
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SICAKLIK-BAĞIL NEM KONTROLLÜ KONVEKTİF İNFRARED BİR KURUTUCUNUN TASARIMI VE DENEYSEL ANALİZİ

Gülşah KARACA DOLGUN

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gülşah KARACA DOLGUN

22/06/2021

SICAKLIK-BAĞIL NEM KONTROLLÜ KONVEKTİF İNFRARED BİR KURUTUCUNUN TASARIMI VE DENEYSEL ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Gülşah KARACA DOLGUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Endüstride kurutma prosesi yoğun olarak kullanılmakta olup enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptir. Kurutma, gıda ürünlerinin bozulmasını engellemek amacıyla uygulanan suyun uzaklaştırılması işlemidir. Ceviz yüksek antioksidan içeriği sebebiyle popüler bir yemiştir ve hasat edildikten sonra bozulmadan saklanabilmesi için kurutulması gerekmektedir. Cevizin kurutulması uzun zaman alan ve enerji yoğun bir işlemdir. Literatürde kuruyemişlerin kurutulmasında daha çok sıcak hava kullanıldığı görülmektedir. Ancak infrared teknolojisinin kuruyemiş kurutulmasında kullanıldığına dair çok az çalışma bulunmaktadır. Kuruyemiş kurutulmasında infrared konvektif bir kurutucunun enerji ve ekserji analizine ise rastlanmamıştır. Bu tez kapsamında kaliteden ödün vermeden enerji tüketimini azaltmak ve kuruma süresini kısaltmak amacıyla açık ve kapalı çevrim olmak üzere iki farklı sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Açık çevrim kurutma sistemi, sıcaklık kontrollü olarak, kapalı çevrim kurutma sistemi sıcaklık ve bağıl nem kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. 2019 yılında hasat edilen Bilecik bölgesi cevizleri açık sistemde, 2020 yılında hasat edilen Bilecik bölgesi cevizleri açık ve kapalı sistemde kurutulmuştur. Cevizin kurutma kinetikleri oluşturularak analiz edilmiş, enerji-ekserji analizi ve performans hesaplamaları yapılmıştır. Açık ve kapalı çevrim kurutma sisteminde kurutulan 2020 yılında hasat cevizlerinin kül ve yağ değerleri, renk özellikleri, yağ kalite özellikleri, yağ asidi kompozisyonu, toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasitesi incelenmiştir. Açık ve kapalı çevrim kurutma sisteminde infrared teknolojisinin kuruma süresini kısalttığı, enerji tüketimini azalttığı ve gıda kalitesini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ürün kaynak mesafesinin 20 cm olduğu konvektif infrared kapalı çevrim kurutma sistemi ceviz kurutma prosesi için en uygun sistem olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışması ile ceviz kurutulmasında konvektif infrared bir kurutucunun enerji ve ekserji analizi, performans analizi, kurutma kinetikleri ve gıda analizi sonuçları literatüre kazandırılmıştır.

Bilim Kodu : 92807

Anahtar Kelimeler : Ceviz kurutma, ısı pompası, infrared enerji, enerji-ekserji analizi, gıda kalitesi

Sayfa Adedi : 117

Danışman : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

DESIGN AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A TEMPERATURE-RELATIVE HUMIDITY CONTROLLED CONVECTIVE INFRARED DRYER

(Ph. D. Thesis)

Gülşah KARACA DOLGUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

The drying process is used extensively in the industry and has an important share in energy consumption. Drying is the process of removing the water applied to prevent the deterioration of food products. Walnuts are a popular nut due to their high antioxidant content. After the walnut is harvested, it must be dried thus, it can be stored without deterioration. Drying walnuts is a time-consuming and energy-intensive process. In the literature, it is seen that mostly hot air is used for drying nuts. However, there are a few studies on the use of infrared technology in drying nuts. No study was found on the energy and exergy analysis of an infrared convective dryer in the drying of nuts. Within the scope of this thesis, two different systems, open and closed cycle, were designed and manufactured in order to reduce energy consumption and drying time without sacrificing quality. The open cycle drying system was temperature controlled, the closed cycle drying system was temperature and relative humidity controlled. Bilecik region walnuts, which were harvested in 2019, were dried in the open cycle system, and the walnuts of the Bilecik region, which were harvested in 2020, were dried in open and closed cycle systems. The drying kinetics of the walnut were analyzed, energy-exergy analysis and performance calculations were performed. Ash and oil values, color properties, oil quality properties, fatty acid composition, total phenolic substance amount and antioxidant capacity of 2020 harvest walnuts dried in open and closed cycle drying system were examined. It has been concluded that infrared technology shortens the drying time, reduces energy consumption and improves food quality in open and closed cycle drying systems. The convective infrared closed cycle drying system with a product source distance of 20 cm has been determined as the most suitable system for the walnut drying process. In this thesis, the energy and exergy analysis, performance analysis, drying kinetics and food analysis results of a convective infrared dryer in walnut drying are introduced to the literature.

Science Code : 92807

Key words : Walnut drying, heat pump, infrared energy, energy-exergy analysis, food quality

Page Number : 117

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında değerli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve hoşgörüsünü esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ'a, tezimin başından sonuna kadar desteğini bir an olsun esirgemeyen, beni her konuda destekleyen ve yardımcı olan hayattaki en büyük şansım sevgili eşim Ekin Can DOLGUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deney düzeneklerinin kuruluşunda büyük emeği geçen Öğretim Görevlisi Burak AKTEKELİ'ye ve kurutulmuş cevizlerin gıda analizlerini yapan sayın hocalarım Doç. Dr. Hakan ERİNÇ ve Arş. Gör. Betül OSKAYBAŞ EMLEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 3

2.1. Sıcak Hava ve İnfrared Destekli Sıcak Hava ile Kuruyemiş Kurutulması 3

2.2. Gıda Analizi 5

2.3. Kombine İnfrared Konvektif Kurutma Sistemleri 7

3. CEVİZ VE CEVİZİN ÖZELLİKLERİ 9

3.1. Ceviz 9

3.2. Cevizin Fiziksel ve Kimyasal Bileşimi 9

3.3. Cevizin Antioksidan ve Fenolik Bileşimleri 11

3.4. Cevizin İnsan Sağlığına Etkileri 11

4. KURUTMA 13

4.1. Kurutma İçin Kontrol Faktörleri 13

4.2. Kurutma Teorisi 14

4.2.1. Kurutmanın statiği 16

4.2.2. Kurutmanın kinetiği 17

4.3. Su Aktivitesi 19

Sayfa

4.4. Kurutmada Enerji 20

4.4.1. Kurutma ve kurutucunun enerji verimliliği..... 21

4.4.2. Isı geri kazanımı ve geliştirilmiş kurutma teknolojileri..... 22

4.5. İnfrared Kurutma..... 23

4.5.1. İnfrared ışınımın teorisi 23

4.5.2. İnfrared lamba..... 26

5. NEMLİ HAVA TERMODİNAMİĞİ 31

5.1. Psikrometrik Diyagramda Temel Kavramlar 31

5.2. Adyabatik Doyma İşlemi 34

5.3. Duyulur Isıtma ve Soğutma 36

6. MATERYAL VE METOT..... 39

6.1. Materyal 39

6.1.1. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 1)..... 39

6.1.2. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 2)..... 41

6.2. Deney Düzeneği 41

6.2.1. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 1)..... 41

6.2.2. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 2)..... 44

6.3. Deneysel Prosedür..... 46

6.3.1. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 1)..... 46

6.3.2. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared..... 47
kurutucu (Grup 2)

6.4. Kalite Analizi Prosedürü 48

6.5. Teorik Analiz 49

Sayfa

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 59

7.1. Sıcaklık Kontrollü Açık Sistem Konvektif İnfrared Kurutucu 59

7.2. Sıcaklık ve Bağıl Nem Kontrollü Kapalı Sistem Konvektif İnfrared Kurutucu . 76

7.3. Gıda Analizi 85

7.3.1. Ceviz örneklerinin kül ve yağ değerleri 85

7.3.2. Ceviz örneklerinin renk özellikleri 86

7.3.3. Ceviz örneklerinin yağ kalite özellikleri ve yağ asidi kompozisyonu 88

7.3.4. Ceviz örneklerinin toplam fenolik madde miktarı (TFM) ve antioksidan kapasitesi 94

7.4. Hata Analizi 96

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 99

8.1. Sıcaklık Kontrollü Açık Sistem Konvektif İnfrared Kurutucu 99

8.2. Sıcaklık ve Bağıl Nem Kontrollü Kapalı Sistem Konvektif İnfrared Kurutucu 101

KAYNAKLAR 103

ÖZGEÇMİŞ 115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Elektrikli yayıcıların özellikleri 27

Çizelge 6.1. Açık çevrim kurutma sistemi ve ölçüm ekipmanının özellikleri 43

Çizelge 6.2. Kapalı çevrim kurutma sistemi ve ölçüm ekipmanlarının özellikleri 43

Çizelge 7.1. Deney sonuçlarının karşılaştırılması 85

Çizelge 7.2. Ceviz örneklerinin kül ve yağ değerleri 86

Çizelge 7.3. Ceviz örneklerinin renk özellikleri 87

Çizelge 7.4. Ceviz yağı kalite özellikleri 92

Çizelge 7.5. Ceviz örneklerinin yağ asidi kompozisyonu 93

Çizelge 7.6. Ceviz örneklerinin toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasitesi 96

Çizelge 7.7. Belirsizlik analizi sonuçları 96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Gıdaların genel sorpsiyon izotermi 16

Şekil 4.2. Kuruma hızı eğrisi, sıcaklık ve nem içeriğinin zamana göre değişimi 18

Şekil 4.3. Su aktivitesi ile gıdalardaki bozulma reaksiyonları arasındaki ilişki 20

Şekil 4.4. Siyah bir cismin yayınım spektrumu 25

Şekil 4.5. IR kaynaklarının ısınma ve soğuma çevrimleri 28

Şekil 4.6. Işıma verimi ve farklı yayıcıların voltaj ve yayıcı sıcaklıkları arasındaki ilişki 28

Şekil 4.7. Suyun dalga boyuna göre absorpsiyon eğrisi 29

Şekil 5.1. Adyabatik doyma işlemi 35

Şekil 5.2. Adyabatik doyma eğrisinin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi..... 36

Şekil 5.3. Duyulur ısıtma ve duyulur soğutmanın psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi 36

Şekil 6.1. Kurutmadan önce kabuklu ceviz resimleri ve farklı kurutma sistemlerinde kurutulmuş ceviz resimleri (Grup 1-2019) 39

Şekil 6.2. Kurutmadan önce kabuklu ceviz resimleri ve farklı kurutma sistemlerinde kurutulmuş ceviz resimleri (Grup 1-2020) 40

Şekil 6.3. Farklı kurutma sistemlerinde kurutulmuş ceviz resimleri (Grup 2 - 2020) 41

Şekil 6.4. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (IRHP)..... 42

Şekil 6.5. İnfrared konvektif açık kurutma sistemi şematik görünüm 43

Şekil 6.6. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu (IRHP) 45

Şekil 6.7. İnfrared konvektif kapalı kurutma sistemi şematik görünüm 45

Şekil 6.8. IRHP şematik gösterim-Açık sistem 50

Şekil 6.9. IRHP şematik gösterim-Kapalı sistem..... 51

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.1. Kurutma kabini giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi (Grup 1-2019) 60

Şekil 7.2. Cevizin iç ve yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi (Grup 1-2019) 61

Şekil 7.3. Kuru baza göre nem içeriğinin zamana göre değişimi (X_{kb}) (Grup 1-2019) 61

Şekil 7.4. Deneyler süresince kurutma hızının (DR) zamana göre değişimi (Grup 1-2019) 62

Şekil 7.5. Toplam enerji tüketiminin modellere göre değişimi (Grup 1-2019) 63

Şekil 7.6. Özgül enerji tüketiminin zamana göre değişimi (SEC) (Grup 1-2019) 63

Şekil 7.7. Enerji verimliliğinin zamana göre değişimi (EE) (Grup 1-2019) 64

Şekil 7.8. Isı pompasının performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{HP}) (Grup 1-2019) 65

Şekil 7.9. Tüm sistemin performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{ts}) (Grup 1-2019) 65

Şekil 7.10. Ekserji verimliliğinin zamana göre değişimi (Grup 1-2019) 67

Şekil 7.11. Kütle transfer katsayısının zamana göre değişimi (Grup 1-2019) 67

Şekil 7.12. Nem oranının zamana göre değişimi (Grup 1-2019) 68

Şekil 7.13. Kurutma kabini giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi (Grup 1- 2020) 69

Şekil 7.14. Cevizin iç ve yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi (Grup 1-2020) 70

Şekil 7.15. Kuru baza göre nem içeriğinin zamana göre değişimi (Xkb) (Grup 1-2020) 70

Şekil 7.16. Deneyler süresince kurutma hızının zamana göre değişimi (DR) (Grup 1-2020) 71

Şekil 7.17. Toplam enerji tüketiminin modellere göre değişimi (Grup 1-2020) 71

Şekil 7.18. Özgül enerji tüketimi ve zaman grafiği (Grup 1-2020) 72

Şekil 7.19. Enerji verimliliğinin zamana göre değişimi (EE) (Grup 1-2020) 73

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.20. Isı pompasının performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{HP}) (Grup 1-2020)..... 74

Şekil 7.21. Tüm sistemin performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{ts}) (Grup 1-2020) 74

Şekil 7.22. Ekserji verimliliğinin zamana göre değişimi (Grup 1-2020)..... 75

Şekil 7.23. Kütle transfer katsayısının zamana göre değişimi (Grup 1-2020)..... 75

Şekil 7.24. Nem oranının zamana göre değişimi (MR) (Grup 1-2020)..... 76

Şekil 7.25. Kurutma kabini giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi (Grup 2-2020) 77

Şekil 7.26. Cevizin iç ve yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi (Grup 2-2020) 78

Şekil 7.27. Kuru baza göre nem içeriğinin zamana göre değişimi (X_{kb}) (Grup 2-2020) 78

Şekil 7.28. Deneyler süresince kurutma hızının zamana göre değişimi (DR) (Grup 2-2020) 79

Şekil 7.29. Kapalı sistem konvektif infrared kurutmada ekipmanlara göre enerji tüketiminin dağılımı (Grup 2-2020)..... 80

Şekil 7.30. Özgül enerji tüketiminin zamana göre değişimi (SEC) (Grup 2-2020)..... 80

Şekil 7.31. Enerji verimliliğinin zamana göre değişimi (EE) (Grup 2-2020)..... 81

Şekil 7.32. Isı pompasının performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{HP}) (Grup 2-2020)..... 82

Şekil 7.33. Tüm sistemin performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{ts}) (Grup 2-2020) 82

Şekil 7.34. Ekserji verimliliğinin zamana göre değişimi (Grup 2-2020)..... 83

Şekil 7.35. Kütle transfer katsayısının zamana göre değişimi (Grup 2-2020)..... 83

Şekil 7.36. Nem oranının zamana göre değişimi (MR) (Grup 2-2020)..... 84

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan (m^2)
Bi	Biot sayısı
C_p	Özgül ısı kapasitesi (kJ/kg K)
$\overline{C}_p$	Ortalama özgül ısı kapasitesi (kJ/kg K)
D_e	Etkin difüzyon katsayısı (m^2/s)
Di	Dinçer sayısı
DR	Kuruma hızı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$.dak.)
EN	Birim zamanda olan enerji akısı (W/m^2)
$\dot{E}n$	Birim zamandaki enerji (kJ/s)
$\dot{E}x$	Birim zamandaki ekserji (kJ/s)
ex	Birim kütle başına ekserji (kJ/kg)
EX	Ekserji akısı (W/m^2)
$E_{tüketim}$	Sistemin toplam elektrik tüketimi (kWh)
F	Şekil faktörü
h_{fg}	Gizli ısı (kJ/kg)
h	Havanın birim kütle başına entalpisi (kJ/kg)
h_m	Kütle transfer katsayısı (m/s)
k_c	Kurutma sabiti (1/dak.)
L	Karakteristik uzunluk (m)
M_i	İlk nemli ürün kütlesi (g)
M_d	Son kuru ürün kütlesi (g)
MR	Nem oranı
m	Kütle (kg)
$\dot{m}$	Kütlesel debi (kg/s)
P	Basınç (kPa)
$\dot{Q}_C$	Kondenser kapasitesi (kW)

Simgeler	Açıklamalar
r	Çap (m)
R	Evrensel gaz sabiti (kJ/kg K)
T	Sıcaklık (K)
T_0	Ölü durum sıcaklığı (K)
T_C	Kondenser sıcaklığı (°C)
T_E	Evaporatör sıcaklığı (°C)
t	Zaman (s)
V	Akış hızı (m/s)
$\dot{V}$	Hacimsel debi (m^3/s)
$\dot{W}_C$	Kompresör gücü (kW)
$\dot{W}_F$	Fan gücü (kW)
X	Nem içeriği ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
X_0	İlk nem içeriği ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
X_e	Denge nem içeriği ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
X_t	"t" anındaki nem içeriği ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
X_{t+dt}	"t + dt" anındaki nem içeriği ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
ω	Özgül nem ($g_{su}/kg_{kuru\ hava}$)
η_{ex}	Ekserji verimliliği (%)
ε	Yayıcılık faktörü
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
β	Kalite faktörü
σ	Stefan-Boltzmann sabiti (W/m^2K^4)
amb	Ortam
abs	Emilen
ave	Ortalama
ç	Çıkış
d	Kuru madde
da	Kurutma havası
DC	Kurutma kabini
des	Yok olan
emit	Yayılan

Simgeler	Açıklamalar
ev	Buharlaşan
g	Giriş
hp	Isı pompası
IR-P	İnfrared lambadan ürüne
IR-DC	İnfrared lambadan kurutma kabinine
kb	Kuru baz
NP	Düğüm noktası
P	Ürün
P-DC	Üründen kurutma kabinine
rad	Yayılan
ref	Yansıyan
trans	İletilen
ts	Tüm sistem
$\boldsymbol{v}$	Buhar
w	Su
0	Ölü durum

Kısaltmalar	Açıklamalar
COP	Performans katsayısı
EE	Enerji verimliliği (%)
HP	Isı pompalı kurutma sistemi
HA	Sıcak hava
IR	İnfrared radyasyon
IRHP	İnfrared destekli ısı pompalı kurutma sistemi
RH	Bağıl nem (%)

1. GİRİŞ

Ceviz, insan sağlığına faydalı olan çoklu doymamış yağ asitlerinin biyokimyasal bileşimi nedeniyle önemli bir ekonomik değere sahiptir. Ceviz, yüksek yağ içeriği (çekirdek ağırlığının %60'ından fazlası), proteinler, vitaminler, lifler, mineraller ve antioksidanlar gibi iyi aroma ve besleyici özelliklere sahip olduğu için diğerleri arasında popüler bir yemiştir [1]. Bununla birlikte, yüksek yağ içeriği ve doymamış yağ asidi miktarı, lipid oksidasyonunu potansiyel olarak önemli bir sorun haline getirir. Bu, cevizlerde istenmeyen küflü tada sahip oksidasyon ürünleri ile sonuçlanan en önemli kalite parametresidir [2]. Mikrobiyal bozulmayı, kalitenin bozulmasını ve ürün kaybını önlemek için hasattan sonra hızlı bir şekilde ürün standartlara göre belirlenen nem içeriğine (X_{kb}) kadar kurutulur. Cevizlerin erken ve geç hasat olma durumuna göre kuruma süreleri değişkenlik gösterse de istenen nem değerine düşmesi geleneksel kurutma sistemlerinde uzun sürmektedir. Uzun kuruma süresi, kontrolsüz ve homojen olmayan kurutma, gıda kalitesinin düşmesine neden olur. Kurutma havası sıcaklığı arttıkça kuruma süresi azalır ancak yüksek kurutma havası sıcaklığı esmerleşme reaksiyonuna neden olur, bu nedenle literatürde 43°C ile sınırlandırılmıştır [3–5]. Kurutma sistemi, ürün sıcaklığının ayarlanan değeri aşmaması için anında kontrol edilmelidir. Bu nedenle ceviz kurutma işlemi için uygun kurutma yönteminin seçimi önemlidir.

Dünyada ve Türkiye'de ceviz kurutmada geleneksel yöntemler uygulanmaktadır. Hava, doğalgaz, kömür veya elektrikle ısıtılarak cevizleri kurutmak üzere kullanılır. İnfrared radyasyon (IR) enerjisi, ortam havasını ısıtmadan ürüne doğrudan nüfuz etme, yüksek ısı transfer hızı, yüksek kuruma hızı, enerji tasarrufu, düşük kuruma süresi, kolay ve hızlı proses kontrolüne imkân sağlama gibi birçok avantaja sahiptir. Isı pompaları düşük sıcaklıktan aldıkları ısıyı bir iş yardımıyla daha yüksek sıcaklıktaki ortama aktarırlar. Kuyu-kaynak arasındaki sıcaklık farkının azalması ısı pompasının etkinlik katsayısını arttırır. Isı pompasının ayrıca sıcaklığa duyarlı malzemeler için düşük sıcaklıkta çalışması, yüksek enerji verimliliği ve kontrol edilebilir kurutma koşulları gibi birçok avantajı vardır. IR enerjisini ve ısı pompasını birlikte kullanmak, ayrı ayrı kaynak kullanımından daha avantajlıdır. Bu avantajları sayesinde hibrit kullanım, geleneksel kurutma işlemlerine göre daha iyi nihai ürün kalitesi ve zaman ve enerji tasarrufu sağlar. Bu çalışmada farklı iklim bölgeleri için açık ve kapalı sistem olmak üzere iki farklı kurutma sistemi önerilmiştir. Her

iki sistemde de sadece konveksiyon ve kombine radyasyon & konveksiyon olmak üzere iki farklı ısı transfer mekanizması ile kurutma yapılması amaçlanmıştır. Sıcak hava (40°C) ısı pompası kullanılarak üretilmektedir. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu Grup 1 olarak adlandırılmıştır. Grup 1 deney setinde evaporatör havasının sıcaklığı ısı geri kazanımı ile arttırılarak, böylece dış hava sıcaklığının düşük olduğu günlerde buzlanma probleminin önüne geçilmesi planlanmıştır. Ayrıca Grup 1 deneylerinde tepsi dikey olarak yerleştirilerek ürüne iki yönlü ısı transferinin kurutmaya etkisi incelenmiştir. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu Grup 2 olarak adlandırılmıştır, kurutma kabininden çıkan hava nem alma serpantininden geçerek, sıcaklığı düşer ve nemi alınır, daha sonra kondenserde set edilen sıcaklık ve bağıl neme getirildikten sonra kurutma kabinine verilir. Bu sayede soğuk dış havanın sürekli ısıtılması ya da yüksek nemli havanın set değerine getirilmesi için enerji harcanması önlenmiş olur. Her iki çevrimde de infrared lamba 35-40°C ürün yüzey sıcaklığına göre kontrol edilmektedir, ayrıca tepsinin alt ve üst yüzeyine ısı iletimi konveksiyon ve radyasyon ile gerçekleşmektedir.

Literatürde çoğunlukla kuruyemişlerin sıcak hava ile kurutulduğu görülmektedir, bu çalışmalarda, gıda analizi, kurutma kinetikleri, enerji ve ekserji analizlerinin bir veya birkaçına beraber rastlanmaktadır. Ancak infrared teknolojisinin kuruyemiş kurutulmasında kullanılmasına yönelik az sayıda çalışma bulunmaktadır. Kuruyemiş kurutulmasında infrared konvektif bir kurutucunun enerji ve ekserji analizine ise rastlanmamıştır. Bu çalışmada her iki çevrimde de kombine infrared konvektif sistem ile enerji ve zaman tasarrufu, cevizin kurutma kinetikleri, enerji ve ekserji analizi, ısıtma performans katsayısı hesaplanarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Cevizlerin kurutma sürelerinin kısaltılarak enerji tüketiminin düşürülmesinin gıda kalitesine olan etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Ceviz numunelerinin, kül, yağ, renk, yağ kalite özellikleri (serbest yağ asitliği değeri, peroksit değeri, sabunlaşma sayısı, iyot sayısı, konjuge dien sayısı ve konjuge trien sayısı), yağ asidi kompozisyonu (palmitik asit, palmitoleik asit, stearik asit, oleik asit, linoleik asit, linolenik asit ve eikosenoik asit), toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasitesi (DPPH ve ABTS) incelenecektir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Sıcak Hava ve İnfrared Destekli Sıcak Hava ile Kuruyemiş Kurutulması

Literatürde cevizin sıcak hava [6–9], ortam havası [3] ve IR önişlem ve sıcak hava [5] ile kurutulmasına dair çalışmalar incelenmiştir. Kurutma havası sıcaklığı yükseldikçe kuruma süresinin azaldığı görülmüştür [6]. Ancak hava sıcaklığı 43 °C'nin üzerine çıktığında ceviz etindeki yağda ekşime görülmektedir [3]. Rumsey ve Thompson (1984) cevizleri ortam havası (14,5-21,9 ℃) ile 94-166 saat arasında kurutmuşlardır. Kurutma simülasyon sonuçlarına göre 72-148 saat sürmüştür. Simülasyon sonuçlarının 148 saati aştığı durumlarda, uzun kuruma süresinin ortamı mikrobiyal bozunmaya hazırladığı gerekçesiyle sonuçlar göz ardı edilmiştir [3]. Fu vd. (2016) cevizleri üç farklı teknikle 60 saatte kurutmuştur. Cevizleri güneşte 26℃, direk fırında 45℃, aralıklı fırınlamada 35, 50 ve 30 ℃ sıcaklıklarda kurutmuşlardır. En az lipid oksidasyonu, aralıklı fırında kurutmada, ardından doğrudan fırında kurutma ve güneşte kurutmada gözlenmiştir [7].

Hassan-Beygi vd. (2009), 4,5 kW ısıtıcı ile sıcak havanın sağlandığı konvektif kurutucuda iki farklı sıcaklıkta (32 ve 43 ℃) ve hava hızlarında (1 ve 3 ms^{-1}) cevizleri kurutmuştur. Etkin difüzyon katsayısı değerleri $3{,}54 \times 10^{-7} – 9{,}92 \times 10^{-7}$ m^2s^{-1} arasında değişmiştir [8]. Chen vd. (2020), kademeli sıcaklıkta (43, 55, 65 ve 75 ℃) kurutmanın cevizin ürün kalitesi ve enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Yirmi iki kurutma koşulu arasında en iyi seçenek 65 ℃ (2 saat) ve 43℃ kurutma hava sıcaklıklarının kombinasyonudur. Böylelikle ceviz kurutmada %40 zaman tasarrufu ve %24 enerji tasarrufu sağlanmıştır. Sıcaklık arttıkça kahverengileşme reaksiyonu oluşmakta ve asit değerleri artmaktadır. Asit değerleri, yüksek sıcaklıktan 43℃'ye düşürülen deneylerde kabul edilebilir aralıkta çıkmıştır (yaklaşık %0,47). Sıcaklığın düşürülmesi ile kahverengileşme reaksiyonu engellenmiştir. Asit değerlerine bakıldığında yirmi iki deneyden sadece sekizinin 0,47'nin altında olduğu görülmüştür. Bunlardan dördü sadece 43℃ sıcaklıkta kurutma deneyleridir. Kısa süreli yüksek sıcaklıkta ısıtma, ağartma etkisine neden olmuş ve cevizde düşük sıcaklıkta kurutmaya göre daha az kızarmaya neden olmuş olabilir. Aynı zamanda, sıcaklığın düşürüldüğü kurutma koşulları ile sıcaklığın daha düşük sıcaklıkta bitmesine izin verilmiştir, böylece yüksek sıcaklığa bağlı kahverengileşme önlenmiştir. Test edilen tüm kurutma koşulları, kabul edilebilir ceviz iç canlılığı sağlamıştır (L> 40) [9]. Chen vd. (2020) 43, 55,

65 ve 75 ℃ sıcak hava sıcaklıklarında ceviz kabuğu ve çekirdeğin kuruma özelliklerini araştırmıştır. Cevizlerin kuruma süresi 10-20 saat arasında değişmiştir. Kabuk sıcaklıkları 41,9- 73,2 ℃ arasında değişirken, iç sıcaklıklar 40,4 – 70,2 ℃ arasında değişmiştir. Ortalama etkin nem yayılma değerleri ceviz kabuğu ve çekirdek için $1{,}51 \times 10^{-9} – 9{,}28 \times 10^{-9}$ m^2s^{-1} ve $1{,}13 \times 10^{-9} – 2{,}85 \times 10^{-9}$ m^2s^{-1} aralığında bulunmuştur [6]. Atungulu vd. (2013) IR enerjisi ile ön işlem uygulamış (2, 3 ve 4 dk.) ve ardından 43℃ kurutma hava sıcaklığı ile cevizleri kurutmuştur. Cevizin nem içeriği %43,3 ve %17,4'ten %8 $g_{su}/g_{yaşmadde}$ (yaş baz) miktarına düşürülmüştür. Cevizin 3-4 dakika IR ön kurutulması, 1-3 saatlik geleneksel düşük sıcaklıkta kurutmaya eşdeğerdir. Yaş ceviz için kurutmanın 24 saate kadar devam ettiği gözlemlenmiştir. Kurutma verimliliği ve ürün kalitesini incelemişlerdir. 1 ton cevizi kurutmak için 380 kWh (356,4 kWh doğal gaz ve 23,6 kWh elektrik) enerji harcanmıştır. Yüksek neme sahip ürünler 24 saatte %43,3'den %20'ye (yaş bazda), düşük nemli ürünler ise 24 saatte %17,4'ten %8'e (yaş bazda) düşürülmüştür [5]. Eğer yüksek nemli ürünler gereken son nem miktarına kadar kurutulsaydı, enerji tüketim miktarı daha yüksek çıkacaktı, çünkü kurumanın sonlarına doğru üründen nemi uzaklaştırmak zorlaştığı için en fazla enerji tüketimi bu aşamada gerçekleşmektedir.

Literatürde macadamia cevizi, antep fıstığı, yer fıstığı, badem ve fındık gibi kuruyemişlerin sıcak hava ile kurutulduğu çalışmalar az sayıdadır. Ancak infrared radyasyon (IR) enerjisinin sıcak hava ile kombine olarak kullanılması sadece birkaç çalışmada görülmüştür. Borompichaichartkul vd. (2009) 40-70 ℃ kurutma havası sıcaklığında ısı pompası ve sıcak hava kullanarak macadamia cevizi kurutmuşlardır. Kurutma iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşama ısı pompası (40℃), ikinci aşama sıcak hava (50-70 ℃) ile sağlanmaktadır. Kuruma süresi, ikinci aşama sıcaklıkları 50 ve 70℃ iken sırasıyla 52 ve 15 saattir [10]. Kashaninejad vd. (2007) dört farklı hava sıcaklığında (25, 40, 55 ve 70℃), üç farklı hava hızında (0,5, 1,0 ve 1,5 m/s) ve iki farklı bağıl nem değerlerinde (%5 ve %20 RH) sıcak hava kullanarak antep fıstığı kurutmuşlardır. Tüm koşullar için kuruma süresi 192,31 dk. ve 2092 dk. arasında değişmektedir. 40℃ kurutma havası sıcaklığında kuruma süresi 600-928 dk. arasında değişmektedir. Etkili yayınım değerleri $5{,}42 \times 10^{-11}$-$9{,}29 \times 10^{-10}$ m^2/s arasında değişmektedir [11]. Rafiee vd. (2007) antep fıstıklarını hava iklimlendirme ünitesi kullanarak 55 ve 70℃ hava sıcaklığında ve 1,5 m/s hava hızında, sırasıyla 1660 ve 640 dakikada kurutmuşlardır [12]. Turan ve Karaosmanoğlu (2019) fındığı 45℃ hava sıcaklığında bir kurutma makinesinde 23 saatte ve 22,1 °C hava sıcaklığı ve %69,8 bağıl nemde güneşin altında 39 saatte kurutmuşlardır [13]. Ceylan ve Aktaş (2008) fındığı bir ısı pompalı kurutucuda 40℃-

0,38 m/s, 45°C- 0,32 m/s ve 50°C-0,25 m/s hava şartlarında kurutmuşlardır. Isıtma sisteminin performans katsayı değerleri sırasıyla 40, 45 ve 50°C hava sıcaklığında 1,40, 1,58 ve 1,70 olarak hesaplanmıştır [14].

Goneli vd. (2017) yerfıstığını 40°C-%19 RH, 50°C-%12 RH, 60°C-%7 RH ve 70°C-%6 RH hava şartlarında zorlanmış konveksiyonla kurutmuşlardır. Kuruma süresi 40, 50, 60 ve 70°C hava sıcaklıklarında sırasıyla 26,8, 15,8, 10,0 ve 7,2 saattir. Etkin yayınım değerleri $1,1831x10^{-10}$ (40°C) ve $3,3502 x10^{-10}$ m^2/s (70°C) arasında değişmektedir [15]. Venkitasamy vd. (2017) 60, 65 ve 70°C kurutma havası sıcaklığında, infrared radyasyon (IR) enerjisi, sıcak hava (HA) ve ardışık IR enerji ve sıcak hava (SIRHA) kullanarak Antep fıstığı kurutmuşlardır. IR ve SIRHA ile 70°C ürün sıcaklığında antep fıstığının kurutulması, HA ile kurutmaya kıyasla, kuruma sürelerini sırasıyla % 34,4 (105 dk.) ve %9,1 (40 dk.) oranında kısalttığı görülmüştür [16]. Venkitasamy vd. (2018) 70°C hava sıcaklığı, 0,2 m/s hava hızında IR, sıcak hava (HA) ve art arda IR ve HA (SIRHA) ile badem kurutmuşlardır. SIRHA kurutmada istenen nem içeriğine 3 saatte ulaşılmış ve HA ile karşılaştırıldığında %40 zaman tasarrufu sağlanmıştır [17].

2.2. Gıda Analizi

Kurutulmuş cevizin kalitesi ile ilgili çalışmalar Fu vd. (2016), Qu vd. (2016) ve Atungulu vd. (2013) tarafından yapılmıştır [5,7,18]. Ceviz ve ceviz yan ürünleri ile ilgili diğer çalışmalar; ceviz yağının antikarsinojenik etkisi [19], ceviz yağının oksidasyona karşı korunması [20] ve ceviz yan ürünlerinin ekstrakt hazırlanmasında kullanımı (antikanser, antiplatelet, doğal boya, antioksidan, antifungal, antimikrobiyal) [21] ve tehlikeli malzeme kaldırmada kullanımı şeklindedir [21,22].

Fu vd. (2016) ve Qu vd. (2016)'nin aralıklı fırın kurutma metodunda kurutulan cevizler, direkt fırın kurutmaya göre daha fazla linoleik asit içermektedir. Aralıklı fırın kurutmaya maruz kalan ceviz numuneleri en düşük lipid oksidasyon değerlerine (asit değeri-AV, peroksit değeri-POV, sabunlaşma değeri-SV) sahiptir, bunu sırasıyla direkt kurutma ve güneşte kurutma takip eder. Kurutma prosedürü sırasında lipoksijenaz (LOX) aktiviteleri artmıştır ve güneşte kurutulan örneklerinki en düşük çıkmıştır ve iki fırında kurutma yöntemi arasında önemli bir fark yoktur ($p> 0,05$). Antioksidan aktivite ile toplam fenol içeriği ve toplam flavonoid içeriği arasında önemli bir ilişki bulunmuştur [7,18]. Atungulu vd. (2013),

raf ömrü çalışmaları için cevizin peroksit değeri ve yüzey rengini araştırmış ve IR ön kurutmanın ceviz kuruma oranını geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca cevizlerin düşük sıcaklıkta havada kurutulmasından önce IR ön işlem süresinin 3 dakika olması tavsiye edilmiştir [5].

Turan ve Karaosmanoğlu (2019), depolama sırasında protein, lipid, nem içerikleri, su aktivitesi, serbest yağ asitleri (FFA), peroksit değeri (PV), acılaşma değeri (RV) ve aflatoksin miktarındaki fındık kalite özelliklerini araştırmıştır. En düşük FFA (%0,35 oleik asit) beton zemin (CG) için kaydedilmiş ve en düşük PV (0,35 $m_{eq}O_2$ kg^{-1}) çim zemin (GG) için kaydedilmiştir. Ek olarak, kurutma makinesi (DM) yöntemi, CG ve GG ile kurutulanlardan çok daha fazla RV (3,87 saat) içermektedir. 24 aylık depolamadan sonra, çekirdek FFA (%0,38 oleik asit) ve RV (3,59 saat), depolamadan sonra kabul edilebilir sınır değerlerinden (sırasıyla %0,40 ve 3 saat) daha düşük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, kabuklu fındıklar, kimyasal özelliklerinde önemli bir değişiklik olmaksızın 24 ay oda sıcaklığında saklanabilmektedir. Genel olarak, DM'nin, fındık kurutma için umut verici bir strateji gibi göründüğü sonucuna varılmıştır [13].

Venkitasamy vd. (2017) çiğ antep fıstığının nem içeriğini kurutarak %38,14'ten (yaş bazda) %9'a düşürmüş ve HA, IR ve SIRHA'yı karşılaştırmıştır. Bu SIRHA yöntemi ayrıca E. faecium hücre popülasyonunu antep fıstığının içinde 6,1 log CFU / g ve kabuğunda 5.41-log CFU / g kadar azaltmıştır. SIRHA ile kurutulmuş antep fıstığının serbest yağ asidi içerikleri, sıcak hava ile kurutulmuş numunelerinkine eşittir. 70°C'de sıcak havayla kurutmaya kıyasla SIRHA yöntemiyle kurutulmuş fıstık tanelerinin peroksit değerlerindeki (PV) önemli farklılıklara rağmen, PV, yemeklik yağlar için izin verilen 5 M_{eq}/kg sınırının içindedir. Antep fıstığının aynı anda kurutulması ve dekontaminasyonun sağlanmasında SIRHA kurutmanın etkinliğini göstermişler [16].

Yu vd. (2020) havuç küplerinin kurutulmasında enerji ve ekserji verimliliklerini artırmak için RH kontrollü kurutma stratejisi önermişlerdir. Yüksek bağıl nemli hava (%40) ile kurutma sırasında enerji ve ekserji verimleri, düşük bağıl nemli hava (%4) ile kurutmaya göre sırasıyla 1,67 ve 2 kat arttığı bulunmuştur. Yüksek bağıl nemli hava ile kurutma sırasında (%40) ortalama ekserji yıkımı ve tersinmezliğin ekserji yıkımı değerleri, düşük bağıl nemdeki havayla (%4) kurutmaya göre sırasıyla %88 ve %34 azalmıştır [23]. Kashaninejad vd. (2007) bağıl nemin %5'ten %20'ye çıkarılmasının antep fıstıklarının

kuruma hızı üzerinde hiçbir etkisi olmadığı sonucuna varmıştır. Bağıl nemin (incelenen aralık dahilinde) numunelerin kuruma hızı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ancak kurutma havası sıcaklığı ve hava hızının fıstıkların kurutulmasında önemli faktörler olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Antep fıstığının kurutulmasında en önemli faktör kurutma havası sıcaklığıdır. Daha yüksek kurutma hava sıcaklığı, daha kısa kuruma süresi ile sonuçlanmıştır. Antep fıstığının kuruması azalan hız döneminde gerçekleşmiştir [11].

2.3. Kombine İnfrared Konvektif Kurutma Sistemleri

Gıda kurutma için sıcak hava, ısı pompası ve infrared teknolojileri uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıcak hava ve infrared teknolojisi mantar dilimleri [24,25], kuşburnu çiçeği [26], patates ve havuç [27], meyve kabuğu [28], elma dilimleri [29], biyokütle [30], arpa [31], ve yeşil biber [32] kurutulmasında kombine olarak kullanılmıştır.

Motevali vd. (2011) mantar dilimlerini 40, 50 ve 60°C hava sıcaklıklarında, 0,5, 0,7 ve 1,0 m/s hava hızlarında ve 22, 31 ve 49 W/cm^2 IR ısı akısı değerlerinde IR, HA ve kombine IR-HA metotları ile kurutmuşlardır. Kurutma süreleri, konvektif kurutma için 165-379 dakika, IR kurutma için 74-172 dakika, kombine HA-IR kurutma için 42-113 dakika arasında olduğu gözlenmiştir. HA-IR kurutma ile HA kurutmaya göre özgül enerji tüketim değerleri % 24-77 arasında azaltılmıştır [24].

Hebbar vd. (2004) patates ve havuç dilimlerini IR, HA ve kombine IR-HA kullanarak kurutmuşlardır. IR 80°C ürün yüzey sıcaklığına göre kontrol edilmiştir ve IR lamba gücü 17 kW'dır. Sadece sıcak hava kurutmada hava şartları 80°C ve 1 m/s'dir. Kombine IR-HA'da hava şartları 40°C-1 m/s'dir. Kuruma süreleri HA için 345 dakika, IR için 285 dakika ve kombine IR-HA için 180 dakikadır. Kombine IR-HA ile kurutma süresi ve enerji tüketimi, HA'ya kıyasla sırasıyla %48 ve %63 oranında azalmıştır [27].

Jaturonglumlert ve Kiatsiriroat (2010) meyve kabuğunu HA ve kombine sıcak hava (HA) ve uzak infrared radyasyon (FIR) ile kurutmuşlardır. Hava sıcaklığı 70°C, hava hızı 1,0 m/s ve IR güç yoğunluğu 1,90, 3,03 ve 4,20 kW/m^2 olarak seçilmiştir. Kuruma sürelerinin HA için 750 dk., kombine HA-FIR için radyasyon yoğunluğuna göre 520 dk. (1,90 kW/m^2), 440 dk. (3,03 kW/m^2) ve 400 dk. (4,20 kW/m^2) olarak değiştiği görülmüştür [28]. El-mesery ve Mwithiga (2015) elma dilimlerini HA, IR - soğuk hava (IR-CA) ve IR – sıcak hava (IR-HA)

metotlarını kullanarak kurutmuştur. Hava şartları soğuk hava (CA) için 30°C-0,6m/s, sıcak hava (HA) için 60°C-0,6 m/s, IR ısı akısı 2000 W/m^2'dir. Kuruma süresi IR-HA ile IR-CA ve HA'ya göre sırasıyla %39,1 ve %57,5 oranında azalmıştır. IR-HA kurutmada özgül enerji tüketimi değerinin HA'dan %83 daha düşük olduğu bulunmuştur [29].

Afzal vd. (1999) HA ve FIR-HA ile arpa kurutmuşlardır. IR için hava sıcaklığı 30℃, IR güç yoğunluğu 0,167, 0,333, 0,500 W/cm^2, HA için hava sıcaklığı 40, 55 ve 70℃, hava hızı 0,3, 0,5 ve 0,7 m/s. HA ve FIR-HA için kuruma süreleri sırasıyla 1,30-5,60 saat ve 0,40-2,83 saat arasında değişmiştir. FIR-HA ile enerji tüketimi, 40℃ HA ile karşılaştırıldığında sırasıyla 0,167, 0,333 ve 0,500 W/cm^2 radyasyon yoğunluklarında %61, %74 ve %78 oranında azalmıştır. İnfrared ısı akısının arttırılması, FIR-HA'da kuruma süresini ve enerji tüketimini azaltmıştır [31].

Łechtańska vd. (2015) yeşil biberi HA ve IR-HA ile kurutmuşlardır. Sistemde hava sıcaklığı 65 ℃ ve hava hızı 1,8 m/s ve IR lamba gücü 240 W'dır. IR-HA ve HA'nın enerji tüketimi sırasıyla 6,9 ve 6,5 kWh'dir. IR-HA ile kuruma süresi ve enerji tüketimi HA kurutmaya kıyasla sırasıyla %38 azalmış ve %6 arttığı gözlenmiştir [32].

