,9962	0,9933	0,0090	0,0040
	Vİ+AOK+KK	h=0,999; j=0,321; k=1,156; m=0,006	0,9999	0,9998	0,0015	0,0004
	VOK+KK	h=0,998; j=0,263; k=1,138; m=-0,006	0,9996	0,9992	0,0029	0,0014
	Vİ+VOK+KK	h=0,998; j=0,306; k=1,101; m=-0,001	0,9989	0,9981	0,0046	0,0021
Wang ve Singh	KK	h=0,012; k=-0,215	0,9998	0,9997	0,0012	0,0006
	Vİ+KK	h=0,012; k=-0,209	0,9994	0,9993	0,0022	0,0009
	AOK+KK	h=0,024; k=-0,295	0,9992	0,9901	0,0033	0,0015
	Vİ+AOK+KK	h=0,023; k=-0,285	0,9986	0,9983	0,0042	0,0011
	VOK+KK	h=0,018; k=-0,257	0,9997	0,9996	0,0020	0,0009
	Vİ+VOK+KK	h=0,021; k=-0,275	0,9980	0,9976	0,0051	0,0023
Page	KK	n=1,307; k=0,189	0,9988	0,9986	0,0028	0,0014
	Vİ+KK	n=1,188; k=0,209	0,9995	0,9995	0,0019	0,0008
	AOK+KK	n=1,136; k=0,317	0,9942	0,9933	0,0084	0,0040
	Vİ+AOK+KK	n=1,066; k=0,329	0,9990	0,9988	0,0036	0,0010
	VOK+KK	n=1,214; k=0,260	0,9989	0,9987	0,0038	0,0018
	Vİ+VOK+KK	n=1,118; k=0,307	0,9989	0,9987	0,0038	0,0017
Lewis	KK	k=0,290	0,9814	0,9814	0,0104	0,0052
	Vİ+KK	k=0,274	0,9919	0,9919	0,0074	0,0029
	AOK+KK	k=0,370	0,9905	0,9905	0,0107	0,0048
	Vİ+AOK+KK	k=0,355	0,9979	0,9979	0,0047	0,0012
	VOK+KK	k=0,337	0,9896	0,9896	0,0107	0,0050
	Vİ+VOK+KK	k=0,352	0,9958	0,9958	0,0068	0,0031

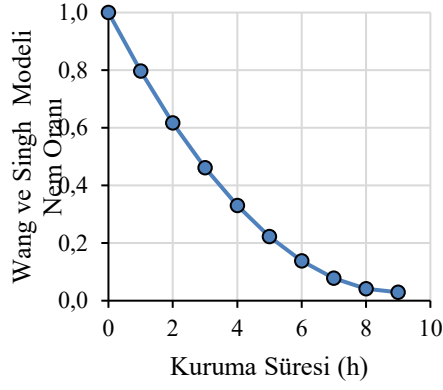
Farklı kurutma yöntemleriyle 70°C sıcaklıkta gerçekleştirilen kurutma işlemlerinde her bir yöntem için en iyi modelin seçilmesinde yalnızca uyum katsayıları (R² ve düzeltilmiş R²) ve hata değerleri (RMSE ve χ²) dikkate alındığında, KK yöntemi için en uygun Wang ve Singh modeli olurken, bu model, en yüksek R² (0,9998) ve en düşük RMSE (0,0012) ile χ² (0,0006) değerlerine sahip olmuştur. Benzer şekilde, Vİ+KK

yöntemi için en uygun model Page modeli ($R^2=0,9995$; $RMSE=0,0019$; $\chi^2=0,0008$) olurken, AOK+KK yönteminde Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9999$; $RMSE=0,0015$; $\chi^2=0,0014$) en uygun model olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, Vİ+AOK+KK yöntemi için Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9999$; $RMSE=0,0015$; $\chi^2=0,004$) en iyi performansı sergilerken, VOK+KK yöntemi için yine Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9997$; $RMSE=0,0020$; $\chi^2=0,0009$) uygun model olarak belirlenmiştir. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemi için Page modeli en uyumlu model olmuştur ($R^2=0,9998$; $RMSE=0,0039$; $\chi^2=0,0017$). Bu modellerin, değişken verilerle yüksek uyum sergilemesi, kullanılan kurutma yöntemlerinin nem giderme işleminin etkin bir şekilde modellendiğini göstermektedir.

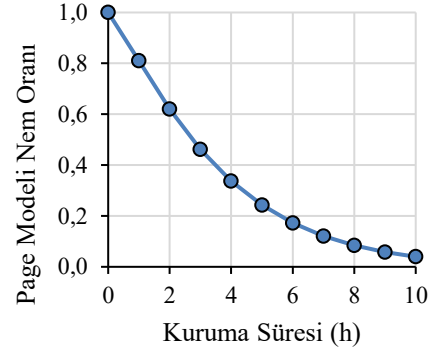
Her bir kurutma yöntemi için en iyi modelin seçilmesinde yalnızca uyum katsayıları (R^2 ve düzeltilmiş R^2) ve hata değerleri ($RMSE$ ve χ^2) değil, aynı zamanda modellerin parametre sayısı dikkate alındığında ise KK yöntemi için en iyi model, iki parametrelili yapısıyla Wang ve Singh modeli olmuş ve bu model, $R^2=0,9998$ ve $RMSE=0,0012$ değerleriyle en yüksek uyumu sağlayarak en düşük hata değerlerini elde etmiştir. Dört parametrelili Midilli ve Küçük modeli de oldukça yüksek uyum katsayıları ($R^2=0,9994$) sağlamış olsa da daha az parametreye sahip Wang ve Singh modeli tercih edilebilir. Vİ+KK yönteminde de en iyi model, iki parametrelili yapısıyla Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9994$ ve $RMSE=0,0022$) olmuştur. Page modeli benzer şekilde yüksek uyum katsayısı ($R^2=0,9995$) sağlamış olsa da hata değerleri Wang ve Singh modeline göre biraz daha yüksek belirlenmiştir. Dört parametrelili Midilli ve Küçük modeli, daha karmaşık yapısına rağmen benzer sonuçlar verebilmiştir. AOK+KK yönteminde en iyi model yine iki parametrelili Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9992$ ve $RMSE=0,0033$) olmuştur. Dört parametrelili Midilli ve Küçük modeli, $R^2=0,9962$ ile yüksek uyum katsayısı sağlamış olsa da daha fazla parametreye sahiptir. Vİ+AOK+KK yönteminde en iyi model, dört parametrelili yapısına rağmen Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9999$ ve $RMSE=0,0015$) olmuştur. Ancak, daha az parametrelili modeller arasında Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9986$, $RMSE=0,0042$) de oldukça başarılı bir performans sergilemiştir. VOK+KK yönteminde en iyi model, Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9997$ ve $RMSE=0,0020$) olmuştur. Midilli ve Küçük modeli de oldukça yüksek uyum katsayıları ($R^2=0,9996$) sağlamış olsa da daha az parametreye sahip Wang ve Singh modeli tercih edilebilir. Vİ+VOK+KK yönteminde en iyi model, Wang ve Singh modeli ($R^2=0,9980$ ve $RMSE=0,0051$) olmuştur. Dört parametrelili Midilli ve Küçük modeli ($R^2=0,9989$, $RMSE=0,0046$) ise daha karmaşık yapısına rağmen benzer sonuçlar vermiştir. Genel

olarak, parametre sayısı göz önüne alındığında, Wang ve Singh modeli, iki parametrelili yapısıyla tüm kurutma yöntemlerinde yüksek uyum katsayıları ve düşük hata değerleri sağlamış, bu nedenle en iyi model olarak öne çıkmıştır. Ancak, bazı durumlarda dört parametrelili Midilli ve Küçük modeli, özellikle VI+AOK+KK yöntemiyle en yüksek uyumu sağlamış ve en düşük hata değerlerini elde etmiştir. Daha az parametrelili modellerle benzer sonuçlar elde edilebildiği durumlarda, Wang ve Singh modeli gibi daha sade yapılar tercih edilebilir.

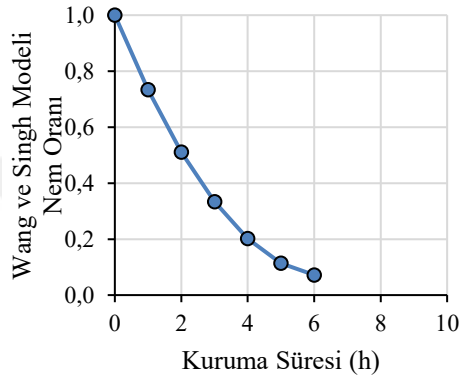
Farklı kurutma yöntemiyle elma dilimlerinin 70°C sıcaklıkta kurutulmasına ait deneysel veriler kullanılarak belirlenen en iyi ince tabaka kuruma modelleri Şekil 4.11’da verilmiştir. KK (Şekil 4.11a), AOK+KK (Şekil 4.11c) ve VOK+KK (Şekil 4.1e) yöntemleri için Wang ve Singh modeli en iyi uyum gösterirken, VI+KK (Şekil 4.11b) ve VI+VOK+KK (Şekil 4.9f) yöntemleri için Page modeli ve VI+AOK+KK (Şekil 4.9d) yöntemi için Midilli ve Küçük modeli yüksek uyum göstermiştir.



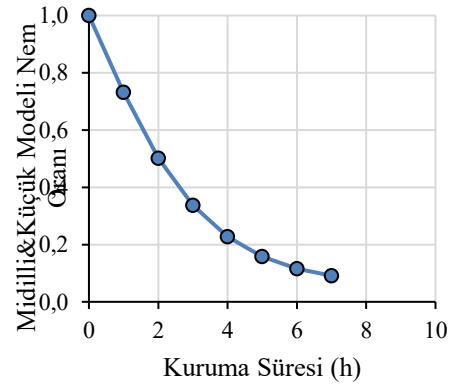
(a)



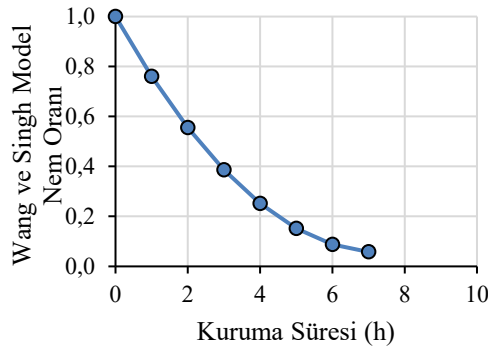
(b)



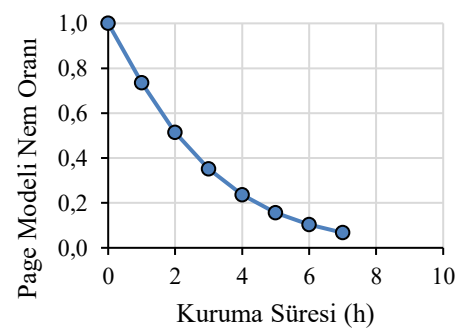
(c)



(d)



(e)

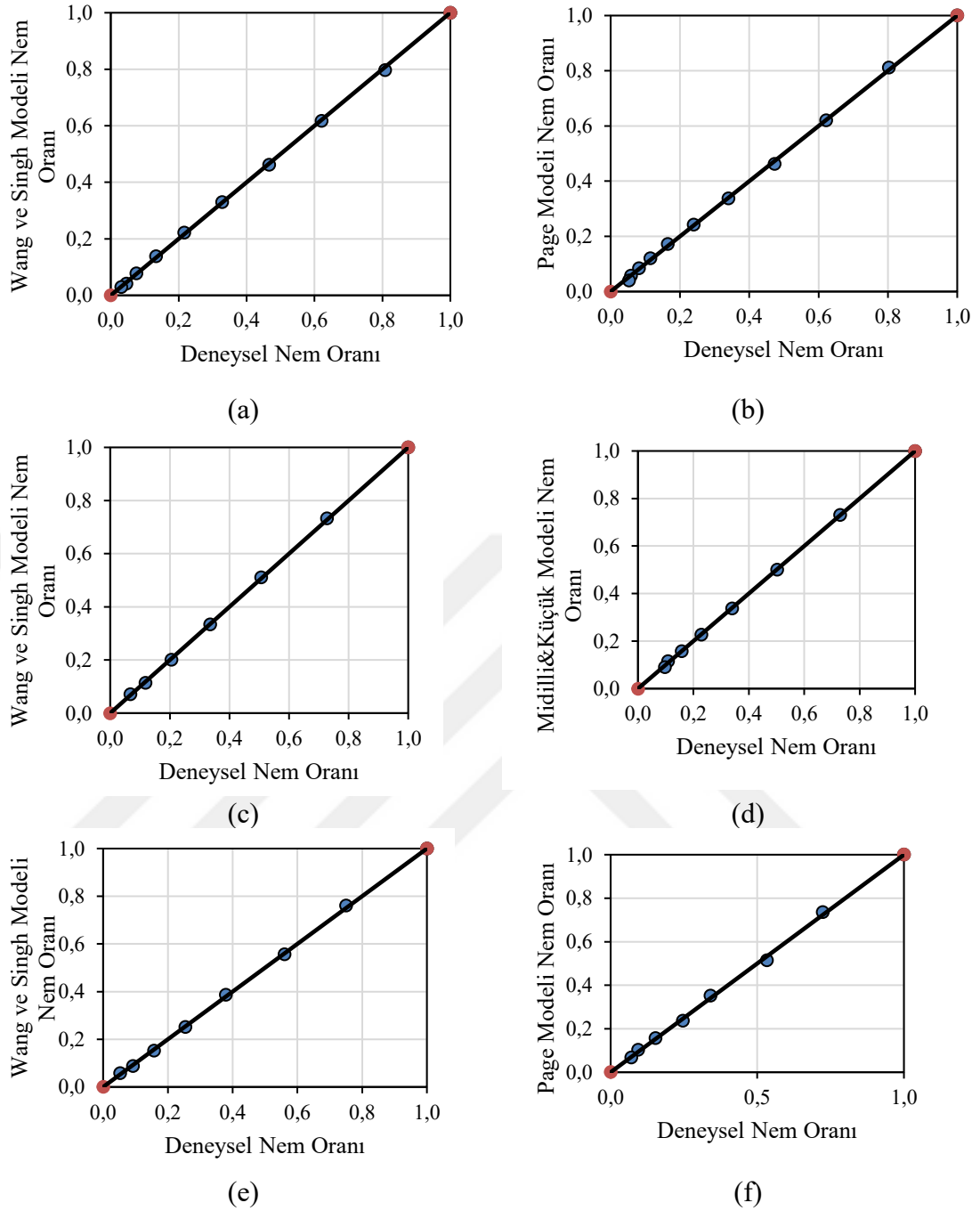


(f)

Şekil 4.11. Farklı yöntemlerle 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları zamana bağlı olarak değişimi: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı sistemle ön kurutma (AOK) işlemi takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtılmalı sistemle ön kurutma (VOK) işlemi takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi

Farklı kurutma yöntemiyle elma dilimlerinin 70°C sıcaklıkta kurutulmasına ait deneysel nem oranlarıyla, belirlenen en iyi ince tabaka kuruma modeline ait nem oranları arasındaki uyum eğrileri Şekil 4.12’da verilmiştir. KK (Şekil 4.12a), AOK+KK (Şekil 4.12c) ve VOK+KK (Şekil 4.2e) yöntemleri için Wang ve Singh modeli en iyi uyum gösterirken, Vİ+KK (Şekil 4.12b) ve Vİ+VOK+KK (Şekil 4.12f) yöntemleri için Page modeli ve Vİ+AOK+KK (Şekil 4.12d) yöntemi için Midilli ve Küçük modeli yüksek uyum göstermiştir.





Şekil 4.12. Farklı yöntemlerle 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için belirlenen en uygun modele ait nem oranları ile deneysel nem oranı arasındaki uyum: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliği vakum impregnasyon (Vİ) işlemiyle maksimize edilmiş elma dilimlerinin KK yöntemiyle kurutulması (Vİ+KK), (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım sistemle ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK yöntemi (AOK+KK), (d) Vİ işlemiyle elektriksel iletkenliği maksimize edilmiş elma dilimlerinin AOK ve KK yöntemleriyle kurutulması (Vİ+AOK+KK), (e) Vakum altında ohmik ısıtım sistemle ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK yöntemi (VOK+KK) ve (f) Vİ+VOK+KK yöntemi

Literatürde yapılan çeşitli kurutma kinetiği çalışmalarında, farklı ürünler ve kurutma yöntemleri karşılaştırılmıştır. Örneğin, Doymaz (2004) tarafından yapılan bir araştırmada, havuç örnekleri önce 100°C’de 5 dakika süreyle haşlanmış ve ardından 15 °C’de 5 dakika boyunca soğutulmuştur. Bu ön işlemlerden sonra örnekler, bir kabin kurutucuda 50, 60, 65 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulmuş ve deneysel veriler çeşitli ince tabaka kurutma modelleriyle modellenerek örneklerin kuruma davranışları analiz edilmiştir. Bulgular, Page ve Modifiye Page modellerinin deneysel verilere en iyi uyumu gösterdiği ortaya konmuştur. Benzer şekilde, Demiray ve Tülek (2012) kabin kurutucuda 60, 70, 80, 90 ve 100°C’de kuruttukları domates dilimlerinin kuruma davranışını farklı ince tabaka kurutma modelleriyle incelemişler ve Page ve Modifiye Page modellerinin en uygun modeller olduğu rapor etmişlerdir. Kabin kurutucuda 55, 65 ve 75°C’de kurutulan sarımsak örneklerinin kuruma davranışını inceleyen Demiray ve Tülek (2014) Page ve Modifiye Page modelinin en uygun model olduğunu bildirmişlerdir. Gür (2016), 50, 60 ve 70°C’de akışkan yataklı kurutucuda kuruttukları bal kabağının kurutma karakteristiğini inceledikleri çalışmalarında kuruma verilerinin matematiksel olarak modellenmesinde Lewis, Henderson-Pabis, Page ve logaritmik ince tabaka kurutma modellerini kullanmışlardır. Tüm sıcaklıklarda Page modelinin en uygun model olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmalar, Page modelinin kurutma kinetiğinin modellenmesinde geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir.

Kurutma kinetiği üzerine yapılan çalışmalar, farklı ürünler ve koşullar altında en uygun matematiksel modellerin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Aksüt vd. (2023a), mor reyhanın kurutma kinetiğini inceledikleri çalışmalarında, 50°C ve %50 bağıl nem koşullarında Midilli ve Küçük modelinin en yüksek uyumu sağlayan model olduğunu $R^2=0.9997$ değeriyle tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, Taşova (2018), patlıcanın kurutma kinetiğini incelediği çalışmada Midilli ve Küçük ile Yağcıoğlu modellerini karşılaştırmış ve tüm kurutma modelleri arasında en yüksek R^2 değerinin Midilli ve Küçük modelinde olduğunu saptamıştır. Ayrıca, Aksüt vd. (2023b), 50, 60 ve 70°C’de mikrodalga kurutucuda kuruttukları limon dilimlerinin kurutma kinetiğinin matematiksel modellenmesini inceledikleri çalışmalarında da en uygun modelin yine Midilli ve Küçük modeli olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışmalar, Midilli ve Küçük modelinin farklı ürünlerin kurutma kinetiğini modellemede yüksek uyum sağladığını göstermektedir.

Kurutma kinetiği üzerine yapılan çalışmalar, farklı ürünler ve kurutma yöntemleri için en uygun matematiksel modellerin belirlenmesine odaklanmaktadır. Literatürde,

kurutma havası sıcaklığı, hava hızı ve ürün kalınlığı gibi parametrelerin kuruma davranışını etkilediği ve bu davranışın matematiksel modellerle ifade edilebildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Bu doktora çalışmasında da literatürde yaygın olarak kullanılan kurutma kinetiği modelleri değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürle uyumlu bulunmuştur. Kaya ve Aydın (2008), konvektif kurutucuda kurutulan kızılcığın kuruma davranışını incelemiş ve İki Terimli Eksponansiyel ile Henderson ve Pabis modellerinin en uygun modeller olduğunu belirtmiştir. Çakmak vd. (2016), dağ çileği meyvelerinin kuruma kinetiğini incelemiş ve Page modelinin her iki kurutma yöntemi için en uygun model olduğunu tespit etmiştir. Benzer şekilde, Omolola vd. (2015), muz kurutma kinetiği üzerine yaptıkları çalışmada İki Terimli Model'in en uygun model olduğunu ifade etmişlerdir.

Domates kurutma çalışmasında, Demiray (2009), Modifiye Page modelinin en uygun model olduğunu belirtirken, Polatçı (2012), Japon eriği için Page modelinin en iyi sonuçları verdiğini rapor etmiştir. Erentürk ve Erentürk (2006), havuç kurutma çalışmalarında Yapay Sinir Ağları'nın en iyi sonucu verdiğini bildirmiştir. Karaaslan (2014), Trabzon hurması için Midilli ve Küçük modelinin diğer modellerden daha iyi sonuç verdiğini ifade etmiştir. Samadi vd. (2014) ise muz dilimlerinin kurutulmasında Midilli modelinin en uygun model olduğunu göstermiştir.

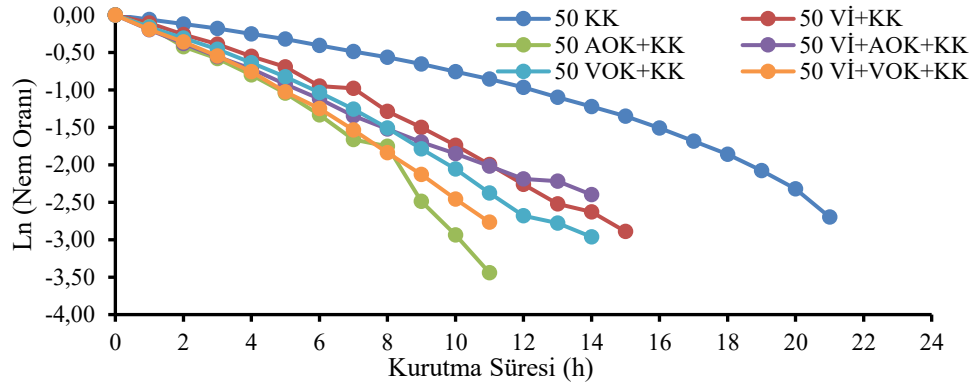
Elma kurutma çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Filiz vd. (2015) ile Velić vd. (2006), Midilli ve Küçük modelinin en uygun model olduğunu belirtmişlerdir. Polatçı vd. (2019), armut kurutma çalışmalarında Midilli-Küçük modelinin en iyi tahmin sonuçlarını verdiğini ifade etmişlerdir. Türkan (2020), muz dilimlerinin kurutulmasında Midilli-Küçük modelinin en uygun model olduğunu bildirmiştir. Dikbasan (2007), elma dilimlerinin kurutulmasında en yüksek R^2 ve en düşük RMSE değerleriyle Midilli ve Küçük modelinin en iyi sonuçları verdiğini rapor etmiştir.

Blanco-Cano vd. (2016), elma dilimlerinin dolaylı güneş ışığında kurutulmasında Wang ve Singh ile Midilli ve Küçük modellerinin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Jokić vd. (2009), Page modelinin elma dilimlerinin kurutulmasında en iyi sonuçları verdiğini ifade etmişlerdir. Vega-Galvèz vd. (2008), Modifiye Page modelinin en uygun model olduğunu saptamışlardır. Cruz vd. (2015), elma dilimlerinin kurutulmasında Henderson-Pabis ve Page modellerinin uygun olduğunu belirtmiştir. Karacaoğlu (2017), Newton ve Page modellerinin elma dilimlerinin kurutulmasında en iyi sonuçları verdiğini ifade etmiştir. Mengeş vd. (2005) ile İzli vd. (2017), Midilli-Küçük modelinin elma kurutma çalışmalarında en uygun model olduğunu bildirmişlerdir.

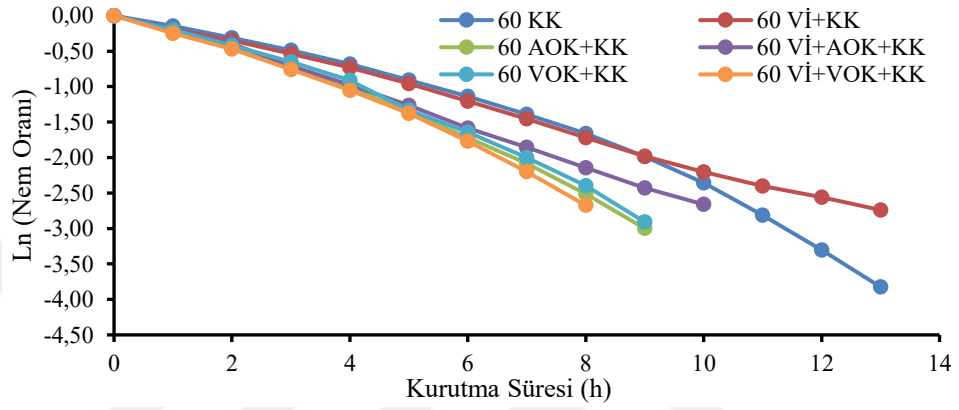
Bu doktora tez çalışmasında, literatürde en çok kullanılan kurutma kinetiği modelleri değerlendirilmiş ve her yöntem ile sıcaklık için uygun modeller belirlenmiştir. Logaritmik, Midilli & Küçük, Page ve Wang & Singh modelleri, çalışmada en uygun modeller olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, literatürdeki çalışmalarla uyum göstermektedir. Sonuç olarak, çalışmada elde edilen bulgular, farklı ürünler ve kurutma yöntemleri için matematiksel modelleme çalışmalarına katkı sağlamaktadır.

4.3.4. Efektif Difüzyon Katsayısı

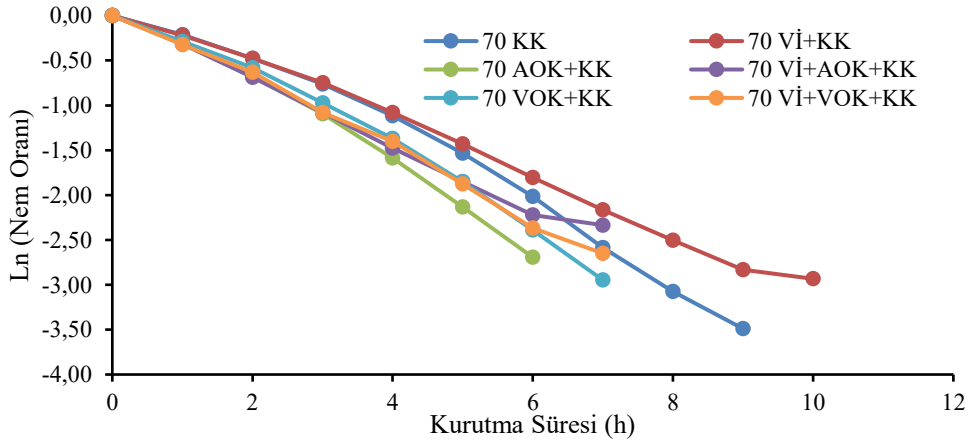
Farklı yöntemlerle 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerine ait nem oranlarının doğal logaritmalarının ($\ln$) zamana bağlı değişimi Şekil 4.13’te sunulmuştur. Genel olarak, kurutma sıcaklığı arttıkça (50°C’den 70°C’ye), tüm yöntemlerde nem oranları daha hızlı bir şekilde azalmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklıkların nemin daha hızlı uzaklaştırılmasıyla ilişkilidir. Ancak, kurutma yöntemleri arasında belirgin farklılıklar oluşmuştur. VOK+KK yöntemi, tüm sıcaklıklarda nem oranını en hızlı azaltan yöntem olarak öne çıkmıştır. Vakum ve ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinin birleşimi, nemin daha hızlı uzaklaştırılmasını sağlamış ve kurutma süresini önemli ölçüde kısaltmıştır. AOK+KK yöntemi, VOK+KK yöntemine kıyasla daha düşük bir hızda nem uzaklaştırmış olsa da geleneksel yöntemle göre daha etkili bulunmuştur. KK yöntemi, tüm sıcaklıklarda nem oranının en yavaş azaldığı yöntem olmuştur. Bu durum, geleneksel kurutma yönteminin diğer yöntemlere göre daha uzun sürede etkili olmasıyla açıklanabilir. Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini arttırmak amacıyla uygulanan Vİ işlemi, tüm yöntemlerde nem uzaklaştırma hızını artırmıştır. Özellikle VOK+KK ve AOK+KK yöntemleriyle kombine edildiğinde, nem oranı daha hızlı bir şekilde azalmıştır. Bununla birlikte, Vİ işleminin etkisi KK yöntemiyle kombine edildiğinde daha sınırlı kalmıştır. Sonuç olarak, kurutma sıcaklığı arttıkça nem uzaklaştırma hızı artmış, ancak yöntemler arasında VOK+KK yöntemi en etkili kurutma performansını göstermiştir. Vİ işlemi, özellikle ohmik ısıtmalı yöntemlerle kombine edildiğinde kurutma sürecini hızlandırmış ve nem oranını daha hızlı azaltmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.13. Altı farklı kurutma yöntemi ile (a) 50°C, (b) 60°C ve (c) 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin nem oranlarının doğal logaritmalarının (Ln) zamana bağlı değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerine ait D_{eff} ve E_a değerleri Çizelge 4.12’de verilmiştir. D_{eff} değeri, kurutma sırasında nemin ürün

içerisindeki hareket hızını ifade eder ve yüksek değerler, nemin daha hızlı difüze olduğunu gösterir (Doğantürk, 2016). Kurutma sırasında nemin difüzyonu için gereken enerji miktarını ifade eden E_a değerinin düşük olması, nemin daha kolay difüze olduğunu gösterir (Nizamlioğlu, 2022). Genel olarak, kurutma sıcaklığı arttıkça tüm yöntemlerde elma dilimlerine ait D_{eff} değerleri yükselmiştir. KK yöntemiyle 50°C’de kurutulan elma dilimleri $1,187 \times 10^{-8}$ m²/s ile en düşük D_{eff} değerine sahipken, 70°C’de bu değer $4,067 \times 10^{-8}$ m²/s’ye yükselmiştir. E_a değeri ise 54,20 kJ/mol ile en yüksek değerlerden biri olarak KK yöntemi için belirlenmiştir. Vİ+KK yöntemiyle 50°C’de kurutulan elma dilimleri $2,018 \times 10^{-8}$ m²/s ile daha yüksek bir D_{eff} değeri göstermiş ve bu yöntem için E_a değeri 20,72 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. AOK+KK yöntemiyle 50°C’de kurutulan elma dilimleri ise $3,051 \times 10^{-8}$ m²/s ile en yüksek D_{eff} değeri sağlamış ve bu yöntem için E_a değeri 10,48 kJ/mol ile en düşük değer olarak belirlenmiştir. Vİ+AOK+KK yöntemiyle 50 °C’de kurutulan elma dilimleri $1,780 \times 10^{-8}$ m²/s D_{eff} değerine sahipken, yönteme ait E_a değeri 31,73 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. VOK+KK yöntemiyle 50 °C’de kurutulan elma dilimlerinde D_{eff} değeri $2,269 \times 10^{-8}$ m²/s olarak belirlenirken, yöntemin E_a değeri 28,51 kJ/mol olmuştur. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemiyle 50°C’de kurutulan elma dilimlerinde $2,561 \times 10^{-8}$ m²/s D_{eff} değeri ve 19,72 kJ/mol E_a değeri belirlenmiştir. Genel olarak, AOK+KK yöntemi düşük E_a ve yüksek D_{eff} değeri ile öne çıkarken, KK yöntemi yüksek E_a ve düşük D_{eff} değeriyle diğer yöntemlere kıyasla daha az etkili bulunmuştur.

Çizelge 4.12. Altı farklı yöntemle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerine ait efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Kurutma Yöntemi	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Efektif Difüzyon Katsayısı ($\times 10^{-8}$) (m ² /s)	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
KK	50	1,187	54,20
	60	2,877	
	70	4,067	
Vİ+KK	50	2,018	20,72
	60	2,241	
	70	3,205	
AOK+KK	50	3,051	10,48
	60	3,350	
	70	3,852	
Vİ+AOK+KK	50	1,780	31,73
	60	2,797	
	70	3,592	
VOK+KK	50	2,269	28,51
	60	3,249	
	70	4,269	
Vİ+VOK+KK	50	2,561	19,72
	60	3,340	
	70	3,964	

Vakum impregnasyon işlemi hem D_{eff} hem de E_a değerlerini önemli ölçüde etkilemiştir. VI işlemi, kurutma sırasında nemin ürün içerisindeki hareketini kolaylaştırmak suretiyle D_{eff} değerini arttırabilir. Örneğin, yalnızca KK yönteminde 50°C 'de kurutulan elma dilimlerinde $1,187 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ olan D_{eff} , VI+KK yönteminde aynı sıcaklıkta $2,018 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 'ye yükselmiştir. Bununla birlikte, VI işlemi E_a değerini düşürerek kurutma için gereken enerji miktarını azaltabilir. KK yönteminde $54,20 \text{ kJ/mol}$ olan E_a değeri, VI+KK yönteminde $20,72 \text{ kJ/mol}$ olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, VI işleminin kurutma sürecini hem hızlandırdığını hem de enerji gereksinimini azalttığını göstermektedir.

Ohmik ısıtmalı ön kurutmanın vakum altında yapılması da D_{eff} ve E_a değerlerini önemli ölçüde etkilemiştir. Atmosfer basıncı altında gerçekleştirilen kurutma (AOK+KK) yöntemi ile karşılaştırıldığında, vakum altında gerçekleştirilen yöntem (VOK+KK), elma dilimlerinin D_{eff} değerini artırmış ve E_a değerini ise düşürmüştür. Örneğin, 50°C 'de AOK+KK yönteminde D_{eff} $3,051 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ iken, VOK+KK yönteminde bu değer $2,269 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 'ye yükselmiştir. Ancak E_a değeri, AOK+KK yönteminde $10,48 \text{ kJ/mol}$ iken, VOK+KK yönteminde $28,51 \text{ kJ/mol}$ olarak artmıştır. Bu durum, vakum altında gerçekleştirilen ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin elma dilimlerinde suyun difüzyonunu hızlandırdığını ancak bu süreçte daha fazla enerji gerektirdiğini göstermektedir.

Gıdaların kurutulması hem ısı hem de kütle transferi süreçlerini içeren karmaşık bir işlem olup, bu süreçlerin verimliliği su buharı difüzyon hızı ve D_{eff} gibi parametrelerle ilişkilidir (Doğantürk, 2016). Literatürde, sıcaklık artışının D_{eff} değerini artırdığı ve kuruma hızını doğrudan etkilediği belirtilmiştir (Nizamlıoğlu, 2022). Ayrıca, E_a değeri bir reaksiyonun gerçekleşebilmesi için gereken minimum enerji miktarını ifade eder ve bu enerji, reaksiyon hızının sıcaklığa bağlı değişimini belirler (Nizamlıoğlu, 2022). Gıdalarda E_a değeri geniş bir aralıkta değişmekte olup, bu değerler ürün ve işlem koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Zhu ve Shen (2014), şeftali kurutma için E_a değerini $42,23 \text{ kJ/mol}$ olarak tespit etmiş, Taşova (2019) ise bezelye kurutma çalışmasında bu değeri $54,72 \text{ kJ/mol}$ olarak rapor etmiştir. Çalışmamızda tespit edilen $10,48$ - $54,20 \text{ kJ/mol}$ aralığındaki E_a değerleri, literatürde bildirilen değerlerle uyumludur. Özellikle, en düşük E_a değeri ohmik ısıtma ön işlemi uygulanan elma dilimlerinde ($10,48 \text{ kJ/mol}$) belirlenirken, en yüksek E_a değeri konveksiyonel kurutma ile kurutulan elma dilimlerinde ($54,20 \text{ kJ/mol}$) elde edilmiştir. Bu

durum, ohmik ısıtma ön işleminin kuruma için gereken enerjiyi düşürdüğünü ve kuruma hızını artırdığını göstermektedir.

Efektif difüzyon katsayısına ilişkin literatür verileri de geniş bir aralığa sahiptir. Sacilik ve Elicin (2006), sıcak havalı konvektif kurutucuda elma dilimlerinin D_{eff} değeri $2,27 \times 10^{-10}$ ile $4,97 \times 10^{-10}$ m²/s arasında bulmuşlardır. Akpınar vd. (2003), konvektif silikon kurutucuda bu değeri $8,41 \times 10^{-10}$ ile $20,60 \times 10^{-10}$ m²/s arasında rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Nizamlioğlu (2022), mikrodalga gücü kullanarak kuruttuğu elma dilimlerinde D_{eff} değeri $9,72 \times 10^{-10}$ ile $2,36 \times 10^{-9}$ m²/s arasında tespit etmiştir. Filiz (2015), Starking Delicious, Golden Delicious ve Granny Smith elma çeşitlerinin 65, 70 ve 75°C sıcaklıklarda kurutulması sonucu elde edilen elma cipslerinin bazı kalite özelliklerini incelediği çalışmada, bu sıcaklıklar için numunelerin D_{eff} değerlerinin sıcaklık arttıkça yükseldiğini ve $1,94-3,42 \times 10^{-10}$ m²/s aralığında hesaplandığını bildirmiştir. Bu doktora tez çalışmasında elma dilimleri için elde edilen D_{eff} değerleri ise $1,187-3,864 \times 10^{-8}$ m²/s arasında bulunmuş olup, literatürdeki bu değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Filiz (2015), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı elma çeşitlerinden 65, 70 ve 75°C’de kurutularak üretilen elma cipslerinin E_a değerlerinin 51,02-53,07 kJ/mol aralığında değiştiğini bildirmiştir. Bu doktora tez çalışmasında hesaplanan E_a değerleri ise 10,48-54,20 kJ/mol arasında olmuştur. VI işlemi görmemiş elma dilimlerinin sadece KK yöntemiyle kurutulmasında elde edilen 54,20 kJ/mol değeri literatür ile uyumlu olsa da diğer yöntemlerde hesaplanan E_a değerlerindeki farklılıklar elma türü yanında kullanılan kurutma tekniği ve dilim kalınlığı gibi değişik faktörlerden kaynaklanabilir.

Literatürde, farklı ürünlerin E_a ve D_{eff} değerleri de çeşitlilik göstermektedir. Örneğin, kuru erik için 57 kJ/mol (Sabarez ve Price, 1999), bamya için 51,26 kJ/mol (Doymaz, 2005), havuç için 82,93 kJ/mol (Doymaz, 2004), üzüm için 40,14 kJ/mol (Roberts vd., 2008) ve şeftali için 42,53 kJ/mol (Zhu ve Shen, 2014) olarak bildirilmiştir. Bu doktora tez çalışmasında özellikle KK yöntemiyle elde edilen değer, literatür verileriyle büyük ölçüde uyumludur. Ancak, diğer yöntemlerle elde edilen bulgular da önemli bir tutarlılık göstermektedir. Özellikle, ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin kuruma için gerekli enerji miktarını düşürdüğü ve kurutma sürecini hızlandırdığı görülmektedir.

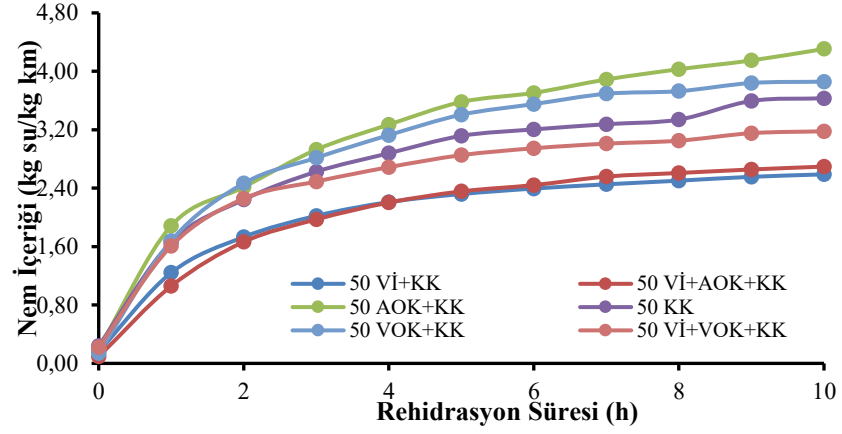
4.4. Kurutulmuş Elma Dilimlerinde Rehidrasyon Kinetiği

4.4.1. Rehidrasyon Oranı, Hacimsel Büzüşme Oranı ve Rehidrasyon Kapasitesi

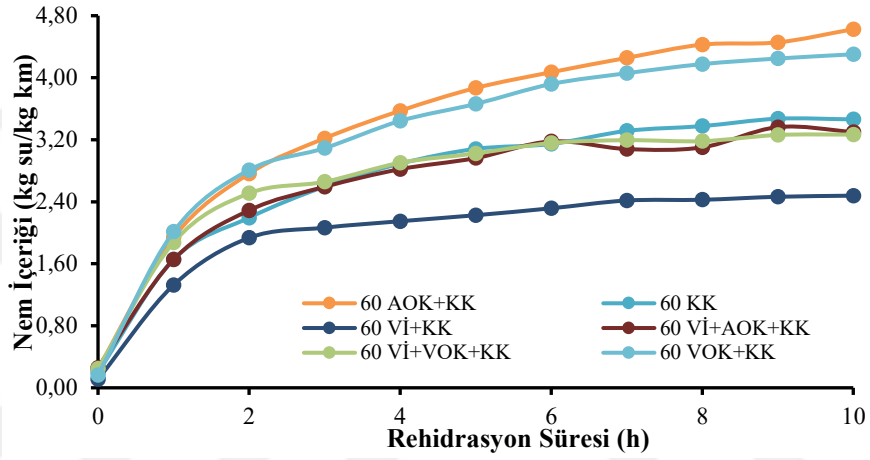
Rehidrasyon, kurutulmuş ürünün kalitesini belirleyen en önemli parametrelerden bir tanesidir (Summa vd., 2005). Rehidrasyon, kuruma işlemi süresince ürünün etkilenme ölçütü olarak bilinmektedir (Çalışkan ve Dirim, 20017). Kurutulmuş ürünlerin yeniden su alarak eski nem içeriğine gelmesi beklenmektedir. Kurutulmuş ürün istenildiği gibi rehidre olduğunda, kullanıldığı ürün içine (kek, pasta vb.) aromasını ve tadını iyi bir şekilde bırakmaktadır. Bu bağlamda kurutulmuş ürünlerinin rehidrasyon kapasitesinin yüksek olması istenmektedir. Doktora tez çalışmasında hiçbir ön işlem uygulanmamış (taze) ve konvektif kurutucuda 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulan elma dilimlerinin başlangıç nem içerikleri sırası ile 0,24, 0,20 ve 0,31 kg su/kg km olarak belirlenmiştir. On saatlik rehidrasyon süresi sonrasında, kurutulmuş elma dilimlerinin nem içerikleri sırasıyla 3,63, 3,46 ve 3,68 kg su/kg km değerlerine ulaşmıştır. Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleme maruz bırakılıp konvektif kurutucuda 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulan elma dilimlerinin başlangıç nem içerikleri ise sırasıyla 0,16, 0,11 ve 0,13 kg su/kg km olarak belirlenmiş ve 10 saatlik rehidrasyon süresi sonrasında, elma dilimlerinin nem içerikleri sırasıyla 2,58, 2,47 ve 2,71 kg su/kg km değerlerine yükseldiği tespit edilmiştir. Vİ işlemi uygulanmış ve konvektif kurutucuda kurutma işlemine tabi tutulan elma dilimleri 10 saatlik rehidrasyon süresinin 9'uncu saatinde tüm sıcaklıklarda denge neme ulaştığı görülmüştür. Bu da Vİ işleminin rehidrasyon hızını etkileyebildiğini göstermektedir. Ön işlem olarak atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımali ön kurutma uygulanmış ve konvektif kurutucuda 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulan elma dilimlerinin başlangıç nem içerikleri sırasıyla 0,20-0,25 ve 0,12 kg su/kg km olmuş ve 10 saatlik rehidrasyon süresi sonunda elma dilimlerinin nem içerikleri sırasıyla 4,31, 4,63 ve 3,95 kg su/kg km olarak belirlenmiştir. Bu işlemde de 10 saatlik rehidrasyon süresinin 9'uncu saatinde tüm sıcaklıklarda denge neme ulaşmıştır. Bu da atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımali ön kurutma işleminin elma dilimlerinin rehidrasyon hızını etkileyebildiğini göstermektedir. Ön işlem olarak vakum altında ohmik ısıtımali ön kurutma uygulanan ve sonrasında konvektif kurutucuda 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulan elma dilimlerinin başlangıç nem içerikleri sırasıyla 0,14, 0,17 ve 0,17 kg su/kg km olarak hesaplanmış ve 10 saatlik rehidrasyon süresi sonunda, elma dilimlerinin nem içerikleri sırasıyla 3,86, 4,30 ve 4,29 kg su/kg km olarak belirlenmiştir. On saatlik rehidrasyon süresinin 7nci saatinde tüm sıcaklıklarda denge neme ulaşmıştır.

Bu da VOK işleminin rehidrasyon hızını olumlu yönde etkileyebildiğini göstermektedir. Ön işlem olarak Vİ işlemi sonrasında vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutmayı takiben konvektif kurutucuda 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulan elma dilimlerinin başlangıç nem içerikleri sırasıyla 0,22, 0,25 ve 0,13 kg su/kg km olarak belirlenmiş ve 10 saatlik rehidrasyon süresi sonunda, elma dilimlerinin nem içerikleri sırasıyla 3,18, 3,27 ve 2,45 kg su/kg km değerlerine yükselmiştir. On saatlik rehidrasyon süresinin 8'inci saatinde tüm sıcaklıklarda denge neme ulaşmıştır. Bu da ohmik ısıtmalı ön kurutma ve Vİ işleminin birlikte kullanılmasının rehidrasyon hızını olumlu yönde etkileyebildiğini göstermektedir.

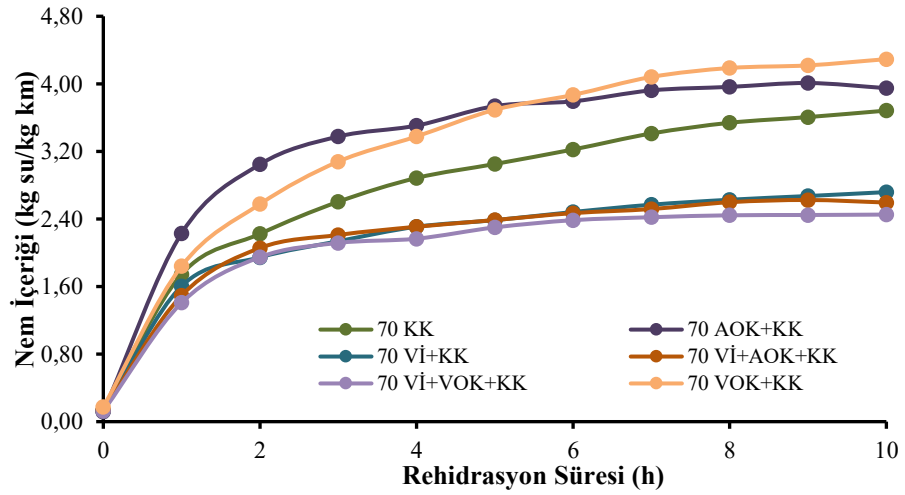
Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon süresine bağlı nem içeriğindeki (kg su/kg km) değişim Şekil 4.14'te sunulmaktadır. Sıcaklıkların artmasıyla birlikte rehidrasyon süresi kısalmış ve dilimlerin nem içeriği belirgin şekilde yükselmiştir. Genel olarak, rehidrasyon süresi arttıkça tüm yöntemlerde elma dilimlerinin nem içeriği artmıştır. Ancak, kurutma yöntemi ve sıcaklık, dilimlerin nem içeriğinin artış hızını ve maksimum seviyesini önemli ölçüde etkilemiştir. AOK+KK yöntemiyle, tüm sıcaklıklarda en yüksek nem içeriğine ulaşılmış ve kurutulmuş dilimlerin rehidrasyon kapasitesi diğer yöntemlere göre daha iyi belirlenmiştir. Özellikle 70°C'de kurutulan örnekler (Şekil 4.14c), yaklaşık 4,5 kg su/kg kuru madde ile en yüksek nem içeriğine ulaşmıştır. VOK+KK yöntemi, AOK+KK yöntemine benzer şekilde yüksek nem içeriği sağlamış, ancak değerler biraz daha düşük kalmıştır. KK yöntemiyle kurutulmuş dilimler rehidre edildiklerinde, diğer yöntemlere kıyasla daha düşük nem içeriği göstermiştir. Özellikle 50°C'de kurutulan örnekler (Şekil 4.14a), rehidrasyon süresi boyunca en düşük nem içeriğine sahip olmuştur. Vİ+KK ve Vİ+AOK+KK yöntemleri, nem içeriği açısından orta seviyelerde yer almış ve rehidrasyon kapasitesi sıcaklığa bağlı olarak değişmiştir. Sonuç olarak, kurutma yöntemi elma dilimlerinin rehidrasyon kapasitesi üzerinde etkili bir faktör olmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.14. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (a) 50, (b) 60 ve (c) 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon süresine bağlı nem içeriğindeki değişim (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Sıcaklık, kurutma ve rehidrasyon süreçlerinde önemli bir etkidir. Kurutma sürecinde sıcaklık arttıkça, kurutma işlemi sırasında elma dilimlerinin D_{eff} değerinde artışlar görülmektedir (Çizelge 4.12). Bu durum, yüksek sıcaklıkların nemin daha hızlı buharlaşmasını ve difüzyonunu kolaylaştırdığını göstermektedir. Ancak bazı durumlarda yüksek sıcaklıklar ürünün yapısal özelliklerini olumsuz etkileyebilir ve bu da RK değerini düşürebilir. Rehidrasyon sürecinde, kurutma sırasında kullanılan sıcaklık, ürünün su tutma kapasitesini etkiler. Daha yüksek sıcaklıklarda kurutulan ürünler, genellikle daha düşük rehidrasyon kapasitesine sahip olabilir (Vega-Galvez vd., 2012). Bunun nedenleri arasında, yüksek sıcaklıkların hücresel yapıyı bozarak suyun geri alınmasını zorlaştırması sayılabilir. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi, rehidrasyon süresi boyunca kurutulmuş elma dilimlerinin nem içeriği, kurutma sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin, 70°C'de kurutulan ürünler genellikle daha düşük nem içeriğine ulaşırken, 50°C'de kurutulan ürünler daha yüksek nem içeriği gösterebilir. Sıcaklık, kurutma yöntemine bağlı olarak E_a değerini de etkiler (Çizelge 4.10). Daha düşük sıcaklıklarda kurutulan ürünler genellikle daha yüksek E_a değerine sahip olur çünkü nemin uzaklaştırılması daha zordur (Vega-Galvez vd., 2012). Örneğin, KK yöntemiyle kurutulan dilimleri için hesaplanan E_a değeri 54,20 kJ/mol ile en yüksek değerlerden biri olmuştur (Çizelge 4.12). Sonuç olarak, sıcaklık hem kurutma hem de rehidrasyon süreçlerinde ürünün nem içeriği, D_{eff} ve RK üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır. Uygun sıcaklık seçimi, ürün kalitesini korumak ve işlem verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir.

Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini arttırmanın amaçlandığı Vİ işlemi, kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon sürecini olumlu yönde etkilemiştir. Vİ işlemi, bitkisel hücreler arasındaki boşluklara sıvıların nüfuz etmesini sağlayarak ürünün yapısal özelliklerinde değişikliklere neden olmuş ve bu durum, kuru elma dilimlerinin suyu daha hızlı ve etkili bir şekilde geri almasını kolaylaştırmıştır. Vİ işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinde, rehidrasyon sırasında nem içeriği daha hızlı artış göstermiş ve daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu, elektriksel iletkenliğin artmasıyla birlikte hücre duvarlarının geçirgenliğinin iyileşmesi ve suyun hücrelere daha kolay nüfuz etmesiyle ilişkilidir (Vega-Galvez vd., 2012). Ayrıca, Vİ işlemi, kuru ürünün rehidrasyon kapasitesini artırarak daha homojen bir nem dağılımı sağlamıştır. Bulgular, Vİ işleminin elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini artırarak rehidrasyon sürecini hızlandırdığını ve ürünün su tutma kapasitesinin iyileştiğini göstermiştir. Bu, özellikle nem içeriğinin

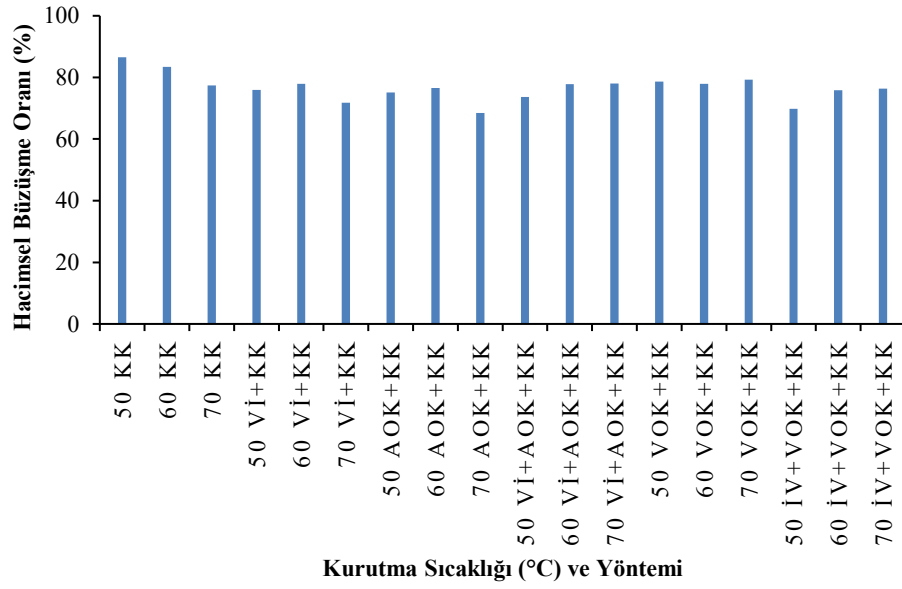
yüksek olduğu yöntemlerde (örneğin Vİ+KK veya Vİ+AOK+KK) daha belirgin olarak görülmüştür.

Elma dilimlerine uygulanan bir diğer işlem olan ohmik ısıtmalı ön kurutmanın vakum altında yapılması, kurutma sürecini ve ürün özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. Vakum ortamı, suyun kaynama noktasını düşürdüğü için nemin daha düşük sıcaklıklarda buharlaşmasını kolaylaştırır ve bu durum, ürünün içindeki nemin daha hızlı ve homojen bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar (Richardson, 2001; İçier vd., 2017). Ayrıca, vakum ortamı, ürünün hücresel yapısındaki bozulmayı azaltarak rehidrasyon kapasitesini artırır. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, ürünün yüzeyinde aşırı kuruma veya yanma gibi olumsuz etkileri en aza indirebilir ve enerji verimliliğini artırabilir. Bu yöntem, özellikle hassas ve dilimlenebilir ürünlerde kaliteyi koruyarak daha iyi rehidrasyon performansı sağlayabilir. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi, VOK+KK yöntemi, rehidrasyon sırasında yüksek nem içeriği sağlamış ve diğer yöntemlere kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir.

Vakum impregnasyon işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutmanın etkileşimi, elma dilimlerinin rehidrasyon kapasitesini ve kurutma verimliliğini olumlu yönde etkilemiştir. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi, bu iki işlemin bir arada kullanılması, nem içeriğinin rehidrasyon süresi boyunca daha hızlı artmasını sağlamış ve daha yüksek nem içeriği değerlerine ulaşılmıştır. Bu etkileşim şu şekilde açıklanabilir: Vİ işlemiyle, bitkisel hücreler arasındaki boşluklara sıvıların nüfuz etmesini sağlayarak ürünün elektriksel iletkenliğini arttırmış ve bu durum, ohmik ısıtmalı ön kurutma sırasında elektrik akımının daha homojen bir şekilde yayılmasını kolaylaştırmış ve ısının ürün boyunca eşit dağılmasını sağlamıştır. Buna ek olarak, Vİ işlemi, hücresel yapıyı koruyarak rehidrasyon sırasında suyun geri alınmasını kolaylaştırmıştır. Vİ işlemi ve ohmik ısıtmalı ön kurutma bir arada kullanıldığında, Vİ işleminin sağladığı elektriksel iletkenlik artışı, ohmik ısıtmanın etkinliğini arttırmıştır. Bu, kurutma sürecini hızlandırırken ürünün rehidrasyon kapasitesini de iyileştirmiştir. Şekil 4.14'te, Vİ işleminin entegre edildiği AOK+KK ve VOK+KK yöntemlerinin, rehidrasyon sırasında nem içeriği açısından diğer yöntemlere kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Bu durum, Vİ ve ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemlerinin sinerjik etkiye sahip olduğuna işaret etmektedir. Bulgular, Vİ ve ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemleri arasındaki etkileşimin hem kurutma sürecini hızlandırdığını hem de rehidrasyon kapasitesini artırarak ürün kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir.

Altı farklı kurutma yöntemiyle ve üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulan elma dilimlerinin HBO değerleri Şekil 4.15'te sunulmuştur. Büzüşme oranları, kurutma

işlemi sırasında elma dilimlerinin su kaybına bağlı olarak hacim kaybını ifade eder ve bu değerler, kurutma yönteminin ve sıcaklığının elma dilimlerinin fiziksel yapısı üzerindeki etkilerini yansıtır. Bulgular, elma dilimlerindeki HBO değerleri söz konusu olduğunda kurutma/rehidrasyon sıcaklığı, kurutma yöntemi ve Vİ işlemlerinin üçlü interaksiyonunun istatistiksel açıdan önemli olmadığını ortaya koymuştur ($p>0,05$) (EK 8-Çizelge 7.1).



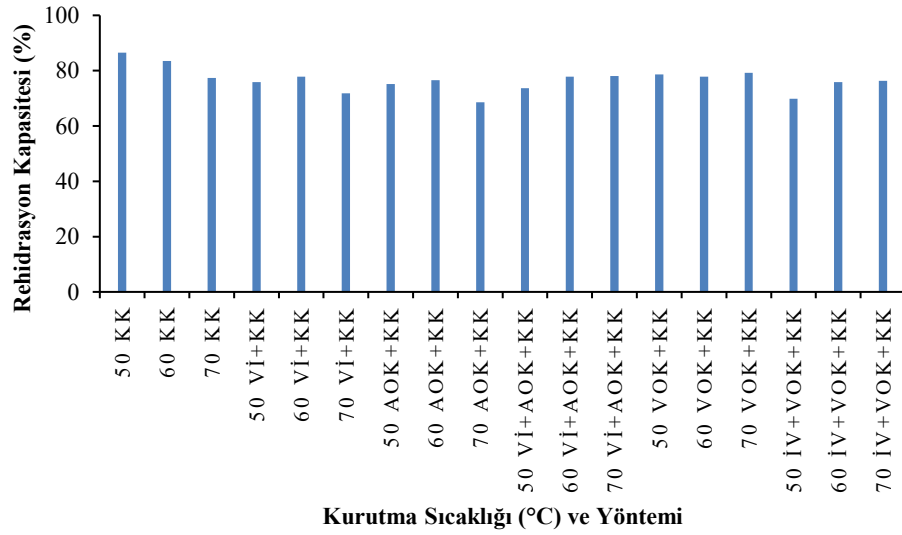
Şekil 4.15. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C)

kurutulan elma dilimlerinin hacimsel büzüşme oranlarındaki değişim (KK:

Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımli ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtımli ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulmuş elma dilimlerinin RK değerleri Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Bulgular, elma dilimlerindeki RK değerleri söz konusu olduğunda kurutma/rehidrasyon sıcaklığı, kurutma yöntemi ve Vİ işlemlerinin üçlü interaksiyonunun istatistiksel açıdan önemli olmadığını ortaya koymuştur ($p>0,05$) (EK 9-Çizelge 7.2). RK, kurutulmuş bir ürünün suyla tekrar nemlendirilme kabiliyetini ifade eder ve bu, kurutma işleminin ürün üzerindeki etkilerini değerlendirmek için önemli bir parametredir. Ürün kurutulduktan sonra yapısı bozulabilmekte ve bundan dolayı rehidre edildiğinde başlangıçtaki su içeriğinin tamamını kazanamayabilir ki, bu nedenle rehidrasyon olayı dehidrasyonun tam tersi olarak düşünülmemelidir (Jamradloedluk vd., 2004). Farklı kurutma yöntemlerinin

elma dilimlerinin RK üzerindeki etkisi, kullanılan tekniklerin ürünün hücresel yapısını koruma veya bozma derecesine göre değişiklik göstermiştir. KK yöntemi, özellikle yüksek sıcaklıklarda hücresel yapıyı daha fazla bozarak (Vega-Galvez, 2012) rehidrasyon kapasitesini düşürmüştür.



Şekil 4.16. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C)

kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon kapasite değerlerindeki değişim (KK:

Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

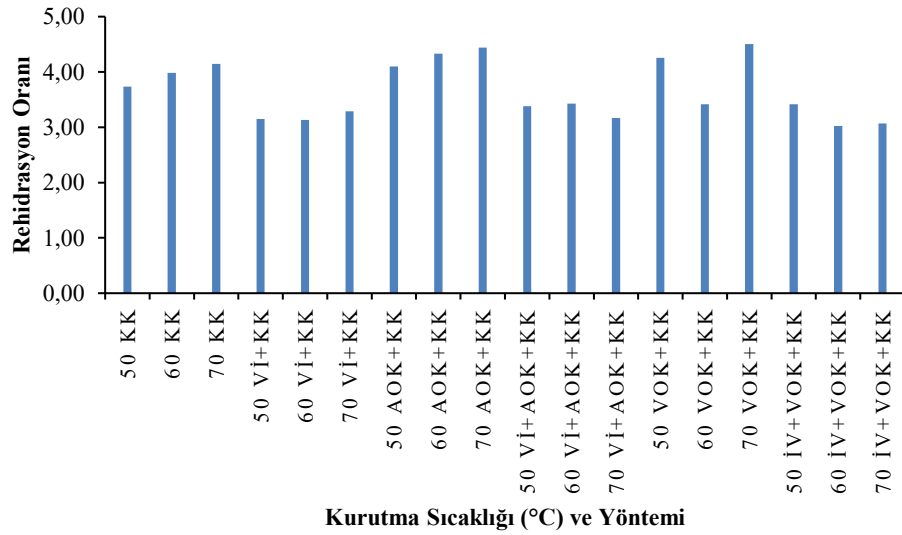
KK yöntemiyle kurutmada sıcaklık arttıkça elde edilen ürünlerin RK değeri düşmüştür. Bu, yüksek sıcaklıkların hücresel yapıyı bozarak su tutma kapasitesini azalttığını göstermektedir (Vega-Galvez, 2012). Ancak, Vİ ve ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemleriyle desteklenen yöntemlerde, sıcaklık artışının olumsuz etkisi daha sınırlı kalmıştır. En yüksek RK 50°C’de KK yöntemiyle kurutulan örneklerde (%86,55), en düşük RK ise 70°C’de AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde (%68,51) gözlenmiştir. Bulgular, Vİ ve ohmik ısıtılmalı ön kurutma işlemlerinin birlikte elma dilimlerinin RK değerini arttırmada etkili olduğunu ve özellikle VOK ve Vİ işlemleriyle desteklenen yöntemlerin kurutulmuş elma dilimlerinin RK değerini en üst seviyeye çıkarabileceği göstermektedir. Sıcaklık artışı, genel olarak RK değerini düşürse de bu yöntemlerin kullanımı sıcaklığın olumsuz etkilerini azaltmıştır. Bulgular, farklı kurutma yöntemleri ve sıcaklıkları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu ($p<0.05$) göstermiştir. Bu da kurutulmuş elma dilimlerinin RK değerini optimize etmek için en

uygun kurutma koşullarının belirlenmesinde kritik bir faktördür. Bu sonuçlar, kurutulmuş elma dilimlerinin kalitesini korumak ve rehidre edilmiş ürünlerin kalitesini artırmak amacıyla kurutma işlemlerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Rehidrasyon kapasitesi üzerine yapılan çalışmalar, farklı ön işlemler ve kurutma koşullarının etkilerini ortaya koymaktadır. Aksüt vd. (2022), mor havuç üzerinde gerçekleştirdikleri rehidrasyon çalışmasında, kaynar suya daldırma ön işlemi uygulayıp 65°C’de kuruttukları mor havuçların RO değerini %75,97, ön işlem uygulanmamış mor havuçların RK değerini ise %76,04 olarak hesaplamışlardır. Tüfekçi ve Özkal (2020), elma dilimlerinde RK değerlerini inceledikleri çalışmada, ultrases ön işlemi uyguladıkları elmayı 60°C’de ve 0,3 m/s hava hızında kurutmuşlardır. Kurutma işlemi sonrasında gerçekleştirilen rehidrasyon çalışmasında, elma dilimlerinin RK değerlerini %15,0 ile %60,6 arasında belirlemiştir. Bu değerler, çalışmamızda elde edilen RK değerlerinin (%68,03-77,37) altında kalmaktadır. Heybeli ve Ertekin (2007) ise sanayi tipi prototip raflı kurutucuda 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin RK değerlerini incelemişler ve %5’lik limon suyuna batırma ön işlemi uygulanan elma dilimlerinde RK değerini %64,34-71,38 aralığında belirlemiştir. Bu değerler, çalışmamızda hesaplanan değerlerle (%68,03-77,37) kıyaslandığında genel anlamda biraz düşük kalmaktadır. Sonuç olarak, farklı ön işlemler ve kurutma yöntemleri, RK üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin RO değerlerinin belirlendiği bu doktora tez çalışmasında elde edilen bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarda elde edilenlerle uyum göstermektedir.

Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulmuş elma dilimlerinin RO değerleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Bulgular, elma dilimlerindeki RO değerleri söz konusu olduğunda kurutma/rehidrasyon sıcaklığı, kurutma yöntemi ve Vİ işlemlerinin üçlü interaksiyonunun istatistiksel açıdan önemli olmadığını ortaya koymuştur ($p>0,05$) (EK 10-Çizelge 7.3). RO değeri, kurutulmuş bir ürünün belirli bir sürede su çekme kapasitesini ifade eder ve kurutma işleminin ürün üzerindeki etkilerini belirlemek için kritik bir parametredir. Genel olarak kurutma sıcaklığı, elma dilimlerinin RO değerini önemli ölçüde etkilemiştir. Ancak bu etki, kullanılan kurutma yöntemine bağlı olarak farklılık göstermiştir. Çoğu yöntemde sıcaklık arttıkça RO değerinde artış gözlenirken, bazı yöntemlerde sıcaklık artışı RO değerini düşürmüştür. Daha düşük sıcaklıklarda (50°C), hücresel yapı daha az zarar gördüğü için RO değeri genellikle daha düşük seviyelerde kalmıştır. Örneğin, KK yönteminde 50°C’de RO 3,73 olarak belirlenmiş ancak, Vİ ile desteklenen KK yönteminde 50°C’de RO daha düşük bir değer

olan 3,15 olarak kaydedilmiştir. Buna karşılık, VOK+KK yöntemi, 70°C’de en yüksek RO değeri sağlamış ve bu değer 4,50 olarak belirlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklardaki KK yönteminde (60°C ve 70°C), nemin daha hızlı uzaklaştırılması RO değerini artırmıştır. Benzer şekilde, AOK+KK yöntemiyle 70°C’de RO 4,44 olarak belirlenmiştir. Ancak, bazı yöntemlerde yüksek sıcaklıklar hücresel yapıya zarar vererek RO değerini düşürmüştür. Örneğin, Vİ ile desteklenen VOK+KK yönteminde 50°C’de 3,42 olan RO, 70°C’de 3,07’ye düşmüştür. Bu, yüksek sıcaklıkların hücre duvarlarını tahrip ederek suyun geri alınabilirliğini azalttığını göstermektedir. Sonuç olarak, kurutma sıcaklığı RO değerini hem olumlu hem de olumsuz yönde etkilemiştir. Bu nedenle, optimum RO değeri için kurutma sıcaklığı ve yöntemi birlikte değerlendirilmelidir.



Şekil 4.17. Altı farklı kurutma yöntemiyle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C)

kurutulan elma dilimlerinin rehidasyon oranı değerlerindeki değişim (KK:

Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım, VOK: Vakum altında ohmik ısıtım, İV: Vakum altında ohmik ısıtım ile desteklenen VOK yöntemi)

Kurutma öncesi elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğinin artırılmasının hedeflendiği Vİ işlemi, kurutulmuş elma dilimlerinin RO değerini genel olarak olumsuz yönde etkilemiştir. Vİ işleminin hücresel yapıyı koruyarak rehidasyon oranını artırması beklenirken, bu çalışmada kullanılan yöntemlerle birlikte değerlendirildiğinde elma dilimlerinin RO değerini düşürdüğü gözlenmiştir. Örneğin, yalnızca KK yöntemi kullanıldığında 50°C’de RO 3,73 iken, Vİ ile desteklenen KK yönteminde bu oran 3,15’e düşmüştür. Benzer şekilde, VOK+KK yöntemi 50°C’de 4,26 RO değeri sağlarken, Vİ ile

desteklenen VOK+KK yöntemi aynı sıcaklıkta yalnızca 3,42 oranına ulaşmıştır. Bu durum, Vİ işleminin hücre içi boşlukları doldurarak suyun geri alınabilirliğini azalttığını ve hücrel yapıya zarar verebileceğini işaret edebilir. Özellikle vakum altında yapılan işlemlerle birleştirildiğinde, Vİ işleminin RO üzerindeki olumsuz etkisi daha belirgin hale gelmiştir.

Ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin vakum altında yapılması, elma dilimlerinin RO değerini genel olarak artırmış ve atmosfer basıncı altında yapılan ön kurutmaya kıyasla daha olumlu sonuçlar vermiştir. Özellikle 70°C’de VOK+KK yöntemi, tüm yöntemler arasında en yüksek RO değeri (4,50) sağlamıştır. Vakum ortamı, nemin daha homojen bir şekilde uzaklaştırılmasını ve hücrel yapının daha iyi korunmasını sağlamıştır. Ancak, vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutmaya Vİ işlemi kullanıldığında, RO değerinde belirgin bir düşüş olmuştur. Bu durum, Vİ işleminin vakum ortamında hücrel yapıyı olumsuz etkileyebileceğini ve rehidrasyon kapasitesini azaltabileceğini işaret etmektedir.

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar, kurutma yöntemleri ve ön işlemlerin rehidrasyon oranları üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Tüfekçi ve Özkal (2020), ultrases ön işlemi uyguladıkları elmayı 60°C’de kurutarak rehidrasyon oranını 4,20 ile 7,10 arasında bulmuştur ve bu değerler çalışmamızdaki bulgularla benzerlik göstermektedir. Polat (2019), farklı yöntemlerle kurutulan havuç örneklerinde yaptığı çalışmada, en yüksek rehidrasyon oranını (6,93) 60°C’de kurutulan ve 40 dakika ultrases ön işlemi uygulanan 2 mm kalınlığındaki havuç dilimlerinde, en düşük rehidrasyon oranını (5,01) ise 70°C’de kurutulan ve ön işlem uygulanmayan 4 mm kalınlığındaki havuç dilimlerinde belirlemişlerdir. Elma dilimlerinin kurutulduğu bu doktora tez çalışmasındaki RO değerleri, Polat’ın rapor ettiği değerlerden daha düşüktür ve bu durum, kurutulan materyalin farklılığından kaynaklanabilir. Aksüt vd. (2022) ise mor havuçlarda yaptıkları çalışmada, kaynar suya daldırma ön işlemi uygulayıp 65°C’de kuruttukları mor havuçların RO değerini 4,20 olarak, ön işlem uygulanmadan kurutulan mor havuçların RO değerini ise yine 4,20 olarak hesaplamışlardır. Bu değerler, çalışmamızda hesaplanan RO değerleri (2,94-4,84) ile benzerlik göstermektedir. Tüm bu araştırmalar, kurutma sıcaklığı, ön işlem türü ve kurutulacak numune özelliklerinin RO değerlerinin üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

İstatistiksel olarak, farklı kurutma yöntemleri ve sıcaklıklar arasında etkileşimin RO değerleri açısından önemli olduğu ($p<0.05$) belirlenmiştir (Çizelge 4.13). Bu da kurutma işleminin rehidrasyon özelliklerini optimize etmek için önemli olduğunu ortaya

koymaktadır. Yüksek RO değerine sahip ürünler, özellikle gıda sanayisinde taze benzeri bir doku elde etmek için önemlidir. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda ve vakumlu kurutma gibi yöntemlerle daha iyi sonuçlar elde edilebileceği görülmektedir. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin RK, RO ve HBO değerlerine ait varyans analiz tabloları EK-8, 9 ve 10'da sunulmuştur. ANOVA bulgularına göre kurutma sıcaklığı ve elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Vİ işleminin uygulanmış veya uygulanmamış elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıklarında kurutulması sonrasında dilimlerin RK, RO ve HBO değerleri Çizelge 4.13'te sunulmuştur. Vİ işleminin farklı kurutma sıcaklıklarında elma dilimlerinin RK, RO ve HBO değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, Vİ genel olarak RK ve RO değerlerini düşürmüş, ancak HBO değerini kısmen azaltmış veya sabit tutmuştur. Vİ işleminin kullanılması, tüm sıcaklıklarda kurutulmuş elma dilimlerinin RK değerini düşürmüş ve bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Örneğin, 50°C'de, Vİ işleminin uygulanmadığında RK değeri %75,00 iken, Vİ işleminin uygulandığında bu değer %69,78'e düşmüştür. Bu fark, hücre yapısının Vİ işleminin uygulanması sırasında zarar görmesinden ve suyun geri alınımını yavaşlatmasından dolayı ortaya çıkabilir. 70°C'de, Vİ işleminin uygulanmadığında RK değeri %77,00 ile en yüksek seviyeye ulaşırken, Vİ işleminin uygulandığında bu değer %68,40'a düşmüştür ($p<0,05$). Vİ işleminin, elma dilimlerinin RO değerlerini de olumsuz yönde etkilemiş ve bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Örneğin, 50°C'de, Vİ işleminin uygulanmadığında elma dilimlerinin RO değeri 4,02 iken, Vİ işleminin uygulandığında bu değer 3,31'e düşmüştür. Vİ işleminin hücre içi boşlukları doldurarak suyun geri alınabilirliğini azaltabilir. 70°C'de, Vİ işleminin uygulanmadığında RO değeri 4,36 ile en yüksek seviyeye ulaşırken, Vİ işleminin uygulandığında bu değer 3,17'ye düşmüştür ($p<0,05$). Vİ işleminin elma dilimlerinin HBO değerleri üzerindeki etkisi, diğer parametrelere kıyasla daha az belirgin olmuştur. Ancak, bazı sıcaklıklarda Vİ işleminin HBO değerlerini azaltmış ve bu fark istatistiksel olarak anlamlı olmuştur ($p<0,05$). Örneğin, 50°C'de, Vİ işleminin uygulanmadığında HBO değeri %80,10 iken, Vİ işleminin uygulandığında bu değer %73,10'a düşmüştür ($p<0,05$). 70°C'de, Vİ işleminin uygulanmadığında HBO değeri %75,03 iken, Vİ işleminin uygulandığında bu değer %75,40 ile benzer seviyede kalmıştır ($p>0,05$). Bulgular Vİ işleminin, elma dilimlerinin RK ve RO değerleri üzerinde olumsuz bir etki yarattığını, ancak HBO değerlerini kısmen azalttığını göstermiştir. İstatistiksel bulgular, Vİ işleminin elma dilimlerinin RK ve RO değerleri üzerindeki etkisinin anlamlı olduğunu, ancak HBO

değerleri üzerindeki etkisinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Özellikle 70°C’de Vİ işlemi uygulanmadığında RK ve RO değerleri en yüksek seviyelere ulaşmış (sırasıyla %77,00 ve 4,36), Vİ işlemi uygulandığında ise bu değerler belirgin şekilde düşmüştür (sırasıyla %68,40 ve 3,17). Bu sonuçlar, Vİ işleminin hücrel yapıyı olumsuz etkileyerek su tutma ve RK değerlerini azalttığını, ancak HBO değerini kısmen iyileştirdiğini göstermektedir.

Çizelge 4.13. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon kapasitesi (RK), rehidrasyon oranı (RO) ve hacimsel büzüşme oranı (HBO) üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Vakum İmpregnasyon	RK (%)	RO	HBO (%)
50	Var	69,78±1,26 ^{C*}	3,31±0,13 ^C	73,10±4,02 ^D
	Yok	75,00±2,27 ^B	4,02±0,34 ^B	80,10±5,57 ^A
60	Var	68,54±2,18 ^C	3,19±0,23 ^C	77,17±1,75 ^{BC}
	Yok	74,16±3,14 ^B	3,91±0,49 ^B	79,29±4,20 ^{AB}
70	Var	68,40±1,74 ^C	3,17±0,17 ^C	75,40±3,31 ^{CD}
	Yok	77,00±1,30 ^A	4,36±0,25 ^A	75,03±5,70 ^{CD}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin RK, RO ve HBO değerlerine ait ANOVA bulgularına göre kurutma sıcaklığı ile kurutma yönteminin ikili etkisi istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur (p<0,05). Vİ işlemi uygulanmış veya uygulanmamış elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıklarında kurutulması sonrasında dilimlerin RK, RO ve HBO değerleri Çizelge 4.14’te sunulmuştur. Genel olarak, ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK ve VOK) yöntemlerinin KK kurutmaya entegre edilmesi, yalnızca KK yöntemine kıyasla elma dilimlerinde daha yüksek RK ve RO değerleri sağlamış, ancak HBO değerlerini azaltmıştır. Kurutma yöntemleri ve sıcaklıklar arasında elma dilimlerinin RK değerleri açısından istatistiksel olarak anlamlı farklar gözlenmiştir (p<0,05). Örneğin, 50°C’de, elma dilimlerine ait en yüksek RK değeri VOK+KK yöntemiyle elde edilmiş (%73,60) ve bu değer KK yöntemiyle elde edilen RK değerinden (%70,63) anlamlı derecede yüksek bulunmuştur (p<0,05). 60°C’de ise AOK+KK yöntemi en yüksek RK değerini sağlamış (%73,76) ancak VOK+KK yöntemiyle elde edilen RK değeri (%68,79) diğer yöntemlere kıyasla anlamlı derecede düşük olmuştur (p<0,05). 70°C’de, RK değerleri yöntemler arasında benzer bulunmuştur (p>0,05). RO değerleri açısından da kurutma yöntemleri ve sıcaklıklar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar gözlenmiştir (p<0,05). Örneğin,

50°C’de, elma dilimlerine ait en yüksek RO değeri VOK+KK yöntemiyle elde edilmiş (3,83) ve bu değer KK yöntemiyle elde edilen RO değerinden (3,44) anlamlı derecede yüksek olmuştur ($p<0,05$). 60°C’de, AOK+KK yöntemi en yüksek RO değerini sağlamıştır (3,87) ancak VOK+KK yöntemiyle elde edilen RO değeri (3,21) diğer yöntemlere kıyasla anlamlı derecede düşük olmuştur ($p<0,05$). 70°C’de, yöntemler arasında RO değerleri açısından anlamlı bir fark gözlenmemiştir ($p>0,05$). Elma dilimlerine ait HBO değerleri açısından kurutma yöntemleri ve sıcaklıklar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar gözlenmiştir ($p<0,05$). Örneğin, 50°C’de, elma dilimlerindeki en düşük HBO değeri AOK+KK yöntemiyle elde edilmiş (%74,36) ve bu değer, KK yöntemiyle elde edilen HBO değerinden (%81,22) anlamlı derecede düşük bulunmuştur ($p<0,05$). 60°C’de, VOK+KK yöntemiyle elma dilimlerinde elde edilen HBO değeri (%76,86) diğer yöntemlere kıyasla daha düşük bulunmuştur ($p<0,05$). 70°C’de ise en düşük HBO değeri AOK+KK yöntemiyle elde edilmiştir (%73,27), bu değer KK yöntemiyle elde edilen HBO değerinden (%74,59) anlamlı derecede düşük olmuştur ($p<0,05$). Genel olarak, KK yöntemine ohmik ısıtmalı ön kurutmanın entegre edilmesi, yalnızca KK yöntemine kıyasla elma dilimlerinde daha yüksek RK ve RO değerleri sağlamış, ancak HBO değerini azaltmıştır. Özellikle 50°C’de VOK+KK yöntemi, en yüksek RK (%73,60) ve RO (3,83) değerlerini sağlamış ancak, 60°C’de bu yöntem, diğer yöntemlere kıyasla elma dilimlerinde daha düşük RK (%68,79) ve RO (3,21) değerlerine neden olmuştur. Bu sonuçlar, kurutma yönteminin ve sıcaklığın, elma dilimlerinin fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.14. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon kapasitesi (RK), rehidrasyon oranı (RO) ve hacimsel büzüşme oranı (HBO) üzerine kurutma sıcaklığı ile kurutma yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	RK (%)	RO	HBO (%)
50	KK	70,63±3,11 ^{C*}	3,44±0,39 ^{CD}	81,22±6,63 ^A
	AOK+KK	72,94±3,07 ^{AB}	3,73±0,44 ^{AB}	74,36±2,51 ^{DE}
	VOK+KK	73,60±3,21 ^A	3,83±0,46 ^A	74,22±5,56 ^{DE}
60	KK	71,50±4,18 ^{BC}	3,55±0,55 ^{BC}	80,65±4,04 ^{AB}
	AOK+KK	73,76±3,83 ^A	3,87±0,57 ^A	77,18±2,74 ^{CD}
	VOK+KK	68,79±2,21 ^D	3,21±0,22 ^D	76,86±1,65 ^{BCD}
70	KK	72,70±3,58 ^{AB}	3,71±0,47 ^{AB}	74,59±3,41 ^{CDE}
	AOK+KK	72,84±5,25 ^{AB}	3,80±0,75 ^{AB}	73,27±6,47 ^E
	VOK+KK	72,56±5,80 ^{AB}	3,78±0,79 ^{AB}	77,79±1,79 ^{BC}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin RK, RO ve HBO değerlerine ait ANOVA bulgularına göre kurutma sıcaklığı ile elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğinin arttırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Vİ işlemi uygulanmış veya uygulanmamış elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıklarında kurutulması sonrasında dilimlerin RK, RO ve HBO değerleri Çizelge 4.15'te sunulmuştur. Genel olarak, elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği Vİ işlemi, elma dilimlerinin HBO değerlerini azaltmış ancak bu etki kullanılan kurutma yöntemine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Vİ işlemi uygulanmadığında, KK yöntemiyle elde edilen HBO değeri %82,46 ile en yüksek seviyeye ulaşmış ve işlem uygulandığında ise değer %75,19'a düşmüştür ($p<0,05$). Bu bulgu, Vİ işleminin hücrel yapıyı kısmen koruyarak hacimsel büzüşmeyi azalttığını göstermektedir. Vİ işlemi uygulanmadığında, AOK+KK yöntemiyle elde edilen HBO değeri %73,39 ile en düşük seviyeye ulaşmıştır. Vİ işlemi uygulandığında ise HBO değeri %76,48'e yükselmiştir. Bu durum, Vİ işleminin bu yöntemde hacimsel büzüşmeyi artırıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ancak, bu fark diğer yöntemlere kıyasla daha az belirgin olmuştur. Vİ işlemi uygulanmadığında, VOK+KK yöntemiyle elde edilen HBO değeri %78,58 olarak belirlenirken işlem uygulandığında ise değer %74,02'ye düşmüştür ($p<0,05$). Bulgular, Vİ işleminin, vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemiyle birlikte kullanıldığında hacimsel büzüşmeyi azalttığını göstermektedir. Vİ işlemi, genel olarak elma dilimlerinin HBO değerlerini azaltmış ancak bu etki kullanılan kurutma yöntemine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Bu sonuçlar, elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin elma dilimlerine ait HBO değerleri üzerindeki etkisinin kurutma yöntemine bağlı olarak değiştiğini ve bazı durumlarda olumlu, bazı durumlarda ise olumsuz sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.15. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin hacimsel büzüşme oranı (HBO) üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)

Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	HBO (%)
KK	Var	75,19±3,82 ^{CD*}
	Yok	82,46±4,57 ^A
AOK+KK	Var	76,48±3,18 ^{BC}
	Yok	73,39±5,03 ^D
VOK+KK	Var	74,02±3,68 ^{CD}
	Yok	78,58±2,25 ^B

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

4.4.2. Rehidrasyon Kinetiğinin Matematiksel Modellenmesi

Bu doktora tez çalışmasında, farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon kinetiğinin modellenmesinde üç farklı rehidrasyon suyu sıcaklığı (50, 60 ve 70°C) kullanılmıştır. Deneysel verilerin uygunluğu, doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle Peleg, Weibull ve Birinci Derece olmak üzere literatürde yaygın olarak kullanılan modellerle test edilmiştir. Çalışmada deneysel veriler ve modellerden elde edilen tahmini değerler kullanılarak her bir modele ait RMSE, R^2 ve χ^2 değerleri hesaplanmıştır.

4.4.2.1. Peleg Modeli

Peleg kinetik modelinde kullanılan rehidrasyon hız (k_1) ve kapasite sabitleri (k_2), rehidrasyon sürecinin kinetik özelliklerini tanımlayan önemli sabitlerdir. Rehidrasyon hız sabiti (k_1), rehidrasyon sürecinin başlangıcındaki su alım hızını temsil eder ve ne kadar düşükse, rehidrasyon hızı o kadar yüksek demektir (Ricce vd., 2016). Yani, düşük k_1 değeri, materyalin suyu daha hızlı emdiğini ve rehidrasyonun daha hızlı gerçekleştiğini gösterir. Bu parametre, rehidrasyonun ilk aşamalarında suyun materyale nüfuz etme hızını etkileyen faktörlerle ilişkilidir (örneğin, gözeneklilik, yüzey özellikleri, kurutma sırasında oluşan yapısal değişiklikler) (Ricce vd., 2016). Rehidrasyon kapasite sabiti (k_2), materyalin maksimum su tutma kapasitesini temsil eder ve ne kadar düşükse, materyalin su tutma kapasitesi o kadar yüksek demektir (Planinic vd., 2005; Ergün vd., 2016). Yani, düşük k_2 değeri, materyalin daha fazla su alabileceğini ve rehidrasyon kapasitesinin yüksek olduğunu gösterir. Bu parametre, materyalin kurutma sırasında maruz kaldığı yapısal değişiklikler ve hücre duvarlarının su tutma kapasitesini etkileyen faktörlerle

ilişkilidir (Planinic vd., 2005; Ergün vd., 2016). Rehidrasyon sürecinin hızını ve kapasitesini tanımlayan bu iki parametre, kurutma yöntemlerinin ve sıcaklıklarının materyalin rehidrasyon özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılır. Düşük k_1 ve k_2 değerleri, hızlı ve yüksek kapasiteli bir rehidrasyon sürecini ifade eder.

Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulmuş elma örneklerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analizi ile hesaplanan Peleg modeline ait katsayılar ile model uyum durumları Çizelge 4.16'da sunulmuştur. 50°C'de kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon verileri incelendiğinde, farklı kurutma yöntemlerinin k_1 ve k_2 değerleri üzerinde belirgin etkileri olmuştur. $V\dot{I}+VOK+KK$ yöntemi, en düşük k_1 (0,4195) ve k_2 (0,2974) değerleriyle en hızlı ve en yüksek kapasiteli rehidrasyonu sağlamıştır. Bu yöntemi, benzer şekilde düşük k_1 ve k_2 değerleriyle $VOK+KK$ yöntemi takip etmiştir (k_1 : 0,4239, k_2 : 0,2245). Geleneksel KK yöntemi, daha yüksek k_1 (0,5625) ve k_2 (0,2296) değerleriyle rehidrasyon hızının daha yavaş ve kapasitesinin daha düşük olduğunu göstermiştir. Vakum impregnasyon ve ohmik ısıtma kombinasyonları, özellikle $V\dot{I}+VOK+KK$ ve $VOK+KK$ yöntemlerinde, rehidrasyon hızını artırmış ve kapasiteyi yükseltmiştir. Ayrıca, bu yöntemler düşük RMSE ve χ^2 değerleriyle modele en iyi uyumu sağlamıştır. $V\dot{I}+AOK+KK$ yöntemi ise en yüksek k_1 (0,6597) değeriyle rehidrasyon hızının başlangıçta daha düşük olduğunu göstermiş ancak bu yöntemin k_2 değeri (0,3040) kapasite açısından iyi bir performans sergilemiştir. 60°C'de kurutulan elma dilimlerinde, k_1 ve k_2 değerleri, kurutma yöntemine bağlı olarak farklılık göstermiştir. $V\dot{I}+VOK+KK$ yöntemi, en düşük k_1 (0,3096) ve k_2 (0,2987) değerleriyle en hızlı ve en yüksek kapasiteli rehidrasyonu sağlamıştır. Bu yöntemi, benzer şekilde düşük k_1 ve k_2 değerleriyle $VOK+KK$ yöntemi takip etmiştir (k_1 : 0,3732, k_2 : 0,2047). Geleneksel KK yöntemi, daha yüksek k_1 (0,5254) ve k_2 (0,2378) değerleriyle rehidrasyon hızının daha yavaş ve kapasitesinin daha düşük olduğunu göstermiştir. Vakum impregnasyon ve ohmik ısıtma kombinasyonları, özellikle $V\dot{I}+VOK+KK$ yöntemi, düşük RMSE (0,0365) ve χ^2 (0,0022) değerleriyle modele en iyi uyumu sağlamıştır. $V\dot{I}+KK$ yöntemi ise k_2 değerinin (0,5038) yüksek olması nedeniyle kapasite açısından daha düşük bir performans sergilemiştir. Genel olarak, vakum ve ohmik ısıtma kombinasyonları, rehidrasyon hızını ve kapasitesini artırmıştır. 70°C'de kurutulan elma dilimlerinde, rehidrasyon verileri farklı kurutma yöntemlerine göre önemli değişiklikler göstermiştir. $V\dot{I}+VOK+KK$ yöntemi, en düşük k_1 (0,3486) ve k_2 (0,3907) değerleriyle en hızlı ve en yüksek kapasiteli rehidrasyonu sağlamıştır. Bu yöntemi, benzer şekilde düşük k_1 ve k_2 değerleriyle $VOK+KK$ yöntemi

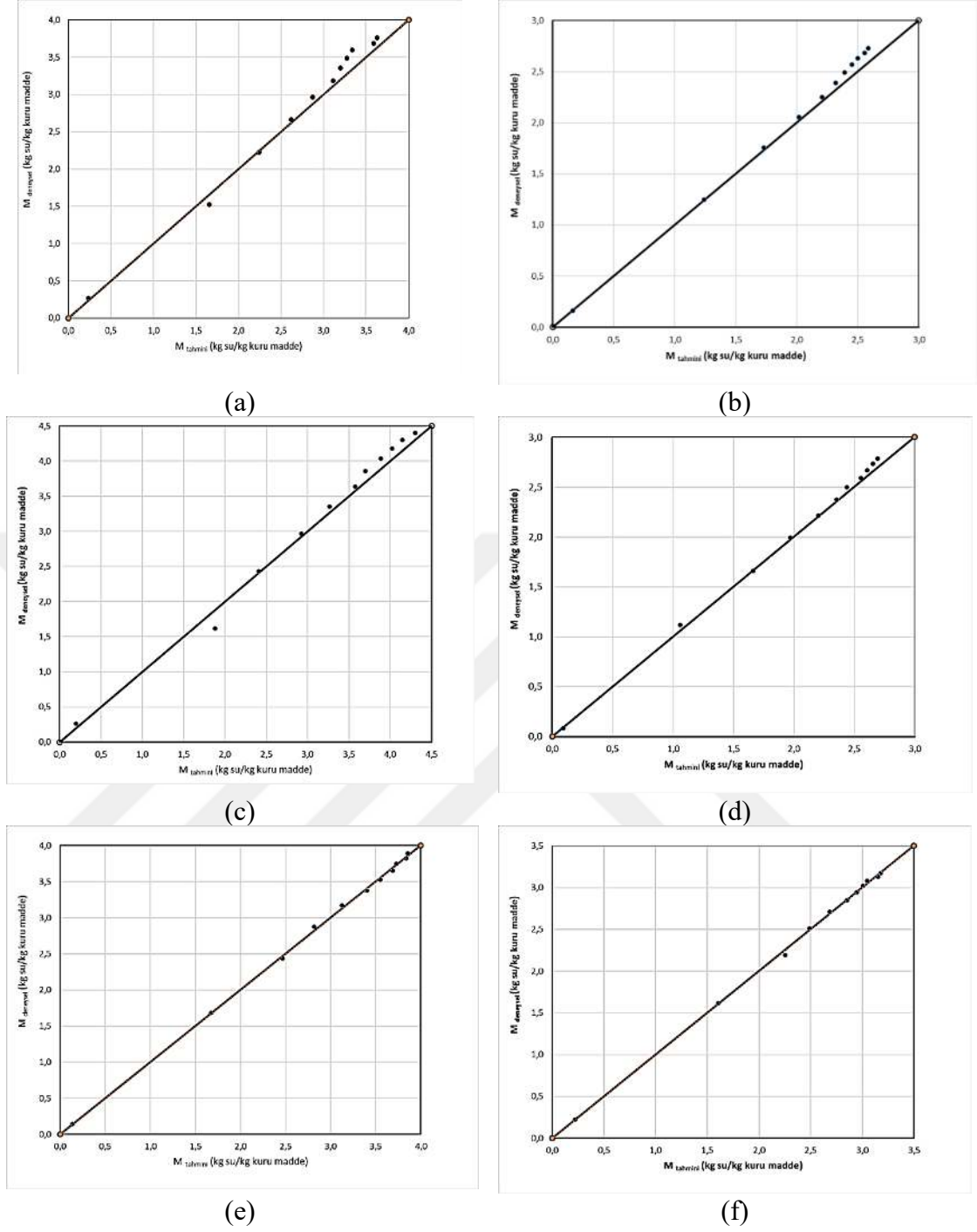
takip etmiştir (k_1 : 0,4248, k_2 : 0,1990). Geleneksel KK yöntemi, daha yüksek k_1 (0,4770) ve k_2 (0,2430) değerleriyle rehidrasyon hızının daha yavaş ve kapasitesinin daha düşük olduğunu göstermiştir. Vİ işlemi ve ohmik ısıtma kombinasyonları, özellikle Vİ+VOK+KK yöntemi, düşük RMSE (0,0341) ve χ^2 (0,0017) değerleriyle modele en iyi uyumu sağlamıştır. AOK+KK yöntemi ise en düşük k_1 (0,2738) değeriyle rehidrasyon hızının başlangıçta daha düşük olduğunu göstermiştir, ancak k_2 değeri (0,2218) kapasite açısından daha sınırlı bir performans sergilemiştir. Genel olarak tüm sıcaklıklarda, Vİ+VOK+KK yöntemi, en düşük k_1 ve k_2 değerleriyle en hızlı ve en yüksek kapasiteli rehidrasyonu sağlamıştır. Bu yöntemi, genellikle VOK+KK yöntemi takip etmiştir. Geleneksel KK yöntemi, daha yüksek k_1 ve k_2 değerleriyle rehidrasyon hızının daha yavaş ve kapasitesinin daha düşük olduğunu göstermiştir. Vİ işlemi ve ohmik ısıtma kombinasyonları, özellikle yüksek sıcaklıklarda, rehidrasyon performansını artırmış ve modele uyumu iyileştirmiştir. Sonuç olarak, vakum ve ohmik ısıtma kombinasyonları, rehidrasyon sürecinde hem hız hem de kapasite açısından üstün performans göstermiştir.

Çizelge 4.16. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analiziyle Peleg kinetik modele göre hesaplanan rehidrasyon hız sabiti değerlerindeki değişim ve modele uyum parametreleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Elektriksel iletkenliğin artışının hedeflendiği vakum impregnasyon işlemi, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma)

Kurutma ve Rehidrasyon Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	k_1^*	k_2^{**}	RMSE	χ^2	R^2
50	KK	0,5625	0,2296	0,0855	0,0126	0,8994
	Vİ+KK	0,5930	0,3330	0,0861	0,0110	0,9998
	AOK+KK	0,5493	0,1864	0,1279	0,0316	0,9963
	Vİ+AOK+KK	0,6597	0,3040	0,0473	0,0034	0,9991
	VOK+KK	0,4239	0,2245	0,0317	0,0018	0,9993
	Vİ+VOK+KK	0,4195	0,2974	0,0248	0,0009	0,9996
60	KK	0,5254	0,2378	0,1053	0,0186	0,9991
	Vİ+KK	0,3942	0,5038	0,4208	0,2589	0,9989
	AOK+KK	0,5006	0,1724	0,1170	0,0280	0,9989
	Vİ+AOK+KK	0,4278	0,2859	0,0609	0,0053	0,9955
	VOK+KK	0,3732	0,2047	0,0666	0,0086	0,9983
	Vİ+VOK+KK	0,3096	0,2987	0,0365	0,0022	0,9993
70	KK	0,4770	0,2430	0,0749	0,0098	0,9964
	Vİ+KK	0,4360	0,3346	0,0926	0,0144	0,9991
	AOK+KK	0,2738	0,2218	0,0861	0,0135	0,9991
	Vİ+AOK+KK	0,4122	0,3426	0,0849	0,0107	0,9991
	VOK+KK	0,4248	0,1990	0,0400	0,0031	0,9990
	Vİ+VOK+KK	0,3486	0,3907	0,0341	0,0017	0,9992

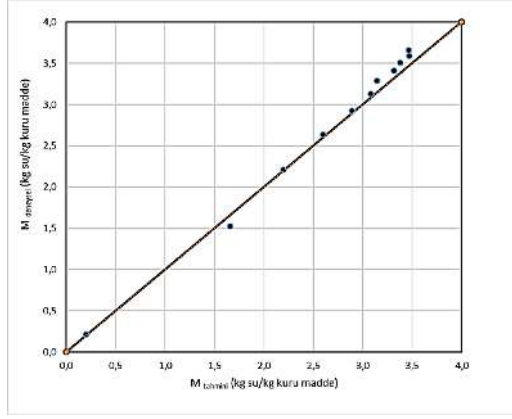
* k_1 : Rehidrasyon hız sabiti (h.kg km/kg su) ** k_2 : Rehidrasyon kapasite sabiti (kg km/kg su)

Farklı yöntemlerle 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri Şekil 4.18’de sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. Farklı yöntemlerle bu sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesiyle elde edilen Peleg Modeli uyum grafikleri, modelin her bir yöntemle oldukça iyi uyum sağladığını göstermektedir. KK yöntemi (Şekil 4.18a), tahmin edilen ve deneysel değerler arasında yüksek bir doğrusal ilişki sergileyerek modelin temel kurutma yöntemlerinde güvenilir olduğunu ortaya koymuştur. Vİ+KK yöntemi (Şekil 4.18b), elektriksel iletkenliğin artırılmasıyla rehidrasyon kapasitesinde iyileşme sağlarken, modelin uyumunun korunduğu görülmüştür. AOK+KK yöntemi (Şekil 4.18c), tahmin edilen ve deneysel değerler arasında güçlü bir uyum sergileyerek Peleg Modeli’nin bu ön kurutma tekniğiyle de geçerli olduğunu göstermiştir. Vİ+AOK+KK yöntemi (Şekil 4.18d), modelin uyumunda benzer bir doğruluk sunmuş ve Vİ işleminin AOK ile kombinasyonunun rehidrasyon davranışını olumlu etkilediği gözlemlenmiştir. VOK+KK yöntemi (Şekil 4.18e), modelin uyumunda yüksek bir doğruluk sergileyerek vakum ortamının rehidrasyon sürecine katkısını vurgulamıştır. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemi (Şekil 4.18f), tahmin edilen ve deneysel değerler arasında en iyi uyumluluklardan birini sunmuş ve bu yöntemin rehidrasyon kapasitesini artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Genel olarak, Peleg Modeli’nin tüm yöntemler için yüksek uyumluluk göstermesi, modelin farklı kurutma ve rehidrasyon süreçlerinde güvenilir bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

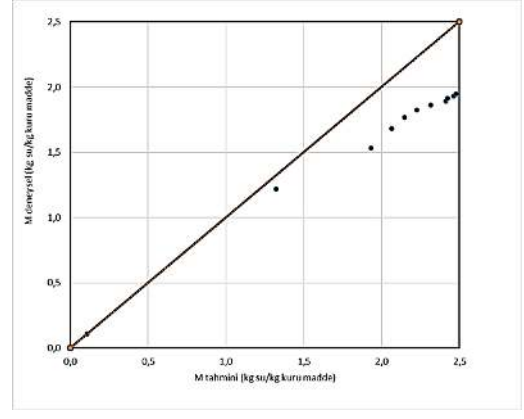


Şekil 4.18. Farklı yöntemlerle 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehirdre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımli ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtımli ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

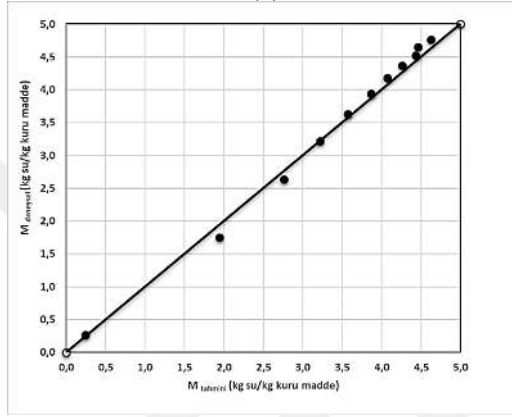
Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri Şekil 4.19’da sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilere göre, Peleg Modeli’nin farklı kurutma ve ön işlem yöntemleriyle uyumu incelendiğinde KK yöntemi (Şekil 19a), modelle oldukça iyi bir uyum göstermiş ve deneysel verilerle tahmin edilen değerler arasında yüksek bir doğruluk sağlanmıştır. Vİ+KK yöntemi (Şekil 19b), modelle uyum açısından KK yöntemine benzer bir performans sergilemiş, ancak yüksek nem içeriği değerlerinde hafif sapmalar gözlenmiştir. AOK+KK yöntemi (Şekil 15c), modelle uyum açısından daha geniş bir dağılım göstermiş ve özellikle orta nem içeriği değerlerinde deneysel ve tahmini veriler arasında farklar oluşmuştur. Vİ+AOK+KK yöntemi (Şekil 19d), modelle uyum açısından daha iyi bir performans sergilemiş ve sapmalar minimum düzeyde kalmıştır. VOK+KK yöntemi (Şekil 19e), modelle oldukça yüksek bir uyum göstermiş ve deneysel verilerle tahmin edilen değerler arasında neredeyse birebir bir ilişki sağlanmıştır. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemi (Şekil 19f), modelle uyum açısından en iyi performansı sergileyen yöntemlerden biri olmuş ve tüm nem içeriği aralıklarında deneysel ve tahmini değerler arasında yüksek bir doğruluk sağlanmıştır. Genel olarak, Peleg Modeli’nin tüm yöntemlerle uyumlu olduğu, ancak VOK+KK ve Vİ+VOK+KK işlemlerinin modelle en iyi uyumu sağladığı belirlenmiştir.



