



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



FAZ DEĞİŞTİRMELİ GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLAMA SİSTEMİYLE ENTEGRE GÜNEŞ ENERJİLİ MEYVE KURUTMA SİSTEMİ MODELLENMESİ, DİZAYNI, TESTLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Çiğdem ÖZÇELİK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir

2020

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**FAZ DEĞİŞTİRMELİ GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLAMA
SİSTEMİYLE ENTEGRE GÜNEŞ ENERJİLİ MEYVE
KURUTMA SİSTEMİ MODELLENMESİ, DİZAYNI,
TESTLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Çiğdem ÖZÇELİK

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Turhan ÇOBAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2020

Çiğdem ÖZÇELİK tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “**Faz Değiştirmeli Güneş Enerjisi Depolama Sistemiyle Entegre Güneş Enerjili Meyve Kurutma Sistemi Modellenmesi, Dizaynı, Testleri ve Değerlendirilmesi**” Başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğıile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yöneresi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 22/07/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliğı/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Doç. Dr. Mustafa Turhan ÇOBAN

Raportör Üye : Prof . Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Emrah TURGUT

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARINA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Faz Değiştirmeli Güneş Enerjisi Depolama Sistemiyle Entegre Güneş Enerjili Meyve Kurutma Sistemi Modellenmesi, Dizaynı, Testleri ve Değerlendirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, döküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

22 / 07 /2020

Çiğdem ÖZÇELİK

ÖZET**FAZ DEĞİŞTİRMELİ GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLAMA
SİSTEMİYLE ENTEGRE GÜNEŞ ENERJİLİ MEYVE KURUTMA
SİSTEMİ MODELLENMESİ, DİZAYNI, TESTLERİ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

ÖZÇELİK, Çiğdem

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa Turhan ÇOBAN

Temmuz 2020, 145 sayfa

Tarımsal ürünlerin tüketilme anına kadar geçen süre içerisinde besleyici özelliklerini kaybetmeden raf ömürlerinin uzatılmasına yönelik olan işlemlerin başında kurutma gelmektedir. Kurutma meyve ve sebzelerin su niceliğini azaltarak, su miktarını düşürmek ve böylece biyokimyasal, kimyasal ve mikrobiyolojik bozulmaları minimize etmek amacıyla ısıtılmış hava ile endüstriyel ölçekte uygulanan bir ürün koruma metodu olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışma ile faz değiştirici parafin malzeme (FDM) kullanılarak ısı geri kazanım üniteli, güneş enerjisi destekli meyve kurutma sistem kurulumu sağlanılıp, ürün testlerinin gerçekleştirilip, kurutulacak ürünün düşük enerji tüketimli sistem tasarımı ile kaliteli ürün eldesi sağlanmıştır. Böylelikle Güneş enerjisinden faydalanılarak farklı bir kurutma sistemi geliştirilip özellikle meyve kurutmada daha ekonomik ve istenilen kimyasal özelliklerinde uygun ürün elde edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda bilgisayar destekli simülasyonları ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Kurutulacak ürünün kuruma performansı, sistemin güneş enerjisi verimlilikleri ile kurutma performansına olan etkileri irdelenmiştir. Ayrıca geliştirdiğimiz bu sisteme reküperatör (çapraz akışlı ısı değiştirici) ünitesi ilave edilerek atık ısının geri kazanılması söz konusu olmuştur.

Geliştirilen bu sistemde Santa Maria armudu kurutulmuştur. Deneylerde 3, 5 ve 10 mm arasında değişen kalınlıklarda armut dilimlerinin kuruma davranışları

incelenmiştir. Deney süresince sistemin giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen sensörler ile sistem içerisindeki sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı değerleri ölçülerek elde edilen veriler datalogger ile veritabanına aktarılmıştır. Bununla birlikte kurutulacak ürünlerden alınan numunelerin ağırlık değişimleri 30 dakika ara ile hassas terazi ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar süresince kabin içerisindeki kuruma süreleri 35°C-45°C arasında değişen sıcaklıklarda genellikle 7-18 saat olarak arasında değişmektedir.

Deney numunelerinin birkaçı Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'ne iletilerek burada nem tayini ve su aktivitesi açısından teste tabi tutulmuştur. Bu çalışmalar sonucunda kurutulan armut dilimlerinin nem tayinlerinin %17'nin altında çıkmasından dolayı kuru madde olarak kabul edilebileceği ve uzun süre bozulmadan saklanabileceği ortaya çıkmıştır. Ayrıca Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde yer alan ısı pompalı kurutma sisteminde de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Her iki sistemde elde edilen bulgular karşılaştırılıp değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Parafin, Isı Pompalı Kurutma Sistemi, Yenilebilir Enerji Sistemleri, Reküperatör Ünitesi, Kurutulmuş Armut.

ABSTRACT**MODELING, DESIGN, TESTING AND EVALUATION OF
INTEGRATED SOLAR POWERED FRUIT DRYING SYSTEM
INTEGRATED WITH PHASE CHANGE SOLAR ENERGY
STORAGE SYSTEM**

ÖZÇELİK, Çiğdem

MSc In Mechanical Eng.

Supervisor: Assoc Prof. Dr. Mustafa Turhan ÇOBAN

July 2020, 145 pages

Drying is one of the most important processes in order to extend the shelf life of agricultural products without losing their nutritive properties during the period until consumption. Drying is defined as a protection method applied on an industrial scale with heated air in order to reduce water quantity of fruits and vegetables to reduce the amount of water and thus minimize biochemical, chemical and microbiological spoilage.

In this study, a solar energy assisted fruit drying system was installed by using phase changer paraffin material (FDM). In this way, a different drying system was developed by using solar energy and especially in fruit drying, more healthy and suitable product was obtained. For this purpose, computer aided simulations and experimental studies were conducted. The drying performance of the product to be dried, the effects of the system on solar energy efficiency and drying performance were examined. In addition the recuperator (cross flow heat exchanger) unit was added to this system, the waste heat was recovered.

In this system Santa Maria pear was dried. In the experiments, the drying behavior of pear slices with thicknesses varying between 3, 5 and 10 mm were examined. During the experiment, temperature, relative humidity and air velocity values were measured by sensors placed at the input and output points of the

system and the database with datalogger. However, the weight changes of the samples taken from the products to be dried were measured with a precision balance at 30 minute intervals. Drying times in the cabin during the experimental studies at temperature ranging from 35°C-45°C usually varies between 7-18 hours.

Some of the test samples were transferred to Ege University Food Engineering Department and tested for moisture determination and water activity. As a result of these studies, it was found out that the dried pear slices could be considered as dry matter due to the moisture determination being below %17 and could be stored for a long time without spoiling. In addition experimental studies were carried out in the heat pump drying system in Ege University Mechanical Engineering Department. The findings obtained from both systems were compared and evaluated.

Keywords: Paraffin, Heat Pump Drying System, Edible Energy Systems, Recuperator Unit, Dried Pear.

ÖNSÖZ

Bu çalışma kapsamında güneş enerjisi destekli faz değiştirmeli ısı ısı enerjisi depolama sistemli meyve kurutma sistemi geliştirilerek, bu sistemin çalışma parametreleri deneysel olarak incelenmek istenmiştir.

Bu süreç zarfında çalışmanın, araştırılmasında, planlanıp oluşturulmasında, yürütülmesinde her türlü ekipman tedariğinde yardımda bulunan teknik bilgi ve desteğini esirgemeyen, deneyimlerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirilmeleriyle çalışmamı şekillendiren, bütün olanaklarını seferber eden, çok kıymetli zamanlarından ödün vererek birlikte canla başla çalışan değerli hocamlarım Yrd. Doç. Dr. M. Turhan ÇOBAN’a ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan GÜRLEK’e teşekkürlerimi sunarım.

Sistem ekipmanlarının montajını ve deney düzeneğinin kurulmasını sağlayan ve deneysel çalışmalar süresince yardımlarını esirgemeyen Türkoğlu Makine San. ve Tic. Ltd. şti. firması sahibi Yusuf TÜRKOğLU'na ve firma çalışanlarına katkılarından dolayı sonsuz teşekkür ederim.

İZMİR

22 / 07 / 2020

Çiğdem ÖZÇELİK

İÇİNDEKİLERSayfa

İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xviii
TABLolar DİZİNİ.....	xxviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxix
1. GİRİŞ	1
2. KURUTMA	5
2.1 Kurutmaya Giriş	5
2.2 Kurutma Esnasında Isı ve Kütle Geçişİ	8
2.3 Biyolojik Malzemelerin Kurutulması	10
2.4 Kurutma Yöntemleri.....	12

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.5 Kurutucu Tipleri.....	14
2.5.1 Güneş enerjisiyle çalışan kurutucular	14
2.5.2 Sıcak hava ile kurutma sistemleri	15
2.5.3 Dondurarak kurutma sistemleri.....	25
2.5.4 Ozmotik kurutma	26
2.5.5 Kızıl ötesi ışınlı kurutma.....	27
2.5.6 Mikrodalga kurutma.....	28
2.5.7 Vakum kurutma.....	28
2.6 Kurutucu Seçimi	29
3. KURUTMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	31
3.1 Armutların Kurutulması	31
3.2 Kurutma Sistemlerinde Kullanılan Verim Tanımlamaları	34
3.2.1 Özgül nem alma hızı (SMER).....	35
3.2.2 Nem alma hızı (MER).....	35
3.2.3 Kurutma verimi	35
3.3 Kurutmanın Modellenmesi	35

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.3.1 Ampirik (Deneysel) model	36
3.3.2 Temel (Matematiksel) model.....	36
3.4 Modelleme Çalışması	41
4. GÜNEŞ ENERJİLİ VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ ÜRÜN KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI	44
4.1 Havalı Kolektör Sistemi	46
4.1.1 Havalı kolektör sistemi modellenmesi.....	48
4.2 Kurutma Kabini Sistemi	50
4.3 Atık Isı Geri Kazanım Sistemi (Rekuperatör Ünitesi).....	51
4.3.1 Rekuperatör ünitesinin ısı analizi	52
4.4 Isıl Enerji Depolama Sistemi	63
4.4.1 Parafin enerji depolama sisteminin modellenmesi	66
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY SONUÇLARI.....	72
5.1 Kurutma Deneyleri	75
5.1.1 Güneş destekli ısı enerjisi depolama sistemi kurutma deneyleri.....	75
5.1.2 Isı pompalı kurutma deneyleri	79

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2 Güneş Destekli Isıl Enerji Depolama Sistemi Kurutma Deneyleri Sonuçları	83
5.2.1 1. kurutma deneyi sonuçları	83
5.2.2 2. kurutma deneyi sonuçları	88
5.2.3 3. kurutma deneyi sonuçları	92
5.2.4 4. kurutma deneyi sonuçları	97
5.2.5 5. kurutma deneyi sonuçları	101
5.2.6 6. kurutma deneyi sonuçları	105
5.3 Isı Pompalı Kurutma Deneyleri Sonuçları	117
5.3.1 1. kurutma deneyi sonuçları	117
5.3.2 2. kurutma deneyi sonuçları	120
5.3.3 3. kurutma deneyi sonuçları	124
5.4 Kurutulmuş Ürün Gıda Analizi Sonuçları	128
5.4.1 Nem tayini.....	128
5.4.2 Su aktivitesi tayini.....	130
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	133

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	138
TEŞEKKÜR	144
ÖZGEÇMİŞ.....	145
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Gıda maddeleri için kurutma olayının şematik gösterimi.	10
2.2. Tepsi kurutma kuru limon dilimleri.	13
2.3. Kabinet tipi güneş enerjili kurutucu	15
2.4. Sıcak hava ile kurutma işlemi.	16
2.5. Paralel ve çapraz akışlı kabin tipi kurutucu şematik gösterimleri.....	18
2.6. Paralel akışlı tünel kurutucu.....	20
2.7. Zıt akışlı tünel kurutucu.	20
2.8. İki kademeli kurutma sistemi.	20
2.9. Bantlı tünel tipi kurutucu.....	21
2.10. İki aşamalı konveyör kurutucu.....	22
2.11. Akışkan yataklı kurutucu.	23
2.12. Püskürtmeli kurutucu ünitesinin süreç şeması.	24
2.13. Paralel, karşıt ve çapraz akımlı püskürtmeli kurutucunun kurutma hazneleri	24
2.14. Döner kurutucu: A, hava ısıtıcısı; B, sabit başlık; C, kurutucu gövdesi; D, sızdırmazlık halkası; E, sızdırmazlık halkası dayanağı; F, sızdırmazlık parçası; G, çemberler; H, dayanma silindirleri J, güvenlik silindirleri; K, döndürme dişlileri.....	25

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.15. Dalga boyları ve elektromanyetik spektrum için verilmiş bir örnek.	28
2.16. Kurutucu seçimi için işlem adımları.	30
3.1. Armut ağacı meyvesi.	31
3.2. Gıda maddelerinin kuruması sırasında ısı ve kütle transferinin şematik diyagramı.	37
3.3. Malzeme numunesindeki element kontrol hacmi	37
3.4. Armut dilimdeki nemin (suyun) hız değerleri.	41
3.5. Armut dilimindeki nemin (suyun) yüzey çözünürlüğü.	42
3.6. Armut diliminin yüzeydeki nem konsantrasyonu (mol/m ³).	42
3.7. Armut dilimindeki basınç değerleri.	43
3.8. Armut diliminin izotermal kontür (sıcaklık) değerleri.	43
4.1. Güneş enerjili ve enerji depolama sistemli ürün kurutma sistemi.	45
4.2. Güneş enerjisi destekli ısı enerjisi depolama sistemli ürün kurutma sistemi resmi.	45
4.3. Havalı güneş kollektörü kesit görünüş resmi.	48
4.4. Isıl enerji depolama sistemine entegre havalı güneş kollektörleri.	48
4.5. Kurutma kabini içi kurutma çekmeceleri.	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.6. Kurutma kabini resmi.....	51
4.7. Plakalar arası sıcak ve soğuk hava akış yönleri.	52
4.8. Reküperatör plaka kesitinde sonlu fark gösterimi.....	53
4.9. Çapraz akışlı ısı değiştirici sonlu farklar yöntemiyle sıcaklık profili kontur grafiği (sıcak taraf).....	60
4.10. Çapraz akışlı ısı değiştirici sonlu farklar yöntemiyle sıcaklık profili kontur grafiği (soğuk taraf).	60
4.11. Çapraz akışlı ısı değiştirici sıcak havanın sıcaklık profili grafiği.	61
4.12. Çapraz akışlı ısı değiştirici soğuk hava profile.	61
4.13. Çapraz akışlı ısı değiştirici sıcak hava profile.....	62
4.14. Çapraz akışlı ısı değiştirici toplam ısı transferi katsayısının (W/m ² K) yerel değişimi.....	62
4.15. Faz değiştiren malzeme (parafin).....	64
4.16. Parafin ısııl enerji depolama sistemi kapalı hali.....	64
4.17. Parafin ısııl enerji depolama sistemi açık hali.....	65
4.18. Parafin ısııl enerji depolama sistemi resmi.....	65
4.19. Isıl enerji depolama ünitesi akış şeması.	67

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.20. Parafin malzemenin bir boyutlu ısı transfer modeli.....	67
4.21. Hava-duvar-Parafin arasındaki ısı transferinin termal devresi.	70
5.1. Armutları dilimlemek için kullanılan kesme aletleri.	72
5.2. Kurutma işlemine tabi armutlar.	76
5.3. Çekirdek yuvaları çıkartılmış armut numuneleri.	76
5.4. Dilimlenerek tepsilere yerleştirilmiş armut numuneleri.	77
5.5. Kuruma öncesi armut dilimlerinin görünüşü.	77
5.6. Kuruma sonrası armut dilimlerinin görünüşü.	78
5.7. Armut numune çalışması.	78
5.8. Isı pompalı kurutucu prensip şeması ve psikometrik diyagramda gösterimi.	79
5.9. Isı pompalı kurutucunun deney düzeneği.	80
5.10. Dilimlenerek tepsilere yerleştirilmiş armut numuneleri.	81
5.11. Kuruma öncesi armut dilimlerinin görünüşü.	81
5.12a. Kuruma sonrası armut dilimlerinin görünüşü.	81
5.12b. Kuruma sonrası armut dilimlerinin kabin görünüşü	82

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.12c. Kuruma öncesi armut numunesi.....	82
5.12d. Kuruma sonrası armut numunesi.....	83
5.13. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	84
5.14. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	85
5.15. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.....	85
5.16. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.....	86
5.17. MR'nin zamana göre değişimi.	87
5.18. MC nin zamana göre değişimi.	87
5.19. DR nin zamana göre değişimi.	88
5.20. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	89
5.21. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	90
5.22. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.....	90
5.23. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.....	91

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.24. MR'nin zamana göre değişimi.....	91
5.25. MC'nin zamana göre değişimi.....	92
5.26. DR'nin zamana göre değişimi.	92
5.27. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	93
5.28. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	94
5.29. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.	94
5.30. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.	95
5.31. MR'nin zamana bağlı değişimi.....	95
5.32. MC'nin zamana göre değişimi.....	96
5.33. DR'nin zamana göre değişimi.	96
5.34. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	98
5.35. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	98
5.36. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.	99

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.37. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.....	99
5.38. MR'nin zamana bağlı değişimi.	100
5.39. MC'nin zamana göre değişimi.	100
5.40. DR'nin zamana göre değişimi.....	101
5.41. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	102
5.42. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	103
5.43. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.....	103
5.44. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.....	104
5.45. MR'nin zamana bağlı değişimi.	104
5.46. MC'nin zamana göre değişimi.	105
5.47. DR'nin zamana göre değişimi.....	105
5.48a. 6. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ilk gün).	106
5.48b. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ikinci gün)	107

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.48c. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma üçüncü gün).....	107
5.49a. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ilk gün).....	108
5.49b. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ikinci gün).....	108
5.49c. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma üçüncü gün).....	109
5.50a. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ilk gün).	109
5.50b. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ikinci gün)	110
5.50c. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma üçüncü gün).....	110
5.51a. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi (6. Kurutma ilk gün).....	111
5.51b. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi (6. Kurutma ikinci gün).....	111
5.51c. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi (6. Kurutma üçüncü gün)	112

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.52a. MR'nin zamana bağlı değişimi.	112
5.52b. MC'nin zamana bağlı değişimi	113
5.52c. DR'nin zamana bağlı değişimi.....	113
5.53a. MR'nin zamana bağlı değişimi.	114
5.53b. MC'nin zamana bağlı değişimi	114
5.53c. DR'nin zamana bağlı değişimi.....	115
5.54a. MR'nin zamana bağlı değişimi.	115
5.54b. MC'nin zamana bağlı değişimi	116
5.54c. MC'nin zamana bağlı değişimi	116
5.55. Kurutma sistemi sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	118
5.56. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.....	118
5.57. MR'nin zamana bağlı değişimi.	119
5.58. MC'nin zamana bağlı değişimi.	119
5.59. DR'nin zamana bağlı değişimi.....	120
5.60. Zamana bağlı artan enerji tüketim miktarı.	120
5.61. Kurutma sistemi sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	121

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.62. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.	122
5.63. MR'nin zamana bağlı değişimi.	122
5.64. MC'nin zamana bağlı değişimi.	123
5.65. DR'nin zamana bağlı değişimi.	123
5.66. Zamana bağlı artan enerji tüketim miktarı.	124
5.67. Kurutma sistemi sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	125
5.68. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.	125
5.69. MR'nin zamana bağlı değişimi.	126
5.70. MC'nin zamana bağlı değişimi.	126
5.71. DR'nin zamana bağlı değişimi.	127
5.72. Zamana bağlı artan enerji tüketim miktarı.	127
5.73. Nem içeriği ölçüm cihazı.	129
5.74. Küçük parçalara ayrılmış armut numuneleri.	129
5.75. Su aktivitesi ölçüm cihazı.	131
5.76. Su aktivitesi ölçümü için hazırlanan armut örneği.	131

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sıcak hava ile kurutma ve dondurarak kurutma arasındaki farklar.....	26
3.1. Santa maria armudunun kimyasal özellikleri	32
3.2. Kurutma eğrileri için verilen ampirik (deneysel) modeller [30]	36
4.1. Eşitlik 4.13 için ai katsayıları	56
4.2. Kuru havanın 5°C-100°C arasındaki termofiziksel özellikleri	58
4.3. Parafinin termo-fiziksel özellikleri [38].....	66
5.1. Armut numunelerinin nem içeriği	130
5.2. Armut numunelerinin su aktivitesi	132

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
dQ/dt	Isı aktarımı (kJ/s)
h	Konvektif ısı transfer katsayısı (kJ/m ² .s.°C)
A_j	Kurutma yüzey alanı (m ²)
T_s	Yüzeyin sıcaklığı (°C)
T_a	Havanın sıcaklığı (°C)
dW/dt	Kurutma hızı (kg/s)
h	Konvektif ısı transfer katsayısı (kJ/m ² .s.°C)
K_g	Kütle transfer katsayısı (kg/m ² .s)
A	Kurutma yüzey alanı (m ²)
H_s	Yüzeyin nemi (kg su/kg kuru hava)
H_a	Havanın nemi (kg su/kg kuru hava)
h_c	Taşınım ısı transfer katsayısı (W/m ² °C)
G	Ürün birim alanı üzerinden geçen havanın kütlesi (kg/m ² .s)
Y_A	Yaş ağırlık(kg)
K_A	Kuru ağırlık (kg)
MC	Nem miktarı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
MC_{YA}	Yaş ağırlığa göre su (nem) oranı (kg su/ kg kuru madde)
MC_{KA}	Kuru ağırlığa göre su (nem) oranı (kg su/ kg kuru madde)
MR	Nem içeriği
Mt	t anındaki ürün nemi
Me	Denge nemi
M_0	Başlangıçtaki ürün kütlesi
DR	Kurutma hızı (g su / g kuru madde x dakika)
MC_{tb}	t anındaki başlangıç nem miktarı
MC_{ts}	t anındaki son nem miktarı
dt	Zaman (dakika)
$SMER_{hp}$	Üründen uzaklaşan nem kütlesi (kg/kWh)
$SMER_{ts}$	Üründen uzaklaşacak nem kütlesi (kg/kWh)
MER	Nem alma hızı
C	Nem konstrasyonu (mol/m^3)
$Deff$	Efektif difüzyon katsayısı
D_0	İntegrasyon sabiti (m^2/s)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Ea	Suyun aktivasyon difüzyon enerjisi (Kj/mol)
Rg	Reaksiyon hızı (mol/m ² s)
T	Mutlak sıcaklık (°C)
Q	Isı miktarı (W/m ² s)
ht	Ortalama ısı transfer katsayısı (W/m ² K)
k	Isı iletim katsayısı (W/m ² K)
L	Karakteristik uzunluk (m)
Re	Reynolds sayısı
Nu	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
Cp	Özgül ağırlık (J/kgK)
ρ	Öz kütle (kg/m ³)
u	Yüzey hava hızı (m/s)
Ts	Yüzey sıcaklığı (°C)
Ta	Hava sıcaklığı (°C)
V	Hacim (m ³)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Kesit Alanı (m^2)
C_{p_c}	Soğuk akışkan için özgül ısı değeri (kJ/kgK)
C_{p_h}	Sıcak akışkan için özgül ısı değeri (kJ/kgK)
dA	Plaka üzerindeki her bir dilimin yüzey alanı (m^2)
dQ	Plaka üzerindeki bölünen her bir parçanın yüzeyinden geçen ısı transferi miktarı (W)
D_h	Hidrolik çap (m)
f	Boru sürtünme faktörü
h_c	Soğuk akışkan için ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_h	Sıcak akışkan için ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
H_c	Soğuk akışkan için entalpi değeri (kJ/kg)
H_h	Sıcak akışkan için entalpi değeri (kJ/kg)
k_t	Metal için ısı iletim katsayısı (W/mK)
L	Plaka Sayısı
m	Kütleli debi (kg/s)
m_c	Soğuk akışkan için kütle debisi (kg/s)
m_h	Sıcak akışkan için kütle debisi (kg/s)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
P	Çevre uzunluğu (m)
R_c	Soğuk akışkan için yüzey kirlilik direnci (m^2K/W)
R_h	Sıcak akışkan için yüzey kirlilik direnci (m^2K/W)
$Q_{m,n}$	Isı değiştirici plakalarından geçen toplam ısı transferi (W)
S	Metal et kalınlığı (m)
$T_{c\ n,m}$	x yönündeki soğuk akışkan sıcaklığı (K)
$T_{h\ m,n}$	y yönündeki sıcak akışkan sıcaklığı (K)
$U_{m,n}$	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
V	Ortalama hız (m/s)
$V_{h\ m,n}$	Sıcak akışkanın hızı (m/s)
$V_{c\ m,n}$	Soğuk akışkanın hızı (m/s)
$\Delta A_{m,n}$	Sonlu eleman üzerindeki ısı transferi alanı (m^2)
ρ	Gazın öz kütlesi (kg/m^3)
ρ_h	Sıcak akışkanın öz kütlesi (kg/m^3)
ρ_c	Soğuk akışkanın öz kütlesi (kg/m^3)
μ	Viskozite (kg/ms)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
I	Güneş ışıınım şiddeti (W/m ²)
Q_u	Yararlı ısı (W)
U_l	Kollektör toplam ısı kayıp katsayısı (W/mC)
A_c	Kollektör alanı (m ²),
F_R	Kollektör verim faktörü

1. GİRİŞ

Kurutma, yiyecekleri korumanın en eski yöntemidir. Tarih boyunca, meyvelerden, etlerden, tahıllardan ve bitkilerden suyu çıkarmak için güneş, rüzgar ve dumanlı bir ateş kullanıldı. Tanım olarak, gıda dehidrasyonu, enzimlerin ve bakterilerin büyümesini engelleyen sıcak havanın içinden dolaştırılarak suyun gıdadan uzaklaştırılması işlemidir. Kurutulmuş gıdalar lezzetli, besleyici, hafif, kolay hazırlanır, depolanması ve kullanımı kolaydır. Enerji girişi, dondurmak veya teneke kutudan almak için gerekenden daha azdır ve depolama alanı, konserve kavanozları ve dondurma kapları için gerekenden daha azdır. Kurutmada ürünün besin değerin çok az etkilenir. Kurutulmuş meyve ve sebzeler lif ve karbonhidrat bakımından zengindir ve yağ oranı düşük olduğundan sağlıklı gıda seçimleri yapar.