3. CEVİZ VE CEVİZİN ÖZELLİKLERİ

3.1. Ceviz

Ceviz ağacının (Juglans regia L.) yeşil dış kabuğu çıkartılmış sert kabuklu meyvesi kabuklu ceviz olarak adlandırılmaktadır. Kuru kabuklu ceviz kütlece nem oranı %12'yi geçmeyen, iç kısımda %8'i geçmeyen, normal depolama şartlarında uzun süre depolanabilen ceviz olarak tanımlanmıştır [33].

Yerli ceviz çeşitleri Bilecik, Şebin, Gültekin 1, Yalova 1, Yalova 3, Yalova 4, Şen 2, Tokat 1, Kaman 1, Kaplan 86, Yavuz 1, Tokat 1 ve Şen 1'dir. Bilecik cevizi içi dolgun ve ince kabuklu olduğu için kabuktan kolay ayrılır. Tane ağırlığı 13 gr, meyve boyu 38 mm, iç ağırlık 6,5 gr, iç oranı %53, yağ oranı %68 ve protein oranı %18'dir. Eylül ayı sonlarında hasat edilir [34]. Bakkalbaşı vd. (2010) yaptıkları çalışmada 2004 yılı ve 2005 yılı hasatlarının ürün ağırlığı sırasıyla 13,30 gr ve 9,48 gr'dır. Kimyasal (protein, ham selüloz ve kül) ve fiziksel (meyve ağırlığı ve iç ağırlığı) özelliklerinde de yıllara göre belirgin farklar vardır [35].

3.2. Cevizin Fiziksel ve Kimyasal Bileşimi

Ceviz, insan sağlığına olumlu etkiler sağlayan besinler içerdiğinden insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Cevizin kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Muradoğlu vd. (2010), Bitlis bölgesinden 18 farklı cevizin genotipinin kimyasal ve mineral içeriklerini araştırmışlardır. Cevizlerin toplam kül içeriği %1,5 ± 0,21- 2,8 ± 0,22 aralığında, protein içeriği %12,8 ± 0,20- 22,3 ± 1,29 arasında, toplam yağ içeriği %49,8 ± 1,22 ile 66,1 ± 1,38 aralığında değişmektedir. Tüm genotiplerde baskın yağ asidi linoleik asittir (%50,58 - 66,60), bunu oleik asit (%14,88 – 28,71) ve linolenik asit (%9,16 - 16,42) takip etmektedir. Cevizin makrobesin içeriği potasyum, fosfor, kalsiyum, magnezyum ve sodyum şeklindedir. Cevizin mikrobesin içeriği demir, bakır, manganez ve çinkodur. İç cevizdeki potasyum içeriği diğer tüm minerallerden daha yüksek bulunmuştur. Cevizin içeriğindeki doymamış yağ asitlerinin minimum ve maksimum değer aralıkları; palmitoleik asit %0,14 ± 0,01 ve 1,69 ± 0,02, oleik asit %14,88 ± 0,50 ve 28,71 ±0,26, gadoleik asit %0,00 ± 0,00 ve 0,16 ± 0,01, linoleik asit %50,58 ± 1,60 ve 66,60 ± 1,35 ve

linolenik asit %9,16 ± 0,01 ve 16,42 ± 0,03 şeklindedir. İç cevizdeki doymuş yağ asitleri, miristik asit (%0,04 ± 0,01- 0,66 ± 0,02), palmitik asit (%3,79 ± 0,35- 5,98 ± 0,18), stearik asit (%1,46 ± 0,14- 2,63 ± 0,18) ve araşit asittir (%0,07 ± 0,00- 0,31 ± 0,03) [36]. Bakkalbaşı vd. (2010) ülkemizde yetiştirilen yedi farklı ceviz örneğinin bazı fiziksel ve kimyasal bileşenlerini iki yılın hasatlarıyla (2004-2005) belirlemişlerdir. Yalova 1, Yalova 3, Yalova 4, Şebin, Bilecik, Şen1 çeşitleri ve Kaman 5 tipi cevizleri incelemişlerdir. Yedi farklı ceviz tipinin kimyasal bileşim ögelerinden kül ve yağ değerleri sırasıyla %1,57-1,94 ve %61,41-72,56 arasında değişmektedir. Çoklu doymamış yağ asidi oranı %61,83-75,32 arasında değişmiştir. Parlaklık göstergesi olan L değerlerinin 39,41 ve 47,63 arasında, kırmızı renk göstergesi olan +a değerlerinin 0,84 ile 1,77 arasında, sarı renk göstergesi olan +b değerlerinin 10,16 ile 12,79 arasında değiştiği sonucuna varmışlardır. Renk değerleri Hunter Lab ile ölçülmüştür. L ve +b değerlerinin cevizde yüksek olmasının ve +a değerlerinin düşük olmasının doğru olacağı sonucuna varmışlardır [35].

Cevizin farklı türde önemli besin bileşenleri olmasına rağmen, en önemli besin içeriği yağlardır. Kuruyemişler, yaklaşık olarak %50-74 oranında yağ içermektedir ve oleik ve linoleik asit içeriği %75'den fazla bir paya sahipken, toplam yağ asitleri ve linolenik asit yaklaşık %15'ini oluşturmaktadır. Doymuş yağ asidi seviyesi tüm kuruyemişlerde yaklaşık %10'dur [37]. Ceviz, yüksek yağ miktarından ziyade yağ asidi bileşimleri nedeniyle çok önemli bir besindir. Ceviz yağı, oleik, linoleik ve linolenik asit gibi temel yağ asitlerini içermektedir. Zwarts vd. (1999) on farklı ceviz türünü (Avrupa, Amerika ve Yeni Zelanda türlerini) incelemiştir, ceviz yağını soğuk sıkım elde etmiştir. Cevizin toplam yağ içeriği %62,4 ile 68,7 arasında değişmektedir. Linoleik asit içeriği %49,3 ile 62,3 arasında, linolenik asit içeriği %8 ile 13,8 arasında değişirken, yağın oleik asit içeriği toplam yağ asitlerinin %14,3 - 26,1'ine tekabül etmektedir [38]. Bada vd. (2010), İspanya Asturias'da farklı coğrafi bölgelerden toplanan on beş farklı ceviz örneği üzerinde çalışmıştır. Yağ asitleri kapiler gaz kromatografisi ile belirlenmiş olup palmitik asit %6,11–7,49, oleik asit %11,70–18,90, linoleik asit %59,81–64,77 ve linolenik asit %11,11–15,65'e karşılık geldiğini bulmuşlardır [39].

Li vd. (2007), üç çeşit Japon cevizi ve iki çeşit İran cevizinin yağ asitleri ve tokoferol (e vitamini içeren yağ) bileşimlerini incelemiş ve birbirleriyle karşılaştırmıştır. Japon cevizleri İran cevizlerine göre daha yüksek linoleik ve daha düşük linolenik asit içeriğine sahiptir [40]. Cevizlerin yağ içeriği ve yağ asidi bileşimi olarak adlandırılan kimyasal bileşiminin

önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Bu durum bitki çeşidine, yetiştirme yerine ve sulama gibi diğer tarım değişkenlerine bağlıdır [39–43].

3.3. Cevizin Antioksidan ve Fenolik Bileşimleri

Faydalı yağ asitleri içeriği ve yüksek antioksidan kapasitesinden dolayı cevize olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Ceviz, ceviz reçeli, ceviz ezmesi, ceviz şekeri, ceviz salamura ve kurutulmuş olarak farklı şekillerde tüketilmektedir. Ayrıca Türk mutfağında pasta ve yemeklerde de yer almaktadır [44]. Ceviz, oksidasyona duyarlı olan linoleik ve oleik asit gibi doymamış yağ asitlerinden oluşan bir yağ açısından zengindir.

Toplam fenolik madde içeriği (TFC), ekstraktın gramı başına miligram gallik asit eşdeğeri (GAE) olarak ifade edilir. İç cevizin toplam fenolik madde içeriğini Arranz vd. (2008) [45], 1071 ± 35 mg GAE/100 $g_{\text{kuru ağırlık}}$, Arcan vd., (2009) [46] 175±17 mg GAE/100 $g_{\text{kuru ağırlık}}$, Li vd. (2006) [47] 10,42 mg GAE/g_{numune} olarak bulmuşlardır. Esen (2013) iç cevizin toplam fenolik madde içeriğini 44,2 ± 2,0 mg GAE/$g_{\text{kuru ağırlık}}$ olarak bulmuşlardır [48].

Toplam antioksidan kapasitesi, tüm testler için örneğin kuru ağırlığının gramı başına mg Trolox eşdeğeri (TE) olarak ifade edilmiştir. Esen (2013) iç cevizin toplam antioksidan kapasitelerinden DPPH ve ABTS değerlerini sırasıyla 101,9 ± 7,0 ve 113,3 ± 2,6 mg TE/$g_{\text{kuru ağırlık}}$ olarak hesaplamıştır [48]. Arranz vd., (2008) [45] yaptıkları çalışmada iç cevizin DPPH ve ABTS değerlerini sırasıyla 14,31 ± 0,07 $g_{\text{kuru ağırlık}}$ /g DPPH ve 153,85 ± 16,23 µmol TE/$g_{\text{kuru ağırlık}}$ ve Arcan vd., (2009) [46] iç cevizin ABTS değerini 2555±196 µmol TE/100 $g_{\text{kuru ağırlık}}$ olarak hesaplamışlardır.

3.4. Cevizin İnsan Sağlığına Etkileri

Ceviz tüketimi, düşük yoğunluklu lipoproteini (LDL) düşürür, aritmiyi azaltır, nörolojik korunma sağlar, tümör büyümesini yavaşlatır, insülin duyarlılığını arttırır, kan basıncını azaltır, vazoreaktiviteyi arttırır, oksidasyonu ve inflamasyonu azaltır. Sonuç olarak, kronik hastalıkların ve ölümlerin azaltılmasında ceviz tüketimi büyük katkı sağlamaktadır [49]. Ek olarak ceviz tüketimi, kardiyovasküler hastalık riskini, koroner kalp hastalığı riskini azaltır, tip 2 diyabet tedavisinde, belirli kanserlerin önlenmesinde ve tedavisinde, yaşlanma ve diğer nörolojik bozukluklardan kaynaklanan semptomların azaltılmasında önemli bir yere sahiptir

[50]. Cevizin, diğer kabuklu kuruyemişlere göre daha yüksek toplam doymamış yağ asidi oranına sahip olması bir diğer deyişle yağ asidi profili sebebiyle ceviz tüketiminin sağlığa faydalı olduğu sonucuna varılmıştır [50].

4. KURUTMA

Kurutma, gıda, tarım, tekstil, ilaç, kimya ve seramik endüstrilerindeki bazı proseslerde kullanılan en temel ve eski işlemlerden birisidir. Kurutma prosesi, aynı zamanda birleşik ısı ve kütle taşınmasını içeren karmaşık bir prosestir. Kurutma, üründen fazla nemin uzaklaştırılması işlemidir. Gıda maddelerinde suyun sıcaklığı, konsantrasyonu ve hareketliliği, ürünün bozulmasına sebep olan işlemlerin birçoğuna sebep olmaktadır. Bu nedenle, ürünün bozulmasını engellemek, taşıma ve depolama maliyetlerini azaltmak amacıyla kurutma yapılmaktadır [51].

Mevsimsel ürünlerin, tüm sene boyunca tüketilebilmesi, ürünlerin yetişmediği bölgelere ticaretinin yapılabilmesi, ihtiyaç fazlası ürünlerin geri kazanılması amacıyla insanlığın varoluşundan bu yana kurutma yapılmaktadır. Böylece iklim şartları ve toprağın elverişsiz olduğu bölgelere yiyecek çeşitliliği sağlanmakta, gıda israfı engellenmekte, gıda kalitesi depolama ve taşıma sırasında korunmaktadır. Gıda kalitesi, kurutma işleminin tipi, durumu, süresi ve belirli gıda maddelerinin hassasiyetine bağlı olarak değişmektedir. Kurutma süresince ürün genellikle oda sıcaklığının üzerinde ancak sterilizasyon sıcaklığının altındadır. Sıcaklığa duyarlı gıda maddelerinin, ısıya maruz kalma süresi ve ısının miktarı gıda kalitesini etkilemektedir. Ayrıca, çabuk bozulan gıda malzemeleri düşük bağıl nemde ve düşük depolama sıcaklıklarında daha kararlıdır [52]. Bu nedenle kurutma, meyve, sebze ve tahıl gibi çabuk bozulan gıdaları stabilize ürünlere dönüştürmek, hasat sonrası kayıpları azaltmak, depolama ve raf ömrünü uzatmak ve kaliteyi arttırmak amacıyla yapılmaktadır [51].

4.1. Kurutma İçin Kontrol Faktörleri

Gıdada bulunan su, haline göre (sıvı ve/veya buhar) bağlı veya bağlanmamış (serbest) su olarak sınıflandırılır. Bağlı su, katının içerisinde sıvı bir çözelti olarak bulunmaktadır veya katının mikro yapısında hapsolmuş suya karşılık gelmektedir. Gözenekli bir malzemedeki bağlanmamış su, fazla olan sudur [51]. Kurutmada iki ayrı olay söz konusudur. Birincisi, nem, bir malzemenin iç kısmından o malzemenin yüzeyine taşınmalıdır. İkincisi, yüzey suyu buharlaştırılarak havaya karışmalıdır. Bu iki adım, çok farklı iki durum içerir. Suyun iç kısımdan yüzeye hareketi kılcal etki veya difüzyon yöntemlerinden biriyle gerçekleşmelidir.

Kılcal etki ile hareket, yalnızca kurutmanın erken aşamalarında meydana gelir. Kurutma işlemi devam ederken, malzeme içindeki su buharının moleküler difüzyonu ile dahili nem hareketi meydana gelir. Suyun yüzeyden çevreleyen havaya buharlaşması ile su yüzeyden uzaklaştırılır. Buharlaşma hızı, kurutma havasının durumuna ve yüzeydeki su konsantrasyonuna bağlıdır [53].

Hava ile kurutma, havanın kurutulacak nesne (ler) üzerinden geçirilmesini içerir. Tipik olarak hava, kurutma bölgesine girmeden önce ısıtılır. Elma dilimi gibi yüksek nemli bir ürün için kurutma işlemini düşünün. Dilimin yüzeyi, dilimlemeden hemen sonra gözle görülür şekilde su ile kaplanacaktır. Bu su buharlaştıkça yüzey biraz kurur. Nem, yüzeyde buharlaşabileceği kadar hızlı bir şekilde dilimin iç kısmından hareket edemez. Bu nedenle, kurutmanın sonraki aşamalarında geçerli olan faktör, dilim içindeki nemin difüzyon hızıdır [53].

Kurutma hızını etkileyen faktörler, kullanılan kurutma sisteminin türüne bağlı olarak biraz değişiklik gösterecektir. Bununla birlikte, genel olarak malzemenin doğası (fiziksel ve kimyasal bileşim, nem içeriği, vb.), kurutulacak parçaların boyutu, şekli ve düzeni, bağıl nem veya havadaki kısmi su buharı basıncı, hava sıcaklığı ve hava hızı gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Katı malzemelerin kurutulmasında dikkat edilmesi gereken bir diğer faktör ise yüzey sertleştirmedir. Kurutmanın ilk aşaması düşük bağıl nem ve yüksek sıcaklıkta meydana gelirse bu sorun ortaya çıkabilir. Bu koşullar altında malzeme yüzeyinden nem, malzemenin içinden yayılabileceğinden çok daha hızlı çıkarılır. Sonuç, malzemenin yüzeyinde sertleştirilmiş nispeten geçirimsiz bir tabakanın oluşmasıdır. Böyle bir tabakanın oluşumu, sonraki kurutmanın çok daha yavaş olmasına neden olur [53].

4.2. Kurutma Teorisi

Kurutma uygulamaları çoğunlukla ısıl yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ancak enerji verimliliğinin arttırılması amacıyla, kurutma öncesinde ya da kurutma işleminin tamamında farklı yöntemler uygulanmaktadır. Kurutmada kullanılan ısı transfer mekanizmaları iletim, taşınım ve ışınımdır. Bu ısı transfer mekanizmalarının kombinasyonu şeklinde de uygulamalar mevcuttur. Geleneksel kurutuculardа ısı maddenin yüzeyinden içeriye doğrudur. Ancak, dielektrik, mikrodalga ve infrared teknolojilerinde ısı akısı

maddenin içinden yüzeyine doğrudur. Her iki teknolojide de kurutmanın devam etmesi için kütle transferinin yönünün maddenin içinden yüzeyine doğru olması gerekmektedir.

Kurutmada gıda kalitesi

Toplam maliyet ve ürün kalitesi kurutma işleminin optimizasyonunda önemli parametrelerdir. Gıda maddelerinin kurutulmasındaki hedefler şu şekildedir [54];

- Stabilitenin (kararlılığın) arttırılması.
- Kontaminasyon olmayan ürün, minimum kimyasal ve biyokimyasal bozunma ve minimum ürün kaybı
- Ürünün kabul edilebilir koku, tat, renk ve yapıda olması, besin değerlerinin korunması,
- Hızlı ve kolay rehidrasyon, basit paketleme ve saklama gereksinimleri.
- Yüksek ısı kütle transfer katsayısı, ucuz enerji kaynağı kullanımı, düşük çevresel etki, basit kurutma ekipmanı ve kolay kullanım.
- Hacmin veya ağırlığın azaltılarak depolama ve taşıma maliyetlerinin azaltılması.

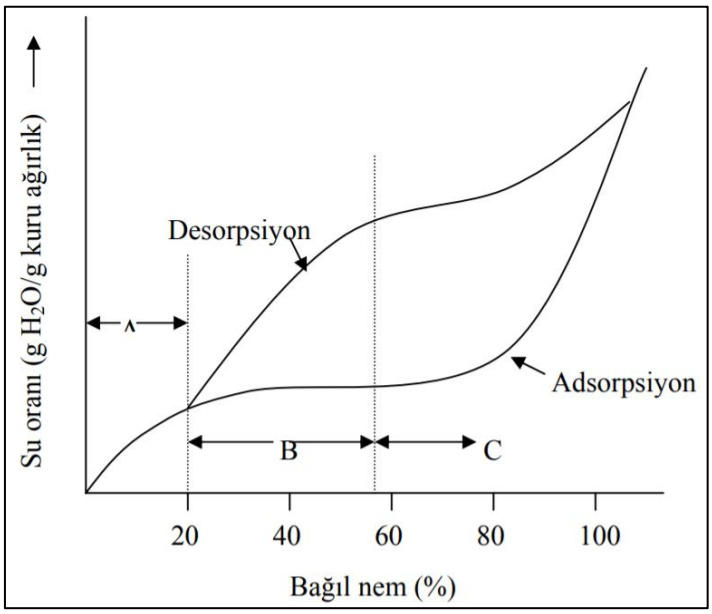
Katı içindeki nemin taşınması, aşağıdaki kütle aktarım mekanizmalarından herhangi biri veya daha fazlasıyla gerçekleşebilir [55]:

- Sıvı difüzyonu, nemli katı, sıvının kaynama noktasının altındaki bir sıcaklıkta ise,
- Buhar difüzyonu, sıvı malzeme içinde buharlaşırsa,
- Knudsen difüzyonu, eğer kurutma çok düşük sıcaklık ve basınç değerlerinde gerçekleşirse (örneğin dondurarak kurutmada)
- Hidrostatik basınç farklılıkları, iç buharlaşma hızı katıdan çevreye buhar aktarım hızını aştığında.
- Yukarıdaki mekanizmaların kombinasyonu şeklinde [55].

Gıda maddeleri kuru madde ağırlıklarının birkaç katı nem tutma özelliğine sahip higroskopik maddeler olup, kılcal-gözenekli yapıya sahiptirler (Soysal vd. 2009). Ürün içerisinde buharlaşma gizli ısısını alan su moleküllerinin üründen çevre havaya iletimi ile kuruma gerçekleşir. Kurutma işlemi esnasında ilk olarak serbest su daha sonra bağlı su buharlaştırılıp uzaklaştırılmaktadır. Kuruma hızı bağlı ve bağlı olmayan su moleküllerinin uzaklaştırılmasına bağlı olarak değişiklik göstermektedir, aynı şekilde suyun uzaklaştırılması için gereken enerji miktarı da farklıdır [56].

4.2.1. Kurutmanın statiği

Farklı bağıl nem içeren koşullarda ve belirli sıcaklık seviyelerinde tutularak dengeye erişmiş bir malzeme ile çevre havasının bağıl nemi arasındaki ilişkinin zamandan bağımsız olarak gösterildiği grafikler sorpsiyon izoterm eğrileri olarak adlandırılır. Kuru bir maddenin nem kazanarak dengeye ulaşması sonucu adsorpsiyon izotermi, nemli maddenin nem kaybederek dengeye ulaşması sonucu desorpsiyon izotermi elde edilir. Gıdaların genel sorpsiyon izotermi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Gıdaların genel sorpsiyon izotermi [57]

Sorpsiyon izotermlerinden, depolama koşullarının belirlenmesinde, gıda formülasyonlarında kuru bileşenlerin karıştırılmasında ve raf ömrü uzun ambalaj seçiminde yararlanılmaktadır. Ürünlerin kurutulma işleminin izlenmesi ve incelenmesinde desorpsiyon izoterminden, kurutulmuş ürünlerin higroskopik nitelikleri ile bunların depolanma koşullarının belirlenmesi için adsorpsiyon izoterminden faydalanılmaktadır.

Denge durumunda; ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ile havada bulunan su buharının kısmi basıncı birbirine eşittir. Malzemenin yüzey sıcaklığı, ortam havası yaş termometre sıcaklığına yakın bir değere sahip olduğundan, ürün yüzeyindeki suyun buhar basıncı ile havadaki su buharının kısmi basıncı eşit alınabilmektedir. Bu sebeple denge

durumunda malzemenin ulaştığı nem, çevre havasının bağıl nemine bir diğer deyişle kısmi buhar basıncına bağlıdır.

Nem İçeriği

Hiçbir tarımsal ürün doğada tamamen kuru değildir, her zaman bir miktar su bulundurur. Bu nem genellikle ürün için nem içeriği yüzdesi olarak belirlenir. Nem içeriğini belirlemek için kuru baz ve yaş baz olmak üzere iki metot kullanılmaktadır [53].

Kuru madde esasına göre ürün nemi (X_{kb}, kuru baz) üründeki nem miktarının, kuru madde miktarına oranıdır:

$$X_{kb} = \frac{m_{top} - m_{kuru\ kütle}}{m_{kuru\ kütle}} \quad (4.1)$$

Yaş madde esasına göre ürün nemi (X_{yb}, yaş baz) üründeki nem miktarının, ürünün toplam kütlesine oranıdır:

$$X_{yb} = \frac{m_{top} - m_{kuru\ kütle}}{m_{top}} \quad (4.2)$$

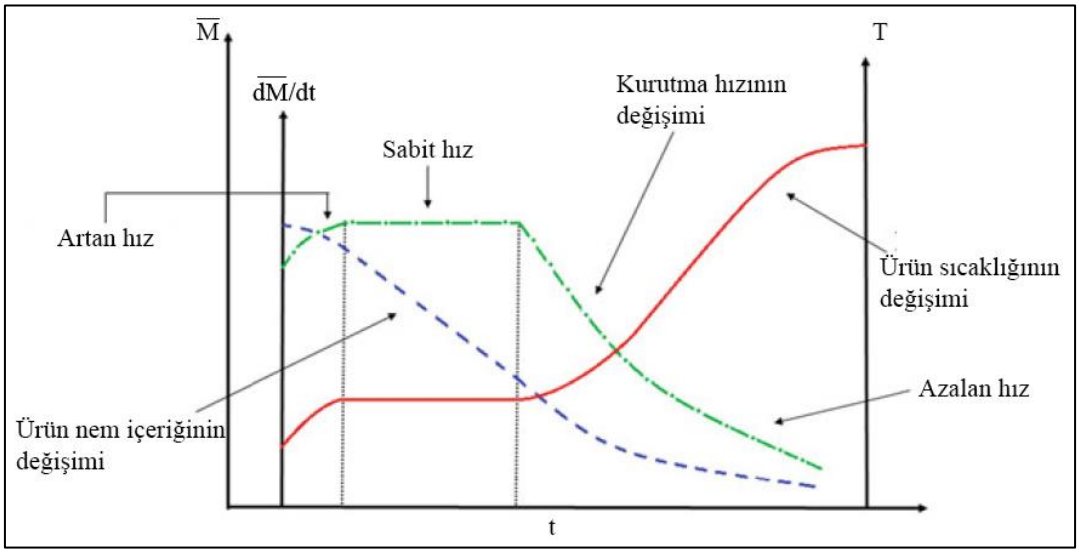
Denge nem içeriği

Sabit bir bağıl nemde ve sıcaklıkta uzun süre tutulan malzeme ve çevre ortam arasında bir dengede olan bir nem içeriğine ulaşılmaktadır. Bu durum, havanın ve malzemenin aynı nem içeriğine sahip olduğu anlamına gelmemektedir. Sadece hava ve malzeme arasında bir dengeye ulaşıldığı için artık nem alışverişi olmayacaktır. Bu denge nem içeriği, sıcaklığın, bağıl nemin ve ürünün bir fonksiyonudur [53].

4.2.2. Kurutmanın kinetiği

Katıların kurutma davranışları, kuruma hızı eğrileri kullanılarak anlaşılmaktadır. Katının kurutma esnasında nem içeriğindeki azalmanın zamana göre değişimi, kuruma hızı eğrilerini vermektedir. Higroskopik bir ürünün tipik kuruma hızı eğrisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Hasat sırasında tahılların sahip oldukları nem miktarı genellikle birinci kritik nokta (BKN)

değerinden daha azdır. Bu nedenle meyve ve sebze haricinde birçok tarım ürünün kurutulması sırasında, sabit kuruma evresine rastlanmaz.



Şekil 4.2. Kuruma hızı eğrisi, sıcaklık ve nem içeriğinin zamana göre değişimi [58]

Kılcal-gözenekli yapıya sahip bir biyolojik materyalden (tane, yaprak vb.) nem kaybı üç aşamada gerçekleşir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi ısınan ürünün sıcaklığı, kurutma ortamının sıcaklığı ile dengeye gelinceye kadar devam eder ve kuruma hızı bu evrede sürekli artar, evrenin sonunda en yüksek değerine ulaşır, sabit kuruma hızı evresi başlar. Isınma evresi genellikle çok kısa sürmektedir. Birinci kuruma evresinde, bir başka ifade ile sabit kuruma hızı evresinde, materyalin yüzeyi başlangıçta ince bir sıvı film tabaka ile kaplıdır. Buharlaşma materyalin yüzeyinde oluşan sıvı film tabakasıyla gerçekleşir. Nemin buharlaşması için kullanılan ısının tümü, suyun buharlaşma gizli ısısı olarak kullanılır. Materyali ısıtmaz, buharlaşma süresince sıcaklık sabit kalır. Materyalin özelliklerine bağlı olmayan bu buharlaşma tamamen dış hava koşullarınca belirlenmektedir. Nemin üründen uzaklaşma debisi, ürün içindeki veya üstündeki suyun buharlaşma debisiyle sınırlıdır. Bir başka ifadeyle, bu evre boyunca suyun materyal yüzeyine ulaşma iletim hızı ile yüzeyden buharlaşan suyun hızı birbirine eşittir. Buharlaşmanın olduğu yüzeye taşınan nem miktarı, materyalin yüzeyinden birim zamanda ayrılan nem miktarını karşılayabildiği sürece bu evre devam eder. Bu evre boyunca yüzeye taşınan nem miktarından dolayı materyalin iç kısımlarında nem miktarı giderek azalmaktadır ve buna bağlı olarak tabakalar arası konsantrasyon farkı azalır. Materyal içinde tabakalar arası konsantrasyon farkının azalması, bu etkene bağlı olarak hareket eden su miktarının azalmasına neden olur. Dolayısıyla yüzeye

taşınan nem miktarı, yüzeyden buharlaşan nem miktarını karşılayamaz. Bunun sonucunda, materyalin yüzeyinin tamamen serbest su ile kaplı olma durumu sona erer. Ortalama nem içeriği kritik nem içeriğine, X_{kr}, ulaştığında, yüzey nem filmi buharlaşma ile o kadar azalmıştır ki, daha fazla kuruma yüzey üzerinde kuru noktaların görünmesine neden olur [55]. Şekil 4.2'ye göre, Birinci Kuruma Evresi'nin sonu İkinci Kuruma Evresi (Azalan Hızla Kuruma Evresi)'nin başlangıcı birinci kritik nokta (BKN) olarak adlandırılır ve yüzeyde ilk kuru noktanın meydana geldiği andır. Kritik nem miktarına ulaştıktan sonra, kuruma işlemi azalan hızda devam eder. Materyal yüzeyindeki ıslak alan miktarı ile orantılı olarak azalma göstermektedir. Azalan hızın başladığı ikinci evrede, buharlaşmanın gerçekleştiği sınır tabakası yüzeyden iç kısımlara doğru ilerler. Bazı ürünlerde birden fazla azalan hızla kuruma periyodu gerçekleşebilir. Azalan hızla kuruma evresi (AHE) sırasında, kuruma hızı değişiminin doğrusallıktan sapmaya başladığı noktaya, ikinci kritik nokta (İKN) ve materyalin bu andaki nem değerine ise "ikinci kritik nem" adı verilmektedir. Üçüncü kuruma evresinde sadece çok küçük kılcal borularda var olan nemin buharlaşması gerçekleşir. Bu aşamada kuruma hızı giderek azalır ve denge konumuna ulaşır. Bu aşama, sıvının yüzey filmi tamamen buharlaşana kadar devam eder. Eğrinin bu kısmı bazı ürünlerde tamamen eksik olabilir veya tüm kurutma azalan hız periyodunda gerçekleşebilir. Kurutma denge nem içeriğine kadar devam eder, bu noktadan sonra nem alışverişi gerçekleşmez [55].

4.3. Su Aktivitesi

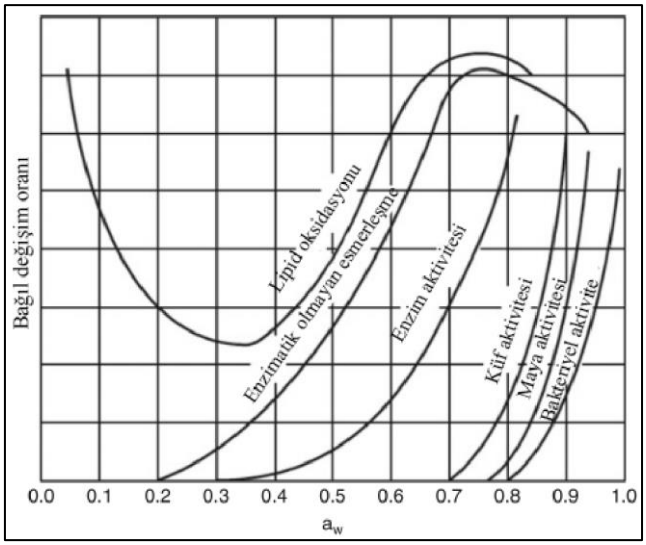
Kurutulmuş gıdalar, mikrobiyolojik aktivitenin olmadığı, kimyasal ve biyokimyasal bozulma reaksiyonlarının minimum olduğu bir su aktivitesi değerine sahip oldukları için uzun süre saklanabilirler.

Su aktivitesi (a_w), denge bağıl nemi olarak ölçülür. Su aktivitesi, a_w, aynı zamanda ürünün içindeki serbest suyun kısmı basıncının (P_i), diğer bir tabirle üründeki suyun buhar basıncının aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına (P_0) oranıdır. Bağıl nem dengesi (BND) Eşitlik (4.4) ile hesaplanmaktadır.

$$a_w = \frac{P_i}{P_0} \tag{4.3}$$

$$BND\ \% = a_w x\ 100 \tag{4.4}$$

Su aktivitesi ile gıda içinde bozulma reaksiyonları arasındaki ilişki Şekil 4.3'te gösterilmiştir. a_w değerinin 0,7'nin altına düşmesi mikrobiyolojik bozulmayı önler. Bununla birlikte, a_w = 0,7 değerinin altında mikrobiyal bozulma olmamasına rağmen, bir gıda ürününün kurutularak başarılı bir şekilde muhafaza edilebilmesi için a_w = 0,3'ün altına düşürülerek diğer bozulma reaksiyonlarının da önlenmesi gereklidir [59].



Şekil 4.3. Su aktivitesi ile gıdalardaki bozulma reaksiyonları arasındaki ilişki [59]

4.4. Kurutmada Enerji

Kurutma en fazla enerji harcanan işlemlerden birisidir ve endüstriyel enerji kullanımının önemli bir kısmını kapsamaktadır. Bu durum verimsiz bir kurutma prosesi kullanıldığında çok fazla enerjinin boşa harcandığını göstermektedir. Bu nedenle üründen birim miktar nem çekmek için tüketilen enerjinin azaltılması kurutma prosesinin iyileştirilmesiyle mümkündür ve farklı metodolojilerin incelenmesi gereklidir [60]. Ürünü tamamen kurutabilmek için genellikle çok fazla enerji gerekir. Bu nedenle, ürünlerin ne kadar kurutulacağı standartlar ile belirlenmiştir. Böylece enerji maliyetleri düşürülür ve işlem verimliliği artar [61].

Kurutmaya tabi tutulan ıslak, gözenekli bir katıda aynı anda üç işlem gerçekleşmektedir. Bunlar; katının yüzeyindeki suyu buharlaştırmak için çevreden ısıl enerji aktarımı, dahili (iç) suyun katının yüzeyine aktarılması ve buharlaşması, suyun ısıtılması ve buharlaşmasından sorumlu olan katının iç kısmına enerji aktarımıdır. Çevre ortamdan ıslak gözenekli katıya ısı aktarımı, iletim, taşınım ve ışınım olmak üzere üç ısı transfer mekanizmasının ayrı ayrı veya

kombinasyonlarının bir sonucu olarak meydana gelmektedir [61]. Farklı materyallerin kurutulmasında enerji tüketimi kullanılan teknolojiye bağlıdır. Kurutma için en yaygın ısı transfer modelleri:

- Malzeme ile temas eden sıcak gazdan taşınım veya vakum altında buharlaşma.
- Malzeme ile temas eden sıcak katı bir yüzeyden iletim.
- Bir sıcak gaz veya yüzeyden ışınım.
- Dielektrik, radyofrekans veya mikrodalga ısıtma ile malzemenin içinde ısı üretimi [62].

Son yıllarda, fosil yakıtların tükenme riskiyle karşı karşıya kalınması, enerjinin daha verimli kullanılmasını gerektirmektedir. Enerji, kurutma uygulaması ve ekipman teknolojisindeki değişiklikler için önemli bir yenilik unsuru haline gelmelidir. Enerji azaltma potansiyeli birkaç açıdan düşünülebilir, bunlardan en önemlileri;

- Metodolojik; genel yöntemlerin geliştirilerek tüketilen enerjinin azaltılması
- Teknolojik; ısı kayıplarının azaltılması ve ikincil enerji kaynaklarının kullanılması
- Sosyoekonomik; potansiyel enerji kaynakları arayışının teşvik edilmesi
- Organizasyonel; enerjinin ekonomik kullanımını amaçlayan süreçlerin koordinasyonu.
- Ekolojik; çevreye verilen zararı azaltmak için çözümlere odaklanmak [61].

Kurutucular, üretim proseslerinde kullanılan toplam enerjinin büyük bir kısmını tüketirler ve birçok endüstriyel proseste geniş uygulama alanına sahiptir. Bu nedenle günümüzde kurutucu maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı, kurutma proseslerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle kurutma sektörü için ürünün iyileştirilmesi ve enerji tüketiminin kabul edilebilir aralıkta olması için yeni teknolojiler geliştirilmelidir [61].

4.4.1. Kurutma ve kurutucunun enerji verimliliği

Küresel ölçekte en büyük enerji tüketicilerinden biri olan kurutucular, sera gazı (GHG) emisyonu üretimine önemli miktarda katkı sağlarlar. Sera gazı emisyonları genellikle CO_2 eşdeğer emisyonlarına dayalı olarak hesaplanır. Kurutma, genellikle %25-50 aralığında düşük termal verime sahip, endüstriyel enerji kullanımının büyük bir kısmını oluşturan enerji yoğun bir işlemdir [61]. Çeşitli araştırmalar, endüstriyel kurutma işlemlerinin ulusal enerji

tüketiminin Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Fransa ve İngiltere için %10 ila %15 arasında, Danimarka ve Almanya için %20 ila %25 arasında değiştiğini bildirmektedir [55].

Kemp (2005)'e göre kurutucuda enerji tüketimini minimize etmenin birkaç yolu vardır. Bunlar; toplam hava akış hızını ve ısı kayıplarını azaltarak kurutucu performansını arttırmak, ısı değiştiriciler ile kurutucu ve çevresi arasındaki enerjinin kullanılması, atık ısı geri kazanım sistemlerinin kullanılması, ısı gereksiniminin düşük kaliteli ve düşük maliyetli kaynaklardan karşılanması, kurutucularda kojenerasyon sistemlerinin kullanılması, atık ısıdan ısı pompası kullanılarak faydalanılması şeklindedir [63].

4.4.2. Isı geri kazanımı ve geliştirilmiş kurutma teknolojileri

Enerji, sürdürülebilir kalkınma ile çok yakından ilişkilidir. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için enerji kaynaklarının yerli ve yenilenebilir olması, kaynak çeşitliliğinin sağlanması ve arz-talep dengesinin dış politikalardan etkilenmemesinin sağlanması gerekmektedir. İklim değişikliği ve küresel çevre sorunları enerji kaynakları ile bağlantılıdır [61].

Endüstriyel uygulamalarda emisyonların ana kaynaklarından biri olan kurutma enerji tüketen bir prosestir. Kurutma havasının ısıtılması için fosil yakıtlar (propan, gazyağı, mazot ve doğalgaz), kömür, elektrik enerjisi, atık malzemeler gibi geleneksel ısı kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları (güneş ve biyogaz) kullanılmaktadır [64,65]. Fosil yakıtlar sınırlı rezervi sebebiyle gelecek vadeden bir kaynak değildir ve gün geçtikçe fiyatı artacaktır. Buna bağlı olarak kurutma maliyetleri ve toplam üretim maliyeti arasındaki oran giderek artacaktır. Bu nedenle enerji verimli kurutma sistemleri, kurutma sonrası ürün kalitesinin korunması ve hava kirliliği kontrolü ile ilgili eylemlerde kurutmadaki yenilikler önemli bir rol oynar [66–68]. Geleneksel bir kurutma ekipmanının enerji verimliliğindeki iyileştirmede; ısı pompası kullanılmalı, atık ısıdan faydalanılmalı, kabin yalıtımlı olmalı, kurutma zamanı kısaltılmalı ve farklı metotlar kombine kullanılmalı [64,69–71] ve aralıklı ısı uygulanmalıdır.

4.5. İnfrared Kurutma

İnfrared kurutmanın; ürünün üniform ısıtılması, ışınımın çevre havayı ısıtmadan direkt ürüne nüfuz etmesi, kontrol kolaylığı, ürünün nem profiline göre IR lambanın ayarlanabilmesi, farklı ürünler için ısıtma döngüsünün programlanması ve değiştirilmesi ve değişen koşullara uyarlanma kolaylığı, ürün bozulmasının çok düşük bir oranda gerçekleşmesi, büyük nesnelerin seçilmiş kısımlarını kurutmaya izin veren yön özellikleri, düşük maliyetli bir teknoloji olması, az yer kaplaması, önceden kurulmuş konvansiyonel kurutucuya uyum sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Elektrikli IR lambalar elektrik enerjisini yüksek verimle ısıl enerjiye çevirirler, IR kaynakları dielektrik ve mikrodalga kaynaklarına kıyasla ucuzdur, uzun servis ömrü vardır ve az bakım gerektirirler. Diğer bir taraftan bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar; ısıtıcıların ölçeklendirilmesi her zaman kolay değildir. Genellikle yüzey kurutmada kullanılırlar. Kalın malzemelerin kurutulmasında başarılı sonuçlarla bu teknolojiyi geliştirmek için büyük çaba sarf edilmektedir. Başarılı bir tasarım sağlamak için ekipman testleri gerçek bir tesiste yapılmalıdır. Olası yangın tehlikeleri işletim ve tasarımda göz önüne alınmalıdır [72].

4.5.1. İnfrared ışınımın teorisi

Elektromanyetik radyasyonun iletiminde bir ortama ihtiyaç duyulmaz. Radyasyonun dalga boyu spektrumu, ısı kaynağının niteliğine ve sıcaklığına bağlıdır. Her vücut ısı ürettiği için kendi sıcaklık seviyesi nedeniyle radyasyon yayar. Termal radyasyonun dalga boyu aralığı spektrum içinde 0.1–100 μm'dir [73]. IR radyasyonu bu kategoriye girer ve geleneksel olarak şu şekilde sınıflandırılır: yakın IR (0.75–1,4 μm), orta IR (1,4–3 μm) ve uzak IR (3–10 μm) [74].

Bir cismin üzerine gelen termal radyasyon absorbe edilebilir ve enerjisi ısıya dönüştürülebilir, yüzeyden yansıtılabilir veya malzeme boyunca iletilebilir. Bu durum Eşitlik 4.5'te ifade edilmiştir[73]:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \tag{4.5}$$

Burada ρ yansıtıcılık, α emicilik ve τ geçirgenliktir. Tek renkli (monokromatik) ışınım için bu özellikler spektral olarak adlandırılır ve bu ışınım çok renkli (polikromatik) olduğunda

toplam olarak tanımlanır [73]. Malzemeler, ışınımın çarptığı cismin geçirgenliklerine göre sınıflandırılırlar. Işınımın iletilmesine izin vermeyen bir cisim opak olarak adlandırılır ve τ=0'dır. Çoğu katı buna örnektir. Diğer taraftan sıvılar ve kaya tuzu veya cam gibi bazı katılar tanımlanmış bir geçirgenliğe sahiptir, yani onlar ışınıma karşı geçirgendirler. Yansıma, malzemenin yüzey kaplamasına bağlı olarak düzenli (aynasal olarak da adlandırılır) veya dağınık olabilir. İlk durumda, radyasyonun geliş açısı, yüksek derecede parlatılmış yüzey veya pürüzsüz bir yüzey nedeniyle yansıma açısına eşittir. Yüzey dalgaboyundan daha büyük pürüzlere sahip olduğunda, radyasyon tüm yönlerde dağınık olarak yansıtılır. Genel olarak katı cisimler, yüzeye yakın çok dar bir tabakadaki tüm radyasyonu emer. Gelen enerjinin tamamını yansıtmadan veya iletmeden emen ideal bir cisim, α = 1 olan siyah cisim olarak adlandırılır. Bir cisim tarafından birim alan ve zaman başına yayılan toplam radyasyon miktarı, toplam emisyon gücü, E, [75] olarak adlandırılır ve vücudun sıcaklığına ve yüzey özelliklerine bağlıdır. Bu enerji bir yüzeyden her yöne ve tüm dalga boylarında yayılır. Siyah cisim, birim alan başına maksimum radyasyonu yayan cisim olarak da tanımlanır. Siyah bir cismin yayma gücü, E_b, yalnızca sıcaklığına bağlıdır. Bir cismin yayma gücü, ε, toplam yayma gücünün aynı sıcaklıktaki siyah cisminkine oranı olarak tanımlanır, $\varepsilon = E / E_b$. [72].