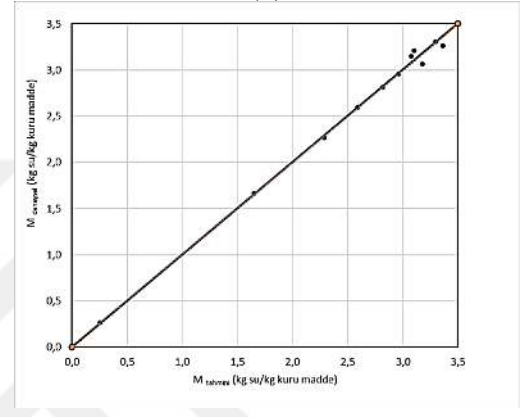
(a)



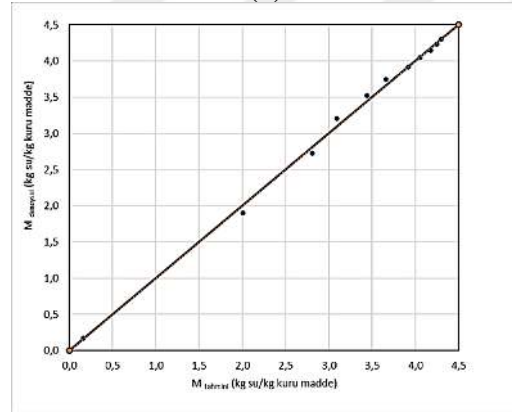
(b)



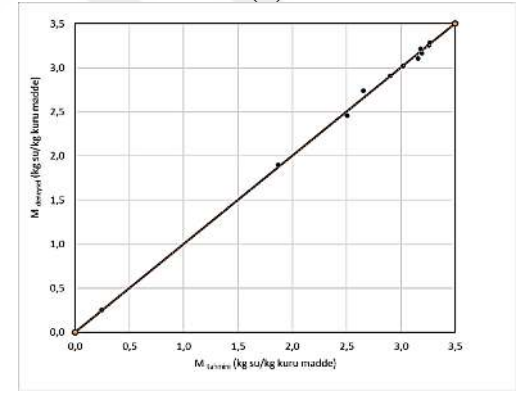
(c)



(d)



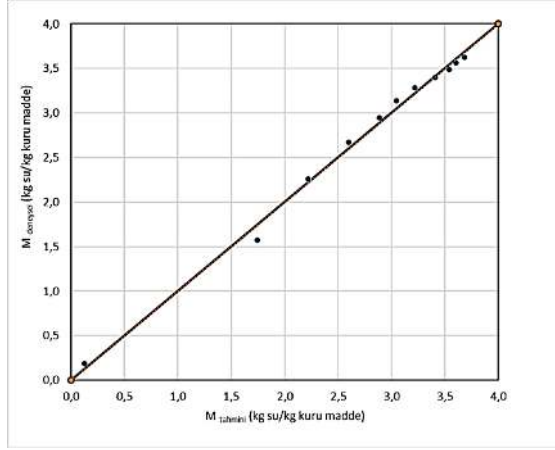
(e)



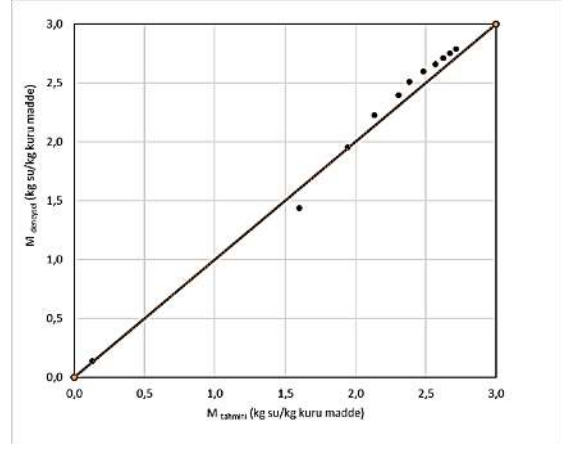
(f)

Şekil 4.19. Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

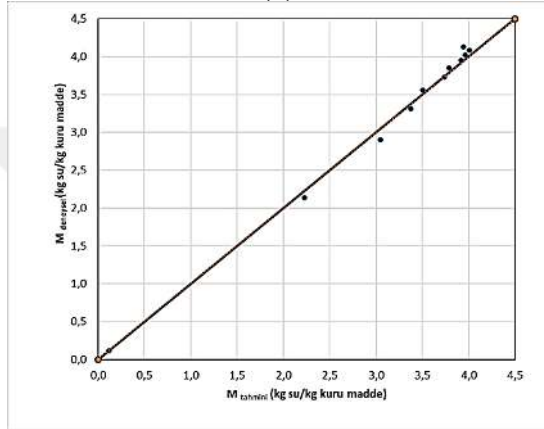
Farklı yöntemlerle 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri Şekil 4.20’de sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon verilerinin Peleg Modeli’ne uyumluluğu, kullanılan kurutma ve ön işlem yöntemlerine göre farklılık göstermiştir. KK yöntemi (Şekil 4.20a), modelle oldukça iyi bir uyum sergileyerek, geleneksel kurutma yönteminin rehidrasyon kinetiğini doğru bir şekilde temsil edebildiğini göstermiştir. Vİ+KK yöntemi (Şekil 4.20b), elektriksel iletkenliğin artırılmasıyla rehidrasyon davranışında iyileşme sağlamış ve modelle uyum açısından başarılı sonuçlar vermiştir. AOK+KK yöntemi (Şekil 4.20c), rehidrasyon kinetiğinde belirgin bir değişiklik yaratmış ve modelle uyumlu bir şekilde sonuçlanmıştır. Vİ+AOK+KK yöntemi (Şekil 4.20d), iki işlemin kombinasyonunun rehidrasyon davranışını etkilediğini ve modelle uyumun diğer yöntemlere benzer şekilde yüksek olduğunu göstermiştir. VOK+KK yöntemi (Şekil 4.20e), vakum etkisinin rehidrasyon kinetiğini olumlu yönde etkilediğini ve modelle uyumun güçlü olduğunu ortaya koymuştur. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemi (Şekil 4.20f), en karmaşık işlem kombinasyonu olmasına rağmen, modelle oldukça iyi bir uyum göstermiştir. Tüm yöntemler genel olarak Peleg Modeli ile yüksek uyumluluk sergilemiş, ancak ön işlemler ve kurutma yöntemlerinin rehidrasyon kinetiği üzerinde farklı etkiler yarattığı gözlemlenmiştir.



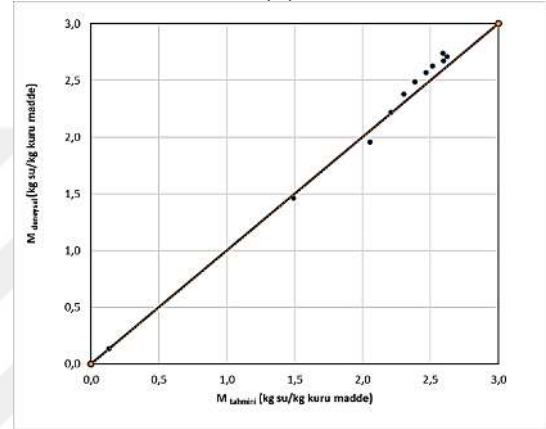
(a)



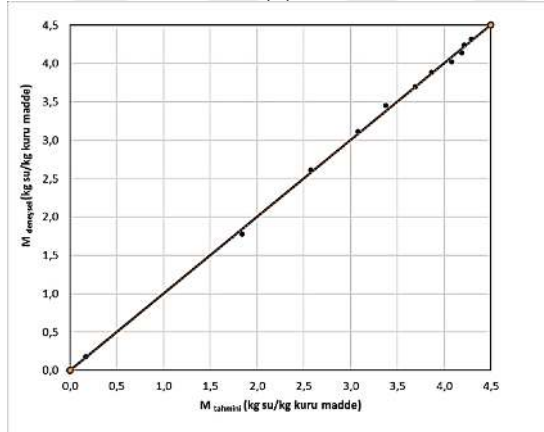
(b)



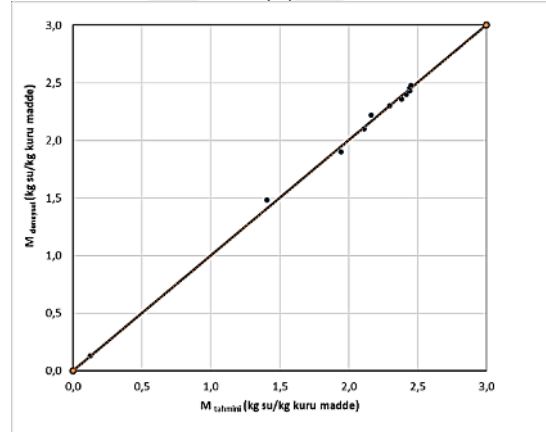
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.20. Farklı yöntemlerle 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Peleg Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

Gómez vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Granny Smith elma dilimleri 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulmuş, rehidrasyon davranışları belirlenmiştir. Kurutulmuş numuneler, oda sıcaklığı (20°C) ve kaynama noktasına yakın bir sıcaklık (98°C) olmak üzere iki ayrı sıcaklıkta 2 saat boyunca rehidrasyona bırakılmış ve her 2 dakikada bir alınan ölçümlerle rehidrasyon kinetikleri değerlendirilmiştir. Deneysel veriler Peleg ve Weibull modellerinin hem 20°C’de hem de 98°C’de yapılan rehidrasyon işlemlerinin kinetiğini modellemede yüksek bir uyuma sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, her iki sıcaklıkta da rehidrasyonun belirli bir hızla ilerlediğini ve su alım mekanizmasının bu modellerin öngörülerıyla örtüştüğünü göstermektedir. Ayrıca, sıcaklık değişiminin rehidrasyon hızını ve kapasitesini etkilediği, ancak model tipinin sıcaklıktan bağımsız olarak süreci doğru şekilde yansıtabildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, Peleg ve Weibull modelleri hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda rehidrasyonun karakterizasyonu için güvenilir yaklaşım sunabilir.

4.4.2.2. Weibull Modeli

Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulmuş elma örneklerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analizi ile hesaplanan Weibull modeline ait katsayılar ile model uyum durumları Çizelge 4.17’de sunulmuştur. Weibull kinetik modeline göre hesaplanan α (şekil parametresi) ve β (hız parametresi) değerleri, farklı kurutma yöntemleri ve sıcaklıkların rehidrasyon sürecine etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Şekil parametresi (α), rehidrasyon eğrisinin şeklini ve su alım davranışını tanımlarken, hız parametresi (β), rehidrasyon hızını temsil eder ve düşük β değerleri, daha yavaş bir rehidrasyon sürecini ifade ederken, yüksek β değerleri daha hızlı bir rehidrasyonu gösterir (Ricca vd., 2016). Araştırma bulguları, kurutma yöntemi ve sıcaklığının rehidrasyon kinetiği üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. 50°C’de kurutulan elma dilimlerinde, farklı kurutma yöntemlerinin rehidrasyon kinetiği üzerinde belirgin etkileri olduğu görülmüştür. VI+VOK+KK yöntemi, en düşük RMSE (0,0432) ve χ^2 (0,0028) değerleriyle Weibull modeline en iyi uyumu sağlamıştır. Bu yöntemin β değeri (1,8086), rehidrasyon hızının diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. VI+AOK+KK yöntemi ise en yüksek α (0,9601) değeriyle rehidrasyon eğrisinin daha keskin bir şekil aldığını ve su alım davranışının farklılaştığını göstermiştir. Geleneksel KK yöntemi, daha yüksek RMSE (0,0711) ve χ^2 (0,0085) değerleriyle modele uyum açısından daha düşük bir performans sergilemiştir. Ayrıca, bu yöntemin β değeri

(2,2843), rehidrasyon hızının diğer yöntemlere göre daha yavaş olduğunu göstermektedir. Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları, özellikle Vİ+VOK+KK ve VOK+KK yöntemlerinde, bu sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon hızını artırmış ve modele uyumu iyileştirmiştir. 60°C’de kurutulan elma dilimlerinde, rehidrasyon kinetiği üzerindeki kurutma yönteminin etkileri daha belirgin hale gelmiştir. Bu sıcaklıkta, Vİ+VOK+KK yöntemi düşük RMSE (0,0642) ve χ^2 (0,0064) değerleriyle modele iyi bir uyum sağlamış ve β değeri (1,4880) ile rehidrasyon hızının yüksek olduğunu göstermiştir. Vİ+AOK+KK yöntemi ise en düşük α (0,7692) değeriyle rehidrasyon eğrisinin daha düz bir şekil aldığını ve su alım davranışının daha yavaş gerçekleştiğini göstermiştir. Geleneksel KK yöntemi, α (0,8624) ve β (2,0257) değerleriyle rehidrasyon hızının diğer yöntemlere göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları, özellikle Vİ+VOK+KK yöntemi, rehidrasyon hızını artırmış ve modele uyumu iyileştirmiştir. Ancak VOK+KK yöntemi, yüksek RMSE (0,1096) ve χ^2 (0,0230) değerleriyle modele uyum açısından daha düşük bir performans sergilemiştir. 70°C’de, kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon kinetiği üzerindeki kurutma yönteminin etkileri daha da belirgin hale gelmiştir. Vİ+AOK+KK yöntemi, en düşük RMSE (0,0481) ve χ^2 (0,0047) değerleriyle modele en iyi uyumu sağlamış ve β değeri (1,2747) ile rehidrasyon hızının yüksek olduğunu göstermiştir. Bu yöntemi, düşük RMSE (0,0533) ve χ^2 (0,0039) değerleriyle Vİ+VOK+KK yöntemi takip etmiştir. VOK+KK yöntemi ise en yüksek α (0,9374) değeriyle rehidrasyon eğrisinin daha keskin bir şekil aldığını göstermiştir. Geleneksel KK yöntemi, daha yüksek RMSE (0,0975) ve χ^2 (0,0161) değerleriyle modele uyum açısından daha düşük bir performans sergilemiştir. Ayrıca, β değeri (2,2033), rehidrasyon hızının diğer yöntemlere göre daha yavaş olduğunu göstermiştir. Bu sıcaklıkta, Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları (yani Vİ+AOK+KK ve Vİ+VOK+KK), rehidrasyon hızını artırmış ve modele uyumu iyileştirmiştir. Genel olarak tüm kurutma sıcaklıklarda, Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları (özellikle Vİ+VOK+KK ve Vİ+AOK+KK), en düşük RMSE ve χ^2 değerleriyle modele en iyi uyumu sağlamış ve yüksek rehidrasyon hızları (β) ile dikkat çekmiştir. Geleneksel KK yöntemi, daha yüksek β değerleriyle rehidrasyon hızının daha yavaş olduğunu ve modele uyum açısından daha düşük bir performans sergilemiştir. Sıcaklık arttıkça, rehidrasyon hızı genel olarak artmış ancak farklı yöntemlerin performansları değişiklik göstermiştir. Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları, rehidrasyon sürecinde hem hız hem de modele uyum açısından üstün performans göstermiştir.

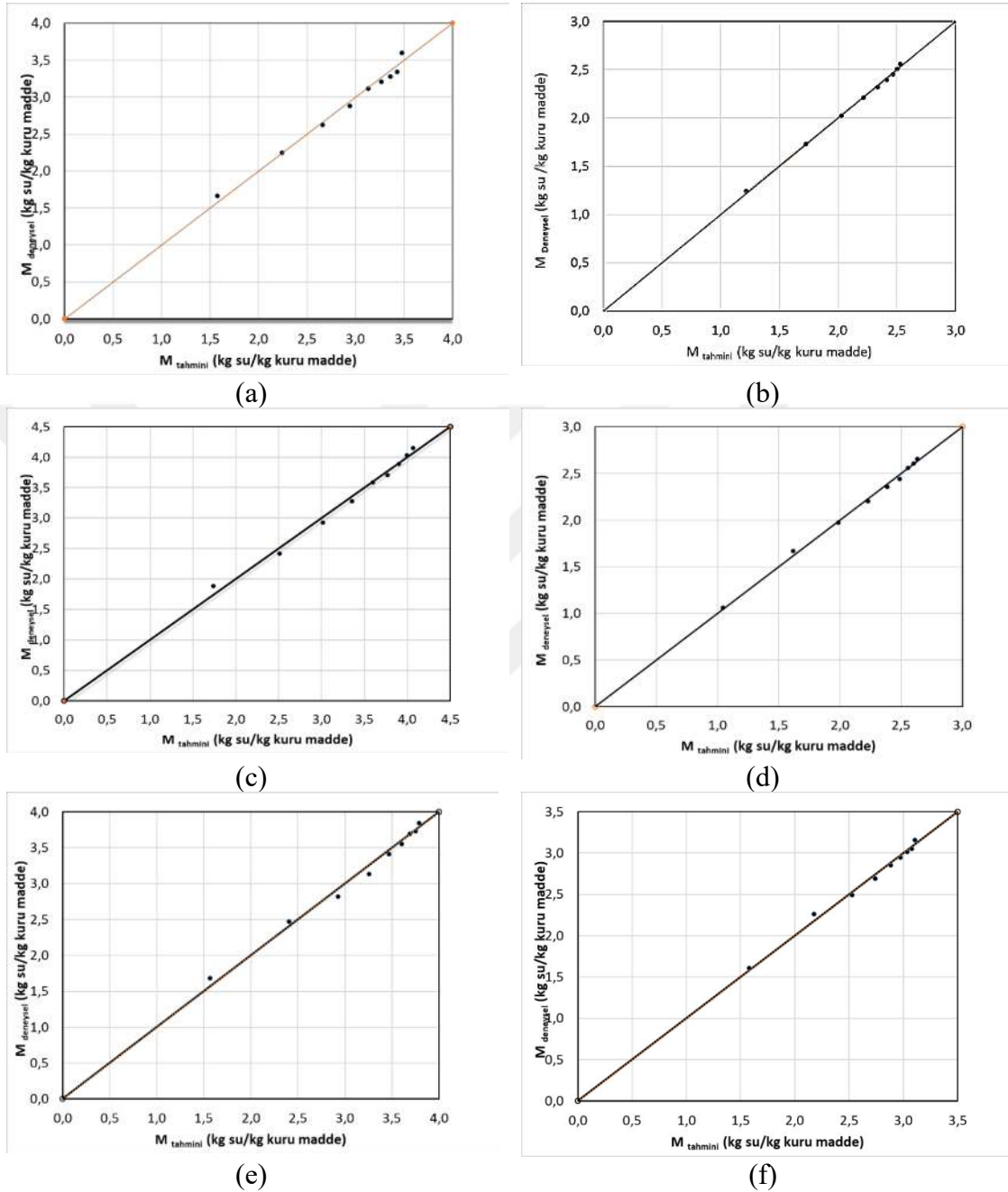
Çizelge 4.17. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analiziyle Weibull kinetik modele göre hesaplanan rehidrasyon hız sabiti değerlerindeki değişim ve modele uyum parametreleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Elektriksel iletkenliğin artışının hedeflendiği vakum impregnasyon işlemi, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma)

Kurutma ve Rehidrasyon Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	α^*	β^{**}	RMSE	χ^2	R ²
50	KK	0,8327	2,2843	0,0711	0,0085	0,9384
	Vİ+KK	0,8570	1,9216	0,0166	0,0004	0,9917
	AOK+KK	0,8220	2,5112	0,0818	0,0128	0,9824
	Vİ+AOK+KK	0,9601	2,2723	0,0277	0,0011	0,9932
	VOK+KK	0,9594	2,1287	0,0809	0,0114	0,9913
	Vİ+VOK+KK	0,8209	1,8086	0,0432	0,0028	0,9963
60	KK	0,8624	2,0257	0,0589	0,0069	0,9863
	Vİ+KK	0,8009	1,4974	0,0579	0,0046	0,9572
	AOK+KK	0,8647	2,4451	0,0653	0,0088	0,9902
	Vİ+AOK+KK	0,7692	1,8057	0,0737	0,0086	0,9954
	VOK+KK	0,8663	2,0771	0,1096	0,0230	0,9837
	Vİ+VOK+KK	0,8491	1,4880	0,0642	0,0064	0,9812
70	KK	0,8203	2,2033	0,0975	0,0161	0,9834
	Vİ+KK	0,6847	1,4243	0,0594	0,0051	0,9657
	AOK+KK	0,8458	1,3603	0,0650	0,0125	0,9605
	Vİ+AOK+KK	0,7062	1,2747	0,0481	0,0047	0,9863
	VOK+KK	0,9374	2,2708	0,0908	0,0157	0,9877
	Vİ+VOK+KK	0,9003	1,3864	0,0533	0,0039	0,9727

* α : Model şekil parametresi ve ** β : Model hız parametresi (1/h)

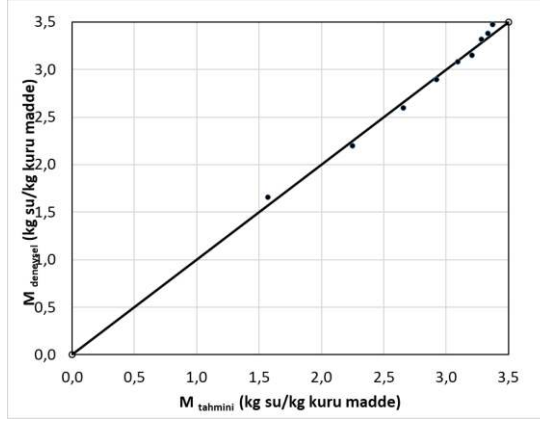
Farklı yöntemlerle 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum grafikleri Şekil 4.21’de sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin Weibull Modeli’ne uyum grafikleri incelendiğinde, tüm yöntemlerin modelle yüksek bir uyum gösterdiği görülmektedir. KK yöntemi (Şekil 4.21a), tahmin edilen ve deneysel değerler arasında oldukça iyi bir doğrusal ilişki sergilemiştir. Vİ+KK yöntemi (Şekil 4.21b), elektriksel iletkenliğin artırılmasıyla rehidrasyon performansını iyileştirmiş ve modelle uyum açısından benzer bir doğruluk sağlamıştır. AOK+KK yöntemi (Şekil 4.21c), tahmin edilen ve deneysel değerler arasında daha geniş bir veri aralığında uyum göstermiştir. Vİ+AOK+KK yöntemi (Şekil 4.21d), modelle uyum açısından diğer yöntemlere benzer bir performans sergilemiş, ancak düşük nem içeriklerinde hafif sapmalar gözlenmiştir. VOK+KK yöntemi (Şekil 4.21e), Weibull Modeli’ne en yüksek uyumu sağlayan yöntemlerden biri olarak dikkat çekmiştir. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemi (Şekil 4.21f), hem geniş veri aralığında hem de yüksek

doğrulukla modelle uyum göstermiştir. Genel olarak, tüm yöntemler Weibull Modeli'ne yüksek uyum göstermiş olsa da ohmik ısıtma ve vakum işlemlerinin kombinasyonu, modelle uyumu optimize ederek rehidrasyon davranışını daha iyi açıklamıştır.

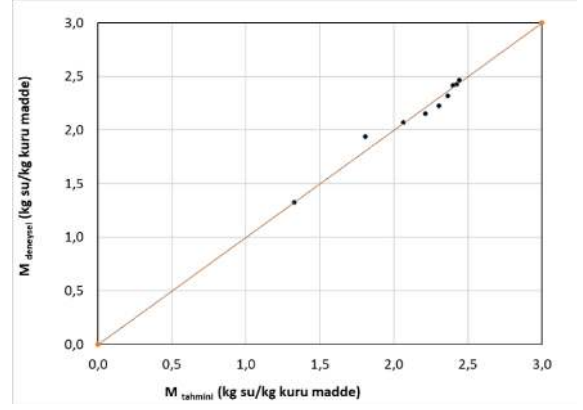


Şekil 4.21. Farklı yöntemlerle 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

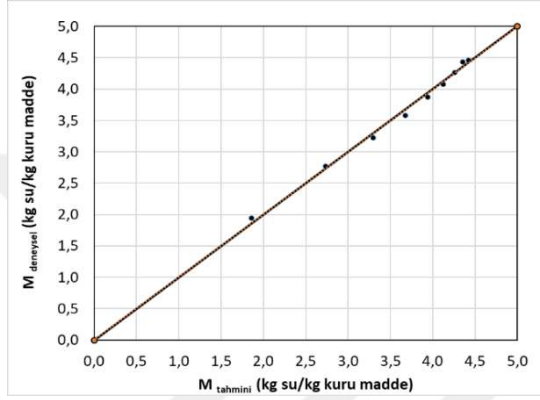
Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum grafikleri Şekil 4.22’de sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon verilerinin Weibull Modeli’ne uyumluluğu, farklı kurutma ve ön işlem yöntemleri açısından incelendiğinde, tüm yöntemlerin modele yüksek uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. KK yönteminde (Şekil 4.22a), deneysel verilerin tahmin edilen değerlerle oldukça iyi bir uyum sağladığı görülmüştür. Vİ+KK yöntemi (Şekil 4.22b), elektriksel iletkenliğin artırılmasıyla rehidrasyon kapasitesini iyileştirmiş ve Weibull Modeli’ne uyum açısından başarılı bir sonuç vermiştir. AOK+KK yöntemi (Şekil 4.22c), model uyumunda diğer yöntemlere benzer bir performans sergilemiştir. Vİ+AOK+KK yöntemi (Şekil 4.22d), hem deneysel hem de tahmini değerler arasında güçlü bir korelasyon göstermiştir. VOK+KK yöntemi (Şekil 4.22e), Weibull Modeli’ne uyum açısından en yüksek doğruluğu sağlayan yöntemlerden biri olmuştur. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemi (Şekil 4.22f), hem Vİ hem de VOK işlemlerinin sinerjik etkisiyle model uyumunda oldukça başarılı bir sonuç vermiştir. Genel olarak, tüm yöntemler Weibull Modeli’ne yüksek uyum göstermiş olsa da ön işlemler ve kurutma yöntemlerinin kombinasyonu, rehidrasyon davranışını ve model uyumunu olumlu yönde etkilemiştir.



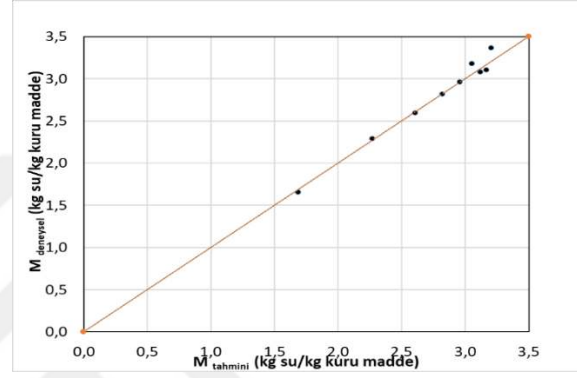
(a)



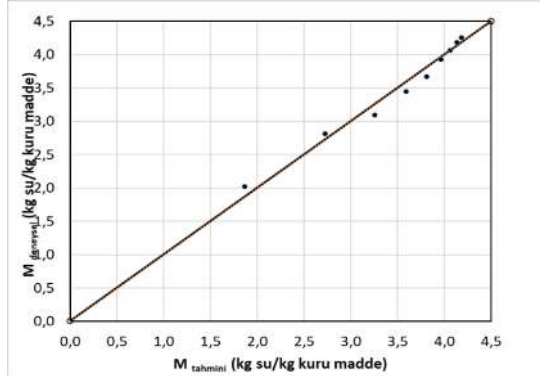
(b)



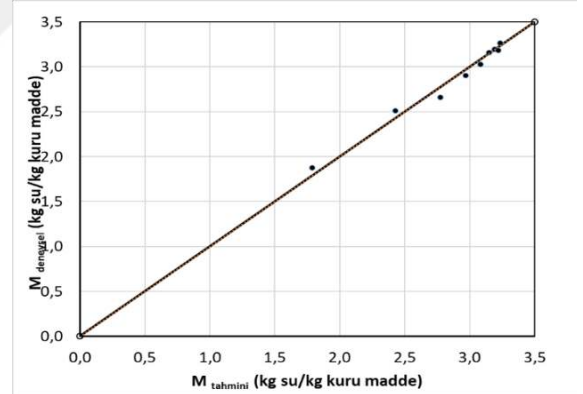
(c)



(d)



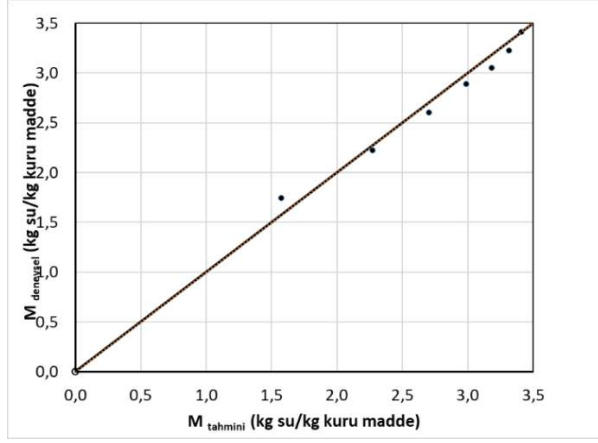
(e)



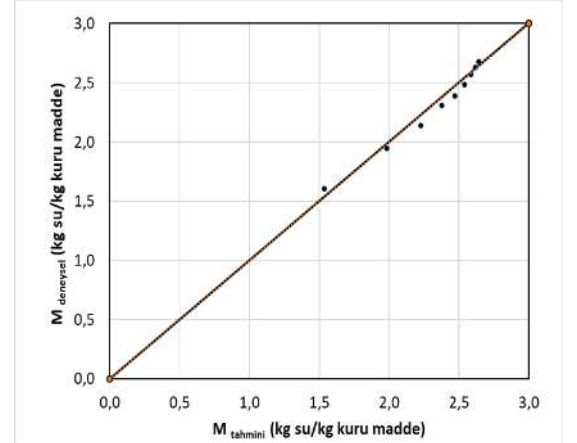
(f)

Şekil 4.22. Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

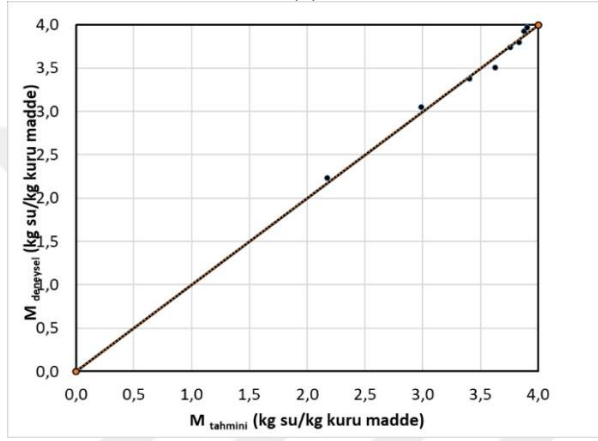
Farklı yöntemlerle 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum grafikleri Şekil 4.23’te sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin Weibull Modeli’ne uyumluluğu, farklı kurutma ve ön işlem yöntemleri açısından değerlendirildiğinde, tüm yöntemlerin modele yüksek uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. KK yöntemi (Şekil 4.23a), deneysel ve tahmini değerler arasında güçlü bir ilişki sergileyerek Weibull Modeli’ne iyi bir uyum sağlamıştır. Vİ+KK yöntemi (Şekil 4.23b), KK yöntemine benzer şekilde yüksek bir uyum göstermiş, ancak deneysel verilerde daha az yayılma ile daha tutarlı bir dağılım sergilemiştir. AOK+KK yöntemi (Şekil 4.23c), Weibull Modeli’ne uyum açısından diğer yöntemlere kıyasla daha geniş bir veri aralığı sunmuş ve tahmin doğruluğunu artırmıştır. Vİ+AOK+KK yöntemi (Şekil 4.23d), deneysel ve tahmini değerler arasında oldukça iyi bir uyum sağlamış, ancak bazı noktalarda hafif sapmalar gözlemlenmiştir. VOK+KK yöntemi (Şekil 4.23e), Weibull Modeli’ne en yüksek uyumu sağlayan yöntemlerden biri olmuş, deneysel ve tahmini değerler neredeyse birebir örtüşmüştür. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemi (Şekil 4.23f), deneysel verilerin tahmini değerlere en yakın olduğu yöntemlerden biri olarak dikkat çekmiştir. Genel olarak, tüm yöntemler Weibull Modeli’ne yüksek uyum göstermiş olsa da VOK ve Vİ sonrası VOK işlemleri, tahmin doğruluğu açısından diğer yöntemlere göre bir adım öne çıkmıştır.



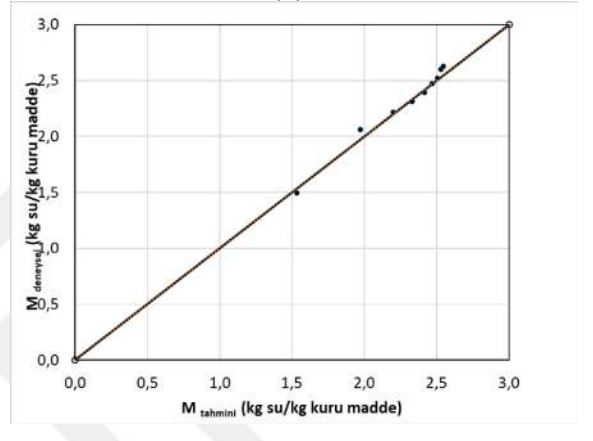
(a)



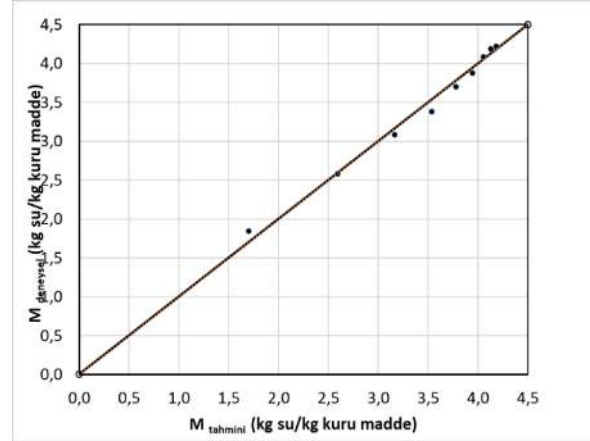
(b)



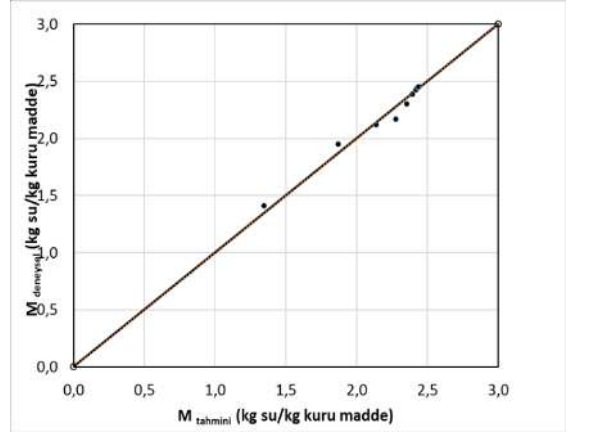
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.23. Farklı yöntemlerle 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Weibull Modeli’ne ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

Rehidrasyon kinetiğinin modellenmesinde Weibull Modeli, birçok araştırmacı tarafından en iyi yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Ruiz Diaz vd., 2003; Garcia Pascual vd., 2006; Marquez vd., 2009). Bu modelin sabitlerinden α değeri modelin şekil parametresini, β değeri ise hız parametresini ifade etmektedir. Literatürde, düşük β değerlerinin rehidrasyon hızını artırdığı belirtilmiştir (Athanasia ve Adamopoulos, 2009). Noshad vd. (2012), farklı yöntemlerle kurutulmuş ayva dilimlerini rehidrasyon işlemine tabi tutmuş ve kullandıkları dört model arasında rehidrasyon eğrilerini en iyi açıklayan modelin Weibull Modeli olduğunu rapor etmişlerdir. Sonuç olarak, Weibull Modeli, rehidrasyon kinetiğini açıklamada yaygın olarak kullanılan ve güvenilir sonuçlar veren bir modeldir. Modelin parametreleri, rehidrasyon sürecinin hızını ve şeklini anlamada önemli bilgiler sunmaktadır.

4.4.2.3. Birinci Dereceden Kinetik Model

Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulmuş elma örneklerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analizi ile hesaplanan Birinci Dereceden Kinetik Model'ine ait katsayılar ile model uyum durumları Çizelge 4.18'de sunulmuştur. Birinci Dereceden Kinetik Model'de hesaplanan k (hız parametresi), rehidrasyon sürecinin hızını temsil eder ve yüksek değerler, rehidrasyonun daha hızlı gerçekleştiğini gösterirken, düşük değerler daha yavaş bir rehidrasyon sürecini ifade eder (Ricce vd., 2016). 50°C'de kurutulan elma dilimlerinde, farklı kurutma yöntemlerinin k değeri ve modele uyum parametreleri üzerinde belirgin etkileri olmuştur. Vİ+KK yöntemi, en yüksek k değeri (0,4424) ile rehidrasyon hızının en yüksek olduğu yöntemi temsil etmiş ve ayrıca düşük RMSE (0,0823) ve χ^2 (0,0100) değerleriyle modele iyi bir uyum sağlamıştır. AOK+KK yöntemi de yüksek k değeri (0,4293) ve düşük RMSE (0,0368) ile iyi bir performans göstermiştir. Geleneksel KK yöntemi, daha düşük k değeri (0,3863) ile rehidrasyon hızının daha yavaş olduğunu göstermiştir. VOK+KK yöntemi ise en düşük k değeri (0,0240) ve en yüksek RMSE (0,4998) ile rehidrasyon hızının en düşük olduğu ve modele uyumun zayıf olduğu bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları (özellikle Vİ+KK ve AOK+KK) rehidrasyon hızını artırmış ve modele uyumu iyileştirmiştir. 60°C'de kurutulan elma dilimlerinde, k değeri ve modele uyum parametreleri, kurutma yöntemine bağlı olarak farklılık göstermiştir. Vİ+AOK+KK yöntemi, en yüksek k değeri (0,5661) ile rehidrasyon hızının en yüksek olduğu yöntemi temsil etmiş ancak, bu yöntemin RMSE (0,1221) ve χ^2 (0,0242) değerleri, modele uyum

açısından diğer yöntemlere göre daha düşük bir performans sergilemiştir. Geleneksel KK yönteminde, orta düzeyde bir k değeri (0,4350) ile rehidrasyon hızı diğer yöntemlere kıyasla daha düşük olmuştur. Bu sıcaklıkta, VOK+KK yöntemi ise benzer bir k değeri (0,4359) ile rehidrasyon hızında geleneksel yöntemle yakın bir performans sergilemiştir. AOK+KK yöntemi, düşük RMSE (0,1410) ve χ^2 (0,0406) değerleriyle modele iyi bir uyum sağlamış ve rehidrasyon hızında dengeli bir performans göstermiştir. 70°C’de kurutulan elma dilimlerinde, k değeri ve modele uyum parametreleri, sıcaklığın artışıyla birlikte daha belirgin hale gelmiştir. Vİ+AOK+KK yöntemi, en yüksek k değeri (0,6570) ile rehidrasyon hızının en yüksek olduğu yöntemi temsil etmiş ve ayrıca düşük RMSE (0,0736) ve χ^2 (0,0079) değerleriyle modele en iyi uyumu sağlamıştır. AOK+KK yöntemi de yüksek k değeri (0,6180) ile rehidrasyon hızında iyi bir performans göstermiştir. Geleneksel KK yöntemi, daha düşük k değeri (0,3893) ile rehidrasyon hızının diğer yöntemlere göre daha yavaş olduğunu göstermiştir. VOK+KK yöntemi ise orta düzeyde bir k değeri (0,4385) ile rehidrasyon hızında dengeli bir performans sergilemiştir. Bu sıcaklıkta Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları (özellikle Vİ+AOK+KK ve AOK+KK) rehidrasyon hızını artırmış ve modele uyumu iyileştirmiştir. Genel olarak, tüm sıcaklıklarda, Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları (Vİ+AOK+KK ve AOK+KK), en yüksek k değerleriyle rehidrasyon hızını artırmış ve düşük RMSE ile modele iyi bir uyum sağlamıştır. Daha düşük k değerlerine sahip geleneksel KK yönteminin rehidrasyon hızı daha yavaş olmuş ve modele uyum açısından daha düşük bir performans sergilemiştir. Sıcaklık arttıkça, tüm yöntemlerde rehidrasyon hızının genel olarak arttığı, ancak farklı yöntemlerin performanslarının değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Vİ işlemi ile ohmik ısıtmalı ön kurutma kombinasyonları, rehidrasyon sürecinde hem hız hem de modele uyum açısından üstün performans göstermiştir.

Çizelge 4.18. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda elde edilen rehidrasyon verilerinin doğrusal olmayan regresyon analiziyle Birinci Dereceden Kinetik Model'e göre hesaplanan rehidrasyon hız sabiti değerlerindeki değişim ve modele uyum parametreleri (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Elektriksel iletkenliğin artışının hedeflendiği vakum impregnasyon işlemi, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma)

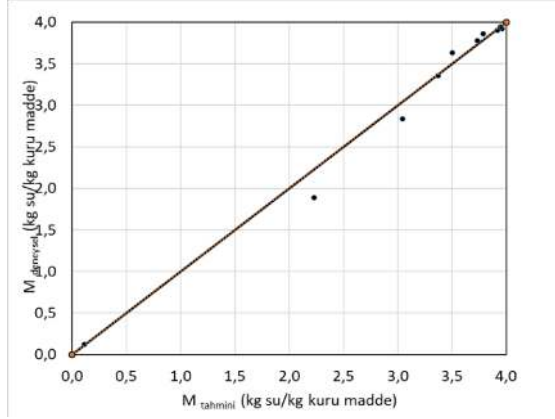
Kurutma ve Rehidrasyon Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	k*	RMSE	χ^2	R ²
50	KK	0,3863	0,1356	0,0310	0,8716
	Vİ+KK	0,4424	0,0823	0,0100	0,9951
	AOK+KK	0,4293	0,0368	0,0020	0,9963
	Vİ+AOK+KK	0,3473	0,1611	0,0501	0,9878
	VOK+KK	0,0240	0,4998	0,1157	0,9291
	Vİ+VOK+KK	0,4388	0,1426	0,0328	0,9957
60	KK	0,4350	0,1023	0,0208	0,9880
	Vİ+KK	0,5121	0,1287	0,0242	0,9571
	AOK+KK	0,3641	0,1410	0,0406	0,9912
	Vİ+AOK+KK	0,4170	0,1669	0,0537	0,8695
	VOK+KK	0,4359	0,1578	0,0481	0,9730
	Vİ+VOK+KK	0,5661	0,1221	0,0242	0,9054
70	KK	0,3893	0,1619	0,0456	0,9733
	Vİ+KK	0,4309	0,2020	0,0616	0,9659
	AOK+KK	0,6180	0,1325	0,0477	0,9459
	Vİ+AOK+KK	0,5177	0,1564	0,0498	0,9476
	VOK+KK	0,4385	0,1103	0,0235	0,9837
	Vİ+VOK+KK	0,6570	0,0736	0,0079	0,9723

*k: Model hız parametresi (1/h)

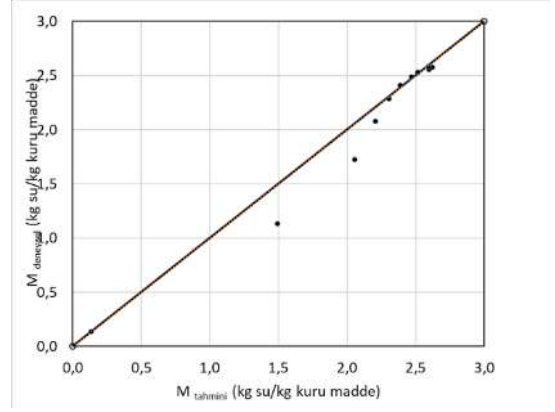
Farklı yöntemlerle 50°C'de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Kinetik Model'e ait uyum grafikleri Şekil 4.24'te sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. KK yöntemiyle elde edilen verilerin modelle oldukça iyi bir uyum sağlamıştır. Veriler, doğrusal çizgiye yakın bir dağılım sergilemiş ve modelin tahmin gücünün yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Vİ+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimlerinin modelle uyumu, yalnızca KK yöntemine kıyasla biraz daha düşük olmuş ancak, genel olarak modelin tahmin gücü kabul edilebilir düzeyde belirlenmiştir. AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerin modelle uyumu da oldukça iyidir. Veriler, doğrusal çizgiye yakın bir dağılım sergilemiş ve modelin bu yöntem için uygun olduğunu ortaya koymuştur. Vİ+AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerin modelle uyumu, AOK+KK yöntemine kıyasla biraz daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, Vİ işleminin su içeriği tahmininde modelin doğruluğunu bir miktar etkileyebileceğini işaret

etmektedir. VOK+KK yöntemiyle kurutulan örnekler modelle oldukça iyi bir uyum sağlamış ve veriler, doğrusal çizgiye yakın bir dağılım sergilemiştir. Vİ+VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerin modelle uyumu, VOK+KK yöntemine kıyasla biraz daha düşük düşük olmuş ancak, genel olarak modelin tahmin gücü kabul edilebilir düzeyde belirlenmiştir. Bulgular, Birinci Dereceden Model'in farklı kurutma ve ön işlem yöntemleri için genel olarak iyi bir uyum sağladığını göstermektedir. Ancak, Vİ işlemi sonrası yapılan kurutma yöntemlerinde model uyumu bir miktar azalmıştır. Bu durum, Vİ işleminin elma dilimlerinin rehidrasyon davranışını etkileyerek modelin doğruluğunu sınırlayabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, tüm yöntemler için modelin tahmin gücü genel olarak kabul edilebilir düzeydedir ve doğrusal çizgiye yakınlık, modelin güvenilirliğini desteklemektedir.

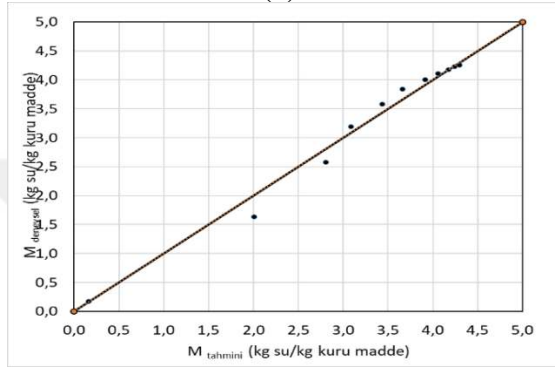




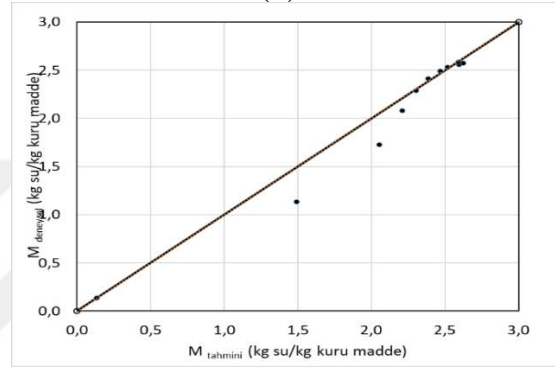
(a)



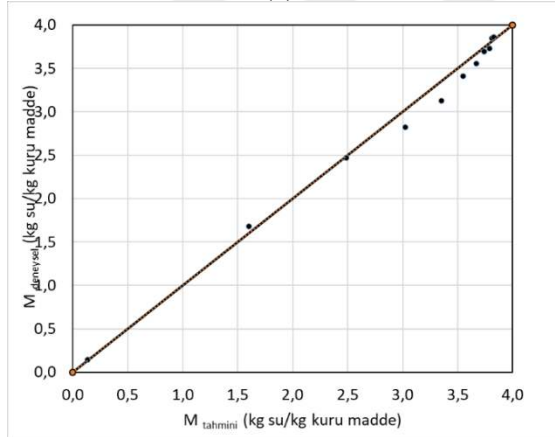
(b)



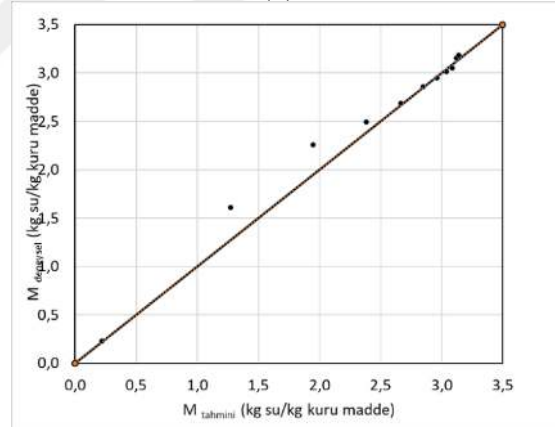
(c)



(d)



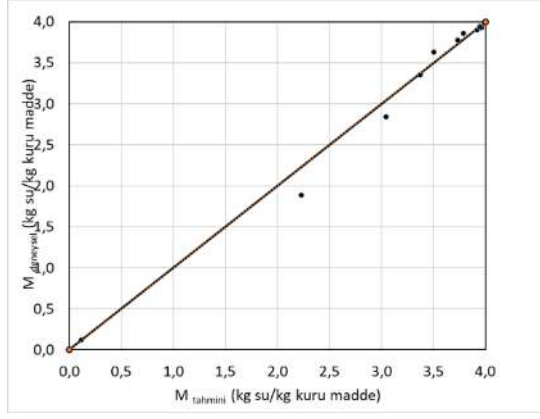
(e)



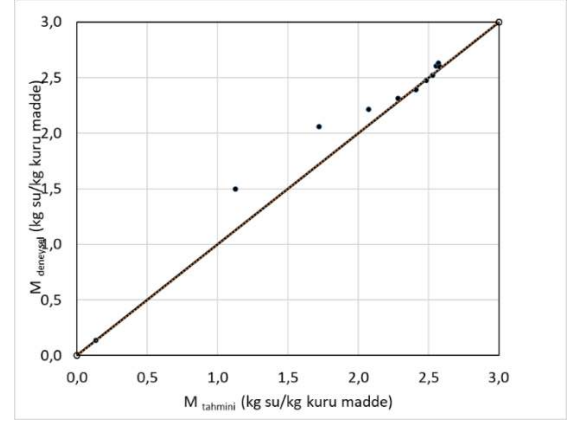
(f)

Şekil 4.24. Farklı yöntemlerle 50°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Kinetik Model’e ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

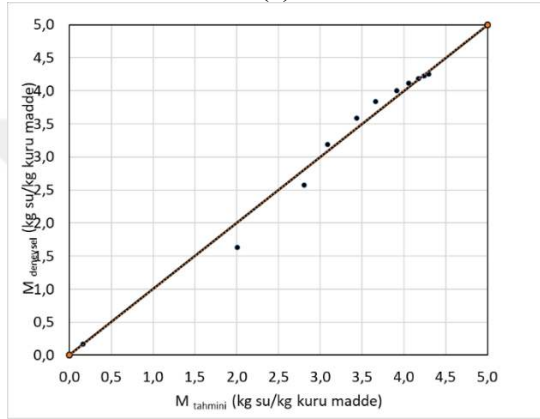
Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Model’e ait uyum grafikleri Şekil 4.25’te sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. KK yönteminde, model deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum sağlamış ve veriler doğrusal çizgiye yakın bir dağılım sergilememiştir. Bu da KK yönteminin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir. Vİ+KK yönteminde ise veriler modelle oldukça iyi bir uyum sağlamış ancak bazı noktalarda hafif sapmalar gözlenmiştir. Bu sapmalar, Vİ işleminin rehidrasyon davranışını etkileyebileceğine işaret etmektedir. AOK+KK yönteminde veriler modelle oldukça iyi bir uyum sağlamış ve yüksek su içeriği değerlerinde hafif sapmalar gözlenmiştir. Vİ+AOK+KK yöntemi, modelle uyumlu bir sonuç vermiş ancak, bazı noktalardaki sapmalar, Vİ ve AOK işlemlerinin kombinasyonunun kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon davranışını etkileyebileceğini göstermektedir. VOK+KK yöntemi verileri modelle oldukça iyi bir uyum göstermiş ve noktalar doğrusal çizgiye yakın bir dağılım sergilemiştir. Bu da yöntemin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir. Vİ+VOK+KK yöntemi, modelle oldukça iyi bir uyum göstermiş ve yöntemin tahmin gücü yüksek olarak belirlenmiştir. Bulgular, tüm kurutma yöntemlerinin Birinci Dereceden Model ile genel olarak iyi bir uyum sağladığını göstermiş ancak bazı yöntemlerdeki (özellikle Vİ ve AOK kombinasyonları) hafif sapmalar, yöntemin rehidratasyon davranışını etkileyen faktörlerden kaynaklanabileceğine işaret etmektedir.