Kurutma, gıda kurutmadan odun kurutmaya kadar çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurutma endüstrisi büyük miktarda enerjiyi kullanan bir işlemdir. Bir kurutucu, ürüne ortam koşulları altında mevcut olduğundan daha fazla ısı sağlar. Böylece ürün içerisinden nem geçişini arttırmak için ürün içinde tutulan nemin buhar basıncını ve nem taşıma kapasitesini artırır. Ayrıca kurutma havasının bağıl nemini önemli ölçüde azaltır ve denge nem oranının yeterince düşük olmasını sağlar Kurutma, ısı ve nem transferinin aynı anda gerçekleştiği termal bir işlemdir. Isı, mevcut katı ve nemin sıcaklıklarını yükseltmek için ısıtılmış havadan konveksiyon yoluyla ürüne aktarılır. Nem, ürünün buharlaşan yüzeyine ve daha sonra su buharı olarak sirkülasyon havasına giderken nem transferoskürleri oluşur. Bu nedenle, ısı ve nem aktarım hızları, sirkülasyonlu kurutma havasının hızı ve sıcaklığı ile ilişkilidir (Dinçer and Rosen, 2007).

Kurutma, termal enerjinin eş zamanlı ısı ve kütle transferi ile gerçekleşen karmaşık bir süreçtir (Erbay ve Icier, 2010). Literatürde bir çok kurutma yöntemi mevcut olup bunlardan hacimsel bir ısıtma modu olarak, mikrodalga kurutma, yüksek ısıtma verimliliği, mükemmel işleme kapasitesi ve kolay olması nedeniyle gıda malzemelerinin kurutulması için uygun bir yöntemdir. Mikrodalga ısıtma

homojenliğini geliştirmek için mevcut mühendislik yaklaşımları kullanılmıştır (Geedipalli ve ark., 2007; Li ve ark., 2011; Zhu ve ark., 2018).

Kurutma işlemlerinin nicel olarak anlaşılmasının aşağıdaki özel zorluklara sahip olduğuna dikkat çekmektedir:

- a) Fiziksel süreçler oldukça doğrusal değildir.
- b) Karmaşık değişimler ve etkileşim süreçleri vardır.
- c) Hakim olgular kurumaya bağlıdır.
- d) Malzemenin içindeki nakil özellikleri yüksek oranda nem içeriğine ve sıcaklığa bağlıdır.

Bu karmaşıklıklardan dolayı, kurutma endüstrisi kurutma problemlerine en uygun çözümleri sunmak için uygun analiz tekniklerine ihtiyaç duyar.

Kurutma teknolojilerinde farklı yöntemlerle gıdaların kurutulması sağlanmıştır. Bunlardan ozmotik dehidrasyon, su içeren hücresel katının konsantre sulu bir çözeltiye daldırılmasıyla suyun uzaklaştırılması işlemidir (Ponting, 1973). Gıda dehidrasyonunun temel amacı, kimyasal reaksiyon oranlarını en aza indirmek, dağıtım ve depolamayı kolaylaştırmak için su içeriğini azaltmaktır. Ozmotik dehidrasyonda gıdalar tuzlu su veya şeker çözeltisine daldırılır. Bu, üç tür karşı kütle aktarım fenomeni ile sonuçlanır. İlk olarak gıda dokusundan ozmotik çözeltiye, ikincisi ozmotik solüsyondan gıda dokusuna, üçüncüsü ise gıda dokusunun kendi çözünenlerine (şekerler, organik asitler, mineraller, vitaminler) doğru ozmotik çözeltiler oluşturularak transfer gerçekleştirilir. Üçüncü transfer, ilk iki transfer tipine kıyasla niceliksel olarak ihmal edilebilir, ancak ürünün bileşimi açısından önemlidir.

Dabhake ve Khedkar (1980), ham mango parçalarının bir dolap kurutucuda kurutulmasının güneş kurumasına kıyasla çok daha hızlı olduğunu gözlemlemiştir. Mehta ve Tomar (1980) hava sirkülasyon kurutucusunun guava ve papaya dilimlerini kurutmak suretiyle iyi kalitede ürünler verdiğini bildirmiştir. Kalra ve Bhardwaj (1981), meyve ve sebze ürünleri için güneş dehidrasyonu kullanarak bir deney yapmış ve yüksek sıcaklık 70-75°C ile dehidrasyon modeli-II'nin düşük

sıcaklık 50-55°C ile dehidrasyon modeli-I ile karşılaştırıldığında daha verimli olduğu sonucuna varmışlardır. Bhutani ve Sharma (1988) kayısı kurutmasının çapraz akışlı bir kurutucuda açık güneşte kurutmaya göre daha hızlı işlediğini bulmuşlardır. Meyvelerin alkali ile muamele edilmesi kuruma süresini azalttı. Şekerler ve organik asitler gibi seçici ve düşük moleküler hücre özlü bileşenler, daha yüksek ozmotik basıncın çevresindeki çözeltiye yayılır. Diğer hücre bileşenleri, sadece küçük bir ölçüde, zarın dışına geçer.

Ozmotik dehidrasyon sırasında suyun ve düşük moleküler ağırlıklı maddelerin doku yapısından difüzyonuna osmo-aktif maddelerin karşı akım difüzyonu eşlik eder. Bu nedenle, geleneksel kurutmanın aksine ozmotik dehidratasyon, suyun karmaşık hareketi, hücre özsuğu içinde çözünmüş maddeler ve osmo-aktif maddeler ile karakterizedir. Bu, sürecin kendisini ve koruma, beslenme ve organoleptik özellikler açısından nihai etkisini önemli ölçüde etkiler (Lenart, 1992). Suyun giderilmesi ve osmo-aktif maddelerdeki artış, hücredeki su aktivitesini azaltır (Lewicki ve Lenart, 1992). Gıda dokuları normal olarak orta sıcaklıklarda sakaroz, fruktoz, glikoz, gliserol, nişasta şurubu ve sodyum klorür gibi konsantre osmo-aktif maddelerin çözeltisine daldırılır, böylece gıdanın dokusuna, rengine ve lezzetine ısı hasarını azaltır (Torreggiani, 1993). Ozmotik dehidratasyon ayrıca organoleptik olarak elde edilmesini sağlayan gıdaların korunmasına yönelik yöntemlerden biridir.

Nejad ve diğ. (2002) çeşitli kurutma yöntemlerinin etkisini incelemiştir. Güneşte kurutma, çöp kurutma, dikey sürekli kurutma, dikey silindirik kurutma ve huni fıstık fındık kalitesi üzerinde silindirik kurutma gibi birçok yöntem mevcuttur. Pragati ve diğ. (2003), farklı kurutma yöntemlerinin susuz aonlanın besinsel bileşimi üzerindeki etkisi üzerine bir deney yürüttüler ve 90 günlük depolamadan sonra besinlerin daha iyi tutulması nedeniyle osmo-hava kurutma yönteminin en iyi olduğunu bildirdiler. Nemin giderilmesi, çürümeye neden olacak mikroorganizmaların büyümesini ve çoğalmasını durdurur ve nem kaynaklı bozulma reaksiyonlarının çoğunu en aza indirmektedir. (Krokida ve Marinos-Kouris, 2003; Araujo ve ark., 2004). Sharma ve diğ. (2006) ozmotik olarak işlenmiş kayısı bütünüünün ve yarılarının organoleptik ve kimyasal değerlendirmesini incelemiştir. Sahari ve diğ. (2006) ozmotik ön işlem ve

dehidrasyon sırasında dilimlenmiş şeftalinin fizyokimyasal özelliklerini incelemiş ve 6 saat sonra sakaroz (% 50 ve 60), glikoz şurubu (% 60) ve tuz (% 40 sakaroz,% 20) çözeltilerinin glikoz şurubu ve% 3 NaCl) suyun daha fazla uzaklaştırılmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Ön işlem edilmiş karadut örnekleri yapay hava ile kurutma, güneşte kurutma ve açık güneşte kurutma ile kurutulmuştur. Ön işlem kombinasyonlarının, bütün kurutma yollarında özellikle dutların ölçülen renk değerlerinde köklü değişikliklere neden olmadığı bulunmuştur (Taser ve ark., 2007). (Doymaz, 2008). Sharma ve diğ. (2011), kayısı ve erik meyvelerinin kurutulmuş meyve bazlı toz, chutney karışımı, kurutulmuş karışım ve kurutulmuş turşuya hazır hale getirilmesi için en uygun olduğunu bildirmiştir. Raquel ve diğ. (2011) armut, yani güneş ocağı, bir güneş kurutma makinesi ve bir tünel kurutucu için farklı kurutma yöntemlerini incelemiş ve güneş kurutma sistemlerinde kurutma süresinin yüzde 40'tan fazla bir azalma gösterdiğini ve kurutma tüneline ise bu azalma arttığını bildirmiştir.

2. KURUTMA

2.1 Kurutmaya Giriş

Kurutma işlemi gazlardan, sıvılardan ya da katılardan su ya da diğer sıvıların uzaklaştırılması işlemidir. Aynı zamanda kurutma işleminin en sık kullanımı katı maddelerden ısı uygulamalarıyla su veya uçucu diğer maddelerin giderilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır (Güngör ve Özbalta, 1997).

Kurutma işlemi gıda ürünlerinin raf ömrünün uzatılmasında kullanılan en önemli uygulamalardan biri olup kimya ve kimyasal üretim proseslerinde kullanılan bir işlemdir. Kimyasal üretim proseslerinin en önemli aşamalarından biri kabul edilen kurutma, bir ürünün satışa sunulmasından önceki dış görünüm ve mukavemet özelliklerini en iyi yansıttığı rutubet (nem) seviyesine getirilmesi için uygulanan bir yöntemdir. Kurutma işlemi ısı ve kütle transferinin aynı anda gözlemlendiği karmaşık bir işlemdir. İşlem sırasında kurutucu gazdan katıya doğru ısı aktarımı gerçekleşir. Ürünün kullanım kalitesi ile dayanım özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden dolayı, son kurutma derecesinin çok önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle şartların optimize edilerek kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesi önemlidir (Güngör ve Özbalta, 1997).

Kurutma sistemleri kurutma işleminin uygulanabilir hale gelmesi ile ürünün ekonomik anlamda işlenmesi, nakliyesi için kütlelerinin azaltılması, daha sonraki üretim aşamalarında istenilen koşulların elde edilmesi, ürünün sterilasyonu veya korunması, çözeltilerden bazı ürünlerin geri kazanılması gerçekleştirilebilir.

Kurutma bozulmaya sebep olan mikroorganizmaların ve kimyasal reaksiyonların durdurulduğu veya yavaşlatıldığı bir yöntemdir. Kurutmanın kurutulmuş ve dehidre edilmiş terimleri aynı anlama gelmemektedir. ABD Tarım Bakanlığı dehidre edilmiş ürünleri %2.5'dan (kuru bazda) daha fazla su içermeyen gıdalar sınıfına koyarken, kurutulmuş gıdaları ise %2.5'dan daha fazla su içerenler arasında gruplamıştır (Ratti, 2001).

Kurutma işlemine başlamadan önce tüm meyve ve sebzeler temiz suda yıkanmalı ve zarar görmüş veya bozulmuş olanları uzaklaştırılmalıdır. Üzüm ve çilek gibi küçük meyveler kesilmeden kurutulabilir fakat çoğu sebze ile mango, ananas ve elma gibi daha büyük meyveler kurutulmadan önce soyulmalı, ayıklanmalı ve kuruma yüzeyini arttırmak ve difüzyon mesafesini azaltmak için, örnek olarak küp şeklinde kesilmelidirler (Esper ve Mühlbauer, 1998).

Evranuz (1998)'e göre kurutma işleminin amaçları genel olarak,

1. Gıda maddesinin dayanma süresini uzatmak,
2. Ürün hacminin küçültülmesi ile depolama ve taşımada ekonomi sağlamak,
3. Yeni ürün formülasyonları geliştirmek şeklinde sıralanabilir.

Kurutma işlemi ile gıdanın uzun süre bozulmadan saklanabilmesi için gıda içerisinde bulunan su, gıdanın bozulmasına neden olmayacak şekilde azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bu işlemle gıdada bulunan C vitamini dışında bütün minerallerin korunduğu bilinmekle birlikte, besin değerleri bakımından da gıda yoğunlaştırılmış özellik kazanır. Bununla beraber kurutulmuş bir şekilde tüketilen gıdalar vücudu yüksek antioksidant potansiyeller ile serbest radikallere karşı koruma sağlar (Çolak Güneş, 2009).

İşlem sırasında kurutma havasından kurutulacak ürüne doğru ısı aktarımı gerçekleşir. Kurutmada son kurutma sıcaklığının (derecesinin) ürünün kullanım kalitesi ile dayanım özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden dolayı çok önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu sebeple kurutmanın kontrollü şartlarda gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu amaçla, yaygın olarak belirli sıcaklık, bağıl nem ve akış hızına (debi) sahip kurutma havası kullanılır. Belirli nitelikteki kurutucu hava aynı anda hem gıdanın sıcaklığının ve buharlaşma gizli ısının artmasını, hem de buharlaşan suyun (nemin) buharlaşma yüzeyinden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Sıcak hava akımına dayalı kurutmada kütle transferi için temel mekanizmalar şu şekilde gerçekleşir:

- ✓ Gıdadaki suyun yüzeye difüzyonu,
- ✓ Yüzeyde buharlaşma,
- ✓ Su buharının hava akımıyla yüzeyden uzaklaştırılmasıdır.

Isı transferi için mekanizma ise şu şekilde gerçekleşir:

- ✓ Kurutucu hava sıcaklığının gıda yüzeyine konveksiyonla taşınması,
- ✓ Isının yüzeyden gıda merkezine doğru iletimle geçmesi şeklinde tarif edilebilir (Özel, 2010).

Tarım sektöründe gelişmiş pek çok ülke, bir yüksek sıcaklık uygulaması olan kurutma prosesini, gıdanın raf ömrünü uzatmak, paketleme maliyetini düşürmek, tonaj ağırlığını azaltmak, ürünün görünüşünü geliştirmek, orijinal tadını ve besin değerini korumak amacıyla kullanmaktadır. Bu bakımdan gıda endüstrisinde kurutma prosesinin temel hedeflerini gıda kalitesi ve güvenliğinin yanı sıra ekonomik ve ekolojik etkenler belirlemektedir.

Kurutulmuş ürünlerin çoğunun bir çok kullanım alanları bulunmaktadır. Örneğin, pekçok ülkede büyük bir endüstri halinde gelişmiş olan kuru çorba üretiminin hammaddesi, kurutulmuş çeşitli türde sebzelerdir (Saldamlı ve Saldamlı, 1990).

Ülkemizde iklim koşullarının uygun olması nedeniyle, her çeşit meyve ve sebzenin kurutulması işlemi büyük çapta doğal koşullar altında güneşe sererek doğal kurutma yapılmaktadır (Tunç ve Mengeş, 2010). Bu kurutma tekniğinde ürün, mikrobiyal kontaminasyona, mikroorganizma gelişmesine ve böcek istilasına açıktır. Ayrıca ürünün beslenme içeriğinde bir düşüş olduğu saptanmıştır. Isıl işlem sırasında hücre membranı geçirgenliğini kaybeder, tekstür değişir ve hücre duvarlarındaki pektik maddeler parçalanmaya uğrarlar. Aroma maddeleri kendine has niteliklerini kaybeder ve böylece istenmeyen aroma bileşikleri oluşur (Dobooğlu, 2012). Bu olumsuzluklardan dolayı, günümüzde kurutma tekniği kontrollü şartlar altında yapılmaya çalışılmaktadır. Uygulamada yaygın olarak kullanılan tekniklerin tamamında, gıda maddesi içinde bulunan suyun buharlaştırılması için gerekli olan ısı enerjisinin, uygun sistemler kullanılarak, gıda kitlesine (ürününe) aktarılması yapılmaktadır. Sıcak hava veya sıcak yüzeyler aracılığı ile aktarılması gereken ısı miktarı, gıda maddesi içinde

bulunan suyun içeriğinde birçok gıda bileşeninin çözünmüş olması, bu suyun hücreler arasında, poroz yapılarda ve kapiler sistemlerde bulunması nedeniyle serbest suya göre oldukça fazladır. Öte yandan, gıda maddesinde karboksil ve amino grupları gibi iyonik gruplarla etkileşim halindeki, bağlı su olarak adlandırılan suyun buharlaştırılması, pratikte uygulanan kurutma yöntemleriyle mümkün değildir. Bu nedenden ötürü, kurutma işleminde, gıda kitlesinden buharlaştırılan su gıda kitlesinde bulunan serbest su olarak adlandırılan sudur. Serbest bağlı olarak, yapıdaki serbest su içeriği azaldıkça, suyun uzaklaştırılması için gereken ısı enerjisinin birim kütle başına düşen miktarı da önemli düzeyde artış göstermektedir (Çolak Güneş, 2009).

2.2 Kurutma Esnasında Isı ve Kütle Geçişi

Isı ve kütle veya ısı ve kütlenin aynı anda transferi esasına dayanmakta olan kurutma işlemi, gıda işleme teknolojisinde önemli bir yer kaplamaktadır (Çınar, 2006). Nemin kurutulması ısı ve kütle transferinin aynı zamanda gözlemlendiği kompleks bir süreçtir (Wang et al., 2006). Kurutma esnasında kurutulacak maddenin içerisindeki serbest suyu buhar haline getirip sonrada bu buharı uzaklaştırmak için, buharlaştırma gizli ısısı değerinde bir ısı iletmek gerekir. Konveksiyonlu taşınım ile kurutulacak ürüne ısı geçişi, sıcaklık ürünün dışından hücrelere doğru olurken, buharlaşma hücreden dışa doğrudur.

Kurutma esnasında iki geçiş işlemi aynı zamanda gerçekleşir (Şekil 2.1). Bunlardan birincisi dış çevreden kurutulacak ürünün yüzeyine ısı geçişi ile birlikte madde içerisine ısı iletimidir ve (2.1) eşitliği ile açıklanır (Özel, 2010).

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A(T_a - T_s) \quad (2.1)$$

Denklemden;

dQ/dt : Isı aktarımı (kJ/s),

h : Konvektif ısı transfer katsayısı (kJ/m².s.°C),

A : Kurutma yüzey alanı (m²),

T_a : Havanın sıcaklığı (°C),

T_s : Yüzeyin sıcaklığıdır (°C).

İkincisi ise (2.2) eşitliği ile gösterilen, ürünün içinden yüzeye doğru olan ve yüzeye gelen nemin ürünü çevreleyen çevreye yayılması ile devam eden kütle geçiştir (Özel, 2010)..

$$\frac{dW}{dt} = K_g \cdot A \cdot (H_s - H_a) \quad (2.2)$$

Burada;

dW/dt : Kurutma hızı (kg/s),

K_g : Kütle transfer katsayısı (kg/m².s),

A : Kurutma yüzey alanı (m²),

H_s : Yüzeyin nemi (kg su/kg kuru hava),

H_a : Havanın nemi (kg su/kg kuru hava) olarak ifade edilmektedir.

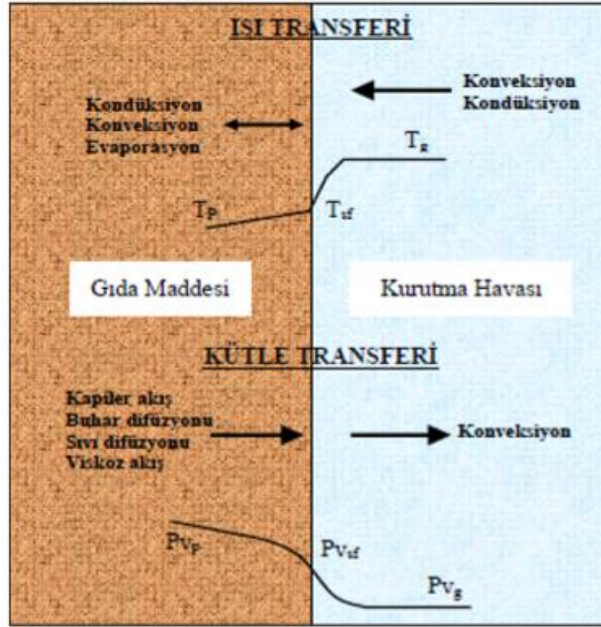
(2.2) eşitliğine göre, yüzey nemi ile havanın nemi arasındaki fark arttıkça kütle aktarım hızı da artar (Acartürk vd., 2007).

Buharlaştırma kurutulan ürüne ve kuruma şartlarına bağlı olarak değişir ve yüzeyde ya da ürünün içinde olabilir. Buna göre kurutma işlemi içerisine kontrol faktörü olarak iki işlem girmektedir.

- ✓ Gerekli gizli buharlaştırma ısıısının iletimi,
- ✓ Gıda maddesinde suyun veya su buharının hareketi ve sonra gıdadan uzaklaşmasının sağlanması ve böylelikle suyun gıda maddesinden ayrılması (Gürses, 1986).

Gıda maddeleri içerisindeki nem sirkülasyonu farklı iletim mekanizmaları ile gerçekleşebilir. Bunlar;

- ✓ Kılcal emme basınçlarının farklılığından kaynaklanan kılcal akışlar,
- ✓ Yoğunluk farklılığından kaynaklanan sıvı yayılımı,
- ✓ Kısmi buhar basıncı farklılıklarından kaynaklanan buhar yayılımı,
- ✓ Dış basınç veya yüksek sıcaklığın neden olduğu toplam basınç farklılığından kaynaklanan viskoz akış (Özel, 2010).



Şekil 2.1. Gıda maddeleri için kurutma olayının şematik gösterimi (Çolak Güneş, 2009).

2.3 Biyolojik Malzemelerin Kurutulması

Kurutma veya dehidrasyon, katı maddelerden su gibi buharlaşabilen maddelerin mikroorganizma gelişimini veya kimyasal tepkimeleri yavaşlatmak veya durdurmak amacıyla uzaklaştırılması işlemidir. Kurutulmuş bir gıda uzun raf ömrünün uzatılması yanı sıra ağırlığının azalmasından dolayı nakliye işlemlerindeki maliyeti de azaltmaktadır (Geankoplis, 1993; Cohen ve Yang, 1995).