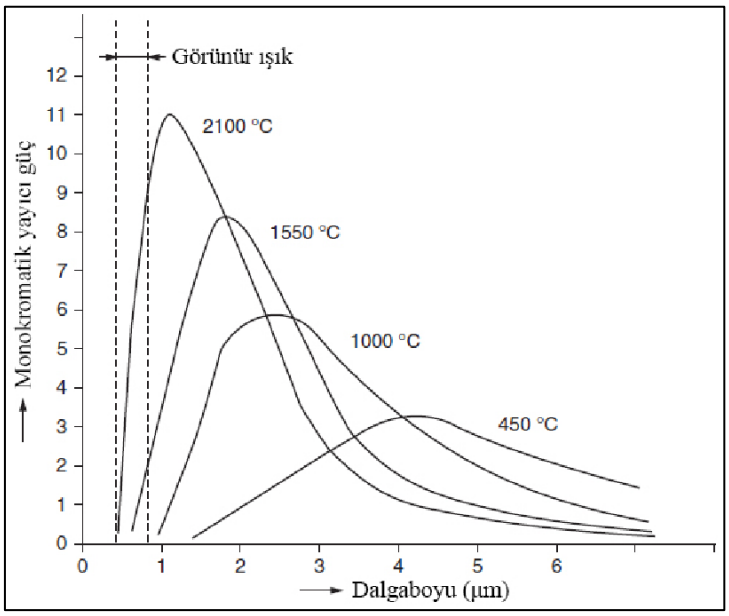
Daha önce belirtildiği gibi, toplam yayıcı gücü, radyasyon spektrumundaki tüm dalga boylarından enerjiye sahiptir. Ancak, tek renkli (monokromatik) yayıcı gücü, E_λ, λ ve λ + dλ dalgaboyları arasında bulunan ışıma enerjisidir [76] . Siyah bir cisim için, yayıcı güç şöyle ifade edilir (Planck ışınım yasası):

$$E_{b,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5\left[exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)-1\right]} \tag{4.6}$$

Burada C_1=3,745 x 10^{-16} Wm^2 ve C_2=1,439 x 10^{-2} Km'dir. Bu nedenle bir cismin tek renkli yayıcılığı $\varepsilon_\lambda = E_\lambda/E_{b\lambda}$ şeklinde tanımlanmıştır. Kirchhoff yasası, termodinamik denge altında (tüm yüzeylerin aynı sıcaklıkta olmasını gerektirir), bir cismin tek renkli emicilik ve yayıcılık gücünün eşit olduğunu belirtir. Eşitlik 4.6, aşağıdaki ifadeyle sıcaklıkla ilgili bir maksimuma sahiptir (Wien yer değişim yasası) [72]:

$$\lambda_{max}.T = c_w \tag{4.7}$$

Burada c_w Wien sabitidir ve değeri 2897,6 μm.K'dir. Planck'ın ışınım yasası, farklı sıcaklıklar için Şekil 4.4'te grafik olarak gösterilmektedir ve dalga boyu arttıkça, siyah cismin, $E_{b,\lambda}$'nın spektral yoğunluğunun önce arttığını, sonra maksimuma ulaştığını ve sonunda azaldığını göstermektedir. Sıcaklık artışı, Wien'in yer değiştirme yasasına göre $E_{b,\lambda}$' da kayda değer bir artışa ve maksimumun (tepe dalga boyu) daha kısa dalga boylarına kaymasına neden olur. Siyah cisim her dalga boyunda enerji yayar, böylece eğriler Şekil 4.4'teki yatay eksene asimptotik olarak yaklaşır. 5000 K'de tepe dalgaboyu, sarı-yeşil bölümde görünür ışık bölgesinde bulunan yaklaşık 5 x10^{-7} m'dir [62].



Şekil 4.4. Siyah bir cismin yayınım spektrumu

Eşitlik 4.6'nın, siyah cismin toplam yayıcı gücünü elde etmek için tüm dalga boylarına göre integrali alınır (Stefan-Boltzmann yasası) ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilir [72]:

$$E_b = \int_0^\infty E_{b,\lambda}\, d\lambda = \sigma T^4 \tag{4.8}$$

Burada, σ, Stefan-Boltzmann sabitidir ve değeri 5,675x10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}'tür. Gri cisim, tüm dalga boyu spektrumunda aynı yayıcılığa sahip olan cisim olarak tanımlanır. Bu nedenle Kirchhoff yasası, sıcaklıklarından bağımsız olarak gri cisimlere uygulanabilir [72].

$$Q_r = A_i F_{ij} \sigma \left(T_i^4 - T_j^4\right) \tag{4.9}$$

Burada, F_{ij}, i ve j yüzeyleri arasındaki şekil veya görüş faktörüdür. Şekil faktörü bir cismin yüzeyinden çıkan radyasyonun ne kadarının diğer yüzeye gittiğinin bir oranıdır. Tanım olarak, bu geometrik faktör, yüzey i tarafından yayılan toplam radyasyonun j yüzeyi tarafından kesilen kısmını hesaba katar. Teorik olarak hesaplamak için, bu faktör oldukça karmaşıktır, ancak en yaygın geometriler için literatürde mevcut çizelgeler ve formüller vardır [75,76]. Karşılıklılık teoremi olarak bilinen kullanışlı bir denklem, şekil faktörlerini ve her iki yüzeyin alanlarını aşağıdaki eşitlik aracılığıyla ilişkilendirir [72]:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \tag{4.10}$$

Radyasyonla enerji alışverişi N cisim arasındaysa, şekil faktörleri aşağıdaki ilişkiyi takip etmelidir:

$$\sum_1^N F_{ij} = 1 \tag{4.11}$$

Aslında, çok az sayıda cisim siyah cisim gibi davranır, bu yüzden bunlara gri cisimler olarak davranmak daha gerçekçi bir varsayım olacaktır. İki gri cisim arasındaki net radyasyon aşağıdaki eşitlikle verilir [72]:

$$Q_r = \frac{\sigma\left(T_i^4 - T_j^4\right)}{\left(\frac{\rho_i}{\varepsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{\rho_j}{\varepsilon_j A_j}\right)} \tag{4.12}$$

4.5.2.İnfrared lamba

IR lamba temel olarak radyatör veya yayıcı olarak adlandırılan bir ısı kaynağı, bir reflektör, kaynak yuvaları, elektriksel bağlantılar ve bir kabuktan oluşmaktadır. Temel bileşen yayıcıdır ve ısının kaynağına bağlı olarak elektrikli ve gazlı olmak üzere iki çeşittir.

Elektrikle ısıtılan yayıcılar; bu yayıcılarda IR ışınımı elektrik akımının bir dirençten geçmesiyle elde edilir ve elektrik akımı sıcaklığı arttırır. En yaygın yayıcılar, metal kılıflı radyan çubuklar, kuartz tüp ve kuartz lambadır. Bu yayıcıların en önemli karakteristik özelliklerinden biriside ısı kaynağından çıkan ışımanın enerji girdisine oranı olan ışıma

verimidir. Bu verimlilik ve yayıcı sıcaklığı doğru orantılıdır ancak sıcaklık ve dalgaboyu arasında ters orantı bulunmaktadır (Eşitlik 4.7) [77].

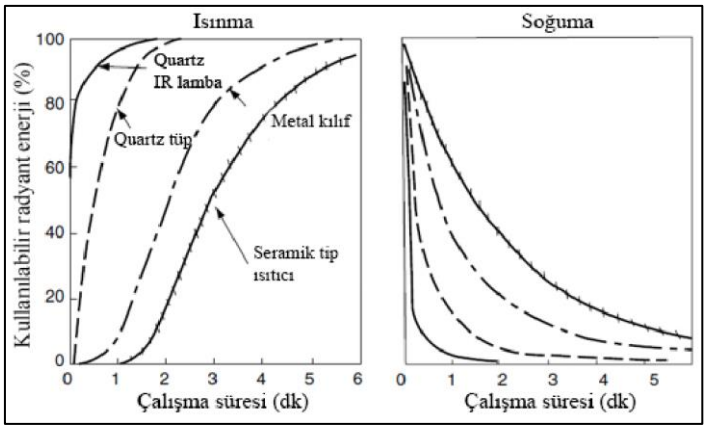
Gaz ateşlemeli yayıcılar; bu tip yayıcılar delikli bir plaka (metal veya ısıya dayanıklı) içerirler, plakanın yüzeylerinden biri gaz alevi ile ısıtılır, böylece plaka sıcaklığını yükseltir ve ışıma enerjisi yaymaya başlar. Bir yayıcı seçerken dikkate alınması gereken hususlar; ısıtılan materyalin absorpsiyon karakteristiği, ürün yüzey alanına yayılan güç yoğunluğu, gereken kontrol tipi, konveksiyonla taşınan ısının radyasyonla taşınan ısıya oranı ve kurulacak prosesin gerekliliklerdir. İnfrared lambaların ısınma süresi ne kadar kısa olursa kontrol edilebilirliği o kadar yüksek olmaktadır. Kuartz lambalar en hızlı ısınma ve soğuma süresine sahiptir. Ayrıca maksimum ısıl verimlilik, yüksek güç yoğunluğu, kontrol kolaylığı ve esnek tasarım parametreleri sebebiyle en başarılı yayıcı kuartz lambalardır. Ek olarak bu tip yayıcılar, ısıtılması için ürüne doğru ışını yöneltmek için altın reflektörler ile beraber kullanılabilirler. Reflektör tipleri; özel metalik/altın reflektörler, özel altın kaplama ikiz kuartz tüp veya düz metalik/seramik kaset reflektörler [77].

Çizelge 4.1. Elektrikli yayıcıların özellikleri

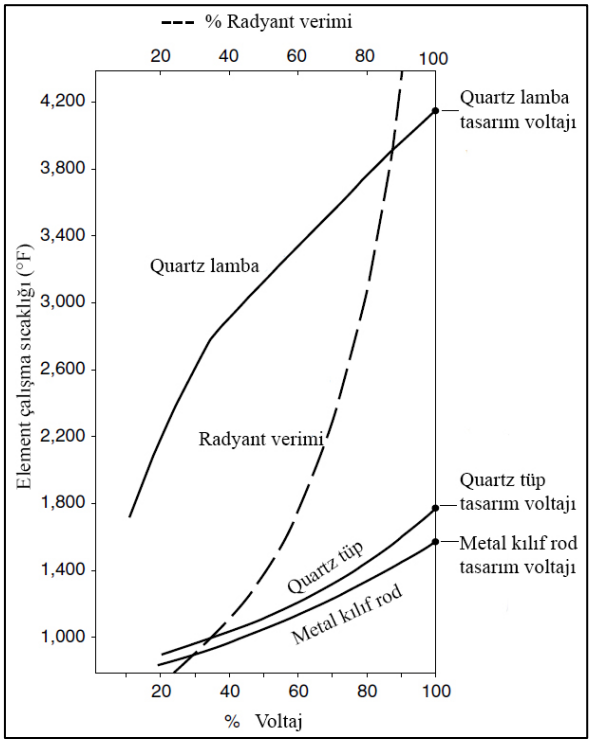
Yayıcı türü	Metal kaplama	Kuartz tüp	Kuartz lamba	Kuartz lamba*
Kaplama malzemesi	Paslanmaz çelik	Yarı saydam kuartz	Berrak kuartz	Berrak kuartz
Filament	Nikel- krom	Nikel- krom	Tungsten	Tungsten
Kaplama çapı	3/8”	3/8”, 5/8”, 7/8”	3/8”	3/8”
Dolgu malzemesi	Izolasyon tozu	Hava	İnert gaz	İnert gaz
Maksimum filament sıcaklığı	982 ℃	982 ℃	2205 ℃	1450 ℃
En yüksek dalgaboyu	-	2,3 µm	1,15 µm	1.99 µm
Voltaj	240 V	600 V’a kadar	Yaklaşık 600V	
Elektrik gücü	60 W/0,0254m	30, 60 veya 90 W/0,0254m	100 W/0,0254m	750 W/0,17 m
Radyant verimliliği	%50	%60	%86	

**Ceramicx firmasından satın alınmıştır. Model: QTS kuartz tungsten lamba*

Elektrikli IR yayıcıların ısınma ve soğuma süreleri Şekil 4.5’de verilmiştir.

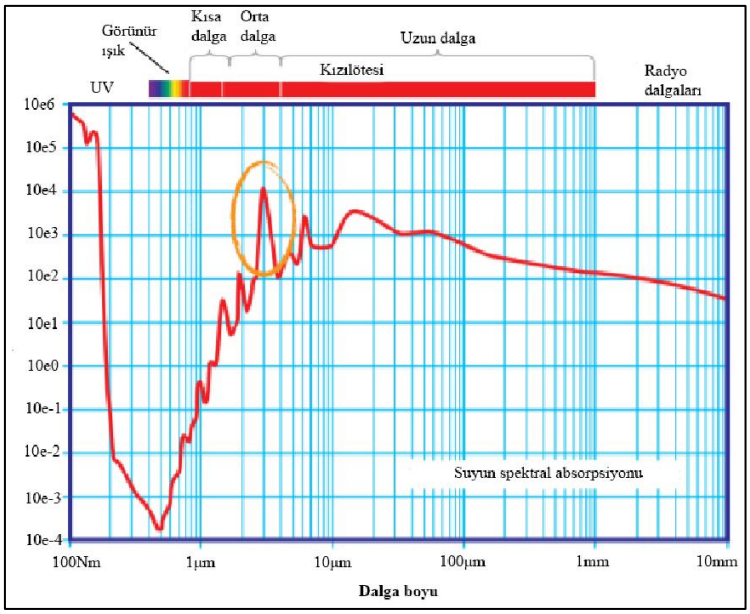


Şekil 4.5. IR kaynaklarının ısınma ve soğuma çevrimleri [72]



Şekil 4.6. Işıma verimi ve farklı yayıcıların voltaj ve yayıcı sıcaklıkları arasındaki ilişki [72]

Suyun spektral absorbsiyon eğrisi (Şekil 4.7) incelendiğinde orta dalga boyunda en yüksek değer gözlenmiştir. Seçilecek lambanın bu değer aralığında olması birinci kriterdir. Bir diğer husus ürün yüzey sıcaklığına göre kontrol edilecek lambanın anlık kontrole hızlı tepki verebilmesidir.



Şekil 4.7. Suyun dalga boyuna göre absorpsiyon eğrisi

5. NEMLİ HAVA TERMODİNAMİĞİ

Nemli hava, su buharı ve kuru havanın bileşiminden oluşmaktadır. Kuru hava mükemmel gaz olarak kabul edilir. Eğer hava içerisindeki su buharı miktarı çok düşükse nemli hava da mükemmel gaz olarak kabul edilmektedir. Nemli havanın kütlesi (m), su buharının kütlesi (m_b) ve kuru havanın (m_h) kütlesi toplanarak bulunur.

$$m = m_b + m_h \tag{5.1}$$

Aynı hacim ve sıcaklıkta bir gaz karışımındaki her bileşenin meydana getirdiği basınç, kısmi basınçtır. Dalton Kanununa göre bir gaz karışımını oluşturan gazların kısmi basınçlarının toplamı gaz karışımının basıncına eşittir. Bu durumda nemli havanın basıncı (P), su buharının (P_b) ve kuru havanın (P_h) kısmi basınçları toplamına eşittir.

$$P = P_b + P_h \tag{5.2}$$

Kuru havanın ve su buharının kısmi basınçları şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_b V = m_b R_b T,\ P_b = \frac{m_b R_b T}{V} \tag{5.3}$$

$$P_h V = m_h R_h T,\ P_h = \frac{m_h R_h T}{V} \tag{5.4}$$

5.1. Psikrometrik Diyagramda Temel Kavramlar

Psikrometri, nemli havanın termodinamik özellikleri ile ilgilenen termodinamiğin bir dalıdır. Nemli hava özelliklerinin hesap yoluyla bulunması oldukça zahmetli bir süreçtir. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin grafik olarak gösterildiği diyagram psikrometrik diyagram, nemli havanın Mollier diyagramı veya nemli havanın entalpi – özgül nem diyagramı olarak da bilinmektedir. Isıtma, soğutma, nem alma gibi havaya uygulanacak proseslerde psikrometrik diyagram sayesinde daha doğru cihaz seçimi yapılabilmektedir. Doymuş hava, doymamış hava, kuru termometre sıcaklığı, yaş termometre sıcaklığı, çiğ noktası sıcaklığı, bağıl nem, özgül nem gibi psikrometrik diyagram okumada kullanılan

temel kavramlar bu bölümde açıklanmıştır. *Doymuş hava*, nemli hava içindeki su buharının doyma sıcaklığı ve basıncında bulunması şeklinde tanımlanmaktadır. Hava taşıyabileceği maksimum su buharı miktarına ulaşmıştır. *Doymamış hava*, içerisinde su buharı barındıran ve doygun hale gelinceye kadar su buharı alabilen havadır. Standart bir termometre ile alınan sıcaklık değeri, *kuru termometre sıcaklığı* olarak adlandırılır. Termometrenin üzerinde sarılmış olan bir ıslak bez ile ölçülen sıcaklık değeri, gaz-buhar karışımının *yaş termometre sıcaklığı* olarak adlandırılır. Nemli hava sabit basınçta soğutulduğunda içerisindeki su buharının kısmi basıncı da sabit kalmaktadır. *Çiy noktası sıcaklığı,* sabit kısmi basınçta su buharının soğutularak doymuş buhar haline geldiği andaki sıcaklıktır. Nemli hava sabit basınçta soğutulduğunda, içindeki su buharı çiy noktası sıcaklığında yoğuşmaya başlar. *Bağıl nem*, havanın içerisindeki su buharı kütlesinin (m_b), havanın o sıcaklıkta taşıyabileceği maksimum su buharı kütlesine ($m_{b,d}$) oranıdır. Havanın doygunluk durumunu belirten boyutsuz bir sayıdır.

$$\emptyset = \frac{m_b}{m_{b,d}} = \frac{(P_b V)/(R_b T)}{(P_{bT} V)/(R_b T)} = \frac{P_b}{P_{bT}} \tag{5.5}$$

Nemli havadaki su buharının kısmi basıncı Eş. (5.6) ile hesaplanmaktadır. Kuru havanın kısmi basıncı (P_h), nemli havanın basıncından (P) su buharının basıncının (P_b) çıkarılmasıyla elde edilir.

$$P_b = \emptyset . P_{bT} \tag{5.6}$$

$$P_h = P - P_b \tag{5.7}$$

Havanın bağıl nemi, $\emptyset$, 0 ile 1 arasında değişmektedir. Sıfıra eşitse kuru hava, bire eşitse doymuş hava, 0 ile 1 arasındaysa nemli hava (doymamış hava) olarak sınıflandırılır. Bir ortamın şartlandırılmasında bağıl nem çok önemlidir. *Özgül nem*, havanın içerisindeki su buharı kütlesinin (m_b) kuru hava kütlesine (m_h) oranıdır.

$$\omega = \frac{m_b}{m_h} = \frac{(P_b V)/(R_b T)}{(P_h V)/(R_h T)} = \frac{R_h}{R_b} . \frac{P_b}{P_h} \tag{5.8}$$

Burada R evrensel gaz sabiti, su buharı için 0,46152 kJ/kgK, kuru hava için 0,287 kJ/kgK'dir.

$$\omega = 0{,}622\frac{P_b}{P_h} = 0{,}622\frac{\emptyset.P_{bT}}{P-\emptyset.P_{bT}} \quad (5.9)$$

Duyulur ısı (Q_d), bir maddenin sıcaklığının değiştirilmesi için verilmesi ya da alınması gereken ısı miktarıdır ve Eş. (5.10) ile ifade edilir.

$$Q_d = mc_p\Delta T \quad (5.10)$$

Burada, m, kütle (kg), c_p özgül ısı (kJ/kg.°C) ve ΔT sıcaklık farkını (°C) ifade eder. *Gizli ısı* (Q_g), bir maddenin faz değiştirmesi için verilmesi ya da alınması gereken ısı miktarıdır, bu işlem sırasında malzemenin sıcaklığı sabittir.

$$Q_g = mh_{sb} \quad (5.11)$$

Burada, m kütle (kg), h_{sb} gizli buharlaşma entalpisidir (kJ/kg) ve doymuş buhar ve doymuş sıvı entalpileri farkı alınarak bulunur.

Nemli havanın yoğunluğu

Nemli hava içerisinde kuru hava ve su buharı bulundurduğu için, kuru hava ve su buharının kütleleri toplamı nemli havanın kütlesini verir.

$$m = m_h + m_b \quad (5.12)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_h}{V} + \frac{m_b}{V} = \frac{P_h}{R_hT} + \frac{P_b}{R_bT} = \left[\frac{P-\emptyset P_{bT}}{R_h} + \frac{\emptyset P_{bT}}{R_b}\right].\frac{1}{T} \quad (5.13)$$

$$\rho = \rho_h + \rho_b \quad (5.14)$$

Nemli havanın yoğunluğu, sıcaklık, basınç ve bağıl nem değerleri ölçülerek hesaplanabilir.

Nemli havanın özgül entalpisi

Nemli havanın entalpisi, kuru havanın ve su buharının entalpileri toplamıdır.

$$H = m_hh_h + m_bh_b \quad (5.15)$$

Eşitliğin her iki tarafı kuru havanın kütlesine bölünürse, birim kuru hava kütlesi başına nemli havanın entalpisi, h;

$$h = h_h + wh_b \tag{5.16}$$

Kuru havanın entalpisi Eş. (5.17) ile hesaplanmaktadır, 0℃'de havanın özgül ısısı 1,0035 kJ/kg℃'dır. Sabit basınçta havanın özgül ısısı sıcaklıkla çok yavaş değiştiği için 100℃'ye kadar sabit kabul edilebilir.

$$h_h = c_{p,h}T = 1{,}0035T \tag{5.17}$$

Su buharının entalpisi Eş. (5.18) ile hesaplanmaktadır. Referans sıcaklığı 0 ℃ alınırsa, bu sıcaklıkta su buharının entalpisi 2501,3 kJ/kg, su buharının ortalama özgül ısısı 1,82 kJ/kg.℃ olarak alınır.

$$h_b = h_{0℃} + c_{p,s}T = 2501{,}3 + 1{,}82T \tag{5.18}$$

Bu durumda nemli havanın entalpisi;

$$h = 1{,}0035T + w(2501{,}3 + 1{,}82T) \tag{5.19}$$

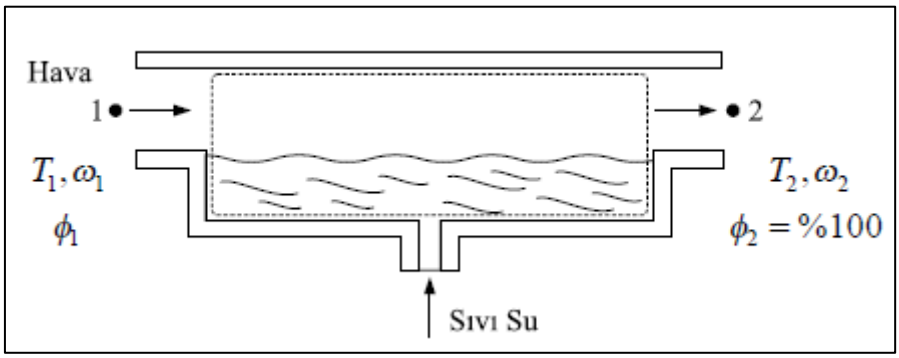
Nemli havanın özgül ısısı Eş. (5.20) ile hesaplanmaktadır.

$$c_p = c_{p,h} + w.c_{p,b} \tag{5.20}$$

5.2. Adyabatik Doyma İşlemi

Havanın özgül nem ve bağıl nem değerlerinin ölçülmesi için geliştirilmiş metotlardan birisi de adyabatik doyma işlemidir (Şekil 5.1). Hava, iyi bir şekilde yalıtılmış ve adyabatik doyma işleminin gerçekleştirilebileceği kadar uzun bir kanalda su ile temas edecek şekilde akıtılır. Su, buharlaşma gizli ısısını havadan alarak buharlaşmaktadır. Böylece kanala T_1 sıcaklığında doymamış halde giren hava T_2 sıcaklığında doymuş halde (φ = %100) kanaldan çıkar. Bu sıcaklık *adyabatik doyma sıcaklığı* olarak adlandırılır. Kanaldaki suyun buharlaşmasından

dolayı kanala su eklemesi yapılmaktadır. Havadan ısı çekilerek buharlaşma gerçekleştiği için T_2 sıcaklığı daima T_1 giriş sıcaklığından küçüktür. Ayrıca adyabatik doyma sıcaklığı daima giriş havasının çiy noktası sıcaklığından büyüktür.



Şekil 5.1. Adyabatik doyma işlemi

Kuru hava ve su buharı kütlesinin korunumu eşitliği:

$$\dot{m}_{h1} = \dot{m}_{h2} = \dot{m}_h \tag{5.21}$$

$$\dot{m}_{s2} = \dot{m}_h(\omega_2 - \omega_1) \tag{5.22}$$

Enerjinin korunumu eşitliği:

$$\dot{m}_h h_1 + \dot{m}_{s2} h_{s2} = \dot{m}_h h_2 \tag{5.23}$$

Eşitliğin her iki tarafını da $\dot{m}_h$ ile bölersek:

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1)h_{s2} = h_2 \tag{5.24}$$

Eş. (5.25)'de Eş. (5.24) yerine konulduğunda:

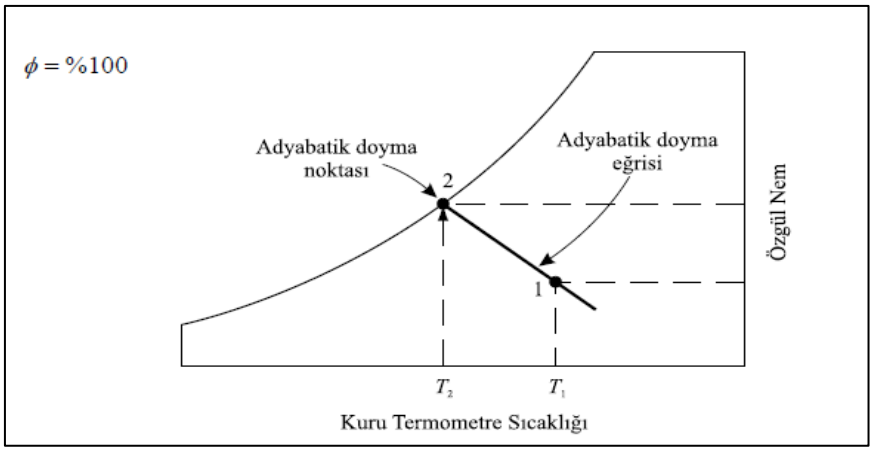
$$h = c_{p,h}T + \omega h_b \tag{5.25}$$

$$\left(c_{p1}T_1 + \omega_1 h_{b1}\right) + (\omega_2 - \omega_1)h_{s2} = \left(c_{p2}T_2 + \omega_2 h_{b2}\right) \tag{5.26}$$

Eğer sıcaklık aralığı için $c_{p1} = c_{p2} = c_p$ eşitliği kabul edilirse ve $h_{b1} - h_{s2} = h_{sb2}$

$$\omega_1 = \frac{c_p(T_2 - T_1) + \omega_2 h_{sb2}}{h_{b1} - h_{s2}} \tag{5.27}$$

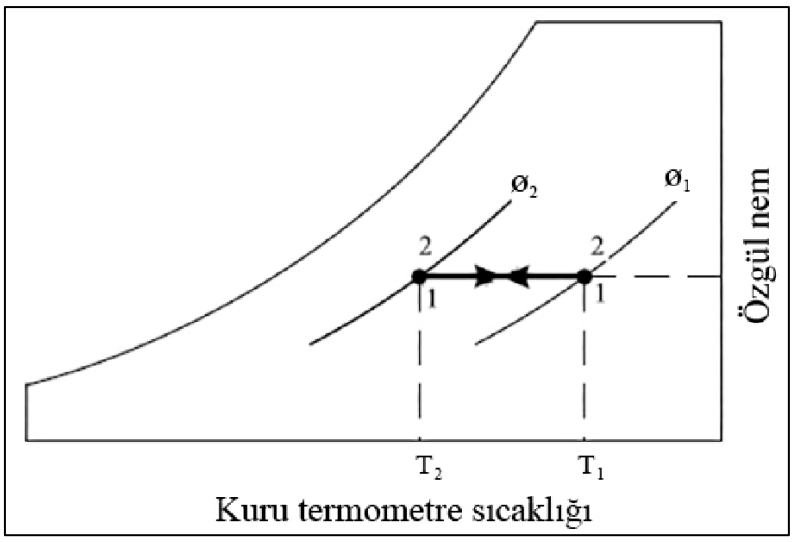
elde edilir. Bu eşitlik *adyabatik doyma eğrisini* verir. Adyabatik doyma eğrisinin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Adyabatik doyma eğrisinin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi

5.3. Duyulur Isıtma ve Soğutma

Özgül nemin sabit kaldığı, ısıtma işlemine *duyulur ısıtma* işlemi, soğutma işlemine *duyulur soğutma* denir. Duyulur ısıtma işleminde bağıl nemin azaldığı, duyulur soğutma işleminde ise bağıl nemin arttığı gözlenir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Duyulur ısıtma ve duyulur soğutmanın psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi

Nemlendirme ve nem alma işleminin olmadığı belirtilen iki işlem için enerjinin korunumu eşitliği:

$$\dot{Q} = \dot{m}_h(h_2 - h_1) \tag{5.28}$$

$$q = h_2 - h_1 \tag{5.29}$$

Verilen eşitlikte h_1 ve h_2, havanın giriş ve çıkış entalpileridir.

6. MATERYAL VE METOT

6.1. Materyal

Bu tez çalışmasında popüler bir kuruyemiş olan ceviz kurutulmuştur. Açık ve kapalı sistem olmak üzere iki farklı kurutucu tasarlanmıştır. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucuda 2019 ve 2020 yılında hasat edilen cevizler kurutulmuştur. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucuda 2020 yılında hasat edilen cevizler kurutulmuştur.

6.1.1. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 1)

2019 yılı deneyleri

Bilecik çeşidinden 2019 yılında geç hasat edilmiş yeşil kabuklu ceviz satın alınmış ve deneyler öncesinde 4 ℃'de depolanmıştır. Kurutulmadan önce kabuklu ceviz ve farklı kurutma sistemlerinde kurutulmuş ceviz resimleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Ürünlerin yeşil kabukları soyulmuş ve kabukta kalan atık liflerin uzaklaştırılması için yıkanmıştır. Kuru ağırlığı belirlemek için bir kısım 103 ± 2 ℃'de bir konveksiyonel kurutma fırınında kurutulmuştur.



Yeşil kabuklu taze ceviz | HP ile kurutulmuş ceviz içi | IRAHP ile kurutulmuş ceviz içi

Şekil 6.1. Kurutmadan önce kabuklu ceviz resimleri ve farklı kurutma sistemlerinde kurutulmuş ceviz resimleri (Grup 1-2019)

Bu sırada ürün ağırlığı, her bir saatlik periyotta yük hücresi üzerinde ölçülmüştür. İki kütle arasındaki değişim %1'den az olduğunda kurutma işlemi bitirilmiş ve bu değer kuru ağırlık olarak kabul edilmiştir. Her deneyde 900 ± 2 gr ağırlığında ve benzer büyüklükteki cevizler kullanılmıştır. Cevizin nem içeriği 0,63 g su/g kuru maddeden (kuru bazda) 0,12 $g_{su}/g_{kurumadde}$ 'ye düşürülmüştür.

2020 yılı deneyleri

Bilecik çeşidinden 2020 yılında erken hasat edilmiş yeşil kabuklu ceviz satın alınmış ve deneyler öncesinde 4 ℃'de depolanmıştır. Kurutulmadan önce kabuklu ceviz ve farklı kurutma sistemlerinde kurutulmuş ceviz resimleri Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Ürünlerin yeşil kabukları soyulmuş ve kabukta kalan atık liflerin uzaklaştırılması için yıkanmıştır. Kuru ağırlığı belirlemek için bir kısım 105 ± 1 °C'de bir konveksiyonel kurutma fırınında kurutulmuştur. Bu sırada ürün ağırlığı, her bir saatlik periyotta hassas terazi ile ölçülmüştür. İki kütle arasındaki değişim %1'den az olduğunda kurutma işlemi bitirilmiş ve bu değer kuru ağırlık olarak kabul edilmiştir. Her deneyde 1000 ± 2 gr ağırlığında ve benzer büyüklükteki cevizler kullanılmıştır. Cevizin nem içeriği 1,12 $g_{su}/g_{kurumadde}$ 'den (kuru bazda) 0,12 $g_{su}/g_{kurumadde}$ 'ye düşürülmüştür.



Şekil 6.2. Kurutmadan önce kabuklu ceviz resimleri ve farklı kurutma sistemlerinde kurutulmuş ceviz resimleri (Grup 1-2020)

6.1.2. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 2)

Bilecik çeşidinden 2020 yılında taze hasat edilmiş yeşil kabuklu ceviz satın alınarak deneyler öncesinde 4 °C'de depolanmıştır. Ürünlerin yeşil kabukları soyulmuş ve kabukta kalan atık liflerin uzaklaştırılması için yıkanmıştır. Kuru ağırlığı belirlemek için, bir kısım bir kurutma fırınında 103 ± 2 °C'de kurutulmuştur. Bu prosedür sırasında, ürünün ağırlığı bir saatlik aralıklarla hassas terazi ile ölçülmüştür. İki ölçüm arasındaki fark %1'den az olduğunda kurutma işlemine son verilmiş ve ölçülen ağırlık ürünün kuru ağırlığı olarak kabul edilmiştir. Kurutma için benzer boyutlardaki ceviz numuneleri seçilmiştir. Her deney için 1000 ± 2 gr ağırlığında ceviz örnekleri kullanılmıştır. Cevizin nem içeriği 1,12 $g_{su}/g_{kurumadde}$ 'den 0,12 $g_{su}/g_{kurumadde}$ 'ye (kuru bazda) düşürülmüştür.



HA ile kurutulmuş ceviz içi | IRAHP20 ile kurutulmuş ceviz içi | IRAHP30 ile kurutulmuş ceviz içi

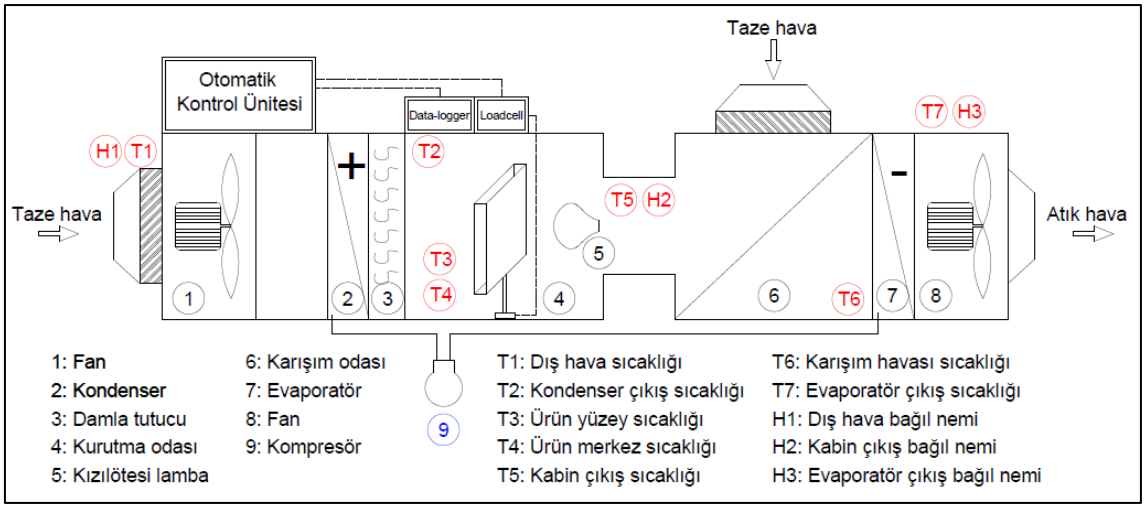
Şekil 6.3. Farklı kurutma sistemlerinde kurutulmuş ceviz resimleri (Grup 2 - 2020)

6.2. Deney Düzeneği

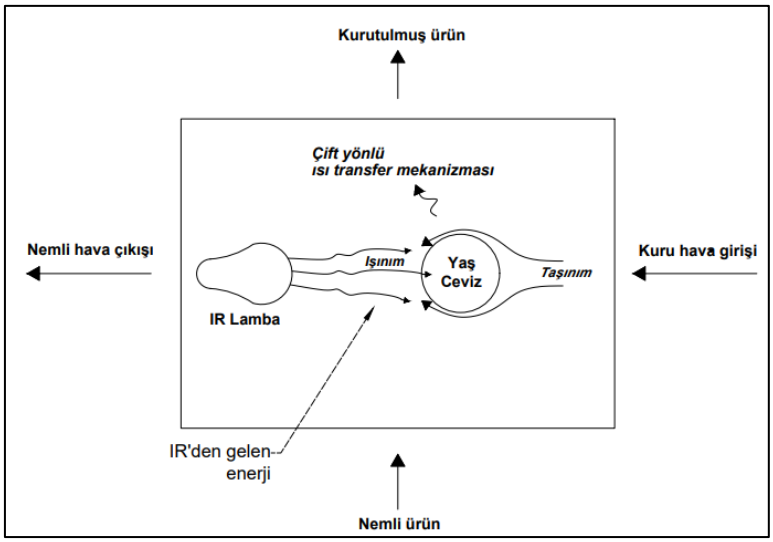
6.2.1. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 1)

Tasarlanan kurutma sisteminde konveksiyon ve kombine konveksiyon & radyasyon olmak üzere iki ısı transfer mekanizması kullanılmıştır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda sıcak hava ile yapılan deneylerde kurutma tepsisi yatay eksene yerleştirilmiştir. Bu durum havanın ilk çarptığı ürünün daha hızlı kurumasına ve tepsi uçlarında ürünün nemli kalmasına neden olmuştur. Bu nedenle tepsi (dikdörtgen prizma şeklinde) bu çalışmada dikey eksende

yerleştirilmiştir. Dikey tepsinin sağ ve sol yüzeyleri sırasıyla IR ve sıcak hava ile ısıtılmıştır. Isının ürüne çift yönlü nüfuz etmesi ile homojen ısı dağılımı elde edilmesi amaçlanmıştır. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu, bir IR lambası (500 W), iki yönde homojen ısı transferi için dikey tepsili kurutma odası, hava debisini ayarlamak için frekans invertörü, kompresör, genleşme vanası, evaporatör ve kondenser, havanın sirkülasyonu için fanlar, ısı geri kazanımıyla evaporatör hava sıcaklığını artırmak için karışım odası, enerji ve ekserji analizi için termokupllar ve sıcaklık-bağıl nem sensörleri, elektrik tüketimini okumak için sayaç ve, kayıt, gözlem ve ölçümlerin kontrol edilmesi için data logger ve yük hücresi içeren bir kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu, Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Laboratuvarında tasarlanmış ve üretilmiştir. Kurutma odası alüminyum sacdan yapılmış ve poliüretan köpük ile izole edilmiştir. Kurutma odasının genişliği, uzunluğu ve yüksekliği 1,0, 0,7 ve 0,4 metre ve tepsinin genişliği ve uzunluğu 0,6 ve 0,3 metredir. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (IRHP) detayları Şekil 6.4'te gösterilmektedir. Açık sistemde kombine ısı transfer mekanizması ile ısının ürüne iki yönlü penetrasyonun şematik gösterimi Şekil 6.5'te verilmiştir. Kurutma odasındaki infrared radyasyonun etkisini azaltmak için sıcaklık sensörleri ince bir reflektör bant ile kaplanmıştır. Altı noktadan (ortam havası, kondenser çıkışı, kurutma odası çıkışı, evaporatör çıkışı, ürün yüzeyi, ürün içi) sıcaklık değerleri, ise ve üç farklı noktadan (ortam havası, kurutma odası çıkışı, evaporatör çıkışı) bağıl nem değerleri ölçülmüştür. Her ölçüm, deneyler boyunca on dakikalık periyotlarla kaydedilmiştir. IRHP'de kullanılan ekipman ve teknik özellikler Çizelge 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.4. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (IRHP)



Şekil 6.5. İnfrared konvektif açık kurutma sistemi şematik görünüm

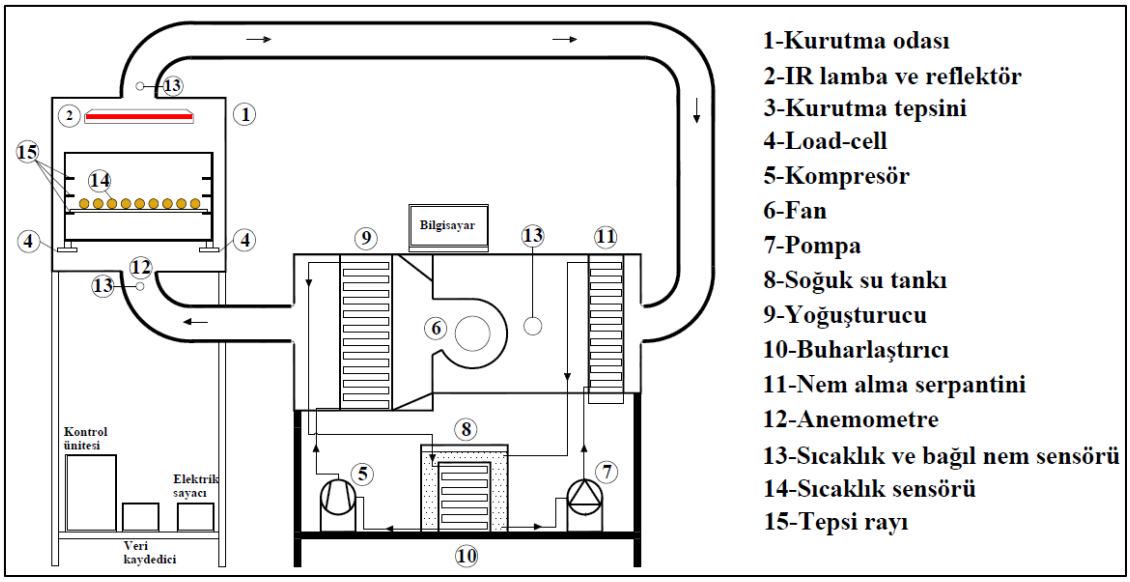
Çizelge 6.1. Açık çevrim kurutma sistemi ve ölçüm ekipmanının özellikleri

Ekipmanlar	Teknik özellikler	Hassasiyet
Isı pompası-açık sistem	Kondenser kapasitesi 4,9 kW, kompresör Toshiba, Japonya, PA215M2AS-4KU, 1,1 kW, 50 Hz, soğutucu akışkan R410A.	-
Radyal fan (frekans invertörü) – açık sistem	FBO-0.5, Beyfan, Türkiye, Güç 0,37 kW, 950 m^3/h, 2800 d/d, frekans invertörü: AC değişken hızlı sürücü.	-
Sayaç	Viko by Panasonic, Japan, ürün kodu: VEM-M580DB0T, monofaz elektronik sayaç, 230 VAC, 50 Hz, çalışma sıcaklığı -40 ile +85°C arasında, 4 tarifeli, 8 sayı haneli LCD ekran.	±1 %
Hassas terazi	Baykon endüstriyel tartı sistemleri, Türkiye, WLC 6 / A2 hassas terazi, maksimum kapasite 6 kg, çalışma sıcaklığı +15 ile +30 °C arasında ve 10-85 % RH.	±0,2 g
Yük hücresi	Zemic Europe B.V., Hollanda, tip L6D, çıktı (mV/V) 2.0, 5–12 V, kapasite 5 kg, çalışma sıcaklığı -35 ile +65°C arasında.	±0,02 %
Yük hücresi indikatörü	Baykon endüstriyel tartı sistemleri, Türkiye, BX27 ağırlık indikatörü, çalışma sıcaklığı -15 ile +55 °C arasında, maksimum % 85 RH, güç gereksinimi 100-240 VAC, 50 Hz, 500 mA.	-
Termo - anemometre	Kimo ölçüm aletleri, Kanada, VT 200, hız ölçüm aralığı 0-20 m/s, sıcaklık ölçüm aralığı -20 ile 80°C.	±0,1 °C ±0,03 ms^{-1}
Termo - higrometre	Testo, Almanya, Testo 175 H1, sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri için data logger, ölçüm aralığı -20 ile 55 °C ve 0-100 % RH.	±0,4 °C ±2 % RH
Termokupl NTC tip	Testo, Almanya, Testo Saveris 2- T1, sıcaklık ölçümleri için data logger (sensör tipi: NTC), ölçüm aralığı -30 ile +50 °C.	±0,5 °C
Thermokupl PT100	Testo, Almanya, Testo 176 T1, sıcaklık ölçümleri için data logger (sensor tipi: PT100), ölçüm aralığı -35 ile +70 °C.	±0.2 °C

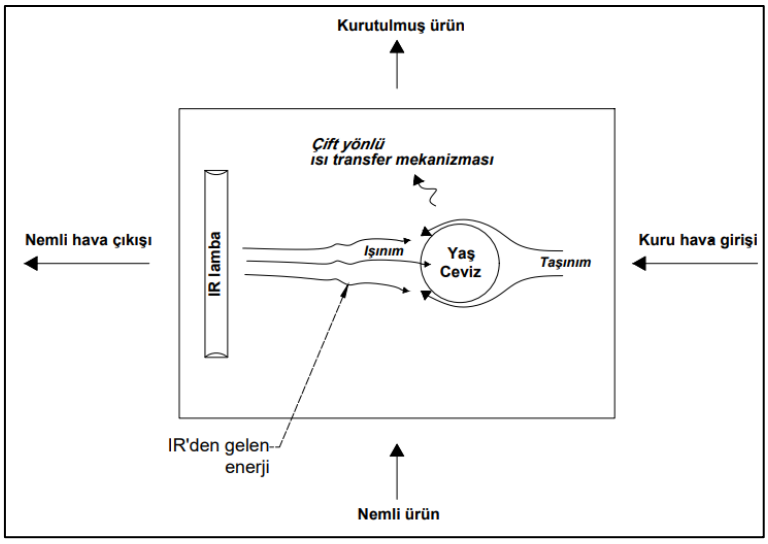
6.2.2. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 2)

Kurutma sistemi iki ısı transfer mekanizması ile tasarlanmıştır: konveksiyon ve kombine konveksiyon ve radyasyon. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutma sistemi, bir IR lambası (750 W), kompresör (frekans kontrollü), kondenser, evaporatör, genleşme vanası, frekans invertörü (kurutma havası hızını ayarlamak için), fanlar, nem alma ünitesi, kurutma odası, sıcaklık-bağıl nem sensörleri, termokupllar ve ana kontrol ünitesi içermektedir. IR lambası ürüne 20 cm ve 30 cm mesafede yerleştirilmiştir ve tepsi ölçüleri 33cm x 33cm'dir. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu (IRHP) detayları Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Kapalı sistemde kombine ısı transfer mekanizması ile ısının ürüne iki yönlü penetrasyonun şematik gösterimi Şekil 6.7'de verilmiştir. Ayrıca infrared radyasyon etkisini azaltmak için kurutma kabinindeki sıcaklık sensörleri ince bir reflektör bant ile kaplanmıştır. Altı farklı noktadan (ortam havası, kondenser çıkışı, kabin çıkışı, nem alma ünitesi çıkışı, ürün yüzeyi, ürün içi) sıcaklık ölçümleri yapılmış, dört farklı noktadan (nem alma ünitesi çıkışı, kabin çıkışı, kondenser çıkışı ve ortam havası) bağıl nem değerleri ölçülmüştür.