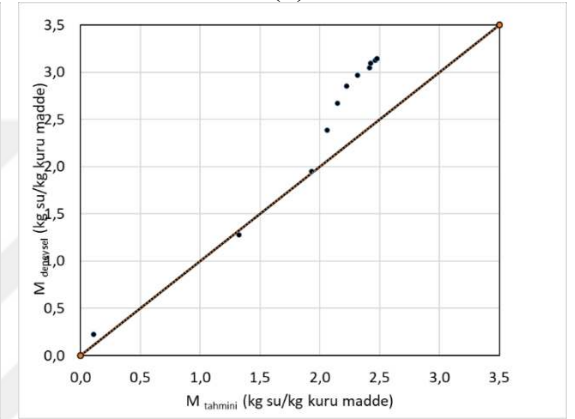
(a)



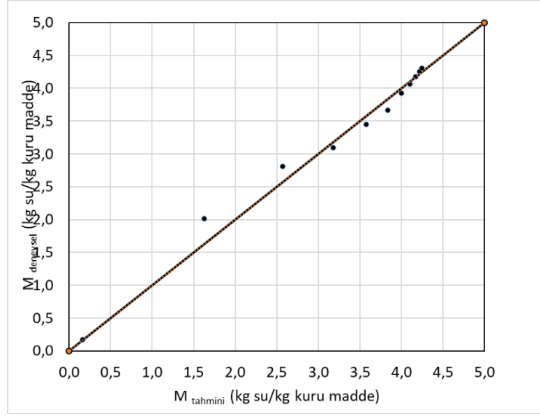
(b)



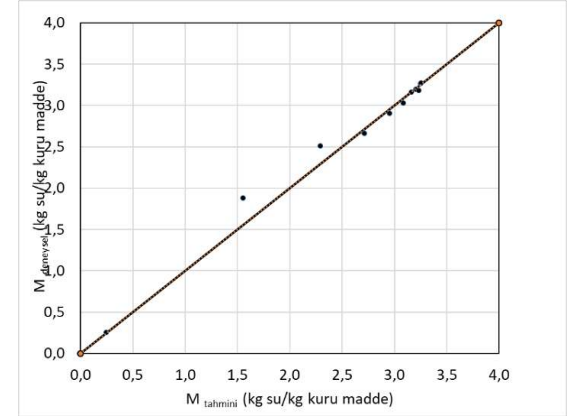
(c)



(d)



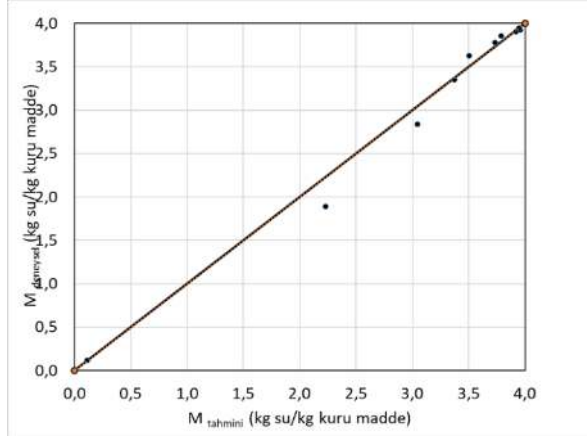
(e)



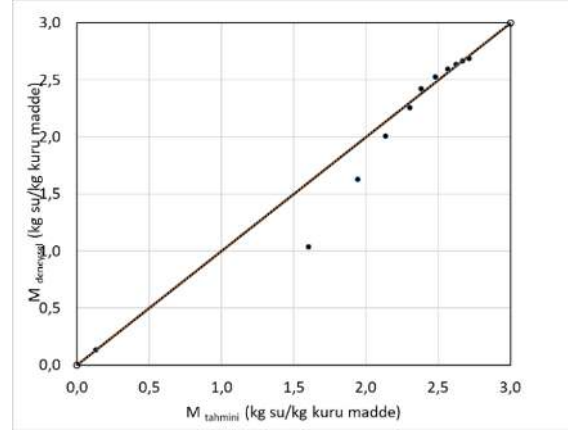
(f)

Şekil 4.25. Farklı yöntemlerle 60°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehirdre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Kinetik Model’e ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımali ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtımali ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

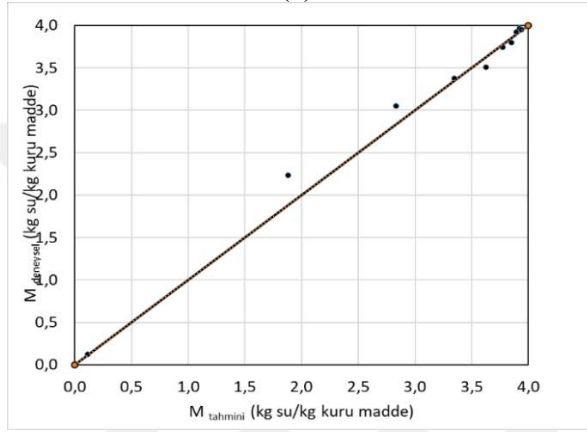
Farklı yöntemlerle 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Kinetik Model’e ait uyum grafikleri Şekil 4.26’da sunulmuştur. Bu sıcaklıkta, tahmin edilen su içeriği (M_{tahmini}) ile deneysel olarak elde edilen su içeriği (M_{deneysel}) arasındaki ilişki doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir. 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon verilerinin Birinci Dereceden Model’e uyumluluğu, farklı yöntemler açısından değerlendirildiğinde, tüm yöntemlerin modele yüksek uyum sağladığı gözlemlenmiştir. KK yöntemi (Şekil 4.26a), deneysel ve tahmini değerler arasında güçlü bir ilişki sergileyerek modelle iyi bir uyum sağlamıştır. Vİ+KK yöntemi (Şekil 4.26b), elektriksel iletkenliğin artırılmasıyla rehidrasyon sürecinde daha tutarlı bir veri dağılımı sağlamış ve modelle uyumu artırmıştır. AOK+KK yöntemi (Şekil 4.26c), geniş bir veri aralığı sunarak deneysel ve tahmini değerler arasında bazı noktalarda hafif sapmalar görülse de iyi bir uyum sağlamıştır. Vİ+AOK+KK yöntemi (Şekil 4.26d) de, deneysel ve tahmini değerler arasında oldukça iyi bir uyum sağlamış, ancak bazı verilerde modelden küçük sapmalar olmuştur. VOK+KK yöntemi (Şekil 4.26e), deneysel ve tahmini değerlerin neredeyse birebir örtüştüğü, modelle en yüksek uyumu sağlayan yöntemlerden biri olmuştur. Son olarak, Vİ+VOK+KK yöntemi (Şekil 4.26f), rehidrasyon verilerinin tahmini değerlere en yakın olduğu yöntemlerden biri olarak öne çıkmış ve modelle oldukça yüksek bir uyum göstermiştir. Genel olarak, tüm yöntemler Birinci Dereceden Kinetik Model’e yüksek uyum göstermiş olsa da VOK+KK ve Vİ+VOK+KK işlemleri, tahmin doğruluğu açısından diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar vermiştir.



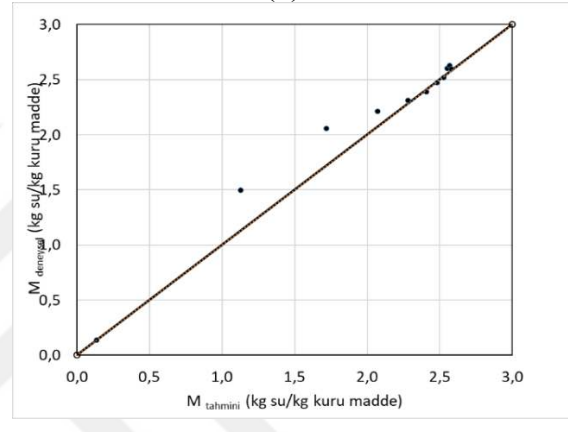
(a)



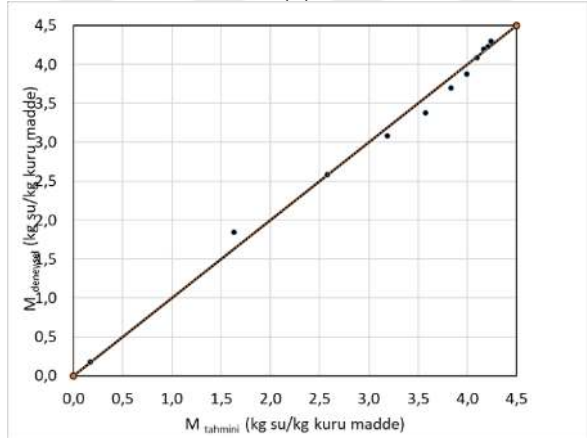
(b)



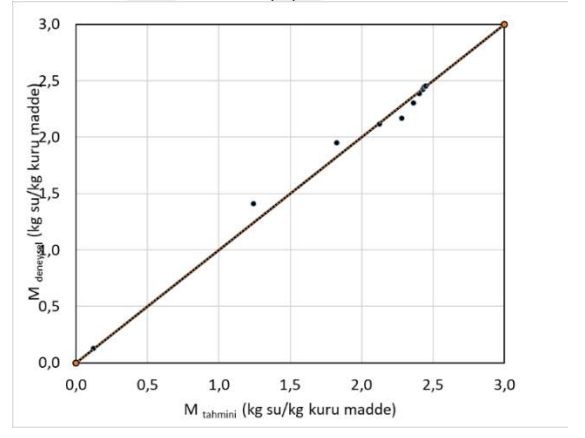
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.26. Farklı yöntemlerle 70°C’de kurutulmuş elma dilimlerinin aynı sıcaklıkta rehidre edilmesi sonucu elde edilen verilerin Birinci Dereceden Kinetik Model’e ait uyum grafikleri: (a) Konveksiyonel kurutma (KK), (b) Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemini takiben KK, (c) Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemini takiben KK, (d) Vİ sonrası AOK işlemini takiben KK, (e) Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemini takiben KK ve (f) Vİ sonrası VOK işlemini takiben KK)

4.5. Taze Elmalara Ait Bulgular

4.5.1. Suda Çözünür Kurumadde İçeriği

Elmanın suda kuru madde içeriği veya °Brix değeri çeşide, yetiştirilme koşullarına (iklim, toprak yapısı ve sulama durumu), olgunluk derecesine, meyvenin hasat zamanına ve yetiştiği bölgenin çevresel şartlarına bağlı olarak değişebilir (Yokuş vd., 2014). Ayrıca, gübreleme gibi tarımsal uygulamalar, depolama süresi ve koşulları da suda çözünür kuru madde içeriğini etkileyen önemli faktörler arasında yer alır ki özellikle olgunlaşma sürecinde ve uygun hasat zamanında elde edilen elmalarda kuru madde oranı genellikle daha yüksek olmaktadır (Yokuş vd., 2014).

Tez çalışması kapsamında kullanılan, Vİ işlemine maruz bırakılmamış taze elma dilimlerinin ortalama °Brix değeri yaklaşık %15 olarak belirlenmiştir. Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işlemine tabi tutulmuş elma dilimlerinde ise °Brix değeri yaklaşık %14 olarak tespit edilmiştir. Farklı elma türlerinin °Brix değerleri ise %9,2-13,5 arasında değişmektedir (Nielsen, 2003). Yokuş (2014), taze ve kabuğu soyulmuş Luiz Golden ile Starking Delicious elma dilimlerinin °Brix değerlerini sırasıyla %15,33 ve %12,67 olarak belirlemiştir. Ayrıca Ak (2016), ozmotik dehidrasyon ön işleminin elma, muz ve ayva dilimlerinin kalite parametrelerine etkisini incelediği çalışmada Amasya cinsi elmaların °Brix değerini %12,02 olarak rapor etmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan ve kabuğu soyulmuş Granny Smith elma dilimlerinin °Brix değerleri ise %14-15 arasında ölçülmüş olup, literatürde bildirilen değerlerle benzerlik göstermiştir.

4.5.2. pH ve Titrasyon Asitliği Değerleri

Elmanın pH ile titrasyon asitliği değerleri çeşidine, yetiştiği bölgenin iklim ve toprak koşullarına, olgunluk derecesine ve hasat sonrası saklama koşullarına bağlı olarak değişebilir (Yokuş vd., 2014). Ayrıca, elmanın bünyesindeki organik asit miktarı da pH ve titrasyon asitliği seviyesinin belirlenmesinde önemli rol oynar ve özellikle olgunlaşma sürecinde organik asitler azalırken pH değeri yükselir (Cemeroğlu, 2007). Bunun yanı sıra, uygulanan tarımsal işlemler ve meyvenin saklama süresi de elmanın pH ve titrasyon asitliği değerini etkileyen diğer faktörler arasında yer alır.

Bu tez çalışmasında kullanılan taze Granny Smith elma dilimlerinin ortalama pH değeri 4,20 olarak belirlenmiştir. Literatürde farklı elma türleri için bildirilen pH değerleri 3,39 ile 4,03 arasında değişmektedir (Fenercioğlu ve Tüfekçi, 2010). Yüksek pH değerinin, elmanın olgunlaşma seviyesinin bir göstergesi olduğu belirtilmektedir

(Cemeroğlu, 2007). Ozmotik dehidrasyon ön işleminin elma, muz ve ayva dilimlerinin kalite parametrelerine etkisini incelediği çalışmada Ak (2016), Amasya elmasının pH değerini 4,24 olarak bildirmiştir. Yokuş (2014) ise taze ve kabuğu soyulmuş Luiz Golden ve Starking Delicious elma dilimlerinin pH değerlerini 4,12-4,26 aralığında rapor etmiştir. Filiz (2015) de taze Starking Delicious, Golden Delicious ve Granny Smith çeşitlerinde pH değerlerini sırasıyla 4,43, 3,93 ve 3,51 olarak bildirmiştir. Bu tez çalışmasında taze elma dilimleri için belirlenen ortalama pH değeri (4,20) her ne kadar Filiz (2015) tarafından rapor edilen değerden düşük olsa da diğer literatür verileriyle genel anlamda uyumlu olmuştur.

Literatürde taze elmalarda titrasyon asitliği değerleri farklı çeşitler için çeşitli aralıklarda rapor edilmiştir; örneğin Filiz (2015), taze Starking Delicious, Golden Delicious ve Granny Smith elmalarının titrasyon asitliği değerlerini (malik asit eşdeğeri (MAE) cinsinden) sırasıyla 0,98, 1,20 ve 1,35 g MAE/100 g km olarak belirtirken, Ak (2016) ise ozmotik dehidrasyon ön işleminin uygulandığı Amasya elmasında bu değeri 0,56 g MAE/100 g km olarak bildirmiştir. Kurutulmuş elma dilimlerine ilişkin olarak ise Baysal vd. (2014), malik asit cinsinden asitlik değerlerinin %1,03-2,93 arasında değiştiğini ve mikrodalgada kurutulan elmalarda malik asit oranının diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğunu rapor etmiştir. Bu doktora tezinde ise sadece taze elma dilimleri analiz edilmiş ve Granny Smith türü için ortalama titrasyon asitliği değeri 0,95 g MAE/100 g km olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değer, literatürde özellikle Filiz (2015) tarafından bildirilen Granny Smith cinsi elmaların titrasyon asitliği ile benzerlik gösterirken, Ak (2016) tarafından bildirilen Amasya cinsi elmalarındaki değerden daha yüksek bulunmuştur. Tez kapsamında kurutulmuş elma dilimlerinde ise analiz gerçekleştirilmemiştir.

4.6. Kurutulmuş Elma Dilimlerine Bulgular

4.6.1. Toplam Kuru Madde İçeriği

Literatürde elmaların kuru madde içeriğinin %10-25 arasında olması gerektiği belirtilmektedir (Cemeroğlu, 2007). Ak (2016) ise ozmotik dehidrasyon ön işleminin elma, muz ve ayva dilimlerinin kalite parametrelerine etkisini incelediği çalışmada Amasya cinsi elmaların toplam kuru madde içeriğini %12,02 olarak rapor etmiştir. Bu doktora tez çalışmasında kullanılan Granny Smith türü taze elma dilimlerinin ortalama kuru madde içeriği %17 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu değer, literatürde farklı elma türleri için belirtilen aralıkla uygunluk gösterir iken Ak (2016) tarafından Amasya

cinsi elmalar için bildirilen değerden yüksek olmuştur. Kuru madde içeriğindeki bu farklılık elmanın çeşidine ilave olarak, yetiştiği bölgenin iklim ve toprak koşullarına, olgunluk derecesine ve hasat sonrası saklama koşullarında bağlı olabilir (Yokuş vd., 2014).

Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam kuru madde içeriğine ait varyans analiz bulguları EK 11-Çizelge 7.4'te sunulmuştur. Elma dilimlerinin toplam kurumadde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin üçlü interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.19'da verilmiştir. 50°C'de kurutulan elma dilimlerinde kuru madde içeriği genellikle daha düşük seviyelerde belirlenmiştir. Yüksek kurutma sıcaklıklarının, bazı gıdaların yüzeylerinde kabuk oluşumuna neden olabiliği ve bu nedenle kurutmanın ilerleyen zamanlarında gıdanın merkezinden yüzeye olan kütle transferini zorlaştırabildiği rapor edilmiştir (Nielsen, 2003; Cemeroğlu, 2007). Bulgular, kurutulmuş elma dilimlerine ait kuru madde içeriğinin kurutma sıcaklığı, kurutma yöntemi ve Vİ işleminin birlikte etkisiyle önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. 50°C'de VOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmayan örnekler %87,75 ile en yüksek kuru madde içeriği değerlerinden birine sahipken, aynı sıcaklıkta KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmayan örnekler %80,66 ile daha düşük bir değer göstermiştir. 60°C'de KK yöntemi ve Vİ işleminin uygulanması, kuru madde içeriğini %90,06 ile en yüksek seviyeye çıkarırken, aynı sıcaklıkta AOK+KK yöntemi ve Vİ işleminin uygulanması en düşük kuru madde içeriği değerlerinden birine (%79,37) neden olmuştur. 70°C'de ise tüm yöntemler arasında kuru madde içeriği değerleri birbirine daha yakın bulunmuş, özellikle AOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmayan örnekler %89,85 ile en yüksek değerlerden birine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, kurutma sıcaklığı, yöntemi ve Vİ işleminin birlikte toplam kuru madde içeriği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.19. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam kurumadde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Kuru Madde İçeriği (%)
50	KK	Var	85,59±0,62 ^{A-E*}
		Yok	80,66±1,74 ^{F-H}
	AOK+KK	Var	82,95±7,82 ^{E-H}
		Yok	84,12±0,88 ^{C-G}
	VOK+KK	Var	81,84±2,25 ^{E-H}
		Yok	87,75±3,01 ^{A-D}
60	KK	Var	90,06±0,86 ^A
		Yok	83,43±2,35 ^{D-H}
	AOK+KK	Var	79,37±3,01 ^H
		Yok	81,16±2,18 ^{E-H}
	VOK+KK	Var	80,14±3,04 ^{GH}
		Yok	85,82±2,41 ^{A-E}
70	KK	Var	88,5±2,46 ^{A-C}
		Yok	88,41±2,91 ^{A-C}
	AOK+KK	Var	88,00±0,84 ^{A-D}
		Yok	89,85±1,21 ^{AB}
	VOK+KK	Var	88,78±0,69 ^{A-C}
		Yok	85,35±4,16 ^{B-F}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Kurutma sıcaklığı, yöntemi ve Vİ işlemi, elma dilimlerinin kuru madde içeriğini etkileyen önemli faktörler olmuştur. Düşük sıcaklıklar hücre yapısını korurken, yüksek sıcaklıklar hücre duvarlarında bozulmalara neden olabilir (Vega-Galvez, 2012). KK yöntemi, hücre yapısını daha iyi korurken, ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemleri hücre yapısında daha fazla bozulmaya neden olduğu, Vİ işleminin, hücreler arasındaki boşlukları doldurarak kuru madde içeriğini arttırdığı, ancak hücre yapısındaki bozulmaların bu etkinin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, kurutma sıcaklığı, yöntemi ve Vİ işlemi bir arada değerlendirilerek en uygun koşullar belirlenmelidir.

Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kurumadde içeriği üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş (p<0,05) ve bulgular Çizelge 4.20’de gösterilmiştir. Bulgular, elma dilimlerinin kuru madde içeriğinin hem kurutma yöntemine hem de Vİ işleminin uygulanıp uygulanmamasına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. KK yöntemiyle kurutulan örneklerde, Vİ işleminin uygulanması kuru madde içeriğini arttırarak en yüksek değere (%88,05) ulaşmıştır. Buna karşılık, aynı

yöntemde Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde kuru madde içeriği daha düşük bir değer (%84,16) göstermiştir. Ohmik ısıtım ön kurutmanın (AOK ve VOK) entegre edildiği KK yöntemlerinde ise Vİ işleminin uygulanması kuru madde içeriğini azaltmış, özellikle AOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanan örnekler en düşük kuru madde içeriği değerine (%83,44) sahip olmuştur. VOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmayan örnekler ise %86,30 ile daha yüksek bir kuru madde içeriği göstermiştir. Bu sonuçlar, kurutma yöntemi ve Vİ işleminin birlikte kuru madde içeriği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.20. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kurumadde içeriği üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtım ön kurutma) (n=9)

Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Kuru Madde İçeriği (%)
KK	Var	88,05±2,38 ^{A*}
	Yok	84,16±3,80 ^{BC}
AOK+KK	Var	83,44±5,64 ^C
	Yok	85,04±4,04 ^{BC}
VOK+KK	Var	83,58±4,40 ^C
	Yok	86,30±3,06 ^{AB}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işlemi, elma dilimlerinin kuru madde içeriği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler göstermiştir (p<0,05). KK yöntemiyle Vİ işlemi uygulanan örneklerde elde edilen %88,05 kuru madde içeriği, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerdeki %84,16 değerinden istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek bulunmuştur (p<0,05). Ancak, KK yönteminin AOK ve VOK işlemleriyle entegre edilmesiyle Vİ işlemi elma dilimlerinin kuru madde içeriğini artırmamış, aksine hafif bir düşüşe neden olmuştur. Bu durum, Vİ işlemi sırasında hücreler arası boşluklara sıvı girişinin suyun uzaklaştırılmasını zorlaştırdığı düşünülmektedir.

4.6.2. Tekstür Analizleri

Bu çalışmada farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği analizleri gerçekleştirilmiş ve verilere ait varyans analiz tabloları sırasıyla EK 12-Çizelge 7.5 ve EK 13-Çizelge 7.6'da verilmiştir. Kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin ikili

interaksiyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.21’de sunulmuştur. Bulgular, elma dilimlerine ait kesme ve delme sertliği değerlerinin hem kurutma sıcaklığına hem de kullanılan kurutma yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Kesme sertliği açısından, 50°C’de AOK+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimlerinde en yüksek değere (125,32 N) ulaşırken, aynı sıcaklıkta KK yöntemiyle kurutulan örnekler en düşük değerlerden birini (62,36 N) göstermiştir. Delme sertliği açısından ise 60°C ve 70°C’de KK yöntemiyle kurutulan örnekler en yüksek değerlere (sırasıyla 37,58 N ve 36,61 N) sahip olmuştur. Buna karşılık, 70°C’de VOK+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimleri, hem kesme sertliği (85,11 N) hem de delme sertliği (17,42 N) açısından en düşük değerlerden birini göstermiştir. Genel olarak, kurutma sıcaklığı arttıkça kesme sertliği değerlerinde artış eğilimi gözlenirken, delme sertliği değerleri kurutma yöntemi ve sıcaklığa bağlı olarak farklılık göstermiştir. Bu sonuçlar, kurutma sıcaklığı ve yönteminin birlikte elma dilimlerinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.21. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile kurutma yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Kesme Sertliği (N)	Delme Sertliği (N)
50	KK	62,36±13,70 ^{E*}	29,69±4,37 ^{BC}
	AOK+KK	125,32±50,30 ^A	28,90±8,10 ^{BC}
	VOK+KK	90,52±40,30 ^B	32,24±13,60 ^{AB}
60	KK	72,30±13,91 ^{CDE}	37,58±15,31 ^A
	AOK+KK	66,23±6,45 ^{DE}	28,71±7,12 ^{BC}
	VOK+KK	79,83±31,60 ^{BCD}	24,20±21,40 ^{CD}
70	KK	111,33±47,10 ^A	36,61±7,97 ^A
	AOK+KK	83,43±24,60 ^{BC}	22,60±4,90 ^{CD}
	VOK+KK	85,11±4,62 ^{BC}	17,42±4,62 ^D

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Farklı kurutma yöntemleri, kurutulmuş elma dilimlerinin kesme sertliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar yaratmıştır ($p<0,05$). AOK+KK yöntemiyle 50°C’de kurutulan örneklerde elde edilen 125,32 N kesme sertliği değeri, diğer yöntemlerle elde edilen birçok değerden istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek olmuştur ($p<0,05$). Benzer şekilde, 70°C’de KK yöntemiyle kurutulan örneklerde elde edilen 111,33 N kesme sertliği değeri, diğer yöntemlerle elde edilen birçok değerden yüksek belirlenmiştir ($p<0,05$). Kurutulmuş elma dilimlerinin delme sertliği açısından da kurutma yöntemi önemli bir etken olmuştur. KK yöntemiyle kurutulan örneklerde delme

sertliği değerleri genellikle daha yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). Örneğin, 60°C’de KK yöntemiyle elde edilen 37,58 N delme sertliği değer, aynı sıcaklıkta VOK+KK yöntemiyle elde edilen 24,20 N değerinden daha yüksek olmuştur ($p<0,05$). Ancak, AOK+KK ve VOK+KK yöntemleriyle kurutulan örneklerde delme sertliği değerleri genellikle daha düşük bulunmuş ve bu değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir ($p>0,05$).

Bulgular, farklı kurutma yöntemi ve sıcaklığın elma dilimlerinin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. VOK+KK yöntemi, kurutulmuş elma dilimlerinde kesme ve delme sertliğini düşürerek doku yumuşamasını sağlamış, özellikle yüksek sıcaklıklarda (70°C) bu etkiler daha belirgin hale gelmiştir. AOK+KK yöntemi ise elma dilimlerinde daha yüksek kesme sertliği değerleri ile dikkat çekmiş, ancak delme sertliği üzerinde daha sınırlı bir etkisi olmuştur. Bu bulgular, vakum altındaki ohmik ısıtmalı n kurutma işleminin, kurutulmuş elma dilimlerinin dokusal özelliklerini optimize etmek için etkili yöntemler olabileceğini göstermektedir.

Kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular izelge 4.22’de sunulmuştur. Bulgular, Vİ işleminin uygulanması veya uygulanmamasının, kullanılan kurutma yöntemine bağlı olarak kesme ve delme sertliği değerlerinde önemli farklılıklara yol açtığı görülmüştür. Vİ işleminin varlığı, tüm kurutma yöntemlerinde kesme ve delme sertliği değerlerini düşürerek elma dilimlerinin daha yumuşak bir dokuya sahip olmasını sağlamıştır. Özellikle VOK+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimlerinde, Vİ işleminin uygulanması kesme sertliğini en düşük seviyeye (64,56 N) indirirken, delme sertliği de en düşük değerlerden biri olan 13,94 N olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, Vİ işleminin uygulanmadığı durumlarda, özellikle AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde kesme sertliği en yüksek değere (114,87 N) ulaşmıştır. Delme sertliği açısından ise KK yöntemi ve Vİ işleminin yokluğu, en yüksek değer (40,95 N) göstermiştir. Bu sonuçlar, kurutma yöntemi ve Vİ işleminin birlikte elma dilimlerinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.22. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği değerleri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)

Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Kesme Sertliği (N)	Delme Sertliği (N)
KK	Var	69,66±9,30 ^{C*}	28,30±6,10 ^C
	Yok	94,33±44,20 ^B	40,95±9,93 ^A
AOK+KK	Var	68,45±13,12 ^C	29,66±6,97 ^{BC}
	Yok	114,87±49,20 ^A	23,98±5,99 ^C
VOK+KK	Var	64,56±15,31 ^C	13,94±7,12 ^D
	Yok	105,75±22,83 ^{AB}	35,02±13,26 ^B

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Bulgular Vİ işleminin hem kesme hem de delme sertliği açısından kurutulmuş elma dilimlerinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebildiğini göstermiştir. Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işlemi, meyve dokusunun yumuşamasına ve kesme ile delme sertliği değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi ise Vİ işlemi olmaksızın daha sert bir dokuya yol açabilmektedir. Bu bulgular, kurutma yöntemlerinin ve Vİ işleminin meyve dokusu üzerindeki etkilerini optimize etmek için önemli ipuçları sunmaktadır.

Kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin üçlü interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş (p<0,05) ve bulgular Çizelge 4.23'te sunulmuştur. Bulgular, elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği değerlerinin hem kurutma sıcaklığına hem de kullanılan kurutma yöntemine bağlı olarak değiştiği, ayrıca Vİ işleminin uygulanıp uygulanmamasının bu değişim üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle, Vİ işleminin varlığı genellikle kesme ve delme sertliği değerlerini düşürerek elma dilimlerinin daha yumuşak bir dokuya sahip olmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, AOK+KK ve VOK+KK yöntemleriyle kurutulan örneklerde, Vİ işlemi uygulanmadığında kesme sertliği değerlerinin belirgin şekilde daha yüksek olduğu, ancak Vİ işleminin uygulanmasıyla bu değerlerin azaldığı gözlenmiştir. Kurutma sıcaklığı arttıkça, özellikle VOK+KK yönteminde, delme sertliği değerlerinde belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, kurutma sıcaklığı, yöntemi ve Vİ işleminin birlikte elma dilimlerinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.23. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kesme ve delme sertliği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma) (n=3)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Kesme Sertliği (N)	Delme Sertliği (N)
50	KK	Var	74,60±1,70 ^{D-F*}	28,40±1,90 ^{D-G}
		Yok	50,12±3,95 ^G	30,98±6,25 ^{D-F}
	AOK+KK	Var	80,92±14,62 ^{DE}	34,58±3,85 ^{B-D}
		Yok	169,72±13,99 ^A	23,22±8,80 ^{E-I}
	VOK+KK	Var	56,46±5,62 ^{FG}	20,85±5,26 ^{F-I}
		Yok	124,56±23,60 ^B	43,63±2,99 ^{AB}
60	KK	Var	64,23±12,44 ^{D-G}	23,77±2,14 ^{E-I}
		Yok	80,37±11,56 ^{DE}	51,39±3,18 ^A
	AOK+KK	Var	62,57±7,37 ^{E-G}	30,32±9,37 ^{D-G}
		Yok	69,87±0,21 ^{D-G}	27,10±3,86 ^{D-H}
	VOK+KK	Var	53,83±8,28 ^{FG}	6,06±1,68 ^J
		Yok	105,84±20,05 ^{BC}	42,35±7,32 ^{A-C}
70	KK	Var	70,15±8,90 ^{D-G}	32,73±8,97 ^{C-E}
		Yok	152,50±24,29 ^A	40,49±5,74 ^{BC}
	AOK+KK	Var	61,85±4,18 ^{D-G}	24,08±1,46 ^{E-I}
		Yok	105,20±9,20 ^{BC}	21,62±6,57 ^{G-I}
	VOK+KK	Var	83,38±5,94 ^D	14,92±1,39 ^{IJ}
		Yok	86,94±0,72 ^{CD}	19,09±2,62 ^{HI}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Kurutulmuş elma dilimlerinin delme sertliği üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili etkisi istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş (p<0,05) ve bulgular Çizelge 4.24'te sunulmuştur. Bulgular, elma dilimlerine ait delme sertliği değerlerinin hem kurutma sıcaklığına hem de Vİ işleminin kullanılmasına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. 50°C'de Vİ işlemi uygulanmayan örnekler, 32,60 N ile daha yüksek bir delme sertliği değerine sahipken, aynı sıcaklıkta Vİ işlemi uygulanan elma dilimlerinde bu değer 27,95 N'ye düşmüştür. 60°C'de Vİ işlemi uygulanmayan örnekler en yüksek delme sertliği değerine (40,28 N) ulaşırken (p<0,05), Vİ işlemi uygulanan örneklerde bu değer 20,05 N ile en düşük seviyeye inmiştir. 70°C'de ise Vİ işlemi uygulanmayan örnekler 27,07 N delme sertliği değeri gösterirken, Vİ işlemi uygulanan örneklerde bu değer 23,90 N olarak ölçülmüştür. Genel olarak, Vİ işleminin uygulanması elma dilimlerinin delme sertliği değerlerini düşürmüştür, ancak bu etki kurutma sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Bu sonuçlar, kurutma sıcaklığı ve Vİ işleminin birlikte delme sertliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.24. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin delme sertliği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Vakum İmpregnasyon	Delme Sertliği (N)
50	Var	27,95±6,46 ^{BC}
	Yok	32,60±9,92 ^B
60	Var	20,05±11,41 ^D
	Yok	40,28±11,53 ^A
70	Var	23,90±9,57 ^{CD}
	Yok	27,07±11,10 ^{BC}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Literatürde, elma dilimlerinin tekstürel özellikleri üzerinde farklı ön işlemlerin etkisi incelenmiştir. Yaranlı (2020), elma dilimlerinde ultrases destekli ozmotik dehidrasyon işlemini kullanarak kuruma karakteristiklerini değerlendirdiği çalışmada, 35 kHz frekansta ultrasonik su banyosuyla gerçekleştirilen işlemler ve farklı süre-sıcaklık kombinasyonlarının etkisini rapor etmiştir. 330 dakikalık işlem sonunda, 30°C’de ozmotik dehidrasyon uygulanan elma dilimlerinde delme testi değerlerinin 0,47’den 0,39 N’a düştüğü ve işlem uygulanmayan örneklerle kıyasla %17,43 oranında azaldığı gözlenmiştir. Bu doktora tez çalışmasında ise, elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işlemi sonucunda, kurutulmuş elma dilimlerinin delme sertliği azalmış ve ürünlerin daha yumuşak bir dokuya sahip olması sağlanmıştır. Ayrıca, 60°C’de kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmamış elma dilimlerinde en yüksek delme sertliği değerine ulaşılırken, Vİ işleminin bu sertliği anlamlı şekilde azalttığı tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, Vİ işleminin kurutma sıcaklığından bağımsız olarak elma dilimlerinin dokusal özelliklerini yumuşattığını ve böylece işlem sürecinde önemli bir avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

4.6.3. Toplam Fenolik Madde İçeriği ve Antioksidan Kapasite Değerleri

Bu çalışmada farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin AK ve TFMİ değerleri belirlenmiş olup verilere ait varyans analiz tabloları sırasıyla EK 14-Çizelge 7.7 ve EK 15-Çizelge 7.8’de verilmiştir. Kurutulmuş elma dilimlerinin TFMİ üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş (p<0,05) ve bulgular Çizelge 4.25’te sunulmuştur. 50°C’de Vİ işlemi uygulanan elma dilimleri, 155,05 mg GAE/100 g km ile en yüksek TFMİ değerine sahip olmuş ve bu değer, aynı sıcaklıkta Vİ işlemi uygulanmayan örneklerin TFMİ değerinden (101,50 mg GAE/100 g km)

istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). Ancak, 60°C ve 70°C’de Vİ işleminin uygulanıp uygulanmaması elma dilimlerinin TFMİ üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmamıştır ($p>0,05$). Örneğin, 70°C’de Vİ işlemi uygulanmayan örnekler 109,52 mg GAE/100 g km ile daha yüksek bir TFMİ göstermiş, ancak bu değer Vİ işlemi uygulanan örneklerin TFMİ (100,67 mg GAE/100 g km) ile istatistiksel olarak anlamlı bir fark göstermemiştir. Bu bulgular, Vİ işleminin kurutulmuş elma dilimlerinin TFMİ üzerindeki etkisinin kurutma sıcaklığına bağlı olarak değiştiğini ve özellikle 50°C’de anlamlı bir artış sağladığını göstermektedir.

Çizelge 4.25. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam fenolik madde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Vakum İmpregnasyon	Toplam Fenolik Madde İçeriği*
50	Var	155,05±70,44 ^{A**}
	Yok	101,50±47,52 ^B
60	Var	96,56±12,36 ^B
	Yok	104,87±49,01 ^B
70	Var	100,67±34,73 ^B
	Yok	109,52±53,03 ^B

*mg gallik asit eşdeğeri/100 g kurumadde, **Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Kurutulmuş elma dilimlerinin TFMİ üzerine kurutma sıcaklığı ile kurutma yönteminin ikili interaksiyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.26’da sunulmuştur. Bulgular, VOK+KK yönteminin, özellikle 50°C’de en yüksek TFMİ değerine ulaştığı (201,85 mg GAE/100 g km) ve bu değer diğer yöntemlerden (KK için 88,6 ve AOK+KK için 95,0 mg GAE/100 km) istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek olduğu görülmüştür ($p<0,05$). 60°C ve 70°C’de de VOK+KK yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek TFMİ değerleri göstermiştir (sırasıyla 138,8 ve 161,24 mg GAE/100 km), ancak bu sıcaklıklarda elde edilen değerler 50°C’deki kadar yüksek olmamıştır. KK ve AOK+KK yöntemleri arasında ise tüm sıcaklıklarda TFMİ açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p>0,05$). Bu bulgular, VOK+KK yönteminin kurutulmuş elma dilimlerinin TFMİ değerini koruma açısından diğer yöntemlere göre daha etkili olduğunu ve bu etkinin özellikle düşük sıcaklıklarda daha belirgin olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.26. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam fenolik madde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ile kurutma yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=6)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Toplam Fenolik Madde İçeriği*
50	KK	88,6±13,27 ^{C**}
	AOK+KK	95,0±38,63 ^C
	VOK+KK	201,85±62,52 ^A
60	KK	83,27±9,90 ^C
	AOK+KK	79,98±17,47 ^C
	VOK+KK	138,8±41,65 ^B
70	KK	85,81±11,78 ^C
	AOK+KK	68,24±10,24 ^C
	VOK+KK	161,24±33,0 ^B

*mg gallik asit eşdeğeri/100 g kurumadde, **Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Kurutulmuş elma dilimlerinin TFMİ üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin üçlü interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş (p<0,05) ve bulgular Çizelge 4.27’de sunulmuştur. Bulgular, VOK+KK yöntemiyle elde edilen elma dilimlerinde, özellikle 50°C’de Vİ işlemi uygulandığında en yüksek TFMİ değerine ulaştığını (246,68 mg GAE/100 g km) ve bu değer, diğer yöntem ve sıcaklıklarda elde edilen değerlerden istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek olduğunu göstermiştir (p<0,05). Aynı sıcaklıkta Vİ işlemi uygulanmayan VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde TFMİ önemli ölçüde düşerek 157,02 mg GAE/100 g km değerine gerilemiştir. 60°C ve 70°C’de ise VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde Vİ işleminin uygulanması elma dilimlerinin TFMİ değerini artırsa da bu artış 50°C’deki kadar belirgin olmamıştır. Örneğin, 70°C’de Vİ işlemi uygulanmayan VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde TFMİ 181,77 mg GAE/100 g km olarak belirlenmiş ve bu değer, Vİ işlemi uygulanan örneklerden (140,71 mg GAE/100 g km) istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek bulunmuştur (p<0,05). KK ve AOK+KK yöntemlerinde ise Vİ işleminin uygulanması TFMİ üzerinde genellikle anlamlı bir artış sağlamamış ve bu yöntemler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir (p>0,05). Bu bulgular, VOK+KK yönteminin elma dilimlerinin TFMİ değerini koruma ve artırma açısından diğer yöntemlere göre daha etkili olduğunu, ancak bu etkinin sıcaklık ve Vİ işleminin uygulanıp uygulanmamasına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.27. Farklı kurutma yöntemleriyle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin toplam fenolik madde içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtım ön kurutma) (n=3)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Toplam Fenolik Madde İçeriği*
50	KK	Var	91,67±15,57 ^{FG**}
		Yok	85,54±13,01 ^{FG}
	AOK+KK	Var	128,06±18,33 ^{DE}
		Yok	61,95±7,29 ^G
	VOK+KK	Var	246,68±59,29 ^A
		Yok	157,02±35,16 ^{BCD}
60	KK	Var	91,65±5,82 ^{FG}
		Yok	74,90±0,81 ^{FG}
	AOK+KK	Var	92,19±11,46 ^{FG}
		Yok	67,77±13,58 ^G
	VOK+KK	Var	105,83±15,87 ^{EF}
		Yok	171,93±34,54 ^{BC}
70	KK	Var	90,61±11,92 ^{FG}
		Yok	81,01±11,65 ^{FG}
	AOK+KK	Var	70,68±11,05 ^{FG}
		Yok	65,80±11,60 ^G
	VOK+KK	Var	140,71±24,88 ^{CD}
		Yok	181,77±34,41 ^B

*mg gallik asit eşdeğeri/100 g kurumadde, **Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Literatürde, kurutulmuş elma dilimlerinin ve diğer bazı meyve-sebze ürünlerinin TFMİ değerlerine farklı kurutma yöntemleri ve ön işlemlerin etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Baysal vd. (2014), farklı kurutma yöntemlerinin elma dilimlerine etkisini değerlendirdikleri çalışmada, kurutulmuş elma dilimlerinde TFMİ değerlerinin 1.265-1.694 mg GAE/g kuru madde arasında değiştiğini ve mikrodalga ile kurutulan elma dilimlerinde en yüksek değere ulaşıldığını bildirmişlerdir. Yağcıları (2020) ise baharatlı saf su ve sakkaroz çözeltilerine daldırılarak, atmosferik ve Vİ ön işlemleri sonrasında vakum altında kurutulan elma örneklerinde TFMİ değerlerinin 124,70-174,5 mg GAE/100 g km arasında olduğunu bildirmiştir. Benzer şekilde Karacaoğlu (2017), Vİ ön işlemi uygulayarak ve 40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda kuruttuğu Granny Smith elma örneklerinde, 7 saatlik kurutma sonrası örneklerin TFMİ değerlerinin 1067,25, 1094,90 ve 1073,49 mg GAE/100 g km arasında değiştiğini ortaya koymuştur. Çam ve Ersus (2008) ise dondurarak kurutma yöntemiyle işlem gören çilek örneklerinde TFMİ değerinin 1195,5 mg GAE/100 g km olduğunu bildirmişlerdir. Soğan dilimlerinin farklı

kurutma yöntemleriyle elde edilen TFMİ değerlerini inceleyen Arslan ve Özcan (2010), mikrodalga ile kurutma uygulamasında TFMİ değerinin 1664 ve 1624 mg GAE/100 g km gibi yüksek değerlere ulaştığını ve bunun kısa süreli kurutmayla ilişkili nem kaybından kaynaklandığını belirtmiştir. Blanda vd. (2008) ise Vİ işlemi uyguladıkları Granny Smith ve Starking Delicious elma çeşitlerinde TFMİ değerinin sırasıyla %26,86 ve %21,57 oranında azaldığını, bunun da elma dokusundan çözeltiye ters yönde bir fenolik madde kütle transferinden kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir. Bu doktora tez çalışmasında ise, her kurutma yönteminde impregnasyon işlemi uygulanan elma dilimlerinde belirlenen TFMİ değerlerinin 140,71 ve 246,68 mg GAE/100 g km arasında değiştiği tespit edilmiş olup, bu değerlerin özellikle Karacaoğlu (2017) ve diğer bazı çalışmalarda bildirilen TFMİ değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu farklılık, hammadde ve işlem farklılıklarının yanı sıra daha uzun kurutma sürelerinin uygulanmasından kaynaklanabilir.

Sonuç olarak, vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma destekli konvektif kurutma yöntemi ve düşük kurutma sıcaklıkları elma dilimlerindeki fenolik bileşenlerin korunmasında en etkili kombinasyon olmuştur. Vakum, fenolik bileşenlerin oksidatif bozulmasını engelleyerek ve hücre yapısında daha iyi korunmalarını sağlayarak TFMİ değerini artırmaktadır (Richardson, 2001; İçier vd., 2017). Ohmik ısıtma, ısıyı homojen şekilde dağıtarak ve termal bozulmaları azaltarak fenolik bileşenlerin korunmasına katkıda bulunur (Vega-Galvez, 2012). Ayrıca, elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğinin arttırılmasının hedeflendiği Vİ işlemi, fenolik bileşenlerin hücre içindeki korunmasını destekleyerek (Richardson, 2001; İçier vd., 2017). Kurutulmuş elma dilimlerinin TFMİ değerini arttırmıştır. Ohmik ısıtmalı ön kurutmanın vakum altında uygulanmasının elma dilimlerinin TFMİ değerinde artış sağlamasının nedeni olarak bu işlemlerin süreyi kısaltmış olması ve ürünün uzun süre sıcaklığa maruz kalmamasından dolayı, ürünün TFMİ korunmuş olabilir.

Kurutulmuş elma dilimlerinin AA değerleri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili etkisi istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.28’de sunulmuştur. Bulgular, AOK+KK yönteminin, elma dilimlerine Vİ işlemi uygulandığında en yüksek AA değerine ulaştığını (407,05 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$) ve bu değer, diğer yöntemlerle elde edilen değerlerden istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek olduğunu göstermiştir ($p<0,05$). Aynı yöntemde Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde AA değeri önemli ölçüde düşerek 259,05 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$ değerine gerilemiştir. KK yönteminde

Vİ işlemleri uygulanan örneklerde AA değeri 346,35 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$ olarak belirlenmiş ve bu değer, Vİ işlemleri uygulanmayan örneklerle (324,95 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$) istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$). VOK+KK yönteminde ise Vİ işlemleri uygulanan örneklerde AA değeri 335,82 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$ olarak belirlenmiş, Vİ işlemleri uygulanmayan örneklerde ise bu değer 280,26 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$ değerine düşmüştür. Bu bulgular, AOK+KK yönteminin Vİ işlemleri ile kombine edildiğinde kurutulmuş elma dilimlerinin AA değerini artırmada en etkili yöntem olduğunu, diğer yöntemlerde ise Vİ işleminin etkisinin daha sınırlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.28. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin antioksidan aktivite değerleri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)

Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Antioksidan Kapasite*
KK	Var	346,35 $\pm$ 62,8 ^{B**}
	Yok	324,95 $\pm$ 67,73 ^{BC}
AOK+KK	Var	407,05 $\pm$ 70,25 ^A
	Yok	259,05 $\pm$ 52,71 ^D
VOK+KK	Var	335,82 $\pm$ 50,85 ^B
	Yok	280,26 $\pm$ 31,03 ^{CD}

*mikromol Trolox® eşdeğeri/100 g kurumadde, **Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Literatürde elma çeşitlerinin ve farklı ön işlemlerin AK değerleri üzerindeki etkisi çeşitli çalışmalarla ortaya koyulmuştur. Halvorsen vd. (2002), Golden Delicious çeşidinde 150 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$, Granny Smith çeşidinde 510 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$ ve Gala çeşidinde 220 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$ AK değeri bildirmiştir. Karacaoğlu (2017) ise Vİ ön işlem sonrası 40, 50 ve 60°C’de kurutulan Granny Smith elmalarda, 7 saat kurutma sonunda AK değerlerini sırasıyla 182,61, 171,66 ve 167,31 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$ olarak rapor etmiştir. Yapılan başka çalışmalarda ise elma kabuğunda etli kısmına göre daha yüksek düzeyde antioksidan tespit edilmiştir (Adoŵ vd., 2001; Yokuş vd., 2014). Bu doktora tez çalışmasında ise Vİ işlemleri uygulanmış örneklerde AK değerleri 335,82-407,05 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g km}$ arasında değişmiş ve bu değerler hem Halvorsen vd. (2002)’nin farklı elma çeşitlerine ait verilerinden hem de Karacaoğlu (2017)’nin aynı türdeki bulgularından yüksek bulunmuştur. Ayrıca, uygulanan KK ve VOK+KK yöntemlerinde de AA değerlerinde artış gözlenirken, AOK+KK yöntemi ile en yüksek AK seviyesine ulaşılmıştır ($p<0,05$). Elde edilen bu sonuçlar, Vİ işleminin ve bazı

kurutma yöntemlerinin gıda bileşenlerinin korunmasını ve antioksidan etkinliğini artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Yine de Granny Smith elmaların tez çalışmaları kapsamında yalnızca etli kısımları kullanıldığından, elde edilen AK değerlerinin kabuklu kullanım durumuna göre daha düşük olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, literatürde elmanın yüksek AK değerlerinin kanserli hücre çoğalmasını engelleyebileceği, lipid oksidasyonunu sınırlayabileceği, kolesterolü düşürüp kanda antioksidan seviyesini artırabileceği bildirilmiştir (Boyer ve Liu, 2004).