Endüstriyel temel işlemlerin daha iyi tasarlanabilmesi için ısı ve kütle transferi olaylarının daha iyi bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Isı ve kütle transferini içeren temel işlemler ile genel olarak kurutma, evaporasyon (buharlaştırma) ve distilasyon operasyonlarında karşılaşılmaktadır (Geankoplis, 1993).

Kurutma işleminin geçmişinin tam olarak ne zaman başladığı bilinmemektedir. Fakat tarihsel kayıtlar bize eskiden insanların deneme ve yanılma yöntemiyle gıdaları kurutmayı çalıştığını göstermektedir. İlk insanlar soğuk ve zorlu kış günleri için çeşitli ürünleri güneşte veya ıste kurutmuşlardır.

Gıda kurutmasının bilimsel bir temele dayanarak gelişmesi endüstrilerin dünya çapında kurulmasına olanak sağlamıştır (Vega-Mercado and Barbosa-Canovas, 1996).

Eskiden beri süregelen ve günümüzde de sıklıkla kullanılan kurutma yöntemlerinden birisi de sıcak hava ile ürünün kurutulmasıdır. Ürün içerisinde bulunan nemin buharlaştırılması için lüzumlu olan gizli ısı¹ sıcak hava tarafından sağlanır ve buharlaşan nem üründen sıcak hava aracılığıyla uzaklaştırılır. Hava ile ürün arasında ısı ve nem transferi aynı anda gerçekleşir ve bu şekilde ürünün nemi ve dolayısıyla su aktivitesi² azaltılır (Ramaswamy ve Marcott, 2006). Nem transferi sırasında etkili olan büyüklük hava ile ürünün yüzeyi arasındaki su buharı kısmi basınçları arasındaki farktır.

Biyolojik bir malzemenin kurutma sonrası kalitesi, kurutma sırasında meydana gelen biyokimyasal ve fiziksel değişimler ile anlaşılabilir. Kurutma süresi, sıcaklığı ve su aktivitesi son ürünün kalitesi üzerinde etkili olmaktadır. Düşük kurutma sıcaklığı son ürünün kalitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmasına karşın kurutma süresini uzatmaktadır. Diğer taraftan yüksek kurutma sıcaklığı kurutma süresini azaltmasına rağmen, çok yüksek seçildiğinde yüzeyin hızla nem kaybederek kabuk bağlaması sonucu ürünün kuruma süresinin uzamasına da neden olabilmektedir. Düşük su aktivitesine sahip son üründe mikroorganizma gelişmesi engellenmekte fakat lipid oksidasyon reaksiyonları hızlanmaktadır (Franzen, 1988).

Biyolojik bir malzemenin kurutma sonrası saklama stabilitesi su aktivitesi düştükçe artmakta ve düşük sıcaklıkta kurutulmuş ürünler daha iyi saklama stabilitesine sahiptir. Lipid içeren gıdalar düşük su aktivitesinde oksidasyona duyarlı olduğundan, bu tip ürünler kurutmadan sonra oksijen geçirgenliği düşük paketlerde muhafaza edilmelidirler (Okos ve ark., 2007).

King (1974) kurutma işleminde başarı sağlayabilmek için aşağıdaki özelliklerin edinilmesinin gerekliliğini ifade etmiştir:

1. Ürün kalitesi

- ✓ Minimum kimyasal ve biyokimyasal bozulma reaksiyonları,
- ✓ Ürün yapısının muhafazası,
- ✓ Suyun, aroma ve tat gibi uçucu malzemeleri etkilemeden seçici olarak uzaklaştırılması.
- ✓ Son ürünün arzulanan renkte olması,
- ✓ Hızlı ve basit rehidrasyon,
- ✓ Kurutma sırasında kontaminasyon (mikrobiyal bulaşma) olmaması.

2. Kurutma ekonomisi

- ✓ Minimum ürün kaybı,
- ✓ Suyun hızlı uzaklaştırılması (kurutma ekipmanının birim miktarından yüksek sığa eldesi),
- ✓ Ucuz enerji kaynağı,
- ✓ Kompleks olmayan kurutma ekipmanı (güvenilirlik ve minimum işçilik).

¹Suyun sıvı evresinden buhar evresine geçmesi için gerekli ısı. Deniz seviyesinde 2257 kJ/kg ya da 539.4 kcal/kg'dır.

²Su aktivitesi: Gıdanın buhar basıncının (p), saf suyun buhar basıncına (p₀) oranına su aktivitesi adı verilir. Ayrıca gıdayı çevreleyen ortamın denge bağıl nemine (ERH) oranı olarak da tanımlanabilmektedir. Saf distile suyun su aktivitesi değeri 1'dir. Su aktivitesi 0.6 olan bir ürün, bağıl nemi %70 olan nemli hava ile temasa geçtiğinde havadan nem alır.

2.4 Kurutma Yöntemleri

Sebze ve meyveler için uygulanacak kurutma yöntemleri büyük önem taşımaktadır (Mengeş, 2005). Kurutma teknolojisinde, uygun yöntemin doğru bir şekilde tayin edilebilmesi için ürünün fiziksel ve kimyasal kompozisyonu, rehidrasyon yeteneği ile başlangıç ve son nem değerlerinin belirlenmesi lazım olmaktadır. Aksi halde nemin gereğinden hızlı, fazla/az veya yanlış yöntem ile uzaklaştırılması, ürünün fiziksel ve mekanik hususlarını zedelemektedir (Erbay ve Küçüköner, 2008). Dünya üzerinde farklı kurutma yöntemlerinin yaygınlaşması ve üretim tesislerinin çeşitlenmesi ile kuru ürün ticareti de önem kazanmıştır (Ertekin vd., 2013).

Kurutma, method bakımından “yapay kurutma” ve “güneşte kurutma” olarak iki gruba ayrılabilir (Özel, 2010). Şekil 2.2’de tepsi kurutma kuru limon dilimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Tepsi kurutma kuru limon dilimleri.

Kurutma işleminin kapalı alanlarda ve denetlenebilir koşullarda yapılması metoduna “yapay kurutma” denir (Saldamlı ve Saldamlı, 1990). Kurutmaya bağımlı tutulan ürünlerdeki nemin uzaklaştırılması amacıyla tedarik edilen ısıнын transfer şekli yapay kurutma yönteminin esasını oluşturmaktadır. Kurutmada üç şekilde ısı geçişi olmaktadır:

- ✓ Taşınım ile ısı geçişi
- ✓ İletim ile ısı geçişi
- ✓ Isınım ile ısı geçişi (Özel, 2010).

Tabi kurutma olarak da adlandırılan güneşte kurutma, güneşten sağlanan ısıdan yararlanılarak açık havada yapılan kurutma işlemidir (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı). Güneşte kurutma yönteminde ise sınıflandırma şu şekilde yapılabilir:

- ✓ Doğal sistemler; meyve, sebze ve tahıl ürünlerinin direkt güneş ışınları altında serilerek kurutulması,
- ✓ Pasif sistemler; sistemde ek enerji olmadan kurutma,
- ✓ Aktif sistemler; kurulan sisteme ek enerji verilerek kurutma (Özel, 2010).

2.5 Kurutucu Tipleri

Kurutucular, saniyelerden aylara kadar uzanan çeşitli sürelerde, hassas ürünlerin hassas kurutmalarında kullanılan çok düşük kapasitelerden, hızlı kurutmalarda ihtiyaç duyulan yüksek kapasitelere kadar geniş aralıklarda çalışabilir. Ürünün kurutucu içindeki durumunun çeşitli hallerinde (durgun, hareketli ve yüksek hızlı vb.), çeşitli basınç değerlerinde (vakumlu ve yüksek basınçlı vs.) çalışan, istenildiği şekilde suyun uzaklaşması için ürüne gerekli enerjiyi çeşitli şekillerde sağlayan sistemlerdir. Çok uzun yıllardır süre gelen güneşte kurutma gibi 8-10 gün süren, ara işlem gerektiren, bulaşmadan ve kirden etkilenmeye açık olan ilkel kurutma şartlarının iyileştirilmesi amacıyla çeşitli denemeler sayesinde farklı tipte kurutucular bulunmuş ve birçok kurutma sistemi ve kurutucu tipi tasarlanmış olup günümüzde halen kullanılmaktadır (Kartal, 2011).

2.5.1 Güneş enerjisiyle çalışan kurutucular

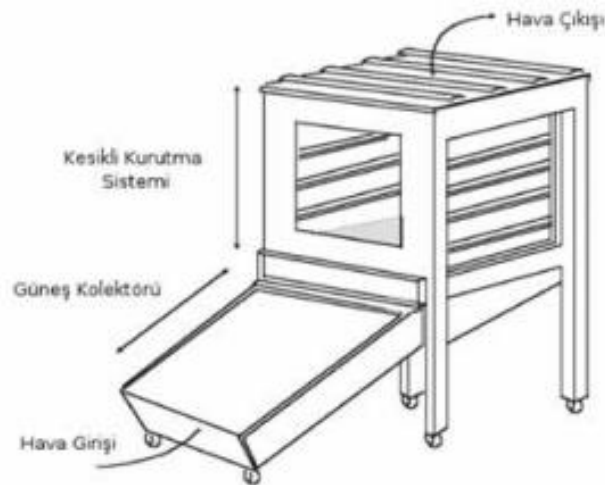
Doğrudan ya da dolaylı güneş enerjisini kullanan kurutucular bu sınıfa girmektedirler. Güneş enerjisiyle çalışan kurutucular genel olarak ısıtma yöntemleri ve güneş enerjisinden faydalanma şekillerine göre iki ana sınıfa ayrılırlar (Ekechukwu ve Norton, 1999):

- 1) Pasif güneş enerjili kurutma sistemleri,
- 2) Aktif güneş enerjili kurutma sistemleri.

Pasif Güneş Enerjili Kurutma Sistemi: Tropik ülkelerde pasif kurutma geleneksel olarak iki şekilde yapılmaktadır. Ürünün yetiştiği bitki toprakla temas halindeyken ya da yerinden alınmadan kesilerek ölmesine izin verilir. Böylelikle mahsül yerinde kurutulmuş olur. Güneş enerjisi ve doğal hava akımları ile ürün toprağa, hasıra ya da çimento zemine serilir veya yatay ya da dikey raflara konularak kurutulur (Şekil 2.3). Yüksek ürün kaybı, küf ve böcek oluşumu, kuş ve kemirgen zararı ve değişen hava koflulları gibi kısıtlayıcı faktörler bu tip sistemlerin dezavantajları arasında yer almaktadır (Ekechukwu ve Norton, 1999). Genel olarak bu şekilde kurutulmuş ürünler uluslararası kalite standartlarını

sağlayamadıklarından uluslararası pazarlarda satılamamaktadırlar (Esper ve Mühlbauer, 1998).

Aktif Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri: Aktif güneş enerjili kurutma sistemleri kısmi olarak güneş enerjisine bağımlıdırlar. Isıtma sistemlerinde, güneş enerjisi ve/veya elektrik enerjisi ya da fosil yakıtlar kullanırken, hava sirkülasyonu için fanlar kullanılmaktadır. Tipik bir aktif güneş enerjili kurutma sistemi, ısı kaynağı olarak yalnızca güneş enerjisi kullanırken, kuruma havasının sirkülasyonu için fanlar ve/veya pompalar kullanır (Ekechukwu ve Norton, 1999). Hava ürün boyunca dolaşırken yüksek dirençle karşılaştığından dolayı sadece birkaç tane tepsi hava akımını engellemeksizin yerleştirilebilir (Esper ve Mühlbauer, 1998).



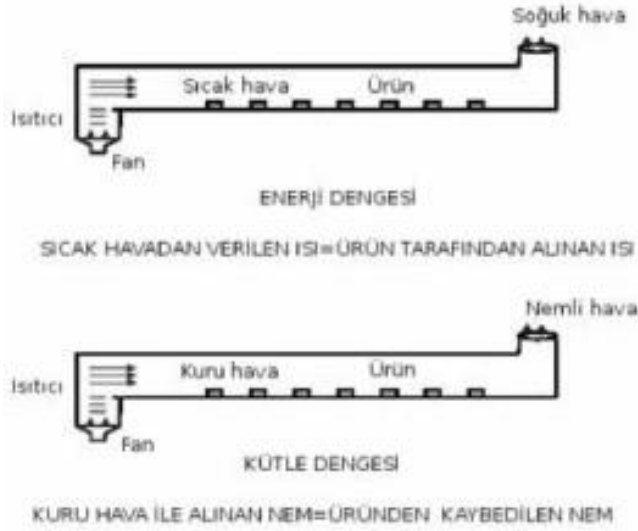
Şekil 2.3. Kabinet tipi güneş enerjili kurutucu (Kalra ve Bhardwaj, 1981).

Aktif güneş enerjili kurutucuların diğer kullanım alanları da büyük ölçekli ticari kurutmalardır. Burada güneş kolektörleri fosil yakıtlı kurutuculara ek olarak kullanılmakta ve böylece toplam enerji harcaması azalırken, kurutma koşulları kontrol altında alınabilmektedir.

2.5.2 Sıcak hava ile kurutma sistemleri

Geçmişte çok eskilere dayanan ve halen sıklıkla kullanılan kurutma tekniklerinden birisi de sıcak hava ile gıda ürünlerinin kurutulmasıdır. Ürün

içerisinde bulunan nemin buharlaştırılması için lüzumlu olan gizli ısı hava aracılığıyla temin edilir ve buharlaşan nem hava tarafından üründen uzaklaştırılır. Hava ile ürün arasında ısı ve nem transferi aynı anda gerçekleşir (Şekil 2.4) ve bu şekilde ürünün nemi ve dolayısıyla su aktivitesi azaltılır.



Şekil 2.4. Sıcak hava ile kurutma işlemi.

Sıcak hava ile kurutma işleminde, kurutma iki alt gruba ayrılır:

1. *Aktif kurutma olarak da adlandırılan ve gıdayı çevreleyen hava tarafından gıdaya transfer edilen enerji vasıtasıyla ürün yüzeyindeki nemin buharlaştırılması aşaması:* Sabit kuruma periyodu olarak da adlandırılabilen bu fazda, nemin gıdadan uzaklaştırılma hızı havanın sıcaklık, nemi, hızı ve basıncı ve ayrıca hava ile temas eden ürünün yüzey alanına bağlıdır.

2. *Kısıtlanmış veya dirençli kurutma olarak da adlandırılabilen ve ürün içinde bulunan nemin yüzeye taşınıp daha sonra uzaklaştırılması aşaması:* Bu fazda nemin katı içindeki hareketi ürünün fiziksel yapısına, sıcaklığına ve nem içeriğine (miktarına) bağlı olarak gerçekleşmektedir (Ramaswamy ve Marcott, 2006).

Kurutma sırasında ürün ile kurutma ortamı arasındaki ısı transferi ve havanın termodinamik şartları kuruma hızı üzerinde oldukça etkilidir. Etkili olan parametreler aşağıda sunulmaktadır (Nonhebel ve Moss, 1971):

1. Isı transferi

- ✓ Isıtma ortamı ile sıvı yüzeyi arasındaki ısı transferi,
- ✓ Ürünün katı tabakalarından ürün içinde bulunan sıvıya iletilen ısı transferi,
- ✓ Isıtma ortamından yaklaşık olarak kurumuş olan ürüne olan ısı transferi,
- ✓ Ürün içinde bulunan sıvının (gıdalar için çoğunlukla serbest su) ısı iletkenlik katsayısı ve gizli ısı kapasitesi,
- ✓ Nemli ürünün veya yaklaşık olarak kurumuş ürünün ısı iletkenlik katsayısı,
- ✓ Kurutulacak ürünün sıcaklığa bağlı sıvılaştırılabilme özelliği; bazı ürünler içinde bulunan sıvı buharlaştırılmadan eriyebilmektedir.

2. Havanın termodinamik koşulları

- ✓ Havanın sıcaklık ve basıncı,
- ✓ Havanın kuruma sırasında bileşimindeki değişimi,
- ✓ Ürün yüzeyinden geçen havanın bağıl hızı.

Sabit kuruma periyodunda, ürüne paralel olarak akan nemli havanın ısı transfer katsayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir:

$$h_c = 0,057 \cdot G^{0,8}$$

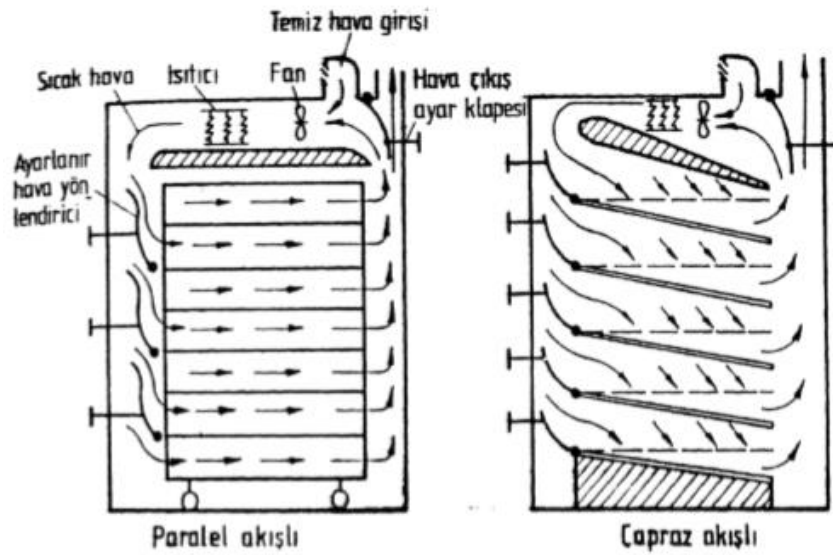
$$G = p \cdot v \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3)'te h_c ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) taşınım ısı transfer katsayısını ve G ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$) ise ürünün birim alanı üzerinden geçen havanın kütlesini göstermektedir. Azalan kuruma periyodunda ise ürün kurudukça ısı transferinin dolayısıyla havanın hızının etkisi azalacağı için (2.3) no'lu eşitliğin kullanımında hatalar ortaya çıkabilmektedir.

Ürünün fiziksel ve kimyasal yapısına ve arzu edilen son nem miktarına bağlı olarak sıcak hava ile kurutma aşağıda belirtilen farklı sistemler ile gerçekleştirilebilmektedir:

2.5.2.1 Kabin tipi kurutucu

Kurutulacak ürün, tabanı delikli veya ızgaralı tepsilere serildikten sonra, kabin içindeki raflara yerleştirilir. Kuru hava bu odalara fan vasıtasıyla verilir. Raflar ve tepsiler havanın dolaşımını engelleyemeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Gıdaların yüzeyini dolaşan hava aldığı nemle birlikte dışarı atılır. Kabin tipi kurutucular (Şekil 2.5), kurutma havasının, kabin içinde dolaşımı sırasında tepsilere göre izlediği akış yönü paralel ve çapraz akışlı olarak farklı tiplerde tasarlanabilir (Kartal, 2011). Kabin tipi kurutucular daha çok taneli ve dilimlenmiş ürünler için (fındık, ceviz, elma, erik ve mantar v.b) uygundur. Bu ürünler kabin içerisindeki rafların üzerine serilerek kurutulmaktadırlar. Bu tip kurutucularda ürüne göre belli bir hava hızı (debi) uygulanır ve ürün kısa sürede kurutma işlemi tamamlanır (Olgun ve Rzayev, 2000).



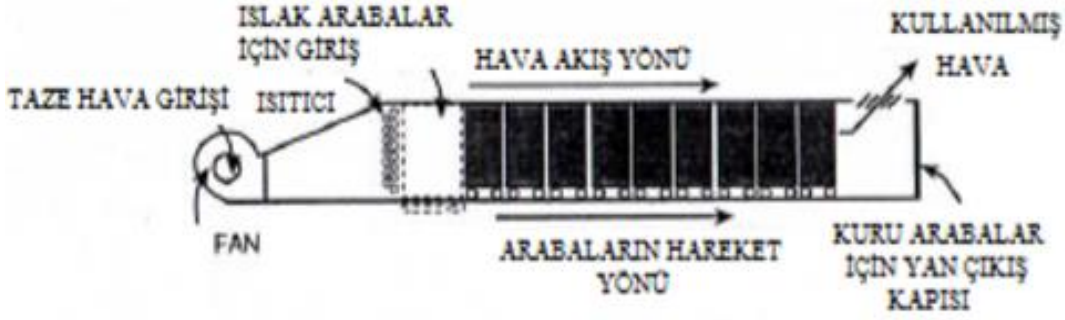
Şekil 2.5. Paralel ve çapraz akışlı kabin tipi kurutucu şematik gösterimleri (Kartal, 2011).

2.5.2.2 Tünel tipi kurutucu

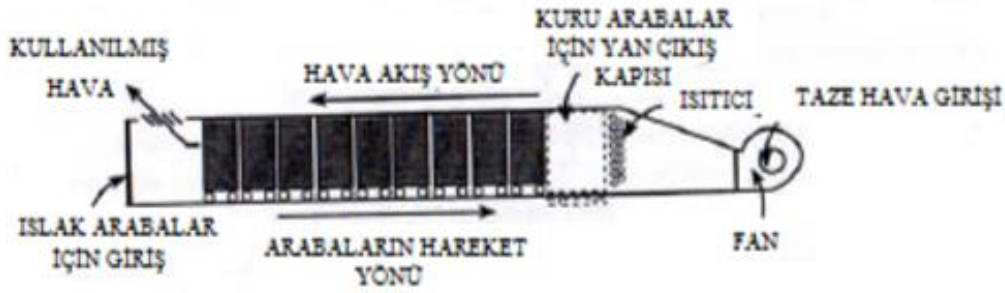
Tünel kurutucular, kabin kurutucuların daha gelişmiş bir modeli olarak düşünülebilir (Cemeroğlu, 1986). Sürekli veya yarı sürekli olarak çalıştırılan tünel kurutucular modifiye edilmiş kurutucu tipidir. Sıcak hava fan yardımı ile sistemde dolaştırılır. Kurutucuda sürekli veya periyodik olarak bulunan tepsilerin üzerindeki kurutulacak ürün arabalar veya bölmeler içerisinde hareket ettirilir. Hava tepsi yüzeyi boyunca, dikey olarak yatak boyunca veya herhangi bir doğrultuda akmaktadır (Dündar, 2010).

Kurutucuda kurutma havasının tekrar ısıtılması veya tekrar kullanılması ile sistemi terk etmeden önce daha fazla nem alması sağlanabilir. Tünel kurutucularda farklı hava hızı, sıcaklığı ve akış yönü ile kurutma yapmak olanaklıdır (Özel, 2010). Hava akışı paralel, çapraz şeklinde hareket ettirilebilir. Kurutma ünitesi Şekil 2.6-2.8’de görülmektedir (Dündar, 2010). Ürün ile hava aynı yönde hareket ederse bunlara paralel akış tüneli (Şekil 2.6) denir. Paralel akış tünellerinde başlangıçta kuruma hızı çok fazladır. Ürünün yüzeyi çok hızlı kuruduğu için üründe çok az bir buruşma belirtisi görülür. Ancak ürün parçacıklarının içerisinde boşluk ve çatlaklar oluşur. Kurutma tünelinin sonunda kurutucu hava nispeten soğuk ve fazla nemli olduğundan kurutmanın son basamağı çok yavaş meydana gelmektedir. Ürün ve havanın birbirine zıt yönde hareket ettiği tünellere zıt (ters) akış tüneli denir (Şekil 2.7). Zıt akış tünellerinde ise madde kurudukça daha uygun kurutma koşulları ile karşılaşır. Tam ve sıkıntısız bir buruşma oluşması için kurutmanın ilk aşaması daha soğuk ve daha nemli hava ile gerçekleşmesi ve kurutulan ürün içerisinde nem dağılımındaki farklılık fazla olmaması gerekmektedir. Zıt akış tüneli, erik gibi yumuşak meyveler için çok daha elverişlidir. Aksi takdirde kurutmanın ilk aşamasında ürünün öz suyu dışarı atılır (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2019).