Her ölçüm birkaç dijital ekranla izlenmiş ve ardından deneyler sırasında on dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Kurutucuya yerleştirilen kontrol ünitesinde enerji tüketimi on dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Kurutma havası hızını kontrol etmek için frekans kontrollü fan kullanılmıştır. IRHP'de kullanılan ekipman ve teknik özellikler Çizelge 6.2'de gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu (IRHP)



Şekil 6.7. İnfrared konvektif kapalı kurutma sistemi şematik görünüm

Çizelge 6.2. Kapalı çevrim kurutma sistemi ve ölçüm ekipmanlarının özellikleri

Ekipmanlar	Teknik özellikler	Hassasiyet
Isı pompası-kapalı sistem	Kondenser kapasitesi 0,746 kW, kompresör gücü 0,37 kW, evaporatör kapasitesi 0,373 kW, soğutucu akışkan R134A	-
Radyal fan-kapalı sistem	0,16 kW, 990 m^3/h, 2750 d/d, 50 Hz, 230 Volt	-
Pompa	0,37 kW, 2,4 m^3/h, 220-240 V, 50Hz	-
Soğuk su tankı	40 Litre	-

Çizelge 6.2. (devam) Kapalı çevrim kurutma sistemi ve ölçüm ekipmanlarının özellikleri

Sayaç	Viko by Panasonic, Japan, ürün kodu: VEM-M580DB0T, monofaz elektronik sayaç, 230 VAC, 50 Hz, çalışma sıcaklığı -40 ile +85°C arasında, 4 tarifeli, 8 sayı haneli LCD ekran.	±1 %
Hassas terazi	Baykon endüstriyel tartı sistemleri, Türkiye, WLC 6 / A2 hassas terazi, maksimum kapasite 6 kg, çalışma sıcaklığı +15 ile +30 ℃ arasında ve 10-85 % RH.	±0.2 g
Yük hücresi	Zemic Europe B.V., Hollanda, tip L6D, çıktı (mV/V) 2.0, 5–12 V, kapasite 5 kg, çalışma sıcaklığı -35 ile +65°C arasında.	±0.02 %
Yük hücresi indikatörü	Baykon endüstriyel tartı sistemleri, Türkiye, BX27 ağırlık indikatörü, çalışma sıcaklığı -15 ile +55 ℃ arasında, maksimum % 85 RH, güç gereksinimi 100-240 VAC, 50 Hz, 500 mA.	-
Termo - anemometre	Kimo ölçüm aletleri, Kanada, VT 200, hız ölçüm aralığı 0-20 m/s, sıcaklık ölçüm aralığı -20 ile 80℃.	±0.1 ℃ ±0.03 ms^{-1}
Termo - higrometre	Testo, Almanya, Testo 175 H1, sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri için data logger, ölçüm aralığı -20 ile 55 ℃ ve 0-100 % RH.	±0.4 ℃ ±2 % RH
Termokupl NTC tip	Testo, Almanya, Testo Saveris 2- T1, sıcaklık ölçümleri için data logger (sensör tipi: NTC), ölçüm aralığı -30 ile +50 ℃.	±0.5 ℃
Thermokupl PT100	Testo, Almanya, Testo 176 T1, sıcaklık ölçümleri için data logger (sensor tipi: PT100), ölçüm aralığı -35 ile +70 ℃.	±0.2 ℃

6.3. Deneysel Prosedür

6.3.1. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 1)

Ceviz numuneleri sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif kurutucu (konveksiyon) ve sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu (konveksiyon & radyasyon) ile kurutulmuştur. Kurutma havası sıcaklığı 40 ℃, hava hızı frekans invertörü (40 Hz) ile 1,5 m/s olarak ayarlanmıştır. Ürün yüzeyinin ayarlanan sıcaklık değerlerine göre IR lamba 35-40 ℃ arasında kontrol edilmiştir. Aynı büyüklükte cevizler seçilerek tepsiye yerleştirilmiştir. Ürün ağırlığı hassas terazi (WLC 6 / A2, Baykon, Türkiye, doğruluk ± 0,2 g) ile ölçüldükten sonra numuneler kurutma tepsisine yerleştirilmiştir. Ağırlık değişimi, yük hücresi (tip L6D, Zemic, Hollanda, doğruluk ±%0,02) ve yük hücresi göstergesi (BX27, Baykon, Türkiye) kullanılarak izlenmiştir. Ceviz iç ve yüzey sıcaklıklarının ölçümünde NTC tipi termokupllar (Testo Saveris 2-T1, Testo, Almanya, doğruluk ± 0,5 ° C) kullanılmıştır. Ortam havası, kurutma odası çıkışı ve evaporatör çıkışının sıcaklık ve bağıl nem değerleri termo higrometre (Testo 175 H1, Testo, Almanya, doğruluk ± 0,4 ° C ve ±% 2 RH) ile

ölçülmüştür. Kondenser çıkışının sıcaklığı PT100 termokupl ile ölçülmüştür (Testo 176 T1, Testo, Almanya, doğruluk ± 0,2 °C).

Kurutma odası girişindeki sıcaklık ve hız değerlerini ölçmek için termal anemometre (VT 200, Kimo, Kanada, doğruluk ± 0.1 ° C ve ± 0.03 m / s) kullanılmıştır. Elektrik tüketim değerleri elektrik sayacı (VEM-M580DB0T, Viko by Panasonic, Japonya) ile ölçülmüştür. IR lambanın tüketimi sistemden bağımsız olarak elektrik sayacı ile ölçülerek çalışma süresi belirlenmiştir. Konvektif kurutma sadece sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif kurutucu ile sağlanmıştır. R410A soğutucu akışkan için termodinamik hesaplamalara göre, buharlaşma için en iyi hava sıcaklığını elde etmek için yüksek bağıl nem ve sıcaklığa sahip egzoz havası ve taze hava karışım odasında 60:40 oranında karıştırılmıştır. Soğutucu akışkan, evaporatör önündeki karışım havasından ısı çekerek buharlaşır ve kondenserde ortam havasına ısı yayarak yoğuşur. Temiz hava kondenserden fan yardımı ile geçirilerek ısıtılmıştır. Kurutma odasına sürekli olarak ısıtılmış temiz hava sağlanmıştır. Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif kurutucuda (HP), ısı transferi yalnızca konveksiyonla gerçekleşmiştir. HP ve IRHP sistemlerinin farkı, ürün yüzey sıcaklığına göre çalışan IR lambasıdır. IRHP'de tepsinin sağ ve sol tarafları sırasıyla IR lambası ve sıcak hava ile ısıtılmıştır. İki farklı ısı transfer mekanizması kullanmak, ısı ve kütle transfer katsayısını arttırır. Isının ürüne çift yönlü nüfuz etmesi, kuruma hızını arttırmıştır.

6.3.2. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu (Grup 2)

Kabin içi sıcaklık stabilize olunca deneyler başlatılmıştır. Ceviz numuneleri, sıcaklık ve bağıl nem kontrollü konvektif kurutucu (konveksiyon) ve sıcaklık ve bağıl nem kontrollü konvektif infrared kurutucu (konveksiyon & radyasyon) ile kurutulmuştur. Kurutma ortam sıcaklığı 40 °C, hava hızı frekans invertörü (40 Hz) ile 1,5 m/s olarak ayarlanmıştır. Aynı büyüklükte cevizler seçilerek tepsiye yerleştirilmiştir. Kabuklu cevizin iç sıcaklığını ve yüzey sıcaklığını ölçmek için sensörler yerleştirilmiştir. Konvektif kurutma sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif kurutucu ile sağlanmıştır. Isı pompasında kullanılan soğutucu akışkan R134a'dır. Kondenserde hava ısıtılarak kurutma kabinine gönderilir, ürünün nemini alan hava nem alma ünitesinden geçirilerek kondensere geri gönderilir. HP ve IRHP sistemlerinin farkı, ürün yüzey sıcaklığına göre çalışan IR lambasıdır.

6.4. Kalite Analizi Prosedürü

Ceviz örneklerinin kül ve toplam yağ içeriği sırasıyla 923.03 ve 945.16 AOAC yöntemlerine göre belirlenmiştir [78]. Ceviz renk özelliklerini değerlendirmek için dijital kamera ile ceviz resimleri çekilerek JPG formatında kayıt altına alınmıştır. Dijital kamera, numuneden 20 cm uzaklıkta dikey olarak yerleştirilmiştir. Görüntülerin renkleri Image J yazılımı 1.53e versiyonu (National Institutes of Health, Bethesda, MD) kullanılarak RGB renk skalasına göre belirlenmiş ve ceviz örneklerinin renk değerleri CIE renk sistemine (L*, α*, b*) dönüştürülmüştür. L* açıklık-koyuluğu belirtir ve 0 ile 100 arasında değişir. a* değeri yeşilliği (-) ve kırmızılığı (+) temsil eder ve b* değeri maviliği (-) ve sarılığı (+) gösterir [79].

Toplam fenolik içerik (TPC) ve toplam antioksidan analizlerinden önce, Pycia vd. (2019)'un kullandığı metotta küçük değişikliklerle ceviz ekstraktları hazırlanmıştır [80]. Ceviz numuneleri bir laboratuvar öğütücü (Premier PRG 259, Stil Electronics Co. İstanbul, Türkiye) kullanılarak öğütülmüştür. Öğütülmüş örnekler (1 gr) metanol:su (70:30, v/v) karışımı ile karıştırılmıştır. Süspansiyon, bir ultra turax homojenleştirici (WiseTis HG-15A, Almanya) kullanılarak 100 rpm'de 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra tüpler karanlıkta 25 °C'de 6 saat ters çevrilerek bekletilmiş, ardından 10 dakika 7000 rpm'de santrifüj işlemi uygulanmıştır. Santrifüj sonrası üstte kalan sıvı süzüldü, analize kadar -70 °C'de saklanmıştır. Numunelerin TPC'si Pasha vd. (2020)'ye göre Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar gram gallik asit eşdeğeri (GAE)/100 g olarak ifade edilmiştir [81]. Antioksidan aktivitesinin belirlenmesi amacıyla elektron transferi reaksiyonuna dayanan ABTS ve DPPH yöntemleri kullanılmış ve sonuçlar mmol Trolox/100 g olarak ifade edilmiştir. DPPH ve ABTS radikal aktiviteleri sırasıyla Alaşalvar ve Çam (2020) ve Severcan vd. (2020)'nin metotları kullanılarak hesaplanmıştır [82,83].

Yağ ekstraksiyonu, Fu vd. (2016)'da tanımlanan metotta küçük bir değişiklikle yapılmıştır [7]. Bu amaçla, öğütülmüş ceviz bir deney tüpünde petrol eteri (1: 2, w/v) ile karıştırılmıştır. Daha sonra süspansiyon, bir ultra turax homojenleştirici (WiseTis HG-15A, Almanya) kullanılarak karıştırılmıştır. Deney tüplerinin ağzı hemen kapatılmış ve bir çalkalayıcı-inkübatörde (WiseCube® WIS-20, Daihan Scientific, Güney Kore) 100 rpm'de 25 °C'de 12 saat karanlıkta çalkalanmıştır. Daha sonra karışım süzülmüş ve ekstraksiyon işlemi aynı koşullar altında 8 saat boyunca bir kez daha tekrarlanmıştır. Süzülen sıvı toplanmış ve bir

Heidolph Hei-Vap buharlaştırıcısı (Heidolph, Schwabach, Almanya) kullanılarak buharlaştırılmıştır. Serbest yağ asidi (%), peroksit değeri, K_{232} (konjuge dienler) ve K_{270} (konjuge trienler) değerleri standart yöntemler [84] kullanılarak belirlenmiştir. Sabunlaşma değeri ve iyot değeri, sırasıyla AOCS CD 3a-94 ve 1c-85'e göre yağ asidi bileşimi kullanılarak hesaplanmıştır [84]. Ceviz yağı örneklerinin yağ asidi bileşimi, metil esterleştirmeden sonra bir gaz kromatografisi (GC-2010, Shimadzu, Japonya) kullanılarak analiz edilmiştir [85]. Bir kapiler kolon (J&W Scientific, Folsom, CA) (60 m × 0.25 mm, 0.25 μm film kalınlığı) ve bir alev iyonlaştırmalı detektör ile donatılmış gaz kromatografı kullanılmıştır. Gaz kromatografın kolon, enjektör ve detektör sıcaklıkları sırasıyla 190, 240 ve 240 °C'dir. Taşıyıcı gaz olarak Helyum kullanılmış olup, hacimsel debisi 1 mL/dk. ve bölünme oranı 80:1 olarak ayarlanmıştır. Her bir yağ asidi, standart yağ asidi metil esterleri kromatogramlarının alıkonma süreleri karşılaştırılarak belirlenmiş ve pik alanları kullanılarak yağ asitlerinin yüzdeleri bulunmuştur. Elde edilen veriler ortalama ± standart sapma olarak ifade edilmiştir. İstatistiksel analiz IBM SPSS Statistics 24.0 (SPSS Inc., Chicago, IL) ile yapıldı. Veriler ayrıca tek yönlü bir varyans analizine (ANOVA) tabi tutulmuştur. $p < 0.05$ anlamlılık düzeyinde ortalamalar arasındaki farklılıklar Duncan testi ile belirlenmiştir.

6.5. Teorik Analiz

Bu bölüm, ürün yüzey sıcaklığı kontrol metodolojisi altında ısı geri kazanımlı infrared destekli ısı pompalı kurutucuda cevizin enerji ve ekserji analizi, performans katsayısı (COP) ve kurutma kinetiğini içermektedir.

Enerji analizi

Enerji verimliliği (EE), suyun buharlaşması için gerekli enerjinin tüketilen toplam enerjiye bölünmesiyle elde edilir. Kurutma sisteminin verimliliği, enerji ve zaman tasarrufu parametreleri Eş. (6.1), Eş. (6.2) ve Eş. (6.3) kullanılarak hesaplanır.

$$EE = \frac{h_{fg}.m_w}{\sum E_{tüketim}} \tag{6.1}$$

Enerji ve zaman tasarrufu

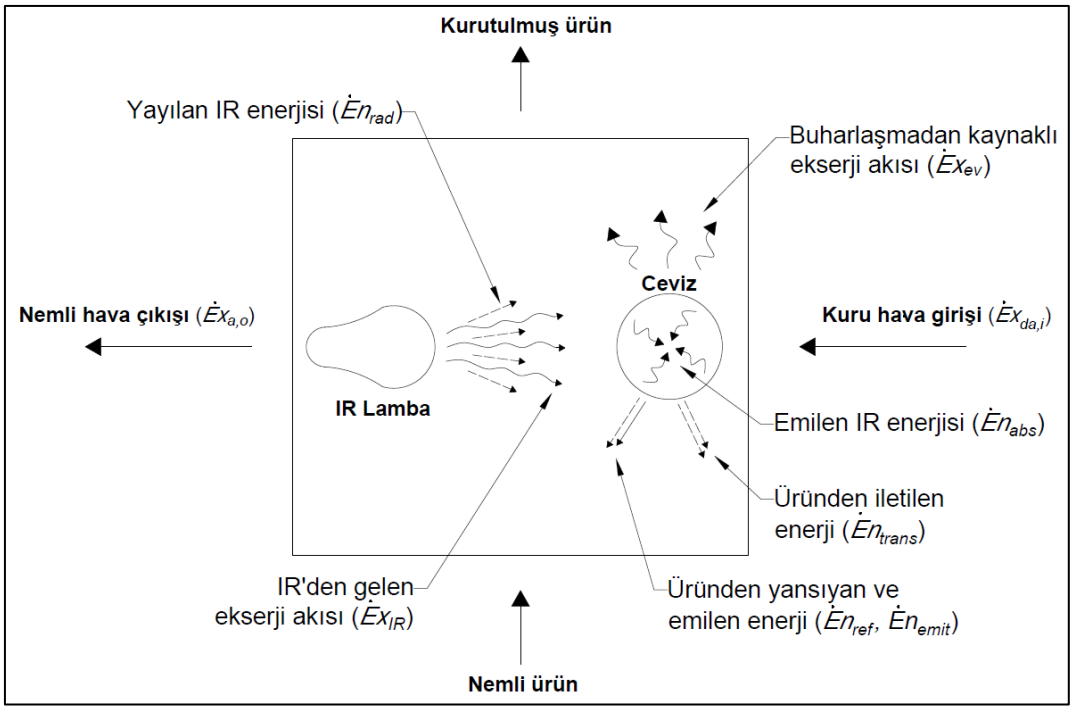
$$Enerji\ tasarrufu = \frac{konvektif\ kurutma\ enerji\ tüketimi - kombine\ kurutma\ enerji\ tüketimi}{konvektif\ kurutma\ enerji\ tüketimi} \quad (6.2)$$

$$Zaman\ tasarrufu = \frac{konvektif\ kurutma\ zamanı - kombine\ kurutma\ zamanı}{konvektif\ kurutma\ zamanı} \quad (6.3)$$

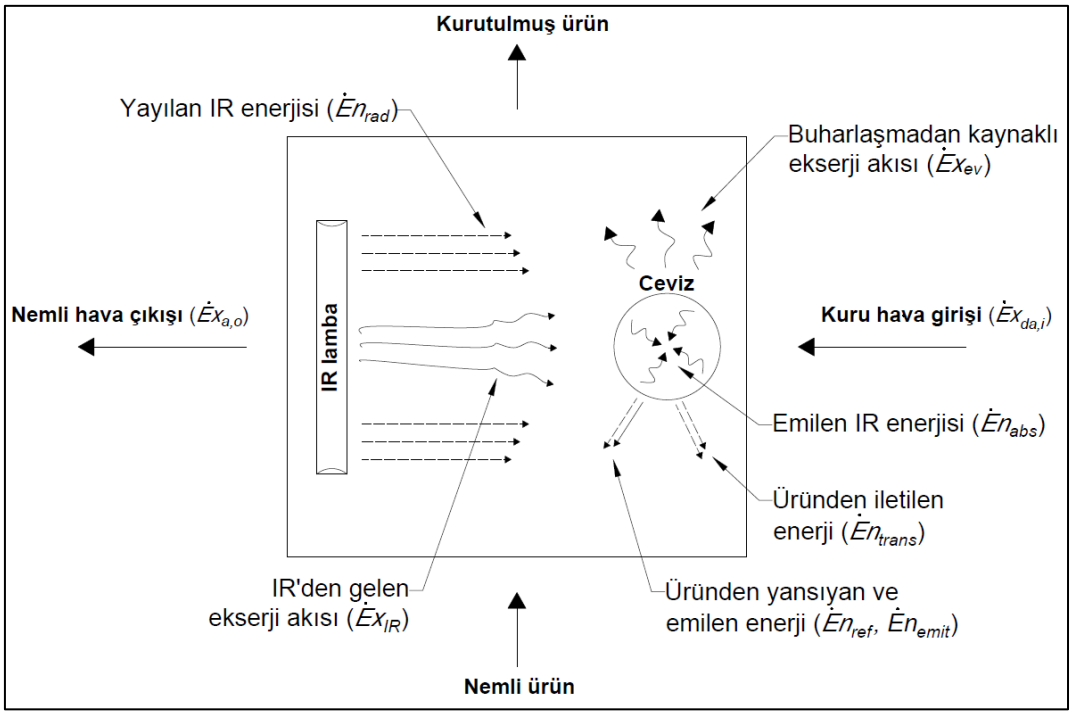
Ekserji analizi

Belirli bir termodinamik durumdaki bir sistemin ekserjisi, sistem o belirli durumdan ölü duruma (referans ortamla denge durumu olan) geçtiğinde elde edilebilecek maksimum iş miktarıdır.

Nemli ürünü kurutmak için infrared enerji ürüne yönlendirildiğinde, enerjinin bir kısmı ürün tarafından emilirken, enerjinin diğer kısmı iletilebilir, yayılabilir ve yansıtılabilir (Şekil 6.6 ve Şekil 6.7).



Şekil 6.8. IRHP şematik gösterim-Açık sistem



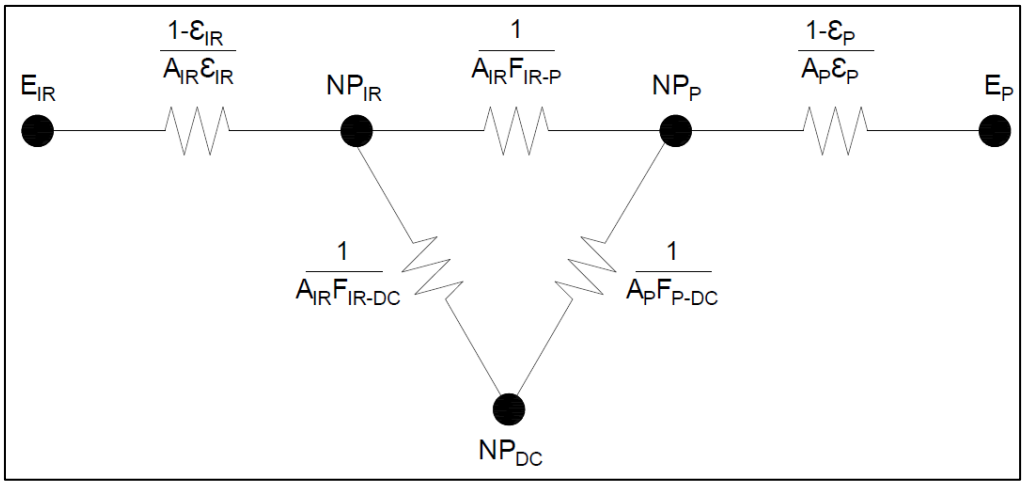
Şekil 6.9. IRHP şematik gösterim-Kapalı sistem

Şekil 6.8 ve 6.9'dan görüldüğü gibi, gelen radyasyon enerjisinin sadece bir kısmı ürün tarafından emilir. Ürün tarafından emilen enerji miktarı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{E}n_{IR,abs} = \dot{E}n_{IR,rad} - \dot{E}n_{IR,ref} - \dot{E}n_{IR,emit} - \dot{E}n_{IR,trans} \tag{6.4}$$

Cevize verilen IR enerjisi miktarı Eş. 6.5 ile hesaplanabilir. Eş. 6.5'te kullanılan kurutma odası, ürün ve kaynak arasındaki infrared radyasyon ağı Şekil 6.10'da verilmiştir [86].

$$\dot{E}n_{IR,abs} = \frac{\sigma\left({T_{IR}}^4 - {T_P}^4\right)}{\frac{1-\varepsilon_{IR}}{A_{IR}\varepsilon_{IR}} + \frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{1}{A_{IR}F_{IR-P}}}\right) + \left(\frac{1}{\frac{1}{A_{IR}F_{IR-DC}} + \frac{1}{A_PF_{P-DC}}}\right)} + \frac{1-\varepsilon_P}{A_P\varepsilon_P}} \tag{6.5}$$



Şekil 6.10. Bir kurutma odası için infrared radyasyon ağı

Ekserji analizinde daha güvenilir sonuçlar için ekserji değeri, enerji değeriyle ilişkilendirilmelidir. Dolayısıyla ekserji değerinin enerji değerine bölünmesiyle bulunan bir kalite faktörü β kullanılır [87]. Şu şekilde tanımlanabilir:

$$\beta = 1 + \frac{1}{3}\left(\frac{T_0}{T_{IR}}\right)^4 \varepsilon_{IR}{}^{-1} - \frac{4}{3}\varepsilon_{IR}{}^{-0.25}\left(\frac{T_0}{T_{IR}}\right) \tag{6.6}$$

Bu sebeple,

$$\dot{E}x_{abs} = \beta . \dot{E}n_{IR,abs} \tag{6.7}$$

Sınır koşullarına göre, bir kurutma sisteminin ekserji denge denklemi Eş. 6.8'de gösterildiği gibi yazılabilir:

$$\frac{m_d(ex_{P,o} - ex_{P,i})}{dt} = \dot{E}x_{da,i} - \dot{E}x_{da,o} + \dot{E}x_{abs} + \dot{E}x_{ev} - \dot{E}x_{des} \tag{6.8}$$

Nemli havanın ekserji hızı şu şekilde hesaplanabilir [88]:

$$\dot{E}x_{da} = \dot{m}_{da}((\overline{C}_p(T_{da} - T_0)) - T_0((\overline{C}_p ln\frac{T_{da}}{T_0}) - (R_{da} + \omega_{da}R_v)ln\frac{P_{da}}{P_0}) + T_0((R_{da} + \omega_{da}R_v)ln\frac{1+1.6078\omega_0}{1+1.6078\omega_{da}}) + 1.6078\omega_{da}R_a ln\frac{\omega_{da}}{\omega_0})) \tag{6.9}$$

$\overline{C}_p$ nemli havanın ortalama özgül ısısıdır ve şu şekilde tanımlanır:

$$\overline{C}_p = C_{p,da} + \omega_{da}.C_{p,v} \tag{6.10}$$

Bir IR lambasının ekserji akısı şu şekilde çözülebilir [89]:

$$EX_{IR} = \sigma T_{IR}^4 \left(\varepsilon_{IR} + \frac{1}{3}\left(\frac{T_0}{T_{IR}}\right)^4 - \frac{4}{3}\varepsilon_{IR}^{\frac{3}{4}}\left(\frac{T_0}{T_{IR}}\right)\right) = \beta.EN_{IR} \tag{6.11}$$

Ayrıca, enerji akısı (EN_{IR}) şu şekilde tanımlanabilir:

$$EN_{IR} = \varepsilon_{IR}\sigma T_{IR}^4 \tag{6.12}$$

Nemli üründeki suyun buharlaşması için kullanılan ekserji hızı şu şekilde hesaplanabilir [87]:

$$\dot{E}x_{ev} = (1 - \frac{T_0}{\bar{T}_P})h_{fg}.(m_w)_{ev} \tag{6.13}$$

HP için ekserji verimliliği Eş. 6.14 ile hesaplanabilir. IRHP için ekserji verimliliği, suyun buharlaşması için harcanan ekserjinin üründen toplam emilen IR ekserjisine ve kurutma odasının giriş havasının ekserjisine bölünmesiyle hesaplanabilir (Eş. 6.15):

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{ev}}{\dot{E}x_{da,i}} x100 \tag{6.14}$$

$$\eta_{ex} = \frac{Buharlaşma\ ekserjisi\ transfer\ hızı}{Giriş\ kuru\ hava\ ekserjisi + \text{Ürün}\ tarafından\ absorbe\ edilen\ ekserji} \tag{6.15}$$

veya,

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{ev}}{\dot{E}x_{da,i} + \dot{E}x_{abs}} x100 \tag{6.16}$$

Etkin nem yayılımı

Etkin nem yayılımını ölçmenin en kapsamlı yöntemi, deneysel olarak Fick'in ikinci kanun çözümüne dayanan kurutma eğrileridir. Küresel geometri için şu şekilde tanımlanabilir [90]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_e.\left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r}.\frac{\partial X}{\partial t}\right) \quad (6.17)$$

Cevizin etkin nem yayılımı, göz ardı edilebilir hacimsel büzülme ile küresel şekil varsayılarak Fick difüzyon denklemine dayalı olarak hesaplanmıştır [6,8]. Aşağıdaki önemli varsayımlar yapılmıştır: sabit bir difüzyon katsayısı (D_e), Fick'in tek boyutlu difüzyon denklemi, düzgün bir ilk nem dağılımı, küresel bir cisimde kararsız hal difüzyonu, ürün içindeki sıcaklık sabittir ve kütle taşınımında temel itici güç, iç nem gradyanıdır. Nem oranının (MR) bir fonksiyonu olan etkin difüzyon katsayısı kurutma işleminin modellenmesinde kullanılır. Numunelerin nem oranı (MR), Eş. 6.18 kullanılarak hesaplanmıştır. Crank (1975), sonsuz seriler şeklinde küresel geometride tek boyutlu nem transferini önermiştir [91–94].

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2} exp\left(-n^2.\pi^2\frac{D_e.t}{r^2}\right) \quad (6.18)$$

burada, X_e, kurutma işleminin sonundaki nem içeriğidir ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$) (yaklaşık % 12 X_{kb}). Kuruma süresi uzun olduğunda, Eş. 6.18 şu şekilde basitleştirilebilir [8,93]:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} exp\left(\frac{-\pi^2.D_e.t}{r^2}\right) \quad (6.19)$$

Kütle transfer katsayısı

Kütle transfer katsayısı, kütle transfer hızını hesaplamak için kullanılır ve Biot numarası ile hesaplanabilir:

$$Bi = \frac{h_m L}{D_e} \quad (6.20)$$

L karakteristik uzunluktur ve kürenin hacmini kürenin alanına bölerek elde edilir. Ayrıca Biot sayısı Dincer numarası (Di) ile hesaplanabilir [95].

$$Bi = \frac{24.85}{Di^{0.375}} \tag{6.21}$$

Dinçer sayısı, infrared radyasyona maruz kalan ürünlere nem transferini ifade etmek için kullanılmıştır ve şu şekilde hesaplanabilir [96]:

$$Di = \frac{V}{k_c L} \tag{6.22}$$

$$-k_c(X_t - X_e) = DR \tag{6.23}$$

Kurutma kinetiği

Nem içeriği kuru baza (X_{kb}) göre şu şekilde hesaplanabilir:

$$X_{kb} = \left(\frac{M_i - M_d}{M_d}\right) x100 \tag{6.24}$$

Kurutma hızı (DR) şu şekilde hesaplanabilir:

$$DR = \frac{X_t - X_{t+dt}}{dt} \tag{6.25}$$

Isı pompası çevrimi

Kurutma için gerekli ısı, kondenser tarafından sağlanır. Kondenserden ısı transferi Eş. 6.26 ile hesaplanabilir. Eş. 6.27'de giriş ve çıkış havasının ortalama yoğunluğu kullanılmıştır. Kurutma odasının giriş ve çıkışındaki hava yoğunluğunun hesaplanmasına kuru hava ve su buharı dahil edilmiştir.

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_{da}.\left(h_{da,o} - h_{da,i}\right) \tag{6.26}$$

$$\dot{m}_{da} = \rho_{da,ave}.\dot{V}_{da} \tag{6.27}$$

İdeal bir soğutma çevrimi için maksimum COP, Carnot verimi ile hesaplanır:

$$COP_{carnot} = \frac{T_C}{T_C - T_E} \tag{6.28}$$

Isı pompası sistemi için COP:

$$COP_{hp} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_C} \tag{6.29}$$

Tüm kurutma sistemi için COP:

$$COP_{ts} = \frac{\dot{Q}_C.t}{\sum E_{tüketim}} \tag{6.30}$$

Sadece sıcak havalı sistemde:

$$E_{tüketim} = \left(\dot{W}_C + \dot{W}_F\right).t \tag{6.31}$$

Sıcak hava ve infrared enerjili açık sistemde:

$$E_{tüketim} = \left(\dot{W}_C + \dot{W}_F + \dot{W}_{IR}\right).t \tag{6.32}$$

Sıcak hava ve infrared enerjili kapalı sistemde:

$$E_{tüketim} = \left(\dot{W}_C + \dot{W}_F + \dot{W}_{IR} + \dot{W}_p\right).t \tag{6.33}$$

Deneylerdeki belirsizliğin hesaplanması

Belirsizlik analizi, teorik ve deneysel uygulamanın tasarımında ve değerlendirilmesinde kullanılan verimli bir yaklaşımdır. Hatalar ve belirsizlikler; termokupl, higrometre, anemometre, yük hücresi ve elektrik sayacı gibi ölçüm cihazlarından kaynaklanabileceği gibi, çevre, gözlem ve insan kaynaklı da olabilir. Deneysel belirsizlik, Holman (2011) tarafından geliştirilen metodoloji kullanılarak hesaplanır [97]:

$$W_R = \left[\left(\frac{\delta R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\delta R}{\partial x_n} w_n\right)^2\right]^{1/2} \quad (6.34)$$

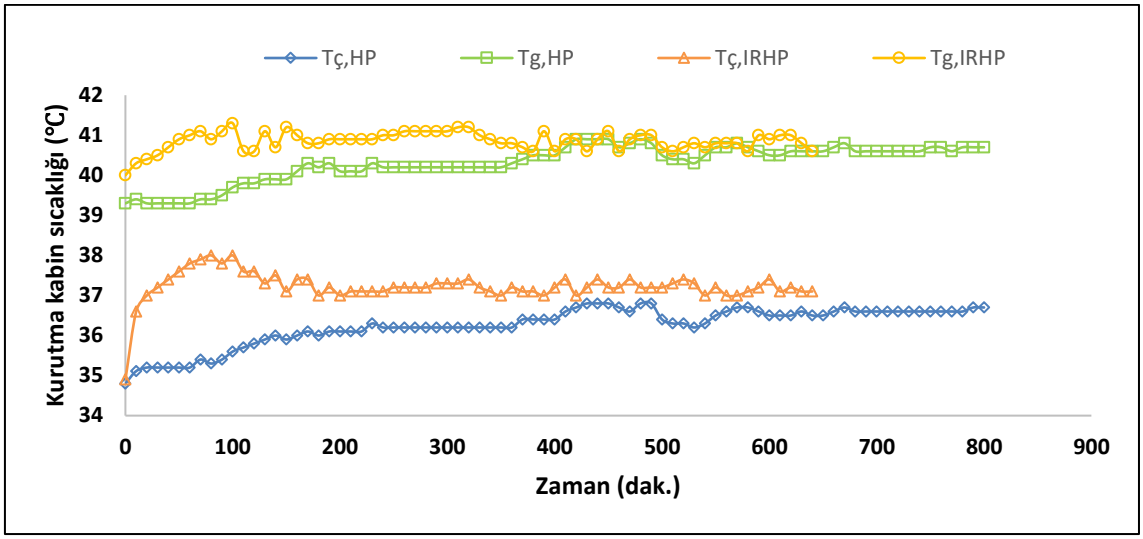
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

7.1. Sıcaklık Kontrollü Açık Sistem Konvektif İnfrared Kurutucu

2019 yılı deneyleri

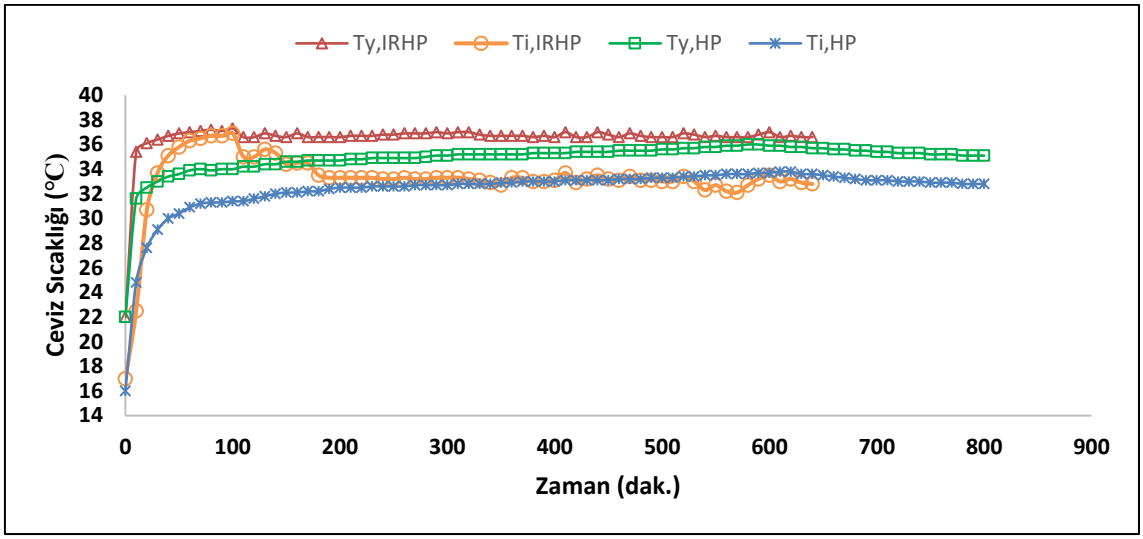
Bu çalışmada dikey bir tepside cevizin kurutulması için konveksiyon ve kombine radyasyon ve konveksiyon olmak üzere iki ısı transfer mekanizması kullanılmıştır. Homojen ısı dağılımı için ürüne iki yönde ısı nüfuz edilmiştir. Böylece kurutma sisteminin ekserji ve enerji analizi, kurutma kinetiği ve kurutucunun etkinliği üzerine ısı transfer yöntemlerinin ve ısının ürüne çift yönlü nüfuziyetinin etkileri araştırılmıştır. Bu bölümde sadece sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif kurutucu ile yapılan deneyler "HP", sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu ile yapılan deneyler "IRHP" olarak kısaltılacaktır. Açık sistem kurutucu Grup 1 olarak adlandırılmıştır.

Kuru madde miktarına göre 0,63 $g_{su}/g_{kurumadde}$ başlangıç nem içeriğine sahip cevizler 0,12 $g_{su}/g_{kurumadde}$ değerine kadar kurutulmuştur. Kurutma odası çıkış ve giriş sıcaklıkları Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Ortalama giriş sıcaklıkları sırasıyla HP ve IRHP'de 40,3 ℃ ve 40,8 olarak gözlenmiştir. HP ve IRHP'de ortalama çıkış sıcaklıkları sırasıyla 36,2 ℃ ve 37,2 ℃ olarak gözlenmiştir. Deneyler sırasında IRHP'deki giriş ve çıkış sıcaklıkları HP'den daha yüksektir. Bu, hava ve üründeki suyu ısıtan IR lambasından kaynaklanmaktadır, bu nedenle üründen daha fazla su buharlaşmıştır. Kabin çıkış sıcaklığını artırmak, evaporatör giriş sıcaklığını, COP_{HP}'yi ve kondenserden çıkan ısıyı arttıracaktır.



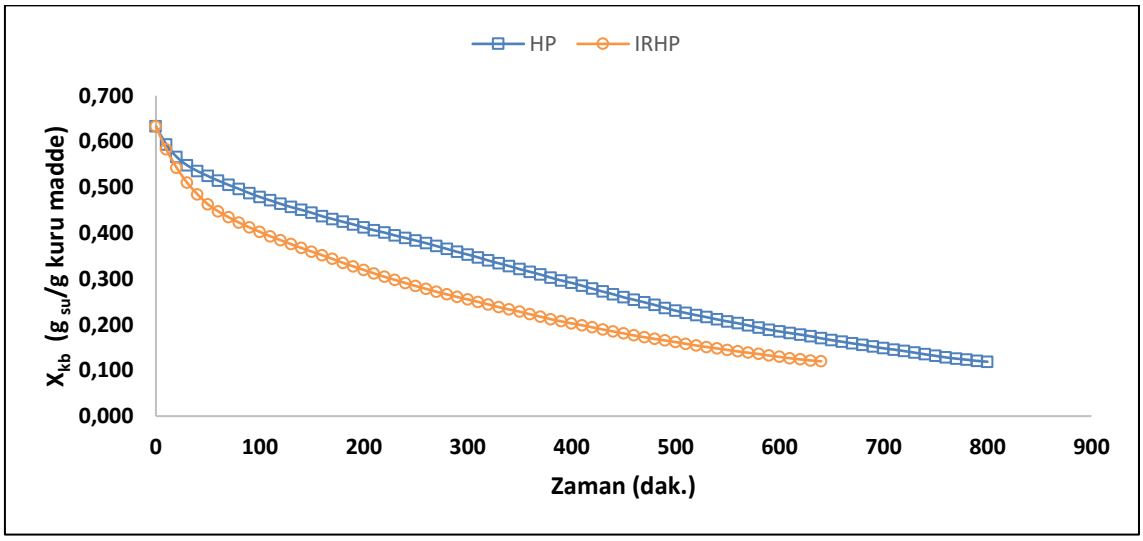
Şekil 7.1. Kurutma kabini giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi (Grup 1-2019)

Cevizin yüzey ve iç sıcaklıklarındaki zamana bağlı değişimler Şekil 7.2'de verilmiştir. Isı pompasının çalışması ile kabin sıcaklığı 40 °C'de tutulmuştur. Ortalama ürün yüzey sıcaklığı HP'de 35 °C iken IRHP'de 37 °C idi. Venkitasamy vd. (2018) IR, HA ve sıralı IR&HA ile badem kurutmuşlardır. Hava 70 °C'de üflenmesine rağmen, sıcak havayla kurutmada yüzey sıcaklığı 50-60 °C arasında değişirken, IR ile yüzey sıcaklığı 70 °C'de tutulmuştur [17]. IRHP'de IR lambası, ürün yüzeyinin 35-40 °C arasındaki set sıcaklığı değerine göre kontrol edilmiştir. Enerjinin çoğu, kurutmanın başlangıcında ürünü ısıtmak için kullanılmıştır. İstenen ayar sıcaklığına (40 °C) ulaşmak için, IR lambası 100. dakikaya kadar sadece 0,5 dakika durmuştur. Sıcak hava ile kurutmanın aksine, IR lambası ortam havasını ısıtmadan ürün içindeki suyu ısıtır. Böylelikle ürünün iç sıcaklığı ilk 100 dakikada yüzey sıcaklığına ulaşmıştır (Bkz. Şekil 7.2). 100. dakikada ayarlanan sıcaklığa ulaşıldığından, IR lambası kapanmış ve kurutmanın geri kalanında aralıklı olarak çalışmıştır. Böylece ürünün iç sıcaklığı azalmıştır. IR lambası aralıklı olarak 170. dakikaya kadar çalışmış, 180-350 dakika arasında çalışmamış ve 350-640 dakika arasında aralıklı olarak çalışmıştır. Ürünün iç sıcaklıkları HP'de 32,5 °C, IRHP'de 33,5 olarak gözlenmiştir.