4.6.4. Renk Analizleri

Bu çalışmada farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin çeşitli renk parametreleri belirlenmiş olup verilere ait varyans analiz tabloları EK 16-Çizelge 7.9 ve EK 23-Çizelge 7.16 aralığında verilmiştir. Kurutulmuş elma dilimlerinin CIE a* (kırmızı-yeşil) renk değeri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin ikili interaksiyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.29’da sunulmuştur. Bulgular, 50°C’de AOK+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimlerinde en yüksek CIE a* değerine (8,23) ulaşıldığını ve bu değer, diğer yöntem ve sıcaklıklarda elde edilen değerlerden istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek olduğunu göstermiştir ($p<0,05$). Aynı sıcaklıkta VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde CIE a* değeri 6,03 olarak belirlenmiş ve bu değer, AOK+KK yöntemine göre daha düşük, ancak KK yöntemine göre (0,77) istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). 60°C’de VOK+KK yöntemiyle kurutulan örnekler, diğer yöntemlere göre daha yüksek bir CIE a* değeri (4,57) göstermiştir, ancak bu sıcaklıkta genel olarak renk değerleri daha düşük bulunmuştur. 70°C’de ise KK yöntemiyle kurutulan örnekler, 6,51 ile en yüksek CIE a* değerine sahip olmuş, ancak bu değer VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerden (5,24) istatistiksel olarak farklılık göstermemiştir ($p>0,05$). Bu bulgular, kurutma sıcaklığı ve yönteminin CIE a* renk değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve özellikle 50°C’de AOK+KK yönteminin kırmızımsı renk tonunu artırmada en etkili yöntem olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.29. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin CIE a* (kırmızı-yeşil) renk değeri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtımaltı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtımaltı ön kurutma) (n=6)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	CIE a*
50	KK	0,77±3,10 ^{E**}
	AOK+KK	8,23±4,98 ^A
	VOK+KK	6,03±3,21 ^B
60	KK	2,75±3,25 ^{DE}
	AOK+KK	3,01±5,03 ^D
	VOK+KK	4,57±3,80 ^{CD}
70	KK	6,51±5,93 ^{BC}
	AOK+KK	2,96±6,21 ^D
	VOK+KK	5,24±2,95 ^{BC}

**Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Kurutulmuş elma dilimlerinin CIE a* (kırmızı-yeşil) renk değeri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş (p<0,05) ve bulgular Çizelge 4.30'da sunulmuştur. Bulgular, Vİ işlemi uygulanmayan elma dilimlerinde CIE a* değerlerini genellikle daha yüksek bulunduğunu ve kırmızımsı renk tonunun daha belirgin olduğunu göstermiştir. AOK+KK yöntemi, Vİ işlemi uygulanmadığında en yüksek CIE a* değerine (9,35) ulaşmış ve bu değer diğer yöntemlerden istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek bulunmuştur (p<0,05). Aynı yöntemde Vİ işlemi uygulandığında ise CIE a* değeri önemli ölçüde düşerek 0,11'e gerilemiştir. VOK+KK yönteminde de benzer bir durum gözlenmiş, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde CIE a* değeri 7,90 olarak belirlenirken, Vİ işlemi uygulanan örneklerde bu değer 2,18'e düşmüştür. KK yönteminde ise Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde CIE a* değeri 6,56 olarak belirlenmiş, Vİ işlemi uygulandığında ise bu değer -0,51'e düşerek kırmızımsı renk tonunun tamamen kaybolduğu görülmüştür. Bu bulgular, Vİ işleminin CIE a* değerini düşürdüğünü ve kırmızımsı renk tonunun korunmasında olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle Vİ işlemi uygulanmadığında AOK+KK yöntemi, kırmızımsı renk tonunu artırmada en etkili yöntem olarak öne çıkmıştır.

Çizelge 4.30. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin CIE a* (kırmızı-yeşil) renk değeri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)

Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	CIE a*
KK	Var	-0,51±1,19 ^{D**}
	Yok	6,56±3,64 ^B
AOK+KK	Var	0,11±2,80 ^D
	Yok	9,35±3,40 ^A
VOK+KK	Var	2,18±1,41 ^C
	Yok	7,90±1,44 ^{AB}

**Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Literatürde, Vİ işleminin elma dilimlerinin CIE a* renk değerini koruma mekanizmasının, elmanın hücre yapısı ve kimyasal bileşimini etkileyerek gerçekleştiği belirtilmiştir (Maskan, 2001; Lavelli vd., 2009; Sinir vd., 2019). Vİ işlemi sırasında elma dilimlerinin hücrelerindeki hava boşluklarının sıvı ile doldurulması, hücre duvarlarının çökmesini engelleyebilir ve elmanın iç yapısının stabil kalmasını sağlayabilir ki bu durum, renk pigmentlerinin oksidasyonunu ve buna bağlı olarak renk değişimini azaltabilir (Fito, 1994). Ayrıca Vİ işlemiyle, elma dilimlerindeki fenolik bileşiklerin oksidasyonu engellenerek renk kaybı önlenir; çünkü fenolikler meyve dokusunda oksijenle temas ettiklerinde oksitlenip kahverengimsi bir renk alabilirler. Vİ işlemi, oksijenin hücrelere ulaşmasını zorlaştırarak oksidatif reaksiyonları yavaşlatabilir (Maskan, 2001; Lavelli vd., 2007; Sinir vd., 2019) ve bu şekilde elma dilimlerinin CIE a* renk değerinin korunmasına katkı sağlar. Bu mekanizma özellikle Granny Smith elmalarının karakteristik yeşil renginin korunmasında önemli bir rol oynayabilir. Doktora tez çalışmasında, istatistiksel olarak anlamlı bulunan CIE a* renk değeri farklılıkları (p<0,05), Vİ işleminin Granny Smith elmalarının yeşil rengini korumada etkili olduğunu ve özellikle AOK+KK yöntemiyle en iyi sonuçların elde edildiğini ortaya koymuştur.

Kurutulmuş elma dilimlerinin CIE b* (sarı-mavi) renk değeri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksiyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş (p<0,05) ve bulgular Çizelge 4.31’de sunulmuştur. Bulgular, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde CIE b* değerlerinin genellikle daha yüksek bulunduğunu ve sarımsı renk tonu daha belirgin olduğunu göstermektedir. 50°C’de Vİ işlemi uygulanmayan örnekler en yüksek CIE b* değerine (26,43) ulaşmış ve bu değer, Vİ işlemi uygulanan örneklerden (17,78) istatistiksel olarak

anlamli derecede yu'ksek bulunmuştur ($p<0,05$). 60°C 'de Vİ işlemi uygulanan ve uygulanmayan o'rn'ekler arasında CIE b^* değerleri a'cısından istatistiksel olarak anlamli bir fark bulunmamış olup, değerler sırasıyla 22,15 ve 23,86 olarak belirlenmiştir. 70°C 'de ise Vİ işlemi uygulanmayan o'rn'eklerde CIE b^* değeri 23,84 olarak belirlenmiş ve bu değer, Vİ işlemi uygulanan o'rn'eklerden (19,43) istatistiksel olarak anlamli derecede yu'ksek bulunmuştur ($p<0,05$). Bu bulgular, elma dilimlerine uygulanan Vİ işleminin CIE b^* değerini d'uşu'duğu'n'u ve sarımsı renk tonunun korunmasında olumsuz bir etkiye sahip olduğunu g'o's'termektedir. O'zellikle 50°C 'de Vİ işlemi uygulanmayan o'rn'ekler, sarımsı renk tonunu koruma a'cısından en yu'ksek değere ulaşmıştır.

Çizelge 4.31. Farklı y'ontemlerle u'ç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin CIE b^* (sarı-mavi) renk değeri u'zerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi ($n=6$)

Kurutma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Vakum İmpregnasyon	CIE b^*
50	Var	$17,78\pm2,56^{\text{C**}}$
	Yok	$26,43\pm3,64^{\text{A}}$
60	Var	$22,15\pm2,38^{\text{B}}$
	Yok	$23,86\pm1,78^{\text{B}}$
70	Var	$19,43\pm3,51^{\text{C}}$
	Yok	$23,84\pm2,38^{\text{B}}$

**Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki a'cıdan o'nemli olduğunu g'o's'termektedir ($p<0,05$).

Kahraman vd. (2021) farklı y'ontemlerle (ultrason kontakt kurutma, konvektif kurutma ve dondurarak kurutma) kuruttukları elma dilimlerinde L renk değerinin konvektif kurutma y'onteminde azaldığını; bunun aksine a, b renk değerleri ile kroma renk değerinin arttığını bildirmişlerdir. Kurutma sırasındaki renkteki değişimlerin Maillard reaksiyonu, pigment bozulması, enzimatik esmerleşme ve askorbik asit oksidasyonu gibi çeşitli fakt'orlerden kaynaklanabileceğini bildirerek uzun bir kuruma s'u'resi ve fakt'orlerin kombinasyonun dilimlerin aydınlık değerinin azalmasına, kırmızılık ve sarılık değerlerinin artmasına sebep olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışmadaki bulgular genel olarak bu doktora tez çalışmasının bulguları ile benzerlik g'o's'termektedir.

Guine ve Barroca (2012) dondurarak ve konvektif kurutma y'ontemiyle iki farklı sıcaklıkta (30°C ve 70°C) yeşil biber ve kabağı kuruttukları çalışmada, liyofilize edilen kabakların L renk değerinde artış, a, b ve kroma değerlerinde d'uşuş rapor ederken konvektif kurutma y'ontemiyle kurutulan o'rn'eklerin L değerinde d'uşuş, a, b ve kroma değerlerinde artış kaydetmişlerdir. Yazarlar, d'uşuk sıcaklıkta kurutulan o'rn'eklerin renk stabilitesinin daha fazla olduğunu; yu'ksek sıcaklıkta kurutulan u'ru'nlerin renk

yoğunluğunda hafif sarı bölgeye doğru kayarak bir azalma olduğunu ve bunu da sıcaklığın karotenoidlerin bozunmasına yol açmasıyla ilişkili olduğunu bildirmişlerdir. Bu bulgular, doktora tez çalışmasının bulguları ile genel anlamda örtüşmektedir. Barbunyaların kurutulduğu bir diğer çalışmada (İzli ve Işık, 2016) ise ürünün L renk değerinin azaldığı, a ve b renk değerlerinin de sıcaklıkla birlikte arttığı bildirilmiştir. Hurma ve domates kurutulmasında ise ürünlerin L, a ve b renk değerlerinin azaldığı görülmüştür (Tülek ve Demiray 2014, İzli ve Işık 2015). Çilek püresinin kurutulduğu bir çalışmada Shrivastav vd. (2021), kurutulmuş ürünün renk doygunluğunun tazeye kıyasla daha az olduğunu, gıdalarda nem içeriği azaldıkça kırımlı açısının azaldığını ve bu sayede kroma değerinin kontrol grubundan uzaklaştığını rapor etmişlerdir.

Kurutulmuş elma dilimlerinin toplam renk değişimi (ΔE^*), renk doygunluğu değişimi (ΔC^*), kroma ve hue açısı değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin ikili interaksiyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.32’de sunulmuştur. Bulgular, 50°C’de AOK+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimlerinde en yüksek ΔE^* değerine (18,25) ulaşıldığını ve bu değer diğer yöntemlerde elde edilen değerlerden istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek bulunduğunu göstermiştir ($p<0,05$). Aynı sıcaklıkta VOK+KK yöntemi de yüksek bir ΔE^* değeri (15,32) göstermiştir. Ancak, KK yöntemiyle kurutulan örneklerde ΔE^* değeri (9,94) daha düşük bulunmuştur. 60°C’de VOK+KK yöntemi (12,74) ile kurutulan örnekler, diğer yöntemlere göre daha yüksek ΔE^* değerine sahipken, 70°C’de AOK+KK yöntemi (11,66) ve VOK+KK yöntemi (11,74) benzer ΔE^* değerleri göstermiştir. 50°C’de AOK+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimlerinde en yüksek ΔC^* değerine (12,58) ulaşmış ve bu değer diğer yöntemlerden istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). Aynı sıcaklıkta VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde ΔC^* değeri (10,57) olurken, KK yöntemiyle kurutulan örneklerde ΔC^* değeri (5,39) diğer yöntemlere göre daha düşük bulunmuştur ($p<0,05$). 60°C’de VOK+KK yöntemi (8,09) ile kurutulan örnekler, diğer yöntemlere göre daha yüksek ΔC^* değerine sahipken, 70°C’de VOK+KK yöntemi (9,42) ve KK yöntemi (9,11) benzer ΔC^* değerleri göstermiştir ($p>0,05$). 50°C’de KK yöntemi en yüksek hue açısı değerine (87,09°) ulaşmış ve bu değer, AOK+KK yöntemiyle elde edilen en düşük hue açısı değerinden (72,12°) istatistiksel olarak anlamlı derecede farklı bulunmuştur ($p<0,05$). 60°C’de KK yöntemi (83,92°) ve AOK+KK yöntemi (83,28°) benzer hue açısı değerleri göstermiştir ($p>0,05$). Ancak, VOK+KK yöntemiyle elde edilen hue açısı değeri (79,36°), KK yöntemine göre istatistiksel olarak anlamlı derecede düşük bulunmuştur ($p<0,05$).

70°C’de ise AOK+KK yöntemi en yüksek hue açısı değerine (84,51°) ulaşmış, bu değer KK yöntemi (78,27°) ve VOK+KK yöntemi (76,66°) ile istatistiksel olarak anlamlı derecede farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Bulgular, kurutulmuş elma dilimlerinde hue açısı değerinin korunmasında düşük sıcaklıklarda KK yönteminin, yüksek sıcaklıklarda ise AOK+KK yönteminin daha etkili olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.32. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin toplam renk değişimi (ΔE^*), renk doygunluğu değişimi (ΔC^*), kroma ve hue açısı değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) ($n=6$)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	ΔE^*	ΔC^*	Kroma	Hue Açısı (°)
50	KK	9,94±3,80 ^{CDE*}	5,39±2,68 ^D	19,05±5,18 ^C	87,09±9,40 ^A
	AOK+KK	18,25±1,25 ^A	12,58±6,80 ^A	25,18±9,00 ^A	72,12±6,09 ^E
	VOK+KK	15,32±2,80 ^{AB}	10,57±2,87 ^{AB}	22,00±4,86 ^{ABC}	74,20±6,76 ^{DE}
60	KK	8,36±3,34 ^E	6,99±3,41 ^{CD}	24,73±2,30 ^A	83,92±7,19 ^A
	AOK+KK	8,70±5,07 ^{DE}	6,79±5,05 ^{CD}	23,96±1,68 ^{AB}	83,28±11,55 ^{AB}
	VOK+KK	12,74±3,02 ^{BC}	8,09±3,24 ^{BC}	21,86±2,68 ^{ABC}	79,36±8,66 ^{BC}
70	KK	10,53±5,20 ^{CDE}	9,11±6,41 ^{BC}	24,68±3,68 ^A	78,27±12,32 ^{CD}
	AOK+KK	11,66±4,55 ^{BCDE}	8,89±4,22 ^{BC}	20,70±4,94 ^{BC}	84,51±15,67 ^A
	VOK+KK	11,74±1,84 ^{CD}	9,42±2,80 ^B	22,19±3,82 ^{ABC}	76,66±6,11 ^{CDE}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Kurutulmuş elma dilimlerinin ΔE^* , ΔC^* , kroma ve hue açısı değerleri üzerine yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili etkisi istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.33’te sunulmuştur. Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğinin artırılmasının hedeflendiği Vİ işlemi uygulandığında, VOK+KK yöntemi en yüksek ΔE^* değerine (13,27) ulaşmış ve bu değer, AOK+KK yöntemi (10,47) ve KK yöntemi (6,54) ile istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Vİ işlemi uygulanmadığında ise AOK+KK yöntemiyle elde edilen kurutulmuş elma dilimlerinde en yüksek ΔE^* değerine (15,27) ulaşılmış, bu değer KK yöntemi (12,68) ve VOK+KK yöntemi (12,79) ile elde edilen değerlerle istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Elma dilimlerine Vİ işlemi uygulandığında, KK yöntemi en düşük ΔC^* değerine (3,62) sahip olmuş ve bu değer, AOK+KK yöntemi (5,01) ve VOK+KK yöntemi (7,07) ile istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Dilimlere Vİ işlemi uygulanmadığında ise AOK+KK yöntemi en yüksek ΔC^* değerine (13,84) ulaşmış ve bu değer, KK yöntemi (10,70) ve VOK+KK yöntemi (11,65) ile istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Elma dilimlerine Vİ işlemi

uygulanıldığında, KK yöntemi en yüksek kroma değerine (21,79) ulaşmış ve bu değer, AOK+KK yöntemi (18,92) ve VOK+KK yöntemi (19,53) ile istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Vİ işlemi uygulanmadığında ise AOK+KK yöntemi en yüksek kroma değerine (27,64) ulaşmış ve bu değer, KK yöntemi (23,85) ve VOK+KK yöntemi (24,50) ile istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Elma dilimlerine Vİ işlemi uygulandığında, KK yöntemi en yüksek hue açısı değerine (91,55) ulaşmış ve bu değer, AOK+KK yöntemi (89,42) ile istatistiksel olarak benzer ($p>0,05$), ancak VOK+KK yöntemi (82,37) ile istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Vakum impregnasyon uygulanmadığında ise KK yöntemi (74,64), AOK+KK yöntemi (70,53) ve VOK+KK yöntemi (71,11) arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar gözlenmiştir ($p<0,05$).

Çizelge 4.33. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin toplam renk değişimi (ΔE^*), renk doygunluğu değişimi (ΔC^*), kroma ve hue açısı değerleri üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) ($n=9$)

Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	ΔE^*	ΔC^*	Kroma	Hue Açısı (°)
KK	Var	6,54±1,45 ^{C*}	3,62±1,19 ^D	21,79±2,51 ^{BC}	91,55±3,47 ^A
	Yok	12,68±3,44 ^{AB}	10,70±3,60 ^B	23,85±5,69 ^B	74,64±6,32 ^C
AOK+KK	Var	10,47±5,37 ^B	5,01±4,09 ^D	18,92±3,07 ^C	89,42±9,36 ^A
	Yok	15,27±4,70 ^A	13,84±3,60 ^A	27,64±4,28 ^A	70,53±5,60 ^D
VOK+KK	Var	13,27±3,72 ^A	7,07±2,29 ^C	19,53±3,53 ^C	82,37±5,08 ^B
	Yok	12,79±1,73 ^{AB}	11,65±1,43 ^B	24,50±1,42 ^B	71,11±3,41 ^{CD}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Elma dilimlerinde renk özelliklerinin incelenmesi, ürünün tüketici tarafından kabulü ve kalite değerlendirmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yağcıları (2020), elma dilimlerine baharatlı saf su ve sakkaroz çözeltileriyle uyguladığı ön işlemlerin ve farklı kurutma yöntemlerinin C^* ve hue değerleri üzerindeki etkisini incelemiş ve ön işlem uygulanmayan elma dilimlerinde C^* değerlerini 26,90-28,32 aralığında bulmuştur. Bu çalışmada, ön işlemsiz örneklerin C^* değerlerinin ön işlem uygulanmış örneklerle göre daha düşük olduğunu da belirtmiştir. Doktora tez çalışmasında ise impregnasyon ön işlemi uygulanmayan elma dilimlerine ait C^* değerleri 19,05-24,73 aralığında tespit edilmiş ve bu sonuçların literatürle benzerlik gösterdiği görülmüştür. Aynı şekilde, Yağcıları (2020) ön işlem uygulanmayan örneklerin hue açısı değerlerini 70,37-76,63°

arasında bildirirken; tez çalışması kapsamında Vİ işlemi uygulanmayan elma dilimlerinde ölçülen hue açısı değerleri 74,20-87,09° arasında bulunmuş ve bu değerler de mevcut literatürle uyumlu olmuştur.

Elma dilimlerinin toplam renk değişimi gibi parametreler hem ürün kalitesinin korunması hem de literatür ile karşılaştırma açısından önem taşımaktadır. Heybeli ve Ertekin (2007), sanayi tipi prototip raflı kurutucuda 60°C’de kurutulmuş ve %5’lik limon suyu ile ön işlem uygulanmamış elma dilimlerinde ΔE^* değerlerini 18,06-21,46 arasında belirlemiştir. Tez çalışmasında ise Vİ işlemi uygulanmamış elma dilimlerinde ΔE^* değerleri 8,36-18,25 arasında hesaplanmış olup, bu sonuçların mevcut literatür değerleriyle bir miktar benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Kurutulmuş elma dilimlerinin ΔC^* değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin üçlü interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.34’te sunulmuştur. Vİ işlemi ve kurutma yöntemi, sıcaklıkla birlikte kurutulmuş elma dilimlerinin ΔC^* değerlerinde önemli değişikliklere neden olmuştur. 50°C’de, AOK+KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulanmadığında en yüksek ΔC^* değeri (18,28) elde edilmiş ve bu değer, diğer tüm kombinasyonlardan istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Aynı sıcaklıkta, KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulandığında en düşük ΔC^* değeri (3,16) gözlenmiş ve bu değer, Vİ işlemi uygulanmadığında elde edilen ΔC^* değerinden (7,62) istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). 60°C’de, AOK+KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulandığında en düşük ΔC^* değeri (2,58) elde edilmiş ve bu değer, Vİ işlemi uygulanmadığında elde edilen ΔC^* değerinden (11,01) istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). 70°C’de ise KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulanmadığında ΔC^* değeri (14,7) en yüksek değerlerden biri olarak gözlenmiş ve Vİ işlemi uygulandığında elde edilen ΔC^* değerinden (3,51) istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Genel olarak, Vİ işlemi ΔC^* değerlerini düşürme eğiliminde olmuş ve bu durum özellikle AOK+KK yöntemi ile düşük sıcaklıklarda belirgin hale gelmiştir. Bulgular, ΔC^* değerleri üzerinde sıcaklık, kurutma yöntemi ve Vİ işleminin birlikte etkili olduğunu göstermiştir ($p<0,05$).

Çizelge 4.34. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin renk doyumluğu değişimi (ΔC^*) üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtım ön kurutma) (n=3)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	ΔC^*
50	KK	Var	3,16±0,66 ^{I*}
		Yok	7,62±1,62 ^{E-G}
	AOK+KK	Var	6,89±3,87 ^{F-I}
		Yok	18,28±0,04 ^A
	VOK+KK	Var	8,63±2,52 ^{D-G}
		Yok	12,51±1,72 ^{BC}
60	KK	Var	4,19±1,65 ^{H-J}
		Yok	9,79±1,68 ^{C-F}
	AOK+KK	Var	2,58±0,43 ^J
		Yok	11,01±3,23 ^{C-E}
	VOK+KK	Var	5,14±0,00 ^{G-J}
		Yok	11,05±0,24 ^{CD}
70	KK	Var	3,51±1,30 ^{IJ}
		Yok	14,7±2,66 ^{AB}
	AOK+KK	Var	5,55±1,64 ^{G-J}
		Yok	12,24±3,52 ^{B-D}
	VOK+KK	Var	7,46±2,16 ^{F-H}
		Yok	11,38±1,85 ^{B-D}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Elma dilimlerinde uygulanan ön işlemler ve farklı kurutma yöntemlerinin renk parametreleri üzerindeki etkileri literatürde geniş olarak araştırılmıştır. Baysal vd. (2014), elma dilimlerini farklı kurutma yöntemleriyle (tepsili, ısı pompalı 50°C, dondurarak ve mikrodalga) sırasıyla 50, 90, 270 ve 20 dakika boyunca kurutmuştur. Kurutma sonucunda en yüksek ΔE değerini ısı pompalı kurutucuda (16,7), en düşük ΔE değerini ise tepsili kurutucuda (9,38) elde etmişlerdir. Bu doktora tez çalışmasında ise farklı kurutma yöntemleri için hesaplanan ΔE değerleri 6,54-15,27 aralığında bulunmuş ve literatürdeki bulgularla belli oranda örtüşmüştür. Ayrıca Çelen vd. (2017), mikrodalga kurutucuda üç farklı güçte (1050, 1500 ve 2100 W) ve üç farklı konveyör hızında kurutulan elma dilimlerinde en düşük ΔE değerinin (10,36) 1050 W ve 0,210 m/dakikada elde edildiğini rapor etmiştir. Hue açısı bakımından ise Baysal vd. (2014), dondurarak kurutulan örneklerde en yüksek değeri (82,56°), ısı pompalı kurutucuda ise en düşük değeri (67,68°) bildirmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen hue açısı değerleri, farklı kurutma yöntemlerine göre 70,53-91,55° arasında olup, literatürde bildirilen değerlerden biraz yüksek olsa da genellikle uyumlu olmuştur. Yağcıları (2020), Vİ ön işlemi uygulanan elma dilimlerinde

C* değerlerini 49,26-60,60 arasında rapor ederken, bu tez çalışmasında ise Vİ işlemi uygulanan elma dilimlerinde C* değerleri 18,92-21,79 arasında ve literatürdeki değerlerden daha düşük olarak belirlenmiştir.

Kurutulmuş elma dilimlerinin hue açısı (°) üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.35'te sunulmuştur. Vİ işlemi ve kurutma sıcaklığı, hue açısı değerlerinde önemli değişikliklere neden olmuştur. Vİ işlemi uygulandığında, 60°C'de en yüksek hue açısı (90,12°) elde edilmiştir ($p<0,05$). 70°C'de Vİ işlemi uygulandığında hue açısı (89,62°), 50°C'de Vİ işlemi uygulandığında elde edilen hue açısı (83,5°) ile istatistiksel olarak farklı bulunmuş, ancak 60°C'de Vİ işlemi uygulandığında elde edilen değere benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Vİ işlemi uygulanmadığında ise en düşük hue açısı (70,01°) 70°C'de gözlenmiş ve bu değer, 50°C'de (72,01°) ve 60°C'de (74,26°) Vİ işlemi uygulanmadığında elde edilen hue açısı değerlerinden istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Genel olarak, Vİ işlemi kurutulmuş elma dilimlerinin hue açısı değerlerini artırma eğiliminde olmuş ve bu durum özellikle 60°C ve 70°C'de belirgin hale gelmiştir. Bulgular, kurutulmuş elma dilimlerinin hue açıları üzerinde sıcaklık, Vİ işlemi ve kurutma yöntemi birlikte etkili olduğunu göstermiştir ($p<0,05$).

Çizelge 4.35. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin hue açısı değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=6)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Vakum İmpregnasyon	Hue Açısı (°)
50	Var	83,5±9,79 ^{B*}
	Yok	72,01±5,99 ^{CD}
60	Var	90,12±3,08 ^A
	Yok	74,26±4,55 ^C
70	Var	89,62±8,2 ^A
	Yok	70,01±4,65 ^D

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Elma dilimlerinde farklı kurutma yöntemlerinin uygulandığı çalışmalarda, renk değişimi parametreleri önemli kalite göstergeleri arasında yer almaktadır. Baysal vd. (2014), tepsili, ısı pompalı (50°C), dondurarak ve mikrodalga kurutma yöntemleriyle elma dilimlerini sırasıyla 50, 90, 270 ve 20 dakika boyunca kurutmuş ve en yüksek ΔC değerini ısı pompalı kurutucuda (10,84), en düşük ΔC değerini ise tepsili kurutucuda

(7,45) elde ettiklerini bildirmiştir. Doktora tez çalışmasında ise farklı kurutma yöntemleri için ΔC^* değerleri 3,62-13,84 arasında bulunmuş olup, elde edilen bulguların mevcut literatür değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Benzer şekilde Çelen vd. (2017) de mikrodalga kurutucuda üç farklı güç (1050, 1500, 2100 W) ve üç farklı konveyör hızı (0,175, 0,210 ve 0,245 m/dakika) kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, en düşük ΔE değerinin (10,36) 1050 W güç ve 0,210 m/dakika konveyör hızında elde edildiğini rapor etmişlerdir. Tüm bu bulgular, elma dilimlerinde uygulanan farklı kurutma yöntemlerinin ve işlem parametrelerinin, renk değişimi üzerinde belirleyici bir etkisinin olduğunu göstermektedir.

Kurutulmuş elma dilimlerinin hue açısı ($^{\circ}$) değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin üçlü interaksiyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.36'da sunulmuştur. Hue açısı, bir rengin tonunu ifade eden bir renk parametresidir ve genellikle renklerin görsel algısını tanımlamak için kullanılır (Yağcılar, 2020). Hue açısı, 0° ile 360° arasında değişir ve renklerin spektral dağılımını temsil eder (Örneğin: 0° : Kırmızı, 90° : Sarı, 180° : Yeşil ve 270° : Mavi). Vİ işlemi, kurutma yöntemi ve sıcaklık kombinasyonları hue açısı değerlerinde önemli değişikliklere neden olmuştur. 70°C 'de AOK+KK yöntemi ile elma dilimlerine Vİ işlemi uygulandığında en yüksek hue açısı değeri ($98,62^{\circ}$) elde edilmiş ($p<0,05$). Aynı sıcaklıkta, KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulanmadığında en düşük hue açısı değeri ($67,74^{\circ}$) gözlenmiştir ($p<0,05$). 50°C 'de, KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulandığında hue açısı değeri ($95,5^{\circ}$), Vİ işlemi uygulanmadığında elde edilen değerden ($78,68^{\circ}$) istatistiksel olarak yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). Aynı sıcaklıkta, VOK+KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulandığında hue açısı değeri ($78,61^{\circ}$), Vİ işlemi uygulanmadığında elde edilen değerden ($69,79^{\circ}$) istatistiksel olarak yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). 60°C 'de ise, AOK+KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulandığında hue açısı değeri ($92,97^{\circ}$), Vİ işlemi uygulanmadığında elde edilen değerden ($73,60^{\circ}$) daha yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). Aynı sıcaklıkta, VOK+KK yöntemi ile Vİ işlemi uygulandığında hue açısı değeri ($87,05^{\circ}$), Vİ işlemi uygulanmadığında elde edilen değerden ($71,67^{\circ}$) de daha yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). Genel olarak, Vİ işlemi kurutulmuş elma dilimlerinin hue açısı değerlerini artırma eğiliminde olmuş ve bu durum özellikle 70°C 'de AOK+KK yöntemi ile belirgin hale gelmiştir. Kurutulmuş elma dilimlerinin hue açısı değerleri üzerinde kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile Vİ işleminin birlikte etkili olduğu görülmüştür ($p<0,05$).

Çizelge 4.36. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin hue açısı değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Hue Açısı (°)
50	KK	Var	95,5±2,67 ^{AB*}
		Yok	78,68±0,19 ^{EFG}
	AOK+KK	Var	76,67±3,2 ^{E-H}
		Yok	67,58±4,31 ^{FG}
	AOK+KK	Var	78,61±5,35 ^D
		Yok	69,79±5,21 ^{HI}
60	KK	Var	90,35±1,4 ^{BC}
		Yok	77,5±1,92 ^{EFG}
	AOK+KK	Var	92,97±0,96 ^{ABC}
		Yok	73,6±7,18 ^{F-I}
	AOK+KK	Var	87,05±2,96 ^{CD}
		Yok	71,67±1,218 ^{GHI}
70	KK	Var	88,79±0,98 ^{BC}
		Yok	67,74±6,1 ^I
	AOK+KK	Var	98,62±1,53 ^A
		Yok	70,41±4,76 ^{HI}
	AOK+KK	Var	81,46±3,25 ^{DE}
		Yok	71,87±3,73 ^{GHI}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Elma dilimlerinde uygulanan farklı ön işlemler ve kurutma koşullarının renk parametreleri üzerindeki etkileri literatürde detaylı olarak incelenmiştir. Yağcıları (2020), baharatlı saf su ve sakkaroz çözeltilerine daldırılarak etüv (75°C, atmosferik basınç, 9 dakika) ve Vİ (75°C, 600 mbar, 9 dakika) ön işlemleri uyguladığı elma örneklerini, farklı vakum seviyelerinde (75°C, 100, 200 ve 300 mbar) kurutarak hue açısı değerlerini genel olarak 100,02-70,37° arasında bulmuştur. Özellikle Vİ ön işlemi uygulanan örneklerde bu değerler 84,50-87,11° arasında tespit edilmiştir. Bu doktora tez çalışmasında ise, tüm örneklerde hue açısı 95,5-67,58° arasında değişmekte olup, Vİ uygulanan elma dilimlerinde bu değerler 83,5-89,62° aralığında belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, literatürde bildirilen hue açısı değerleriyle genel olarak uyumlu olmakla birlikte, bazı uygulamalarda bir miktar daha yüksek bulunmuştur. Bu bulgular, ön işlemler ve kurutma yöntemlerinin elma dilimlerinin renk özellikleri üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, taze elma dilimlerinde elektriksel iletkenliğin artırılması amacıyla uygulanan Vİ işleminin, kurutulmuş ürünlerde renk stabilitesini artırarak rengin daha iyi

korunmasına katkı sağladığı belirlenmiştir. Vİ işlemi, özellikle her kurutma sıcaklığında daha yüksek hue açıları elde edilmesine yardımcı olurken, orta (60°C) ve yüksek (70°C) sıcaklıklarda renk doygunluğunun en iyi şekilde korunduğu ve renk kaybının minimize edildiği görülmüştür. Bu bulgular, Vİ işleminin ve sıcaklık kontrolünün kurutulmuş elma dilimlerinde renk kalitesini artırmada etkili bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Kurutma yöntemi, sıcaklığı ve ürün özelliklerinin renk değişimi üzerindeki etkileri farklı ürün ve araştırmalarda da vurgulanmaktadır. Rajoriya vd. (2019), elma dilimlerini farklı sıcaklıklarda kuruturken, kurutma işleminin başlangıcında toplam renk farkının arttığını, kurutma ilerledikçe ise enzimlerin inaktive olmasıyla enzimatik bozunmanın önlendiğini rapor etmişlerdir. Mamathi vd. (2021), ananas dilimlerinde sıcaklık artışıyla birlikte ΔE^* değerinin arttığını; renk pigmentlerinin oksidasyonu ile b^* değerinin azaldığını ve doğal sarı rengin kaybolduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, bu doktora tez çalışmasında da sıcaklık arttıkça ΔE^* değerinin hafif arttığı belirlenmiştir.

Taj vd. (2023), ceviz örneklerinde daha yüksek kurutma sıcaklıklarında renk yoğunluğunun azaldığını ve en yüksek ΔE değerinin güneşte kurutulanlarda, en düşük renk farkının ise 70°C’de kırım penceresi düzeneğinde kurutulanlarda görüldüğünü belirtmişlerdir. Zalpouri vd. (2023) ise kişniş püresinde istif kalınlığı arttıkça hue açısı değerinin azaldığını ve renk değişiminin, klorofilin ısıya duyarlı yapısından kaynaklandığını vurgulamıştır. Ancak, bu tez çalışmasında kurutma sıcaklığındaki artışa bağlı olarak elma dilimlerinin hue açısı değerlerinde düzenli bir değişim gözlenmemiştir.

Farklı ürünler üzerinde yapılan çalışmalar da benzer şekilde kurutma parametrelerinin renk özellikleri üzerindeki etkilerine dikkat çekmektedir. Örneğin, Shrivastav vd. (2021), çilek püresinde kurutma sonunda CIE a^* ve hue değerlerinde önemli bir azalma olduğunu bildirmiştir. Castoldi vd. (2015) domates püresinde, istif kalınlığının artmasının kurutma süresini ve buna bağlı olarak renk değişimini artırdığını göstermiştir. Hernandez-Santos vd. (2016), havuç dilimlerinde sıcaklık arttıkça kroma değerinin azaldığını tespit etmiş; Guiné ve Barroca (2012) ise, düşük sıcaklıkta kurutulan biberlerin renginin daha iyi korunduğunu, balkabağında ise dondurarak kurutmanın renk değişimine neden olduğunu belirtmiştir. Çelen ve Kahveci (2013), mikrodalga ile kurutulan domates dilimlerinde artan mikrodalga gücüyle hue açısının yükseldiğini, CIE a^* değerinin ise azaldığını raporlamıştır. Orikasa vd. (2014), kivilerde vakum altında kurutmanın renk değişimini azalttığını fakat sıcaklığın etkisinin belirgin olmadığını gözlemlemiştir. Aral ve Beşe (2016) alıç meyvelerinde en yüksek ΔE değerinin düşük sıcaklıkta, en düşük ΔE ’nin ise yüksek sıcaklık ve hava hızında oluştuğunu bildirmiştir.

Correia vd. (2017), en düşük ΔE değerinin düşük sıcaklıkta kurutulan kivilerde görüldüğünü raporlamıştır.

İzli vd. (2018) ananas dilimlerinde en az renk değişimini dondurarak kurutmada gözlemlerken, konvektif kurutmada ise sıcaklık arttıkça renk değişiminin arttığını ve bunun Maillard reaksiyonu ve enzimatik esmerleşmeye bağlı olabileceğini ifade etmişlerdir. Çelen (2019), Trabzon hurması meyvelerinde mikrodalga gücü arttıkça istenmeyen karamelizasyon ve enzimatik esmerleşmenin arttığını, düşük mikrodalga gücüyle ise renk özelliklerinin korunmasında daha iyi sonuçlar elde edildiğini belirtmiştir.

Kurutulmuş elma dilimlerinin esmerleşme indeksi (BI) üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.37’de sunulmuştur. Vİ işlemi uygulanan örneklerde BI değerleri genel olarak daha düşük bulunmuştur. 50°C’de kurutulan örneklerde Vİ işlemi uygulanan dilimlerin BI değeri (-0,27) en düşük değeri olurken, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde en yüksek BI değeri (1,73) belirlenmiştir ($p<0,05$). 60°C’de Vİ işlemi uygulanan ve uygulanmayan örneklerin esmerleşme indeksi değerleri benzer bulunmuştur ($p>0,05$). 70°C’de Vİ işlemi uygulanan örneklerin BI değeri (0,58) ise Vİ işlemi uygulanmayan örneklerden (1,18) daha düşük olmuştur ($p<0,05$). Bu bulgular, Vİ işleminin kurutulmuş elma dilimlerinin BI değerlerini azaltmada etkili olduğunu ve bu etkinin kurutma sıcaklığına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.37. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin esmerleşme indeksi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Vakum İmpregnasyon	Esmerleşme İndeksi
50	Var	-0,27±1,13 ^{D*}
	Yok	1,73±0,58 ^A
60	Var	0,89±0,38 ^{BC}
	Yok	1,18±0,23 ^B
70	Var	0,58±0,53 ^C
	Yok	1,18±0,19 ^B

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Kurutulmuş elma dilimlerinin BI değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.38’de sunulmuştur. 50°C’de Vİ işlemi uygulanan ve KK yöntemiyle kurutulan

örneklerde BI değeri (-0,27) en düşük değeri göstermiştir ($p<0,05$). Aynı sıcaklıkta VI işlemi uygulanmayan örneklerin BI değeri 1,73 ile en yüksek değerdedir ($p<0,05$). Bulgular uygulanan impregnasyonun BI değerini düşürerek renk değişimine olumlu katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.38. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin esmerleşme indeksi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) ($n=6$)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Esmerleşme İndeksi
50	KK	$-1,08 \pm 0,85^{C*}$
	AOK+KK	$1,20 \pm 1,20^A$
	VOK+KK	$0,15 \pm 1,65^{DE}$
60	KK	$1,25 \pm 0,29^A$
	AOK+KK	$1,14 \pm 0,18^A$
	VOK+KK	$0,72 \pm 0,30^{AB}$
70	KK	$1,23 \pm 0,33^A$
	AOK+KK	$0,65 \pm 0,61^B$
	VOK+KK	$0,83 \pm 0,54^{AB}$

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Kurutma sırasında uygulanan yüksek sıcaklıklar ve uzun kurutma süreleri gıdalarda termal bozunmaya sebep olmakta ve Maillard reaksiyonu ile diğer enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarının gelişmesine yol açmaktadır. Bu durumdan dolayı gıdanın yüzey ve iç kısımlarında kahverengi pigmentler meydana gelmekte ve bu renk pigmentleri gıdanın renginde koyulaşmaya neden olmaktadır (Castoldi vd., 2015). Preethi vd. (2020) pancarların iletken hidro kurutma yöntemi ile kurutulması sırasında sıcaklığın 40'tan 60°C'ye çıkarılmasının renk pigmentlerinin bozulmasına sebep olduğunu, bunun yanı sıra renkte açıklık/koyuluğu ifade eden CIE L* değeriyle yüksek oranda korelasyon gösterdiğini bildirmiştir. Benzer şekilde Mamathi vd. (2021) ananas dilimlerinin kırım pencereci kurutma sisteminde ananas dilimlerinin kurutulması sırasında sıcaklığın 80'den 90°C'ye çıkarılmasının kurutulmuş dilimlerde BI değerini %37-40 oranında arttırdığını rapor etmiştir. Azizi vd. (2017) ise kivi dilimlerinin kırım pencereci yöntem ile 80-100°C'de kurutulmasında sıcaklık artışının üründe istenmeyen esmerleşme reaksiyonlarına neden olduğunu ve düşük sıcaklıklarda renklerin daha iyi korunduğu ifade etmiş, kırım pencereci kurutucunun katma değerli ve hassas meyve-sebzeler için uygun olduğu vurgulamıştır.

Aykırı-Dinçer vd. (2021) 50 ve 70°C’de kırım pencereleli kurutma yöntemi ile 0.5 ve 1.0 mm istif kalınlığında kurutulan kemik suyunun istif kalınlığı arttıkça CIE L* ve b* değerlerinde artış olduğunu bu sayede renk kabul edilebilirliğinin arttığını belirtmiştir. Ancak sıcaklık artışına bağlı gerçekleşen CIE a* renk değerindeki artışın Maillard Reaksiyonu ile oluşan koyu pigmentlerden kaynaklandığını belirtmiştir.

Baysal vd. (2014), farklı kurutma yöntemlerinin (tepsili kurutma, ısı pompalı kurutma, dondurarak kurutma ve mikrodalga kurutma) elma dilimlerinin renk değerleri üzerine etkisini belirledikleri çalışmada, ısı pompası ile kurutulmuş elma dilimlerinin kurutma sırasındaki esmerleşme sonucunda CIE a* renk değerinin kırmızıya döndüğünü, CIE b* renk değerlerinin ise 30,16 ve 32,87 arasında değiştiğini bildirmiştir. ΔE^* değeri 9.38 ile 16,73 arasında değişirken, en düşük ΔE^* değeri tepsili kurutucuda kurutulan elma dilimlerinde, en yüksek ΔE^* değeri ise ısı pompasıyla kurutulan örneklerde belirlenmiştir. Taze elma dilimlerinin hue açısı değeri 80,22° olarak belirlenmiş olup, tepsili kurutma ve dondurarak kurutma ile kurutulan elma dilimlerinin hue açısı değerlerinin taze elmaya oldukça benzediğini bildirmişlerdir.

4.6.5. Su Aktivitesi Değerleri

Kurutulmuş elma dilimlerinin su aktivitesi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin üçlü interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.39’da sunulmuştur. Taze elmaların su aktivitesi 0,90 üzerinde bulunmuştur. Kurutulmuş numunelerde su aktivitesi değerleri genellikle 0,65’in altına düşmüştür. Kurutulmuş elma dilimlerinin su aktivitesi değerlerine ait varyans analiz bulguları ise EK 24-Çizelge 7.17’de sunulmuştur. Genel olarak, su aktivitesi değerleri hem kurutma sıcaklığına hem de kullanılan yonteme bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Vİ işleminin uygulandığında, su aktivitesi değerlerinde belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Örneğin, 50°C’de VOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işleminin uygulanan örneklerde su aktivitesi değeri 0,66 ile en yüksek değerlerden birini gösterirken, aynı sıcaklıkta KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işleminin uygulanmayan örneklerde bu değer 0,55 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, 70°C’de KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işleminin uygulanmayan örneklerde su aktivitesi değeri 0,41 ile en düşük seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, kurutma sıcaklığının ve yöntemin su aktivitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu, ancak Vİ işleminin bu etkiyi değiştirebildiğini ortaya koymaktadır. Özellikle VOK+KK yöntemiyle kurutulan

örneklerde Vİ işleminin su aktivitesini bir miktar artırdığı, ancak bu etkinin sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.39. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin su aktivitesi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Su Aktivitesi
50	KK	Var	0,61±0,00 ^{A-E*}
		Yok	0,55±0,07 ^{C-E}
	AOK+KK	Var	0,53±0,03 ^{DE}
		Yok	0,59±0,04 ^{B-E}
	VOK+KK	Var	0,66±0,02 ^{AB}
		Yok	0,53±0,03 ^E
60	KK	Var	0,66±0,03 ^{AB}
		Yok	0,59±0,07 ^{B-E}
	AOK+KK	Var	0,66±0,01 ^{AB}
		Yok	0,62±0,01 ^{A-D}
	VOK+KK	Var	0,69±0,01 ^A
		Yok	0,55±0,06 ^{C-E}
70	KK	Var	0,58±0,02 ^{B-E}
		Yok	0,41±0,09 ^F
	AOK+KK	Var	0,62±0,04 ^{A-C}
		Yok	0,52±0,12 ^E
	VOK+KK	Var	0,54±0,03 ^{C-E}
		Yok	0,57±0,04 ^{C-E}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Su aktivitesi değerleri, genellikle 0,60'ın altında olduğunda mikrobiyal büyümenin engellendiği ve gıda ürünlerinin güvenli kabul edildiği bir aralıkta yer alır (Cemeroğlu, 2007). Bulgular, özellikle 50°C ve 60°C'de bazı yöntemlerle kurutulan örneklerde su aktivitesi değerlerinin 0,60'a yakın veya üzerinde olduğunu göstermiştir (örneğin, 50°C'de VOK+KK yöntemiyle Vİ işlemi uygulanan örneklerde 0,66). Ancak, 70°C'de kurutulan örneklerde su aktivitesi değerlerinin genellikle daha düşük olduğu ve güvenli kabul edilen aralığa daha yakın olduğu dikkat çekmektedir (örneğin, KK yöntemiyle Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde 0,41). Bu durum, kurutma sıcaklığının ve yönteminin su aktivitesini düşürmede önemli bir rol oynadığını, ancak bazı koşullarda su aktivitesi değerlerinin mikrobiyal güvenlik sınırına yakın olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, özellikle düşük sıcaklıklarda kurutma işlemlerinde su aktivitesinin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir.

Kurutma koşullarının ve ürün özelliklerinin su aktivitesi üzerindeki etkisi, yapılan çeşitli araştırmalarda ayrıntılı olarak incelenmiştir. Taj vd. (2023), kırınım pencereci kurutucuda bütün olarak kuruttukları cevizlerde, kurutma sıcaklığının 50°C'den 90°C'ye artırılmasıyla su aktivitesinin %50,7 oranında azaldığını; 50°C'de kurutulan örneklerde su aktivitesinin 0,65, 90°C'de kurutulanlarda ise 0,32 olduğunu rapor etmiştir. Zalpouri vd. (2023) ise kişniş püresinde hem kurutma sıcaklığı hem de istif kalınlığının su aktivitesine anlamlı derecede etki ettiğini; düşük sıcaklıkta ve yüksek istif kalınlığında en yüksek (0,364), yüksek sıcaklık ve düşük istif kalınlığında ise en düşük su aktivitesi (0,347) değerlerinin gözlemlendiğini bildirmiştir. Benzer şekilde, Mandale vd. (2023) tarafından farklı sıcaklık, süre ve istif kalınlığında kurutulan kırmızı pancar örneklerinde, artan kurutma sıcaklığının nem difüzyonunu ve buharlaşmayı artırdığı, böylece su aktivitesinin azaldığı belirlenmiştir; en yüksek su aktivitesi 75°C'de 1,5 mm istif kalınlığında 60 dakikada kurutulan pancarda (0,427), en düşük su aktivitesi ise 85°C'de 0,5 mm istif kalınlığında 30 dakikada kurutulan pancarda (0,399) ölçülmüştür.

Baysal vd. (2014) tarafından elma dilimleriyle yapılan çalışmada, tepsili, ısı pompalı (50°C), dondurarak ve mikrodalga kurutma yöntemleriyle sırasıyla 50, 90, 270 ve 20 dakika sürede gerçekleştirilen kurutma sonucunda, en düşük su aktivitesinin mikrodalga kurutmada (0,47), en yüksek su aktivitesinin ise ısı pompalı kurutmada (0,54) elde edildiği belirtilmiştir. Filiz (2015) ise, farklı elma çeşitlerinin 65, 70 ve 75°C'de kurutulması sonucunda, elma cipslerinde 0,15-0,19 aralığında oldukça düşük su aktivitesi değerleri gözlemlenmiştir.

Bu doktora tez çalışması kapsamında belirlenen elma dilimlerine ait su aktivitesi değerleri ise 0,41-0,66 arasında olup, bazı literatür çalışmalarındaki değerlerle benzerlik göstermekle birlikte, özellikle Filiz (2015) tarafından yapılan çalışmadaki değerlerin üzerinde bulunmuştur. Tüm bu bulgular, kurutma sıcaklığının, yönteminin ve istif kalınlığının, su aktivitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu, bu parametrelerin optimize edilmesinin ürün kalitesi açısından önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

4.6.6. Kül İçeriği

Gıdaların yakılması sonucu geride kalan kül miktarı ve bileşimi gıdalar arasında farklılık göstermektedir. Gıdalarda kül tayini kaliteyi belirlemek açısından önemlidir ve belirlenen kül miktarı yakma sonucunda ortamda kalan inorganik maddelere bağlıdır (Cemeroğlu, 2007). Bundan dolayı da kül içeriği gıdanın beslenme değeri kadar elementel analizler için de önemlidir ve taze elmanın kül içeriği %0,3-3,5 arasında

değişmektedir (Nielsen, 2003). Elma kabuklarında kül oranı daha yüksektir (Yokuş, 2014). Çalışmada kullanılan Granny Smith cinsi elmaların kabukları soyulduktan sonra kurutulmuşlar ve kurutma sonrasındaki dilimlerin kül içeriği %1,98-2,42 arasında değişmiştir. Doktora tez çalışmasında kurutulmuş elma dilimlerinin kül içeriğine ait varyans analiz bulguları EK 25-Çizelge 7.18'de sunulmuştur. Kurutulmuş elma dilimlerinin kül içeriği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.40'ta sunulmuştur. Vİ işlemi uygulandığında kül içeriği değerlerinin genel olarak arttığı gözlenmiştir. Vİ işleminde elektriksel iletkenliğinin artırılması amacıyla elma dilimlerine CaCl_2 nüfuz edilmiş ve bu durum elma dilimlerindeki inorganik bileşen olan kalsiyum içeriğinde artışa neden olmuştur. Özellikle AOK+KK ve VOK+KK yöntemleriyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanan örneklerde kül içeriği sırasıyla %2,33 ve %2,42 ile en yüksek değerlere ulaşmıştır ($p<0,05$). Buna karşılık, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde kül içeriği daha düşük bulunmuş ve KK ve AOK+KK yöntemleriyle kurutulan örneklerde yaklaşık %1,55 değeriyle en düşük belirlenmiştir ($p<0,05$). Bu durum, Vİ işleminin ve kullanılan kurutma yönteminin kül içeriği üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemleri (AOK ve VOK) ile Vİ işleminin birlikte kullanılması, kurutulmuş elma dilimlerinin kül içeriğini artırmada etkili olmuştur.

Çizelge 4.40. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kül içeriği üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=9)

Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Kül İçeriği (%)
KK	Var	1,98±0,24 ^B
	Yok	1,56±0,14 ^C
AOK+KK	Var	2,33±0,24 ^A
	Yok	1,55±0,17 ^C
VOK+KK	Var	2,42±0,13 ^A
	Yok	1,94±0,15 ^B

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Kurutulmuş elma dilimlerinin kül içeriği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu

istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.41’de sunulmuştur. Vİ işlemi uygulanmış örneklerde kül içeriği her üç sıcaklıkta da işlemin uygulanmadığı örneklerden daha yüksek bulunmuş ve bu durum, Vİ işleminin kül içeriğini artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Örneğin, Vİ uygulanmış dilimler 50°C ’de kurutulduğunda, örneklerin kül içeriği %2,24 iken Vİ uygulanmamış örneklerde bu değer %1,55’te kalmıştır ($p<0,05$). Ayrıca, kurutma sıcaklığı ile Vİ işlemi arasındaki istatistiksel olarak anlamlı ikili etkileşim, her iki faktörün birlikte kül içeriği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle Vİ işlemi uygulanmamış örneklerde kurutma sıcaklığına bağlı olarak elma dilimlerinin kül içeriği değerlerinde dalgalanmalar gözlenirken, Vİ işlemi uygulanmış örneklerde kül içeriği sıcaklık değişiminden daha az etkilenmiştir. Bu bulgular, Vİ işlemi ile sıcaklığın kurutulmuş elma dilimlerinin kül içeriği üzerinde sinerjik bir etki yarattığını göstermektedir.