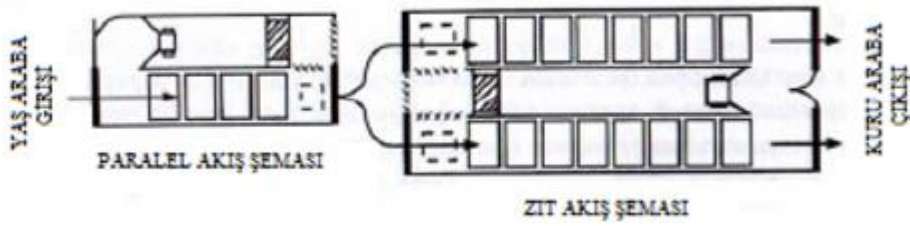
Diğer taraftan Şekil 2.8’de gösterilen bir bölmesi paralel akış, diğer bölmesi zıt akışlı olan iki kademeli veya çok kademeli tüneller de mevcuttur. Çift aşamalı tünellerin genellikle ilk derecesi paralel, ikinci derecesi zıt akım tüneli halindedir (Cemeroğlu, 1986).



Şekil 2.6. Paralel akışlı tünel kurutucu.



Şekil 2.7. Zıt akışlı tünel kurutucu.

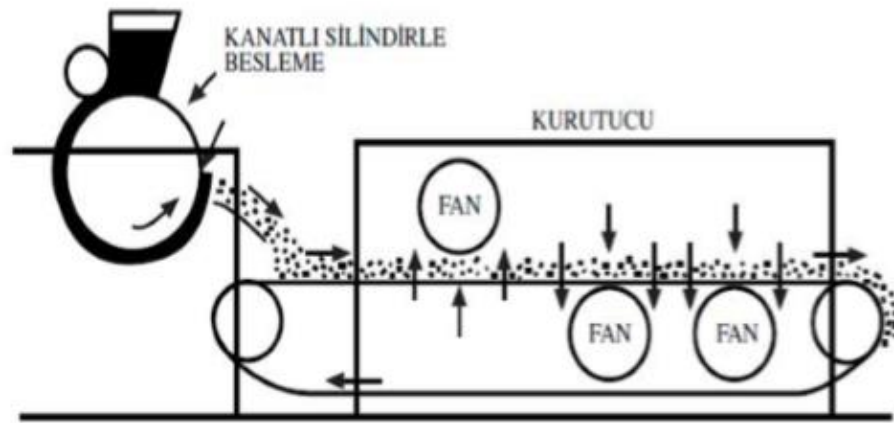


Şekil 2.8. İki kademeli kurutma sistemi.

2.5.2.3 Bantlı kurutucu

Bu kurutucularda, tünel kurutuculardaki raylı-araba sisteminin yerini sonsuz dönüş hareketli bir bant almıştır. Paslanmaz çelik örgü zincirden yapılmış olup bandın taşıdığı ürüne alttan ve üstten sıcak hava verilmektedir (Saldamlı ve Saldamlı, 1990). Şekil 2.9’da bant tipi bir kurutucu görülmektedir. Bu sistemlerin en önemli özelliği, kurutulacak ürünün fazla örselenmeden kurutulması ve süreç

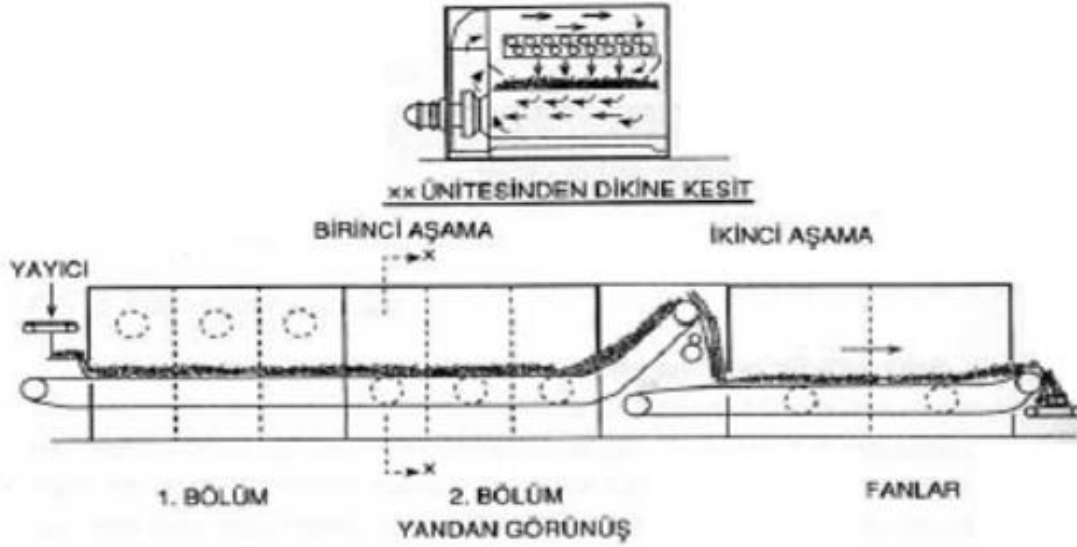
koşullarının kolayca belirlenmesidir. Üst üste konuşlandırılmış bir dizi bant içeren kurutucular kurutma zamanı uzun olan gıda ürünleri söz konusu olduğu hallerde kullanılmaktadır. Bu kurutucularda, madde üst banttan bir alttaki banda akarak kurutucu içinde ilerlemektedir. Sıcak gazlar ise bantlara paralel ve/veya dik yönde hareket eder (Cemeroğlu, 1986). Gıda maddelerindeki kullanımıyla genelde %80 nem içeriği oranlarından %10 nem içeriği oranlarına geçişi sağlayan basit sistemlerdendir (Kartal, 2011).



Şekil 2.9. Bantlı tünel tipi kurutucu (Dündar, 2010).

2.5.2.4 Konveyörlü kurutucu

Konveyör kurutuculara sürekli bant sistemi de denir. Şekil 2.10'da gösterilen konveyör kurutucuların çalışma ilkesi, tünel kurutucular ile aynıdır. Tünel kurutuculardaki tavaların yerini devamlı çalışan bir bant almıştır. Paslanmaz çelikten üretilmiş elek biçiminde bir bantla ilerletilen ürüne, alttan ve üstten sıcak hava uygulanmaktadır (Olgun ve Rzayev, 2000). Bantlı kurutucu sistemine üstünlükleri, konveyör kullanımıyla en yüksek alan kullanım performansını yakalamasıdır. Konveyörler sayesinde çeşitli şekillerde alanda dolaşan ürün daha uniform (düzenli) bir şekilde kurur (Kartal, 2011). Konveyör kurutucular, büyük miktarlardaki ürünü bir dönem boyunca kurutmaya elverişlidir. Havuç, fasulye, soğan ve elma gibi doğranmış, kıyılmış, parça halindeki ürünlerin kurutulmaları mümkündür.

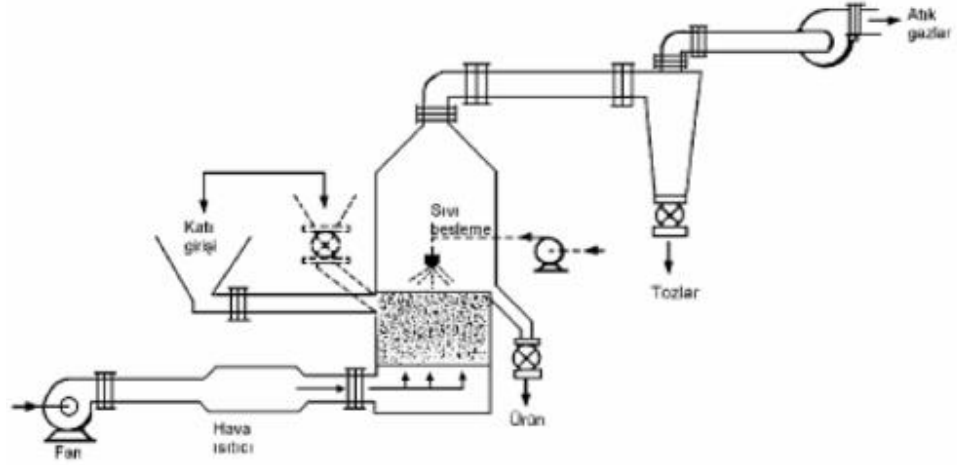


Şekil 2.10. İki aşamalı konveyör kurutucu.

Bu sistem iki aşamalı olarak tasarlanmıştır. Her iki aşamada sıcaklık ve nem içeriği açısından farklı niteliklerde hava kullanılmaktadır. İlk bölmede yüksek sıcaklıkta, hızı fazla ve orta derecede nem içeren hava kullanılırken ikinci bölmede daha ılık fakat son derece kuru hava kullanılmaktadır (T.C. Milli Eğitim Müdürlüğü).

2.5.2.5 Akışkan yataklı kurutucu

Akışkanlaştırılmış yatakta, kurutma ortamı sıcak hava akışı tanecik yapısındaki maddeler arasından geçirilir. Şekil 2.11’de gösterilen bir akışkan kurutucuda hava hızı özenle ayarlanmalıdır. Toz veya taneli yapıdaki kurutucular ürün ile akışkanlaştırma gazı arasındaki bağlantı çok iyi olduğundan, kurutma havası ile tanecikler arasında ısı aktarımı da efektif şekilde gerçekleşir. Bu düzenek ile büyük sıcaklık farkları olmaksızın ürünlerin kurutulması olanaklıdır. Otomatik yükleme ve boşaltmanın gerekli olduğu bu düzeneğin en önemli avantajı kurutma işleminin kısa bir sürede bitirilmesidir (Bayhan, 2011). Akışkan yataklı kurutucular yaygın olarak havuç, patates, kahve, bezelye, et, taze fasulye, soğan, kakao, tuz ve şekerin kurutulmasında kullanılır (Gürses, 1986).



Şekil 2.11. Akışkan yataklı kurutucu (McKetta, 1983).

2.5.2.6 Püskürtmeli (Sprey) kurutucu

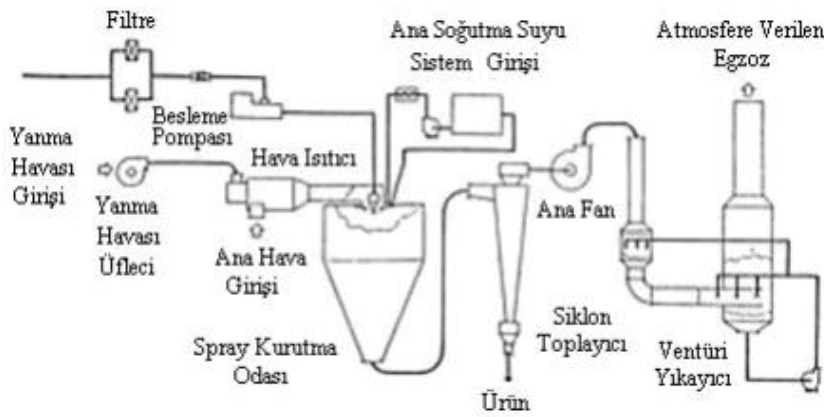
Sprey kurutucular süt tozu, peynir altı suyu tozu, süt, tereyağı ve peynirle yapılan bazı kuru çocuk mamalarının yapımında, öz çay, öz kahve, meyve ve sebze suları tozları, et özü ve maya özü yapımında kullanılır. Çünkü kurutulmuş madde damlacık veya tanecik yapısı olarak aynı yapıdadır ve kurutma zamanı oldukça kısadır (5-15 s) (Gürses, 1986).

Püskürtmeli kurutma işlemleri, üretim ihtiyaçlarına ve püskürtülerek kurutulacak çözeltilerin stabilitesine bağlı olarak kesikli veya sürekli olabilir. Düşük ürün manipülasyonu nedeniyle, mikrobiyal ve partikül yükü azaltılabilir. Normalde bir çözelti kabı, ön filtreli ve steril filtreli bir filtrasyon sistemi ve püskürtmeli kurutucuyu kontrollü bir hızda, sprej kurutucunun kendisi ve dökme kaplarda beslemek için bir basınç kabı vardır. Ürün kurutmak için kullanılan hava HEPA filtrelenmiş olmalıdır. Silikon contalarla tasarlandığında, sistem sterilizasyon sıcaklıklarına dayanacaktır.

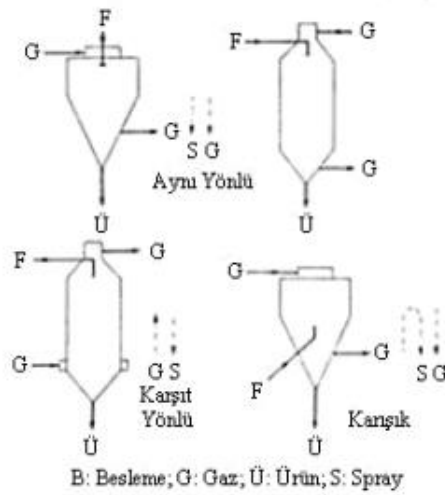
Püskürtme cihazı ya bir püskürtme memesi ya da yüksek hızlı bir centrifugal cihaz olabilir. Spreyle kurutulmuş ürünler tipik olarak sıcaklığa duyarlıdır, bu nedenle hava sıcaklığı mümkün olduğunca kontrol edilmelidir. Püskürtme cihazının tasarımı, ürünün damar duvarlarına yapışmamasını sağlamalıdır. Sürekli kurutma ve pirojenasyon, sürekli çalışan tünel veya kesikli fırında yapılabilir.

Püskürtme kurutucu normalde ürünü kurutmak için kullanılan ahot hava sistemi ile sterilize edilmiş kuru ısıdır. Sprey kurutucuya giren aliller sterilize edilebilir olmalıdır. Püskürtmeli kurutucu boyutunun ve çözelti atomize edici aygıtın seçimi, en iyi şekilde, boyutlandırılmış pilot ekipman üzerinde yapılan deneme çalışmaları ile belirlenir. Dondurarak kurutmada olduğu gibi, operasyonel giderler sprey kurutma işlemlerini belirli uygulamalarla sınırlandırır (Günerban, 2013).

Şekil 2.12’de, tipik bir sprey kurutucu sistemi Şekil 2.13’de ise paralel, karşıt ve çapraz akımlı püskürtmeli kurutucunun kurutma hazneleri görülmektedir.



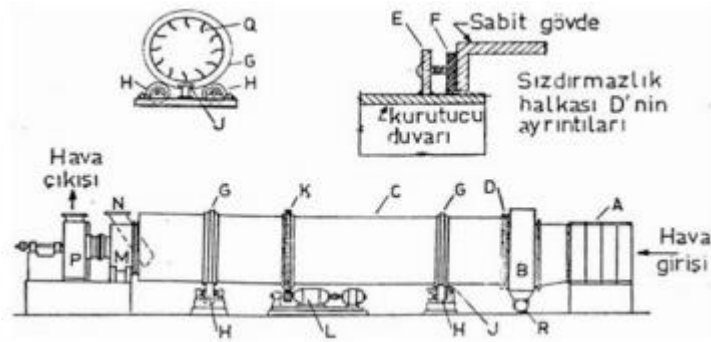
Şekil 2.12. Püskürtmeli kurutucu ünitesinin süreç şeması (Mujumdar, 2000).



Şekil 2.13. Paralel, karşıt ve çapraz akımlı püskürtmeli kurutucunun kurutma hazneleri (Mujumdar, 2000).

2.5.2.7 Döner kurutucu

Geniş çaplı uzun silindirik bir boru şeklinde olan kurutma ortamı ve ürünün boru içinde hareketini kolaylaştırmak için bu silindirik boruya gerekli açığı veren ayarlanabilen ayaklardan oluşan bir kurutucu sistemidir (Şekil 2.14). Kurutmayı gerçekleştirecek bölümler doğrudan veya dolaylı olarak ısıtılır, hava akışı paralel veya ters akımlı olarak ayarlanabilir. Döner kurutucuda hava, rafların altına verilir (Kartal, 2011). Döner kurutucularda gıda ürünü silindir içerisine verilir. Silindir içerisinde ilerleyen gıda ürünü (maddesi) silindir boyunca verilen sıcak hava akımı ile ya da ısıtılmış silindir duvarlarından kondüksiyon taşınımı ile ısıtma yapılır. Bazı döner kurutucularda silindirin kendisi döner bazılarında ise silindir sabittir. Silindir içerisinde dönen paletler sayesinde gıda ürünü (maddesi) silindir boyunca taşınır (Cemeroğlu, 1986).



Şekil 2.14. Döner kurutucu: A, hava ısıtıcısı; B, sabit başlık; C, kurutucu gövdesi; D, sızdırmazlık halkası; E, sızdırmazlık halkası dayanağı; F, sızdırmazlık parçası; G, çemberler; H, dayanma silindirleri; J, güvenlik silindirleri; K, döndürme dişlileri.

2.5.3 Dondurarak kurutma sistemleri

Liyofilizasyon olarak da adlandırılan dondurarak kurutma yöntemi ilk olarak 1940'larda kuru plazma ile kan ürünlerinin büyük miktarda imalatı için geliştirilmiştir. Ayrıca dondurarak kurutma ile antibiyotik ile biyolojik maddeler endüstriyel ölçekte üretimi gerçekleştirilmiştir.

Dondurarak kurutma yöntemi, hassas ürünlerin (eczacılık ürünleri, serumlar, virüs kültürleri, bakteri, aşılar, kahve ve çay esansları, deniz ürünleri, etler,

sebzeler ve süt gibi) kurutulması için kullanılır. Ürün önce dondurulup sonra da düşük sıcaklıklı bir yoğuşturucuya bağlı vakum odasına yerleştirilir. Donmuş maddeye ısı iletilir (genelde kızılötesi ışınlama), uçucu (genelde su) gaz haline gelip yoğuşur. Dondurarak kurutma işlemi, düşük basınçta 40 ile -10°C sıcaklık aralık değerlerinde gerçekleşir (Günerban, 2013).

Sıcak hava ile kurutma ve dondurarak kurutma arasındaki farklar aşağıdaki tabloda verilmiştir. Her ikisinin de ayrı ayrı avantajları bulunurken, kalite açısından dondurarak kurutma öne çıkmaktadır.

Tablo 2.1. Sıcak hava ile kurutma ve dondurarak kurutma arasındaki farklar (Fellows, 2000)

Sıcak Hava ile Kurutma	Dondurarak Kurutma
Sebze ve tane gibi kolay kuruyan ürünlerde başarılıdır.	Birçok üründe başarılı olarak uygulanabilmesine rağmen, diğer yöntemler ile kurutulamayan gıdalar ile uygulaması sınırlıdır.
Et ürünlerinde başarılı değildir.	Pişmiş ve ham etin kurutulmasında başarıyla kullanılabilir.
Sıcaklık 37° ile 93°C arasında değişebilir.	Sıcaklık donma noktasının altında olabilir.
Atmosferik basınçta gerçekleşir.	Basınç oldukça düşüktür (27-133 Pa)
Suyun gıda yüzeyinden evaporasyonu ile gerçekleşir.	Buzun süblimasyonu (katı fazdan direk buhar fazına geçiş) ile gerçekleşir.
Katı madde hareketinden kaynaklanan yüzey sertleşmesi gerçekleşebilir.	Katı madde hareketi minimum seviyededir.
Ürün üzerindeki stresten dolayı yapısal bozulmalar ve büzülme meydana gelir.	Büzülme ve yapısal değişimler minimum seviyededir.
Kurutulan ürünün rehidrasyonu minimum seviyededir.	Hızlı rehidrasyon meydana gelir.
Koku ve aroma çoğunlukla değişmektedir.	Koku ve aroma muhafaza edilebilmektedir.
Ürünün rengi genellikle kurutma sonunda daha esmerdir.	Ürün rengini muhafaza edebilmektedir.
Kurutma maliyeti düşüktür.	Kurutma maliyeti sıcak havaya göre genellikle 4 kata kadar daha fazladır.

2.5.4 Ozmotik kurutma

Ozmotik kurutma bilhassa sebze ve meyve gibi ürünlerin, konsantre çözeltiler içinde sularının uzaklaştırılması işlemidir. Ozmotik kurutmada aynı anda üründen çözeltiliye doğru olan su akışı, çözeltiden ürüne (herhangi bir besin

ögesi, koruyucu ya da duyusal kalite geliştiriciyi ürüne katmayı sağlamak için) çözünen aktarımı ve ürüne ait çözünenlerin çözeltiye geçmesi gibi üç farklı kütle aktarımı oluşur. Ürüne ait çözünenlerin çözeltiye geçmesi, su kaybı ve çözünen yanında nicelik yönüyle çok az miktarlarda ise de, son ürünün bileşimi bakımından önemlidir. Böylece ozmotik kurutmayla çözünür kuru madde iştirakıyla formülasyon etkisi sağlanmaktadır. Diğer taraftan en mühim belirleme, ürünlerdeki nem miktarının istenilen bir orana düşürülebilmesidir. Bu nedenle ozmotik kurutma; pastörizasyon, dondurma, kurutma ve konserveleme gibi işlemlerden önce bir ön işlem için kullanılmaktadır (Kartal, 2011).

2.5.5 Kızıl ötesi ışınlı kurutma

Gıda endüstrisinde iletim ve taşınım ısı transfer mekanizmaları ısı işlemlerde çoğunlukla kullanılmaktadır. Isıl işlemlerde güneş enerjisi ve kısa dalga boyuna sahip kızılötesi enerjisi ile de ışınlı ısı transferi mekanizmasından faydalanılmaktadır. Ticari uzun dalgaboylu kızılötesi ısıtıcılardaki gelişmelere beraberinde son zamanlarda ilgi uzun dalga boylu kızılötesi (FIR “Far Infrared Radiation”) ışınlı ısı transferinde yoğunlaşmıştır. Uzun dalga boylu kızılötesi ışınlı ısı, FIR ısıtıcılardan gıdaya elektromanyetik dalga olarak gönderilmektedir. Gıda ve ısıtıcı arasındaki ısı transferi her iki malzemenin sıcaklık farkı ile doğru orantılı olarak gerçekleşmektedir. Mikrodalga enerjisinin benzeri FIR da gıda maddeleri tarafından emilmekte ve daha sonra ısıya çevrilmektedir. FIR’la ısıtma geleneksel yöntemlerle ısıtmaya göre, maliyet ve son ürün kalitesinde etkili olmaktadır. Infrared ısıtmanın gıda işleme açısından avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ✓ Gıdaya etkin olarak ısınlı ısı transfer edilebilmesi ile işlem süresi ve maliyetler düşmektedir.
- ✓ Ekipman içerisindeki hava ısıtılmadığından ortam havası normal sıcaklıklarda muhafaza edilebilmektedir.
- ✓ Daha iyi kontrol edilebilir, güvenilir ve küçük boyutlardaki ekipmanların dizaynı mümkün olabilmektedir (Sakai ve Mao, 2006).

Kızılötesi ışınlı ısı sebze ve deniz ürünlerinin kurutulmasında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Sebze kurutma esnasında kuruma etkinliğinin yanı sıra

rengin ve besin içeriğinin korunmasına özen gösterilmelidir. Kuruma esnasında ısı ve oksidasyondan kaynaklanan klorofil ve karotenoid bozulması oluşabilmektedir (Hebbbar ve ark., 2004).

2.5.6 Mikrodalga kurutma

Mikrodalga ile kurutmada renk, ürün kalitesi, tat gibi gıda yapısal özelliklerin muhafaza edilmesinde etkili bir kurutma yöntemidir. Diğer kurutma sistemlerine oranla daha ekonomiktir. Sanayi de yaygın olarak vakum ile birlikte kullanılarak yapılan kurutmalarda, diğer kurutma sistemlerine göre süre açısından avantaj sağlamaktadır. Şekil 2.15'te dalga boylarına göre elektromanyetik dalgalar gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Dalga boyları ve elektromanyetik spektrum için verilmiş bir örnek.

2.5.7 Vakum kurutma

Vakumlu kurutma işlemi besin içeriğinde meydana gelen kayıpları azaltmak ve kurutulmuş gıdanın kalitesini korumak için uygulanan bir methoddur. Vakum kurutucular ısıya hassas ürünlerin, daha düşük sıcaklıklarda ani bir şekilde kuruması için geliştirilmişlerdir. Vakumlu kurutma yöntemi atmosferik koşullarda diğer kurutma methodlarıyla karşılaştırıldığında daha düşük kurutma sıcaklığı ve oksijensiz ortamda kurutma gibi bazı özgün özelliklere sahip olduğundan dolayı daha nitelikli ürün kazanılmasını sağlamaktadır (Hastürk vd., 2012).