Şekil 7.2. Cevizin iç ve yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi (Grup 1-2019)

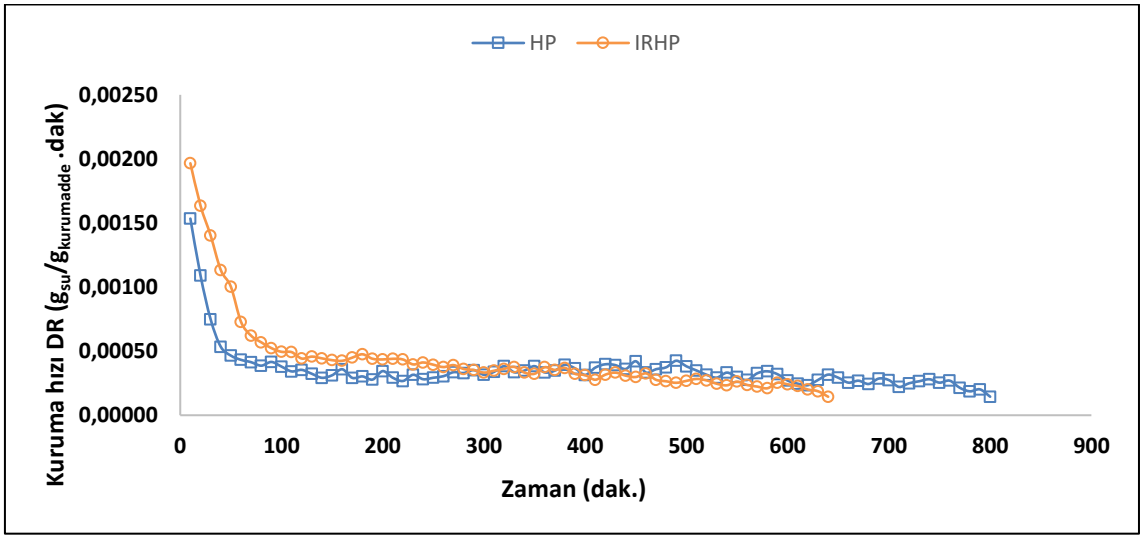
Şekil 7.3'te görülebileceği gibi, ceviz numunelerinin nem içerikleri HP kurutucuda 800 dakikada 0,633 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'den 0,12 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'ye ve IRHP kurutucuda 640 dakikada düşürülmüştür.



Şekil 7.3. Kuru baza göre nem içeriğinin zamana göre değişimi (X_{kb}) (Grup 1-2019)

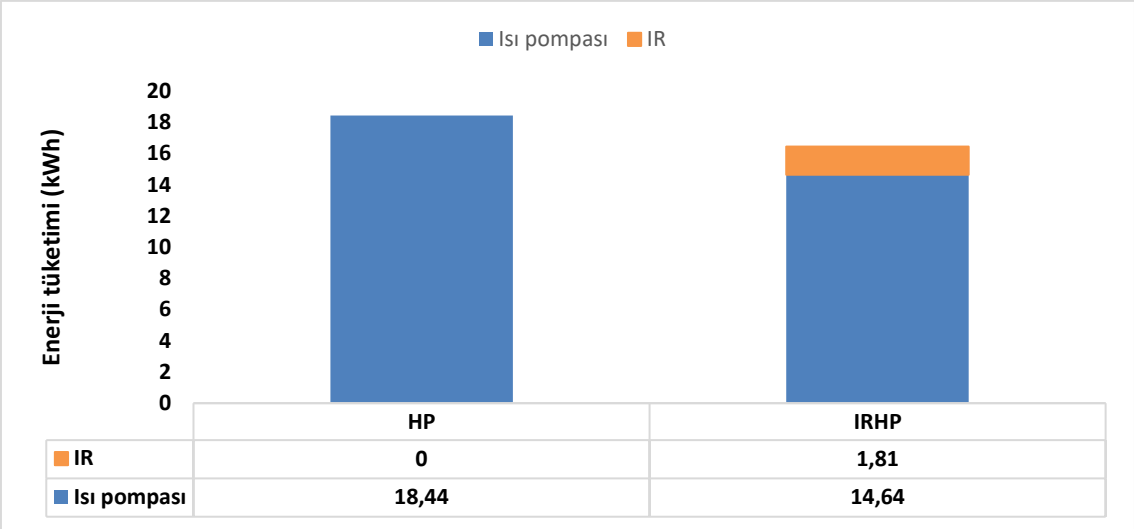
Deney sırasında kuruma hızındaki (DR) değişim Şekil 7.4'te gösterilmektedir. DR'nin değişimindeki önemli parametre radyasyon olarak tespit edilmiştir. Bu sırada ürün yüzeyinin su formunda ince bir film ile kaplandığı, suyun buharlaşmasının hava şartlarıyla kısıtlandığı varsayılıyordu. Özellikle kurutmanın ilk dönemlerinde IR ısıtmanın buharlaşma üzerindeki

etkisinin, konvektif ısıtmaya göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Isı transfer yöntemi değişikliğinin DR üzerindeki etkisi Şekil 7.4'de görülebilir.

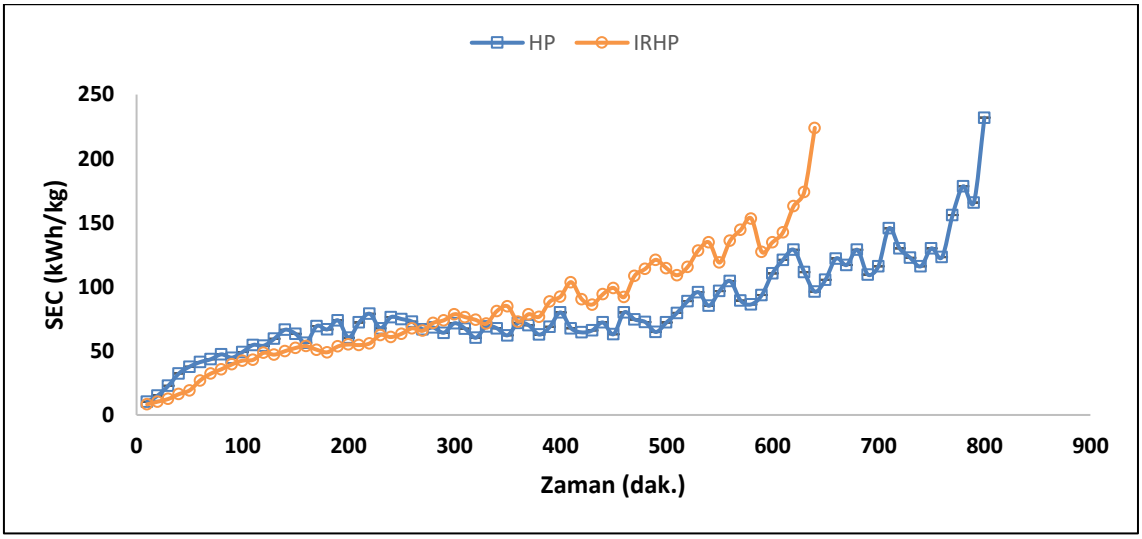


Şekil 7.4. Deneyler süresince kurutma hızının (DR) zamana göre değişimi (Grup 1-2019)

Toplam enerji tüketimi HP'de 18.44 kWh ve kuruma süresi 800 dakikadır. Isı pompası ve IR lambasının enerji tüketim değerleri IRHP'de sırasıyla 14,64 kWh ve 1,81 kWh'dir. Toplam kuruma süresi 640 dakika, infrared lamba çalışma süresi 217,6 dakikadır. Infrared lamba kullanılarak %10 enerji tasarrufu ve %20 zaman tasarrufu sağlanmıştır. Toplam enerji tüketiminin konvektif ve infrared destekli konvektif sisteme göre değişimi Şekil 7.5'te verilmiştir. Şekil 7.6'da özgül enerji tüketiminin (SEC) zamana göre değişimi verilmiştir. Kurutmanın başlarında IRHP sistemin SEC değerlerinin HP'den düşük olduğu görülmektedir. Bu durum kurumanın başlarında üründen uzaklaştırılan nem miktarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. IRHP sistemin SEC değerlerinin kurumanın sonuna doğru HP'den daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum kurutmanın sonlarında kuruma hızının düşmesi ve IR lambanın yüksek elektrik tüketiminden kaynaklanmaktadır.

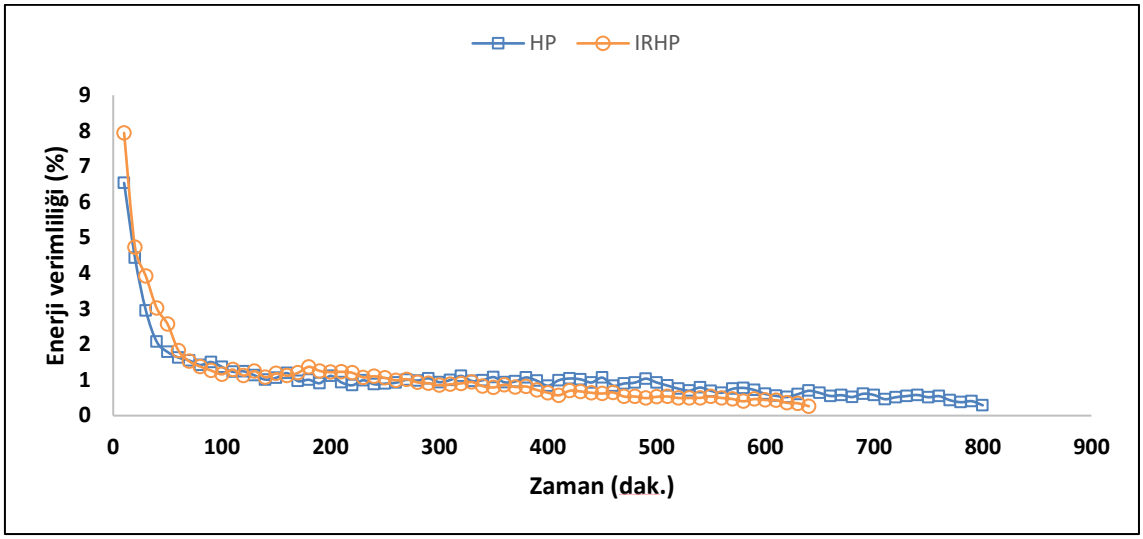


Şekil 7.5. Toplam enerji tüketiminin modellere göre değişimi (Grup 1-2019)



Şekil 7.6. Özgül enerji tüketiminin zamana göre değişimi (SEC) (Grup 1-2019)

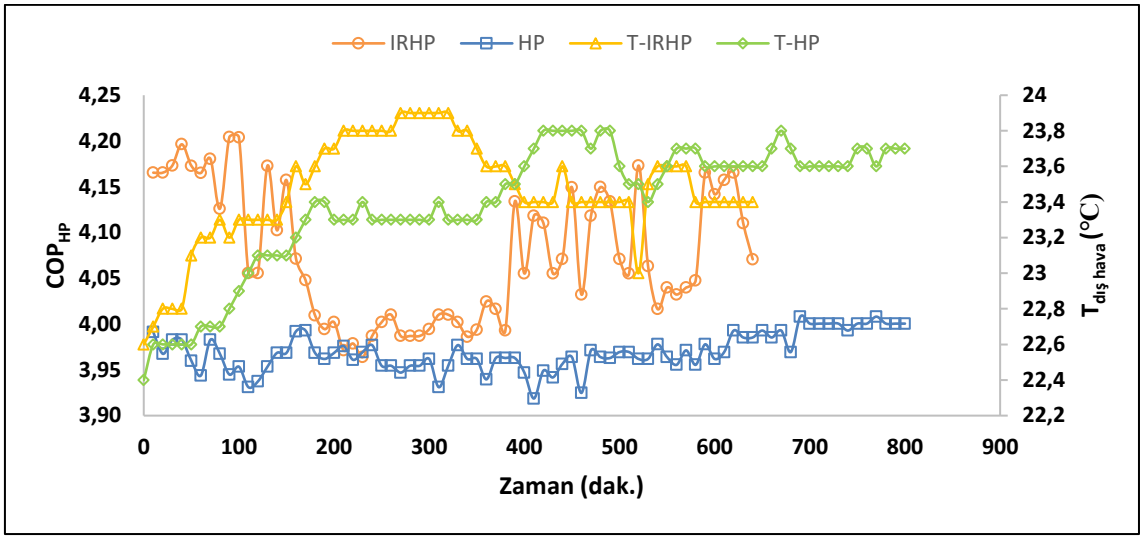
Kompresör her iki sistemde de anlık olarak yaklaşık aynı miktarda elektrik tüketmiştir. IR lambasının aralıklı çalışması nedeniyle, IRHP'deki bu zaman aralığındaki enerji tüketimi HP'den daha yüksektir. Bu nedenle bazı bölgelerde IRHP'nin EE değerlerinin Şekil 7.7'de HP'den daha düşük olduğu görülmüştür. Sisteme IR lambası eklenerek kurutma hızı artırılarak kurutma süresi ve enerji tüketimi azaltılmıştır. Böylelikle IRHP'nin enerji verimliliği artmıştır. EE değerleri IRHP'de %0,29 - 7,94 ve HP'de %0,28 - 6,54 aralığında hesaplanmıştır. Şekil 7.7'de görülebileceği gibi, kurutmanın son aşamasında üründen nem çekmek zor olduğu için EE'nin azaldığı görülmektedir.



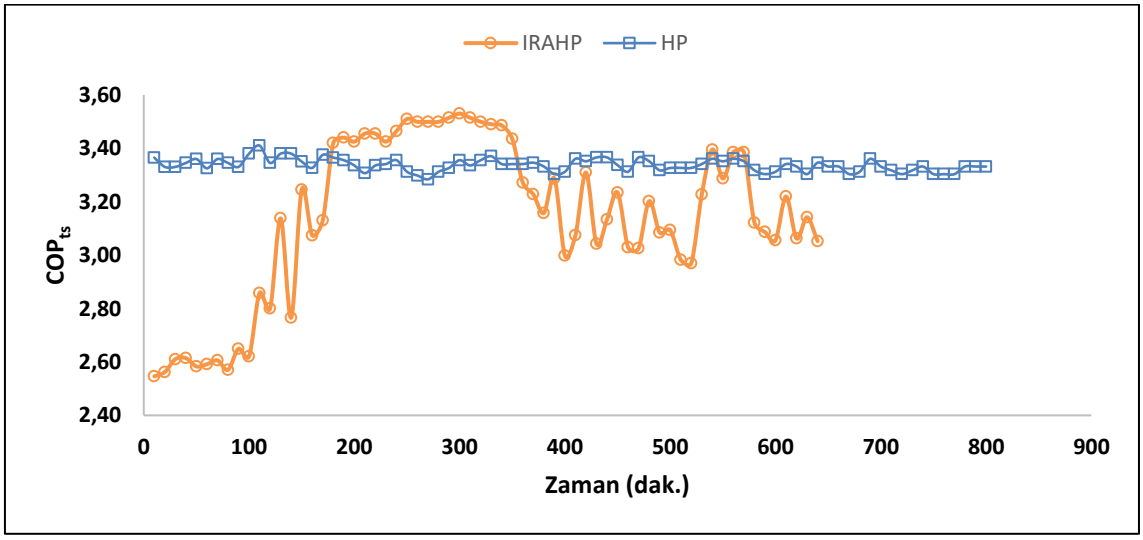
Şekil 7.7. Enerji verimliliğinin zamana göre değişimi (EE) (Grup 1-2019)

Ortalama etkin nem yayılım katsayıları (D_e), HP ve IRHP için sırasıyla 6,6612 × 10^{-8} ve 7,6827 × 10^{-8} m^2s^{-1} olarak belirlenmiştir. Chen vd. (2020) ceviz kabuğu ve çekirdek için ortalama etkin nem yayılım değerlerini sırasıyla 1,51 × 10^{-9} ile 9,28 × 10^{-9} m^2s^{-1} ve 1,13 × 10^{-9} ile 2,85 × 10^{-9} m^2s^{-1} aralığında hesaplamıştır [6]. Ortalama kütle transfer katsayıları HP ve IRHP için sırasıyla 4,7324 × 10^{-6} ve 5,7603 × 10^{-6} ms^{-1} olarak belirlenmiştir.

COP_{HP} değerlerinin ve dış hava sıcaklıklarının zamana göre değişimi Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Ortalama COP_{HP} değerleri IRHP ve HP'de sırasıyla 4,10 ve 3,97 olarak hesaplanmıştır. Hava kaynaklı ısı pompası sistemine infrared lambaların eklenmesinin ısı pompası sisteminin COP değerini arttırdığı görülmüştür. Kurutmanın sonuna doğru IR lambasının aralıklı çalışması nedeniyle COP_{HP} değerleri artmıştır. Sisteme IR lambası eklendiğinde kuruma süresi ve enerji tüketimi azalmıştır. Ancak anlık enerji tüketiminin artması nedeniyle tüm sistemin COP değeri düşmüştür. İki ısı transfer mekanizmasına göre tüm sistemin COP değerlerindeki değişim Şekil 7.9'da gösterilmektedir. IR lambanın sürekli çalışması nedeniyle kurutmanın ilk aşamasında daha düşük COP_{ts} değerleri hesaplanmıştır. Kurutmanın son aşamasında IR lambanın aralıklı çalışmasına bağlı olarak dalgalanma görülmüştür. Tüm sistemin ortalama COP_{ts} değerleri IRHP ve HP için sırasıyla 3,14 ve 3,34'tür.



Şekil 7.8. Isı pompasının performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{HP}) (Grup 1-2019)

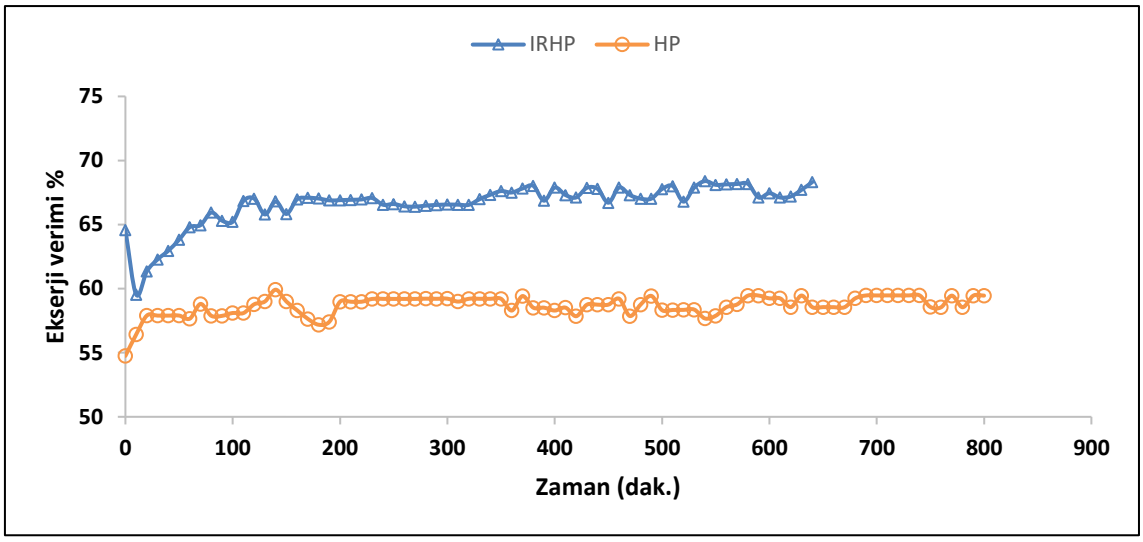


Şekil 7.9. Tüm sistemin performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{ts}) (Grup 1-2019)

Isı transfer mekanizmasına göre ekserji verimliliğindeki zamana bağlı değişiklikler Şekil 7.10'da verilmiştir. Ekserji verimleri HP'de %54,76 – 59,92 ve IRHP'de %59,54 – 68,39 arasında değişmiştir. İnfrared lambalar havanın içindeki su buharını ısıttığı için kabin çıkış havası sıcaklığı HP'den daha yüksektir. İnfrared lambaların aralıklı çalışması nedeniyle, ekserji verimliliğinde dalgalanmalar görülmüştür. Ekserji verimliliği değerleri literatür ile karşılaştırıldığında kurutma havası sıcaklığı, infrared lambanın yüzey sıcaklığı ve alanı, kurutulan ürün yüzey sıcaklığı, yüzey alanı ve ürün tipi gibi parametrelerin değişmesinden dolayı değişkenlik göstermektedir.

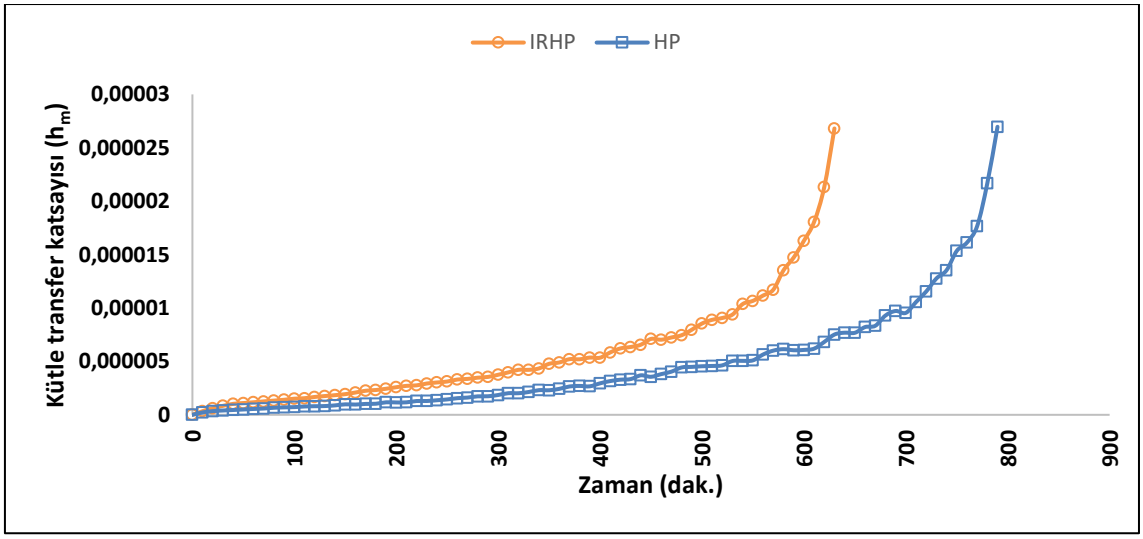
Yu vd. (2020) bağıl nem (RH) kontrol stratejisi ile havuç küpleri kurutmuşlardır. Kurutma parametreleri olarak hava sıcaklığı 60 ℃, hava hızı 1,6 m/s, hava bağıl nemi %4, 20 ve 40 seçilmiştir. Enerji ve ekserji verimliliklerini optimize etmek için bağıl nemi değiştirerek farklı kontrol stratejileri uygulamışlardır. Maksimum ekserji verimlilik değerleri %40, 20 ve 4 RH için sırasıyla %80, 70 ve 30'dur. Hava bağıl neminin %40 (2 saat), %20 (2 saat) ve %4 (3,5 saat) olarak çok aşamalı kontrolü, yüksek ekserji verimliliği (%53,3), enerji verimliliği ve zaman tasarrufu açısından en uygun strateji olarak bulunmuştur [23]. Chen vd. (2020) aşamalı olarak sıcaklığın düşürülmesinin enerji ve ekserji verimliliklerine ve ceviz kalitesine etkisini araştırmıştır. Kurutma havası sıcaklıkları 43, 55, 65 ve 75 ℃ ve hava hızı 0,7 m/s olarak seçilmiştir. Kurutmanın sonuna doğru ekserji verimi artmıştır ve %36 ile %57 arasında değişmiştir [9].

Aghbashlo (2016), kombine infrared konvektif kurutma sisteminin ekserji verimliliğini teorik olarak analiz etmiştir. IR kurutmanın ekserji verimlilik değerleri 800-1200 ℃ arasında değişen IR kaynak sıcaklığına göre %10 ile %30 arasında değişmiştir. Kombine infrared konvektif kurutma sisteminin ekserji verimlilik değerleri, giriş havasının farklı kütle akış hızlarına göre %5 ile %30 arasında değişmektedir [87]. Kuzgunkaya ve Hepbaşlı (2007) toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma kabini ile defne yaprağı kurutmuşlardır. Ekserji verimlilik değerleri 40, 45 ve 50 ℃ kurutma havası sıcaklığı için sırasıyla %81,35, 85 ve 87,48 olarak hesaplanmıştır [98]. Dincer ve Rosen (2013) havadan suya ısı pompası ünitesinin ekserji analizini araştırmıştır. Ekserji verimlilik değerleri HP ünitesi ve genel sistem için sırasıyla % 72,07 ve % 59,77 olarak hesaplanmıştır [99]. Aktaş vd. (2017) 45 ve 50 ℃ hava sıcaklığında ve 0,5 m/s hava hızında ısı pompalı kurutucu ve infrared destekli ısı pompalı kurutucu ile rendelenmiş havuç kurutmuşlardır. Kurutma sisteminin ekserji verimliliği değerleri % 31,6 ile % 66,8 arasında değişmiştir [100]. Motevali vd. (2018) hava sıcaklığı (40, 50 ve 60 ℃), hava hızı (0,4, 0,7 ve 1,0 m/s) ve infrared radyasyon (0,22, 0,31 ve 0,49 W/cm^2) parametrelerinin çeşitli kombinasyonlarında kuşburnu çiçeği kurutmuşlardır. En yüksek ortalama enerji ve ekserji verimlilik değerleri 0,4 m/s, 60 ℃ ve 0,49 W/cm^2 kurutma koşullarında sırasıyla % 49,92 ve % 23,65 olarak hesaplanmıştır [26]. Afzali vd. (2019) akışkan yataklı kurutucuda mantar dilimlerini kurutmuş ve infrared konvektif kurutmanın ekserji verimlilik değerlerinin %32,72 ile %63,26 arasında değiştiğini bildirmiştir [25]. Şevik vd. (2019) infrared lambalı ve infrared lambasız çift geçişli güneş hava kurutucu kullanarak elma dilimleri ve nane yaprakları kurutmuşlardır. Ekserji verimlilik değerlerinin %49,17 ile %69,35 arasında değiştiğini bildirmişlerdir [101].



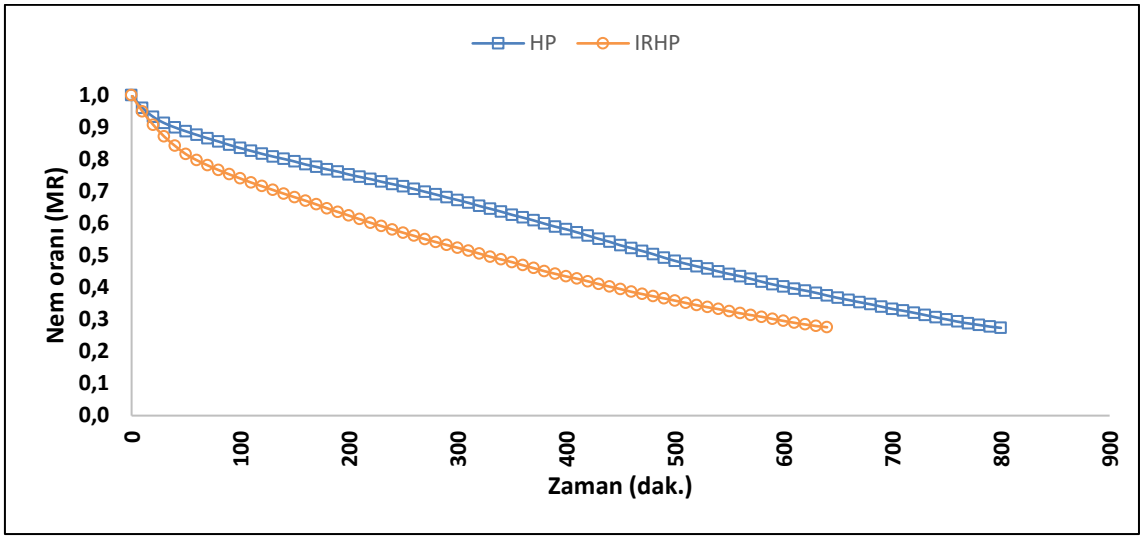
Şekil 7.10. Ekserji verimliliğinin zamana göre değişimi (Grup 1-2019)

Kütle transfer katsayısının zamana bağlı değişimi Şekil 7.11'de gösterilmiştir. İnfrared ısıtıcı eklenmesi kütle transfer katsayısını arttırarak kurumayı hızlandırmaktadır.



Şekil 7.11. Kütle transfer katsayısının zamana göre değişimi (Grup 1-2019)

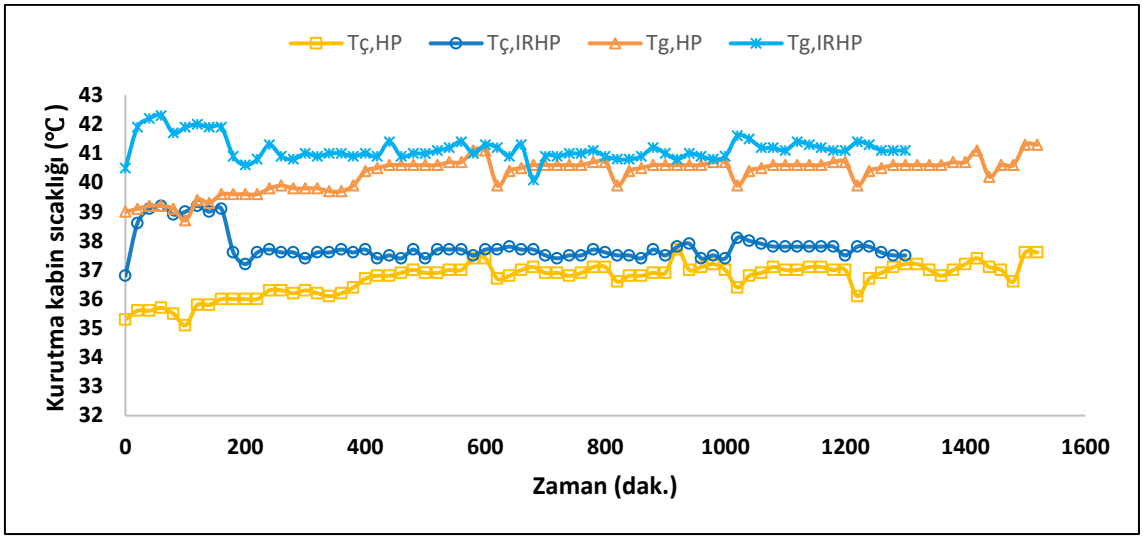
Nem oranının (MR) zamana bağlı değişimi Şekil 7.12'de gösterilmiştir. İki kurutma sistemi için MR'nin ilk değeri 1, son değeri IRHP için 0,276, HP için 0,274 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.12. Nem oranının zamana göre değişimi (Grup 1-2019)

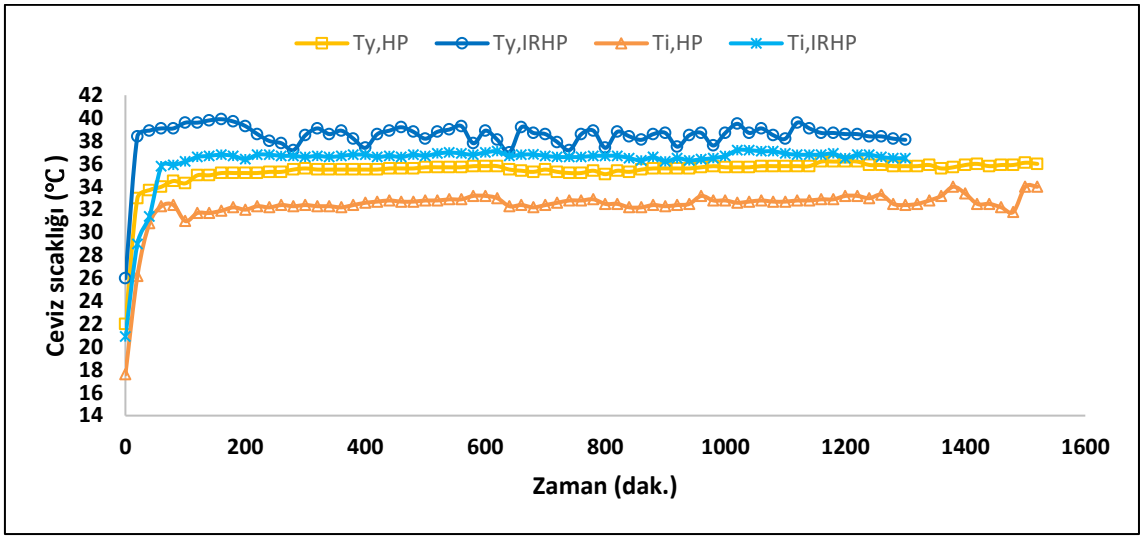
2020 yılı deneyleri

Kuru madde miktarına göre 1,12 $g_{su}/g_{kurumadde}$ nem içeriğine sahip cevizler 0,12 $g_{su}/g_{kurumadde}$ nem içeriğine (kuru baza göre) ulaşana kadar açık sistem kurutucuda sadece konveksiyon ve kombine radyasyon konveksiyon ısı taşınım metotları ile kurutulmuştur. Kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıkları Şekil 7.13'te gösterilmiştir. Ortalama giriş sıcaklıkları sırasıyla HP ve IRHP'de 40,3 ℃ ve 41,14 ℃ olarak gözlenmiştir. HP ve IRHP'de ortalama çıkış sıcaklıkları sırasıyla 36,71 ℃ ve 37,78℃ olarak gözlenmiştir. Deneyler sırasında IRHP'deki giriş ve çıkış sıcaklıkları HP'den daha yüksektir. Bu, hava ve üründeki suyu ısıtan IR lambasından kaynaklanmaktadır, bu nedenle üründen daha fazla su buharlaşmıştır. Kabin çıkış sıcaklığını artırmak, evaporatör giriş sıcaklığını, COP_{HP}'yi ve kondenserden çıkan ısıyı arttırmaktadır.



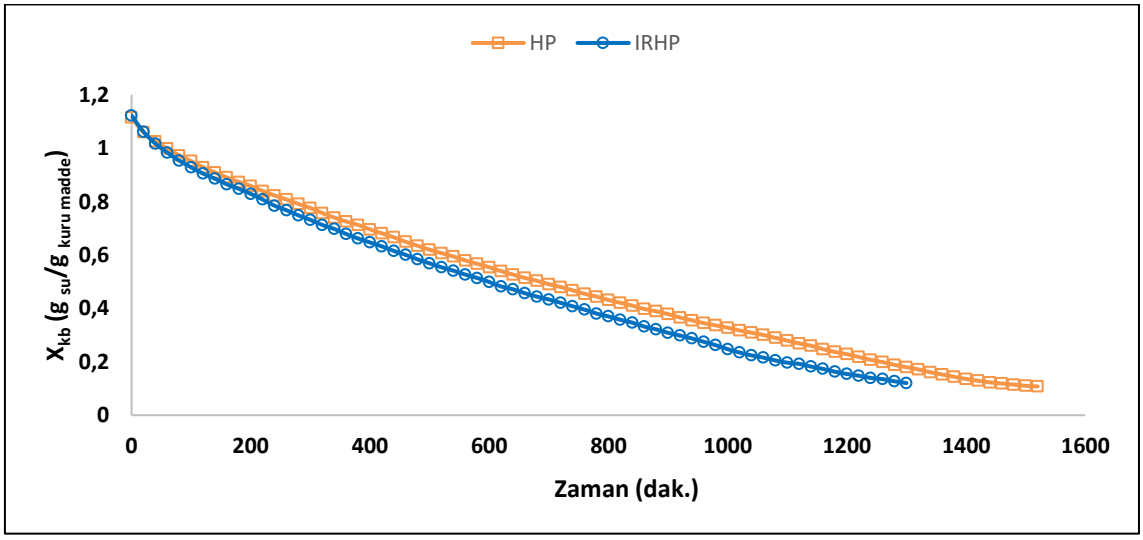
Şekil 7.13. Kurutma kabini giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi (Grup 1-2020)

Cevizin yüzey ve iç sıcaklıklarındaki zamana bağlı değişimler Şekil 7.14'te verilmiştir. Isı pompasının çalışması ile kabin sıcaklığı 40 °C'de tutulmuştur. Ortalama ürün yüzey sıcaklığı HP'de 35,34 °C iken IRHP'de 38,4 °C değerlerine sahiptir. IRHP'de IR lambası, ürün yüzeyinin 35-40 °C arasındaki set sıcaklığı değerine göre kontrol edilmiştir. Enerjinin çoğu, kurutmanın başlangıcında ürünü ısıtmak için kullanılmıştır. İstenen ayar sıcaklığına (40 °C) ulaşmak için, IR lambası 160. dakikaya kadar aralıksız çalışmıştır. Sıcak hava ile kurutmanın aksine, IR lambası ortam havasını ısıtmadan ürün içindeki suyu ısıtmaktadır. Böylelikle ürünün iç sıcaklığı ilk 160 dakikada yüzey sıcaklığına ulaşmıştır. (Bkz. Şekil 7.14). 160. dakikada ayarlanan sıcaklığa ulaşıldığından, IR lambası kapanmış, böylece ürünün iç sıcaklığı azalmıştır. IR lambası 820-1000 ve 1140-1300 dakika arasında çalışmamış ve kurutmanın geri kalanında aralıklı olarak çalışmıştır. Ürünün iç sıcaklıkları HP'de 32,32 °C, IRHP'de 36,24 olarak gözlenmiştir.



Şekil 7.14. Cevizin iç ve yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi (Grup 1-2020)

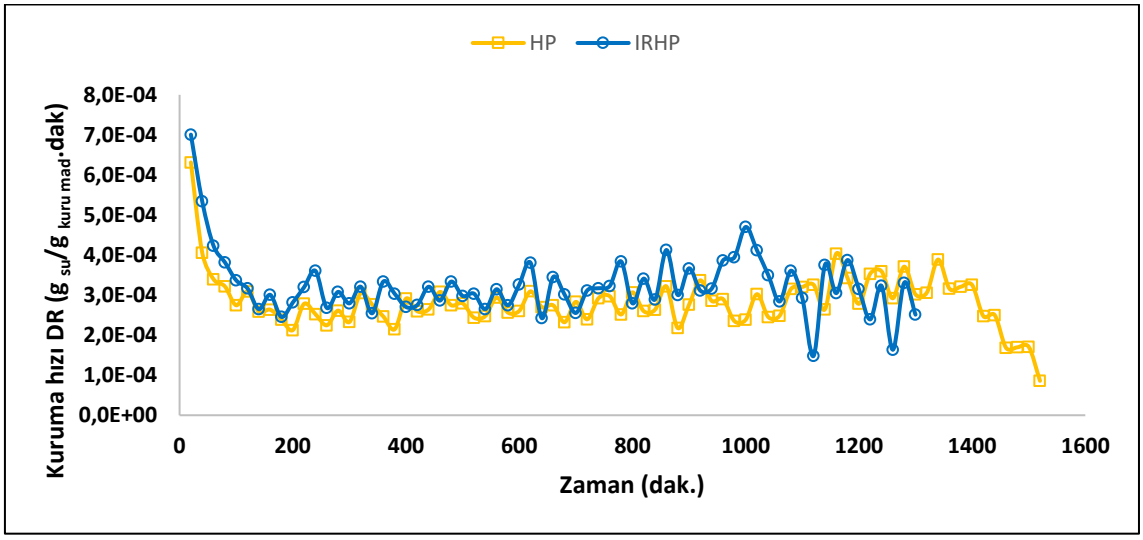
Şekil 7.15'te görülebileceği gibi, ceviz numunelerinin nem içerikleri HP kurutucuda 1520 dakikada 1,12 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'den 0,12 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'ye ve IRHP kurutucuda 1300 dakikada düşürülmüştür.



Şekil 7.15. Kuru baza göre nem içeriğinin zamana göre değişimi (X_{kb}) (Grup 1-2020)

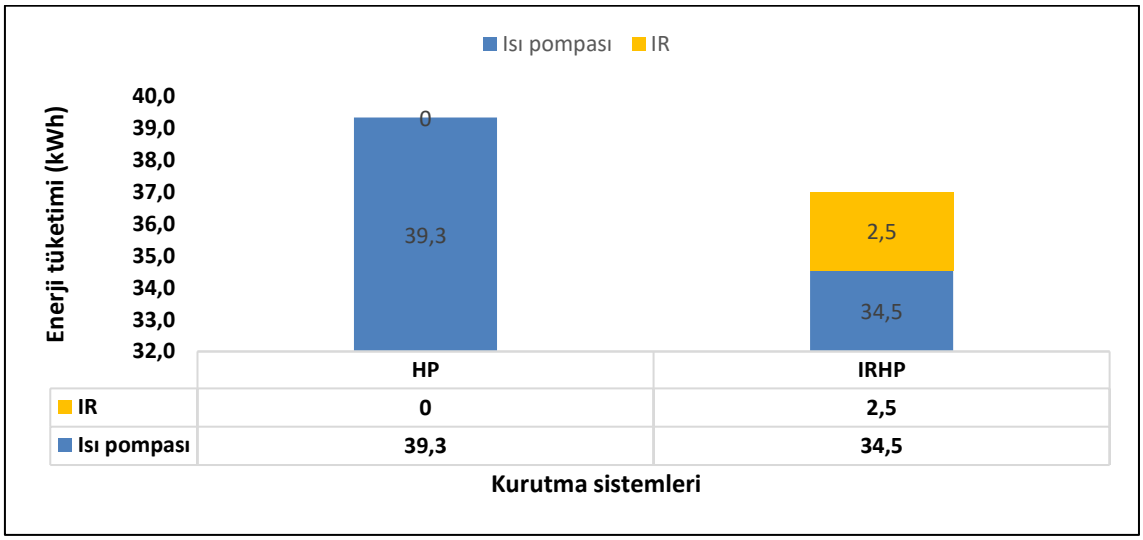
Deney sırasında kuruma hızındaki (DR) değişim Şekil 7.16'da gösterilmektedir. DR'nin değişimindeki önemli parametre radyasyon olarak tespit edilmiştir. Bu sırada ürün yüzeyinin su formunda ince bir film tabaka ile kaplandığı, suyun buharlaşmasının hava şartlarıyla kısıtlandığı varsayılmaktadır. Özellikle kurutmanın ilk dönemlerinde IR ısıtmanın

buharlaşma üzerindeki etkisi, konvektif ısıtmaya göre daha yüksektir. Isı transfer yöntemi değişikliğinin DR üzerindeki etkisi Şekil 7.16'da görülebilir.