Çizelge 4.41. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin esmerleşme indeksi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi ($n=9$)

Kurutma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Vakum İmpregnasyon	Kül İçeriği (%)
50	Var	$2,24\pm0,16^{\text{A}}$
	Yok	$1,55\pm0,21^{\text{D}}$
60	Var	$2,22\pm0,42^{\text{A}}$
	Yok	$1,81\pm0,21^{\text{B}}$
70	Var	$2,27\pm0,21^{\text{A}}$
	Yok	$1,69\pm0,24^{\text{C}}$

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Kurutulmuş elma dilimlerinin kül içeriği değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin üçlü interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.42’de sunulmuştur. Vİ işlemi uygulanmış örneklerde kül içeriği değerleri genel olarak daha yüksek bulunmuş ve bu durum, Vİ işleminin kül içeriğini artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kurutma yöntemi ve sıcaklığı da kül içeriği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, 50°C ’de VOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmış örneklerin kül içeriği %2,44 ile en yüksek değerlerden birini alırken, aynı koşullarda Vİ işlemi uygulanmamış örneklerde kül içeriği %1,80 olarak belirlenmiştir ($p<0,05$). Benzer şekilde, 60°C ’de AOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmış örneklerin kül içeriği %2,58 ile en yüksek değeri almıştır. Vİ işlemi uygulanmamış örneklerde, kurutma yöntemi ve sıcaklık faktörlerine bağlı olarak kül

içeriği değerlerinde dalgalanmalar gözlenmiştir. Örneğin, 70°C’de KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmamış örneklerin kül içeriği %1,55 iken, aynı sıcaklıkta VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde kül içeriği %1,98 olarak belirlenmiştir ($p<0,05$). Bununla birlikte, Vİ işlemi uygulanmış örneklerde kül içeriği değerleri genellikle daha yüksek ve daha tutarlı bir dağılım göstermiştir. Kurutma sıcaklığı, kurutma yöntemi ve Vİ işleminin kül içeriği üzerinde sinerjik bir etki yaratmıştır. Özellikle VOK+KK ve AOK+KK yöntemleriyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmış örneklerde kül içeriği değerlerinin daha yüksek olması, bu yöntemlerin kül içeriğini artırmada daha etkili olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.42. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kül içeriği üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemi ile elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma) (n=3)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	Kül İçeriği (%)
50	KK	Var	2,19±0,05 ^{CDE*}
		Yok	1,44±0,07 ^I
	AOK+KK	Var	2,11±0,02 ^{DE}
		Yok	1,41±0,06 ^I
	VOK+KK	Var	2,44±0,15 ^{AB}
		Yok	1,80±0,19 ^{FG}
60	KK	Var	1,71±0,11 ^{GH}
		Yok	1,68±0,04 ^{GH}
	AOK+KK	Var	2,58±0,22 ^A
		Yok	1,71±0,20 ^{GH}
	VOK+KK	Var	2,38±0,08 ^{ABC}
		Yok	2,05±0,07 ^E
70	KK	Var	2,06±0,16 ^E
		Yok	1,55±0,16 ^{HI}
	AOK+KK	Var	2,32±0,15 ^{BCD}
		Yok	1,53±0,08 ^{HI}
	VOK+KK	Var	2,44±0,20 ^{AB}
		Yok	1,98±0,02 ^{EF}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Kurutulmuş ürünlerde kül içeriği, kullanılan hammaddeye ve uygulanan kurutma yöntemine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Yokuş (2014), Luiz Golden ve Starking Delicious elma dilimlerini mikrodalga, dondurarak ve vakumla kurutma yöntemleriyle işleyerek elde ettiği ürünlerde kül içeriğini %1,22-2,05 arasında rapor etmiş ve bu değerler, tez çalışmasında Vİ işlemi uygulanmamış örneklerde belirlenen kül içeriğiyle (%1,41-1,98) benzer olmuştur. Atlı ve Ötleş (1999), tünel tipi

kurutucuda kurutulan elma dilimlerinde kül içeriğini %0,25-2,73 arasında belirlemiş ve bu bulgular da tez çalışması kapsamındaki Vİ işlemi uygulanmamış örneklerle benzer olmuştur. Halil vd. (2019), konveksiyonel kurutma, vakum altında kurutma ve mikrodalga kurutma yöntemleriyle elde ettikleri zeytin cipslerinde kül içeriğini %6,76-7,71 g/100 g km aralığında bulmuşlardır. Literatürdeki diğer ürünlerde de benzer şekilde, manyok cipsinde 1,53-2,06 g/100 g km (Oghenechavwuko vd., 2003), muz cipsinde 3,25-10,50 g/100 g km (Elkhalifa vd., 2014) ve gluten cipsinde 3,38 g/100 g km (Ertop vd., 2016) kül içeriği bildirilmiştir. Bu farklılıklar, hammadde farklılığından kaynaklanmaktadır (Halil vd., 2019).

4.6.7. Morfolojik Yapı Analizleri

Farklı kurutma yöntemleri ile üç farklı sıcaklıkta (50, 60 ve 70°C) kurutulan elma dilimlerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri EK 26-Şekil 7.8, EK 27-Şekil 7.9 ve EK 28-Şekil 7.10'da sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde, 50°C'de hücre yapısında daha az çöküntü ve yüzeyde daha az pürüzlülük olduğu görülse de tüm sıcaklıklarda KK yönteminde hücre yapısında meydana gelen bozulmalar net bir şekilde görülmektedir. Uygulanan ön işlemler ile hücre yapısındaki değişimler daha az seviyede gerçekleşmiştir. Vİ işlemi uygulanması sonrasında farklı yöntemler ile kurutulan örneklerin, impregnasyon çözeltisinde kullanılan CaCl_2 'ün etkisiyle uygulanan tüm kurutma sıcaklıklarında daha pürüzsüz bir yapıya sahip olduğu, elma dilimlerinde çökmelerin ve büzülmenin az olduğu gözlenmektedir. Vİ işlemi, yüksek sıcaklıklarda bile elma dilimlerinin yapısının korunmasında etkili olmuştur. Ohmik ısıtımali ön kurutma uygulanan elma dilimlerinde kurutma sıcaklığı artışına bağlı olarak hücrelerde büzülme meydana gelmiş olsa bile ohmik ısıtmanın vakum altında uygulanması (VOK) ile birlikte bu büzülme en alt seviyeye inmiş ve daha pürüzsüz bir yapı elde edilmiştir. Genel anlamda, Vİ işlemi ile ohmik ısıtımali ön kurutma işlemi kurutulmuş elma dilimlerinin yapısı üzerindeki olumsuz etkileri ortadan kaldırmış ve bu konuda VOK yönteminin en etkili olduğu tespit edilmiştir.

Elma dilimlerinde kurutma yöntemi ve sıcaklığının mikro yapısal etkilerini inceleyen çalışmalar, farklı yöntemlerin kurutulmuş ürünlerin hücresel yapısı üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir. Tortoe ve Orchard (2006), elma dilimlerini üç farklı sıcaklıkta (32,2. 40,0 ve 55,0°C) ve dört farklı ozmotik çözeltiyle (%40, 50, 60 ve 70 sakkaroz çözeltisi) dehidre etmiş ve sıcaklık artışına bağlı olarak hücre içi boşlukların genişlediğini SEM görüntüleriyle tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, Ma vd. (2021), farklı

kurutma yöntemlerinin (konvektif, ısı pompası yardımıyla kurutma ve dondurarak kurutma) elma kabuğunun mikro yapısı üzerindeki etkilerini incelemiş ve dondurarak kurutulan elma dilimlerinin ince gözenek duvarlı, poröz bir yapıya sahip olduğunu, bu yöntemin bitki dokusunun gözenekli hücreli yapısını koruduğunu rapor etmişlerdir. Buna karşılık, konvektif kurutma gibi yöntemlerde suyun buharlaşması sırasında hücrelerin büzülmesi ve çökmesi nedeniyle daha kalın gözenek duvarları ve yoğun yapılar oluştuğunu belirtmişlerdir. Tüfekçi ve Özkal (2020) ise elma dilimlerini konvektif yöntem ve ultrasonik ön işlem uygulayarak kurutmuş ve SEM görüntülerinde, ultrasonik ön işlemde kavitasyon nedeniyle elma dilimlerinde çökme meydana geldiğini, ön işlem uygulanmayan yöntemde ise yapının daha kararlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sebze ve meyvelerin yüzey morfolojisi üzerine yapılan diğer çalışmalar da benzer sonuçlar ortaya koymaktadır. Vargas vd. (2022) konvektif kurutma, dondurarak kurutma ve kırılım penceresi yöntemiyle karalahana, ıspanak ve brokoliyi kurutmuş ve konvektif kurutucuda kurutulan sebzelerin yüzey morfolojilerinin, diğer iki teknikle kurutulan sebzelerle göre daha pürüzlü olduğunu bildirmişlerdir. Domates dilimlerini farklı sıcaklıklarda kurutan Moreno ve Diaz-Moreno (2017), 50°C’de kurutulan domatesin mezokarpında yapısal hasar gözlemezken, 60 ve 70°C’de endokarp ve mezokarpın sertleştiğini ve bu sıcaklıklarda daha fazla kırılabilirliğe yol açan güçlü bükülmelerin meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Tian vd. (2005) ise mikrodalga (4-10 W/g,) ve konvektif kurutma (60 ve 70°C’de) yöntemleriyle kivi dilimlerini kurutmuş ve konvektif kurutma yöntemiyle kurutulan kivi dilimlerinde gözeneklerin daha az olduğunu, mikrodalga yöntemiyle kurutulan dilimlerde ise daha kısa kuruma süresi, daha düşük kuruma sıcaklığı ve iç su buharından kaynaklanan doku genişlemesi nedeniyle daha düşük büzülme seviyelerine rastlandığını belirtmişlerdir. Bu çalışmalar, farklı kurutma yöntemleri ve sıcaklıkların ürünlerin mikro yapısı ve morfolojik özellikleri üzerinde önemli etkiler yarattığını ve her yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajlarının bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu doktora tez çalışmasında, farklı sıcaklık ve yöntemlerle kurutulan elma dilimlerinin SEM görüntülerine ait bulgular, yukarıda belirtilen literatür bulguları ile benzerlik göstermektedir. KK yöntemi ile kurutulan elma dilimlerinin morfolojik yapısı diğer kurutma yöntemleri ile kurutulan elma dilimlerine göre daha pürüzlü olmuştur. Ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi vakum altında gerçekleştiğinde kurutulan elma dilimlerinin morfolojik yapısının daha kararlı hale gelmiştir. Ohmik ısıtma yönteminde üründe homojen bir ısınma sağlanmakta ve dolayısı ile dengeli bir nem uzaklaşması

gerçekleşmektedir (Vega-Galvez, 2012). Bu durum, bitki hücre duvarını koruyarak hücre bütünlüğü sağlamış (Richardson, 2001; İçier vd., 2017) ve sonuçta ohmik ısıtmalı ön kurutmayla birlikte kurutulmuş üründe daha kararlı bir morfolojik yapı oluşmuştur.

4.6.8. Metal Migrasyon Analizleri

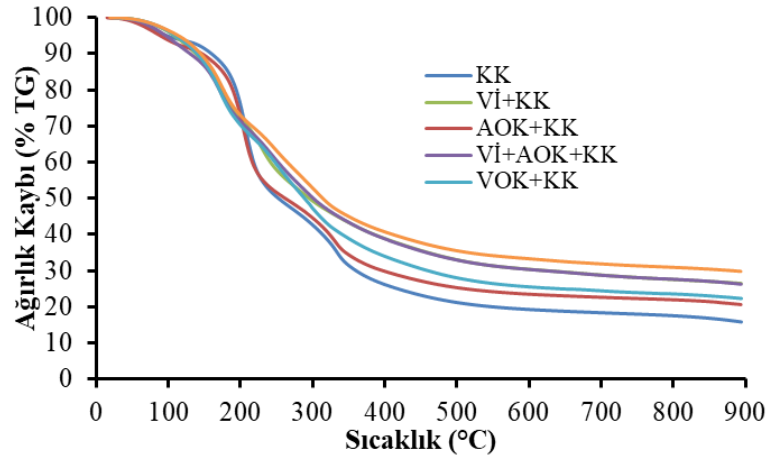
Ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi sırasında paslanmaz çelik elektrotlardan elma dilimlerine olası bir metal migrasyonun gerçekleşme düzeyinin tespit edilmesi amacıyla farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin metal seviyeleri de bu çalışma kapsamında belirlenmiştir. Kurutulmuş elma dilimlerinde nikel (Ni), manganez (Mn), çinko (Zn), kurşun (Pb) ve kobalt (Co) tespit edilmemiş olup krom (Cr) metal seviyelerinin dedeksiyon limiti (LOD) altında olduğu (0,14-0,21 mg/kg) saptanmıştır. Ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi, plaka şeklindeki düz paslanmaz çelik (316) elektrotlardan paslanmaz çeliğin ana bileşenleri olan Cr ve Ni metallerinin elma dilimlerine geçişine (migrasyonuna) neden olmamıştır. Paslanmaz çeliğin temel bileşenleri demir, krom, nikel, karbon, molibden ve az miktarda diğer metallerdir. 316 numaralı paslanmaz çelikler ise %16 Cr ve %10 Ni'den oluşmakta ve korozyon direncini arttırmak için yapısına %2 oranında molibden ilave edilmektedir (Samaranayake ve Sastry, 2005). ABD Tıp Enstitüsü Gıda ve Beslenme Kurulu tarafından yetişkinlerde demir (Fe) için tolere edilebilir üst alım seviyesi 45 mg/gün olarak belirlenmiştir (Anonim, 2001). Yapılan çalışmada elma dilimlerinde Fe geçişi olmamıştır. Dana etinden hazırlanmış köftelerin paslanmaz çelik elektrot içeren ohmik ısıtmalı sistemde pişirilmesi ve ardından vakum soğutulmasıyla ilgili bir çalışmada Güler-Dal (2023), köftelere metal geçişinin tolere edilebilir düzeyin çok altında olduğunu bildirmiştir. Bir diğer çalışmada Jun vd., (2007) yerel bir marketten aldıkları domates konservesine ohmik ısıtma için yüksek frekanslı dalgalı form uyguladıklarını ve domates konservesini paketlemişlerdir. Yaptıkları metal migrasyon analizinde domates konservesine geçen metal değerlerinin tolere edilebilir değerlerin altında olduğunu bildirmişlerdir. Benzer şekilde, bu doktora tez çalışmasında da belirtilen metallerin ürüne geçişinin tolere değerlerin oldukça altında olduğu saptanmıştır.

4.6.9. Termogravimetrik Analizler

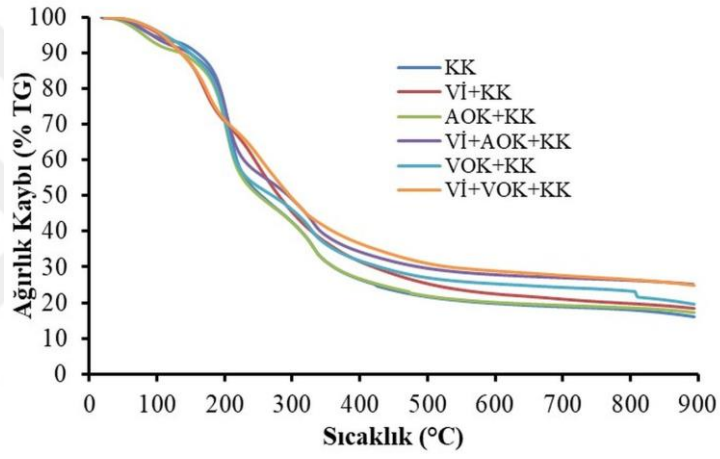
Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin termal stabiliteleri Şekil 4.27'de sunulmuştur. Tüm kurutma yöntemlerinde ağırlık kaybı, sıcaklık arttıkça kademeli olarak azalmaktadır. KK yöntemi, genellikle diğer yöntemlere kıyasla daha düşük termal stabilite göstermiştir. Vİ işlemi ile kurutulan örnekler, hücre

yapısındaki değişiklikler nedeniyle (Richardson, 2001; İçier vd., 2017) daha yüksek termal stabilite sergilemiştir. AOK ve VOK yöntemleri, özellikle 60°C ve 70°C sıcaklıklarda (Şekil 4.27B ve 4.27C), termal stabiliteyi artırarak ağırlık kaybını azaltmıştır. VOK yöntemi, düşük basınç koşullarında nemin daha etkili uzaklaştırılması (Vega-Galvez, 2012) nedeniyle en iyi sonuçları vermiştir. Genel olarak, kurutma sıcaklığının artışı, termal stabiliteyi artırırken, kullanılan ön işlem yöntemleri de bu stabiliteyi önemli ölçüde etkilemiştir. Bu bulgular, kurutma yöntemlerinin ve sıcaklıklarının elma dilimlerinin termal özellikleri üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

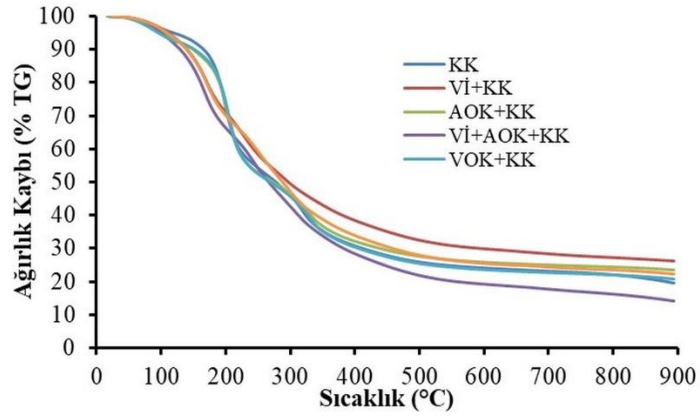




(A)



(B)



(C)

Şekil 4.27. Altı farklı kurutma yöntemiyle (A) 50°C, (B) 60°C ve (C) 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin termal stabiliteyi (KK: Konveksiyonel kurutma, VI: Vakum impregnasyonu, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtım, VOK: Vakum altında ohmik ısıtım) göstermektedir.)

Elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini artırmayı hedefleyen bir ön işlem olarak Vİ işlemi, kurutulmuş ürünlerin termal stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. TGA analizlerinden elde edilen bulgular, Vİ işleminin uygulandığı örneklerde termal stabilitenin genel olarak arttığını göstermektedir. Bu durum, Vİ işlemi sırasında elma dilimlerinin hücre yapısına nüfuz eden çözeltilerin, termal bozunmaya karşı daha dirençli bir matris oluşturmasıyla ilişkilendirilebilir. Özellikle Vİ işlemi ile birlikte ohmik ısıtmalı ön kurutma (yani AOK ve VOK) yöntemlerinin kullanılması, termal stabiliteyi daha da artırmıştır. Bu yöntemler, elektriksel iletkenliği artırarak ısıнын daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlamış ve böylece termal bozunmayı geciktirmiştir. Ayrıca, Vİ işlemiyle işlenen elma dilimlerinin, kurutma sırasında hücre yapısındaki nem kaybını daha kontrollü bir şekilde gerçekleştirdiği ve bu durumun termal stabiliteyi olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, Vİ işlemi, kurutulmuş elma dilimlerinin termal özelliklerini iyileştiren etkili bir ön işlem olarak öne çıkmaktadır.

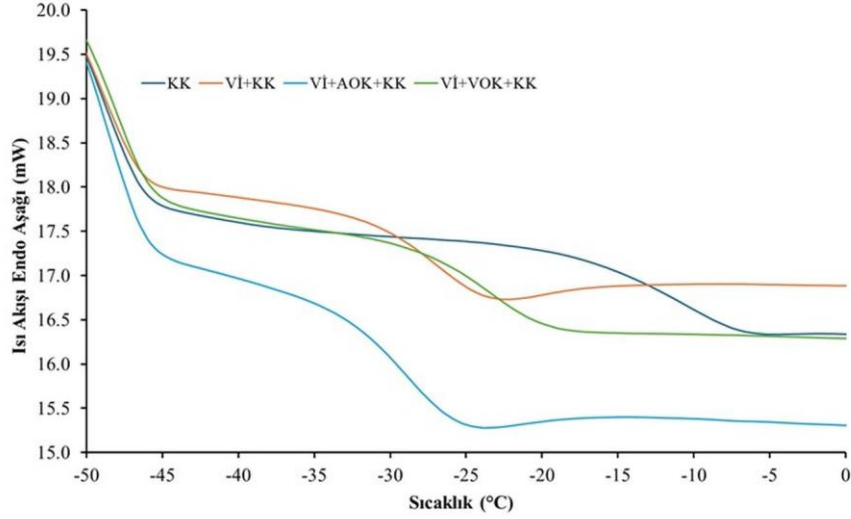
Elma dilimlerinin termal stabilitesini artırmada AOK yöntemi etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemin uygulandığı örneklerde ağırlık kaybı daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmiş ve termal stabilite artmıştır. Ohmik ısıtma, elektriksel iletkenlik yoluyla ısıнын homojen bir şekilde dağılmasını sağlamakta ve bu durum, hücre yapısındaki nemin daha etkili bir şekilde uzaklaştırılmasına olanak tanımaktadır (Vega-Galvez, 2012). Ayrıca, ohmik ısıtma sırasında oluşan hızlı ve eşit ısı transferi, hücre duvarlarının yapısal bütünlüğünü koruyarak termal bozunmayı geciktirmektedir (Richardson, 2001; İçier vd., 2017). Bu nedenle, AOK yöntemi, elma dilimlerinin kurutma sürecinde termal özelliklerini iyileştiren önemli bir ön işlem olarak değerlendirilmektedir. VOK yöntemi, elma dilimlerinin termal stabilitesini artırmada AOK yöntemine kıyasla daha üstün bir performans sergilemiştir. Vakum koşulları, düşük basınç ortamında nemin daha hızlı ve etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamakta, bu da termal stabiliteyi olumlu yönde etkilemektedir. TGA analizleri, VOK işleminin uygulandığı örneklerde ağırlık kaybının daha düşük olduğunu ve termal bozunmanın daha geç başladığını göstermektedir. Vakum ortamı, hücre yapısındaki gazların uzaklaştırılmasına ve nemin buharlaşma sıcaklığının düşmesine neden olarak, ohmik ısıtmanın etkisini artırmaktadır. Bu durum, elma dilimlerinin hem termal dayanıklılığını hem de kurutma verimliliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, VOK yöntemi, termal stabiliteyi en üst düzeye çıkaran etkili bir ön işlem olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, elma dilimlerinin termal stabilitesini artırmak amacıyla en uygun ön işlem kombinasyonu Vİ+VOK+KK olmuştur ve bu yöntem, yüksek sıcaklıklarda daha

düşük ağırlık kaybı ile daha iyi bir termal stabilite sağlamıştır. Diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında, bu kurutma yöntemi kombinasyonu, kurutulmuş elma dilimlerinin hem fiziksel yapısını koruma hem de ağırlık kaybını minimize etme açısından üstün bir performans sergilemektedir.

4.6.10. Diferansiyel Taramalı Kalorimetrik Analizler

Elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sonrasında üç farklı yöntemle kurutulan elma dilimlerinin diferansiyel taramalı kalorimetrik analiz (DSC) sırasında ısı akışının sıcaklıkla değişimi ve termal davranışları Şekil 4.28’de sunulmuştur. KK yöntemiyle kurutulan elma dilimlerinin, diğer yöntemlere kıyasla daha düşük ısı akışı değerleri sergilediği görülmektedir. Bu durum, KK yönteminin hücre yapısında daha fazla bozulmaya neden olmasıyla ilişkilendirilebilir. Vİ işlemiyle birlikte KK yöntemi, ısı akışında KK yöntemine göre daha dengeli bir değişim sağlamıştır. Vİ işlemiyle entegre edilen ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemleri içeren yöntemler (yani Vİ+AOK+KK ve Vİ+VOK+KK) ısı akışında daha dengeli bir değişim sağlamış ve termal özellikleri iyileştirmiştir. Özellikle Vİ+VOK+KK yöntemi, düşük sıcaklıklarda daha yüksek ısı akışı değerleriyle dikkat çekmiş, bu da vakum koşullarının termal stabiliteyi artırıcı etkisini göstermiştir. Ayrıca, Vİ işlemi, elma dilimlerinin elektriksel iletkenliğini artırarak ohmik ısıtmalı ön kurutmalı yöntemlerin etkinliğini güçlendirmiş ve termal davranışlarını olumlu yönde etkilemiştir. Sonuç olarak, Vİ işlemi ve ohmik ısıtmalı ön kurutmalı yöntemler, elma dilimlerinin termal özelliklerini iyileştiren etkili işlemler olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.28. Elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sonrasında üç farklı yöntemle kurutulan elma dilimlerinin diferansiyel taramalı kalorimetrik analiz sırasında ısı akış özelliğinin sıcaklıkla değişimi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Üç farklı yöntemle kurutulan elma dilimlerinin DSC analizi sırasında ısı akışının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.29’da gösterilmiştir. KK yöntemiyle kurutulan örnekler, diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek ısı akışı değerleri sergilemiştir. Bu durum, KK yönteminin hücre yapısında daha fazla nem tutulumuna neden olmasıyla ilişkilendirilebilir. AOK+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimleri, sadece KK yöntemiyle kurutulanlara göre daha düşük ısı akışı değerleri göstermiş ve bu durum, ohmik ısıtmanın bitkisel hücre yapısındaki nemi daha etkili bir şekilde uzaklaştırmasına işaret etmektedir (Vega-Galvez, 2012). Ohmik ısıtmalı ön kurutma işleminin vakum altında yapıldığı VOK+KK yöntemiyle kurutulan elma dilimleri, en düşük ısı akışı değerlerini sergileyerek, vakum koşullarının nemin uzaklaştırılmasında ve termal stabilitenin artırılmasında daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak, ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemleri (AOK+KK ve VOK+KK), KK yöntemine kıyasla kurutulmuş elma dilimlerinde daha dengeli bir termal davranış sağlamış ve dilimlerin termal özelliklerini iyileştirmiştir. Özellikle VOK+KK yöntemi, düşük sıcaklıklarda daha stabil bir ısı akışı profili sunarak, vakum koşullarının termal stabilite üzerindeki olumlu etkisini göstermiştir.

33,65°C'ye düşmüştür. En düşük entalpi değerleri, 50°C ve 60°C'de Vİ+AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde görülmüştür. Bulgular, Vİ işlemi ve ohmik ısıtmalı ön kurutma yöntemlerinin, kurutulmuş elma dilimlerinin termal özelliklerini ve enerji gereksinimlerini önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.43. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerine ait camsı geçiş sıcaklığı ve entalpi değerleri üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, Vİ: Vakum impregnasyon, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtmalı ön kurutma, VOK: Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemini göstermektedir.)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	Entalpi (J/g)
50	KK	-18,34	4,11
	AOK+KK	-22,23	6,61
	VOK+KK	-21,50	5,38
	Vİ+KK	-31,55	3,80
	Vİ+AOK+KK	-33,65	2,31
	Vİ+VOK+KK	-28,75	3,02
60	KK	-17,71	6,92
	AOK+KK	-22,84	5,79
	VOK+KK	-21,32	5,15
	Vİ+KK	-31,26	0,86
	Vİ+AOK+KK	-28,95	3,97
	Vİ+VOK+KK	-32,07	1,91
70	KK	-11,57	7,68
	AOK+KK	-22,84	5,79
	VOK+KK	-21,38	4,91
	Vİ+KK	-33,59	1,49
	Vİ+AOK+KK	-29,86	2,45
	Vİ+VOK+KK	-26,83	3,74

Camsı geçiş sıcaklığı, gıda ürünlerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir ve kurutma yöntemleri ile ürünün bileşimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sobral vd. (2001), dondurularak kurutulmuş Japon hurması meyvelerinde T_g değerlerini belirlemek amacıyla DSC yöntemini kullanmış ve bu ürün için bir hal diyagramı elde etmiştir. Benzer şekilde, Sa ve Sereno (1994), dondurarak kurutulan üzümelerde T_g değerlerinin -15,8 ila -86,3°C arasında, çileklerde ise -20,1 ila -90,8°C arasında değiştiğini rapor etmişlerdir. Bai vd. (2001) ise dondurularak kurutulan elma dilimlerde T_g değerlerinin -57,8 ila -61,6°C arasında değiştiğini bildirmiştir ancak bu değerler doktora tez çalışmasında farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulan Granny Smith cinsi elma dilimleri için belirlenen bulgulardan çok daha düşüktür.

Guerrero (1995) ise dondurularak kurutulan Granny Smith elmalarında T_g değerini $-9,3^{\circ}\text{C}$ olarak bildirirmiştir.

Farklı kurutma yöntemlerinin T_g değeri üzerindeki etkisi de literatürde geniş bir şekilde ele alınmıştır. Jakubezyk vd. (2010), farklı kurutma yöntemlerinin elma püresinin camsı geçiş sıcaklıklarına herhangi bir etkisinin olmadığını, ancak maltodekstrin eklenmesinin T_g değerinde $10-30^{\circ}\text{C}$ 'lik bir artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Silva vd. (2006), dondurularak kurutulmuş camu-camu posası için T_g değerini $-3,2^{\circ}\text{C}$ olarak rapor ederken, maltodekstrin eklenmesiyle bu değerin $62,7^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseldiğini bildirmiştir. Syamaladevi vd. (2009) ise hiç su içermeyen ahududu tozu için T_g değerini $40,2^{\circ}\text{C}$ olarak rapor etmiş ve gıdaların camsı geçiş sıcaklıklarının esas olarak nem içeriği ve kimyasal bileşimle ilişkili olduğunu vurgulamıştır. Raharitsifa ve Ratti (2010), düşük su aktivitesinde köpürtülmüş elma suyu tozu için T_g değerini yaklaşık 20°C olarak bildirmiş ve meyve tozlarının camsı geçiş sıcaklıklarının ürünün kimyasal bileşenlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Kurutulmuş elmaların T_g değeri üzerine yapılan çalışmalar da bu parametrenin nem içeriği ve su aktivitesine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Deng ve Zhao. (2008), farklı kurutma yöntemlerinin kurutulmuş elma dilimlerinin T_g değerine etkisini araştırmış ve bu değerlerin $-3,41$ ila $5,12^{\circ}\text{C}$ arasında değiştiğini, en düşük T_g değerinin dondurularak kurutulan elma dilimlerinden elde edildiğini bildirmiştir. Ratti (2001), kurutulmuş elmalarda T_g değerinin nem içeriği ve su aktivitesi düştükçe arttığını ve T_g değerinin, kalan su miktarının plastikleştirici ve hareketlilik artırıcı etkisinin bir fonksiyonu olduğunu belirtmiştir. Slade ve Levine (1995) ise nem içeriğindeki azalmanın serbest hacimde azalmaya ve yerel viskozitede artışa yol açtığını, bunun da amorf bölgedeki moleküllerin hareketliliğini azaltarak T_g değerinde artışa neden olduğunu öne sürmüşlerdir.

Sonuç olarak, camsı geçiş sıcaklığı, gıdaların stabilitesini ve fiziksel özelliklerini etkileyen kritik bir parametre olup, kurutma yöntemleri, nem içeriği, su aktivitesi ve ürünün kimyasal bileşimi gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilendiği düşünülmektedir. Literatürde bildirilen çalışmalar, bu parametrenin ürün özelliklerine göre geniş bir aralıkta değiştiğini ve kurutma işlemlerinin T_g değeri üzerindeki etkisinin ürünün bileşimine bağlı olarak farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

4.6.11. Enerji Analizleri

Kurutulmuş elma dilimlerinin özgül nem çekme oranı (SMER, kg su/kWh), özgül enerji tüketimi (SEC, kWh/kg su), birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli olan enerji miktarı (MER, kg su/h) ve toplam enerji tüketimi (kWh) üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin arttırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili interaksyonu istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.44'te sunulmuştur. Doktora tez çalışması kapsamında kurutulan elma dilimlerinin SMER, SEC, MER ve toplam enerji tüketimlerine ait varyans analiz bulguları ise EK 29-Çizelge 7.19 ve EK 32-Çizelge 7.22 arasında sunulmuştur. SMER değerleri incelendiğinde, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde daha yüksek değerler elde edilmiştir ($p<0,05$). Örneğin, 50°C'de Vİ uygulanmayan örneklerde SMER değeri $3,60 \times 10^{-2}$ kg su/kWh iken, Vİ uygulanan örneklerde bu değer $2,10 \times 10^{-2}$ kg su/kWh'ye düşmüştür. Bu durum, Vİ işleminin nem çekme oranını özellikle bu kurutma sıcaklığında azalttığını göstermektedir. SEC açısından, Vİ işlemi uygulanan örneklerde enerji tüketiminin belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir ($p<0,05$). 60°C'de Vİ uygulanmayan örneklerde SEC değeri 299,50 kWh/kg su iken, Vİ uygulanan örneklerde bu değer 499,70 kWh/kg su olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, MER değerleri de Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde daha yüksek bulunmuş ($p<0,05$). Örneğin, 70°C'de Vİ uygulanmayan örneklerde MER değeri $52,00 \times 10^{-5}$ kg su/h iken, Vİ uygulanan örneklerde bu değer $31,00 \times 10^{-5}$ kg su/h olarak kaydedilmiştir. Toplam enerji tüketimi açısından ise Vİ işlemi uygulanan örneklerde genellikle daha yüksek değerler elde edilmiştir ($p<0,05$). Örneğin, 60°C'de Vİ uygulanan örneklerde toplam enerji tüketimi 1,64 kWh iken, Vİ uygulanmayan örneklerde bu değer 1,24 kWh olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, kurutma sıcaklığı ve Vİ işleminin ikili interaksyonu, kurutulmuş elma dilimlerinin enerji tüketimi ve nem çekme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ($p<0,05$). Vİ işlemi, enerji tüketimini artırırken nem çekme oranını azaltmakta ve bu da kurutma sürecinin verimliliği üzerinde belirgin bir etki yaratmaktadır. Bu bulgular, kurutma işlemlerinde Vİ uygulamasının enerji ve nem yönetimi açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.44. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimleri için özgül nem çekme oranı (SMER), özgül enerji tüketimi (SEC), birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli olan enerji miktarı (MER) ve toplam enerji tüketimi üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (n=9)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Vakum İmpregnasyon	SMER ($\times 10^{-2}$, kg su/kWh)	SEC (kWh/kg su)	MER ($\times 10^{-5}$, kg su/h)	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)
50	Var	2,10 $\pm$ 0,50 ^{B*}	440,90 $\pm$ 125,70 ^B	17,00 $\pm$ 3,10 ^F	1,54 $\pm$ 0,22 ^B
	Yok	3,60 $\pm$ 0,60 ^A	282,20 $\pm$ 11,30 ^C	26,00 $\pm$ 3,10 ^D	1,28 $\pm$ 0,34 ^C
60	Var	0,60 $\pm$ 1,20 ^C	499,70 $\pm$ 37,70 ^A	23,00 $\pm$ 1,10 ^E	1,64 $\pm$ 0,16 ^A
	Yok	0,30 $\pm$ 0,04 ^C	299,50 $\pm$ 19,20 ^C	37,00 $\pm$ 3,10 ^{-B}	1,24 $\pm$ 0,39 ^C
70	Var	0,30 $\pm$ 0,20 ^C	504,03 $\pm$ 47,40 ^A	31,00 $\pm$ 3,10 ^{-C}	1,58 $\pm$ 5,70 ^{AB}
	Yok	0,70 $\pm$ 0,60 ^C	295,90 $\pm$ 45,40 ^C	52,00 $\pm$ 4,10 ^A	1,22 $\pm$ 0,15 ^C

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir (p<0,05).

Kurutulmuş elma dilimlerinin SMER, SEC ve toplam enerji tüketimi üzerine kurutma sıcaklığı ve yönteminin ikili etkisi istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş (p<0,05) ve bulgular Çizelge 4.45'te sunulmuştur. İkili etkisi, kurutma sıcaklığı ve yöntemin birlikte, enerji tüketimi ve nem çekme oranı gibi parametreler üzerinde önemli bir etki yarattığını göstermektedir. SMER değerleri incelendiğinde, KK yöntemi genellikle daha yüksek SMER değerleri sergilemiştir. Örneğin, 50°C'de KK yöntemiyle kurutulan örneklerde SMER değeri 3,50 $\times 10^{-2}$ kg su/kWh iken, AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde bu değer 2,30 $\times 10^{-2}$ kg su/kWh'ye düşmüştür (p<0,05). VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde ise SMER değeri 2,70 $\times 10^{-2}$ kg su/kWh olarak hesaplanmıştır. Kurutma sıcaklığı arttıkça SMER değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Örneğin, 70°C'de KK yöntemiyle kurutulan örneklerde SMER değeri 0,20 $\times 10^{-2}$ kg su/kWh'ye kadar düşmüştür. SEC açısından, AOK+KK yöntemi genellikle daha yüksek enerji tüketimi sergilemiştir. 50°C'de AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde SEC değeri 446,80 kWh/kg su iken, KK yöntemiyle kurutulan örneklerde bu değer 298,40 kWh/kg su olarak ölçülmüştür (p<0,05). VOK+KK yöntemi ise 339,50 kWh/kg su ile bu iki yöntem arasında bir değer göstermiştir. Kurutma sıcaklığı arttıkça SEC değerlerinde genel bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Örneğin, 70°C'de KK yöntemiyle kurutulan örneklerde SEC değeri 378,80 kWh/kg su olarak belirlenmiştir. Toplam enerji tüketimi açısından, VOK+KK yöntemi genellikle daha yüksek değerler sergilemiştir. 50°C'de VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde toplam enerji tüketimi 1,66 kWh iken, AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde bu değer 1,31 kWh olarak belirlenmiştir (p<0,05). 70°C'de ise KK yöntemiyle kurutulan örneklerde toplam enerji tüketimi 1,55

kWh olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak, kurutma sıcaklığı ve yöntemi, kurutulmuş elma dilimlerinin enerji tüketimi ve nem çekme oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur ($p<0,05$). KK yöntemi genellikle daha yüksek SMER değerleri sağlarken, AOK+KK yöntemi daha yüksek SEC değerleri ile öne çıkmıştır. VOK+KK yöntemi ise toplam enerji tüketimi açısından genellikle daha yüksek değerler sergilemiştir. Bu bulgular, kurutma işlemlerinde sıcaklık ve yöntemin dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.45. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimleri için özgül nem çekme oranına (SMER), özgül enerji tüketimine (SEC) ve toplam enerji tüketimi üzerine kurutma sıcaklığı ve yöntemin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma) ($n=6$)

Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Yöntemi	SMER ($\times 10^{-2}$, kg su/kWh)	SEC (kWh/kg su)	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)
50	KK	3,50 $\pm$ 0,80 ^{A*}	298,40 $\pm$ 32,30 ^F	1,26 $\pm$ 0,01 ^{CD}
	AOK+KK	2,30 $\pm$ 0,60 ^B	446,80 $\pm$ 0,00 ^A	1,31 $\pm$ 0,45 ^C
	VOK+KK	2,70 $\pm$ 0,00 ^B	339,50 $\pm$ 63,20 ^E	1,66 $\pm$ 0,06 ^A
60	KK	0,80 $\pm$ 1,50 ^C	385,30 $\pm$ 76,55 ^{CD}	1,60 $\pm$ 0,09 ^{AB}
	AOK+KK	0,25 $\pm$ 0,05 ^C	412,50 $\pm$ 121,90 ^{BC}	1,18 $\pm$ 0,28 ^D
	VOK+KK	0,28 $\pm$ 0,09 ^C	400,90 $\pm$ 133,30 ^{BCD}	1,54 $\pm$ 0,28 ^B
70	KK	0,20 $\pm$ 0,08 ^C	378,80 $\pm$ 123,50 ^D	1,55 $\pm$ 0,32 ^B
	AOK+KK	0,50 $\pm$ 0,60 ^C	428,50 $\pm$ 99,20 ^{AB}	1,07 $\pm$ 0,04 ^E
	VOK+KK	0,70 $\pm$ 0,70 ^C	392,60 $\pm$ 138,60 ^{CD}	1,59 $\pm$ 0,31 ^{AB}

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).

Kurutulmuş elma dilimlerinin SEC, MER ve toplam enerji tüketimi üzerine kurutma sıcaklığı ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin ikili etkisi istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p<0,05$) ve bulgular Çizelge 4.46’da sunulmuştur. SEC değerleri söz konusu olduğunda, Vİ işlemi uygulanan örneklerde genellikle daha yüksek enerji tüketimi belirlenmiştir ($p<0,05$). Örneğin, KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanan örneklerde SEC değeri 422,13 kWh/kg su iken, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde bu değer 286,20 kWh/kg su olarak hesaplanmıştır. AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde ise Vİ işlemi uygulandığında SEC değeri 545,20 kWh/kg su ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. VOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde ise Vİ işlemi uygulandığında SEC değeri 477,33 kWh/kg su olarak kaydedilmiştir. MER değerleri açısından, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde genellikle daha yüksek değerler elde edilmiştir ($p<0,05$). Örneğin, VOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde MER değeri $42,00 \times 10^{-5}$ kg su/h iken, Vİ işlemi uygulanan örneklerde bu değer $23,00 \times 10^{-5}$ kg su/h olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde,

AOK+KK yöntemiyle kurutulan örneklerde Vİ işlemi uygulanmadığında MER değeri $36,00 \times 10^{-5}$ kg su/h iken, Vİ işlemi uygulandığında bu değer $20,00 \times 10^{-5}$ kg su/h'ye düşmüştür. Toplam enerji tüketimi açısından, Vİ işlemi uygulanan örneklerde genellikle daha yüksek değerler hesaplanmıştır ($p < 0,05$). Örneğin, VOK+KK yöntemiyle kurutulan ve Vİ işlemi uygulanan örneklerde toplam enerji tüketimi 1,77 kWh iken, Vİ işlemi uygulanmayan örneklerde bu değer 1,42 kWh olarak belirlenmiştir. KK yöntemiyle kurutulan örneklerde ise Vİ işlemi uygulandığında toplam enerji tüketimi 1,59 kWh iken, Vİ işlemi uygulanmadığında bu değer 1,36 kWh olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak, kurutma yöntemi ve Vİ işleminin ikili etkisi, kurutulmuş elma dilimlerinin enerji tüketimi ve su uzaklaştırma verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ($p < 0,05$). Vİ işlemi, SEC ve toplam enerji tüketimini artırırken, MER değerlerini düşürmektedir. Bu bulgular, kurutma işlemlerinde Vİ uygulamasının enerji yönetimi ve verimlilik açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.46. Farklı yöntemlerle üç farklı sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimleri için özgül enerji tüketimi (SEC), birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli olan enerji miktarı (MER) ve toplam enerji tüketimi üzerine kurutma yöntemi ile elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği vakum impregnasyon işleminin etkisi (KK: Konveksiyonel kurutma, AOK: Atmosfer basıncı altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma ve VOK: Vakum altında ohmik ısıtılmalı ön kurutma) (n=9)

Kurutma Yöntemi	Vakum İmpregnasyon	SEC (kWh/kg su)	MER ($\times 10^{-5}$, kg su/h)	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)
KK	Var	422,13 $\pm$ 78,20 ^{C*}	26,00 $\pm$ 5,10 ^C	1,59 $\pm$ 0,27 ^B
	Yok	286,20 $\pm$ 29,18 ^{DE}	37,00 $\pm$ 9,10 ^B	1,36 $\pm$ 0,15 ^C
AOK+KK	Var	545,20 $\pm$ 24,25 ^A	20,00 $\pm$ 7,10 ^D	1,40 $\pm$ 0,28 ^C
	Yok	313,32 $\pm$ 29,04 ^D	36,00 $\pm$ 9,10 ^B	0,96 $\pm$ 0,08 ^D
VOK+KK	Var	477,33 $\pm$ 68,20 ^B	23,00 $\pm$ 5,10 ^D	1,77 $\pm$ 0,10 ^A
	Yok	278,09 $\pm$ 16,80 ^E	42,00 $\pm$ 1,10 ^A	1,42 $\pm$ 0,19 ^C

*Farklı üssel harf, ortalamalar arasındaki farkın istatistiki açıdan önemli olduğunu göstermektedir ($p < 0,05$).

Kurutma yöntemleri ve koşulları, gıda ürünlerinin enerji tüketimi ve kurutma verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Literatürde farklı ürünler ve kurutma yöntemleri için yapılan çalışmalar, SMER, SEC ve MER gibi parametrelerin geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Kaya Dursun vd. (2022), Japon madımağı (yılan kökü veya kurtpençesi) bitkisini farklı yöntemlerle kuruttukları ve enerji analizlerini yaptıkları çalışmalarında SMER değerlerini 0,003-0,009 kg/kWh, SEC değerlerini ise 24,03-913,60 kWh/kg su olarak hesaplamışlardır. Bu değerler, çalışmamızda elde edilen sonuçlarla yakın düzeydedir. Özdemir vd. (2024), limequat kabuklarını ultrason destekli, vakum

destekli ve ultrason-vakum destekli kurutma yöntemleriyle kuruttukları çalışmalarında, en yüksek SMER (0,0053 kg/kWh) ve MER (0,0012 kg/h) değerleri ile en düşük SEC (188,27 kWh/kg) değerini ultrason destekli vakum kurutma yöntemiyle elde etmişlerdir. Bu nedenle limequat kabuklarının kurutulması için en uygun yöntemin ultrason destekli vakum kurutma olduğunu bildirmişlerdir. Baysal vd. (2014), elma dilimlerini farklı kurutma yöntemleriyle kuruttukları çalışmalarında, dondurarak kurutma yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha düşük SMER ve MER, ancak daha yüksek SEC değerleri sağladığını rapor etmişlerdir. Elma dilimlerinin dondurularak kurutulmasında SMER, MER ve SEC değerleri sırasıyla 0,01 kg/kWh, 0,02 kg/h ve 259,2 MJ/kg olarak belirlenmiştir. Tosun (2009) ise elma dilimlerinin kurutulmasında 4 farklı sıcaklık değeri ve ısı pompalı kurutma sistemi kullanmış ve MER değerlerini sırasıyla 0,65, 0,99, 0,94 ve 1,2 kg/saat olarak belirlemiştir. Sonuç olarak, kurutma yöntemleri ve koşulları, ürünlerin enerji tüketimi ve kurutma verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Literatürde bildirilen SMER, SEC ve MER değerleri, çalışmamızda elde edilen sonuçlarla genellikle uyumlu olup, farklı kurutma yöntemlerinin enerji verimliliği ve ürün kalitesi üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Bu bulgular, kurutma işlemlerinde uygun yöntemin seçilmesinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu doktora tez çalışmasında, Granny Smith elma dilimlerinin 50, 60 ve 70°C’de farklı kurutma yöntemlerine ve ön işlemlere tabi tutulmasının ürün özelliklerine ve kurutma performansına etkisi incelenmiştir. Geleneksel KK, vakum ve atmosferik basınç altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK+KK ve VOK+KK) gibi yenilikçi tekniklerin yanı sıra, elektriksel iletkenliğin artırılmasının hedeflendiği Vİ işleminin (Vİ+AOK+KK ve Vİ+VOK+KK) de ürün üzerindeki farklı etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında, bu faktörlerin kurutulan elma dilimlerinde su kaybı, hacimsel büzüşme, mekanik yapı, fonksiyonel bileşenlerin korunumu, camsı geçiş sıcaklığı ve renk gibi önemli kalite parametrelerine etkisi karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, kurutma sürecinin etkinliği ve son ürün kalitesi üzerinde en etkili faktörlerin kurutma sıcaklığı, uygulanan yöntem ve ön işlem olduğu görülmüştür. 50°C’de KK yönteminde su kaybı yaklaşık %75 olarak belirlenmiş, vakumlu veya ohmik ön kurutma uygulandığında ise bu oran bir miktar azalmıştır. Sıcaklık arttıkça su kaybındaki artışın hızlandığı ve 70°C’de bu değerin %77’ye ulaştığı saptanmıştır. Kurutma süresi kısalmış olsa da özellikle yüksek sıcaklıklarda yapılan kurutmaların ürün dokusunda istenmeyen yapısal kayıplara yol açabildiği tespit edilmiştir. Vİ işlemi özellikle suyun geri alınabilirliğini azaltmış, farklı yöntemlerle kombine edildiğinde su kaybı üzerinde anlamlı değişiklikler yaratabilmiştir.

Kurutma kinetiği analizleri, sıcaklık arttıkça kurutma sürecinin hızlandığını ve nem difüzyon mekanizmasının değiştiğini göstermiştir. Bu bağlamda, 50°C’de Page ile Wang & Singh modelleri en başarılı modeller olurken 60 ve 70°C’de ise Wang & Singh modeli öne çıkmıştır. D_{eff} ve enerji tüketimi de önemli değişim göstermiş, düşük sıcaklıklarda KK yöntemini hem enerji verimliliği hem de enerji tüketimi açısından avantaj sağladığı, belirli ön işlemler ve yüksek sıcaklıkta ise bu parametrelerin farklılaştığı gözlenmiştir.

Uygulanan kurutma yöntemleri ve sıcaklık düzeylerinin, elma dilimlerinin mekanik dokusu ile HBO değerleri üzerinde de belirgin etkileri olmuştur. Özellikle ohmik ısıtmalı ön kurutma ve Vİ işlemi ürünlerin daha yumuşak ve kırılgan bir yapıya sahip olmasını sağlarken, vakum altında ve düşük sıcaklıkta yapılan işlemler sayesinde HBO minimum düzeyde kalmıştır. Fonksiyonel bileşen içeriklerinin korunmasında, düşük sıcaklıkta yürütülen ve Vİ işlemi ile desteklenen kurutma stratejileri öne çıkmıştır. Bu özellik, ürünün AK ve TFMİ değerlerinin stabilitesi açısından avantaj sağlamıştır.

Çalışmada elde edilen bulgulara göre renk analizi, T_g ve kül içeriği gibi kalite göstergeleri de kurutma koşullarından büyük ölçüde etkilenmiştir. 50°C’de ohmik ön kurutma, elma dilimlerinin daha parlak ve canlı renkte kalmasını sağlamış; Vİ işlemiyle birlikte uygulanan ön işlemler kül içeriğinde artışa yol açmıştır. SEM görüntülerinde, düşük sıcaklık ve ön işlemler altında ürünün mikroyapısının daha iyi korunduğu, hacimsel deformasyonun minimum olduğu gösterilmiştir.