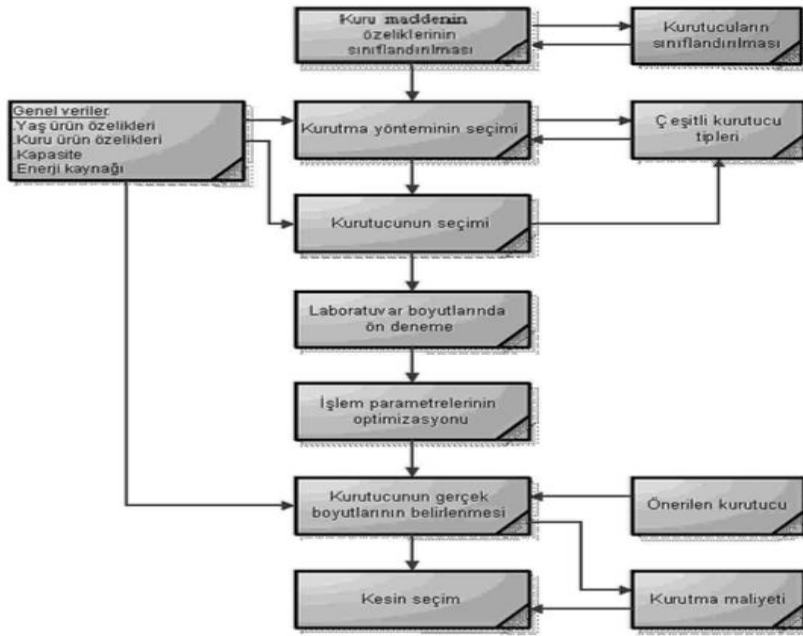
2.6 Kurutucu Seçimi

Kurutucu seçiminde kazanılan tecrübeler ve üretici tavsiyeleri, bilimsel araştırmalardan daha etkili hale gelmiştir. Kurutma teknolojileri geliştikçe, kurutucu seçimi için çok daha fazla sayıda teknik bilgi ve bunların uygulanması bakımından bilgisi ve deneyimi olmayan kişiler için zor ve ilgi gerektiren bir vazife olmuştur (Güngör, 2013).

Kurutucu seçimi, birçok faktörün özenle incelenmesini gerektiren karmaşık bir işlemdir. Kurutulacak maddenin özellikleri, enerji kaynağı, ısıtıcı çeşidi, kurutma havası ile madde arasındaki hidrodinamik koşullar bilhassa irdelenmelidir. Kurutucu seçimi esnasında teknolojik gelişmeler, ekonomik çalışma ve elde edilen kuru ürünün kalitesi de önemli faktörler arasında yer almaktadır. Kurutucu seçimi için aşağıda belirtilen nitelikler göz önünde bulundurulmalıdır:

- ✓ Yıllık kurutulacak ürün miktarı,
- ✓ Kuruluş yapım maliyeti,
- ✓ Kuruluşun işletme masrafları,
- ✓ İşlem esnasında kurutulacak maddeden harcanılacak kayıp miktarı,
- ✓ Güvenlikli çalışma,
- ✓ Kurumuş ürünün kalitesinin uygunluğu,
- ✓ Kurumuş ürünün dış görünüşünün isteğe uygunluğu,
- ✓ Kurutucunun çeşitli kapasitelerde çalıştırılabilme esnekliği,
- ✓ Çevre kirliliğine etkisi olup olmadığı,
- ✓ Çalışma sırasında etkin kontrollerin yapılmasına olanak vermesi,

Kurutucu seçiminde ilk olarak maddenin niteliklerinin tespit edilmesidir. Kurutulacak maddenin statik ve kinetik kurutma hususları ve kurumuş üründe aranan şekil ve dış görünüm durumları ilk önce tespit edilmelidir (Dündar, 2010). Şekil 2.16'da kurutucu seçimi için izlenecek adımlar gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Kurutucu seçimi için işlem adımları (Günerhan, 2013).

3. KURUTMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

3.1 Armutların Kurutulması

Armut, gülgiller (Rosaceae) familyasının Maloideae alt familyasında tasniflenen *Pyrus* cinsine ait ağaç nitelikli bitki türüdür. Bu türlerden bazılarının yenilebilir meyvelerinin ortak adıdır. Armut, üzüm ve elmadan sonra üçüncü mühim ılıman iklim meyvesini oluşturmaktadır. Kuzey ve Güney yarı kürelerinin ılıman iklim kuşağı ülkelerinde yetiştirilen armut, dünyanın oldukça önemli meyve ağaçlarından bir tanesidir (Itai, 2007).



Şekil 3.1. Armut ağacı meyvesi.

Pyrus communis L. (Armut) türünün bir çok kültür formu Anadolu'da yetişmektedir. Dünyadaki armut çeşitlerinin sayısı yaklaşık olarak 5000'in üzerindedir. Birbirinden farklı iklimsel koşullara sahip olan ülkemizde, her bölgeye uygun ve bazı yörelerde yaygın olarak yetiştirilen 640 armut çeşidi mevcuttur. Ancak bunlar arasında kalite ve verimi yüksek olan ve ticarî olarak yetiştirilenlerin sayısı azdır. Bu türlerin çoğu doğada kendiliğinden yetişmiş ve anavatanları arasında ülkemizin de bulunduğu ahlat (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) veya diğer *Pyrus* (*P. communis* L., *P. caucasica* Fed, *P. Salicifolia* Pall.) türlerine aşılansarak yetiştirilmektedir (Itai, 2007).

Ülkemizde armut en fazla sofralık taze meyve olarak tüketilmekte; gıda sanayinde ise püre, konsantre ve meyve suyu üretiminde kullanılmaktadır. Yurtdışında armut konserve edilerek veya kurutularak da değerlendirilmektedir.

Tuik verilerine göre Dünya'daki armut üreticisi ülkelerin birim alana düşen verimleri, ortalama 1.21 ton/da'dır. Yoğun yetiştiricilik metotları ile üretim yapan ABD gibi ülkelerin verimleri, Dünya ortalamasının oldukça üzerinde iken (3.33 ton/da); Türkiye gibi üretimi halen geleneksel metotlarla gerçekleştiren ülkelerin verimleri ise oldukça düşüktür. Dünya armut üretiminde ilk sırayı 15.231.858 tonla (%67.3) Çin alırken, ABD 732642 tonla (%3.23), İtalya 736646 tonla (%3.25), İspanya 473400 tonla (%2.10), Arjantin 704200 tonla (%3.11) ve Kore 307820 tonla (% 1.4) üretimde söz sahibi olan başlıca ülkelerdir.

TS 184 (Mart 2007) ICS 67.080.10 diye adlandırılan bu standard; armudun tanımına, sınıflandırma ve özelliklerine, numune alma ve muayeneleriyle piyasaya arz şekline dair bilgileri içermektedir.

Türk Standartları Enstitüsü armut kurusu için standart değerler (TSE 3689 ISO 7702) oluşturmuştur. Bu standartlarda kurutulacak ürünün ilk ve son nem değerleri, kurutma sonrası renk ve biçim yönünden kıstaslar ve armut kurusunda olabilecek katkı maddelerinin maksimum değerleri verilmektedir.

Santa Maria armudunun kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1. Santa maria armudunun kimyasal özellikleri

Özellikler	Değerler
Su miktarı, (%)	83,1 ± 0,52
Kuru madde, (%)	16,90 ± 0,52
Suda çözünür kuru madde, (%)	13,2 ± 0,00
pH	4,388 ± 0,022
Toplam asitlik, (%)	0,12 ± 0,01
Kül miktarı, (%)	0,0997 ± 0,001

Armutların kurutulmasında genellikle iki kontrol methodu bulunmaktadır. Bunlar ise kurutma esnasında ve sonrasında yapılan duyusal kontrol ve kütle değişimine bağlı olarak ürünlerdeki nem kontrolüdür.

Armutlar ortalama 5 mm kalınlığında dilimlenir. 5 mm kalınlıktaki armut dilimleri kurutulduktan sonra ikiye katlandığında elastik bir yapıya sahip olmalı ve kırılmamalıdır. Oradan ikiye bölünüp bakıldığında merkez bölgesinde nem olmamalıdır. Üründe, kurutma sırasında nem miktarının kontrolü için ürünün kuru ağırlığının bilinmesi gerekmektedir. Ardından kuru ağırlığa göre ürünün başlangıç nem miktarı bulunur. Armut dilimi için kurutma sonrasında uygun olan su oranı en çok 0.17 gr.su /gr.kuru ağırlıktır. Armut dilimi içindeki su oranlarını (nem miktarı) yaş ve kuru esasa göre sırasıyla aşağıdaki bağıntılarla hesaplamak mümkündür:

Yaş Esasa Göre Su Oranı Hesabı:

$$MC_{YA} = \frac{YA-KA}{YA} \quad (3.1)$$

Kuru Esasa Göre Su Oranı Hesabı:

$$MC_{KA} = \frac{YA-KA}{KA} \quad (3.2)$$

eşitlikleriyle hesaplanır.

Deneyler sonucunda armut dilimlerindeki nem oranı, içeriği (MR);

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

eşitliğinden faydalanılarak hesaplanmıştır [26].

Deneyde alınan sonuçlara göre kurutma hızları (DR);

$$DR = \frac{MC_{tb} - MC_{ts}}{dt} \quad (3.4)$$

eşitliğinden hesaplanabilir [27].

Kurutma işlemlerinde öncelikle kurutulacak katıların yüzeylerindeki suyun başlangıçta sıvı fazda olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle ilk olarak bu suyun sıvı fazdan buhar fazına dönüştürülmesi gerekmektedir. Kurutulacak ürünü çevreleyen yüzeyden söz konusu sıvının uzaklaştırılması için ısı enerjisi gereklidir (Atalay, 2015).

Su hemen hemen bütün gıda ürünleri için çok önemli bir bileşendir ve bilinen fiziksel ve kalite özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Söz konusu bu su (yaş baza göre % 50'nin altında bulunmadıkça) gıda ürünlerinde genellikle saf suyun fiziksel özelliklerini gösterecektir. Nem miktarı azalmaya devam ettikçe ürünün içindeki su daha az aktif olacak ve saf su özelliklerinden uzaklaşacaktır. Gıda maddeleri içindeki bu su, bu aşamada bağlı su olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak gıdaların nem içeriği, ürünün içindeki nemin yüzdesi olarak ifade edilir. Literatürde ürün nem (su) içeriğini kuru ve yaş baz olarak değerlendirmelerde bulunulur (Atalay, 2015).

Bu çalışmanın kapsamındaki deneylerde % 20 su içeriği değerine (yaş baz) kadar kurutma yapılmıştır. Ayrıca kurutma denemelerinden önce, ürün numuneleri kuru madde tayini için etüvde kurutularak kuru madde miktarı tespiti de yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan kurutma sisteminde *Pyrus Communis* cinsi Santa Maria armudu (sarı ve yeşil armut) kurutulmuştur. Deneylerde armutların tam kuru durumdaki su oranı kuru esasa göre eşitlik 3.2'den 5,5578 g su/g kuru ağırlık, tam kuru durumdaki su oranı yaş esasa göre ise eşitlik 3.1'den 0.82 g su/g yaş ağırlık olarak hesaplanmıştır.

3.2 Kurutma Sistemlerinde Kullanılan Verim Tanımlamaları

Özgül nem alma hızı, nem alma hızı, kurutma verimi kurutma sistemlerinin veriminin ve etkenliğinin belirlenebilmesi için tanımlanması gereken en önemli faktörlerdendir. Aşağıda bunların tanımları verilmiştir:

3.2.1 Özgül nem alma hızı (SMER)

Bir kurutma sisteminin enerji verimliliği yaygın olarak özgül nem alma hızıyla belirlenir. Bu büyüklük SMER olarak adlandırılan birim kWh enerji kullanımı için, kurutulacak üründen uzaklaştırılan su kütleini ifade etmektedir. Kurutucunun enerji verimliliği için işletme masrafları önemli bir değişkendir. SMER için, $SMER_{hp}$ (üründen uzaklaşan nem kütlesi) ve $SMER_{ts}$ (üründen uzaklaşacak nem kütlesi) şeklinde iki tanımlama yapılabilir (Oktay, 2003).

$$SMER_{hp} = \frac{\text{üründen uzaklaşan nem kütlesi}}{\text{Enerji sarfiyatı (tüm sistem için)}} \left[\frac{kg - su}{kWh} \right] \quad (3.5)$$

$$SMER_{ts} = \frac{\text{üründen uzaklaşacak nem kütlesi}}{\text{Enerji sarfiyatı (tüm sistem için)}} \left[\frac{kg - su}{kWh} \right] \quad (3.6)$$

3.2.2 Nem alma hızı (MER)

MER olarak adlandırılan nem alma hızı, bir kurutucudan birim zamanda uzaklaştırılan nem kütleine denir (Oktay, 2003).

$$MER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Kurutma süresi}} \left[\frac{kg - su}{h} \right] \quad (3.7)$$

3.2.3 Kurutma verimi

Kurutma verimi ise, başlangıçta üründe mevcut olan su miktarının ne kadarlık bir yüzdesinin üründen uzaklaştırıldığını anlatır (Oktay, 2003).

$$\% \text{ Kurutma Verimi} = \frac{M_1 - M_2}{M_{su}} 100 \quad (3.8)$$

3.3 Kurutmanın Modellenmesi

Feng, Yin ve diğ. ark. (2012) kurutma modelini (ısı ve kütle transfer işlemlerinin modellenmesini) genel olarak ampirik (deneysel) ve temel (matematiksel) model olmak üzere iki gruba ayırmışlardır (Kumar et al., 2012).

3.3.1 Ampirik (Deneyisel) model

Ampirik modellerin uygulanması kolaydır ve genellikle kurutma eğrisini tanımlamak için kullanılır. Üstel denklemler en yaygın şekilde kullanılır. Aşağıdaki Tablo 3.2’de kurutma kinetiğini tanımlamak için kullanılan ampirik modellerin listesi görülmektedir (Kumar et al., 2012):

Tablo 3.2. Kurutma eğrileri için verilen ampirik (deneysel) modeller (Kumar et al., 2012)

Model	Name of the Model	Reference
$MR = \exp(-kt)$	Newton	(Sutar and B.N.Thorat 2011) and (Baini and Langrish 2007)
$MR = \exp(-kt^n)$	Page	
$MR = \exp(-(kt)^n)$	Modified Page	
$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis	
$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic	
$MR = a \exp(-k_0 t) + a \exp(-k_1 t)$	Two-term	
$MR = 1 + at + bt^2$	Wand and Singh	
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion	
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Verma	
$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Modified Henderson and Pabis	
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Two term exponential	
$MR = \exp\left(-k \left(\frac{t}{L^2}\right)^n\right)$	Modified Page equation – II	

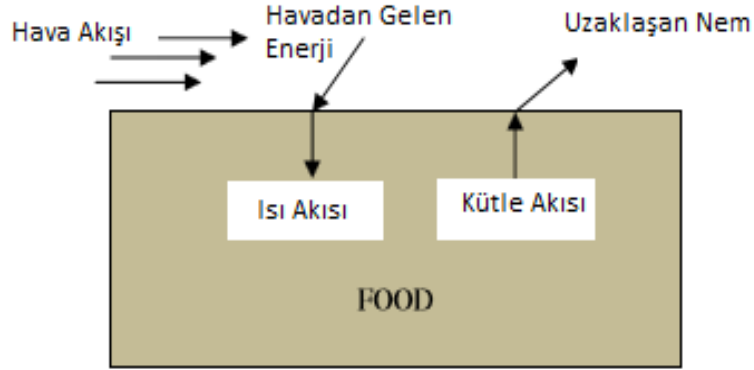
Burada, a, b, c model sabitleridir (boyutsuz) ve k, g, h kurutma sabitleridir (s^{-1}). Bu modeller aslen Newton’un soğutma yasası ve Fick’in yayılım yasalarından türetilmiştir (Erbay ve Icier 2010).

3.3.2 Temel (Matematiksel) model

Temel model, ısı ve kütle transfer modeli olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Şekil 3.2’de, hem ısı hem de kütlenin taşınmasını gösteren gıda kurutma sisteminin şematik diyagramını göstermektedir. Bu taşıma ısı işlemi iki farklı özellik ortaya çıkarır:

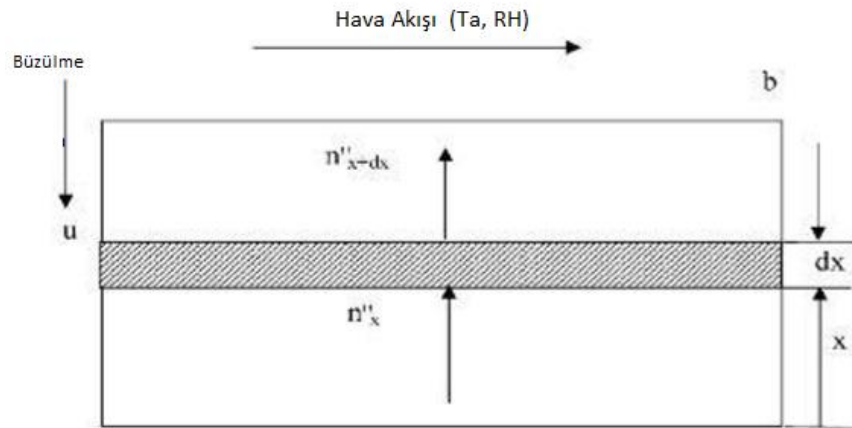
- ✓ İçeriden gelen ısı akısı nedeniyle gıda sıcaklığının hava sıcaklığına doğru artması

- ✓ Buharlaşma nedeniyle dışarıdaki ısı akısı nedeniyle sıcaklığın düşmesi (Barati ve Esfahani, 2011)



Şekil 3.2. Gıda maddelerinin kuruması sırasında ısı ve kütle transferinin şematik diyagramı.

Bu modelde, kurutma maddesi, tek tip bir başlangıç sıcaklığında (T_0) ve nem içeriğinde (M_0) $L = 2b$ kalınlığında ince bir levha olarak kabul edilir. Her iki taraf, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, T_a sıcaklığında ve bağıl neme (RH) sıcaklıkta bir hava akışına maruz bırakılmaktadır. Ayrıca büzölmenin etkisini hesaba katmak gerekir (Mulet ve diğerleri, 1987). Sebze ve meyvelerde, büzölme hacmi dehidrasyon nedeniyle su kaybı hacmine çok yakındır (Suzuki ve diğ., 1976).



Şekil 3.3. Malzeme numunesindeki element kontrol hacmi (Afolabi and Agarry, 2014).

Modeli basitleştirmek için, aşağıdaki varsayımlar yapıldı (Karim ve Hawlader, 2005):

- ✓ Nem hareketi ve ısı transferi tek boyutludur (yani, iç kısımdan havanın numune arayüzüne ve buharlaşma arayüzünde gerçekleşir).
- ✓ Kurutma sırasında kimyasal bir reaksiyon oluşmaz, yani malzemenin, havanın ve nemin termal ve kimyasal özellikleri, dikkate alınan sıcaklık aralığında sabittir.
- ✓ Kurutma ilerledikçe malzeme büzülür.
- ✓ Sıcaklık ve nem, nem difüzyonuna bağlıdır.
- ✓ Kurutucuya havanın düzgün dağılması sağlanır.
- ✓ Kurutulan madde içindeki nem ve sıcaklık dağılımları uniform bir şekilde gerçekleşmektedir.
- ✓ Sadece iletim ve taşınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir (Afolabi and Agarry, 2014).

3.3.2.1 Kütle transferinin modellenmesi

Kütle korunumlu denklemlerin modellenmesi, Fick'in ikinci kanunu kullanılarak yazılabilir. 2. Fick Kanunu nem difüzyonu olarak tanımlanan etkin difüzyon katsayısı olarak ifade edilmektedir.

$$0 - \frac{\partial j}{\partial x}(Ax) = \left(u \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial t} \right) (Ax) \quad (3.9)$$

Denklemin her iki tarafı Ax' 'e bölünürse;

$$-\frac{\partial j}{\partial x} = u \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial t} \quad (3.10)$$

Burada; $J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$ (kütle transfer akısı),

$C = \text{Nem konsantrasyon, } M = \text{Nem içeriği, } D = \text{Difüzyon katsayısı}$

J 'yi (3.10) denkleminde yerine koyarsak aşağıdaki kütle transfer denklemi elde edilir.

$$u \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \text{ denklemi elde edilir.} \quad (3.11)$$

Yukarıdaki denklemde büzülme ihmal edildiğinde Fick'in 2. Kanunu elde edilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (3.12)$$

Uygun başlangıç ve sınır koşullarını kullanılarak, çeşitli geometriler için analitik çözümler sunmuştur. L kalınlığına ve sabit difüzyona sahip bir dilim için ortalama nem değerini (içeriğini) veren bu çözüm aşağıdaki gibi ifade edilebilir [Lee and Kim, 2009]:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4L^2} D_{eff} t\right) \quad (3.13)$$

Denklemden görüldüğü üzere nem difüzyonu nem ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Denklem (3.13) de difüzyon katsayısı (n=1 için) logaritmik formda aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Darvishi ve ark., 2013; Sharma ve Prasad, 2004):

$$D_{eff} = \frac{-0,101 \ln(MR) - 0,0213}{\left(\frac{t}{L^2}\right)} \quad (3.14)$$

Crank (1975) ve Fish (1958), kurutma sırasında büzülmekte olan ürün için nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak etkili difüzyon katsayısını aşağıdaki denklem ile ifade etmişlerdir (Kumar et al., 2012).

$$\frac{D_{ref}}{D_{eff}} = \left(\frac{b_0}{b}\right)^2 \quad (3.15)$$

Kalınlık oranı;

$$b = b_0 \left[\frac{\rho_w + M_w \rho_s}{\rho_w + M_0 \rho_s} \right] \quad (3.16)$$

Diğer yandan sıcaklığa bağlı etkili difüzyon katsayısı Arrhenious eşitliği ifade edilmektedir [Onwude ve ark., 2016]:

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R_g T}} \quad (3.17)$$

3.3.2.2 Isı Transferinin modellenmesi

Isı transferinin modellenmesi, sistemin enerji dengesi düzenlenerek oluşturulmaktadır. Denklem (3.18)'de görüldüğü üzere kurutma ürünündeki sıcaklık artış oranı; güneş kolektöründen gelen faydalı ısı miktarı (Q), taşınım yoluyla kazanılan ya da kaybedilen ısı miktarı ve buharlaşmadan dolayı meydana gelen ısı miktarının toplamına eşittir (Atalay, 2015).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + h_T A (T_a - T) + Q \quad (3.18)$$

Bir çok araştırmacı, laminar ve türbülanslı akışlar için Nusselt ve Sherwood numaralarını kullanarak kurumaya giren ürünün ısı ve kütle transfer katsayısını hesapladı. Ortalama ısı transfer katsayısı (h_T), sırasıyla laminar ve türbülanslı akış için aşağıdaki denklemden (Mills 1995) hesaplanmaktadır (Kumar et al., 2012):

$$Nu = \frac{h_T L}{k} = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33} \quad (3.19)$$