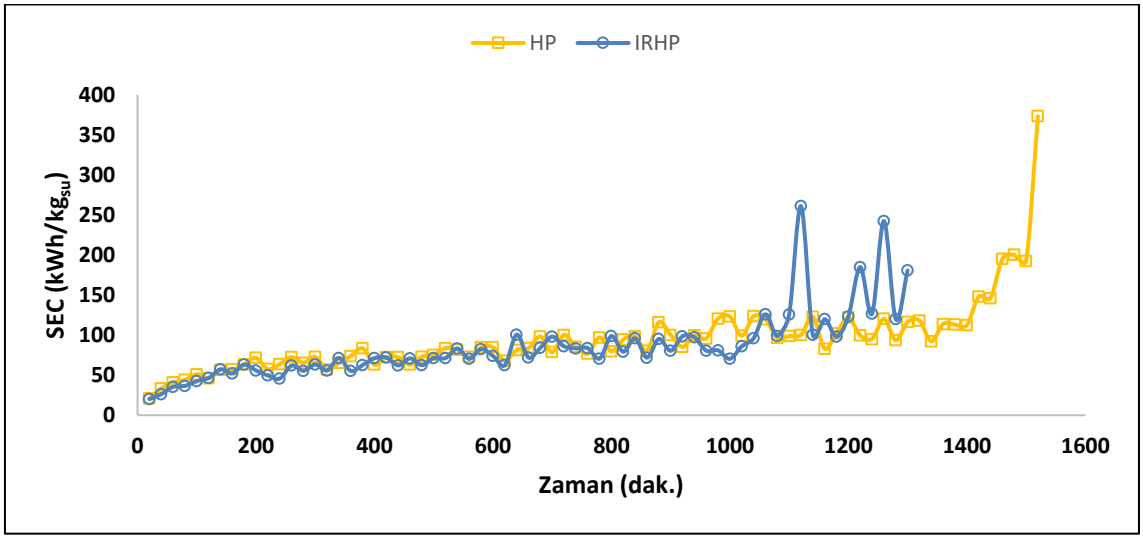
Şekil 7.16. Deneyler süresince kurutma hızının zamana göre değişimi (DR) (Grup 1-2020)

Toplam enerji tüketimi HP'de 39,3 kWh ve kuruma süresi 1520 dakikadır. Isı pompası ve IR lambasının enerji tüketim değerleri IRHP'de sırasıyla 34,5 kWh ve 2,5 kWh'dir. Toplam kuruma süresi 1300 dakika, infrared lamba çalışma süresi 294,05 dakikadır. İnfrared lamba kullanılarak %5,85 enerji tasarrufu ve %14,5 zaman tasarrufu sağlanmıştır. Toplam enerji tüketiminin konvektif ve infrared destekli konvektif sisteme göre değişimi Şekil 7.17'de verilmiştir.



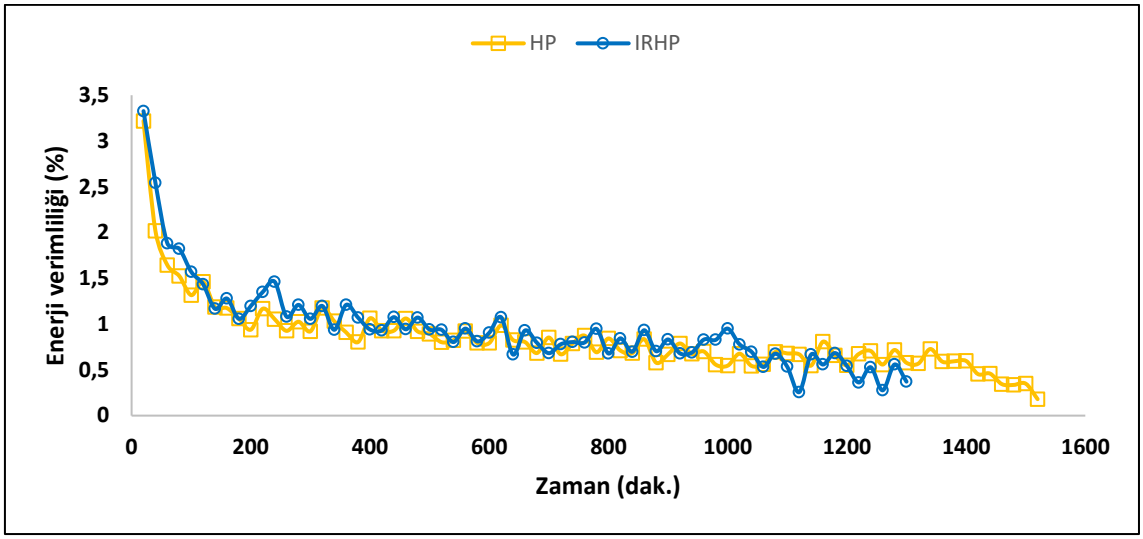
Şekil 7.17. Toplam enerji tüketiminin modellere göre değişimi (Grup 1-2020)

HP ve IRHP sisteminde özgül enerji tüketiminin (SEC) zamana göre değişim grafiği Şekil 7.18'de verilmiştir.



Şekil 7.18. Özgül enerji tüketimi ve zaman grafiği (Grup 1-2020)

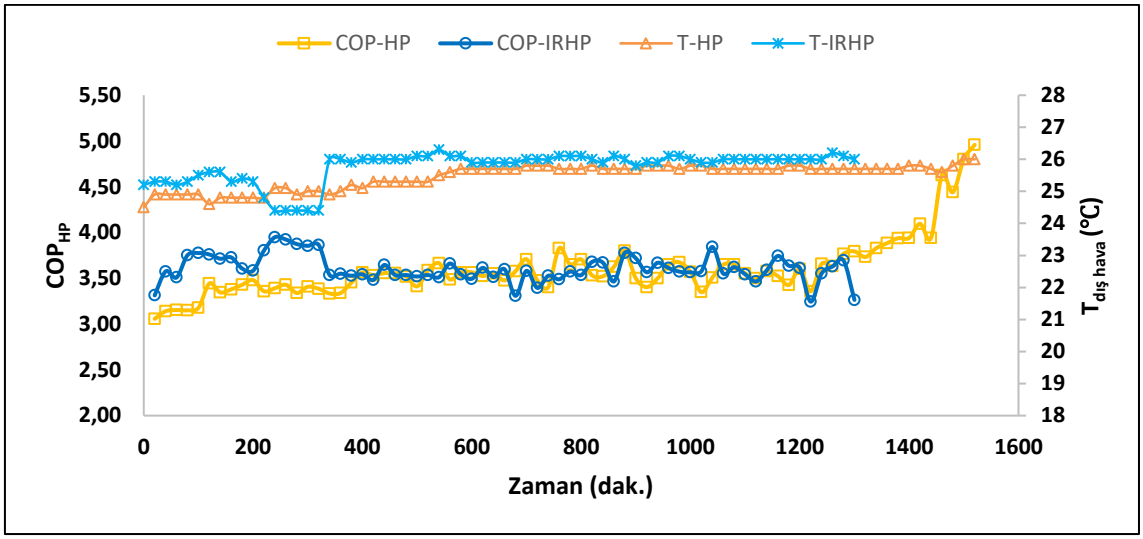
Kompresör her iki sistemde de anlık olarak yaklaşık aynı miktarda elektrik tüketmiştir. IR lambasının aralıklı çalışması nedeniyle, IRHP'deki bu zaman aralığındaki enerji tüketimi HP'den daha yüksek olmuştur. Bu nedenle bazı bölgelerde IRHP'nin enerji verimliliği (EE) değerlerinin Şekil 7.19'da HP'den daha düşük olduğu görülmüştür. Sisteme IR lambası eklendiğinde kurutma hızı artmış, kurutma süresi ve enerji tüketimi azalmıştır. Böylelikle IRHP'nin EE değerleri artmıştır. EE değerleri IRHP'de %0,26-3,33 ve HP'de %0,18-3,22 aralığında değişmiştir. Şekil 7.19'da görülebileceği gibi, kurutmanın son aşamasında üründen nemi uzaklaştırmak zor olduğu için EE azalmıştır.



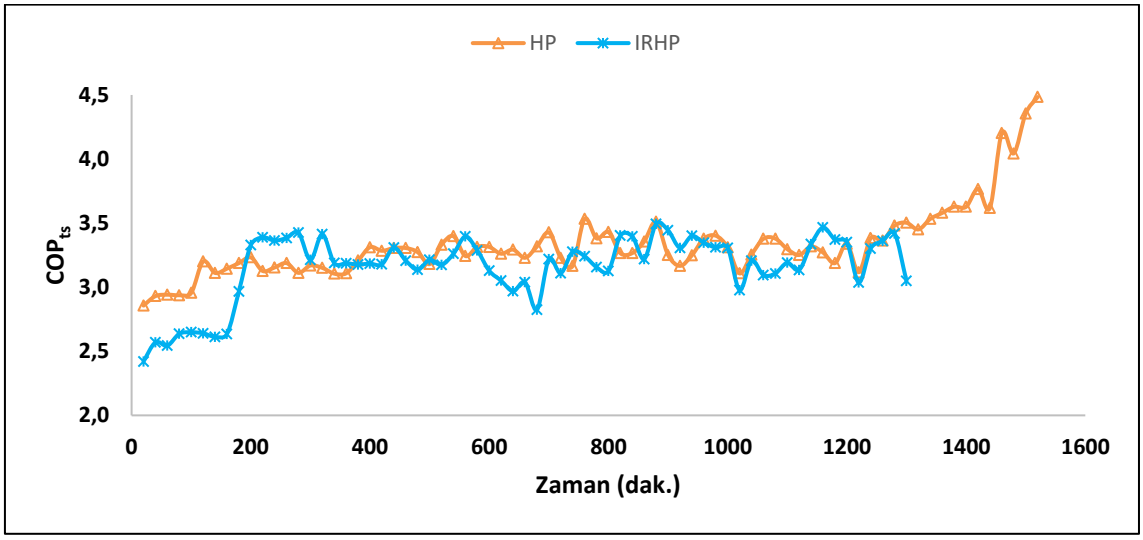
Şekil 7.19. Enerji verimliliğinin zamana göre değişimi (EE) (Grup 1-2020)

COP_{HP} değerlerinin ve dış hava sıcaklıklarının zamana göre değişimi Şekil 7.20'de gösterilmiştir. Ortalama COP_{HP} değerleri IRHP ve HP'de sırasıyla 3,60 ve 3,60 olarak hesaplanmıştır. Hava kaynaklı ısı pompası sistemine infrared lambaların eklenmesinin ısı pompası sisteminin COP değerini etkilemediği görülmüştür. Set sıcaklığına ulaşılana kadar IR lamba sürekli çalışmış, set sıcaklığı elde edildikten sonra aralıklı olarak çalışmasına devam etmiştir. HP sistemi için minimum ve maksimum COP_{HP} değerleri 3,05 ve 4,95, IRHP sistemi için minimum ve maksimum COP_{HP} değerleri 3,24 ve 3,94'dır.

Ancak anlık enerji tüketiminin artması nedeniyle tüm sistemin COP değeri düşmüştür. İki ısı transfer mekanizmasına göre tüm sistemin COP değerlerindeki değişim Şekil 7.21'de gösterilmektedir. IR lambanın sürekli çalışması nedeniyle kurutmanın ilk aşamasında daha düşük COP_{ts} değerleri hesaplanmıştır. Kurutmanın geri kalanında IR lambanın aralıklı çalışmasına bağlı olarak dalgalanma görülmüştür. Tüm sistemin ortalama COP_{ts} değerleri IRHP ve HP için sırasıyla 3,16 ve 3,33'tür. Sisteme IR lambası eklendiğinde kuruma süresi ve enerji tüketimi azalmıştır.

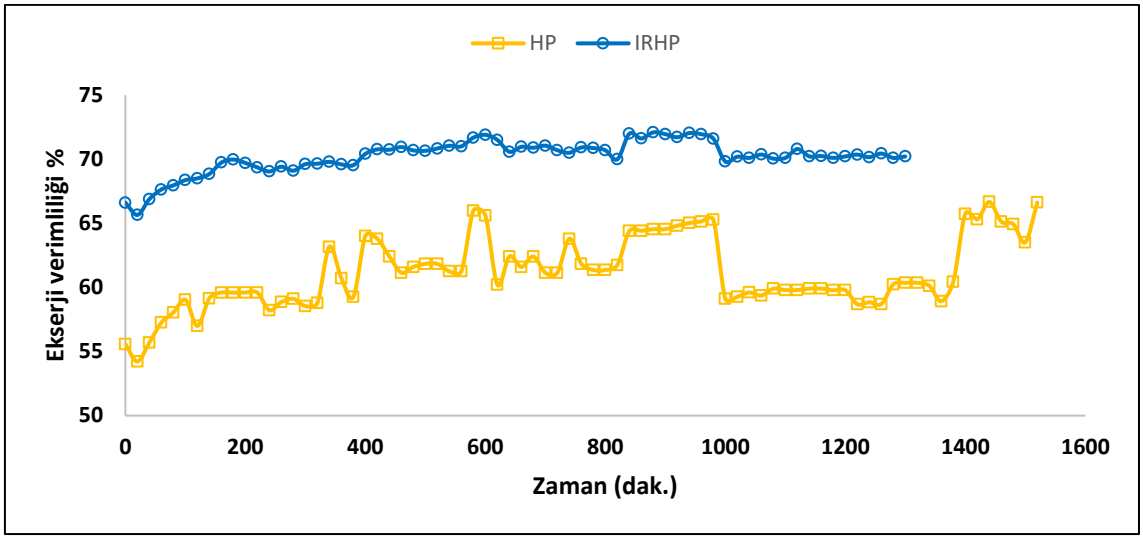


Şekil 7.20. Isı pompasının performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{HP}) (Grup 1-2020)



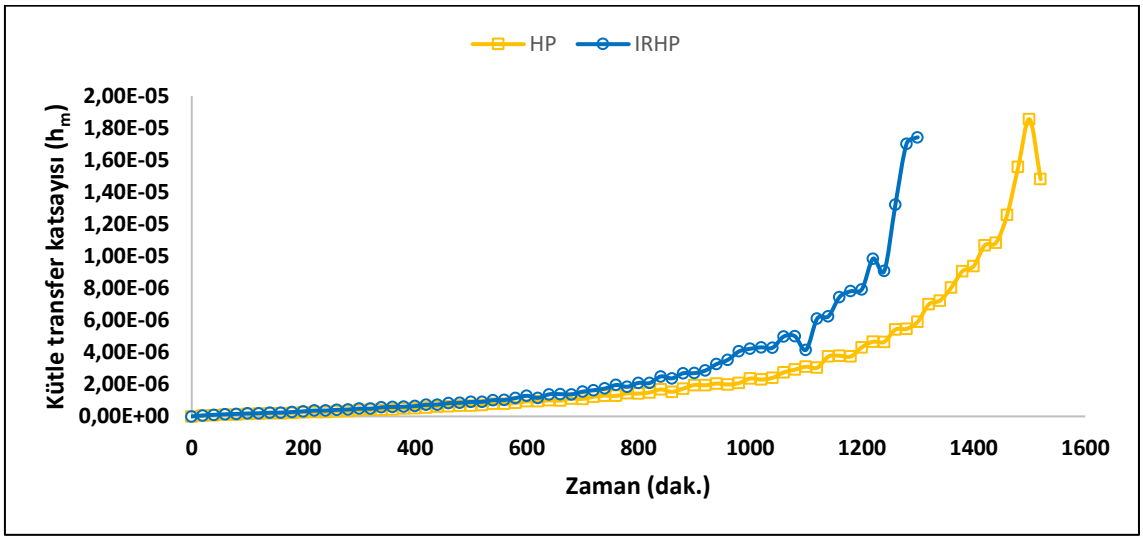
Şekil 7.21. Tüm sistemin performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{ts}) (Grup 1-2020)

Isı transfer mekanizmasına göre ekserji verimliliğindeki zamana bağlı değişiklikler Şekil 7.22'de verilmiştir. Ekserji verimleri HP'de %54,22-66,67 ve IRHP'de %65,66-72,10 arasında değişmektedir. İnfrared lambaların aralıklı çalışması nedeniyle, ekserji verimliliğinde dalgalanmalar görülmüştür.



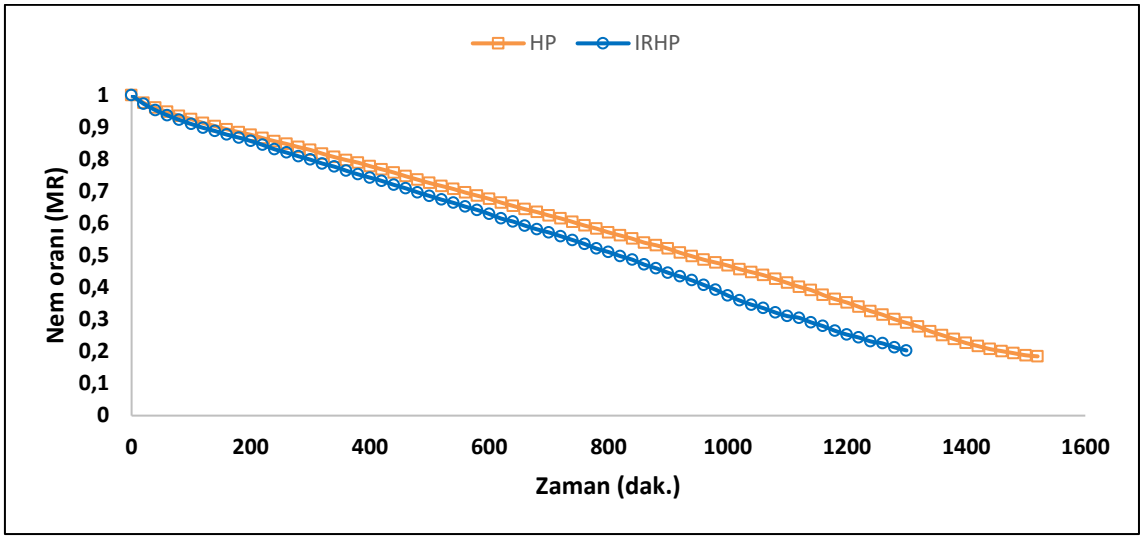
Şekil 7.22. Ekserji verimliliğinin zamana göre değişimi (Grup 1-2020)

Sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutma sisteminde ısı transfer mekanizmasına bağlı olarak kütle transfer katsayısının zamana bağlı değişimi Şekil 7.23'te gösterilmiştir. Ceviz numunelerinin nem oranlarının zamana bağlı değişimi Şekil 7.24'te verilmiştir.



Şekil 7.23. Kütle transfer katsayısının zamana göre değişimi (Grup 1-2020)

Nem oranının (MR) zamana göre değişimi Şekil 7.24'te verilmiştir. İlk MR değeri her iki sistemde 1 ile başlamış olup son değerleri IRHP'de 0,203 ve HP'de 0,185 olarak hesaplanmıştır.

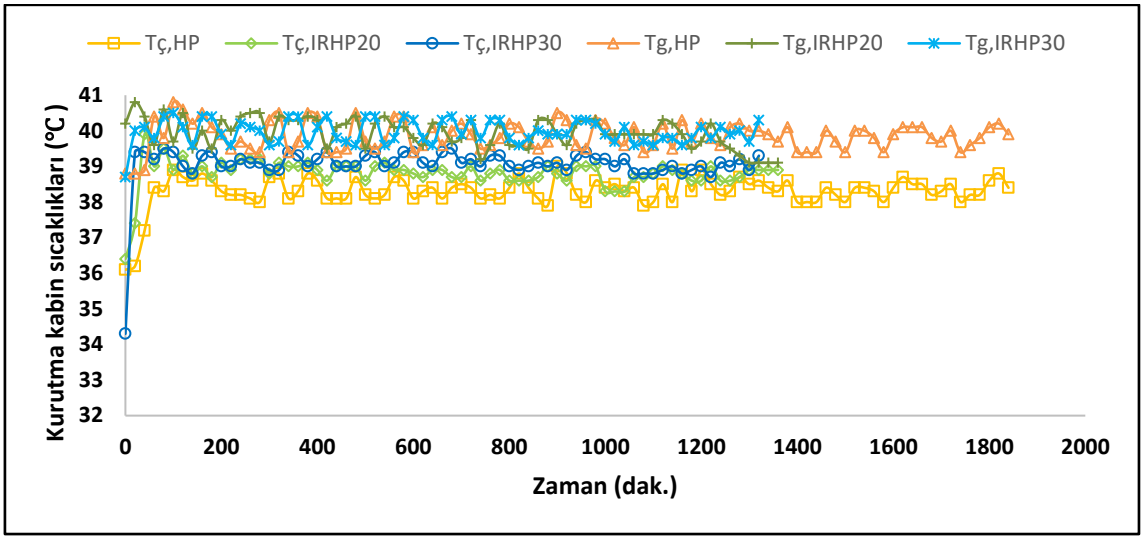


Şekil 7.24. Nem oranının zamana göre değişimi (MR) (Grup 1-2020)

7.2. Sıcaklık ve Bağıl Nem Kontrollü Kapalı Sistem Konvektif İnfrared Kurutucu

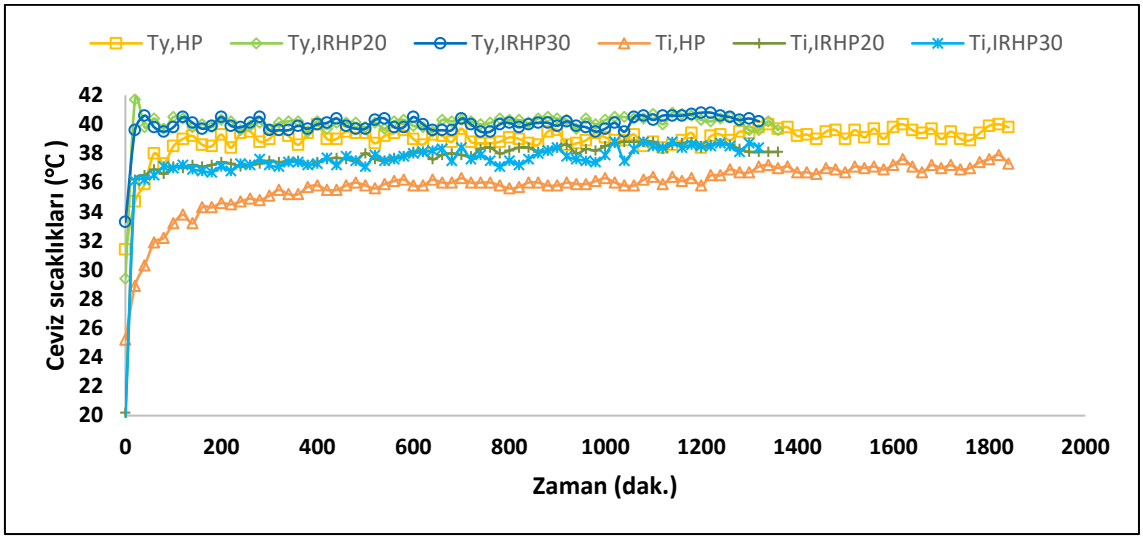
Bu çalışmada cevizin kurutulmasında konveksiyon ve kombine konveksiyon ve radyasyon olmak üzere iki ısı transfer mekanizması kullanılmıştır. Nem alma üniteli kapalı çevrimli ısı pompalı kurutucu HP, kapalı çevrimli infrared destekli nem alma üniteli ısı pompalı kurutucu ise IRHP olarak adlandırılmıştır. Kapalı çevrimli kurutma sistemi Grup 2 olarak sınıflandırılmıştır. IRHP kurutma sisteminde ürün-kaynak mesafesi değiştirilerek iki grup deney yapılmıştır. Mesafe 20 cm ise IRHP20, 30 cm ise IRHP30 olarak kısaltılmıştır.

Kurutma odası çıkış ve giriş sıcaklıkları Şekil 7.25'te gösterilmiştir. Ortalama giriş sıcaklıkları HP, IRHP20 ve IRHP30'da sırasıyla 39,8, 39,9 ve 39,9 ℃ olarak gözlenmiştir. Ortalama çıkış sıcaklıkları HP, IRHP20 ve IRHP30'da sırasıyla 38,3, 38,8 ve 39 ℃ olarak gözlenmiştir. İnfrared lambalar havanın içindeki su buharını ısıttığından, kabinin çıkış hava sıcaklığı HP'den daha yüksektir. Kabin çıkış sıcaklığının yükseltilmesi, nem alma cihazı giriş sıcaklığını artırmış ve kompresörde enerji tüketimini azaltmıştır.



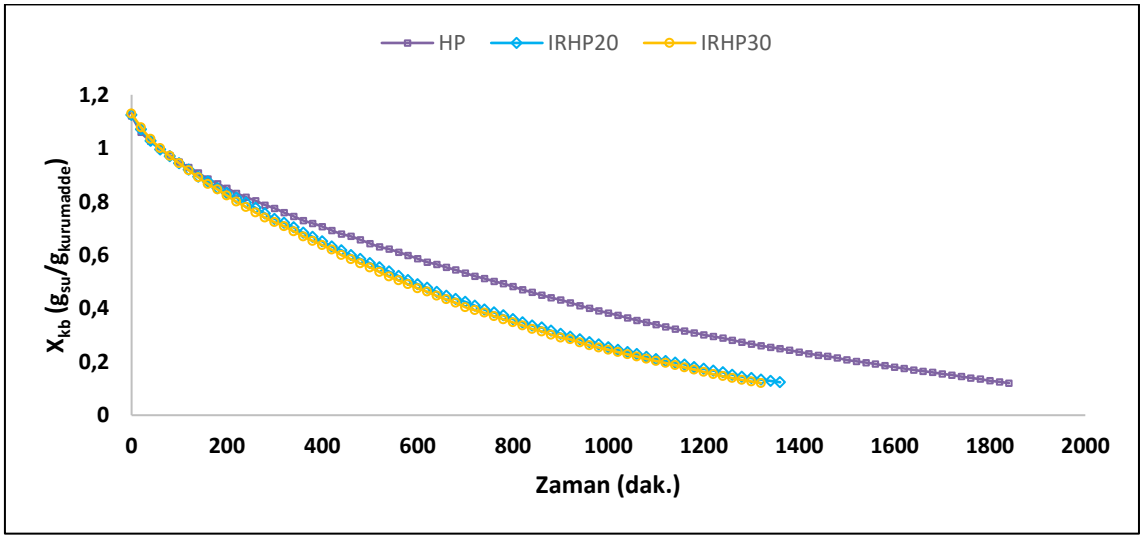
Şekil 7.25. Kurutma kabini giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi (Grup 2-2020)

Cevizin yüzey ve iç sıcaklıklarındaki zamana bağlı değişimler Şekil 7.26'da verilmiştir. Isı pompasının çalışması ile kabin sıcaklığı 40 °C'de tutulmuştur. Ortalama ürün yüzey sıcaklığı değerleri HP, IRHP20 ve IRHP30 için sırasıyla 39, 40 ve 39.9 °C'dir. IRHP'de 35-40 °C aralığında ürün yüzey sıcaklık değerlerine göre IR lambası kontrol edilmiştir. Kurutma süresince infrared lamba aralıklı olarak çalışmıştır. Bu nedenle ürün yüzey sıcaklıklarında dalgalanmalar gözlenmiştir. İnfrared lambaların saat başına ortalama çalışma süreleri IRHP20'de 4,71 dakika ve IRHP30'da 11,04 dakikadır. Ürünün iç sıcaklıkları HP'de 35,7 °C, IRHP20'de 37,6 °C ve IRHP30'da 37,4 olarak gözlenmiştir. IR enerjisi ceviz yüzey sıcaklığına göre kontrol edilmiştir, bu nedenle yüzey sıcaklıklarının HP'den daha yüksek olduğu görülmüştür. Enerji, orta dalga infrared radyasyonla anında cevizin çekirdeğine getirilir. Isı akışı, nemi malzemenin içinden dışına doğru iter ve malzemenin içten dışa homojen bir şekilde kurumasını sağlar. IR enerjisi ürünü içeriden dışarıya ısıttığı için ceviz iç sıcaklığının HP'den daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 7.26. Cevizin iç ve yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi (Grup 2-2020)

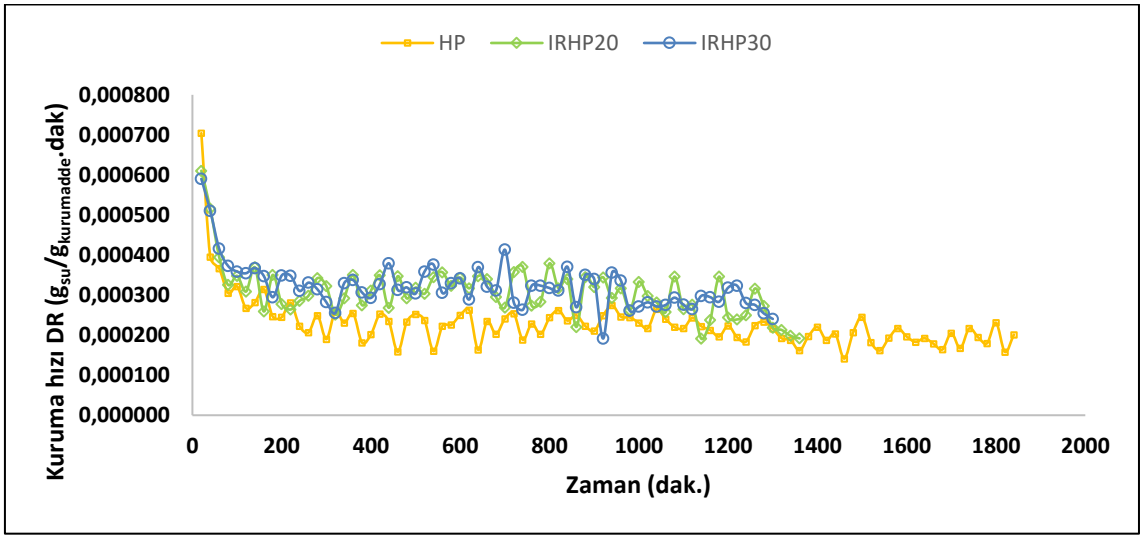
Şekil 7.27'de görüldüğü gibi ceviz örneklerinin nem içerikleri 1,12 g_{su} /$g_{kuru\ madde}$'den 0,12 g_{su} /$g_{kuru\ madde}$'ye HP kurutucuda 1880 dakikada, IRHP20 kurutucuda 1360 dakika ve IRHP30 kurutucuda 1320 dakikada düşürülmüştür.



Şekil 7.27. Kuru baza göre nem içeriğinin zamana göre değişimi (X_{kb}) (Grup 2-2020)

Deney sırasında kuruma hızındaki (DR) değişim Şekil 7.28'de gösterilmektedir. DR'nin değişimindeki önemli parametre radyasyon olarak tespit edilmiştir. Ayrıca deneyler azalan hız döneminde gerçekleşmiştir. Bu sırada ürün yüzeyinin su formunda ince bir film tabaka ile kaplandığı, suyun buharlaşmasının hava şartlarıyla kısıtlandığı varsayılmaktadır. Özellikle kurutmanın ilk dönemlerinde IR ısıtmanın buharlaşma üzerindeki etkisi, konvektif

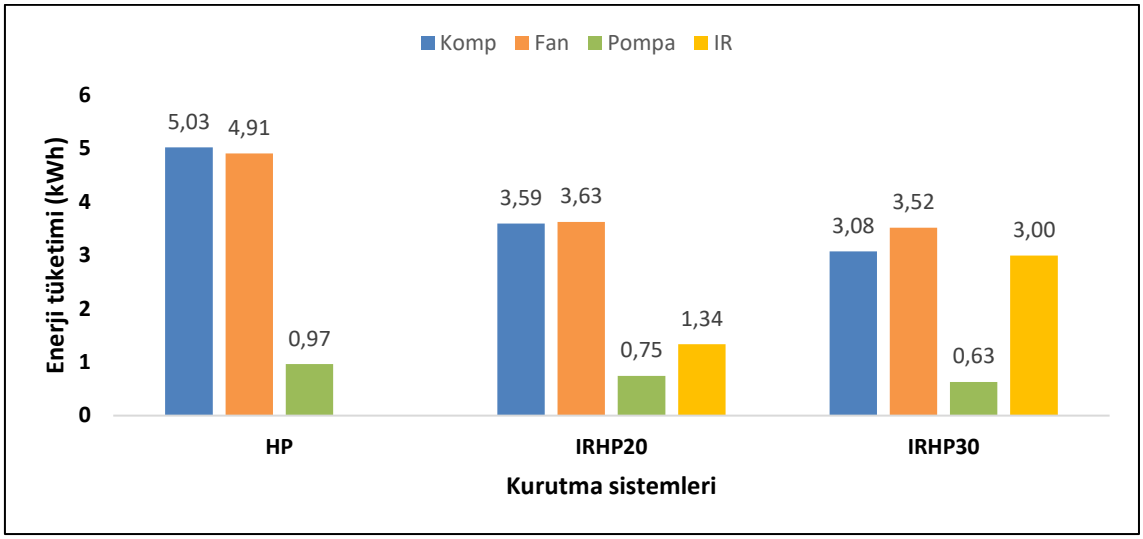
ısıtmaya göre daha yüksektir. Isı transfer yöntemi değişikliğinin DR üzerindeki etkisi Şekil 7.28'de görülebilir.



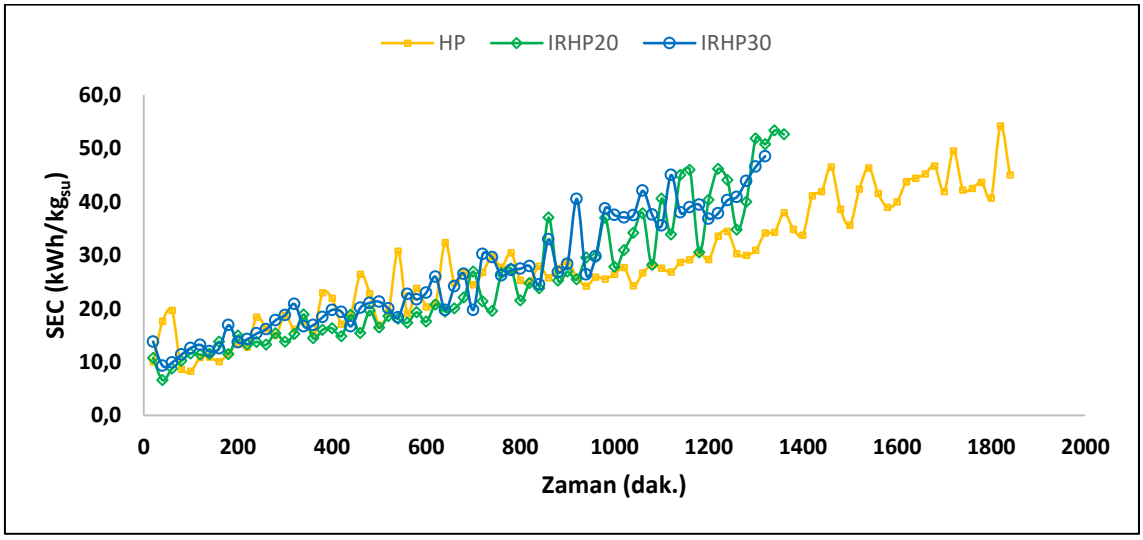
Şekil 7.28. Deneyler süresince kurutma hızının zamana göre değişimi (DR) (Grup 2-2020)

Sistem ve ekipmanın toplam enerji tüketimleri Şekil 7.29'da verilmiştir. Toplam enerji tüketim değerleri HP'de 10,898 kWh, IRHP20'de 9,301 kWh ve IRHP30'da 10.224 kWh'dir. Bu sistemlerin kuruma süreleri HP, IRHP20 ve IRHP30 için sırasıyla 1840, 1360 ve 1320 dakikadır. Isı pompalarının enerji tüketim değerleri HP'de 5,03 kWh, IRHP20'de 3,59 kWh ve IRHP30'da 3,08 kWh şeklindedir. IR lambası çalışma süreleri IRHP20'de 106,8 dakika ve IRHP30'da 239,7 dakika şeklindedir.

SEC değerlerinde zamana bağlı değişiklikler Şekil 7.30'da verilmiştir. IR lambasının sisteme eklenmesi ile hem buharlaşan su miktarı hem de anlık enerji tüketimi artmıştır. Kurutmanın sonuna doğru üründen nem çekmek zorlaşır ve ekipmanın enerji tüketimi devam eder. Bu nedenle IRHP sistemlerinin SEC ve EE değerlerinin kurutmanın son aşamasında sırasıyla HP'den yüksek ve düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 7.29. Kapalı sistem konvektif infrared kurutmada ekipmanlara göre enerji tüketiminin dağılımı (Grup 2-2020)

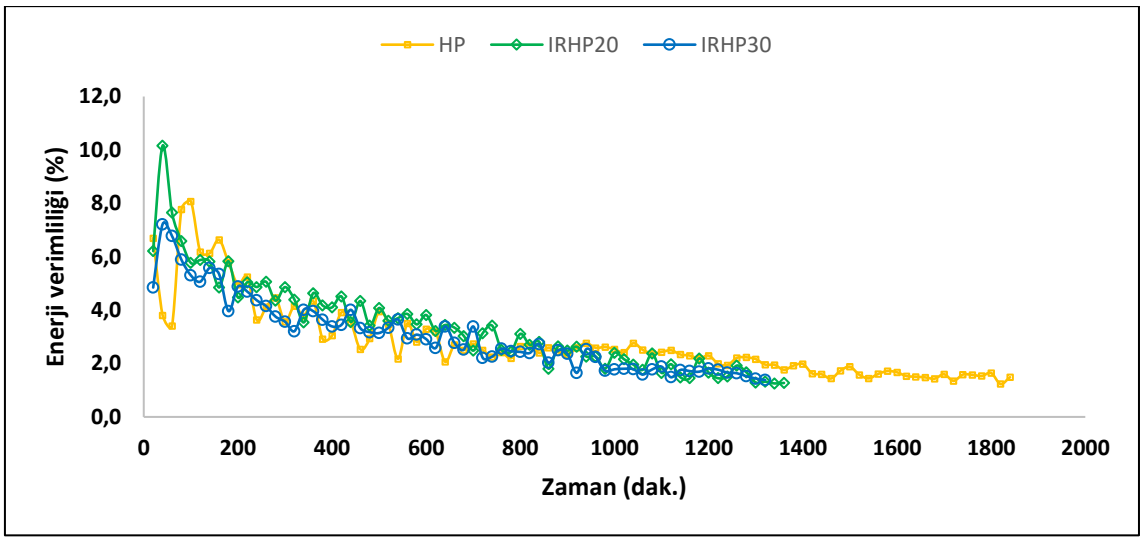


Şekil 7.30. Özgül enerji tüketiminin zamana göre değişimi (SEC) (Grup 2-2020)

Sisteme infrared lamba eklendiğinde, geleneksel HP sistemine göre kuruma süresinin ve toplam elektrik tüketiminin azaldığı görülmüştür. Çünkü sisteme yardımcı kaynak eklenmesiyle kompresör çalışması azalmış, kurutma hızı ve kütle transfer katsayısı artmıştır. Ürün-kaynak mesafesi azaldığında IR lambanın çalışma süresi azalmış, dolayısıyla EE değerleri artmıştır. Enerji verimliliğindeki zamana bağlı değişim Şekil 7.31'de gösterilmektedir. Ortalama EE değerleri HP, IRHP20 ve IRHP30 için sırasıyla 2,83, 3,39 ve 3,06 şeklindedir. Şekil 7.31'de görülebileceği gibi, kurutmanın son aşamasında üründen nem çekmek zor olduğu için EE azalmıştır. Kurutmanın son aşamasında buharlaşan su miktarının azalması ve cihazların elektrik tüketiminin devam etmesi nedeniyle IRHP'nin EE değerleri

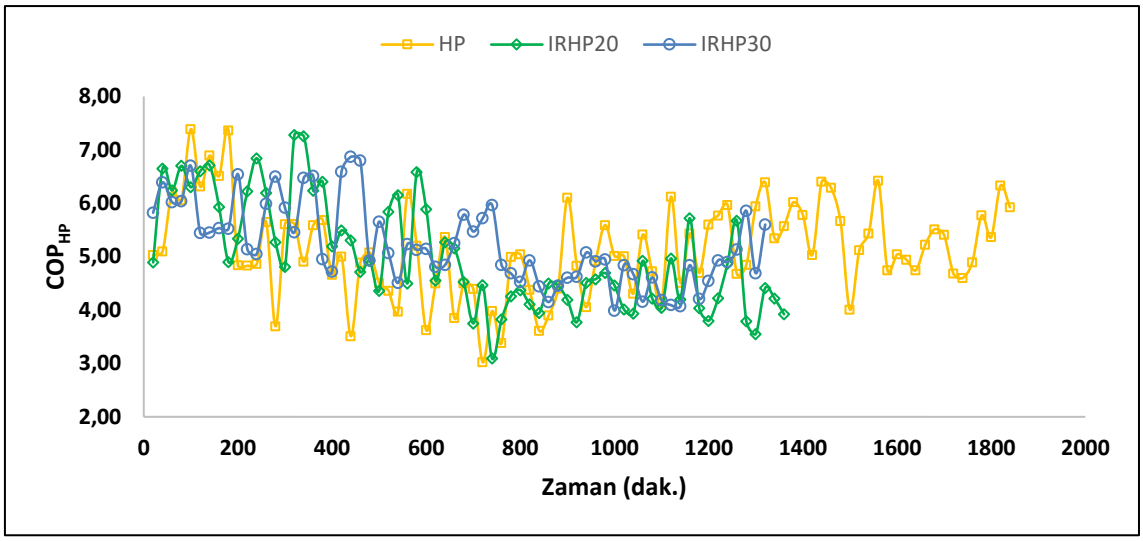
HP'den düşük olmuştur. EE değerleri, HP'de %1,23-8,08, IRHP20'de %1,2065-9,1416 ve IRHP30'da %1,3025-7,2141 aralığında değişmiştir.

Isıtma sistemine infrared lamba eklendiğinde kuruma süresi ve enerji tüketimi azalmıştır. Ürün-kaynak mesafesi azaldığında, ayarlanan sıcaklık hızlı bir şekilde yakalandığı için IR lamba daha az çalışmış ve enerji tüketimi azalmıştır. Ürün-kaynak mesafesinin kısaltılması ile %9 enerji tasarrufu elde edilmiş ve kuruma süresi %3 artmıştır. Ürün kaynak mesafesi 20 cm olduğunda geleneksel HP sistemine göre %14,7 enerji tasarrufu ve %26,1 zaman tasarrufu sağlanmıştır. Ürün kaynak mesafesi 30 cm olduğunda geleneksel HP sistemine göre %6,2 enerji tasarrufu ve %28,3 zaman tasarrufu sağlanmıştır.

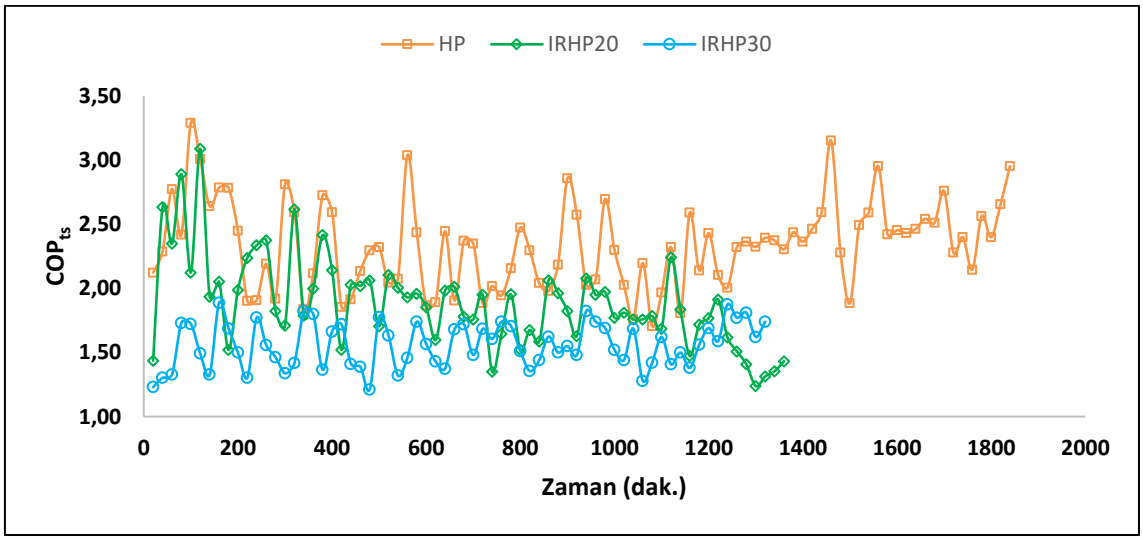


Şekil 7.31. Enerji verimliliğinin zamana göre değişimi (EE) (Grup 2-2020)

COP_{HP} değerlerindeki zamana bağlı değişiklikler Şekil 7.32'de gösterilmektedir. Isı pompasının ortalama COP_{HP} değerleri HP, IRHP20 ve IRHP30'da sırasıyla 5,15, 5,01 ve 5,24 olarak hesaplanmıştır. HP kurutma sistemine infrared lambaların eklenmesi ile kompresör çalışma süresinin azalması nedeniyle IRHP30'un COP_{HP} değerini arttırdığı görülmüştür. IR lambasının elektrik tüketimi nedeniyle IRHP'nin ortalama COP_{ts} değeri HP'den daha düşüktür. IRHP'de ürün kaynak mesafesi azaltılırken IR lamba ve kompresörün çalışma süreleri sırasıyla kısalmış ve artmıştır. Böylece IRHP20'de IRHP30'a göre COP_{ts} değeri artmış ve COP_{HP} değeri azalmıştır. İki ısı transfer mekanizmasına göre COP_{ts} değerlerindeki değişim Şekil 7.33'te gösterilmektedir. Tüm sistemin COP_{ts} değerleri HP, IRHP20 ve IRHP30 için sırasıyla 2,34, 1,89 ve 1,56 olarak hesaplanmıştır.