Rehidrasyon kapasitesi ve su aktivitesi açısından, Vİ işlemi ve ohmik ısıtmalı ön kurutma uygulamalarının bağımsız veya kombinasyon halinde kullanımı kurutulmuş elma dilimlerinin su alma davranışını büyük ölçüde etkilemiştir. Atmosferde uygulanan ohmik ön kurutma (AOK) en yüksek rehidrasyon performansına ulaşırken, özellikle vakum ortamında ve Vİ işlemi uygulamasında bu kapasitede belirgin azalmalar gözlenmiştir. Bu durum, ürünün hücresel yapısında meydana gelen değişimlerin su tutma ve geri kazanım özelliklerine olan etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

Metal kontaminasyonu açısından, ohmik ısıtmalı ön kurutma işlemi sonrasında numunelerde nikel, manganez, çinko, kurşun ve kobalt saptanmamış, krom seviyesi ise deteksiyon sınırının altında kalmıştır. Bu bulgular, kullanılan paslanmaz çelik elektrotların elma dilimlerine önemli bir metal geçişine yol açmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, farklı kurutma yöntemlerinin ve sıcaklık uygulamalarının elma dilimlerinin kalite parametreleri ve işlenme verimliliği üzerinde önemli ve çok yönlü etkileri olduğu saptanmıştır. Düşük sıcaklıklarda yürütülen, özellikle vakum ve ohmik ısıtmalı ön kurutma gibi yenilikçi tekniklerle desteklenen süreçler, ürünün hem kalitesini hem de enerji verimliliğini artırmak açısından oldukça avantajlı olabilmektedir. Bu bulgular, endüstriyel ölçekte daha kaliteli, güvenli ve sürdürülebilir gıda kurutma süreçleri tasarımı için dikkate alınabilecek niteliktedir.

6. KAYNAKLAR

- Abbott, J. A., Saftner, R. A., Gross, K. C., Vinyard, B. T., & Janick, J. (2004). Consumer evaluation and quality measurement of fresh-cut slices of 'Fuji,' 'Golden Delicious,' 'GoldRush,' and 'Granny Smith' apples. *Postharvest Biology and Technology*, 33, 127-140.
- Adedeji, A. A., Gachovska, T. K., Ngadi, M. O., & Raghavan, G. S. V. (2008). Effect of pretreatments on drying characteristics of okra. *Drying Technology*, 26(10), 1251-1256.
- Adow, K. K., Dzogbefia, V. P., & Ellis, W. O. (1997). Combined effect of drying time thickness on the solar drying of okra. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 73(3), 315-320.
- Afzaal, M., Saeed, F., Hussain, S., Mohamed, A. A., Alamri, M. S., Ahmad, A., Ateeq, H., Tufail, T., & Hussain, M. (2020). Survival and storage stability of encapsulated probiotic under simulated digestion conditions and on dried apple snacks. *Food Science & Nutrition*, 8(10), 5392-5401.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Hassan-Beygi, S. R. (2010). Drying and rehydration characteristics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(3), 351-365.
- Ak, F. (2016). *Elma, Ayva ve Muz Meyvelerine Uygulanan Ozmotik Dehidrasyon Ön İşleminin Bu Meyvelerin Kalite Parametreleri Üzerine Etkisi ve Kinetik Modellemesi. (Doktora Tezi)*. Tunceli ve Atatürk Üniversitesi Ortak Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli.
- Akkara, M., & Kayaardı, S. (2014). İleri muhafaza tekniklerinin et kalitesi üzerine etkisi. *Akademik Gıda*, 12(4), 79-85.
- Akpınar, E. K., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59, 99-104.
- Aksüt, B., Dimçer, E., Saraçoğlu, O., & Polatçı, H. (2023a). Kurutma yöntemi ve sıcaklık değerlerinin mor reyhanın kuruma kinetiği ve renk kalitesi üzerine etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 38(1), 187-198.
- Aksüt, B., Dursun, S. K., & Taşova, M. (2022). Sıcak suya daldırma işleminin kalite özellikleri ve kuruma kinetiği parametrelerine etkisi: Mor havuç örneği. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Ereğli Tarım Bilimleri Dergisi*, 2(1).
- Aksüt, B., Polatçı, H., & Taşova, M. (2023b). The effect of pre-treatment and drying temperatures on energy consumption and quality characteristics in drying of lemon (*Citrus limon* L.) slices. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(19), 10415-10427.
- Aktaş, M., & Kara, M. Ç. (2013). Güneş enerjisi ve ısı pompalı kurutucuda dilimlenmiş kivi kurutulması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4), 733-741.

- Andres, I., Salvatori, D., Chiralt, A., & Fito, P. (2001). Vacuum impregnation viability of some fruits and vegetables. In P. Fito, A. Chiralt, J. M. B. Spiess, W. E. L. Behnili (Eds.), *Osmotic dehydration and vacuum impregnation applications in food industries*. CRC Press.
- Anonim. (2001). *Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc*. Institute of Medicine/Food and Nutrition Board. National Research Council, National Academy Press.
- Anonim. (2008). *Mesleki eğitim ve öğretim sisteminin güçlendirilmesi projesi: Gıda teknolojisi- Meyveleri kurutma*. Ankara. <http://www.hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursproglari/gida/moduller/meyvelerikurutma> (Erişim tarihi: 26.03.2025)
- Anonim. (2014). *Gıdalarda temel işlemler II*. <http://www.akademik.adu.tr/myo/cine/webfolders/dersnotlari/gida/temel/islemle> (Erişim tarihi: 19 Nisan 2025)
- Anonim. (2020). *KUMİB (İstanbul Kuru Meyve ve Mamulleri İhracatçıları Birliği) Raporu*. http://www.iib.org.tr/files/downloads/raporlar/2020/eylul/kurumeyve_eylul2020.pdf (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2024)
- AOAC. (1990). Meat and meat products. In *Official methods of analysis* (39th ed., pp. 931-937). Association of Official Analytical Chemists International.
- AOAC. (2002). *Official methods of analysis* (17th ed., W. Horwitz, Ed.). The Association of Official Analytical Chemists.
- Aral, S., & Beşe, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, 210, 577–584.
- Arslan, D., & Özcan, M. M. (2010). Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *Food Science and Technology*, 43, 1121–1127.
- Asami, D. K., Hong, Y. J., Barrett, D. M., & Mitchell, A. E. (2003). Comparison of total phenolic and ascorbic acid content in freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(5), 1237-1241.
- Assiry, A. M. (2011). Application of ohmic heating technique to approach near-ZLD during the evaporation process of seawater. *Desalination*, 280(1-3), 217-223.
- Atay, A. N., Atay, E., & Koyuncu, F. (2010). Dünya elma ıslah programlarına genel bir bakış. *Bahçe*, 39(1), 31-44.
- Athanasia, M. G., & Adamopoulos, K. G. (2009). Modeling the rehydration process of dried tomato. *Drying Technology*, 27, 1078-1088.

- Atlı, Y., & Ötleş, S. (1999). Elma kurutma işleminin besin öğeleri üzerine etkisi. *Beslenme ve Diyet Dergisi*, 28(2), 59-62.
- Aykırı-Dinçer, E., Özdemir, M., & Topuz, A. (2021). Quality characteristics of bone broth powder obtained through Refractance Window™ drying. *LWT*, 147, 111526.
- Azizi, D., Jafari, S. M., Mirzaei, H., & Dehnad, D. (2017). The influence of Refractance Window drying on qualitative properties of kiwi fruit slices. *International Journal of Food Engineering*, 13(2).
- Bai, Y., & Rahman, M. S. (2002). Structural changes in apple rings during convection air-drying with controlled temperature and humidity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(11), 3179-3185.
- Baker, G. J. C. (1997). *Industrial drying of foods*. Chapman & Hall.
- Balpetek Külcü, D., Günaydın, İ. N. P., & Aydın, H. K. (2018). Ohmik ve mikrodalga pişirme uygulanmış tavuk göğüs etinin buzdolabı şartlarında depolanması ve bazı mikrobiyal kalite değişimleri. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(1), 7-14.
- Banti, M. (2020). Gıdalardaki elektriksel iletkenlik üzerine bir inceleme, meyve ve sebzelerdeki durum. *Dünya Gıda Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 4(4), 80-89.
- Barat, J. M., Fito, P., Andrés, A., & Martínez-Monzó, J. (2001). Vacuum impregnation for development of new dehydrated product. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 297-302.
- Bashimov, G. (2016). Elma ihracatında Türkiye'nin karşılaştırmalı üstünlüğü. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13(2), 9-15.
- Başkaya Sezer, D., & Demirdöven, A. (2015). Meyve sebze işlemede mikrodalga haşlama uygulamaları. *Gıda*, 40(3), 171-177.
- Bayav, A., & Karlı, B. (2020). Isparta ve Karaman illerinde elma üretim maliyetinin karşılaştırılması. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 25(2), 225-236.
- Bayhan, H. A. (2011). *Kabin Tipi Bir Kurutucuda Kurutma Süresini Etkileyen Parametrelerin DeneySEL Olarak İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Baysal, T., İçier, F., & Baysal, A. H. (2011). *Güncel elektriksel ısıtma yöntemleri*. İzmir: Sidas Medya Yayınları.
- Baysal, T., Ozbalta, N., Gokbulut, S., Capar, B., Tastan, O., & Gurlek, G. (2014). Investigation of effects of various drying methods on the quality characteristics of apple slices and energy efficiency. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 35(1), 135-144.
- Bengston, G., Rahman, M. S., Stanley, R., & Perera, C. O. (1998). Effect of specific pretreatment on the drying behaviour of apple rings. In *Proceedings of the New*

- Bhattacharya, S. (2014). *Conventional and advanced food processing technologies*. Londra: John Wiley & Sons.
- Blanco-Cano, L., Soria-Verdugo, A., Garcia-Gutierrez, L. M., & Ruiz-Rivas, U. (2016). Modeling the thin-layer drying process of Granny Smith apples: Application in an indirect solar dryer. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1086-1094.
- Blanda, G., Cerretani, L., Bendini, A., Cardinali, A., Scarpellini, A., & Lercker, G. (2008). Effect of vacuum impregnation on the phenolic content of Granny Smith and Stark Delicious frozen apple cvv. *European Food Research and Technology*, 226, 1229-1237.
- Boldaji, M. T., Borghei, A. M., Beheshti, B., & Hosseini, S. E. (2015). The process of producing tomato paste by ohmic heating method. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 3598–3606.
- Boyer, J., & Liu, R. H. (2004). Apple phytochemicals and their health benefits. *Nutrition Journal*, 3, 5.
- Bozkurt, H. (2009). *Köfte Üretiminde Ohmik Pişirmenin Uygulanması, Matematiksel Modellenmesi ve Ekserjetik Optimizasyonu (Yüksek Lisans Tezi)*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Bozkurt, H., & Icier, F. (2010). Ohmic cooking of ground beef: Effects on quality. *Journal of Food Engineering*, 96(4), 481-490.
- Buzrul, S. (2022). Reassessment of thin-layer drying models for foods: A critical short communication. *Processes*, 10, 118.
- Cappato, L.P., Ferreira, M.V.S., Guimaraes, J.T., Portela, J.B., Costa, M.Q., Freitas, A.L.R., Cunha, R.L., Oliveria, C.A.F., Mercali, G.D., Marzack, L.D.F., Cruz, A.G. (2017). Ohmic heating in dairy processing: Relevant aspects for safety and quality. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 104-112.
- Castagnini, J.M., Betoret, N., Betoret, E., Fito, P. (2015). Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix. *LWT*, 64(2), 1289-1296.
- Castoldi, M., Zotarelli, M., Durigon, A., Carciofi, B., Laurindo, J. (2015). Production of tomato powder by refractance window drying. *Drying Technology*, 33 (12):1463-1473.
- Castro, I., Teixeira, J. A., Salengke, S., Sastry, S. K., & Vicente, A. A. (2003). The influence of field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products. *Journal of Food Process Engineering*, 26, 17-29.
- Cemeroglu, B. (2007). *Gıda analizleri* (3. bs.). Ankara: Bizim Grup Yayınları.

- Cemeroğlu, B. (2013). *Gıda mühendisliğinde temel işlemler* (3. bs.). Ankara: Bizim Grup Basımevi.
- Cemeroğlu, B., & Acar, J. (1986). *Meyve ve sebze işleme teknolojisi* (6. bs.). Ankara: Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları.
- Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., & Özkan, M. (2003). *Meyve ve sebze işleme teknolojisi*. Ankara: Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları.
- Chen, C. (2015). Ohmic heating. In S. Bhattacharya (Ed.), *Conventional and advanced food processing technologies* (pp. 673-690). New Jersey, US: John Wiley & Sons.
- Chen, Q., Li, Z., Bi, J., Zhou, L., Yi, J., & Wu, X. (2017). Effect of hybrid drying methods on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of dried black mulberry. *LWT*, 80, 178-184.
- Cho, W. I., Kim, E. J., Hwang, H. J., Cha, Y. H., Cheon, H. S., Choi, J. B., & Chung, M. S. (2017). Continuous ohmic heating system for the pasteurization of fermented red pepper paste. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 42, 190-196.
- Coffman, M. A. (2017). The health benefits of Granny Smith apples. *Healthy Eating*. <http://healthyeating.sfgate.com/health-benefits-granny-smith-apples-3334.html> (Erişim tarihi: 15.04.2025)
- Correia, P., Guiné, R. P. F., Correia, A. C., Gonçalves, F., Brito, M., & Ribeiro, J. (2017). Physical, chemical and sensorial properties of kiwi as influenced by drying conditions. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(3), 203-212.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). Londra: Oxford University Press.
- Cruz, A. C., Guiné, R. P., & Gonçalves, J. C. (2015). Drying kinetics and product quality for convective drying of apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith). *International Journal of Fruit Science*, 15(1), 54-78.
- Çakır, M. T. (2015). Güneş enerjisinden yararlanarak tarım ürünlerinin kurutulması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 41-55.
- Çakmak, H., Bozdoğan, N., Turkut, G. M., Kumcuoğlu, S., & Tavman, Ş. (2016). Dağ çileğinin (*Arbutus unedo* L.) kuruma kinetiğinin incelenmesi ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Gıda*, 41(4), 227-234.
- Çalışkan, G., & Dirim, S. N. (2017). Drying characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices in convective and freeze dryer. *Heat and Mass Transfer*, 53(6), 2129-2141.
- Çam, M., & Ersus, S. (2008). Dondurularak kurutulmuş çilek meyvesinin toplam fenolik madde içeriğinin ve antioksidan kapasitesinin belirlenmesi. *Gıda Kongresi*, 21-23.

- Çelen, İ. H., Çelen, S., Moralar, A., Buluş, H. N., & Önler, E. (2016). Mikrodalga bantlı kurutucuda patatesin kurutulabilirliğinin deneysel olarak incelenmesi. *Electronic Journal of Vocational Colleges- Special Issue: The Latest Trends in Engineering*, 5(4), 57-69.
- Çelen, S. (2019). Effect of microwave drying on the drying characteristics, color, microstructure, and thermal properties of Trabzon persimmon. *Foods*, 8(2), 84.
- Çelen, S., & Kahveci, K. (2013). Microwave drying behaviour of tomato slices. *Czech Journal of Food Sciences*, 31(2), 132-138.
- Çelen, S., Haksever, A., & Moralar, A. (2017). The effects of microwave energy to the drying of apple (gala) slices. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 7(1), 228-236.
- Çınar, İ. (2009). Ozmotik dehidrasyon mekanizması ve uygulamaları. *Gıda*, 34(5), 325-329.
- Çokgezme, Ö. F., & İçier, F. (2016). Dondurulmuş gıdaların çözündürülmesinde alternatif bir yöntem: Ohmik çözündürme. *Akademik Gıda*, 14(2), 166-171.
- Çokgezme, Ö. F., Sabancı, S., Çevik, M., Yıldız, H., & İçier, F. (2017). Performance analyses for evaporation of pomegranate juice in ohmic heating assisted vacuum system. *Journal of Food Engineering*, 207, 1-9.
- Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F., & Fadavi, A. (2015). Exergy and energy analyses of liquid food in an ohmic heating process: A case study of tomato production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 31, 73-82.
- Daza, L. D., Fujita, A., Fávaro-Trindade, C. S., Rodrigues-Ract, J. N., Granato, D., & Genovese, M. I. (2016). Effect of spray drying conditions on the physical properties of Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) fruit extracts. *Food and Bioproducts Processing*, 97, 20-29.
- Demiray, E. (2009). *Kurutma İşleminde Domatesin Likopen, B-Karoten, Askorbik Asit ve Renk Değişim Kinetiğinin Belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Demiray, E. (2015). *Havuç ve kırmızıbiberin farklı kurutma yöntemleri ile kurutulması, kuruma karakteristiklerinin ve bazı kalite özelliklerindeki değişimin modellenmesi. (Doktora Tezi)*. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Demiray, E., & Tulek, Y. (2012). Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill. cv. Rio Grande) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Transfer*, 48, 841-847.
- Demiray, E., & Tulek, Y. (2014). Drying characteristics of garlic (*Allium sativum* L.) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Transfer*, 50(6), 779-786.
- Demirdöven, A., & Baysal, T. (2008). Meyve ve sebze işleme sanayinde yeni uygulamalar. *Türkiye 10. Gıda Kongresi*, 21-23 Mayıs, Erzurum, Türkiye.

- Demirdöven, A., & Baysal, T. (2014). Optimization of ohmic heating applications for pectin methylesterase inactivation in orange juice. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 1817-1826.
- Deng, Y., & Zhao, Y. (2008). Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). *LWT*, 41(9), 1575-1585.
- Dikbasan, T. (2007). *Determination of Effective Parameters For Drying of Apples (Yüksek Lisans Tezi)*. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Dixon, J., & Hewett, E. W. (1998). Temperature affects postharvest color change of apples. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(2), 305-310.
- Doğantürk, M. (2016). *Taşköprü Sarımsağındaki Allisin'in Degradasyon Kinetiği Üzerine Farklı Kurutma Sıcaklıklarının Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, Türkiye.
- Donald, B. B., Fred, W. B., & Carl, W. H. (1973). *Drying cereal grains*. Westport: The AVI Publishing Company Inc.
- Doymaz, İ. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359-364.
- Doymaz, İ. (2005). Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 275-279.
- Elkhalifa, A. E. O., Hassan, A. M., & Zei, M. E. A. (2014). Analytical quality and acceptability of baked and fried banana chips. *Journal of Human Nutrition and Food Science*, 2(6), 1052.
- Erbay, B., & Küçüköner, E. (2008). Gıda endüstrisinde kullanılan farklı kurutma sistemleri. *Türkiye 10. Gıda Kongresi*, 1045-1048, Erzurum, Türkiye.
- Erentürk, S., & Erentürk, K. (2006). Havuç kuruma kinetiğinin tahmininde regresyon analizi ve yapay sinir ağlarının kıyaslanması. *Türkiye 9. Gıda Kongresi*, 24-26 Mayıs, Bolu.
- Ergün, K., Çalışkan, G., & Dirim, S. N. (2016). Determination of the drying and rehydration kinetics of freeze dried kiwi (*Actinidia deliciosa*) slices. *Heat and Mass Transfer*, 52, 2697-2705.
- Ergüneş, G., & Taşova, M. (2018). Kabin kurutucuda kurutulan kuşburnu (*Rosa canina* L.) meyvesinin kuruma performansı, efektif difüzyon ve aktivasyon enerjisi değerlerinin belirlenmesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 7(1), 75-82.
- Eroğlu, E., & Yıldız, H. (2011). Gıdaların ozmotik kurutulmasında uygulanan yeni tekniklerin enerji verimliliği bakımından değerlendirilmesi. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2), 41-48.

- Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349-359.
- Ertop, M. H., Kutluk, K., Coşkun, K., & Canlı, S. (2016). Gıda endüstrisi yan ürünleri kullanımıyla cips üretimine yeni bir yaklaşım: Zenginleştirilmiş gluten cipsi. *Akademik Gıda*, 14(4), 398-406.
- Evranuz, Ö. (1998). Gıda maddelerinin kurutulması sırasında kuruma kinetiği kontrol eden faktörler ve kalite üzerine etkileri. *Gıda*, 13(1), 51-58.
- Fenercioğlu, H., & Tüfekçi, H. B. (2010). Türkiye’de üretilen bazı ticari meyve sularının kimyasal özellikler açısından gıda mevzuatına uygunluğu. *Akademik Gıda*, 8(2), 11-17.
- Filiz, E. B. (2015). *Elma Cipsinin Bazı Kalite ve Antioksidan Özelliklerine Kurutma, Ambalajlama ve Depolamanın Etkisi. (Doktora Tezi)*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Fito, P. (1994). Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. *Journal of Food Engineering*, 22(1-4), 313-328.
- Fito, P., Chiralt, A., Barat, J. M., & Martinez-Monzo, J. (2001). Vacuum impregnation for development of new dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 49, 297-302.
- Garcia-Pascual, P., Sanjuan, N., Bon, J., Carreres, J., & Mulet, A. (2005). Rehydration process of *Boletus edulis* mushroom: Characteristics and modelling. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 1397-1404.
- Gavahian, M., & Farahnaky, A. (2018). Ohmic-assisted hydrodistillation technology: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 72, 153-161.
- Gavahian, M., Farahnaky, A., Javidnia, K., & Majzoobi, M. (2012). Comparison of ohmic-assisted hydrodistillation with traditional hydrodistillation for the extraction of essential oils from *Thymus vulgaris* L. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 14, 85-91.
- Gavahian, M., Farahnaky, A., Javidnia, K., & Majzoobi, M. (2013). A novel technology for extraction of essential oil from *Myrtus communis*: Ohmic-assisted hydrodistillation. *Journal of Essential Oil Research*, 25(4), 257-266.
- Gavahian, M., Farahnaky, A., Majzoobi, M., Javidnia, K., Saharkhiz, M. J., & Mesbahi, G. (2011). Ohmic-assisted hydrodistillation of essential oils from *Zataria multiflora* Boiss (Shirazi Thyme). *Journal of Food Science and Technology*, 46, 2619-2627.
- Gavahian, M., Farhoosh, R., Javidnia, K., Shahidi, F., & Farahnaky, A. (2015). Effect of applied voltage and frequency on extraction parameters and extracted essential oils from *Mentha piperita* by ohmic assisted hydrodistillation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29, 161-169.

- Gavahian, M., Lee, Y. T., & Chu, Y. H. (2018). Ohmic-assisted hydrodistillation of citronella oil from Taiwanese citronella grass: Impacts on the essential oil and extraction medium. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 48, 33-41.
- Geankoplis, C. J. (1993). *Transport processes and unit operations* (3rd ed.). Londra: Prentice Hall International.
- Ghnimi, S., Flach-Malaspina, N., Dresch, M., Delaplace, G., & Maingonnat, J. F. (2008). Design and performance evaluation of an ohmic heating unit for thermal processing of highly viscous liquids. *Chemical Engineering Research and Design*, 86, 626-632.
- Gomes, C. F., Sarkis, J. R., & Marczak, L. D. F. (2018). Ohmic blanching of Tetsukabuto pumpkin: Effects on peroxidase inactivation kinetics and color changes. *Journal of Food Engineering*, 233, 74-80.
- Gölcük, H., Karaalp, E., Yaman, T., Güler-Dal, H. Ö., & Yılmaz, Y. (2020). Potential use of capsicum pepper powder and natural cheese aroma in Turkish delight (lokum) production. *Akademik Gıda*, 18(3), 296-302.
- Guerrero, J. A. (1995). *Efecto de la deshidratación osmótica y secado sobre las propiedades higroscópicas y la temperatura de transición vítrea (Tg) de manzana. (Yüksek Lisans Tezi)*. Universidad de las Americas, Puebla, Meksika.
- Guillemin, A., Degraeve, P., Noel, C., & Saurel, R. (2008). Influence of impregnation solution viscosity and osmolarity on solute uptake during vacuum impregnation of apple cubes. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 475-483.
- Guiné, R. P., & Barroca, M. J. (2012). The drying of vegetables: Effect on the texture and colour of pumpkin and green pepper. *Food and Bioproducts Processing*, 90(1), 58-63.
- Gunasekaran, S. (1999). Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. *Drying Technology*, 17(3), 395-412.
- Güler Dal, H. Ö. (2023). *Vakum Altında Ohmik Isıtma İşlemiyle Köftelerin Ön Pişirilmesi ve Soğutulması. (Doktora Tezi)*. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, Türkiye.
- Güler Yaranlı, F. (2020). *Elmaların Ultrases Destekli Osmotik Dehidrasyonu: Kuruma Karakteristikleri ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri. (Yüksek Lisans Tezi)*. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Güner, M. (1991). *Kurutmanın bilimsel temelleri, kurutma modelleri ve güneşli kurutucular* (Yayın No. 48). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Güngör, A., & Özbalta, N. (1997). Ozonlu su ile yıkanan kırmızı pul biberin mikrodalga enerjisi ile kurutulması. III. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı*, 2, 737-747. TMMOB, MMO, İzmir.

- Gür, M. (2016). Balkabağının akışkan yataklı kurutucuda kurutulmasının deneysel ve teorik incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 145-158.
- Güracar, M. (1995). *Güneş Enerjili Hava Isıtıcısı Yardımıyla Tarım Ürünlerinin Kurutulması (Yüksek Lisans Tezi)*. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye.
- Halil, T., Tamer, C. E., & Karabacak, A. Ö. (2019). Farklı yöntemlerle kurutulan yeşil zeytin katkılı cipslerin kurutma kinetiği ve bazı kalite parametrelerinin incelenmesi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(1), 123-142.
- Hall, E. G., Scott, K. J., & Coote, G. G. (1961). Control of superficial scald with diphenylamine. *Australian Journal of Agricultural Research*, 12, 834-857.
- Halvorsen, B. L., Holte, K., Myhrstad, M. C. W., Barikmo, I., Hvattum, E., Remberg, S. F., Wold, A-B., Haffner, K., Baugerød, H., Andersen, L. F., Moskaug, Ø., Jacobs, D. R. & Blomhoff, R. (2002). A systematic screening of total antioxidants in dietary plants. *Journal of Nutrition*, 132, 461-471.
- Hashemi, S. M. B., Niakousari, M., Zandi, M., & Saharkhiz, M. J. (2016). Application of ultrasonic Ohmic hydrodistillator system in production of essential oil from Zenyan. *International Food Research Journal*, 23(1), 135.
- Hashemi, S. M. B., Nikmaram, N., Esteghlal, S., Khaneghah, A. M., Niakousari, M., Barba, F. J., Roohinejad, S., & Koubaa, M. (2017). Efficiency of Ohmic assisted hydrodistillation for the extraction of essential oil from oregano (*Origanum vulgare* subsp. *viride*) spices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 172-178.
- Henríquez, C., Córdova, A., Almonacid, S., & Saavedra, J. (2014). Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel byproducts. *Journal of Food Engineering*, 143, 146-153.
- Hernandez-Santos, B., Martinez-Sanchez, C. E., Torruco-Uco, J. G., Rodriguez-Miranda, J., Ruiz-Lopez, I. I., Vajando-Anaya, E. S., Carmona-García, R. & Herman-Lara, E. (2016). Evaluation of physical and chemical properties of carrots dried by Refractance Window drying. *Drying Technology*, 34(12), 1414-1422.
- Heybeli, N., & Ertekin, C. (2007). Elma dilimlerinin ince tabaka halinde kuruma karakteristiği. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 3(3), 179-187.
- Hosainpour, A., Darvishi, H., & Nargesi Fadavi, A. (2013). Ohmic pre-drying of tomato paste. *Food Science and Technology International*, 20(3), 193-204.
- Huang, D., Ou, B., & Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6), 1841-1856.
- Indiarto, R., & Rezaharsanto, B. (2020). A review on ohmic heating and its use in food. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9(2), 485-490.

- İcier, F., Yildiz, H., Sabanci, S., Cevik, M., & Cokgezme, O. F. (2017). Ohmic heating assisted vacuum evaporation of pomegranate juice: Electrical conductivity changes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 241–246.
- İcier, F. (2003). *Gıdaların Ohmik Isıtma Yöntemiyle Isıtılmasının Deneyisel ve Kuramsal Olarak İncelenmesi. (Doktora Tezi)*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- İcier, F., & Ilicali, C. (2004). Electrical conductivity of apple and sourcherry juice concentrates during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, 27(3), 159–180.
- İcier, F., & Yıldız, H. (2005). Elektriksel yöntemlerin gıdaların kalite özellikleri üzerine etkileri. *Gıda*, 30(4), 255–260.
- İcier, F., Çokgezme, Ö. F., & Sabancı, S. (2016). Alternative thawing methods for blanched potato cubes: Microwave, ohmic, and carbon fiber plate assisted cabin thawing. *Journal of Food Process Engineering*, 40, e12403.
- İncedayı, B., Seyhan, B., & Çopur, Ö. U. (2019). Ohmik ısıtma destekli işlemlerin gıdalarda kullanımı ve kalite üzerine etkisi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(2), 341–354.
- İseava, J. (2007). *Kayıt Kurutmanın Deneyisel ve Teorik Olarak Araştırılması. (Doktora Tezi)*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- İzli, N., & Işık, E. (2015). Color and microstructure properties of tomatoes dried by microwave, convective, and microwave-convective methods. *International Journal of Food Properties*, 18(2), 241–249.
- İzli, N., & Işık, E. (2016). Farklı kurutma yöntemlerinin barbunya fasulyesinin (*Phaseolus vulgaris* L.) kurutma karakteristikleri, renk ve mikro yapı özellikleri üzerine etkisi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi (JAFAG)*, 33(2), 79–88.
- İzli, N., İzli, G., & Taşkın, O. (2018). Impact of different drying methods on the drying kinetics, color, total phenolic content and antioxidant capacity of pineapple. *CyTA–Journal of Food*, 16(1), 213–221.
- İzli, N., Tamer, C. E., Çopur, O. U., Işık, E., & Yıldız, B. (2017). Drying model of sliced apple and effect of vacuum impregnation on its physicochemical properties. *Philippine Agricultural Scientist*, 100, 315–332.
- Jakób, A., Bryjak, J., Wójtowicz, H., Illeová, V., Annus, J., & Polakovič, M. (2010). Inactivation kinetics of food enzymes during ohmic heating. *Food Chemistry*, 123, 369–376.
- Jakubczyk, E., Ostrowska-Ligeza, E., & Gondek, E. (2010). Elma püresi tozunun nem tutma özellikleri ve cam geçiş sıcaklığı. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(12), 2515–2523.

- Jamradloedluk, J., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S., & Prachayawarakorn, S. (2004). Modelling of dehydration and rehydration kinetics of Durian. In *The 2nd International Conference on Innovations in Food Processings Technology and Engineering* (pp. 267-277). Asian Institute of Technology, Thailand.
- Jeager, H., Roth, A., Toepfl, S., Holzhauser, T., Engel, K. H., Knorr, D., ... & Steinberg, P. (2016). Opinion on the use of ohmic heating for the treatment of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 84-97.
- Jena, S., & Das, H. (2007). Modelling for vacuum drying characteristic of coconut presscake. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 92-99.
- Jin, Y., Jiang, C., Jiao, Y., Llave, Y., Fukuoka, M., & Sakai, N. (2020). Analysis of ohmic heating of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) fillets at high frequencies by 3D simulation: Effect of ohmic heating system, sample shape, and size. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102503.
- Jindarat, W., Rattanadecho, P., & Vongpradubchai, S. (2011). Analysis of energy consumption in microwave and convective drying process of multi-layered porous material inside a rectangular wave guide. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 728-737.
- Jokic, S., Velic, D., & Bilic, M. (2009). Influence of process parameters and pre-treatments on quality and drying kinetics of apple samples. *Czech Journal of Food Science*, 27(2), 88-94.
- Jun, S., Sastry, S. ve Samaranayake, C. (2007). Retort poşetlerindeki gıdaların ohmik ısıtılması sırasında elektrot bileşenlerinin göçü. *Yenilikçi Gıda Bilimi ve Ortaya Çıkan Teknolojiler*, 8(2), 237-243.
- Kahraman, O., Malvandi, A., Vargas, L., & Feng, H. (2021). Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105510.
- Karaaslan, S. (2014). Trabzon hurmasının mikrodalga ile kurutulmasında uygun kuruma modelinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9(1), 8-15.
- Karacaoğlu, C. (2017). *Ultrasonikasyon Destekli Vakum İmpregnasyon Tekniğinin Elma Küplerini Kuruma Kinetiği ve Antioksidan Aktivitesi Üzerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, Türkiye.
- Karacaoğlu, C., Gürsoy, O., & Yılmaz, Y. (2016). Ultrasonikasyon destekli vakum impregnasyon (emdirme) tekniği ile muamele işleminin kivi dilimlerinin kuruma kinetiği üzerine etkisi. *Akademik Gıda*, 14(3), 256-266.
- Kaur, N., & Singh, A. K. (2016). Ohmic heating: Concept and applications – A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(14), 2338-2351.
- Kaya Dursun, S., Aksüt, B., Nuri Öcalan, O., & Taşova, M. (2023). Oven, temperature-controlled microwave, and shade drying effects on drying kinetics, bioactive

compounds and antioxidant activity of knotweed (*Polygonum cognatum* Meissn.). *Chemistry & Biodiversity*, 20(5), e202201196.

- Kaya, A., & Aydın, O. (2008). Kurutma havası sıcaklığının kızılcağın kuruma süresi ve sorpsiyon eğrisine etkisinin deneysel incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28(2), 45-49.
- Kaya, O., & İçier, F. (2019). İndüksiyon ve ohmik ısıtma işlemlerinin gıdalara uygulanabilirliğinin karşılaştırılması. *Akademik Gıda*, 17(1), 111-120.
- Khue, D. N., Tiep, H. T., & Dat, L. Q. (2020). Influence of frequency and temperature on the inactivation of *Salmonella enterica* serovar enteritidis in ohmic heating of pomelo juice. *LWT*, 129, 109528.
- Kim, S. S., & Kang, D. H. (2017). Synergistic effect of carvacrol and ohmic heating for inactivation of *E. coli* O157:H7, *S. typhimurium*, *L. monocytogenes*, and MS-2 bacteriophage in salsa. *Food Control*, 73, 300-305.
- Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (1992). Drying kinetics of onion and green pepper. *Drying Technology*, 10(4), 995-1011.
- Konak, Ü. İ., Certel, M., & Helhel, S. (2009). Gıda sanayisinde mikrodalga uygulamaları. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(3), 20-31.
- Kondo, S., Tsuda, K., Muto, N., & Ueda, J. (2002). Antioxidative activity of apple skin or flesh extracts associated with fruit development on selected apple cultivars. *Scientia Horticulturae*, 96, 177-185.
- Kutlu, N., Yeşilören, G., İşçi, A., & Şakıyan, Ö. (2017). Konvansiyonel ekstraksiyona alternatif: Yeşil teknolojiler. *Gıda*, 42(5), 514-526.
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Jaouhari, J. T. (2004). Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61(2), 173-179.
- Lavelli, V. (2009). Combined effect of storage temperature and water activity on the antiglycoxidative properties and color of dehydrated apples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(24), 11491-11497.
- Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432.
- Liu, L., Llave, Y., Zheng, D., Fukuoka, M., & Sakai, N. (2017). Electrical conductivity and ohmic thawing of frozen tuna at high frequencies. *Journal of Food Engineering*, 197, 68-77.
- Loypimai, P., Moongngarm, A., & Chottanom, P. (2015). Impact of stabilization and extraction methods on chemical quality and bioactive compounds of rice bran oil. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 27(11), 849-856.

- Lyng, J. G., Clemente, I., & McKenna, B. M. (2019). Ohmic pasteurization of meat and meat products. In *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* (pp. 593-622). Academic Press.
- Ma, Q., Bi, J., Yi, J., Wu, X., Li, X., & Zhao, Y. (2021). Stability of phenolic compounds and drying characteristics of apple peel as affected by three drying treatments. *Food Science and Human Wellness*, 10(2), 174-182.
- Makroo, H. A., Rastogi, N. K., & Srivastava, B. (2016). Enzyme inactivation of tomato juice by ohmic heating and its effects on physico-chemical characteristics of concentrated tomato paste. *Journal of Food Process Engineering*, 40, e12464.
- Mamathi, C. A., Hema, V., & Sinija, V. R. (2021). Effect of refractance window drying (RWD) and low temperature low humidity (LTLH) drying on the physical, nutritional and functional characteristics of pineapple slices. *The Pharma Innovation Journal*, 10(10), 1883-1892.
- Mandale, N. M., Attkan, A. K., Kumar, S., & Kumar, N. (2023). Drying kinetics and quality assessment of refractance window dried beetroot. *Journal of Food Process Engineering*, e14332.
- Mao, J., Zhang, L., Chen, F., Lai, S., Yang, B., & Yang, H. (2017). Effect of vacuum impregnation combined with calcium lactate on the firmness and polysaccharide morphology of Kyoho grapes (*Vitis vinifera* × *V. labrusca*). *Food and Bioprocess Technology*, 10, 699-709.
- Marques, L. G., Prado, M. M., & Freire, J. T. (2009). Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT*, 42(7), 1232-1237.
- Martínez-Monzó, J., Martínez-Navarrete, N., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). Mechanical and structural changes in apple (var. Granny Smith) due to vacuum impregnation with cryoprotectants. *Journal of Food Science*, 63(3), 499-503.
- Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 177-182.
- Memiş, S. (2017). *Çemen Tohumu Bazlı Nanokil Katkılı Biyobozunur Nanokompozit Film Üretimi ve Karakterizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi)*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Mengeş, O. H., Ertekin, C., & Aydın, C. (2005). Elma dilimlerinin konveksiyonla kurumasına uygun kuruma modelinin belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilim Dergisi*, 1(3), 229-236.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- Moirea, R., Sereno, A. M., & Martinez, E. (2001). Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*, 47(1), 43-49.

- Moraga, M., Moraga, G., Fito, P., & Martinez-Navarrete, N. (2009). Effect of vacuum impregnation with calcium lactate on the osmotic dehydration kinetics and quality of osmodehydrated grapefruit. *Journal of Food Engineering*, 90(3), 372-379.
- Moreno, G. D. C., & Díaz-Moreno, A. C. (2017). Effect of air drying process on the physicochemical, antioxidant, and microstructural characteristics of tomato cv. Chonto. *Agronomía Colombiana*, 35(1), 100-106.
- Moreno, J., Espinoza, C., Simpson, R., Petzold, G., Nuñez, H., & Gianelli, M. P. (2016). Application of ohmic heating/vacuum impregnation treatments and air drying to develop an apple snack enriched in folic acid. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 381-386.
- Moreno, J., Simpson, R., Estrada, D., Lorenzen, S., Moraga, D., & Almonacid, S. (2011a). Effect of pulsed-vacuum and ohmic heating on the osmotic dehydration Kinect physical properties and microstructure of apple (cv. Granny Smith). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 12, 462-568.
- Moreno, J., Simpson, R., Pizarro, N., Parada, K., Pinilla, N., Reyes, J. E., & Almonacid, S. (2012). Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the quality and microbial stability of osmotically dehydrated strawberries (cv. Camarosa). *Journal of Food Engineering*, 110(2), 310-316.
- Moreno, J., Simpson, R., Sayas, M., Segura, I., Aldana, O., & Almonacid, S. (2011b). Influence of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of pears (cv. Packham's Triumph). *Journal of Food Engineering*, 104(4), 621-627.
- Mujica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., Lopez-Malo, A., Plaou, E., & Welte-Chanes, J. (2003). Impregnation and osmotic dehydration of some fruit: Effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering*, 57, 305-314.
- Mujumdar, A. S. (2007). *Handbook of industrial drying* (3rd ed.). CRC Press.
- Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (2002). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments* (2nd ed.). Wiley.
- Nakilcioğlu, E., & Ötleş, S. (2014). Basınçlı çözgen ekstraksiyonu ve gıda sanayiindeki uygulamaları. *Akademik Gıda*, 12(2), 88-94.
- Nguyen, T. K., Mondor, M., & Ratti, C. (2018). Shrinkage of cellular food during air drying. *Journal of Food Engineering*, 230, 8-17.
- Nielsen, S. S. (2003). *Food analysis*. Perdue University, West Lafayette, Indiana.
- Nizamlioğlu, N. M. (2022). Farklı sıcaklık ve mikrodalga güçlerinde kurutulan elma dilimlerinin kurutma özellikleri. *Akademik Gıda*, 20(3), 253-262.
- Noshad, M., Mohebbi, M., Shahidi, F., & Mortazavi, A. S. (2012). Kinetic modelling of rehydration in air-dried quinces pretreated with osmotic dehydration and ultrasonic. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36, 383-992.

- Oghenechavwuko, U. E., Saka, G. O., Adekunbi, T. K., & Taiwo, A. C. (2013). Effect of processing on the physicochemical properties and yield of Gari from dried chips. *Journal of Food Process Technology*, 4, 255.
- Olgun, H., & Rzayev, P. (2000). Fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulması. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24(1), 1-14.
- Omolola, A. O., Jideani, A. I., & Kapila, P. F. (2015). Drying kinetics of banana (*Musa spp.*). *Interciencia*, 40(6), 374-380.
- Orikasa, T., Koide, S., Okamoto, S., Imaizumi, T., Muramatsu, Y., Takeda, J. I., ... & Tagawa, A. (2014). Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. *Journal of Food Engineering*, 125, 5158.
- Öğüt, S., Seçilmiş Canbay, H., ve Uludağ, H. (2016). Effect of environmental factors on heavy metal content of raw milk. *Akademik Gıda*, 14(2), 105-110.
- Özçatalbaş, O., Turhanoğulları, Z., & Kutlar, İ. (2009). Dünya elma üretim sektörünün genel durumu ve gelişmeler. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(1), 139-144.
- Özdemir, M., Pehlivan, S., & Güngör-Bilgicer, V. (2024). Limequat kabuklarının ultrason destekli vakumla kurutulması ve termal, morfolojik ve fonksiyonel özelliklerinin karakterizasyonu. *Termal Bilim ve Mühendislik İlerlemesi*, 54, 102841.
- Page, G. (1949). *Factors Influencing the Maximum Rate of Air-Drying Shelled Corn in Thin Layers (Master's Thesis)*. Purdue University, West Lafayette, Indiana, ABD.
- Palaniappan, S., & Sastry, S. K. (1991). Electrical conductivities of selected foods during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, 14(3), 221-236.
- Park, I. K., & Kang, D. H. (2013). Effect of electroporabilization by ohmic heating for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in buffered peptone water and apple juice. *Applied Environmental Microbiology*, 79(23), 7122-7129.
- Park, I. K., Ha, J. W., & Kang, D. H. (2017). Investigation of optimum ohmic heating conditions for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in apple juice. *BMC Microbiology*, 17, 117.
- Pathare, P. B., & Roskilly, A. P. (2016). Quality and energy evaluation in meat cooking. *Food Engineering Reviews*, 8, 435-447.
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216-1217.
- Pereira, R. N., Rodrigues, R. M., Genisheva, Z., Oliveira, H., de Freitas, V., Teixeira, J. A., & Vicente, A. A. (2016). Effects of ohmic heating on extraction of food-grade phytochemicals from colored potato. *LWT*, 74, 493-503.

- Piette, G., Buteau, M. L., De Halleux, D., Chiu, L., Raymond, Y., Ramaswamy, H. S., & Dodtje, M. (2004). Ohmic cooking of processed meats and its effects on product quality. *Journal of Food Science*, 69, 71-78.
- Planinić, M., Velić, D., Tomas, S., Bilić, M., & Bučić, A. (2005). Modelling of drying and rehydration of carrots using Peleg's model. *European Food Research and Technology*, 221, 446-451.
- Polat, A. (2019). *Havuç ve Patatesin Kurutulmasında Ultrases Ön İşlem Uygulamasının Etkisinin Belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
- Polatçı, H. (2012). Farklı kurutma yöntemlerinin AVG uygulaması yapılmış Black Beauty (*Prunus salicina* L.) erik çeşidinde kuruma süresi ve kalitesine etkisi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(2), 171-178.
- Polatçı, H., Taşova, M., & Saraçoğlu, O. (2020). Armut (*Pirus communis* L.) posasının bazı kalite değerleri açısından uygun kurutma sıcaklığının belirlenmesi. *Academic Platform- Journal of Engineering and Science*, 8(3), 540-546.
- Preethi, R., Deotale, S. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Conductive hydro drying of beetroot (*Beta vulgaris* L) pulp: Insights for natural food colorant applications. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12), e13557.
- Raharitsifa, N., & Ratti, C. (2010). Foam-mat freeze-drying of apple juice: Stability of dry products during storage. *Journal of Food Process Engineering*, 33, 341-364.
- Rajoriya, D., Shewale, S. R., & Hebbar, H. U. (2019). Refractance window drying of apple slices: Mass transfer phenomena and quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1646-1658.
- Ramesh, M. N., Wolf, W., Tevini, D., & Bognar, A. (2002). Microwave blanching of vegetables. *Journal of Food Science*, 67(1), 390-398.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods. *Journal of Food Engineering*, 49, 311-319.
- 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 and Medicine*, 26(9-10), 1231-1237.
- Ricce, C., Rojas, M. L., Miano, A. C., Siche, R., & Augusto, P. E. D. (2016). Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*, 89, 701-708.
- Richa, R., Shahi, N. C., Singh, A., Lohani, U. C., Omre, P. K., Kumar, A., & Bhattacharya, T. K. (2017). Ohmic heating technology and its application in meaty food: A review. *Advances in Research*, 10(4), 1-10.
- Richardson, P. (2001). *Thermal technologies in food processing*. Boca Raton, USA: Elsevier CRC Press.

- Riveros-Gomez, M., Baldán, Y., Román, M. C., Fabani, M. P., Mazza, G., & Rodríguez, R. (2022). Drying and rehydration kinetics of peeled and unpeeled green apple slices (Granny Smith cv). *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 57(10), 835-847.
- Roberts, J. S., Kidd, D. R., & Padilla-Zakour, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465.
- Ruan, R., Ye, X., Chen, P., Doona, C. J., Taub, I., & Center, N. S. (2001). Ohmic heating. In *Thermal technologies in food processing*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ruiz Diaz, G., Martinez-Monzo, P., & Chiralt, A. (2003). Modelling of dehydration, rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(2), 203-209.
- Sa, M. M., & Sereno, A. M. (1994). Glass transitions and state diagrams for typical natural fruits and vegetables. *Thermochimica Acta*, 246, 285-297.
- Sabancı, S., & İçier, F. (2017). Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for concentration of sour cherry juice. *Journal of Food Engineering*, 212, 262-270.
- Sabancı, S., & İçier, F. (2020). Enhancement of the performance of sour cherry juice concentration process in vacuum evaporator by assisting ohmic heating source. *Food and Bioprocess Processing*, 122, 269-279.
- Sabancı, S., Cevik, M., Cokgezme, O. F., Yildiz, H., & İçier, F. (2018). Quality characteristics of pomegranate juice concentrates produced by ohmic heating assisted vacuum evaporation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Article in Press.
- Sabarez, H., Price, W. E., Back, P. J., & Woolf, L. A. (1997). Modelling the kinetics of drying of d'Agen plums (*Prunus domestica*). *Food Chemistry*, 60(3), 371-382.
- Saberian, H., Hamidi-Esfahani, Z., Gavlighi, H. A., & Barzegar, M. (2017). Optimization of pectin extraction from orange juice waste assisted by ohmic heating. *Chemical Engineering and Processing*, 117, 154-161.
- Sacilik, K., & Elicin, A. K. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73(3), 281-289.
- Sakr, M., & Liu, S. (2014). A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39, 262-269.
- Saldamlı, İ., & Saldamlı, E. (1990). *Gıda endüstrisi makinaları*. İstanbul, Türkiye: Reyhan Yayınları.
- Saldamlı, İ., & Saldamlı, E. (2004). *Gıda endüstrisi makinaları* (2. baskı). Ankara, Türkiye: Savaş Kitapevi.

- Salvatori, D., Andres, A., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering*, 21(1), 59-73.
- Samadi, S. H., Ghobadian, B., Najafi, G., & Motevali, A. (2014). Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 174-182.
- Samaranayake, C. P., & Sastry, S. K. (2005). Electrode and pH effects on electrochemical reactions during ohmic heating. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 577(1), 125-135.
- Sarang, S., Sastry, S. K., & Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 351-356.
- Sastry, S. K. (1992). Advances in ohmic heating for sterilisation of liquid particle mixtures. In R. P. Singh & M. A. Wirakartakusumah (Eds.), *Advances in food engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Sastry, S. K., & Barach, J. T. (2000). Ohmic and inductive heating. *Journal of Food Science*, 65, 42-46.
- Saxena, J., Makroo, H. A., & Srivastava, B. (2016). Effect of ohmic heating on polyphenol oxidase (PPO) inactivation and color change in sugarcane juice. *Journal of Food Process Engineering*, 40, e12485.
- Seyhun, N., Sumnu, S. G., & Şahin, S. (2008). Parçacık içeren sıvı gıdalarda alternatif ısıtma yöntemi olarak ohmik ısıtma yönteminin kullanılması. *Türkiye 10. Gıda Kongresi*, 755-758, Erzurum, Türkiye.
- Shrivastav, S., Ganorkar, P. M., Prajapati, K. M., & Patel, D. B. (2021). Drying kinetics, heat quantities, and physiochemical characteristics of strawberry puree by Refractance Window drying system. *Journal of Food Process Engineering*, 44(9), e13776.
- Shynkaryk, M. V., Ji, T., Alvarez, V. B., & Sastry, S. K. (2010). Ohmic heating of peaches in the wide range of frequencies (50 Hz to 1 MHz). *Journal of Food Science*, 75(7), E493-E500.
- Silva, K. S., Fernandes, M. A., & Mauro, M. A. (2014). Effect of calcium on the osmotic dehydration kinetics and quality of pineapple. *Journal of Food Engineering*, 134, 37-44.
- Silva, M. A., Sobral, P. J. A., & Kieckbusch, T. G. (2006). State diagrams of freeze-dried camu-camu (*Myrciaria dubia* (HBK) Mc Vaugh) pulp with and without maltodextrin addition. *Journal of Food Engineering*, 77, 426-432.
- Silva, V. L. M., Santos, L. M. N. B. F., & Silva, A. M. S. (2017). Ohmic heating: An emerging concept in organic synthesis. *Chemistry- A European Journal*, 23, 7853–7865.

- Sinir, G. Ö., Karabacak, A. Ö., Tamer, C. E., & Çopur, Ö. 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.
- Skudder, J. (1989). Ohmic heating in food processing. *ASEAN Food Journal*, 4(4), 162-163.
- Slade, L., & Levine, H. (1995). Glass transition. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 38, pp. 103-269). New York, NY, ABD: Academic Press.
- Sobral, P. J. D. A., Telis, V. R. N., Habitante, A. M. Q. B., & Sereno, A. (2001). Phase diagram for freeze-dried persimmon. *Thermochimica Acta*, 376(1), 83-89.
- Soghani, B. N., Azadbakht, M., & Darvishi, H. (2018). Ohmic blanching of white mushroom and its pretreatment during microwave drying. *Heat and Mass Transfer*, 54, 3715-3725.
- Soysal, Y., & Öztekin, S. (2001). Technical and economic performance of a tray dryer for medicinal and aromatic plants. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79(1), 73-79.
- Sumnu, G., Turabi, E., & Öztöp, M. (2005). Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination ovens. *LWT*, 38(5), 549-553.
- Sun, D. (2006). *Thermal food processing*. CRC Press.
- Sun, D. W. (2014). *Emerging technologies for food processing* (pp. 469-500). New York, NY, ABD: Academic Press.
- Syamaladevi, R. M., Sablani, S. S., Tang, J., Powers, J., & Swanson, B. G. (2009). State diagram and water adsorption isotherm of raspberry (*Rubus idaeus*). *Journal of Food Engineering*, 91, 460-467.
- Symons, M. (2007). *One continuous picnic: A gastronomic history of Australia* (2nd ed., pp. 110-112). Melbourne, Australia: Melbourne University Press.
- Taj, F., Khan, S. A., Dar, A. H., Manzoor, N., Kumar, N., Dwivedi, M., Singh, A., & Kumar, M. (2023). Refractance window drying of walnut kernel (*Juglans regia* L.). *Discover Food*, 3(1), 1.
- Talens, P., Martinez, N., Fito, P., & Chiralt, A. (2002). Changes in optical and mechanical properties during osmohydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 3(2), 191-199.
- Tappi, S., Tylewicz, U., Romani, S., Siroli, L., Patrignani, F., Dalla Rosa, M., & Rocculi, P. (2016). Optimization of vacuum impregnation with calcium lactate of minimally processed melon and shelf-life study in real storage conditions. *Journal of Food Science*, 81(11), 2734-2742.