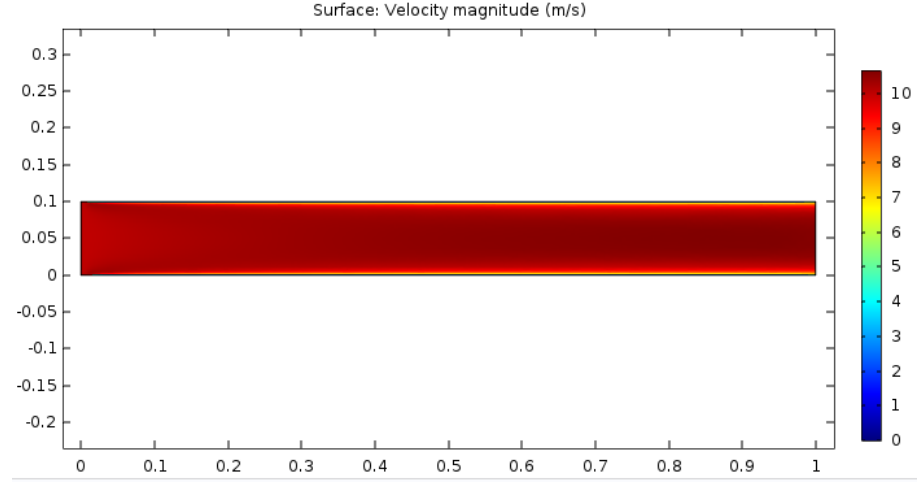
$$Nu = \frac{h_T L}{k} = 0,0296 Re^{0,5} Pr^{0,33} \quad (3.20)$$

Diğer yaklaşımlar ısı taşınım transfer katsayısını (h_T) doğal konveksiyon yoluyla ya da deneysel sonuçlardan elde etmektedir. Aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanabilmektedir [Honarvar ve Mowla, 2012; Isleroglu ve Kaymak- Ertekin, 2016; Pasban ve diğerleri., 2017]:

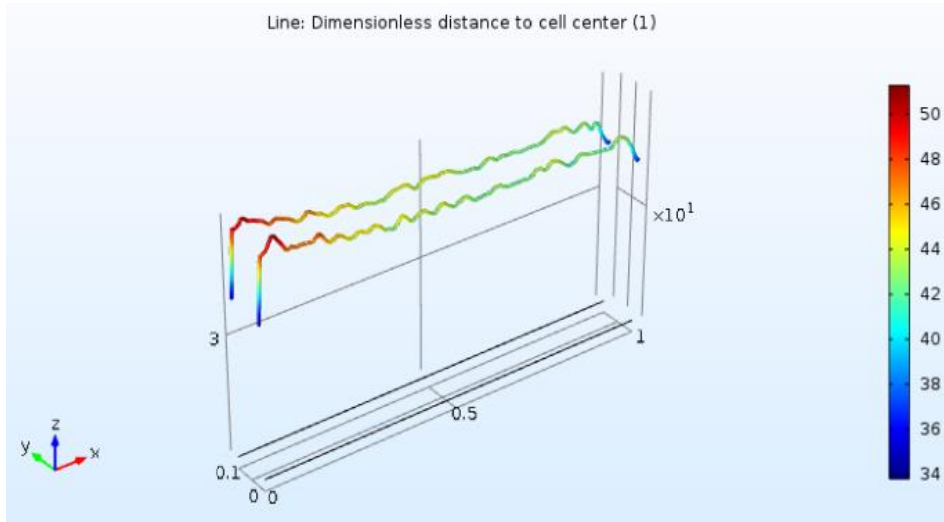
$$\frac{T_s - T_a}{T_0 - T_a} = \exp \left[- \left(\frac{h_T A_s}{\rho C_p V} \right) t \right] \quad (3.19)$$

3.4 Modelleme Çalışması

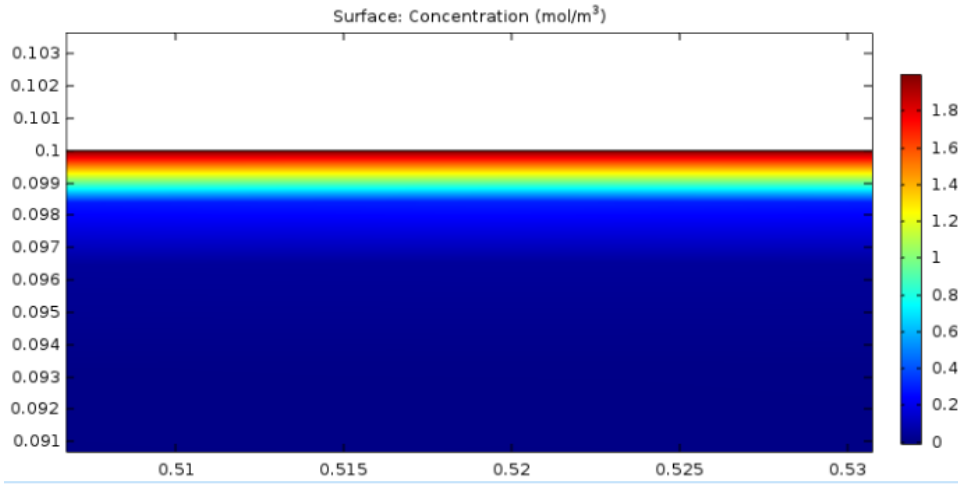
Bu modelleme çalışmada COMSOL Multiphysics 5.2 programı kullanılarak armut diliminin kurutulması esnasında meydana gelen sıcaklık ve nem değişimleri incelenmiştir. Bu modelde, kurutma maddesi, tek tip bir başlangıç sıcaklığında (T_0) ve nem içeriğinde (M_0) ince bir dikdörtgen plaka olarak kabul edilmiştir. Bu plaka üzerindeki kütle ve ısı transferi yukarıda verilen denklemlerden faydalanılarak COMSOL programıyla çözümlenmiştir. Geliştirilen bu modelleme çalışması deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve bu simülasyon çalışmasının deneysel verilerle uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Bu modelleme çalışmasında elde edilen veriler Şekil 3.4-3.5'te yer alan grafiklerde gösterilmiştir:



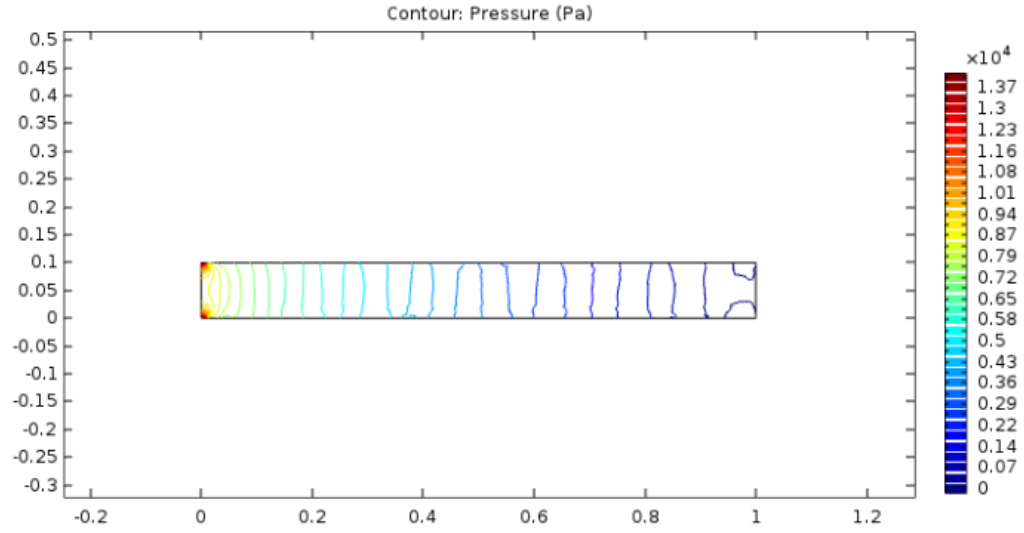
Şekil 3.4. Armut dilimdeki nemin (suyun) hız değerleri.



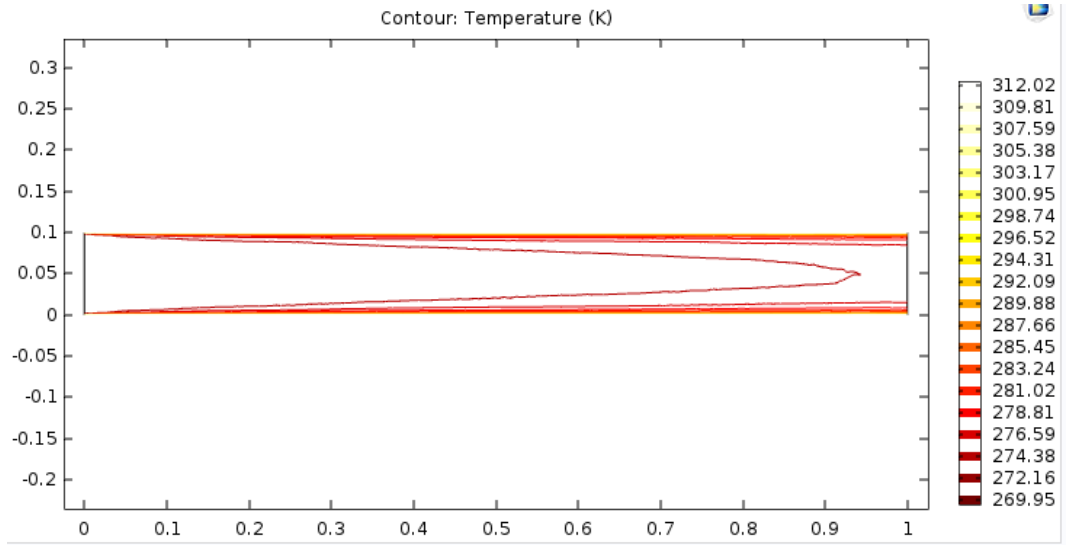
Şekil 3.5. Armut dilimindeki nemin (suyun) yüzey çözünürlüğü.



Şekil 3.6. Armut diliminin yüzeydeki nem konsantrasyonu (mol/m³).



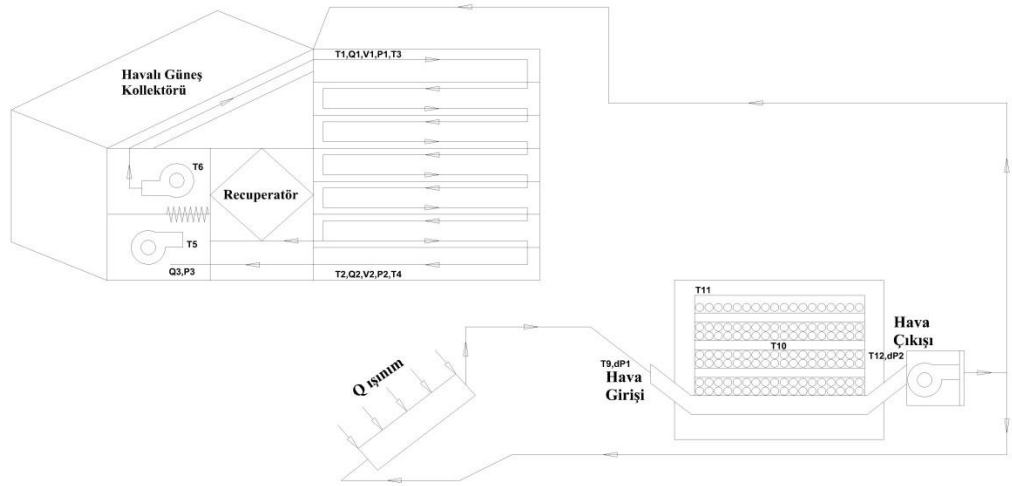
Şekil 3.7. Armut dilimindeki basınç değerleri.



Şekil 3.8. Armut diliminin izotermal kontür (sıcaklık) değerleri.

4. GÜNEŞ ENERJİLİ VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ ÜRÜN KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI

Bu çalışma kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen güneş enerjili ve enerji depolama sistemli ürün kurutma sistemine ait akış şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Üfleme fanı aracılığıyla güneş toplayıcısına gelen enerji kurutma kabinine girmekte ve üstten alta doğru dolaşarak kurutma kabini içerisindeki tepsilerde farklı kalınlıklarda yer alan armut dilimlerinin nemini ısı ile buharlaştırarak kurutma havasını oluşturmaktadır. Nem miktarı artan kurutma havasının gittikçe nem alma kabiliyetinde azalma görülmektedir. Nem miktarı artan kurutma havası emiş fanı aracılığıyla reküperatör (ısı değiştirici) ekipmanına gönderilerek, burada taze hava ile karıştırılmakta ve taze havanın ön ısıtma uygulanmaktadır. Böylece atık ısının yaklaşık %50-60 oranında geri kazanımı elde edilmektedir. Bunun dışında güneş ışığının olmadığı zamanlarda kurutma işleminin sürekliliğini sağlayan ısıl enerji depolama sistemi kurutma sisteminden bağımsız olarak çalışmakta olup Şekilde 4.1'de görüldüğü üzere enerji depolama sistemi bünyesinde tuttuğu enerjiyi kurutma kabinine aktarmaktadır. Isıl enerji depolama sistemi deney düzeneğinden bağımsız olup havalı güneş kolektörüne gelen enerjiyi ısıl enerji depolama sistemindeki FDM malzemesine (parafin) ileterek burada enerjinin depolanması sağlamaktadır. Ayrıca hassas terazi ile armut dilimi numunelerinin ağırlıkları 30 dakikada bir ölçülerek ağırlık değişimleri belirlenmiştir. Şekil 4.2'de güneş enerjisi destekli ısıl enerji depolama sistemli ürün kurutma sisteminin resmi görülmektedir.



Şekil 4.1. Güneş enerjili ve enerji depolama sistemli ürün kurutma sistemi.



Şekil 4.2. Güneş enerjisi destekli ısı depolama sistemli ürün kurutma sistemi resmi.

Deney düzeneği, güneş toplayıcı olarak havalı kolektör sistemi, ısı depolama sistemi (parafin), kurutma kabini, düzenek içindeki hava akışını sağlayan fan sistemi, düzenek içindeki atık ısının geri kazanımını sağlayan reküperatör (ısı değiştirici) ünitesi ve test ünitelerinden oluşmaktadır. Bu sistemler ile ilgili tasarım ve malzeme seçim kriterleri geliştirilen bilgisayar benzeşimlerinden yararlanılarak belirlenmiştir. Deney düzeneğinde yer alan bu

sistemlerle ilgili özellikleri her bir sistem için aşağıdaki gibi açıklamak mümkündür:

4.1 Havalı Kolektör Sistemi

Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynağı ve sınırlı enerji kaynaklarına dayanmayan bir teknolojidir. Güneş tarafından yayılan güneş radyasyonu, yılda yaklaşık 101.000 terawatt ile dünyaya çarpar. Bu, dünyanın yıllık talebinden yaklaşık 10.000 kat daha fazladır (Cho, 2010). Bununla birlikte, ekonomik, güvenli ve temiz bir enerji kaynağı olarak güneşin muazzam potansiyeli, radyasyonu toplanıp daha faydalı biçimlere dönüştürülmedikçe kullanılamaz. Bu güneş enerjisi dönüşümünü gerçekleştirmenin bir yolu, fotonları ısıya dönüştürmektir. Bu süreçte, yanıcı fosil yakıtlardan elde edilen ısının yerini alarak güneş radyasyonu doğrudan kullanılır. Güneş radyasyonu, bir fototermal işlem vasıtasıyla faydalı termal enerjiye dönüştürülür.

Araştırmacılar, güneş enerjisi sıcak su panelleri, güneş parabolik olukları ve güneş kuleleri veya güneş hava toplayıcıları (SAC) gibi temel tesisatlar gibi bu tür güneş enerjisi enerjisini dönüştürmek için farklı yollar geliştirdiler.

SAC'ler, binalara sıcak havayı aktif olarak iletmek için güneş radyasyonu kullanan bir tür güneş termal toplayıcıdır. Tipik olarak bir binanın güney yönüne sahip yüzeylerine yerleştirilen ve düşük maliyetli bir alan ısıtma aracı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. SAC'lerin ABD ve Kanada'da bina termal gereksinimlerinde başarılı bir şekilde uygulanan sistemlerdir (Shukla ve diğerleri, 2012).

Havalı güneş kolektörleri uzun ömürlü, korozyon ve donma gibi sorunlarla karşılaşılmayan ve ağırlıkça hafif olan basit cihazlardır. Güneş enerjili sıcak hava toplayıcıları güneşe bakan dikey duvarlara veya çatılara monte edilir. Kolektöre ulaşan güneş radyasyonu emici plakayı ısıtır. Kolektörden geçen hava emici plakadan ısıyı alır. Donma, aşırı ısınma ve sızıntılar, güneş hava toplayıcıları için sıvı toplayıcılara göre daha az zahmetlidir. Ancak sıvı daha iyi bir ısı iletkeni olduğu için, su veya ısı transfer sıvısı kullanan güneş kolektörleri, ev için sıcak su

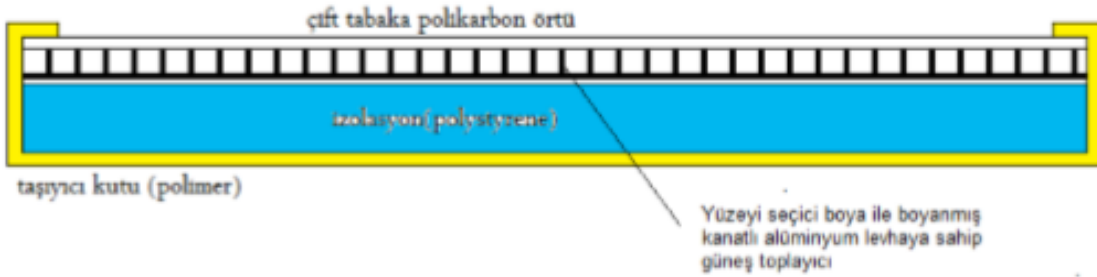
ısıtması için daha uygundur. Ayrıca binaların ısıtılmasında ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında rahatlıkla kullanılabilir. Bir güneş sıcak hava toplayıcı en çok hacim ısıtma için kullanılır. Sırlı ve sırsız iki tip hava toplayıcı vardır.

Güneş enerjili hava ısıtıcıları, sıvı tipi güneş kolektörlerine kıyasla düşük ısı kapasitesi ve havanın düşük termal iletkenliği nedeniyle termal verim bakımından doğal olarak düşüktür. Birçok araştırmacı, hava ve emici ortam arasında ısı transferi sağlayarak güneş enerjili hava ısıtıcılarının verimliliğini artırmaya çalışmıştır. Asıl sorun, emici ve hava arasındaki düşük ısı transfer katsayısı olup bu da termal verimliliği azaltmaktadır. Güneş kolektörlerinin tasarımının iyileştirilmesi sistemin daha iyi performans göstermesine yol açacaktır. Güneş kolektörlerinde çeşitli soğurucu plakalar ve cam sistemleri kullanılmıştır. Literatürde gözenekli (geçirgen) soğurucu ve gözeneksiz olan ve farklı cam türleri de mevcuttur. Gözeneksiz emicinin ana dezavantajı, hava ve emici plaka arasındaki konvektif ısı geçiş katsayısı oldukça düşük olduğundan emici ile hava arasında ısı transferi de düşüktür. Gözenekli tipte, güneş radyan ısını ve hava ile emici arasındaki ısı konveksiyonu kolektör emicisinden geçen havayı etkili bir şekilde güçlendirebilir. Bu da ısı transfer katsayısı ve termal verimliliğin kalitesini iyileştirir. Bu nedenle termal özellikler açısından gözenekli emici toplayıcı daha etkilidir.

Güneş enerjili hava ısıtıcısı, bir emici plaka, hava akımının geçişi için paralel plakalardan oluşan bir kısım, en üstte bir cam veya plastik örtü ve alt ve yan kısımlarından yatılılmış bir kasadan meydana gelmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi emici plaka ile hava akımı arasındaki ısı transfer katsayısının düşüktür. Bu da ısı kapasitenin düşük olmasını sağlamaktadır. Emici plaka ile hava arasındaki ısı transfer katsayısının iyileştirmek için emici plakaya kanakçıklar eklenmesi ya da dalgalı yutucu, katı dolgu malzemeli, delikli küre veya V şekli verilmiş yutucu plakalar kullanılması gibi birçok tasarımlar bulunmaktadır (Mohamad, 1997).

Bu tasarıma ilişkin havalı güneş kolektör kesit görünüş resim Şekil 4.3'te verilmiştir. Sistemin temel olarak iki ucu tamamen açık olan toplayıcıların ana gövdesi polikarbon malzemeden yapılmıştır. Güneş toplayıcısı izolasyon

(polystyrene), güneş toplayıcı levha ve iki katlı polikarbon ve güneş ışığını yutan tabakadan meydana gelmektedir. Bu çalışmada 2 adet kurutma sisteminde, Şekil 4.4’de görüldüğü gibi 3 adet de ısıl enerji depolama sisteminde olmak üzere toplamda 5 adet güneş toplayıcı sistem (havalı güneş kolektörü) kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Havalı güneş kolektörü kesit görünüş resmi (Atalay, 2015).



Şekil 4.4. Isıl enerji depolama sistemine entegre havalı güneş kolektörleri.

4.1.1 Havalı kolektör sistemi modellenmesi

Havalı kolektör sistemi modellenmesinde güneş kolektöründen aktarılan enerji miktarı hava akış oranında, kolektör alanına gelen güneş ışıyım değerine ve çevre koşullarına göre değişir. Kolektör çıkış sıcaklığı değişimi, sabit gelen güneş ışıyım değeri ve sabit çevre sıcaklığı şartları altında kolektör iç sıcaklığı değişimi

ile hesaplanabilir. Hava akış oranı ise Duffie ve Beckman (1991), ileri sürdüğü kollektörde yararlı enerji kazanımlı eşitlik 4.1 ile hesaplanabilir:

$$Q_u = A_c [IF_R(\tau\alpha) - F_R U_l (T_i - T_{amb})] \quad (4.1)$$

Yararlı enerji kazanımlı (Q_u) aşağıdaki eşitlik (4.2) ile de hesaplanabilmektedir:

$$Q_u = (\dot{m} c_p)_a (T_0 - T_i) \quad (4.2)$$

4.1 ve 4.2 denklemlerinden yararlanılarak hava akış oranı aşağıdaki eşitlik 4.3 ile hesaplanabilir:

$$m_a = \frac{A_c [IF_R(\tau\alpha) - F_R U_l (T_i - T_{amb})]}{c_{p_a} (T_0 - T_i)} \quad (4.3)$$

Burada T_i kolektör içindeki giriş hava sıcaklığı olup ısıtıl enerji depolama sistem kabin ortalama sıcaklığı (T_{bi}) ile eş değerde olduğu varsayılabilir. Kollektördeki havanın çıkış sıcaklığı T_0 değeri ise ısıtıl enerji depolama sistem kabin içindeki havanın sıcaklığına (T_{ai}) eşit olarak alınabilir.

Havalı güneş kollektörün anlık ısıtıl verimi aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\dot{m} c_p (T_0 - T_i)}{L A_c} \quad (4.4)$$

Burada C_p havanın özgül ısısı ($=1005 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$), I kollektör yüzeyine gelen toplam güneş ışıınımı (W/m^2), A_c ise kollektör yüzey alanını göstermektedir. Kütleli debi $\dot{m} = \rho V A_c$ ile hesaplanır. Burada ρ nemli havanın yoğunluğu olup giriş ve çıkış havasının ortalama sıcaklığı ve bağıl neminden tablodan alınmıştır (Tamer, 1990). V hava akış hızı, A_c ise havanın kollektör çıkış kesit alanıdır.

4.2 Kurutma Kabini Sistemi

Bu çalışma kapsamında geliştirilen deney düzeneğinde armut kurutulması işlemi gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, kurutma kabinine tepsilere farklı kalınlıklarda armutlar kesilerek dilimler halinde tepsilere yerleştirilmiştir. Kurutma kabini için ısı yalıtımlı polimer malzeme kullanılmıştır. Güneşi toplayacak olan seçici boya ile boyanmış metal (alüminyum) hariç tüm sistem ısı yalıtımlı polimer malzemeden oluşmaktadır. Kabin malzemesi olarak ısı yalıtımından dolayı izoboard çerçeve malzemesi ise alüminyum tercih edilmiştir. Küçük boyutlardaki kabin tipi kurutucularda hiçbir boru bağlantısı olmadığı için tüm akış birbirinden ayrılmış odacıklar halinde kurutma kabininin içinde oluşmaktadır. Kurutma kabininde seri bir akış mekanizması mevcuttur ve Şekil 4.5’de görüldüğü üzere kabin içinde hareketli kurutma çekmeceleri bulunmaktadır. Çekmecelere ulaşım kabin arkasında bulunan kapak tarafından yapılmaktadır. Kurutma kabininin resmi de Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.5. Kurutma kabini içi kurutma çekmeceleri.