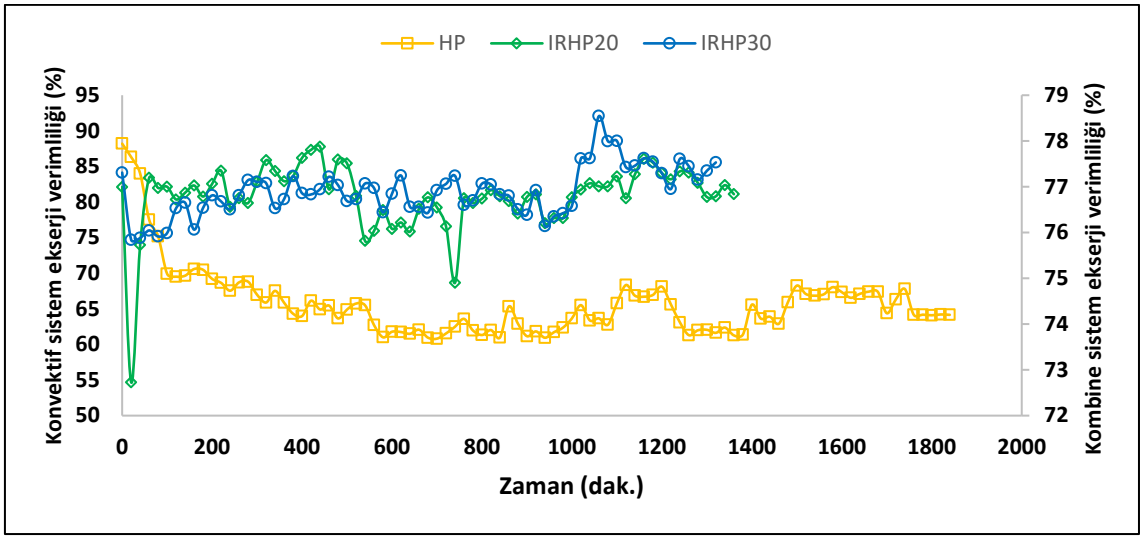


Şekil 7.32. Isı pompasının performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{HP}) (Grup 2-2020)



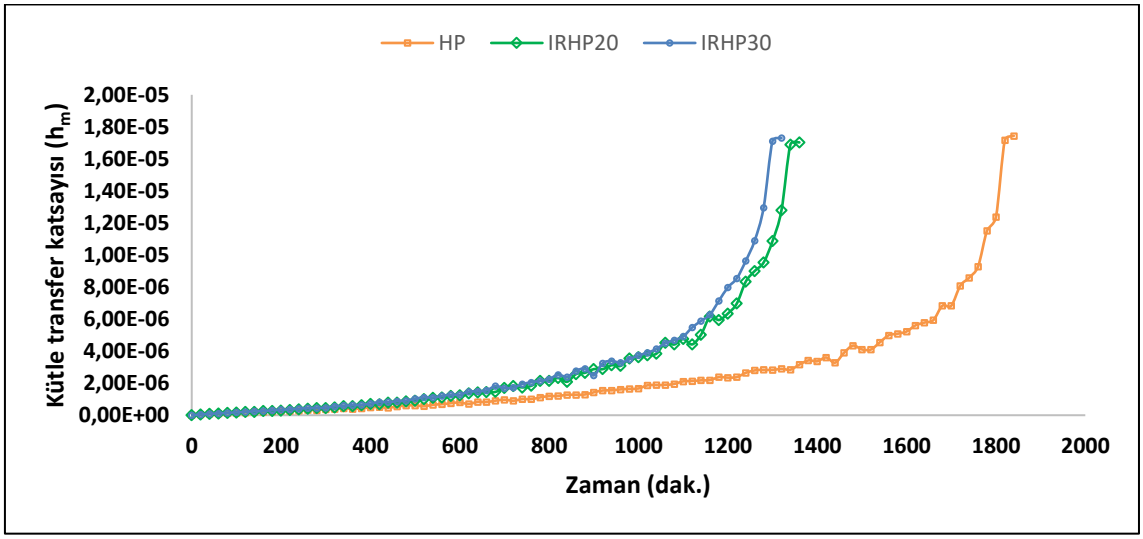
Şekil 7.33. Tüm sistemin performans katsayısının zamana bağlı değişimi (COP_{ts}) (Grup 2-2020)

Isı transfer mekanizmasına göre ekserji verimliliğindeki zamana bağlı değişim Şekil 7.34'te verilmiştir. Ekserji verimleri HP'de %60,81-88,19, IRHP20'de %72,73-77,87 ve IRHP30'da %75,84-78,54 arasında değişmektedir. İnfrared lambaların aralıklı çalışması nedeniyle, ekserji verimliliğinde dalgalanmalar görülmüştür.



Şekil 7.34. Ekserji verimliliğinin zamana göre değişimi (Grup 2-2020)

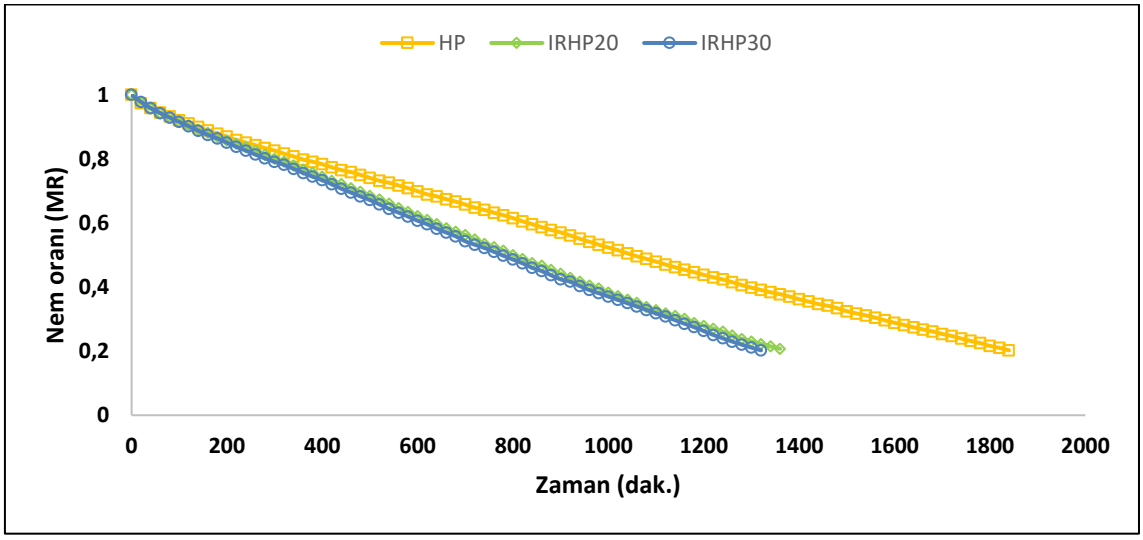
Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucuda, kütle transfer katsayısının (h_m) IR lambanın bulunma durumuna ve ürün-kaynak mesafesine bağlı zamana göre değişimi Şekil 7.35'te verilmiştir. İnfrared lamba eklenmesiyle h_m değerinin yaklaşık %12 arttığı görülmektedir. Ancak ürün-kaynak mesafesinin azaltılması ile h_m değerinde %0,19 azalma görülmüştür.



Şekil 7.35. Kütle transfer katsayısının zamana göre değişimi (Grup 2-2020)

Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucuda, nem oranının (MR) zamana göre değişimi Şekil 7.36'da verilmiştir. Konvektif infrared kurutucuda ürün

kaynak mesafesi değiştirilmesine rağmen kuruma süreleri birbirine yakın seyretmiştir bu nedenle MR değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 7.36. Nem oranının zamana göre değişimi (MR) (Grup 2-2020)

Çizelge 7.1'de yapılan tüm deneylerin sonuçları verilmiştir. Ilıman iklim bölgeleri için önerilen açık sistemde havanın sürekli ısıtılması gerektiği için enerji tüketiminin yüksek olduğu görülmektedir. Ürünün ilk nem içeriği arttıkça kuruma süresi ve enerji tüketimi artmaktadır. Konvektif sisteme infrared lambaların entegre edilmesiyle ısının ürüne çift yönlü penetrasyonu sağlanır. Böylece ısı ve kütle transferi arttığı için kuruma hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. İnfrared lambaların ürün yüzey sıcaklığına göre kontrol edilmesiyle de gıda kalitesi korunarak enerji tüketimi azaltılmaktadır. Kapalı sistem karasal iklim bölgeleri için önerilmektedir. Kapalı sistemde ısıtılan havanın sıcaklık farkı açık sistem kadar yüksek olmadığı için enerji tüketimi azaltılmıştır. Konvektif kurutma sisteminde, infrared lambalar eklenmesiyle ısı transferi, konveksiyon ve radyasyon ısı transfer mekanizmaları ile gerçekleşmektedir. Isının ürüne çift yönlü penetrasyonu açık sistemde olduğu gibi kapalı sistemde de ısı ve kütle transferini arttırdığı için kuruma hızını arttırmıştır. Böylece kuruma zamanı kısalmış ve lambaların ürün yüzey sıcaklığına göre kontrol edilerek aralıklı çalıştırılması ile enerji tüketimi azaltılmıştır. İnfrared teknolojisinin kurutma sistemlerinde konvektif kurutuculara eklenmesi enerji ve ekserji verimliliğini geliştirmekte, kuruma sürelerini ve enerji tüketimlerini azaltmaktadır. Yüksek ilk nem içeriğine sahip cevizlerin kurutulmasında gıda kalitesinden ödün vermeden en çok enerji ve zaman tasarrufu sağlayan sistem sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı çevrim konvektif

infrared kurutma sistemidir. Özelikle IRHP20 sistemi IRHP30 sistemine göre daha fazla enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Çizelge 7.1. Deney sonuçlarının karşılaştırılması

	Grup 1-2019		Grup 1-2020		Grup 2-2020		
	HP	IRAHP	HP	IRAHP	HP	IRHP20	IRHP30
Başlangıç nem değeri (g_{su}/ $g_{kuru\ madde}$)	0,633	0,633	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
Kuruma süresi (dakika)	800	640	1520	1300	1840	1360	1320
Enerji tüketimi (kWh)	18,44	16,45	39,3	37	10,898	9,301	10,224
Enerji tasarrufu (%)	-	10	-	5,9	-	14,7	6,2
Zaman tasarrufu (%)	-	20	-	14,5	-	26,1	28,3
Kuruma hızı (DR)	14,5-153,4 $*10^{-5}$	14,5-196 $*10^{-5}$	8,59 -63,1 $* 10^{-5}$	14,8 -70,1 $* 10^{-5}$	14,1-70,4 $* 10^{-5}$	19,1-61 $*10^{-5}$	19,2-59 $*10^{-5}$
SEC (kWh/kg su)	10,32-232	8,25-224	20,9-373,4	20,1-261,0	8,29-54,21	6,59-53,3	9,26-48,5
Enerji verimi (%)	0,28-6,54	0,29-7,94	0,18-3,22	0,26-3,33	1,23-8,08	1.21-9.14	1,30-7,21
Ekserji verimi (%)	54,76-59,92	59,54-68,39	54,22-66,67	65,66-72,10	60,81-88,19	72,73-77,87	75,84-78,54
COP_{hp}	3,97	4,10	3,60	3,60	5,15	5,01	5,24
COP_{ts}	3,34	3,14	3,33	3,16	2,34	1,89	1,56

7.3. Gıda Analizi

7.3.1. Ceviz örneklerinin kül ve yağ değerleri

Ceviz örneklerinin kül değerleri %2,18 ve %2,25 arasında olup, kuruyan cevizler ve işlem görmemiş yaş ceviz karşılaştırıldığında kurutma işleminin kül miktarı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemsizdir ($p>0,05$) (Çizelge 7.2). Pycia (2019) on bir farklı ceviz türünün üzerine çalışmış, kül içeriklerini %1,83 ile %2,02 arasında bulmuştur [80]. Başka

bir çalışmada, Fas'ta yetişen cevizlerin kül içerikleri %1,67 ile %2,53 arasında değişmiştir [102]. Farklı yerlerde yetişen ceviz örneklerinin kül içeriklerinin farklı çıkmasında toprağın mineral içeriği, yetişme koşulları, hasat zamanı ve hasat metodu gibi faktörler rol almaktadır [103].

Ceviz örneklerinin yağ oranı %56,41 ile %58,20 arasında bulunmuştur (Bkz. Çizelge 7.2). İşlem görmemiş yaş ceviz örneğinin yağ oranı %57,42 olup kurutulmuş ceviz örneklerinin yağ oranları ile arasındaki fark önemsizdir ($p>0,05$). Martinez vd. (2010) farklı ceviz türlerinin yağ içeriğini belirlemiş, yağ içeriklerinin %62 ile %74 arasında değiştiğini ifade etmiştir [104]. Başka bir çalışmada Li vd. (2017) farklı ceviz türlerinin yağ içeriğinin %56,8 ile %70,88 arasında değiştiğini gözlemlemiştir [105]. Farklı ceviz türlerinin yağ içeriğinin farklı olmasında genetik çeşitlilik, toprak koşulları, coğrafi ve iklimsel olarak farklı yetişme koşulları etki etmektedir [106].

Çizelge 7.2. Ceviz örneklerinin kül ve yağ değerleri

Ceviz örnekleri	**Kül (%)***	**Yağ (%)***
İşlem görmemiş ceviz	2,25±0,08[a]	57,42±0,08[ab]
Açık sistem-HP (2020)	2,19±0,10[a]	57,38±0,80[ab]
Açık sistem-IRHP (2020)	2,20±0,01[a]	57,51±0,03[a]
Kapalı sistem-HP (2020)	2,29±0,08[a]	57,41±0,48[ab]
Kapalı sistem -IRHP20 (2020)	2,18±0,07[a]	58,20±0,12[a]
Kapalı sistem -IRHP30 (2020)	2,25±0,03[a]	56,41±0,40[b]

**Kuru madde üzerinden hesaplanmıştır.*
***Aynı sütunda farklı harflerle işaretlenmiş ortalamalar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel olarak önemli fark vardır ($p<0.05$)*

7.3.2. Ceviz örneklerinin renk özellikleri

Gıda ürünlerinin rengi tüketilebilir olmasını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Gıda ürünlerinin renginin korunması, kurutma esnasında üründe meydana gelen hasarın değerlendirilebilmesi için önemli bir kalitatif indeks olarak kabul edilir [107].

Ceviz örneklerinin renk özellikleri CIE renk parametreleri kullanılarak (L^*, a^*, b^*) değerlendirilmiş, sonuçlar Çizelge 7.3'de ifade edilmiştir. CIE renk parametrelerine göre, L^* değeri açıklık (100)- koyuluğu (0) ifade etmek için kullanılmıştır. $+a^*$ ve $-a^*$ sırasıyla

kırmızılık ve yeşillik derecesini verirken; +*b** ve -*b** sırasıyla sarılık ve mavilik derecesini ifade etmek için kullanılır [108]. Ceviz örneklerinin *L** değeri 44,91 ile 55,06 arasında değişmiştir. Kurutma işlemi *L** değerini önemli oranda azaltmıştır ($p<0,05$). Kurutma işlemi ile *L** değerinin azalarak koyuluğun artması ısıl işlem esnasında gerçekleşen enzimatik olan ve enzimatik olmayan reaksiyonlar kaynaklıdır [9]. Açık sistem ve kapalı sistem örnekleri kendi içlerinde değerlendirildiğinde, infrared destekli kurutma ve sadece ısı pompası kullanarak ceviz kurutmanın cevizlerin *L** değeri üzerinde önemli etkisi yoktur ($p>0,05$). Ceviz endüstrisinde kurutulmuş ceviz örneklerinin *L** değerinin 40'tan yüksek (*L**>40) olması istenir [109]. Sonuç olarak bu tez kapsamında kurutulan ceviz örneklerinin renk özellikleri standartlara uygundur.

Ceviz örneklerinin *a** değeri 8,37 ile 14,37 arasında değişmiştir. En düşük *a** değeri işlem görmemiş yaş ceviz örneğine aittir. Kurutma işlemi *a** değerini önemli oranda arttırmıştır ($p<0,05$). En yüksek *a** değeri sadece ısı pompası kullanılarak kurutulan açık sistem örneğine aittir. Açık sistemde *a** infrared destekli kurutma ile önemli oranda düşmüştür ($p<0,05$), kapalı sistemde ise infrared desteğinin *a** değerine etkisi istatistiksel olarak önemsizdir ($p>0,05$). Ceviz örneklerinin *b** değerleri 40,25 ile 43,02 arasında değişmekte olup, örneklerin *b** değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak önemsizdir ($p>0,05$).

Çizelge 7.3. Ceviz örneklerinin renk özellikleri

Ceviz örnekleri	*L**	*a**	*b**
İşlem görmemiş ceviz	55,06±1,32^{a}	8,37±0,33^{c}	41,97±0,94^{a}
Açık sistem-HP (2020)	44,91±1,47^{c}	14,37±0,39^{a}	40,25±2,11^{a}
Açık sistem-IRHP (2020)	45,98±2,75^{bc}	13,21±0,40^{b}	41,78±2,40^{a}
Kapalı sistem-HP (2020)	48,61±2,31^{b}	13,02±0,53^{b}	43,02±1,92^{a}
Kapalı sistem -IRHP20 (2020)	46,26±1,71^{bc}	13,20±0,96^{b}	42,47±1,72^{a}
Kapalı sistem -IRHP30 (2020)	48,07±1,58^{b}	12,97±0,92^{b}	41,88±0,75^{a}

***Aynı sütunda farklı harflerle işaretlenmiş ortalamalar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel olarak önemli fark vardır ($p<0.05$).*

7.3.3. Ceviz örneklerinin yağ kalite özellikleri ve yağ asidi kompozisyonu

Ceviz örneklerinin yağ kalite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla % serbest yağ asitliği değeri (SYA), peroksit değeri (PD), sabunlaşma sayısı (SS), iyot sayısı (İS), konjuge dien sayısı ve konjuge trien sayısı belirlenmiştir.

SYA değeri yağlarda trigliserit halinde bulunmayan yağ asitlerinin ve yağlardan ışık, ısı veya lipaz enzimi etkisi ile salınan yağ asitlerinin ölçüsüdür. SYA değeri oksidasyon stabilitesini gösterir ve hidrolitik acılaşmanın derecesini ifade etmek için kullanılabilir [18]. SYA cevizin oksidatif açıdan kalitesini gösteren bir parametre olup, cevizin kaliteli olarak nitelendirilebilmesi için SYA değerinin %oleik asit cinsinden %0,6'yı geçmemesi istenir [110]. Bu tez çalışmasında kurutulan ve yaş ceviz örneklerinin % serbest yağ asitliği (SYA) değeri % oleik asit cinsinden hesaplanmış ve değerler Çizelge 7.4'te gösterilmiştir. Buna göre, kurutulmuş ceviz örneklerinin %SYA değerleri %0,07 ile %0,11 arasında değişmektedir. İşlem görmemiş yaş ceviz örneğinin %SYA değeri 1,37'dir. Kurutma işlemleri ceviz örneğinin %SYA değerini önemli oranda azaltmıştır ($p<0,05$). Fakat kurutulmuş örnekler arasında kurutma işlem farklılığın etkisinin önemi yoktur ($p>0,05$). Kurutma işleminin %SYA değerini düşürmesi, kurutma işleminin lipaz veya lipoksigenaz enzimini inaktive etmesi ile açıklanabilir [79]. Bu tez çalışmasına benzer şekilde Suri vd., 2019 infrared (IR) ve kuru havayla kavurmanın çörek otu (Nigella sativa L.) tohumu yağının SYA değeri üzerine etkisini incelemiştir. Buna göre, kavurma işlemi işlem görmemiş çörek otunun SYA değerinin azalmasını sağlamış, fakat aynı sıcaklık ve sürelerde infrared ve kuru hava ile kavurma işlemi kıyaslandığında farklı uygulamaların SYA değeri üzerine etkisi önemsiz bulunmuştur [79].

Peroksit değeri (PD), yağların oksidatif bozunması nedeniyle oluşan birincil oksidasyon ürünlerinin (peroksitler) ölçüsü olup, yağ kalitesini belirlemek için kullanılan parametrelerden biridir [79]. Çizelge 7.4'te ceviz örneklerinin PD gösterilmiş olup, bu değer 0,02 ile 0,58 m_{eq} O_2/kg arasında değişmektedir. En yüksek PD değeri işlem görmemiş yaş ceviz örneğine aittir (0,98 m_{eq} O_2/kg). Kurutma işlemi PD'nin önemli oranda düşmesini sağlamıştır ($p<0,05$). Kurutma işleminden sonra cevizin kaliteli olarak nitelendirilebilmesi için peroksit değerinin 1 m_{eq} O_2/kg'ı aşmaması istenir [110]. Kurutma esnasında fındık, ceviz gibi ürünlerde peroksit oluşumundan kaçınılması için kurutma sıcaklığının 45°C'yi aşmaması ve sürenin mümkün olduğunca kısa tutulması gerekmektedir [111]. Bu tez

çalışmasında ürünlerin maksimum sıcaklığı 40°C olarak belirlenmiş ve kurutulmuş ceviz örneklerinde peroksit değeri 1 m_{eq} O_2/kg'ı aşmamıştır (Bkz. Çizelge 7.4). Kapalı sistemde sadece sıcak hava ile kurutmada PD 0,58 m_{eq} O_2/kg olarak bulunmuştur ve kapalı sistemde infrared uygulaması örneklerin PD'nin önemli ölçüde azalmasını sağlamıştır ($p<0,05$). Bununla birlikte kapalı sistemler için infrared kaynağı ve ürün arasındaki mesafenin PD üzerine etkisi önemli değildir ($p>0,05$). Hızlı peroksit oluşumu acılaşmadan önce gelen oksidatif reaksiyonların başladığını gösterir [79]. Yani, sadece ısı pompası içeren kapalı sistemin infrared destekli kapalı sisteme göre oksidatif açıdan daha hassas olduğu söylenebilir. Atungulu (2013) infrared radyasyonunu ön işlem olarak ceviz kurutmada kullanmış, 3 dakika infrared önişlemi uygulanan ceviz örneğinin PD'ni, infrared uygulanmayan cevize göre sıfırıncı günde düşük bulmuştur, depolamanın 20. gününde 2 dakika önişlem uygulanan cevizin PD değeri uygulanmayan cevize göre düşüktür, ancak depolamanın 40. gününde önişlem uygulanan cevizlerin PD değeri uygulanmayan cevizlerden daha yüksek çıkmıştır [5]. Wang vd. (2002) kabuklu cevizlerde tarla ve depolama zararlılarını kontrol etmek için radyo frekans enerjisine dayalı işlem gerçekleştirmişlerdir, bu amaçla cevizlere hem ısı uygulaması hem radyo frekans dalgası ve sadece radyo frekans dalgası uygulamışlardır. Uygulama sonrası depolama yapılmadan PD belirlenmiş hem radyo frekans dalgası hem ısı uygulaması gerçekleştirilen ceviz örneklerinde daha düşük PD elde edilmiştir. Suri vd., 2019 çörek otu tohumunu sadece sıcak hava ve sadece infrared uygulaması ile kavurup peroksit değerini belirlemişlerdir. Her iki şekilde de kavrularak kurutulan örneğin işlem görmemiş örneğe göre PD düşük bulunmuştur. Bununla birlikte, aynı sıcaklık ve sürede infrared ve sıcak hava işleminin PD üzerine etkisi kıyaslanmış, sadece infrared radyasyon uygulanarak kavrulan örneklerin PD değeri belirli sıcaklık uygulamasına kadar sadece sıcak hava ile kavrulan örneklerden düşük bulunmuştur. Ayrıca sadece sıcaklık, sadece kavurma süresinin ve her ikisinin etkileşiminin PD'ni etkilediğini ifade etmişlerdir [79].

Venkitasamy vd. (2018) badem kavurma işleminde infrared radyasyon desteğinden yararlanmış, fakat işlem süresinin uzamasının PD'ni arttırdığını belirtmiştir [112]. Bu tez çalışmasında ise infrared radyasyon uygulaması ısı pompası ile kurutmaya destek olarak kullanılmış ve istenilen nem içeriği (MC) değerine infrared ısıtıcı desteği ile daha hızlı ulaşılmıştır, yani cevize uygulanan ısı süresi infrared ısıtıcı desteği ile kısalmıştır. Bu durum, kapalı kurutma sisteminde infrared ısıtıcı desteği ile kurutulan cevizlerin peroksit değerinin sadece ısı pompası içeren sisteme göre daha düşük çıkmasını sağlamıştır. Açık

kurutma sistemi ile kurutulan örneklere bakıldığında sadece ısı pompası ve IR destekli ısı pompası ile kurutulan örneklerin peroksit değerleri arasında önemli bir fark gözlenmemiştir ($p>0,05$). İnfrared destekli kapalı sistemde (%30) açık sisteme (%15) göre daha fazla zaman tasarrufu görülmesi peroksit değerini de etkilemiş olabilir, sonuç olarak, PD için IR desteği sadece kapalı sistemler için önemlidir.

Konjuge dien ve konjuge trien sayısı yağın oksidasyon derecesini belirten parametrelerden biridir. Konjuge dien değeri birincil oksidasyon derecesi ile ilgili iken, konjuge trienler daha çok ikincil oksidasyon derecesi hakkında fikir verir ve birincil oksidasyon ürünlerinin degradasyonu ile oluşurlar [113,114]. Hashemi vd. (2017)'e [115] göre, konjuge dien ve trien değerleri oksijene maruz kalma süresi arttıkça artar. Çizelge 7.4'e göre, ceviz örneklerinin konjuge dien değerleri 1,05 ile 1,42 arasında değişmekte iken, konjuge trien değerleri 0,11 ile 0,15 aralığındadır. İşlem görmemiş yaş ceviz örneği en yüksek konjuge dien (1,62) ve konjuge trien (0,18) değerine sahiptir. Kurutma işlemleri konjuge dien ve konjuge trien değerinin önemli oranda azalmasını sağlamıştır ($p<0,05$). Açık sistemde kurutulan örnekler için infrared destekli ısı uygulaması sadece ısı pompası uygulamasına kıyasla konjuge dien ve trien değerinde önemli etki göstermemiştir ($p>0,05$). Kapalı sistemde kurutulan örneklere bakıldığında, infrared destekli ısı uygulaması konjuge dien değerini önemli oranda azaltmış ($p<0,05$), konjuge trien değeri için önemli fark oluşturmamıştır ($p>0,05$). Ayrıca kapalı sistemler için uygulanan infrared radyasyon kaynağının ürün mesafesine etkisi konjuge dien değeri için önemli bulunmuştur ($p<0,05$) ve infrared radyasyon kaynağı ve ürün mesafesi azaldıkça konjuge dien değeri 1,25'ten 1,11'e düşmüştür. Bu durum, infrared radyasyon kaynağı ürüne yaklaştıkça ürünün yüzey sıcaklığının istenilen seviyeye hızlı ulaşması, kurutma süresinin azalarak ceviz örneklerinin ısıya daha az maruz kalması, böylece oksidatif stabilitenin artması ile açıklanabilir. Genel olarak konjuge dien değerleri incelendiğinde, ceviz örneklerinin peroksit değerlerinde gözlemlenen artış ve azalışların konjuge dien değerlerinde de gözlendiği söylenebilir. Literatürde de PD ile konjuge dien değeri arasında güçlü korelasyon olduğu belirtilmiştir [113,116,117].

İyot sayısı (İS) genellikle yağın içinde bulunan yağ asitlerinin doymamışlık derecesini belirlemek için kullanılır. Depolama boyunca bu değerde meydana gelen azalma genellikle çoklu doymamış yağ asitlerinin çift bağlarının serbest radikaller tarafından yok edilmesine atfedilir [118]. Yüksek iyot değerlerine sahip yağlar genellikle daha az stabildir ve

oksidasyona daha duyarlıdır [119]. Ceviz örneklerinin İS 167,27 ile 168,11 aralığında bulunmuştur. Cittadini vd. (2020) farklı ceviz türlerinin iyot sayısının 143,9 ile 165,8 aralığında değiştiğini [120], Geng vd. (2020) ise farklı yağ ekstraksiyon metotlarıyla elde ettiği ceviz yağının iyot sayısının 159,4 ve 163,9 aralığında değiştiğini bildirmiştir [121]. Bu tez çalışmasında İS literatüre göre biraz yüksek bulunmuştur. Bu durum cevizlerin genetik çeşitliliği, yetişme koşullarındaki ve yağ ekstraksiyon metotlarından kaynaklı farklılıklar ile açıklanabilir. Kurutulan örnekler arasında en yüksek iyot sayısı kapalı sistemde sadece ısı pompası ile kurutulan örneğe aittir. Kapalı sistemde ısı pompasına infrared ısıtıcı eklenmesi iyot sayısını önemli derece düşürmüştür ($p<0,05$), fakat infrared radyasyon kaynağı ve ürün arasındaki mesafenin İS üzerine etkisi önemsizdir ($p>0,05$). İşlem görmemiş yaş ceviz örneğinin İS (167,44) ile açık sistemde sadece ısı pompası kullanılarak kurutulan örneğin İS (167,53) arasındaki fark istatistiksel olarak önemsizdir ($p<0,05$). Açık sistemde kurutulan örnekler incelendiğinde, infrared destekli kurutma iyot sayısını önemli şekilde düşürmüştür ($p<0,05$). En düşük İS sahip örnekte açık sistem infrared destekli kurutulan örneğe aittir (167,27). Sonuç olarak, infrared destekli kurutmanın açık sistem ve kapalı sistem örneklerinin iyot sayısını üzerinde etkisi önemlidir ($p<0,05$). Açık sistem ve kapalı sistemde, infrared destekli kurutma ile sadece ısı pompası kullanılarak kurutulan cevizler ayrı bir şekilde kıyaslandığında, infrared radyasyon desteği ile kurutulan örneklerin oksidatif stabilitesi daha yüksektir.

Sabunlaşma sayısı (SS) yağın ortalama bağıl moleküler kütlesini yansıtan bir değerdir. Yüksek sabunlaşma değeri, daha yüksek akışkanlığı ve daha güçlü hidrofilik yapıyı temsil eder [18]. Ceviz örneklerinin SS 192,37 ve 192,42 g/kg aralığında bulunmuştur (Çizelge 7.4). Literatürde de benzer sonuçlar yer almaktadır. Moodley vd. (2007) Güney Afrika'da yetişen ceviz türünün SS'nı 190,4 g/kg bulurken [119], Qu vd. (2016) farklı kurutma tekniği uyguladığı cevizlerin SS'nın 196,53 ile 230,90 mg/g aralığında değiştiğini bildirmiştir [18]. Çizelge 7.4'e göre, SS işlem görmemiş yaş ceviz örneğinde 192,37 g/kg olarak bulunmuş, uygulanan kurutma işlemleri SS'nın artmasını sağlamıştır. Bu artış açık sistemde infrared destekli kurutma için az iken ($p>0,05$), diğer kurutma yöntemleri için daha fazla olmuştur ($p<0,05$). Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında uygulanan farklı kurutma işlemlerinin SS üzerine etkisi önemli değildir ($p<0,05$). Benzer şekilde, X. Zhou vd. (2018) ceviz örneklerini sıcak hava, vakumlu kurutma ve sıcak hava destekli radyo dalgaları olmak üzere üç farklı yöntemle kurutmuş ve SS değerlerini hesaplamıştır. Buna göre, bütün örneklerin SS değeri kurutma ile önemli oranda arttığını, bununla birlikte kurutma yöntem farklılığının vakumlu

kurutma ve sıcak hava destekli radyo dalgaları ile kurutma için önemli olmadığını ifade etmiştir [122].

Çizelge 7.4. Ceviz yağı kalite özellikleri

Ceviz örnekleri	% Serbest yağ asitliği (SYA)	Peroksit değeri (meq O_2/kg)(PD)	Sabunlaşma sayısı (g/kg) (SS)	İyot sayısı (İS)	Konjuge dien (K_{232})	Konjuge trien (K_{270})
1	1,37±0,06^{a}	0,98±0,08^{a}	192,37±0,03^{b}	167,44±0,07^{c}	1,62±0,02^{a}	0,18±0,00^{a}
2	0,11±0,01^{b}	0,02±0,00^{c}	192,42±0,00^{a}	167,53±0,07^{bc}	1,10±0,02^{d}	0,12±0,01^{c}
3	0,09±0,00^{b}	0,05±0,00^{c}	192,39±0,00^{ab}	167,27±0,02^{d}	1,05±0,00^{d}	0,12±0,00^{c}
4	0,11±0,01^{b}	0,58±0,02^{b}	192,41±0,00^{a}	168,11±0,02^{a}	1,42±0,09^{b}	0,15±0,02^{b}
5	0,07±0,01^{b}	0,02±0,00^{c}	192,41±0,00^{a}	167,69±0,12^{b}	1,11±0,02^{d}	0,11±0,01^{c}
6	0,09±0,01^{b}	0,04±0,00^{c}	192,40±0,00^{a}	167,53±0,01^{bc}	1,25±0,09^{c}	0,11±0,00^{c}

**1:İşlem görmemiş ceviz, 2: Açık sistem-HP, 3:Açık sistem-IRHP,4:Kapalı sistem-HP,5: Kapalı sistem -IRHP20, 6: Kapalı sistem -IRHP30.*

***Aynı sütunda farklı harflerle işaretlenmiş ortalamalar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel olarak önemli fark vardır ($p<0.05$)*

Ceviz örneklerinin yağ asidi kompozisyonu Çizelge 7.5'te gösterilmiştir. Buna göre, ceviz yağı yüksek oranda çoklu doymamış yağ asidi (palmitoleik, oleik, linoleik, linolenik ve eikosenoik asit) içerir. Bu oran cevizde bulunan toplam yağ asitlerinin yaklaşık %90-92'sini oluşturur ve ceviz yağının oksidasyona karşı hassasiyetinin yüksek olmasına neden olur [7]. Ceviz örneklerinde en baskın bulunan yağ asidi linoleik asit olarak bulunmuş ve oranı %64,54 ile %65,03 aralığında değişmiştir. Linoleik asidi sırası ile linolenik asit (%14,04-14,71), oleik asit (%11,78-12,23), palmitik asit (%6,62-6,80) ve stearik asit (%1,71-2,04) takip etmiştir. Bu tez çalışmasına benzer şekilde, Bada vd. (2010) farklı ceviz türleri için baskın yağ asitlerini sıralamış ve linoleik asiti sırasıyla linolenik asit ve oleik asitin takip ettiğini belirtmiştir [39]. Poggetti vd. (2018) farklı ceviz türlerinin yağ asidi kompoziyonunu belirlemiş, linoleik asidin oranının %46,9- 68,6, oleik asidin oranının %10-25,1 ve linolenik asidin oranının ise %6,9-17,6 aralığında olduğunu belirtmiştir [123]. Ceviz örneklerinin yağ asidi kompozisyonunda görülen farklılıklara genetik çeşitliliğin ve yetişme koşullarının sebep olduğu düşünülmektedir [105] . Çizelge 7.5'e göre, farklı kurutma yöntemlerinin ceviz örneklerinin linoleik asit içeriğine etkisi önemlidir ($p<0,05$). En düşük linoleik asit oranı (%64,54) sadece ısı pompası ile açık sistemde kurutulan örneğe aittir. En yüksek linoleik asit oranı ise (%65,03) infrared kaynak – ürün mesafesinin 30 cm olduğu infrared destekli kapalı sistemde kurutulan örneğe aittir. Ceviz örneklerinin linolenik asit oranına

bakıldığında en düşük linolenik asit oranı (%14,04) infrared kaynak – ürün mesafesinin 30 cm olduğu infrared destekli kapalı sistemde kurutulan örneğe aittir, en yüksek linolenik asit oranı ise (%14,71) sadece ısı pompası ile kapalı sistemde kurutulan örneğe aittir. Farklı kurutma yöntemlerinin linolenik asit oranına etkisi önemlidir ($p<0,05$). Ayrıca, infrared destekli kurutma yöntemi hem açık sistemde hem de kapalı sistemde linolenik asit oranını önemli oranda azaltmıştır ($p<0,05$). Oleik asit oranı en yüksek örnek (%12,23) işlem görmemiş ceviz örneğine aittir. Kurutma işlemi oleik asit miktarını önemli oranda azaltmıştır ($p<0,05$). Linolenik asidin, oleik aside kıyasla oksidasyon hassasiyeti daha yüksektir [18]. Oleik, linoleik ve linolenik asidin oksidasyon hassasiyeti karşılaştırıldığında yağ asitlerinin sırasıyla oksidasyon hassasiyet oranı 1:12:25 ve aynı koşullar altında fotooksidasyonda ise bu oranın 1:1,7:2,3 olduğu belirtilmiştir [7]. Çizelge 7.5'e göre cevizde en fazla bulunan doymuş yağ asidi palmitik asittir ve bu sırayı stearik asit takip eder. Bada vd., (2010), 15 farklı ceviz türü için palmitik asit oranının %6,1-7,41, stearik asit oranının ise %1,51-2,75 aralığında değiştiğini bildirmiştir En yüksek palmitik asit oranı (%6,80) açık sistemde sadece ısı pompası ile kurutulan örneğe aittir, en düşük oran (%6,62) ise işlem görmemiş ceviz örneğine aittir (Bkz. Çizelge 7.5). Kurutma yöntem farklılıkları ceviz örneğinin palmitik asit içeriğine önemli miktarda etki etmiştir ($p<0,05$).

Çizelge 7.5. Ceviz örneklerinin yağ asidi kompozisyonu

Ceviz örnekleri	Yağ asidi kompozisyonu (%)						
	Palmitik asit (16:0)	Palmitoleik asit (16:1)	Stearik asit (18:0)	Oleik asit (18:1)	Linoleik asit (18:2)	Linolenik asit (18:3)	Eikosenoik asit (20:1)
1	6,62±0,01e	0,122±0,01^{c}	1,82±0,00^{d}	12,23±0,05^{a}	64,83±0,08^{b}	14,20±0,09^{c}	0,18±0,00^{a}
2	6,80±0,01a	0,125±0,00^{bc}	1,91±0,00^{b}	11,92±0,01^{d}	64,54±0,01^{d}	14,53±0,03^{b}	0,17±0,00^{a}
3	6,67±0,01d	0,135±0,00^{abc}	1,83±0,01^{c}	12,12±0,02^{b}	64,92±0,06^{b}	14,30±0,09^{c}	0,17±0,01^{a}
4	6,72±0,00c	0,141±0,00^{a}	1,77±0,00^{e}	11,88±0,02^{d}	64,60±0,02^{cd}	14,71±0,00^{a}	0,18±0,00^{a}
5	6,76±0,01b	0,132±0,01^{abc}	1,71±0,00^{f}	12,00±0,03^{c}	64,66±0,02^{c}	14,49±0,02^{b}	0,18±0,01^{a}
6	6,71±0,01c	0,138±0,00^{ab}	2,04±0,00^{a}	11,78±0,01^{e}	65,03±0,02^{a}	14,04±0,00^{d}	0,17±0,00^{a}

**1:İşlem görmemiş ceviz, 2: Açık sistem-HP, 3:Açık sistem-HP-IR,4:Kapalı sistem-HP,5: Kapalı sistem -HP-IR20cm, 6: Kapalı sistem -HP-IR30cm*

***Aynı sütunda farklı harflerle işaretlenmiş ortalamalar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel olarak önemli fark vardır ($p<0.05$)*

Stearik asit oranı en yüksek (%2,04) örnek infrared kaynak- ürün mesafesinin 30 cm olduğu infrared destekli kapalı sistem örneğine aittir. İşlem görmemiş yaş ceviz örneği en düşük

stearik asit oranına sahip olup, bu değer %1,82'dir. Diğer yağ asit oranlarında olduğu gibi örneklerin stearik asit oranı için kurutma yöntem farklılıklarının önemi vardır ($p<0,05$) [39]. Bu tez çalışmasına benzer şekilde, Fu vd. (2016), farklı ceviz kurutma yöntemlerinin ceviz yağ asidi kompozisyonunu değiştirdiğini göstermiştir [7]. Al Juhaimi vd. (2017) ise, pikan cevizini farklı sıcaklıklarda konveksiyonel fırında ve farklı mikrodalga güçleri kullanarak mikrodalga fırında olacak şekilde sekiz farklı yöntemle fırınlamış, fırınlanan örneklerin yağ asidi oranının farklı olduğunu gözlemlemiştir [124].

7.3.4. Ceviz örneklerinin toplam fenolik madde miktarı (TFM) ve antioksidan kapasitesi

Fenolikler meyve, sebze, baklagiller başta olmak üzere çoğu gıdada doğal olarak bulunan ve gıdanın beslenme ve duyusal özelliklerine, raf ömrüne etki eden önemli bileşenlerdir. Son yıllarda, antioksidan özellikleri ile insan sağlığına fayda sağlamaları ile ilgili çalışmaların artması, fenolik bileşenlere ve fenolik bileşence zengin gıdalara ilgiyi arttırmıştır. Cevizin de fenolikler açısından zengin ve antioksidan kapasitesi yüksek bir gıda olduğu bilinmektedir [7,80].