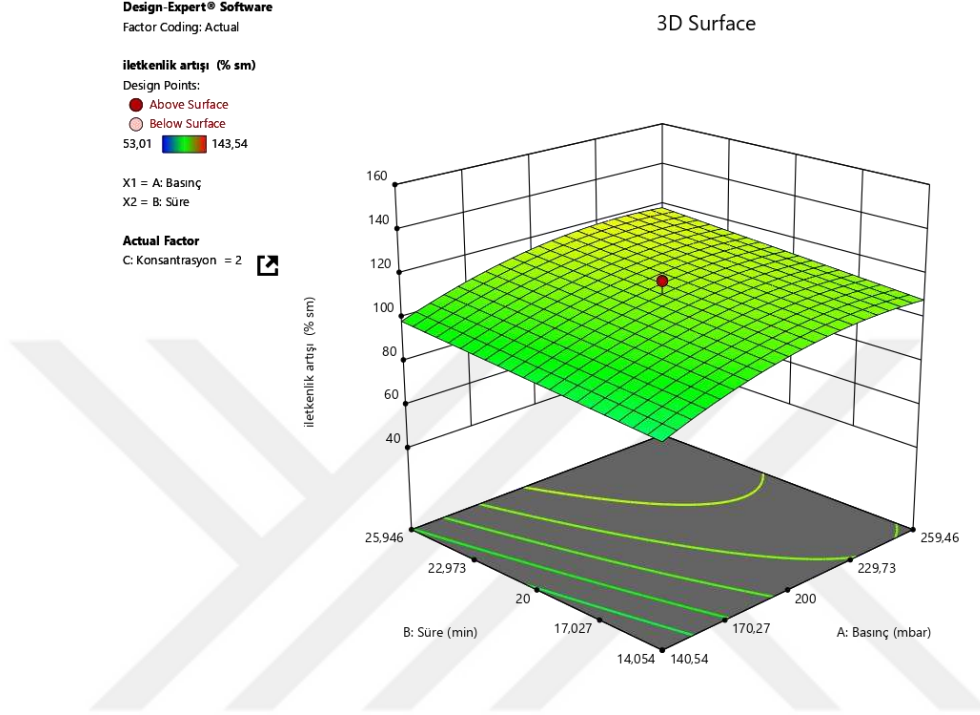
- Tarhan, S., Ergüneş, G., Güneş, M., & Mutlu, A. (2009). Farklı kurutma koşullarının Amasya elmasının kuruma süresi ve kalitesi üzerine etkileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(2), 1-6.
- Taşova, M. (2018). Düşük ve yüksek sıcaklıklarda kurutulan patlıcan (*Solanum melongena* L.) dilimlerinin kurutma kinetiği ve renk değerleri açısından en uygun kurutma sıcaklığının belirlenmesi. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 84-93.
- Tavakolpour, Y., Moosavi-Nasab, M., Niakousari, M., Haghighi-Manesh, S., Hashemi, S. M. B., & Mousavi Khaneghah, A. (2017). Comparison of four extraction methods for essential oil from *Thymus daenensis* Subsp. *Lancifolius* and chemical analysis of extracted essential oil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4), e13046.
- Tian, Y., Wu, S., Zhao, Y., Zhang, Q., Huang, J., & Zheng, B. (2015). Drying characteristics and processing parameters for microwave-vacuum drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 2620-2629.
- Tola, Y. B., Rattan, N. S., & Ramaswamy, H. S. (2014). Electrodes in ohmic heating. *Ohmic Heating in Food Processing*, 141-155.
- Tortoe, C., & Orchard, J. (2006). Microstructural changes of osmotically dehydrated tissues of apple, banana, and potato. *Scanning*, 28(3), 172-178.
- Tosun, S. (2009). *Bazı Tarımsal Ürünler İçin Isı Pompalı Bir Kurutucunun Geliştirilmesi ve Termodinamik Analizi (Doktora Tezi)*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Tripathi, M. K., & Giri, S. K. (2014). Probiotic functional foods: Survival of probiotics during processing and storage. *Journal of Functional Foods*, 9, 225-241.
- Tripathy, P. P., & Kumar, S. (2009). Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying. *Applied Thermal Engineering*, 29(1), 884-891.
- Turgut, Y., Turgut, S. S., & Karacabey, E. (2021). Use of ohmic heating as an alternative method for cooking pasta. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(13), 5529-5540.
- Tüfekçi, M., & Özkal, S. G. (2020). Investigation of effect of ultrasound pretreatment on drying and rehydration characteristics and microstructure of apple slices. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 30, 1-10.
- Tülek, Y., & Demiray, E. (2014). Effect of hot air drying and different pretreatments on color and drying characteristics of persimmons. *Tarım Dergisi*, 20, 27-37.
- Türkan, B. (2020). *Endüstriyel Malzemelerde Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transferinin Deneysel ve Nümerik İncelenmesi (Doktora Tezi)*. Bursa Uludağ University, Bursa, Türkiye.

- Türker, İ., & İşleroğlu, H. (2017). Mahlep püresinin kızılötesi ısıtım ile kurutulması işleminde antosiyanin, fenolik madde ve antioksidan kapasite değişim kinetiği. *Gıda Dergisi*, 42(4), 422-430.
- Uzundumlu, A. S., Işık, H. B., & Işık, N. (2009). Dünya işlenmemiş elma sektörüne genel bir bakış. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(1), 17-23.
- Ünlütürk, A., & Turantaş, F. (2002). *Gıdaların mikrobiyolojik analizi* (2. Baskı). Meta Basım Matbaacılık.
- Van der Sluis, A. A. (2005). *A Chain Analysis of the Production of 'Healthy' Apple Juice: the Case of Polyphenolic Antioxidants. (Dissertation)*. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Vargas, L., Kapoor, R., Nemzer, B., & Feng, H. (2022). Application of different drying methods for evaluation of phytochemical content and physical properties of broccoli, kale, and spinach. *LWT*, 155, 112892.
- Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R., & Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132(1), 51-59.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., & Lemus-Mondaca, R. (2008). Empirical modeling of drying process for apple (cv. Granny Smith) slices at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32, 972-986.
- Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M. M., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 271-289.
- Velic, D., Bilic, M., Tomas, S., & Aladic, K. (2006). Study of the drying kinetics of "Granny Smith" apple in tray drier. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72(4), 323-328.
- Wang, C. Y., & Singh, R. P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying. *Transactions of the ASAE*, 11, 668-672.
- Yağcılar, M. (2020). *Farklı Ön İşlemler Uygulanarak Vakum Altında Kurutulan Küp Kesim Elmaların Kuruma Karakteristiklerinin ve Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi)*. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Yağcıoğlu, A. (1999). *Tarım ürünlerinde kurutma tekniği*. İzmir, Türkiye: Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Yaldız, O., Ertekin, C., & Uzun, H. İ. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457-465.
- Yıldız Turp, G., Icier, F., & Kor, G. (2016). Influence of infrared final cooking on color, texture and cooking characteristics of ohmically pre-cooked meatball. *Meat Science*, 114, 46-53.

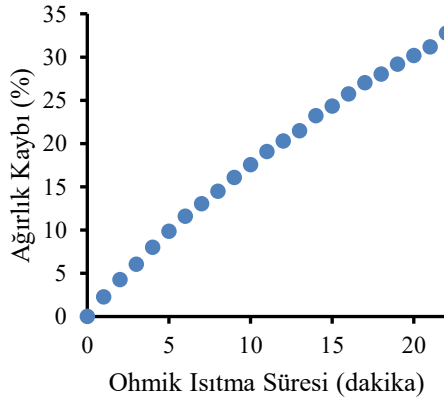
- Yıldız, Z., & Gökayaz, L. (2019). Elma dilimlerinin farklı güneş kurutma yöntemleri ile kurutulması. *Gıda ve Yem Bilimi-Teknoloji Dergisi*, 22, 29-36.
- Yılmaz, F. M., & Bilek, S. E. (2017). Vakumlu emdirim (impregnasyon) teknolojisinin fonksiyonel meyve ve sebze ürünlerinin geliştirilmesinde kullanımı. *Akademik Gıda*, 15(2), 163-171.
- Yokuş, B. (2014). *Farklı Ön İşlemlerin ve Uygulanan Farklı Kurutma Yöntemlerinin Elmada Toplam Fenol Miktarı ve Antioksidan Aktivite Üzerine Etkileri. (Yüksek Lisans Tezi)*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, Türkiye.
- Zalpouri, R., Singh, M., Kaur, P., Singh, S., Kumar, S., & Kaur, A. (2023). Mathematical and artificial neural network modelling for refractance window drying kinetics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) followed by the determination of energy consumption, mass transfer parameters and quality. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-17.
- Zheng, L., & Sun, D. W. (2005). Vacuum cooling of foods. In D. W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (pp. 579-602). New York, NY, USA: Academic Press.
- Zhu, A., & Shen, X. (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 345-351.

7. EKLER

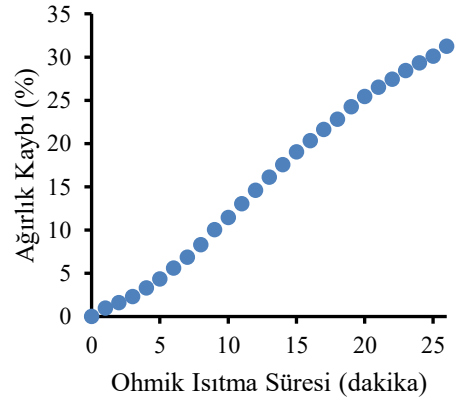
EK 1 – Şekil 7.1. Vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sırasında vakum düzeyi ile işlem süresinin elma dilimlerinin elektriksel iletkenlik artış değerlerine (%) etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi



EK 2 – Şekil 7.2. Taze elma dilimleri (a) ile vakum impregnasyon (Vİ) işlemi uygulanan elma dilimlerinde (b) atmosferik basınç altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemi sırasında süreye bağlı olarak gerçekleşen ağırlık kaybı (%)

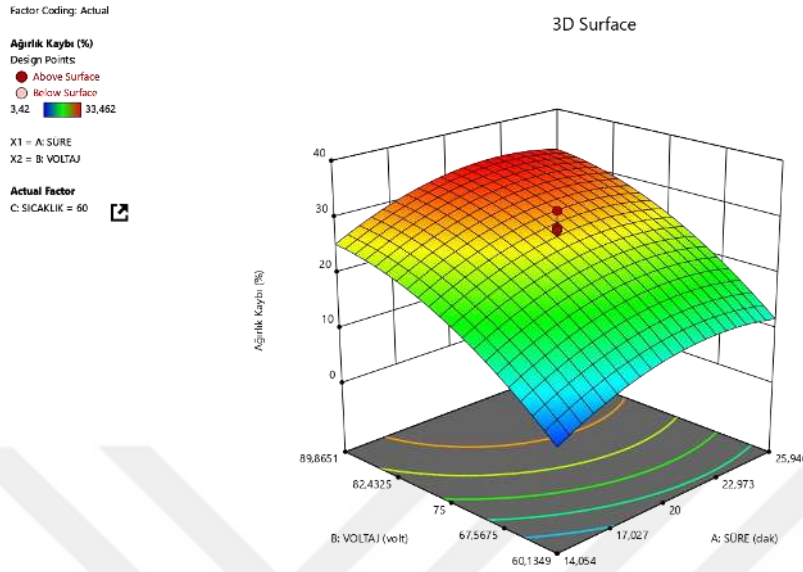


(a)

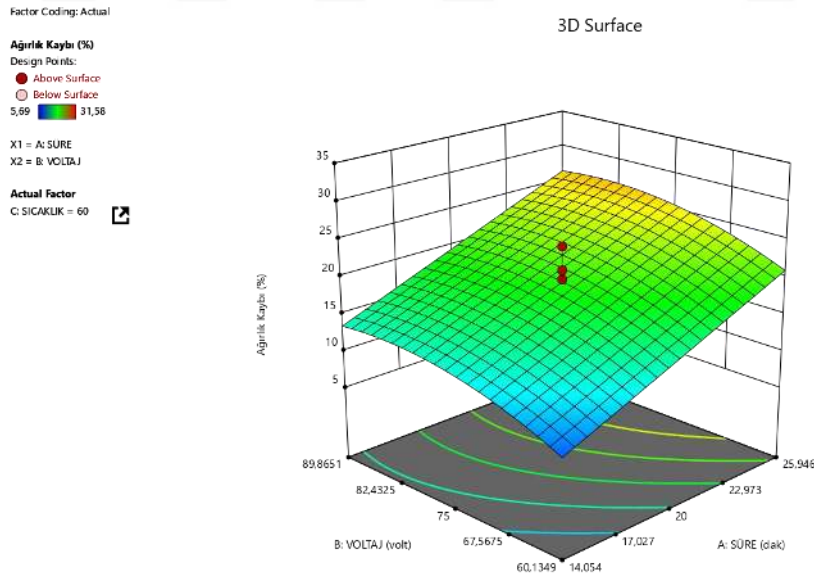


(b)

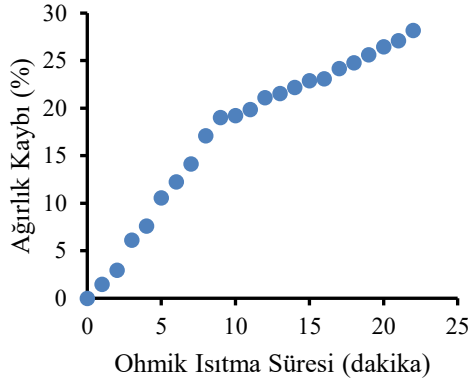
EK 3 – Şekil 7.3. Atmosferik basınç altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemine maruz bırakılan taze elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi



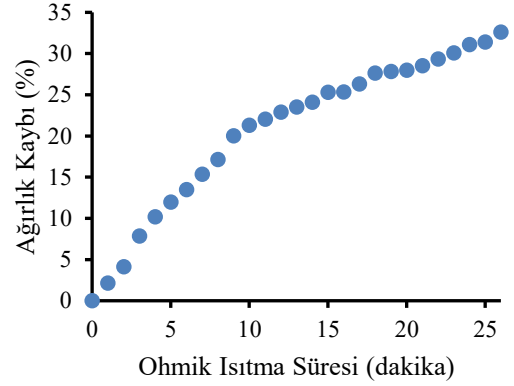
EK 4 – Şekil 7.4. Vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sonrasında atmosferik basınç altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (AOK) işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi



EK 5 – Şekil 7.5. Taze elma dilimleri (a) ile vakum impregnasyon (Vİ) işlemi uygulanan elma dilimlerinde (b) vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemi sırasında süreye bağlı olarak gerçekleşen ağırlık kaybı (%)

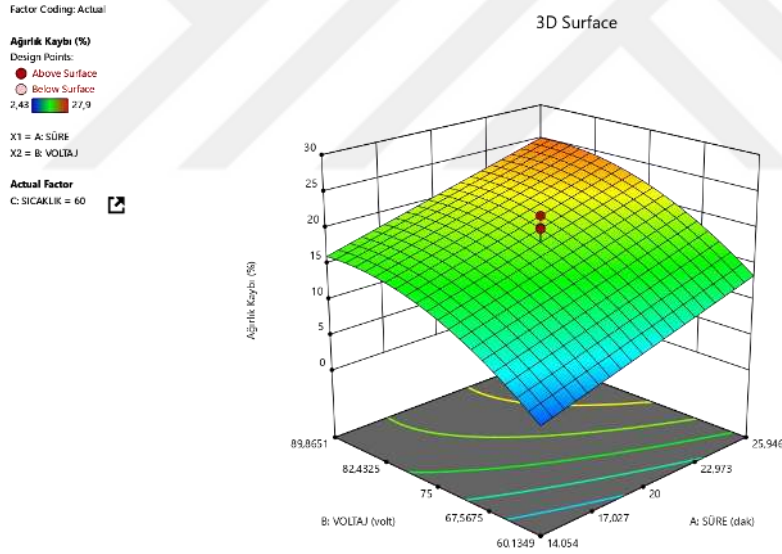


(a)

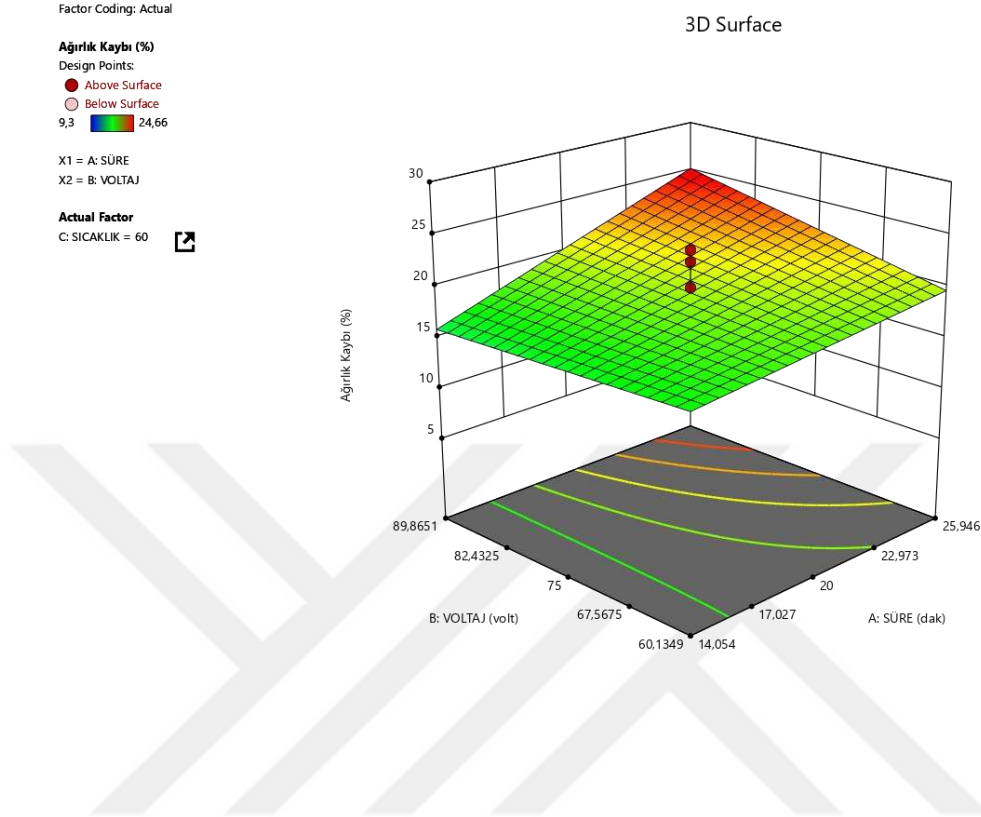


(b)

EK 6 – Şekil 7.6. Vakum altında ohmik ısıtmalı ön kurutma (VOK) işlemine maruz bırakılan taze elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi



EK 7 – Şekil 7.7. Vakum impregnasyon (Vİ) işlemi sonrasında vakum altında ohmik ısıtımali ön kurutma (VOK) işlemine maruz bırakılan elma dilimlerinin ağırlık kaybına (%) işlem süresi ve voltajın etkisine ait üç boyutlu yüzey-yanıt eğrisi



EK 8 – Çizelge 7.1. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin hacimsel büzüşme oranı değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	82,03	41,01	5,22	0,0102
Kurutma Yöntemi	18	2	140,21	70,11	8,93	0,0007
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	170,05	42,51	5,41	0,0016
Vakum İmpregnasyon	27	1	115,05	115,05	1465	0,0005
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	126,07	63,04	8,03	0,0013
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	259,95	129,98	16,55	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	39,76	9,94	1,27	0,3014
Kaynak						
Model		17	933,11	54,89	6,99	<0,0001
Hata		36	282,72	7,85		
Düzeltilmiş toplam		53	1215,84			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 9 - Çizelge 7.2. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon kapasitesine değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	18,08	9,04	3,87	0,0301
Kurutma Yöntemi	18	2	28,89	14,44	6,18	0,0049
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	74,81	18,70	8,01	0,0001
Vakum İmpregnasyon	27	1	567,07	567,07	242,72	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	30,80	15,40	6,59	0,0036
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	1,44	0,72	0,31	0,7367
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	20,23	5,06	2,17	0,0927
Kaynak						
Model		17	741,32	43,61	18,66	<0,0001
Hata		36	84,11	2,32		
Düzeltilmiş toplam		53	825,43			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 10 – Çizelge 7.3. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin rehidrasyon oranı değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	0,42	0,21	4,08	0,0253
Kurutma Yöntemi	18	2	0,57	0,28	5,44	0,0086
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	1,28	0,32	6,15	0,0007
Vakum İmpregnasyon	27	1	10,31	10,31	198,23	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	0,68	0,34	6,49	0,0039
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	0,10	0,05	0,91	0,4099
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	0,46	0,12	2,21	0,0877
Kaynak						
Model		17	13,80	0,81	15,62	<0,0001
Hata		36	1,87	0,05		
Düzeltilmiş toplam		53	15,68			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 11 – Çizelge 7.4. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin toplam kuru madde içeriğine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	253,18	126,59	15,77	<0,0001
Kurutma Yöntemi	18	2	31,95	15,98	1,99	0,1514
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	115,20	28,80	3,59	0,0146
Vakum İmpregnasyon	27	1	0,29	0,29	0,04	0,8510
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	3,77	1,89	0,24	0,7917
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	112,46	56,23	7,00	0,0027
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	116,36	29,09	3,62	0,0140
Kaynak						
Model		17	633,21	37,25	4,64	<0,0001
Hata		36	289,00	8,03		
Düzeltilmiş toplam		53	922,22			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 12 – Çizelge 7.5. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kesme sertliği değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO ($\times 10^3$)	OK ($\times 10^3$)	F	P
Sıcaklık	18	2	4,42	2,21	14,69	<0,0001
Kurutma Yöntemi	18	2	0,75	0,38	2,49	0,0991
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	12,53	3,13	20,82	<0,0001
Vakum İmpregnasyon	27	1	16,61	16,61	110,36	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	0,93	0,46	3,07	0,0606
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	1,00	0,50	3,32	0,0495
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	13,45	3,36	22,35	<0,0001
Kaynak						
Model		17	52,14	3,07	20,39	<0,0001
Hata		31	4,66	0,15		
Düzeltilmiş toplam		48	56,81			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 13 – Çizelge 7.6. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin delme sertliği değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO ($\times 10^2$)	OK ($\times 10^2$)	F	P
Sıcaklık	18	2	2,25	1,13	3,76	0,0367
Kurutma Yöntemi	18	2	8,95	4,47	14,96	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	6,72	1,68	5,62	0,0019
Vakum İmpregnasyon	27	1	9,66	9,66	32,30	<0,001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	6,53	3,26	10,91	0,0003
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	13,00	6,50	21,72	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	4,58	1,14	3,83	<0,0133
Kaynak						
Model		17	50,80	2,99	9,99	<0,0001
Hata		28	8,37	0,30		
Düzeltilmiş toplam		45	59,17			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 14 – Çizelge 7.7. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin antioksidan aktivite değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO ($\times 10^3$)	OK ($\times 10^3$)	F	P
Sıcaklık	18	2	31,03	15,51	5,97	0,0066
Kurutma Yöntemi	18	2	7,78	3,89	1,50	0,2404
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	12,30	3,08	1,18	0,3381
Vakum İmpregnasyon	27	1	65,08	65,08	25,03	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	6,40	0,40	1,23	0,3064
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	30,58	15,29	5,88	0,007
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	9,96	2,49	0,96	0,4448
Kaynak						
Model		17	146,35	86,10	3,31	0,002
Hata		30	77,99	2,60		
Düzeltilmiş toplam		47	224,34			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 15 – Çizelge 7.8. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin toplam fenolik madde içeriğine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO (×10 ³)	OK (×10 ³)	F	P
Sıcaklık	18	2	7,01	3,51	8,17	0,0014
Kurutma Yöntemi	18	2	70,62	35,31	82,23	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	5,59	1,40	3,25	0,0244
Vakum İmpregnasyon	27	1	1,78	1,78	4,15	0,0501
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	10,18	5,09	11,86	0,0001
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	2,66	1,33	3,10	0,0594
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	10,75	2,69	6,26	0,0008
Kaynak						
Model		17	96,63	5,68	13,24	<0,0001
Hata		31	13,31	0,43		
Düzeltilmiş toplam		48	109,94			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 16 – Çizelge 7.9. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin CIE L* (parlaklık) değerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	60,33	30,16	1,31	0,2811
Kurutma Yöntemi	18	2	98,04	49,02	2,14	0,1327
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	46,48	11,62	0,51	0,7312
Vakum İmpregnasyon	27	1	359,03	359,03	15,65	0,0003
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	18,44	9,22	0,4	0,6720
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	24,53	12,27	0,53	0,5904
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	124,00	31,00	1,35	0,2700
Kaynak						
Model		17	730,84	42,99	1,87	0,0559
Hata		36	825,77	22,94		
Düzeltilmiş toplam		53	1556,61			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 17 – Çizelge 7.10. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin CIE a* (kırmızı/yeşil) değerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	27,71	13,86	5,28	0,0108
Kurutma Yöntemi	18	2	37,83	18,91	7,21	0,0028
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	122,97	30,74	11,72	<0,0001
Vakum İmpregnasyon	27	1	624,20	624,20	238,04	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	10,66	5,33	2,03	0,1487
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	24,01	12,01	4,58	0,0184
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	16,53	4,13	1,58	0,2062
Kaynak						
Model		17	908,25	53,44	20,38	<0,0001
Hata		30	78,67	2,62		
Düzeltilmiş toplam		47	987,17			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 18 – Çizelge 7.11. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin CIE b* (sarı/mavi) değerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	16,72	8,36	1,50	0,2389
Kurutma Yöntemi	18	2	92,66	46,33	8,29	0,0012
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	58,12	14,53	2,60	0,0539
Vakum İmpregnasyon	27	1	302,04	302,04	54,04	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	100,59	50,30	9,00	0,0008
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	6,40	3,20	0,57	0,5695
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	5,09	1,27	0,23	0,9209
Kaynak						
Model		17	544,98	32,06	5,74	<0,0001
Hata		33	184,43	5,59		
Düzeltilmiş toplam		50	729,41			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 19 – Çizelge 7.12. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin toplam renk farkı (ΔE^*) değerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	159,80	79,90	9,95	0,0005
Kurutma Yöntemi	18	2	124,64	62,32	7,76	0,002
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	112,38	28,10	3,50	0,0189
Vakum İmpregnasyon	27	1	125,00	125,00	15,57	0,0005
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	32,31	16,15	2,01	0,1519
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	113,47	56,74	7,07	0,0032
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	14,21	3,55	0,44	0,7769
Kaynak						
Model		17	624,77	36,75	4,58	0,0002
Hata		29	232,77	8,03		
Düzeltilmiş toplam		46	857,55			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 20 – Çizelge 7.13. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kroma (C*) renk değerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	17,86	8,93	1,07	0,3561
Kurutma Yöntemi	18	2	13,41	6,70	0,8	0,4576
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	135,76	33,94	4,06	0,0092
Vakum İmpregnasyon	27	1	326,62	326,62	39,06	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	41,59	20,80	2,49	0,0996
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	82,99	41,49	4,96	0,0135
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	117,09	29,27	3,5	0,0180
Kaynak						
Model		17	710,72	41,81	5,00	<0,0001
Hata		31	256,00	8,36		
Düzeltilmiş toplam		48	969,91			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 21 – Çizelge 7.14. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin hue açısı değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO (×10 ²)	OK (×10 ²)	F	P
Sıcaklık	18	2	1,56	0,78	5,43	0,0095
Kurutma Yöntemi	18	2	3,36	1,68	11,74	0,0002
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	5,39	1,35	9,41	<0,0001
Vakum İmpregnasyon	27	1	29,17	29,17	201,68	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	1,20	0,60	4,20	0,0243
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	1,30	0,65	4,53	0,0188
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	1,86	0,47	3,25	0,0246
Kaynak						
Model		17	47,29	2,78	19,42	<0,0001
Hata		31	4,44	0,14		
Düzeltilmiş toplam		48	51,73			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 22 - Çizelge 7.15. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin esmerleşme değerlerine (BI) ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	0,72	0,36	1,79	0,1843
Kurutma Yöntemi	18	2	4,06	2,03	10,16	0,0005
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	3,08	0,77	3,86	0,124
Vakum İmpregnasyon	27	1	10,52	10,52	52,69	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	5,86	2,93	14,66	<0,0001
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	0,73	0,36	1,82	0,1797
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	0,59	0,15	0,74	0,5718
Kaynak						
Model		17	21,80	1,28	6,42	<0,0001
Hata		29	5,79	0,20		
Düzeltilmiş toplam		46	27,59			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 23 – Çizelge 7.16. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kroma farkı (ΔC^*) değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO	OK	F	P
Sıcaklık	18	2	47,02	23,51	5,38	0,0082
Kurutma Yöntemi	18	2	57,19	28,59	6,79	0,0034
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	104,13	26,03	6,18	0,0008
Vakum İmpregnasyon	27	1	581,19	581,19	137,95	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	1,20	0,60	0,14	0,8674
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	36,92	18,46	4,38	0,0205
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	53,16	13,29	3,15	0,0206
Kaynak						
Model		17	834,02	49,06	11,64	<0,0001
Hata		31	139,03	4,213		
Düzeltilmiş toplam		50	973,05			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 24 – Çizelge 7.17. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin su aktivitesi değerlerine ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO ($\times 10^{-2}$)	OK ($\times 10^{-2}$)	F	P
Sıcaklık	18	2	7,16	3,58	12,81	<0,0001
Kurutma Yöntemi	18	2	0,61	0,30	1,09	0,3481
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	1,76	0,44	1,57	0,2034
Vakum İmpregnasyon	27	1	6,97	6,97	24,92	<0,001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	0,47	0,24	0,84	0,4404
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	1,25	0,62	2,23	0,1226
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	5,34	1,33	4,77	0,0034
Kaynak						
Model		17	23,55	1,39	4,95	<0,0001
Hata		36	10,02	0,28		
Düzeltilmiş toplam		53	33,61			

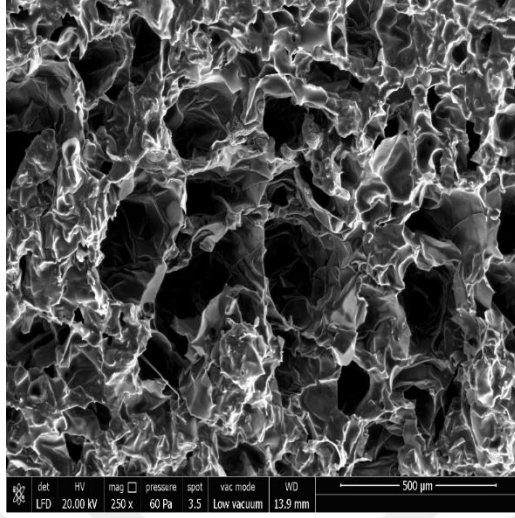
*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 25 – Çizelge 7.18. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kül içeriğine ait varyans analiz tablosu

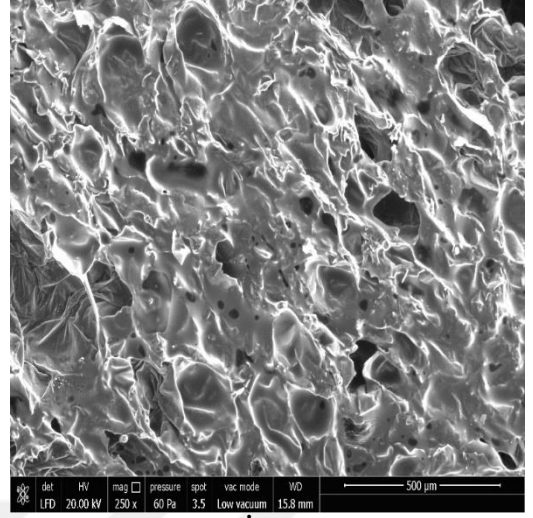
Faktör	N	SD*	KO ($\times 10^{-2}$)	OK ($\times 10^{-2}$)	F	P
Sıcaklık	18	2	13,98	6,99	3,93	0,0289
Kurutma Yöntemi	18	2	148,55	74,28	41,75	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	40,19	10,05	5,65	0,0013
Vakum İmpregnasyon	27	1	414,65	414,65	233,10	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	19,07	9,54	5,36	0,0093
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	39,69	16,99	9,55	0,0005
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	31,91	7,98	4,48	0,0050
Kaynak						
Model		17	719,22	42,31	23,78	<0,0001
Hata		35	62,26	1,78		
Düzeltilmiş toplam		52	781,48			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

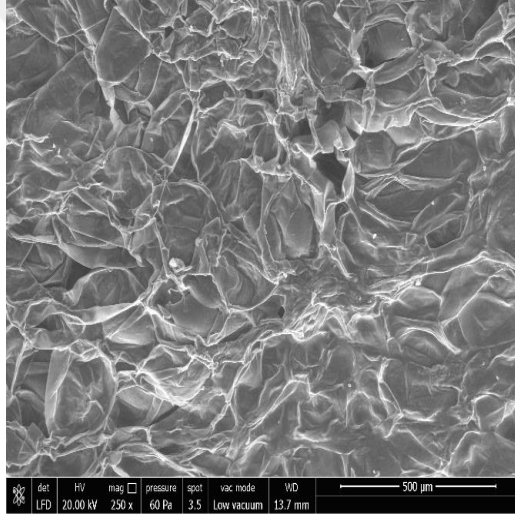
EK 26 – Şekil 7.8. Farklı kurutma yöntemleri ile 50°C’de kurutulan elma dilimlerinin
SEM görüntüleri



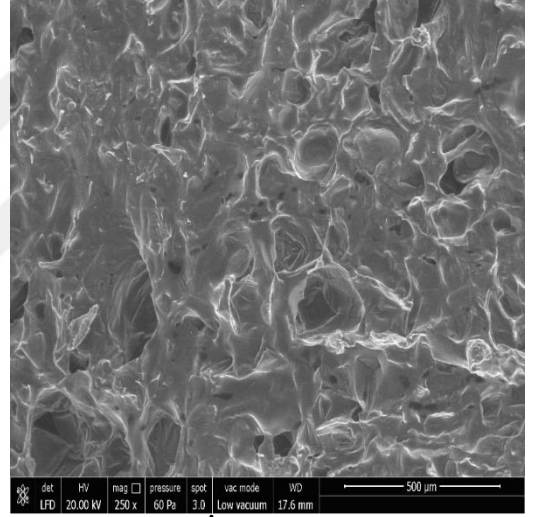
KK



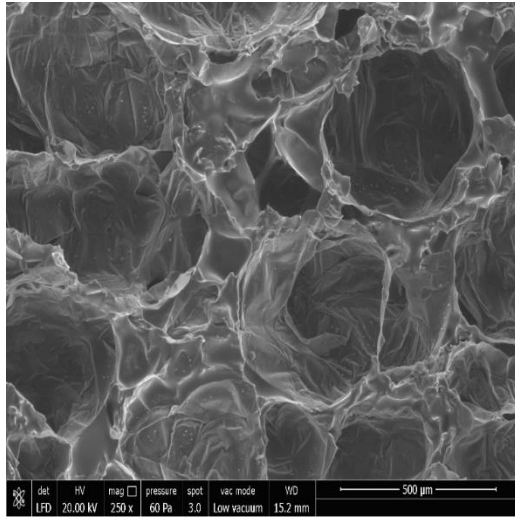
VI+KK



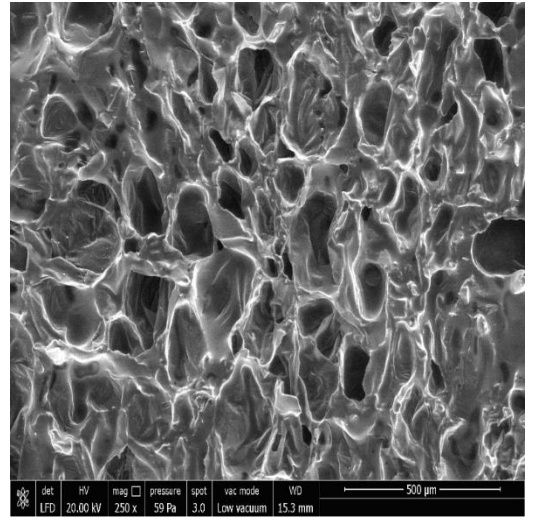
AOK+KK



VI+AOK+KK

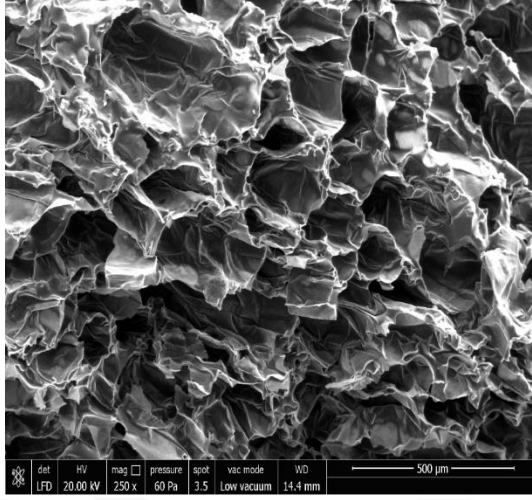


VOK+KK

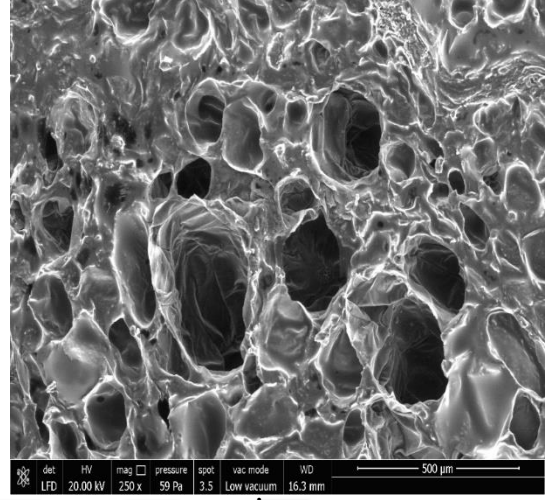


VI+VOK+KK

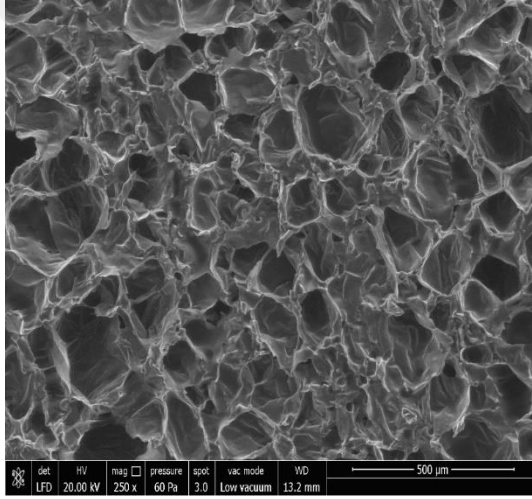
EK 27 – Şekil 7.9. Farklı kurutma yöntemleri ile 60°C’de kurutulan elma dilimlerinin
SEM görüntüleri



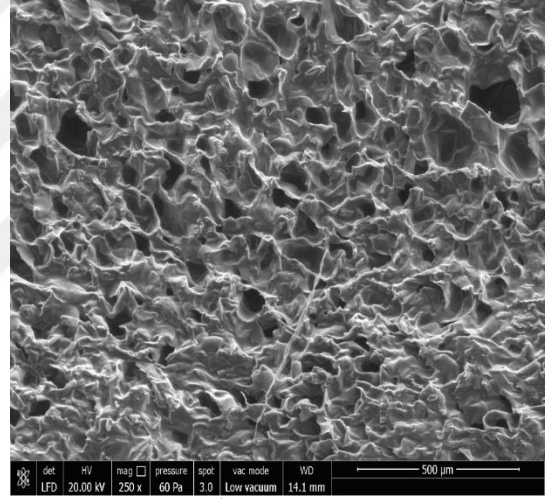
KK



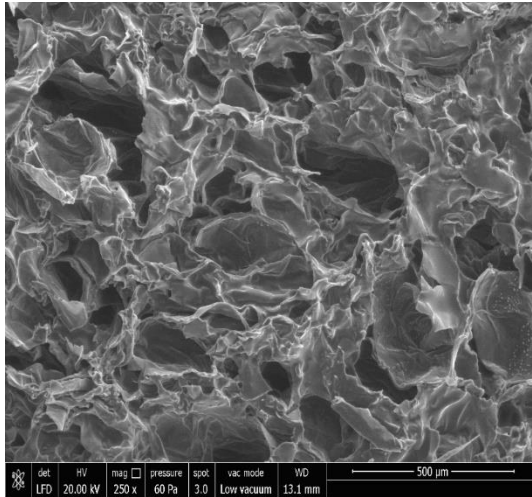
VI+KK



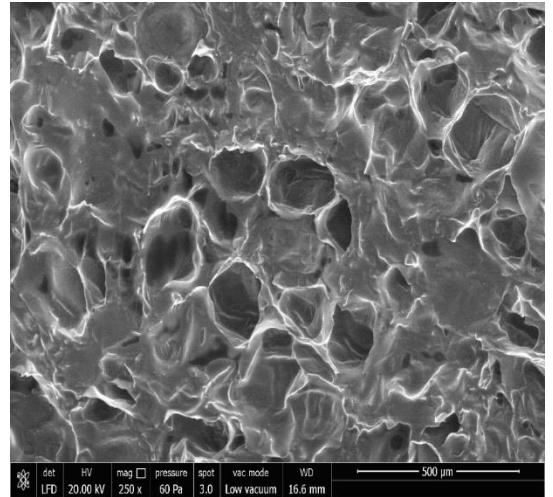
AOK+KK



VI+AOK+KK

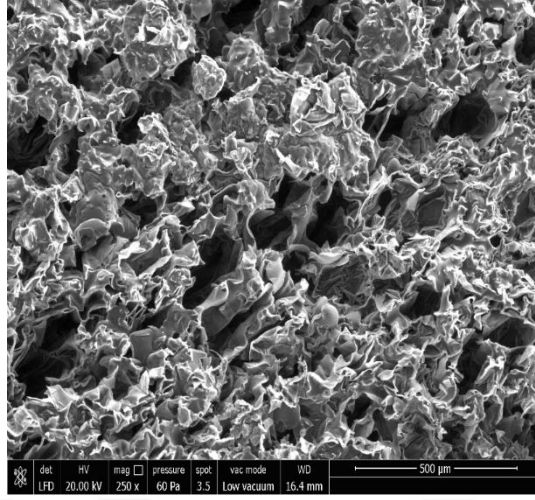


VOK+KK

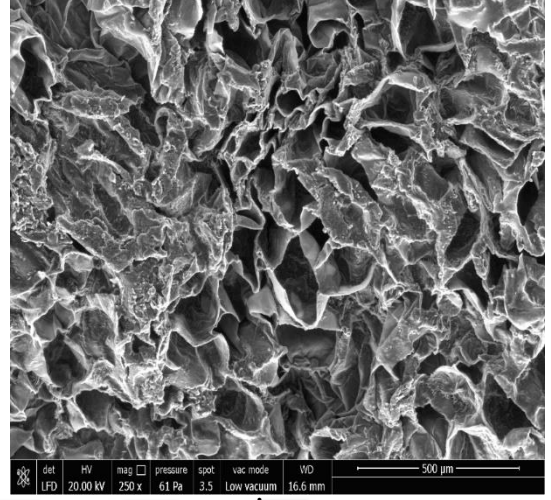


VI+VOK+KK

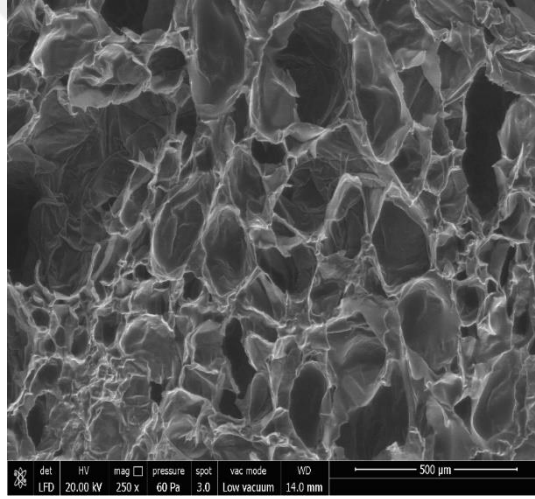
EK 28 – Şekil 7.10. Farklı kurutma yöntemleri ile 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin
SEM görüntüleri



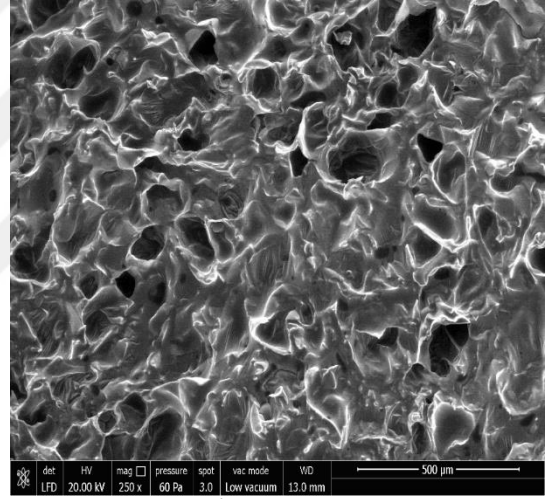
KK



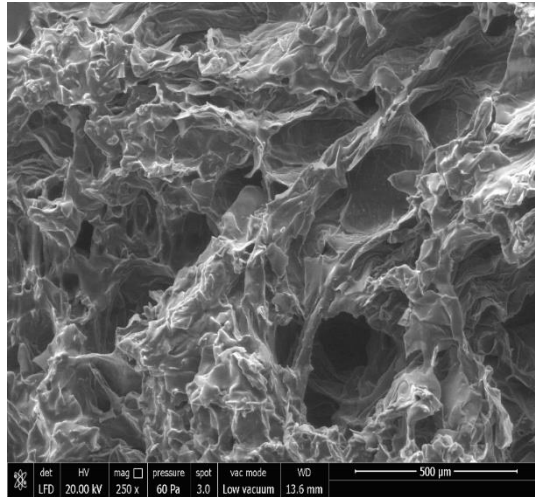
Vİ+KK



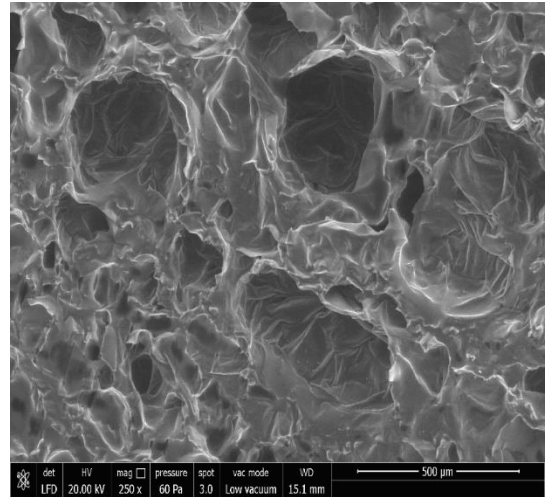
AOK+KK



Vİ+AOK+KK



VOK+KK



Vİ+VOK+KK

EK 29 – Çizelge 7.19. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin, kurutma sırasında özgül nem çekme oranına (SMER) ait ANOVA tablosu

Faktör	N	SD*	KO ($\times 10^{-2}$)	OK ($\times 10^{-2}$)	F	P
Sıcaklık	18	2	0,70	0,30	95,44	<0,0001
Kurutma Yöntemi	18	2	0,03	0,01	3,81	0,0315
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	0,04	0,01	2,88	0,0361
Vakum İmpregnasyon	27	1	0,04	0,04	10,19	0,0029
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	0,07	0,04	9,86	0,0004
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	0,01	0,01	1,26	0,2969
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	0,01	0,00	0,82	0,5222
Kaynak						
Model		17	0,89	0,05	14,45	<0,0001
Hata		36	0,13	0,00		
Düzeltilmiş toplam		53	1,01			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 30 – Çizelge 7.20. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin, kurutma sırasında özgül enerji tüketimine (SEC) ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO ($\times 10^3$)	OK ($\times 10^3$)	F	P
Sıcaklık	18	2	17,53	8,77	10,89	0,0002
Kurutma Yöntemi	18	2	53,11	26,56	32,99	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	27,48	6,87	8,53	<0,0001
Vakum İmpregnasyon	27	1	482,39	482,39	599,12	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	6,35	3,18	3,94	0,0283
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	21,42	10,71	13,30	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	45,20	11,30	14,04	<0,0001
Kaynak						
Model		17	633,40	38,44	47,74	<0,0001
Hata		36	28,98	0,81		
Düzeltilmiş toplam		53	682,38			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 31 – Çizelge 7.21. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kurutma sırasında, birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli enerji miktarına (MER) ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO ($\times 10^{-8}$)	OK ($\times 10^{-9}$)	F	P
Sıcaklık	18	2	0,37	0,02	379,05	<0,0001
Kurutma Yöntemi	18	2	1,05	5,27	10,94	0,0002
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	16,90	42,2	0,88	0,4873
Vakum İmpregnasyon	27	1	0,30	0,03	615,38	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	3,94	0,20	40,90	<0,0001
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	1,37	6,85	14,23	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	1,45	3,61	7,50	0,0002
Kaynak						
Model		17	0,74	0,44	90,54	<0,0001
Hata		36	1,73	48,20		
Düzeltilmiş toplam		53	0,76			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler

EK 32 – Çizelge 7.22. Farklı kurutma yöntemleri ile 50, 60 ve 70°C’de kurutulan elma dilimlerinin kurutulması için gerekli olan toplam enerji miktarına ait varyans analiz tablosu

Faktör	N	SD*	KO (×10⁻²)	OK (×10⁻²)	F	P
Sıcaklık	18	2	1,70	0,85	1,74	0,1899
Kurutma Yöntemi	18	2	160,52	80,26	164,33	<0,0001
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi	6	4	61,24	15,31	31,35	<0,0001
Vakum İmpregnasyon	27	1	154,30	154,30	315,92	<0,0001
Sıcaklık×Vakum İmpregnasyon	9	2	4,57	2,28	4,67	0,0157
Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	9	2	10,53	5,27	10,78	0,0002
Sıcaklık×Kurutma Yöntemi×Vakum İmpregnasyon	3	4	97,99	24,50	50,16	<0,0001
Kaynak						
Model		17	490,85	28,87	59,12	<0,0001
Hata		36	17,58	0,49		
Düzeltilmiş toplam		53	508,43			

*SD: Serbestlik derecesi, KO: Kareler ortalaması, OK: Ortalama kareler