Şekil 4.6. Kurutma kabini resmi.

4.3 Atık Isı Geri Kazanım Sistemi (Rekuperatör Ünitesi)

Bu çalışmada kurutma kabini içerisinde yer alan rekuperatör ünitesi atık ısının yaklaşık %50-60 oranında geri kazanılmasını sağlayan çapraz akışlı bir ısı değiştiricidir. Çapraz akışlı ısı değiştiricileri birbirine paralel levhalardan oluşur ve bir levhadan sıcak akışkan akarken bir sonraki levhadan soğuk akışkan çapraz olarak akar. Bu yapı birçok levha halinde tekrarlanır. Isı alışverişi herhangi bir aracı akışkan kullanmadan egzoz havasından taze havaya doğrudan sağlanır. Isı değiştirici plakalarının ısı iletim katsayısı yüksek malzemeden imal edilmiş olmaları tercih edilir. Plakaların bir yüzeyinden egzoz havası geçerken diğer yüzeyden taze hava geçirilir ve ısı alışverişi bu şekilde sağlanır (Çimen, 2005). Bu modelleme çalışmasında da soğuk akışkan olarak tüm analizlerde hava alınmıştır. Sıcak akışkan olarak ise hava ve yanma gazları (baca ısı geri kazanımı) alınarak ısı değiştiricinin performansı irdelenmiştir. Yanma gazlarının ve havanın termodinamik ve termofiziksel özellikleri (viskozite, ısı iletkenlik katsayısı vb.) hal denklemleri ve eğri uydurulmuş veriler kullanılarak hesaplanmıştır.

4.3.1 Recüperatör ünitesinin ısı analizi

Recüperatör ünitesinde hava akımları aynı plakanın ön ve arka yüzeylerine temas ederek yüksek iletkenliğe sahip alüminyum plaka üzerinden enerji alışverişinde bulunurlar. Şekil 4.7’de bu hava akış yönleri görülmektedir. Termodinamik kanunlarına göre ısı sıcaktan soğuğa doğru akış eğilimi gösterir. Recüperatör ünitesi boyunca ısı akışı, dönüş havasından taze havaya doğru düzenlenmiştir. Dönüş havasının ısıtmaya veya soğutmaya çalıştığı plaka yüzeyinde yayılmaya çalışan ısı, diğer yüzünde akan taze hava tarafından alınır. Isı akışı eş zamanlıdır. Plakalı ısı değiştiriciler ısıyı bünyesinde hapsedip depolamaz. Fiziksel yapıları ve çalışma şekilleri buna uygun değildir. (İmmak, 2013).



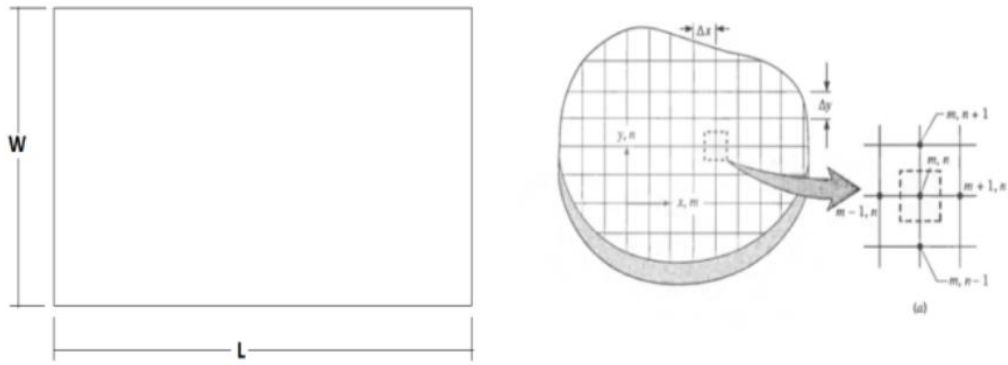
Şekil 4.7. Plakalar arası sıcak ve soğuk hava akış yönleri.

Reküperatör ünitesinin plaka yüzeylerinde farklı sıcaklıklarda bölgelerin oluşmasında plaka yüzeyleri boyunca iki hava akımının farklı sıcaklıklara sahip olmasıdır. Bu sıcaklık dağılımı Şekil 4.6’da sıcak akışkan kırmızı, soğuk akışkan mavi tonda gösterilmiştir. En soğuk köşe; soğuk hava akımına en yakın, sıcak hava akımına en uzak olan köşedir. En sıcak köşe ise, sıcak hava akımına en yakın, soğuk hava akımına en uzak köşedir. Çapraz akışlı reküperatörlerde bu iki köşe zıt köşelerde yer alır. Diğer iki köşe ise nerede ise eşit sıcaklıklarda ve en soğuk ile en sıcak köşenin ortalama sıcaklığına sahip olurlar.

Bu tasarımda da yukarıda da ifade edildiği gibi, ünite içi konfigürasyonda reküperatör, en soğuk köşesi aşağıya gelecek şekilde montajlanmıştır. Aksi halde

ılık hava akımı, içinden ayrılan su buharını su olarak yukarı taşımaya çalışacak ve beklenmeyen basınç düşümlerinin yaşanmasına sebep olacaktır. Yatay plakalı reküperatör uygulamalarında, suyun plaka yüzeyinde birikmeden akabilmesi için reküperatör, ünite içine plakalarının yatay ile $4-7^\circ$ açı yapacak şekilde yerleştirilmesi önerilir.

Recüperatör ünitesinin sayısal olarak sıcaklık dağılımının bulunması, Şekil 4.8'de de gösterildiği gibi her düğüm noktasında sıcaklık için denge bağıntılarının belirlenmesi mümkündür. Bu bağıntıların çözümü sağlamak için reküperatör (ısı değiştirici) plakaları yüzeyinden geçen ısı transfer miktarının hesaplanması gerekmektedir.



Şekil 4.8. Reküperatör plaka kesitinde sonlu fark gösterimi [35].

Temel ısı transfer bağıntısını yazıldığında;

$$Q_{m,n} = U_{m,n} \Delta A_{m,n} (T_{h\,m,n} - T_{c\,m,n}) \quad (4.2)$$

Her bir plaka yüzeyinden geçen ısı miktarı ise;

$$dQ_{m,n} = U_{m,n} dA_{m,n} (T_{h\,m,n} - T_{c\,m,n}) \quad (4.3)$$

bağıntısı ile verilmektedir.

Bu denklemlerde plakaların x yönünde m eleman sayısına, y yönünde ise n eleman sayısına sahip olduğu ve problemin çözüm kolaylığı açısından $\Delta x = \Delta y$ olduğu kabul edilmiştir.

$$x = m\Delta x \quad (4.4. a)$$

$$y = n\Delta x \quad (4.4. b)$$

Bu çalışmada sınır şartlarını;

$$T_{h\ m,n} = T_{y0} = \text{Sabit} \quad (4.5. a)$$

$$T_{c\ m,n} = T_{x0} = \text{Sabit} \quad (4.5. b)$$

Isı değiştiricide hem sıcak gaz hem de soğuk gazın giriş sıcaklıklarının, gazların toplam debilerinin veya ısı değiştiricisine giriş hızlarının da biliniyor olması ve sabit olması gerekmektedir. Isı değiştiricinin toplam levha sayısı ve levhalar arası mesafenin, Δz , de tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada akış alanı olarak sadece Δz mesafesinin yarısı göz önüne alınacak ve sınır değeri olarak adyabatik sınır değeri olarak varsayılmıştır. Ayrıca bu yaklaşım sıcaklık profilinin z doğrultusunda değişmediğini varsaymaktadır. Kanallardaki gazın kütleli debisi:

$$\Delta m_{h\ m,n} = \frac{1}{2} \frac{m_h}{L} \quad (4.6)$$

$$\Delta m_{c\ m,n} = \frac{1}{2} \frac{m_c}{L} \quad (4.7)$$

Soğuk ve sıcak akışkan tarafındaki levha eşittir. Bu tarz ısı değiştiricileri uygulamalarında sıcak akışkan ve soğuk akışkan taraflarının boyu da birbirine eşit olmaktadır. Fakat bu durumun bu şekilde olması da zorunlu değildir. Bu çalışmada da boyların eşit olduğu varsayılmamıştır. Geliştirilen bu modelde hız profilinin dolayısıyla yerel kütleli debilerin de sabit olması gerekmemektedir. Eğer değişken hız profili mevcutsa hız profili ve kütleli debi arasındaki ilişki:

$$\Delta m_{h\,m,n} = \rho_h(T_{h\,m,n}) \frac{\Delta z}{2} \Delta x V_{h\,m,n} \quad (4.8)$$

$$\Delta m_{c\,m,n} = \rho_c(T_{c\,m,n}) \frac{\Delta z}{2} \Delta x V_{c\,m,n} \quad (4.9)$$

Bu ısı değiştiricide iki taraftaki akış için dikdörtgen profil ısı transferi denklemleri kullanılabilir. Dikdörtgen kanal içindeki sıvı akışı için ısı transferi akış rejimine göre değişir. Akış rejimini bulmak için önce Reynold sayısı bilinmelidir. Reynold sayısı eşitlik 4.10 ile hesaplanır:

$$Re_D = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (4.10)$$

Bu denklemde hidrolik çap değeri D_H aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir:

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (4.11)$$

Bu bağıntıda; A plaka üzerindeki her bir parçanın yüzey alanı P ise plaka üzerindeki her bir parçanın çevresel uzunluğudur.

Laminer akış şartlarında ($Re_D < 2100$):

$$x = \frac{\Delta z}{W} \quad (4.12)$$

$$Nu_D = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 + a_6 x^6 \quad (4.13)$$

Tablo 4.1. Eşitlik 4.13 için ai katsayıları

a_0	0,754000000000580E+01
a_1	-0,193789080028494E+02
a_2	0,333861212302836E+02
a_3	-0,170496495070800E+02
a_4	-0,304226226912837E+02
a_5	0,495297442580787E+02
a_6	-0,206246852871550E+02

Geçiş bölgesinde ($2100 < Re < 3300$) ise Abraham, Sparrow Tong denklemini kullanabiliriz.

$$Nu_D = 2,2407 \left(\frac{Re_D}{1000} \right)^4 - 29,499 \left(\frac{Re_D}{1000} \right)^3 + 142,32 \left(\frac{Re_D}{1000} \right)^2 - 292,51 \left(\frac{Re_D}{1000} \right) + 219,88 \quad (4.14)$$

Türbülanslı bölgede ($Re > 3300$) Gnielinski denklemini kullanılabilir:

$$Nu_D = \frac{hD_H}{k} = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.15)$$

Bu çalışmada sürtünme faktörünün hesaplanması için "Serghides Bağıntısı" kullanılmıştır. Serghides (1984) denklemi, Colebrook-White denkleminin bir yaklaşımıdır. Reynolds sayılarının tüm aralıkları için geçerlidir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = A - \left[\frac{(B - A)^2}{C - 2B + A} \right] \quad (4.16)$$

Burada;

$$A = -2 \log_{10} \left[\left(\frac{(\varepsilon/D)}{3,7} + \frac{12}{Re} \right) \right] \quad (4.17)$$

$$B = -2 \log_{10} \left[\left(\frac{(\varepsilon/D)}{3,7} \right) + \frac{2,51A}{Re} \right] \quad (4.18)$$

$$C = -2 \log_{10} \left[\left(\frac{(\varepsilon/D)}{3,7} \right) + \frac{2,51B}{Re} \right] \quad (4.19)$$

Geliştirilen bu modelde sıcak akışkan ve soğuk akışkan aynı dikdörtgen kanaldan aktığı için toplam ısı transfer katsayısını hesaplamada aşağıdaki bağıntıdan yararlanılabilir.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{s}{k_t} + R_h + R_c \quad (4.20)$$

Rekuperatör ünitesinin ısı transferi katsayılarının hesaplanması için havanın termodinamik ve termofiziksel özelliklerini de bilmemiz gerekir. Havanın ısı iletim katsayısı, vizkozitesi gibi özellikleri eğri uydurma formüllerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada da eğri uydurmalarda en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile kuru havanın 5°C-100°C arasındaki termofiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak denklemleri elde edilmiştir. Tablo 4.1'de kuru havanın 5°C-100°C arasındaki termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Kuru havanın 5°C-100°C arasındaki termodinamik özellikleri

T °C	T K	Yoğunluk kg/m ³	Özgül Isı cp J/kg.K	Isı İletim Katsayısı k W/m.K	Dinamik Viskozite μ kg/m.s	Pr
5	278,15	1,269	1006	0,02401	1,7540E-05	0,735
10	283,15	1,246	1006	0,02439	1,7780E-05	0,7336
15	288,15	1,225	1007	0,02476	1,8020E-05	0,7323
20	293,15	1,204	1007	0,02514	1,8250E-05	0,7309
25	298,15	1,184	1007	0,02551	1,8490E-05	0,7296
30	303,15	1,164	1007	0,02588	1,8720E-05	0,7282
35	308,15	1,145	1007	0,02625	1,8950E-05	0,7268
40	313,15	1,127	1007	0,02662	1,9180E-05	0,7255
45	318,15	1,109	1007	0,02699	1,9410E-05	0,7241
50	323,15	1,092	1007	0,02735	1,9630E-05	0,7228
60	333,15	1,059	1007	0,02808	2,0080E-05	0,7202
70	343,15	1,028	1007	0,02881	2,0520E-05	0,7177
80	353,15	0,9994	1008	0,02953	2,0960E-05	0,7154
90	363,15	0,9718	1008	0,03024	2,1390E-05	0,7132
100	373,15	0,9458	1009	0,03095	2,1810E-05	0,7111

Havanın termodinamik denklemlerini oluştururken havanın ideal gaz olduğu kabul edilir. Burada hava özgül ısı değerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak değiştiği ancak basınç veya yoğunluğun fonksiyonu olarak değişmediği varsayılmıştır.

Kuru hava için özgül ısı denklemi:

$$C_{pi}(T) = 1030,5 - 0,19975T + 3,9734 \cdot 10^{-4}T^2 \quad (4.21)$$

Viskozite;

$$\mu(T) = 2,7 \cdot 10^{-9}T^3 - 5,7104 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,0073489T + 0,094425 \quad (4.22)$$

Isı iletim katsayısı;

$$k(T) = -9.0288 \cdot 10^{-12}T^3 - 1,585 \cdot 10^{-8}T^2 + 8,6247 \cdot 10^{-5}T + 0,0014539 \quad (4.23)$$

Yoğunluk;

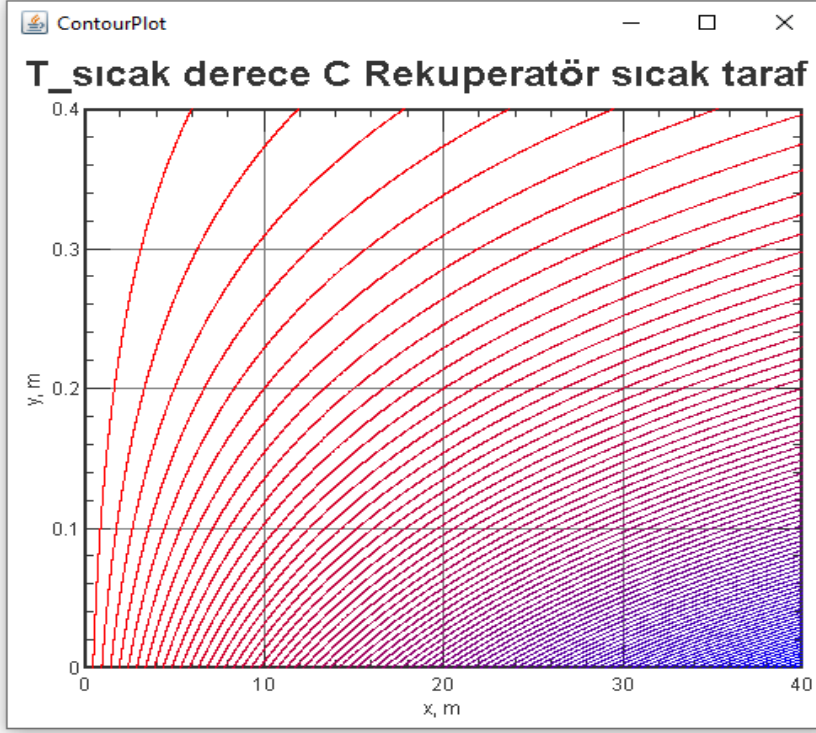
$$\rho = -2,9543 \times 10^{-8}T^3 + 3,9415 \times 10^{-5}T^2 - 0,019602T + 4,3067 \quad (4.24)$$

Prandtl Sayısı;

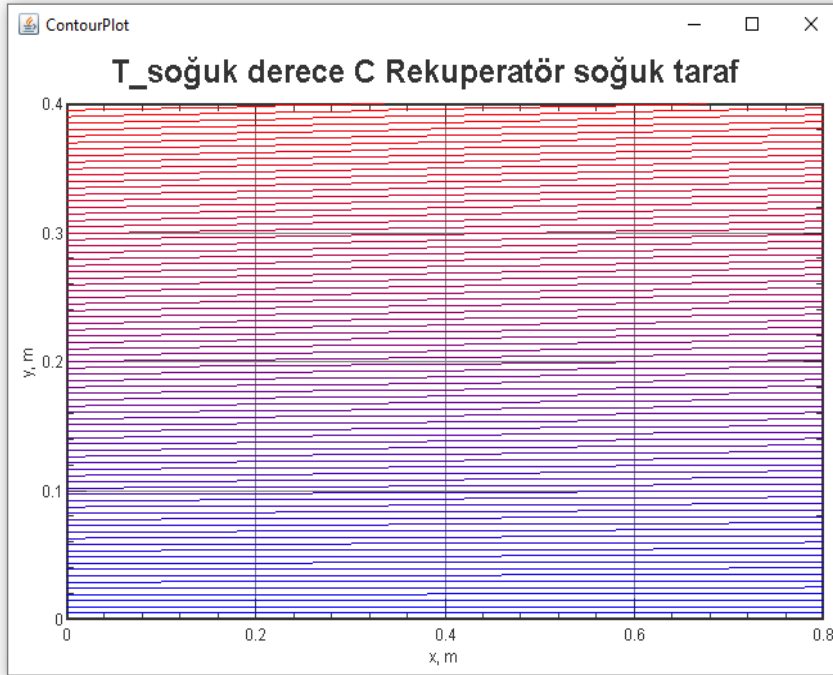
$$Pr = 4,4484 \cdot 10^{-9}T^3 - 3,9408 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,0008903T + 0,69647 \quad (4.25)$$

Yukarıdaki denklemlerde sıcaklık Kelvin olarak baz alınmıştır ve çeşitli sıcaklık aralıkları için farklı katsayılar tanımlamak mümkündür. Bu katsayılar gerçek tablo değerlerinden eğri uydurma yöntemleri yardımıyla elde edilmiştir.

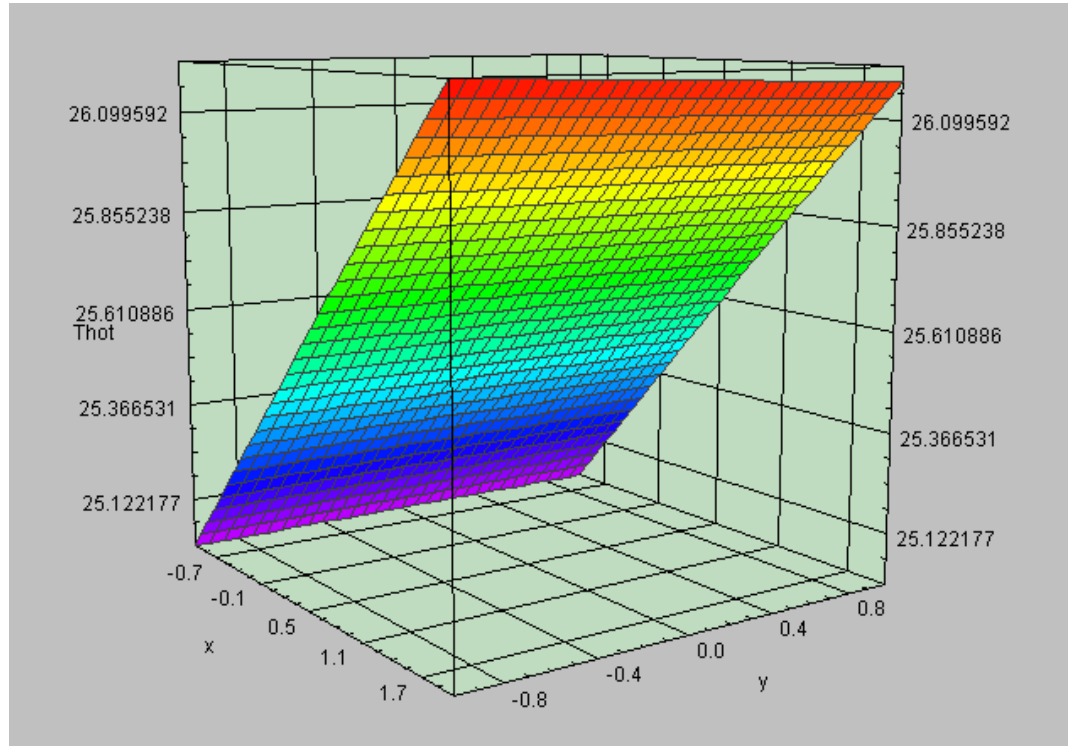
Programın sonuçları irdelendiğinde çapraz akışlı ısı değiştirici için java programlama dilinde program oluşturulmuştur. Gazların termodinamik ve termodinamik özellikleri için Gas.java, gaz karışımlarının termodinamik özellikleri için Gmix.java, hava- hava çapraz akışlı ısı değiştiricisi için recuperator1test.java programı hazırlanarak önceki bölümde verilen denklemlerin çözülmesi sağlanmıştır. Temel olarak bir hava-hava ısı değiştiriciyi modellemek için veri olarak $m_{\text{sıcak, gaz}} = 0,635 \text{ kg/s}$ ve $m_{\text{soğuk, gaz}} = 0,54 \text{ kg/s}$, levha boyutu $= 0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$, kanal yüksekliği $= 2,25 \text{ mm}$, levha sayısı $= 140$ olarak ve soğuk hava giriş sıcaklığı 25°C ve sıcak hava giriş sıcaklığı için 50°C alındığında bu durumda oluşabilecek program çıktıları Şekil 4.9 – 4.14'de verilmektedir.



Şekil 4.9. Çapraz akışlı ısı değiştirici sonlu farklar yöntemiyle sıcaklık profili kontur grafiği (sıcak taraf).



Şekil 4.10. Çapraz akışlı ısı değiştirici sonlu farklar yöntemiyle sıcaklık profili kontur grafiği (soğuk taraf).