Ceviz örneklerinin toplam fenolik madde miktarı (TFM) ve antioksidan kapasitesi Çizelge 7.6'da gösterilmiştir. Toplam TFM 1,22 ile 1,63 g GA/100 g arasında değişmektedir. Kurutulan örnekler arasında en düşük TFM (1,26 g GA/100g) açık sistemde sadece ısı pompası kullanılarak kurutulan örneğe aittir. Açık sistemde infrared kurutma desteği TFM içeriğinin sadece ısı pompası ile kurutmaya göre önemli miktarda artmasını sağlamıştır ($p<0,05$). Kapalı sistemde ise, sadece ısı pompası kullanılarak kurutulan örneğin TFM 1,43 g GA/100g'dır. İnfrared destekli kurutmada infrared radyasyon kaynağı ve ürün mesafesi 20 cm olduğunda sadece ısı pompası ile kurutulan kapalı sistem örneğine göre TFM artmıştır (1,63 g GA/100g) ve bu artış istatistiksel olarak önemlidir ($p<0,05$). Fakat infrared kaynak-ürün mesafesi 30 cm'ye çıkarıldığında TFM'de önemli bir artış gözlenmemiştir ($p>0,05$). İnfrared destekli kurutulan örneklerin TFM'nın yüksek çıkmasının sebebi, infrared desteğinin kurutma süresinin kısalmasını sağlaması bu sebeple fenoliklerin daha az zarar görmesi verilebilir (X. Zhou vd., 2018). Bu tez çalışmasına benzer şekilde L. Zhou vd. (2017), infrared desteği ile sarımsak kurutmuş ve infrared gücü arttırıldığında TFM miktarının arttığını gözlemlemiştir. L. Zhou vd. (2017)'e göre bu artış, radyasyon desteğinin etkisi ile nemin hızla uzaklaşması ve kurutma süresinin kısalması ile ilgili olabilir. Ayrıca

infrared radyasyon gücün artmasıyla birlikte kurutulmuş sarımsak dilimindeki toplam fenolik bileşiklerin artması, infrared ışınların kovalent bağları kırarak antioksidanları serbest bırakmasıyla da bağdaştırılabilinir [125]. X. Zhou vd., (2018) ise, farklı yöntemlerle ceviz kurutmada cevizlerin TFM 0,97 ile 1,37 g GA/100 g aralığında bulmuştur. Ayrıca sadece sıcak hava kullanarak kurutulan cevizlerin TFM değerini radyo dalgası destekli sıcak hava kurutma yöntemine göre düşük bulmuştur. Pycia vd. (2019), farklı ceviz türlerinin TFM'nı 0,82 ile 2,09 g GA/100g arasında değiştiğini ifade etmiştir. Literatürle kıyaslandığında cevizlerin TFM'da görülen farklılıklar birçok faktörden kaynaklanabilir, bunlar genetik çeşitlilik, cevizin olgunluk durumu, hasat zamanında görülen farklılıklar, depolama koşulları, ekstraksiyon ve analiz yönteminde görülen farklılıklar vb. şeklinde sıralanabilir [80].

Ceviz örneklerinin antioksidan kapasitesi DPPH ve ABTS radikal yakalama aktivitesi testleri ile belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 7.6'da gösterilmiştir. Açık sistemde sadece ısı pompası kullanılarak kurutulan örnek en düşük DPPH yakalama aktivitesine sahiptir (1,04 mmol Trolox/100g). Açık sistemde kurutulan örneklere bakıldığında infrared destekli kurutma ve sadece ısı pompası kullanılarak kurutma karşılaştırıldığında yöntem farkının DPPH radikal yakalama aktivitesi üzerinde önemli farkı yoktur ($p>0,05$). Kapalı sistem örnekleri kendi içerisinde değerlendirildiğinde, en yüksek DPPH radikal yakalama aktivitesi değerine 20 cm infrared destekli kurutma ile ulaşılmıştır (1,13 mmol Trolox/100 g), bu değeri sırasıyla 30 cm infrared desteği ile kurutulan örnek ve sadece ısı pompası ile kurutulan örnek izlemiştir. Fakat kapalı sistemde kurutulan örnekler arasında istatistiksel olarak önemli fark gözlenmemiştir ($p>0,05$). Sonuç olarak cevizlerin DPPH radikal aktivitesi üzerine farklı kurutma yöntemlerinin etkisi yoktur ($p<0,05$). Ceviz örneklerinin ABTS radikal yakalama aktivitesi değerlendirildiğinde açık sistemde sadece ısı pompası kullanılarak kurutulan örnek en düşük değere sahiptir (1,35 mmol Trolox/100 g). Açık sistemde infrared desteği ABTS radikal yakalama aktivitesini önemli oranda arttırmıştır (Çizelge 7.6; 1,44 mmol Trolox /100g) ($p<0,05$). Kapalı sistemde kurutulan örnekler değerlendirildiğinde infrared destekli kurutma ABTS radikal etkisini arttırmış olsa da bu artış istatistiksel olarak önemli değildir ($p>0,05$). Ayrıca yüksek antioksidan kapasitesi yüksek fenolik içerikle bağdaştırılır [7]. Çizelge 7.6'ya göre antioksidan kapasitesi yüksek olan örnekler incelendiğinde toplam fenolik içeriğinin de yüksek olduğu gözlenmektedir.

Çizelge 7.6. Ceviz örneklerinin toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasitesi

Ceviz örnekleri	TFM* (g GA/100 g)	Antioksidan Kapasitesi	
		DPPH* (mmol Trolox/ 100g)	ABTS *(mmol Trolox/100g)
1	1,22±0,08^{d}	1,04±0,07^{ab}	1,33±0,07^{b}
2	1,26±0,07^{d}	1,00±0,02^{b}	1,35±0,02^{b}
3	1,57±0,07^{ab}	1,09±0,02^{ab}	1,44±0,04^{a}
4	1,43±0,01^{c}	1,09±0,04^{ab}	1,42±0,04^{ab}
5	1,63±0,08^{a}	1,13±0,07^{a}	1,49±0,09^{a}
6	1,52±0,08^{bc}	1,10±0,07^{ab}	1,45±0,06^{a}

**Sonuçlar kuru madde üzerinden hesaplanmıştır.*

***TFM: Toplam fenolik madde miktarı; GA: Gallik asit; 1:İşlem görmemiş ceviz, 2: Açık sistem-HP, 3:Açık sistem-HP-IR,4:Kapalı sistem-HP,5: Kapalı sistem -HP-IR20cm, 6: Kapalı sistem -HP-IR30cm.*

**** Aynı sütunda farklı harflerle işaretlenmiş ortalamalar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre istatistiksel olarak önemli fark vardır ($p<0.05$)*

7.4. Hata Analizi

Deneylerin hata analizi sonuçları Çizelge 7.7'de verilmiştir. 2019 ve 2020 yılında Grup 1 ve Grup 2 deney setlerinde yapılan deneylerde aynı ölçüm aletleri kullanıldığı için kurutma havası sıcaklığı, kurutulan ürün kütlesi, hava hızı, kurutma havası bağıl nemi, kurutma hızı ve nem oranı belirsizlik analizi sonuçları aynıdır. Ancak, nem içeriği ve enerji verimliliğindeki belirsizlikler birbirinden farklıdır. Belirsizlik analizi sonuçları kabul edilebilir değerlere sahiptir.

Çizelge 7.7. Belirsizlik analizi sonuçları

Parametre	Birim	Belirsizlik
Kurutma havası sıcaklığı	°C	±0,571
Kurutulan ürün kütlesi	g	±0,502
Hava hızı	m/s	±0,104
Kurutma havasının bağıl nemi	%	±2,410
Kurutma hızı (DR)	$g_{su}/g_{kurumadde}$.dak. (%)	±0,201
Nem oranı (MR)	%	±0,121

Çizelge 7.7. (devam) Belirsizlik analizi sonuçları

Parametre	Birim	Belirsizlik
Nem içeriği (MC)		
Grup 1 - 2019	$g_{su}/g_{kurumadde}$ (%)	±0,073
Grup 1 - 2020	$g_{su}/g_{kurumadde}$ (%)	±0,026
Grup 2 - 2020	$g_{su}/g_{kurumadde}$ (%)	±0,026
Enerji verimliliği (EE)		
Grup 1 - 2019	%	±0,021
Grup 1 - 2020	%	±0,022
Grup 2 - 2020	%	±0,053

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sıcaklık Kontrollü Açık Sistem Konvektif İnfrared Kurutucu

2019 yılı deneyleri

Bu çalışmada cevizler HP ve IRHP ile 40 °C hava sıcaklığında ve 1,5 m/s hava hızında kurutulmuştur. İki ısı transfer mekanizmasının ve ısının ürüne iki yönlü nüfuziyetinin etkileri enerji-ekserji analizi ve kurutma kinetiği ile incelenmiştir. Cevizin nem içeriği (kuru bazda) 0,63 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'den 0,12 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$' ye düşürülmüştür. Deneyler sonucunda bazı önemli çıktılar elde edilmiştir:

- Kombine ısı transferi ve ısının ürüne çift yönlü penetrasyonu, enerji-ekserji analizine göre sistem performansını geliştirmiştir. EE değerleri IRHP'de %0,29-7,94 ve HP'de %0,28-6,54 aralığında değişmiştir. Ekserji verimliliği IRHP'de %59,54 – 68,39 ve HP'de %54,76 – 59,92 arasında değişmiştir.
- HP'de toplam enerji tüketimi 18,44 kWh ve kuruma süresi 800 dakikadır. IRHP'de ısı pompası ve IR lambasının elektrik tüketimi sırasıyla 14,64 kWh ve 1,81 kWh'dir. Toplam kuruma süresi 640 dakika ve IR lambasının çalışma süresi 217,6 dakikadır. İnfrared teknolojisi kullanılarak %10 enerji tasarrufu ve %20 zaman tasarrufu sağlanmıştır.
- Ortalama COP_{HP} değeri IRHP'de 4,10 ve HP'de 3,97'dir. Tüm sistemin COP_{ts} değeri IRHP için 3,14 ve HP için 3,34'tür.
- IR lamba ürünü hızlı ısıtır ve böylece üründen daha fazla su buharlaştırır. Bu nedenle, IRHP'deki ısı ve kütle transferi HP'den daha hızlı gerçekleşmiştir.
- Ortalama ürün yüzey sıcaklığı HP'de 35 °C, IRHP'de 37 °C değerlerindedir. IRHP'de IR lambası 35-40 °C arasında ürün yüzeyi set sıcaklık değerlerine göre kontrol edilmiştir. Ürünün iç sıcaklıkları HP'de 32,5 °C, IRHP'de 33,5 olarak gözlemlenmiştir.
- Enerji - ekserji analizi ve zaman tasarrufu açısından ceviz kurutmaya en uygun ısı transfer mekanizması IRHP olarak bulunmuştur.

Literatürde kuruyemişlerin IR enerjisi kullanılarak kurutulması üzerine çok az çalışma vardır. Bildiğimiz kadarıyla cevizin infrared destekli konvektif kurutulmasının enerji ve

ekserji analizi ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın ceviz kurutma işleminin anlaşılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu tasarımın, yüksek enerji ve ekserji verimi ile kuruyemiş endüstrisinde yeni tip büyük ölçekli bir kurutucu tasarlamak için kullanılabileceği görülmüştür.

2020 yılı deneyleri

Bu çalışmada cevizler HP ve IRHP ile 40 °C hava sıcaklığında ve 1,5 m/s hava hızında kurutulmuştur. İki ısı transfer mekanizmasının ve ısının ürüne iki yönlü nüfuziyetinin etkileri enerji-ekserji analizi ve kurutma kinetiği ile incelenmiştir. Cevizin nem içeriği (kuru bazda) 1,12 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'den 0,12 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'ye düşürülmüştür. Deneyler sonucunda bazı önemli çıktılar elde edilmiştir:

- Kombine ısı transferi ve ısının ürüne çift yönlü penetrasyonu, enerji-ekserji analizine göre sistem performansını geliştirmiştir. EE değerleri IRHP'de %0,26-3,33 ve HP'de %0,18-3,22 aralığında değişmiştir. Ekserji verimliliği IRHP'de %65,66-72,10 ve HP'de %54,22-66,67 arasında değişmektedir.
- HP'de toplam enerji tüketimi 39,3 kWh ve kuruma süresi 1520 dakikadır. IRHP'de ısı pompası ve IR lambasının elektrik tüketimi sırasıyla 34,5 kWh ve 2,5 kWh şeklindedir. Toplam kuruma süresi 1300 dakika ve IR lambasının çalışma süresi 294,05 dakikadır. İnfrared lamba kullanılarak %5,85 enerji tasarrufu ve %14,5 zaman tasarrufu sağlanmıştır.
- Ortalama COP_{HP} değeri IRHP'de 3,60 ve HP'de 3,60'dır. Tüm sistemin COP_{ts} değeri IRHP için 3,16 ve HP için 3,33'tür.
- Ortalama ürün yüzey sıcaklığı HP'de 35,34 °C iken IRHP'de 38,4 °C'dur. IRHP'de IR lambası 35-40 °C arasında ürün yüzey set sıcaklık değerlerine göre kontrol edilmiştir. Ürünün iç sıcaklıkları HP'de 32,32 °C, IRHP'de 36,24 olarak gözlenmiştir.
- Enerji - ekserji analizi ve zaman tasarrufu açısından ceviz kurutmaya en uygun ısı transfer mekanizması IRHP olarak bulunmuştur.

8.2. Sıcaklık ve Bağıl Nem Kontrollü Kapalı Sistem Konvektif İnfrared Kurutucu

Ceviz HP, IRHP20 ve IRHP30 ile 40 ℃ hava sıcaklığında ve 1,5 m/s hava hızında kurutulmuştur. İki ısı transfer mekanizması, ürün-kaynak mesafesi, aralıklı çalışma, ısının ürüne çift yönlü penetrasyonu etkileri incelenmiştir. Enerji-ekserji analizi ve kurutma kinetiği araştırılmıştır. Cevizin nem içeriği (kuru bazda) 1,12 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'den 0,12 $g_{su}/g_{kuru\ madde}$'ye düşürülmüştür. Bu çalışmada elde edilen önemli sonuçlar şunlardır:

- Kombine ısı transferi, ürün-yüzey mesafesinin azalması ve ısının ürüne çift yönlü penetrasyonu, enerji-ekserji analizine göre sistem performansını geliştirmiştir. EE değerleri IRHP30'da %1,3025-7,2141, IRHP20'de %1,2065-9,1416 ve HP'de %1,23-8,08 aralığında değişmiştir. Ekserji verimliliği IRHP30'da %71,7-76,9, IRHP20'de %70,21-77,88 ve HP'de %65,18-84,13 arasında değişmiştir.
- Kurutma sistemlerinde toplam enerji tüketim değerleri HP, IRHP20 ve IRHP30 için sırasıyla 10,898, 9,301 ve 10,224 kWh'dir. Kuruma süreleri HP, IRHP20 ve IRHP30'da sırasıyla 1840, 1360 ve 1320 dakikadır. İnfrared lamba kullanılarak geleneksel HP sisteme göre IRHP20 ve IRHP30'da sırasıyla %14,7 ve %6,2 enerji tasarrufu, %26,1 ve %28,3 zaman tasarrufu sağlanmıştır.
- Ortalama COP_{HP} değeri HP'de 5,15, IRHP20'de 5,01 ve IRHP30'da 5,24 şeklindedir. Tüm sistemin COP_{ts} değeri HP için 2,34, IRHP20 için 1,89 ve IRHP30 için 1,56 olarak hesaplanmıştır.
- Ortalama ürün yüzey sıcaklığı değerleri HP'de 39 ℃, IRHP20'de 40 ℃ ve IRHP30'da 39,9 şeklindedir. IRHP'de ürün yüzeyinin 35-40 ℃ arasında ayarlanan sıcaklık değerlerine göre IR lambası kontrol edilmiştir. Ürünün iç sıcaklıkları HP'de 35,7 ℃, IRHP20'de 37,6 ℃ ve IRHP30'da 37,4 ℃ olarak gözlendi.
- IRHP20, enerji - ekserji analizi ve zaman tasarrufu açısından ceviz kurutmaya en uygun ısı transfer mekanizması olarak bulunmuştur.

Isının ürüne iki yönlü penetrasyonu ile cevizin kuruma süresi azaltılmış, enerji tüketimi düşürülmüş ve kaliteli bir kurutma sağlanmıştır. Bu çalışma ile ürün kalitesi, enerji tüketimi ve kurutma süresi açısından açık ve kapalı çevrim infrared konvektif kurutma sisteminde elde edilen sonuçlar literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca gıda kalitesi, enerji ve ekserji analizleri ile kuruyemiş kurutma sistemlerine katkı sağlayacaktır. Açık ve kapalı çevrim

kurutma sistemleri arasından gıda kalitesi, enerji ve zaman tasarrufu açısından sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı çevrim konvektif infrared sistemler önerilmektedir. Ürün – kaynak mesafesinin 20 cm olduğu IRHP20, gıda kalitesinden ödün vermeden en az enerji tüketen sistem olmuştur. Kapalı çevrimde gıda kalitesi bozulmadan enerji sarfiyatı azaldığından sanayi için daha ekonomik kurutma mümkün olacaktır. Bu çalışmanın kuruyemiş kurutma endüstrisinde infrared lambaların yaygınlaşmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Kaliteli bir kuruma prosesi ile ürünlerin ihracat sürecinde istenen kalite standartlarına ulaşılması mümkündür. Kaliteli ceviz üretimi ile ceviz ihracatı arttırılırken ithalatı azaltılabilecektir.

Öneriler

- Bu tez çalışması kapsamında kurulan sıcaklık kontrollü açık sistem konvektif infrared kurutucu ve sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kapalı sistem konvektif infrared kurutucu güneş enerjisi ile entegre kullanılabilir. Sıcak hava, güneş radyasyonunun yüksek ve ulaşılabilir olduğu zaman aralığında havalı güneş kollektörlerinden sağlanabilir.
- Sistemin elektrik ihtiyacı gündüz fotovoltaik güneş panelleri kullanılarak karşılanabilir ve ihtiyaç fazlası elektrik akülere depolanabilir.
- Cevizin kurutulmasında gıda kalitesinin bozulmaması için maksimum sıcaklık değeri literatürde 43 °C ile sınırlandırılmıştır. Ancak literatürde görüldüğü üzere kurumanın başlarında birkaç saat yüksek sıcaklığa (65 °C) maruz bırakılması ve daha sonra sıcaklığın düşürülmesi (43 °C) ile gıda kalitesi sonuçlarının kabul edilebilir aralıkta olduğunu göstermiştir. Bu sebeple kurumanın daha hızlı gerçekleşmesi amacıyla bu çalışmadaki set sıcaklığından daha yüksek kurutma havası sıcaklıklarında ürün yüzey sıcaklığı kontrol edilerek ceviz kurutma deneyleri gerçekleştirilebilir.
- Tepki süresi hızlı olan infrared lamba kullanımı ile ürünün istenen sıcaklık aralığında tutulması daha kolay olmaktadır. Ürün yüzey sıcaklığı kontrolünün önemli olduğu proseslerde hızlı tepki süresine sahip infrared lambalar kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Vanhanen, L. P., and Savage, G. P. (2006). The use of peroxide value as a measure of quality for walnut flour stored at five different temperatures using three different types of packaging. *Food Chemistry*, 99(1), 64–69.

2. Jensen, P. N., Sørensen, G., Brockhoff, P., and Bertelsen, G. (2003). Investigation of packaging systems for shelled walnuts based on oxygen absorbers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(17), 4941–4947.

3. Rumsey, T., and Thompson, J. (1984). Ambient air drying of english walnuts. *Transactions of the ASAE*, 27 (3), 942–945.

4. Chen, C., Weipeng, Z., Venkitasamy, C., Khir, R., McHugh, T., and Pan, Z. (2019). Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristics. *Drying Technology*, 38(8), 975-986.

5. Atungulu, G. G., Teh, H. E., Wang, T., Fu, R., Wang, X., Khir, R., and Pan, Z. (2013). Infrared pre-drying and dry-dehulling of walnuts for improved processing efficiency and product quality. *Applied Engineering in Agriculture*, 29 (6), 961–971.

6. Chen, C., Venkitasamy, C., Zhang, W., Khir, R., Upadhyaya, S., and Pan, Z. (2020). Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150, 119283. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119283

7. Fu, M., Qu, Q., Yang, X., and Zhang, X. (2016). Effect of intermittent oven drying on lipid oxidation, fatty acids composition and antioxidant activities of walnut. *LWT - Food Science and Technology*, 65, 1126–1132.

8. Hassan-Beygi, S. R., Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., and Massah, J. (2009). Drying characteristics of walnut (Juglans regia L.) during convection drying. *International Agrophysics*, 23, 129–135.

9. Chen, C., Venkitasamy, C., Zhang, W., Deng, L., Meng, X., and Pan, Z. (2020). Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. *Journal of Food Engineering*, 285, 110105.

10. Borompichaichartkul, C., Luengsode, K., Chinprahast, N., and Devahastin, S. (2009). Improving quality of macadamia nut (Macadamia integrifolia) through the use of hybrid drying process. *Journal of Food Engineering*, 93, 348–353.

11. Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., and Tabil, L. G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, *78*, 98–108.

12. Rafiee, S., Jafari, A., Kashaninejad, M., and Omid, M. (2007). Experimental and numerical investigations of moisture diffusion in pistachio nuts during drying with high temperature and low relative humidity. *International Journal of Agriculture and Biology*, 9 (3), 412–415.

13. Turan, A., and Karaosmanoğlu, H. (2019). Effect of drying methods on long term storage of hazelnut. *Food Science and Technology*, 39 (2).

14. Ceylan, İ., and Aktaş, M. (2008). Energy analysis of hazelnut drying system-assisted heat pump. *International Journal of Energy Research*, 32(February), 971–979.

15. Goneli, A. L. D., Araujo, W. D., Filho, C. P. H., Martins, E. A. S., and Oba, G. C. (2017). Drying kinetics of peanut kernels in thin layers. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 37 (5), 994–1003.

16. Venkitasamy, C., Brandl, M. T., Wang, B., McHugh, T. H., Zhang, R., and Pan, Z. (2017). Drying and decontamination of raw pistachios with sequential infrared drying, tempering and hot air drying. *International Journal of Food Microbiology*, 246, 85–91.

17. Venkitasamy, C., Zhu, C., Brandl, M. T., Niederholzer, F. J. A., Zhang, R., Mchugh, T. H., and Pan, Z. (2018). Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of Enterococcus faecium NRRL B-2354. *LWT - Food Science and Technology*, 95, 123–128.

18. Qu, Q., Yang, X., Fu, M., Chen, Q., Zhang, X., He, Z., and Qiao, X. (2016). Effects of three conventional drying methods on the lipid oxidation, fatty acids composition, and antioxidant activities of walnut (Juglans regia L.). *Drying Technology*, 34(7), 822–829.

19. Batirel, S., Yilmaz, A. M., Sahin, A., Perakakis, N., Kartal Ozer, N., and Mantzoros, C. S. (2018). Antitumor and antimetastatic effects of walnut oil in esophageal adenocarcinoma cells. *Clinical Nutrition*, 37(6), 2166–2171.

20. Gursul, S., Karabulut, I., and Durmaz, G. (2019). Antioxidant efficacy of thymol and carvacrol in microencapsulated walnut oil triacylglycerols. *Food Chemistry*, 278, 805–810.

21. Jahanban-Esfahlan, A., Ostadrahimi, A., Tabibiazar, M., and Amarowicz, R. (2019). A comprehensive review on the chemical constituents and functional uses of walnut (Juglans spp.) husk. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(16).

22. Jahanban-Esfahlan, A., Jahanban-Esfahlan, R., Tabibiazar, M., Roufegarinejad, L., and Amarowicz, R. (2020). Recent advances in the use of walnut (Juglans regia L.) shell as a valuable plant-based bio-sorbent for the removal of hazardous materials. *RSC Advances*, 10(12), 7026–7047.

23. Yu, X.-L., Zielinska, M., Ju, H.-Y., Mujumdar, A. S., Duan, X., Gao, Z.-J., and Xiao, H.-W. (2020). Multistage relative humidity control strategy enhances energy and exergy efficiency of convective drying of carrot cubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149, 119231.

24. Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., and Amirnejat, H. (2011). Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energy*, 36, 6433–6441.

25. Afzali, F., Darvishi, H., and Behroozi-Khazaei, N. (2019). Optimizing exergetic performance of a continuous conveyor infrared-hot air dryer with air recycling system. *Applied Thermal Engineering*, 154(March), 358–367.

26. Motevali, A., Jafari, H., and Hashemi, S. J. (2018). Effect of IR intensity and air temperature on exergy and energy at hybrid infrared-hot air dryer. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 24 (1), 31–42.

27. Hebbar, H. U., Vishwanathan, K. H., and Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65, 557–563.

28. Jaturonglumlert, S., and Kiatsiriroat, T. (2010). Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *Journal of Food Engineering*, 100, 254–260.

29. El-mesery, H. S., and Mwithiga, G. (2015). Performance of a convective , infrared and combined infrared- convective heated conveyor-belt dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 52 (5), 2721–2730.

30. El-mesery, H. S., Abomohra, A. E.-F., Kang, C.-U., Cheon, J.-K., Basak, B., and Jeon, B.-H. (2019). Evaluation of infrared radiation combined with hot air convection for energy-efficient drying of biomass. *Energies*, 12, 2818.

31. Afzal, T. M., Abe, T., and Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering*, 42(4), 177–182.

32. Łechtańska, J. M., Szadzińska, J., and Kowalski, S. J. (2015). Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 98, 155–164.

33. İnternet: Türk Standartları Enstitüsü, TS 1275 Ceviz - Kabuklu, Turkey, 2008. URL: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/10/20081011-12.htm. Son Erişim Tarihi : 20.05.2021.

34. İnternet: PGlobal Küresel Danışmanlık ve Eğitim Hizmetleri A.Ş., Üretici Rehberi Ceviz, URL: http://www.kop.gov.tr/upload/dokumanlar/226.pdf. Son Erişim Tarihi : 20.05.2021.

35. Bakkalbaşı, E., Menteş Yılmaz, Ö., and Artık, N. (2010). Türkiye 'de Yetiştirilen Yerli Bazı Ceviz Çeşitlerinin Fiziksel Özellikleri ve Kimyasal Bileşenleri. *Akademik Gıda*, 8(1), 6–12.

36. Muradoglu, F., Oguz, H. I., Yildiz, K., and Yilmaz, H. (2010). Some chemical composition of walnut (Juglans regia L.) selections from Eastern Turkey. *African Journal of Agricultural Research*, *5*(17), 2379–2385.

37. Ruggeri, S., Cappelloni, M., Gambelli, L., Nicoli, S., and Carnovale, E. (1998). Chemical composition and nutritive value of nuts grown in Italy. *Italian Journal of Food Science*, 10(3), 243–252.

38. Zwarts, L., Savage, G. P., and McNeil, D. L. (1999). Fatty acid content of New Zealand-grown walnuts (Juglans regia L.). *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50(3), 189–194.

39. Bada, J. C., León-Camacho, M., Prieto, M., Copovi, P., and Alonso, L. (2010). Characterization of walnut oils (Juglans regia L.) from Asturias, Spain. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87(12), 1469–1474.

40. Li, L., Tsao, R., Yang, R., Kramer, J. K. G., and Hernandez, M. (2007). Fatty acid profiles, tocopherol contents, and antioxidant activities of heartnut (Juglans ailanthifolia Var. cordiformis) and Persian walnut (Juglans regia L). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(4), 1164–1169.

41. Amaral, J. S., Casal, S., Pereira, J. A., Seabra, R. M., and Oliveira, B. P. P. (2003). Determination of Sterol and Fatty Acid Compositions, Oxidative Stability, and Nutritional Value of Six Walnut (Juglans regia L.) Cultivars Grown in Portugal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(26), 7698–7702.

42. Savage, G. P., Dutta, P. C., and McNeil, D. L. (1999). Fatty acid and tocopherol contents and oxidative stability of walnut oils. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(9), 1059–1063.

43. Villarreal-Lozoya, J. E., Lombardini, L., and Cisneros-Zevallos, L. (2007). Phytochemical constituents and antioxidant capacity of different pecan [Carya illinoinensis (Wangenh.) K. Koch] cultivars. *Food Chemistry*, 102(4), 1241–1249.

44. Akca, Y., and Yilmaz, S. (2017 October). *Walnut production in Turkey from past to present*. Paper presented at the VIII International Scientific Agriculture Symposium, Bosnia-Herzegovina.

45. Arranz, S., Pérez-Jiménez, J., and Saura-Calixto, F. (2008). Antioxidant capacity of walnut (Juglans regia L.): Contribution of oil and defatted matter. *European Food Research and Technology*, 227(2), 425–431.

46. Arcan, I., and Yemenicioğlu, A. (2009). Antioxidant activity and phenolic content of fresh and dry nuts with or without the seed coat. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(3), 184–188.

47. Li, L., Tsao, R., Yang, R., Liu, C., Zhu, H., and Young, J. C. (2006). Polyphenolic profiles and antioxidant activities of heartnut (Juglans ailanthifolia var. cordiformis) and Persian walnut (Juglans regia L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(21), 8033–8040.

48. Esen, Ö. B. (2013). *Health Related Properties of Different Parts of Walnut (Juglans Regia L.) and a Walnut Drink*, M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.

49. Ros, E., Izquierdo-Pulido, M., and Sala-Vila, A. (2018). Beneficial effects of walnut consumption on human health: Role of micronutrients. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 21 (6), 498–504.

50. Hayes, D., Angove, M. J., Tucci, J., and Dennis, C. (2016). Walnuts (Juglans regia) Chemical Composition and Research in Human Health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(8), 1231–1241.

51. Delgado, J. M. P. Q. and Gilson Barbosa de Lima, A. (Eds.). (2016) Drying and Energy Technologies. *Advanced Structured Materials* (Volume 63). Springer.

52. Wolf, W., Spiess, W. E. L., and Jung, G. (1985). *Sorption isotherms and water activity of food materials* (First Edition). New York: Elsevier.

53. Wilhelm, L. R., Suter, D. A., and Brusewitz, G. H. (2004). Drying and Dehydration. In American Society of Agricultural Engineers (Ed.), *Food & Process Engineering Technology*. St. Joseph, Michigan. American Society of Agricultural Engineers, pp. 259-284.

54. Bruin, S., and Luyben, K. C. A. . (1980). Drying of food materials: a review of recent developments. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Advances in Drying* (Vol. 1). Washington: Hemisphere Publishing Corporation, pp. 155-215.

55. Mujumdar, A. S. (2015). Principles, Classification and Selection of Dryers. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (Fourth Edition). Boca Raton, Florida. CRC Press Taylor & Francis Group.

56. Heldman, D. R., and Lund, D. B. (Eds.). (2006). *Handbook of food engineering* (Second Edition). Boca Raton, Florida. CRC Press Taylor & Francis Group.

57. Koroş, B. (2007). *Geleneksel Türk Gıdalarının Adsorpsiyon İzotermlerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

58. Delgado, J. M. P. Q., Gilson Barbosa de Lima, A., Neto, S. R. F., and Franco, C. M. R. (2016). Intermittent Drying: Fundamentals, Modeling and Applications. In J. M. P. Q. Delgado & A. Gilson Barbosa de Lima (Eds.), *Advanced Structured Materials - Drying and Energy Technologies* (Vol. 63). Switzerland. Springer, pp. 19-43.

59. Toledo, R. T., Singh, R. K., and Kong, F. (2018). *Food Science Text Series - Fundamentals of Food Process Engineering* (Fourth Edition). Switzerland. Springer.

60. Chua, K. J., Mujumdar, A. S., Hawlader, M. N. A., Chou, S. K., and Ho, J. C. (2001). Batch drying of banana pieces - effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour. *Food Research International*, 34, 721–731.

61. Barbosa de Lima, A. G., da Silva, J. V., Pereira, E. M. A., dos Santos, I. B., and Barbosa de Lima, W. M. P. (2016). Drying of Bioproducts: Quality and Energy Aspects. In J. M. P. Q. Delgado & A. Gilson Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (Vol. 63). Switzerland. Springer.

62. Efremov, G. (2014). Infrared Drying. In E. Tsotsas and A. S. Mujumdar (Eds.), *Modern Drying Technology- Process Intensification* (Vol. 5). Germany. WİLEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

63. Kemp, I. C. (2005). Reducing Dryer Energy Use by Process Integration and Pinch Analysis. *Drying Technology*, 23 (9-11), 2089–2104.

64. Strumillo, C., Jones, P. L. and Zylla, R. (2007). Energy Aspects in Drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (Third Edition). Boca Raton, Florida. CRC Press Taylor & Francis Group.

65. Schoenau, G. J., Arinze, E. A. and Sokhansanj, S. (1995). Simulation and optimization of energy systems for in-bin drying of canola grain (rapeseed). *Energy Conversion and Management*, 36 (1), 41–59.

66. Naghavi, Z., Moheb, A. and Ziaei-rad, S. (2010). Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model. *Energy Conversion and Management*, 51, 258–264.

67. Aregba, A. W. and Nadeau, J. P. (2007). Comparison of two non-equilibrium models for static grain deep-bed drying by numerical simulations. *Journal of Food Engineering*, 78, 1174–1187.

68. Jumah, R. Y. and Mujumdar, A. . (2007). Dryer Emission Control Systems. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying.* Third Edition. Boca Raton, Florida. CRC Press Taylor and Francis Group.

69. Van ‘t Land, C. M. (1991). *Industrial drying equipment: selection and application* (First Edition*)*. New York. Marcel Dekker Inc.

70. Keey, R. B. (1991). *Drying of loose and particulate materials* (First Edition). New York. Hemisphere Publishing Corporation.

71. Raghavan, V. G. S., Rennie, T. J., Sunjka, P. S. ., Orsat, V., Phaphuangwittayakul, W. and Terdtoon, P. (2004). *Energy aspects of novel techniques for drying biological materials.* Proceedings of the the 14th International Drying Symposium, Vol. B. Sao Paulo, Brazil. pp. 1021–1028.

72. Ratti, C., and Mujumdar, A. S. (2015). Infrared Drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (Fourth Edition). Boca Raton, Florida. CRC Press Taylor & Francis Group.

73. Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*, 2 (3), 109–119.

74. Sakai, N. and Hanzawa, T. (1994). Applications and advances in far infrared heating in Japan. *Trends in Food Science & Technology*, 5 (11), 357-362.

75. Kreith, F., Manglik, R. M. and Bohn, M. S. (2011). *Principles of Heat Transfer*, (Seventh Edition). United States of America. Cengage Learning.

76. Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E. and Rorrer, G. L. (2008). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* (Fifth Edition). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

77. Hallström, B., Skjöldebrand, C. and Trägårdh, C. (1988). *Heat Transfer and Food Products* (First Edition). London: Elsevier Applied Science.

78. Cunniff, P. and Association of Official Analytical Chemists. (1995). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (16th Edition), Washington, DC. Association of Official Analytical Chemists.

79. Suri, K., Singh, B., Kaur, A., Yadav, M. P. and Singh, N. (2019). Impact of infrared and dry air roasting on the oxidative stability, fatty acid composition, Maillard reaction products and other chemical properties of black cumin (Nigella sativa L.) seed oil. *Food Chemistry*, 295, 537–547.

80. Pycia, K., Kapusta, I., Jaworska, G. and Jankowska, A. (2019). Antioxidant properties, profile of polyphenolic compounds and tocopherol content in various walnut (Juglans regia L.) varieties. *European Food Research and Technology*, 245(3), 607–616.

81. Pasha, I., Ahmad, F., Siddique, Z. and Iqbal, F. (2020). Probing the effect of physical modifications on cereal bran chemistry and antioxidant potential. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(4), 1909–1918.

82. Alaşalvar, H. and Çam, M. (2020). Ready to drink iced teas from microencapsulated spearmint (Mentha spicata L.) and peppermint (Mentha piperita L.) extracts: physicochemical, bioactive and sensory characterization. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(3), 1366–1375.

83. Severcan, S. S., Uzal, N. and Kahraman, K. (2020). Clarification of Apple Juice Using New Generation Nanocomposite Membranes Fabricated with TiO_2 and Al_2O_3 Nanoparticles. *Food and Bioprocess Technology*, 13(3), 391–403.

84. American Oil Chemists' Society. (2004). *Official methods and recommended practices of the AOCS* (Fifth Edition). USA. Champaign, IIIinois: American Oil Chemists' Society.

85. Dieffenbacher, A. and Pocklington, W. D. (1992). *Standard Methods for the Analysis of Oils, Fats and Derivatives* (Seventh Edition). Great Britain. Oxford Blackwell Scientific Publications.

86. Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. (2007). Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *Journal of Food Engineering*, 78, 1248–1258.

87. Aghbashlo, M. (2016). Exergetic simulation of a combined infrared-convective drying process. *Heat Mass Transfer*, 52, 829–844.

88. Dincer, I. and Sahin, A. Z. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 645–652.

89. Wright, S. E., Rosen, M. A., Scott, D. S. and Haddow, J. B. (2002). The exergy flux of radiative heat transfer with an arbitrary spectrum. *Exergy, an International Journal*, 2, 69–77.

90. Srikiatden, J. and Roberts, J. S. (2007). Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements. *International Journal of Food Properties*, 10, 739–777.

91. Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (Second Edition). Great Britain. Oxford University Press.

92. Essalhi, H., Benchrifa, M., Tadili, R. and Bargach, M. N. (2018). Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 58–64.

93. Feng, H., Yin, Y. and Tang, J. (2012). Microwave drying of food and agricultural materials: Basics and heat and mass transfer modeling. *Food Engineering Reviews*, 4, 89–106.

94. Singh, S. P., Jairaj, K. S. and Srikant, K. (2012). Universal drying rate constant of seedless grapes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6295–6302.

95. Dincer, I. and Hussain, M. M. (2002). Development of a new Bi-Di correlation for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3065–3069.

96. Dincer, Ibrahim. (1996). Development of a new number (the Dincer number) for forced-convection heat transfer in heating and cooling applications. *International Journal of Energy Research*, 20, 419–422.

97. Holman, J. P. (2011). *Experimental Methods for Engineers* (Eighth Edition). New York. Mc Graw Hill.

98. Kuzgunkaya, E. H. and Hepbasli, A. (2007). Exergetic evaluation of drying of laurel leaves in a vertical ground-source heat pump drying cabinet. *International Journal of Energy Research*, 31, 245–258.

99. Dincer, I. and Rosen, M. A. (2013). Exergy Analysis of Heat Pump Systems. *Exergy*, Chapter 7, 101–113.

100. Aktaş, M., Khanlari, A., Amini, A. and Şevik, S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared–heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. *Energy Conversion and Management*, 132, 327–338.

101. Şevik, S., Aktaş, M., Dolgun, E. C., Arslan, E. and Tuncer, A. D. (2019). Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. *Solar Energy*, 180, 537–549.

102. Kabiri, G., Bouda, S., Elhansali, M. and Haddioui, A. (2019). Biochemical characterization and antioxidant activity of walnut kernel (Juglans regia L.) of accessions from Middle and High Atlas in Morocco. *Acta Scientiarum - Biological Sciences*, 41(1), 1–12.

103. Bakker, R. and Elbersen, H. (2005). *Managing ash content and quality in herbaceous biomass: an analysis from plant to product.* WUR Bioenergy Papers and Project Reports, 14th European Biomass Conference, Paris, France, October, 17-21, pp. 210-213.

104. Martínez, M. L., Labuckas, D. O., Lamarque, A. L. and Maestri, D. M. (2010). Walnut (Juglans regia L.): Genetic resources, chemistry, by-products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(12), 1959–1967.

105. Li, Q., Yin, R., Zhang, Q., Wang, X., Hu, X., Gao, Z. and Duan, Z. (2017). Chemometrics analysis on the content of fatty acid compositions in different walnut (Juglans regia L.) varieties. *European Food Research and Technology*, 243, 2235–2242.

106. Wakeling, L. T., Mason, R. L., D'Arcy, B. R. and Caffin, N. A. (2001). Composition of Pecan Cultivars Wichita and Western Schley [Carya illinoinensis (Wangenh.) K. Koch] Grown in Australia. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(3), 1277–1281.

107. Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M. and Jahanbakhshi, A. (2019). The effect of microwave and convective dryer with ultrasound pre-treatment on drying and quality properties of walnut kernel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(11), 1–17.

108. Bawa, M., Songsermpong, S., Kaewtapee, C. and Chanput, W. (2020). Effects of microwave and hot air oven drying on the nutritional, microbiological load, and color parameters of the house crickets (Acheta domesticus). *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(5), 1–12.

109. Wang, S., Monzon, M., Johnson, J. A., Mitcham, E. J. and Tang, J. (2007). Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts. II: Insect mortality and product quality. *Postharvest Biology and Technology*, 45(2), 247–253.

110. Wang, S., Tang, J., Johnson, J. A., Mitcham, E., Hansen, J. D., Cavalieri, R. P., Bower, J. and Biasi, B. (2002). Process protocols based on radio frequency energy to control field and storage pests in in-shell walnuts. *Postharvest Biology and Technology*, 26(3), 265–273.

111. Turan, A. (2018). Effect of drying methods on nut quality of hazelnuts (Corylus avellana L.). *Journal of Food Science and Technology*, 55(11), 4554–4565.

112. Venkitasamy, C., Zhu, C., Brandl, M. T., Niederholzer, F. J. A., Zhang, R., McHugh, T. H. and Pan, Z. (2018). Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of Enterococcus faecium NRRL B-2354. *LWT- Food Science and Technology*, 95, 123–128.

113. Dordoni, R., Cantaboni, S. and Spigno, G. (2019). Walnut paste: oxidative stability and effect of grape skin extract addition. *Heliyon*, 5(9), e02506.

114. Aachary, A. A., Chen, Y., Eskin, N. A. M. and Thiyam-Hollander, U. (2014). Crude canolol and canola distillate extracts improve the stability of refined canola oil during deep-fat frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 116(11), 1467–1476.

115. Hashemi, S. M. B., Mousavi Khaneghah, A., Koubaa, M., Lopez-Cervantes, J., Yousefabad, S. H. A., Hosseini, S. F., Karimi, M., Motazedian, A. and Asadifard, S. (2017). Novel edible oil sources: Microwave heating and chemical properties. *Food Research International*, 92, 147–153.

116. Marmesat, S., Morales, A., Velasco, J., Ruiz-Méndez, M. V. and Dobarganes, M. C. (2009). Relationship between changes in peroxide value and conjugated dienes during oxidation of sunflower oils with different degree of unsaturation. *Grasas y Aceites*, 60 (2), 155–160.

117. Ding, C., Khir, R., Pan, Z., Zhao, L., Tu, K., El-Mashad, H. and McHugh, T. H. (2015). Improvement in Shelf Life of Rough and Brown Rice Using Infrared Radiation Heating. *Food and Bioprocess Technology*, 8(5), 1149–1159.

118. Tonfack Djikeng, F., Selle, E., Morfor, A. T., Tiencheu, B., Hako Touko, B. A., Teboukeu Boungo, G., Ndomou Houketchang, S., Karuna, M. S. L., Linder, M., Ngoufack, F. Z. and Womeni, H. M. (2018). Effect of Boiling and roasting on lipid quality, proximate composition, and mineral content of walnut seeds (Tetracarpidium conophorum) produced and commercialized in Kumba, South-West Region Cameroon. *Food Science and Nutrition*, 6(2), 417–423.

119. Moodley, R., Kindness, A. and Jonnalagadda, S. B. (2007). Elemental composition and chemical characteristics of five edible nuts (almond, Brazil, pecan, macadamia and walnut) consumed in Southern Africa. *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 42(5), 585–591.

120. Cittadini, M. C., Martín, D., Gallo, S., Fuente, G., Bodoira, R., Martínez, M. and Maestri, D. (2020). Evaluation of hazelnut and walnut oil chemical traits from conventional cultivars and native genetic resources in a non-traditional crop environment from Argentina. *European Food Research and Technology*, 246(4), 833–843.

121. Geng, Q., Chen, J., Guo, R., Zhang, L., Li, Q. and Yu, X. (2020). Salt-assisted aqueous extraction combined with Span 20 allow the obtaining of a high-quality and yield walnut oil. *Lwt- Food Science and Technology*, 121, 108956.

122. Zhou, X., Gao, H., Mitcham, E. J. and Wang, S. (2018). Comparative analyses of three dehydration methods on drying characteristics and oil quality of in-shell walnuts. *Drying Technology*, 36(4), 477–490.

123. Poggetti, L., Ferfuia, C., Chiabà, C., Testolin, R. and Baldini, M. (2018). Kernel oil content and oil composition in walnut (Juglans regia L.) accessions from north-eastern Italy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(3), 955–962.

124. Juhaimi, F. Al, Özcan, M. M., Uslu, N. and Doğu, S. (2017). Pecan walnut (Carya illinoinensis (Wangenh.) K. Koch) oil quality and phenolic compounds as affected by microwave and conventional roasting. *Journal of Food Science and Technology*, 54(13), 4436–4441.

125. Zhou, L., Guo, X., Bi, J., Yi, J., Chen, Q., Wu, X. and Zhou, M. (2017). Drying of Garlic Slices (Allium Sativum L.) and its Effect on Thiosulfinates, Total Phenolic Compounds and Antioxidant Activity During Infrared Drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(1), 1–11.



GAZİ GELECEKTİR...