Şekil 4.11. Çapraz akışlı ısı değiştirici sıcak havanın sıcaklık profili grafiği.

data output(veri çıktısı):

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
25.0312...	25.0312...	25.0311...	25.0311...	25.0310...	25.0310...	25.0309...	25.0309...	25.0308...	25.0308...	25.0307...	25.0307...	25.0307...	25.0306...	25.0306...	25.0305...	25.0305...	25.0304...	25.0304...	25.0303...	25.0303...
25.0625...	25.0624...	25.0623...	25.0622...	25.0621...	25.0620...	25.0619...	25.0618...	25.0617...	25.0616...	25.0615...	25.0614...	25.0613...	25.0612...	25.0611...	25.0610...	25.0610...	25.0609...	25.0608...	25.0607...	25.0606...
25.0936...	25.0935...	25.0934...	25.0932...	25.0931...	25.0929...	25.0928...	25.0927...	25.0925...	25.0924...	25.0922...	25.0921...	25.0920...	25.0918...	25.0917...	25.0915...	25.0914...	25.0913...	25.0911...	25.0910...	25.0908...
25.1248...	25.1246...	25.1244...	25.1242...	25.1240...	25.1239...	25.1237...	25.1235...	25.1233...	25.1231...	25.1229...	25.1227...	25.1226...	25.1224...	25.1222...	25.1220...	25.1218...	25.1216...	25.1214...	25.1213...	25.1211...
25.1559...	25.1557...	25.1554...	25.1552...	25.1550...	25.1547...	25.1545...	25.1543...	25.1540...	25.1538...	25.1536...	25.1533...	25.1531...	25.1529...	25.1527...	25.1524...	25.1522...	25.1520...	25.1517...	25.1515...	25.1513...
25.1870...	25.1867...	25.1864...	25.1862...	25.1859...	25.1856...	25.1853...	25.1850...	25.1848...	25.1845...	25.1842...	25.1839...	25.1836...	25.1834...	25.1831...	25.1828...	25.1825...	25.1823...	25.1820...	25.1817...	25.1814...
25.2180...	25.2177...	25.2174...	25.2171...	25.2167...	25.2164...	25.2161...	25.2158...	25.2154...	25.2151...	25.2148...	25.2145...	25.2141...	25.2138...	25.2135...	25.2132...	25.2128...	25.2125...	25.2122...	25.2119...	25.2116...
25.2491...	25.2487...	25.2483...	25.2479...	25.2476...	25.2472...	25.2468...	25.2464...	25.2461...	25.2457...	25.2453...	25.2450...	25.2446...	25.2442...	25.2438...	25.2435...	25.2431...	25.2427...	25.2424...	25.2420...	25.2416...
25.2800...	25.2796...	25.2792...	25.2788...	25.2783...	25.2779...	25.2775...	25.2771...	25.2767...	25.2762...	25.2758...	25.2754...	25.2750...	25.2746...	25.2742...	25.2738...	25.2733...	25.2729...	25.2725...	25.2721...	25.2717...
25.3110...	25.3105...	25.3100...	25.3095...	25.3091...	25.3086...	25.3082...	25.3077...	25.3072...	25.3068...	25.3063...	25.3058...	25.3054...	25.3049...	25.3045...	25.3040...	25.3035...	25.3031...	25.3026...	25.3022...	25.3017...
25.3418...	25.3413...	25.3408...	25.3403...	25.3398...	25.3393...	25.3388...	25.3383...	25.3378...	25.3372...	25.3367...	25.3362...	25.3357...	25.3352...	25.3347...	25.3342...	25.3337...	25.3332...	25.3327...	25.3322...	25.3317...
25.3727...	25.3721...	25.3716...	25.3710...	25.3705...	25.3699...	25.3694...	25.3688...	25.3682...	25.3677...	25.3671...	25.3666...	25.3660...	25.3655...	25.3649...	25.3644...	25.3638...	25.3633...	25.3627...	25.3622...	25.3617...
25.4035...	25.4029...	25.4023...	25.4017...	25.4011...	25.4005...	25.3999...	25.3993...	25.3987...	25.3981...	25.3975...	25.3969...	25.3963...	25.3957...	25.3951...	25.3945...	25.3939...	25.3933...	25.3927...	25.3922...	25.3916...
25.4343...	25.4337...	25.4330...	25.4323...	25.4317...	25.4311...	25.4304...	25.4298...	25.4291...	25.4285...	25.4278...	25.4272...	25.4265...	25.4259...	25.4253...	25.4246...	25.4240...	25.4233...	25.4227...	25.4221...	25.4214...
25.4650...	25.4644...	25.4637...	25.4630...	25.4623...	25.4616...	25.4609...	25.4602...	25.4595...	25.4588...	25.4581...	25.4574...	25.4567...	25.4561...	25.4554...	25.4547...	25.4540...	25.4533...	25.4526...	25.4520...	25.4513...
25.4958...	25.4950...	25.4943...	25.4935...	25.4928...	25.4920...	25.4913...	25.4906...	25.4898...	25.4891...	25.4884...	25.4876...	25.4869...	25.4862...	25.4854...	25.4847...	25.4840...	25.4833...	25.4825...	25.4818...	25.4811...
25.5264...	25.5256...	25.5249...	25.5241...	25.5233...	25.5225...	25.5217...	25.5209...	25.5201...	25.5194...	25.5186...	25.5178...	25.5170...	25.5163...	25.5155...	25.5147...	25.5139...	25.5132...	25.5124...	25.5116...	25.5108...
25.5571...	25.5562...	25.5554...	25.5546...	25.5537...	25.5529...	25.5521...	25.5512...	25.5504...	25.5496...	25.5488...	25.5479...	25.5471...	25.5463...	25.5455...	25.5447...	25.5439...	25.5430...	25.5422...	25.5414...	25.5406...
25.5877...	25.5868...	25.5859...	25.5850...	25.5841...	25.5833...	25.5824...	25.5815...	25.5807...	25.5798...	25.5789...	25.5780...	25.5772...	25.5763...	25.5755...	25.5746...	25.5737...	25.5729...	25.5720...	25.5712...	25.5703...
25.6182...	25.6173...	25.6164...	25.6154...	25.6145...	25.6136...	25.6127...	25.6118...	25.6109...	25.6099...	25.6090...	25.6081...	25.6072...	25.6063...	25.6054...	25.6045...	25.6036...	25.6027...	25.6018...	25.6009...	25.6000...
25.6487...	25.6478...	25.6468...	25.6458...	25.6449...	25.6439...	25.6429...	25.6420...	25.6410...	25.6401...	25.6391...	25.6381...	25.6372...	25.6362...	25.6353...	25.6343...	25.6334...	25.6324...	25.6315...	25.6306...	25.6296...
25.6792...	25.6782...	25.6772...	25.6762...	25.6752...	25.6742...	25.6732...	25.6721...	25.6711...	25.6701...	25.6691...	25.6681...	25.6671...	25.6661...	25.6651...	25.6642...	25.6632...	25.6622...	25.6612...	25.6602...	25.6592...
25.7097...	25.7086...	25.7076...	25.7065...	25.7054...	25.7044...	25.7033...	25.7023...	25.7012...	25.7002...	25.6991...	25.6981...	25.6971...	25.6960...	25.6950...	25.6939...	25.6929...	25.6919...	25.6908...	25.6898...	25.6888...
25.7401...	25.7390...	25.7379...	25.7368...	25.7357...	25.7346...	25.7335...	25.7324...	25.7313...	25.7302...	25.7291...	25.7280...	25.7269...	25.7259...	25.7248...	25.7237...	25.7226...	25.7215...	25.7205...	25.7194...	25.7183...
25.7705...	25.7693...	25.7682...	25.7670...	25.7659...	25.7647...	25.7636...	25.7625...	25.7613...	25.7602...	25.7590...	25.7579...	25.7568...	25.7557...	25.7545...	25.7534...	25.7523...	25.7512...	25.7500...	25.7489...	25.7478...
25.8008...	25.7996...	25.7984...	25.7972...	25.7960...	25.7948...	25.7937...	25.7925...	25.7913...	25.7901...	25.7889...	25.7878...	25.7866...	25.7854...	25.7842...	25.7831...	25.7819...	25.7807...	25.7796...	25.7784...	25.7773...
25.8311...	25.8299...	25.8286...	25.8274...	25.8262...	25.8249...	25.8237...	25.8225...	25.8212...	25.8200...	25.8188...	25.8176...	25.8164...	25.8151...	25.8139...	25.8127...	25.8115...	25.8103...	25.8091...	25.8079...	25.8067...
25.8614...	25.8601...	25.8588...	25.8575...	25.8563...	25.8550...	25.8537...	25.8524...	25.8512...	25.8499...	25.8486...	25.8474...	25.8461...	25.8448...	25.8436...	25.8423...	25.8411...	25.8398...	25.8386...	25.8373...	25.8361...

Şekil 4.12. Çapraz akışlı ısı değiştirici soğuk hava profile.


```

----- Capture Output -----
> "D:\java\bin\javaw.exe" recuperator1test
n_x=41n_y=21L=0.8W=0.4
Thotout=26.20386881334515
Tcoldout=49.29280334848561
Q=7874.184262484819 W
Thot inlet=50.0Thot exit=26.20386881334515
Tcold inlet=25.0Tcold exit=49.29280334848561

```

4.4 Isıl Enerji Depolama Sistemi

Faz değişim malzemeleri (FDM'ler), geniş kullanım potansiyeline sahip enerji depolama malzemeleridir. Yüksek enerji depolama kapasiteleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamalarında kullanılırlar. Parafin esaslı organik FDM'ler kimyasaltermal kararlılık, kolay ve ekonomik ulaşılabilirlik gibi avantajları nedeniyle en çok tercih edilen FDM türüdür. Ancak bu türün bilinen en önemli dezavantajı termal iletkenliklerinin düşük olmasından dolayı sistemlerin ısı şarj/deşarj hızını sınırlamaktadır. Düşük ısı iletkenlikleri doğrudan enerji depolamada verimli kullanımlarının önündeki en önemli engeldir (Temel and Erdiş, 2019).

Bununla birlikte parafin katı-sıvı geçişi sırasında sızıntıdan muzdariptir. Bu nedenle, parafinin etkin kapsüllenmesi ve termal iletkenlik artırılması ile ilgili çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Palet, petek gibi çeşitli formlarda FDM'ye farklı yüksek termal iletken katkı maddelerinin (karbon nano-katkı maddeleri ve metal nano-parçacıklar) eklenmesi gibi yaklaşımlarla PCM'nin termal iletkenliğini artırmak için önemli çabalar sarf edilmiştir. Şimdiye kadar, önceki araştırmaların çoğu FCM'nin termal iletkenlik artırılmasına odaklanmıştır (Qu et al., 2019).

Bu çalışmada güneş enerjisini depolamak için Şekil 4.15'de görüldüğü üzere saf parafin malzeme kullanılmıştır.



Şekil 4.15. Faz değıştiren malzeme (parafin).

Şekil 4.16 – 4.18'de parafin ısı enerji depolama sistemi ile ilgili görseller yer almaktadır. Bu çalışmada, şematik resimde de görüldüğü üzere havalı kolektörlerden elde edilen enerji parafin ısı enerji deposuna aktarılacaktır. Böylelikle kabin girişindeki hava sıcaklığı ile kolektör çıkışındaki hava sıcaklığı birbirine eşit sıcaklık değeri olacaktır. Kabin çıkışı da kolektöre bağlı olacağından ısı kayıplarını minimum düzeye indirebilmek koşuluyla havanın kabin çıkış sıcaklığı ile kolektöre giriş sıcaklığı birbirine eşit olacaktır. Ek olarak, parafin malzemeyi koruyabileceğimiz kabin izolasyonlu yapı sayesinde bulunduğu ortamda ısı kaybı söz konusu olmamaktadır.



Şekil 4.16. Parafin ısı enerji depolama sistemi kapalı hali.



Şekil 4.17. Parafin ısııl enerji depolama sistemi açık hali.



Şekil 4.18. Parafin ısııl enerji depolama sistemi resmi.

4.4.1 Parafin enerji depolama sisteminin modellenmesi

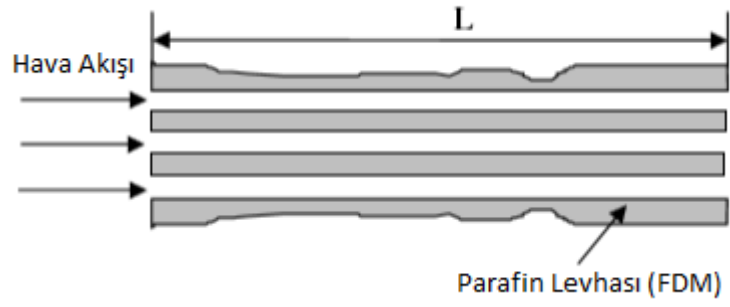
Faz değişim malzemeleri (FDM), faz değişimi işlemi sırasında büyük miktarlarda gizli ısıyı depolayarak ve serbest bırakarak termal enerjiyi depolamak ve sıcaklığı ayarlamak için aktif bir araştırma konusu haline gelmiştir. FDM'nin termal enerji depolama alanındaki uygulamaları, güneş enerjisi depolama, atık ısı geri kazanımı, binalardaki iklimlendirme sistemleri vb. gibi birçok alanda iyi bilinmektedir. Bu nedenle, mevcut FDM'yi iyileştirmek ve istenen termal özelliklere sahip yeni malzemeleri tanımlamak için kayda değer araştırma çalışmaları yapılmıştır. Parafin malzemesinin termo-fiziksel özellik değerleri Tablo 4.3'te verilmektedir.

Tablo 4.3. Parafinin termo-fiziksel özellikleri (Sarı ve Karaipekli, 2007)

Termo-fiziksel Özellikler	Saf Parafin
Katı-katı faz geçiş sıcaklığı (°C)	28,8
Erime sıcaklığı (°C)	41,6
Toplam gizli füzyon ısısı (kJ / kg)	194,6
Özgül ısı (kJ / kg C)	1,93 (s); 2,38 (I)
Yoğunluk (kg / m ³)	785
Isı iletkenliği (W / mK)	0,22

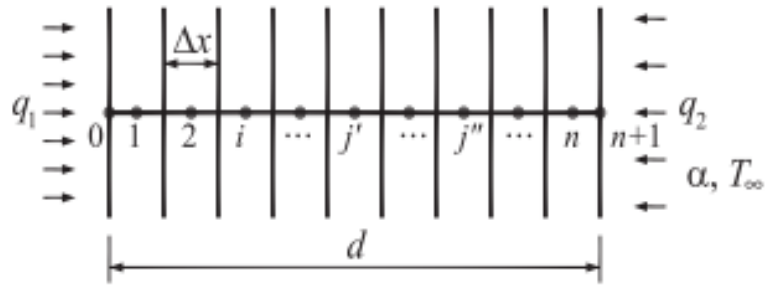
4.4.1.1 Matematiksel model

Bir parafinin ısı performansını belirleyebilmek için, literatürde birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Bu çalışmada Vakılaltojjar (2000) tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Modelde hem duyulur ısı hem de gizli ısı hesaplamalarında bulunulmuştur. Bu modelde duyulur ısı hava ile parafin malzeme arasındaki ısı transferini tanımlar (Bruno ve Saman, 2001). Isı transferinin sabit erime noktası sıcaklığında gerçekleştiği varsayılmıştır (Vakılaltojjar, 2000; Vakılaltojjar ve Saman, 2001).



Şekil 4.19. Isıl enerji depolama ünitesi akış şeması.

Parafin levhaları birbirine paralel bir çok katmandan oluşur ve bu katmanlar arasından hava akışı sağlanmaktadır. Matematiksel (analitik) modelde kullanılacak problem geometrisi Şekil 4.19’de verilmiştir. Bu çalışmada ve ısı transferi yatay olarak ele alınmıştır.



Şekil 4.20. Parafin malzemenin bir boyutlu ısı transfer modeli.

Parafin malzemenin (FDM) etkin termal iletkenliği k olarak belirtilir. Şekil 4.20’ye göre sağ ve sol taraf için sabit ısı akısı için aşağıdaki denklemler yazılır.

$$\frac{k(T_0 - T_1)}{\Delta x/2} = q_1 \quad (4.26a)$$

$$\frac{k(T_n - T_{n+1})}{\Delta x/2} = q_2 = h_{conv}(T_{n+1} - T_\infty) \quad (4.26b)$$

Modelin analitik çözümü için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- ✓ Parafin malzeme (FDM) içerisinde ısı üretimi yoktur.
- ✓ Katı ve sıvı fazdaki FDM'nin termofiziksel özellikleri sıcaklıkla değişmemektedir.
- ✓ Parafin mazleme içindeki ısı transferi olayında iletim etkindir.
- ✓ “y”ve“z” yönlerindeki sıcaklık değişimlerinin önemsiz olduğundan bir (tek) boyutlu çözüm yapılmıştır.

Erime veya donmayı içeren modelde faz değişimi için, enerjinin korunumu bir boyutlu entalpi cinsinden Denklem (4.27) ile tanımlanmaktadır (Voller, 1990):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(uH) = \nabla(k(\nabla T)) \quad (4.27)$$

Genelde faz değişimi geçiren malzemelerin faz değişimi esnasında termofiziksel özellikleri sabit kabul edilir. Öyle bir durumda Denklem (4.28) basitleştirilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k(\nabla T)) \quad (4.28)$$

Yukarıdaki denklemlerde, toplam hacimsel entalpi H faz değiştiren malzemenin hem duyulur hem de gizli ısılarının toplamıdır. Toplam hacimsel entalpi faz değiştiren malzemenin sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki denklem (4.29) gibidir.

$$H(T) = \int_{T_m}^T \rho c dT + \rho f_1(\lambda) \quad (4.29)$$

$$f_1 = \begin{cases} 1 & \text{eğer } T > T_m \\ 0 & \text{eğer } T < T_m \end{cases} \quad (4.30)$$

Denklem (4.29)'un $h(T) = \int_{T_m}^T \rho c dT$ tarafı duyulur ısıyı ifade etmektedir.

Denklem (4.29) başka bir ifadeyle yazılırsa;

$$H = h + \rho f_l \lambda \quad (4.31)$$

Malzemenin faz değişimlerine göre entalpi denklemleri aşağıda verilen denklemler ile ifade edilir.

$$H = \int_{T_m}^T \rho_s c_s dT \quad T < T_m \text{ (katı)} \quad (4.32a)$$

$$H = \rho_l f_l \lambda \quad T = T_m \text{ (erime)} \quad (4.32b)$$

$$H = \int_{T_m}^T \rho_l c_l dT + \rho_l \lambda \quad T > T_m \text{ (sıvı)} \quad (4.32c)$$

Denklem (4.32) çözülürse aşağıda verilen denklemler bulunur.

$$T = T_m + \frac{H}{\rho_s c_s} \quad H < 0 \text{ (katı)} \quad (4.33a)$$

$$T = T_m \quad 0 \leq H \leq \rho_l \lambda \text{ (ara yüzey)} \quad (4.33b)$$

$$T = T_m + \frac{H - \rho_l \lambda}{\rho_l c_l} \quad H > \rho_l \lambda \text{ (sıvı)} \quad (4.33c)$$

Denklem 4.31 ile 4.28 düzenlenirse zamana bağlı olarak volumetric duyulur entalpi aşağıdaki denklem (4.32) ifade edilir.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla h) - \rho \lambda \frac{\partial f_1}{\partial t} \quad (4.34)$$

Başlangıç Koşulları;

Parafin başlangıçta katıdır ve sıcaklığı belirli bir değerde kabul edilir. Parafin'in başlangıç sıcaklığı olan Tinit'in 20°C olduğu varsayılır. $T(x, y, 0) = T_{init}$ Denklem (4.35)'de görüldüğü üzere duyulur entalpi için katı ve sıvı olarak iki durum söz konusudur.

$$h_{init} = \begin{cases} \rho_s c_s (T_m - T_{init}) \\ \rho_l c_l (T_{init} - T_m) \end{cases} \quad (4.35)$$

Sınır Koşulları;

Bir nod için hava yoluyla x yönündeki ısı transfer miktarı ise aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$Q_{air} = m_{air}c_p\Delta T_{air} \quad (4.36)$$

Havanın kütleli debisi;

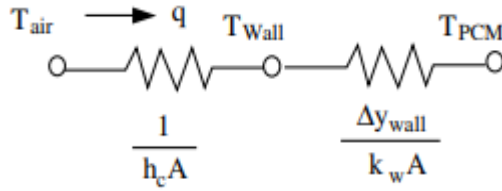
$$m_{air} = \rho_{air}V_{air}A_f$$

Şekil 4.21’de görüldüğü üzere hava tarafından Parafin duvarına taşınan ısı Q_{conv} Denklem (4.37) ile ifade edilir.

$$Q_{conv} = h_{conv}A(T_{air} - T_{wall}) \quad (4.37)$$

Parafinden yüzey noduna iletilen ısı, Parafin duvarına iletilen ısı Q_{cond} Denklem (4.38) ile ifade edilir. Isı transferi bağıntılarına göre $Q_{cond} = Q_{conv}$ olmalıdır.

$$Q_{cond} = k_wA \frac{(T_{wall} - T_{PCM})}{\Delta y_{wall}} \quad (4.38)$$



Şekil 4.21. Hava-duvar-Parafin arasındaki ısı transferinin termal devresi.

Yüzey nod sıcaklığı, T_{FDM} , levhadaki duyulur entalpi'yi belirlemede Denklem (4.39)'da görüldüğü üzere dikkate alınır.

$$\left. \begin{aligned} h_s &= \rho_s c_s (T_{FDM} - T_{MELT}) \\ h_s &= 0 \\ h_s &= \rho_l c_l (T_{FDM} - T_{MELT}) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} T_{FDM} &< T_{MELT} \\ T_{FDM} &= T_{MELT} \\ T_{FDM} &> T_{MELT} \end{aligned} \quad (4.39)$$

4.4.1.2 Isıl depolama sistemindeki ısı analiz sonuçları

Yukarıda verilen denklemlerden yararlanarak parafin malzemesi için Python programı kullanılarak modelleme çalışmasında bulunulmuştur. Parafinin duyulur ve gizli ısı transfer miktarını belirleyebilmemiz için $\rho_{solid}=880 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{liquid}=780 \text{ kg/m}^3$, $c_{psolid}=1,93 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, $c_{pliquid}=2,38 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, $k_{solid}= 0,514 \text{ W/mK}$, $k_{liquid}= 0,224 \text{ W/mK}$ gibi değerler çeşitli tablolardan alınarak okunmuştur. Termal difüzyon değeri $\alpha_{solid} = \frac{k_{solid}}{\rho_{solid} c_{psolid}} = \frac{0,514}{(880).(1,93)} = 3,026377767.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha_{liquid} = \frac{k_{liquid}}{\rho_{liquid} c_{pliquid}} = \frac{0,224}{(780).(2,38)} = 1,206636501.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır.

Faz değiştiren bir madde ile enerji depolanmasında T_1 sıcaklığından T_2 sıcaklığına ısıtılan madde T_{melt} sıcaklığında faz değiştiriyorsa ($T_1 < T_{melt} < T_2$) depolanan enerji miktarı Denklem (4.40) ile belirtilebilir.

$$Q_d = m[cp_{solid}(T_{melt} - T_1) + \varphi + cp_{liquid}(T_2 - T_{melt})] \quad (4.40)$$

Bu eşitlikte m maddenin kütlesini, cp_{solid} katı fazın ısı kapasitesini, cp_{liquid} sıvı fazın ısı kapasitesini ve φ ise faz değişimi sırasında depolanan gizli ısıyı ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında $T_1=T_{init}=20^\circ\text{C}$, $T_2=60^\circ\text{C}$ alınmıştır.

$$Q_d = 50[1,93(41,6 - 20) + 194,6 + 2,38(60 - 41,6)]$$

$$Q_d = 14004 \text{ kJ olarak hesaplanır.}$$

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY SONUÇLARI

Bu tez çalışmasında su içeriği yüksek tarım ürünlerinin kurutulması üzerine deneyler yapılmıştır. Bu kurutma işlemi nem alma prensibine dayalı güneş enerjisi destekli bir kurutucu sisteminde gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte kurutma işleminin sürekliliğini sağlamak amacıyla kurutma sisteminden bağımsız olarak çalışan ısı enerjisi depolama sistemi kullanılmıştır. Sistemin montajı Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nün arka bahçesine yapılmıştır. Montaj işlemleri tamamlandıktan sonra her iki sisteme yönelik deneysel çalışmalara başlanılmıştır. Bu çalışmanın önemli bir parçası da hem güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin hem de ısı enerjisi depolama sisteminin çalışma parametrelerinin incelenmesidir. Ayrıca ısı pompalı kurutma sisteminin de çalışma parametreleri incelenerek bu iki sistemin kurutma karakteristikleri irdelenmiştir.

Kurutma işleminin ilk aşaması; kurutucu tipinin ve kapasitesinin belirlenmesi için kurutulacak ürünün çeşidini ve miktarını belirlemektir. Bu çalışmada kurutulacak ürün olarak Pyrus Communis cinsi Santa Maria armudu (sarı ve yeşil armut) seçilmiştir. Armutlar yıkama, çekirdek kısmını temizleme ve dilimleme işlemleri sonrası kurutucu raflarına konularak kurutulmuştur. Armut dilimleri 3, 5 ve 10 mm kalınlıkta olacak şekilde manuel (elle) kesme aletleri kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Armutları dilimlemek için kullanılan kesme aletleri.

Armudun tanımına, sınıflandırma ve özelliklerine, numune alma ve muayeneleriyle piyasaya arz şekline dair bilgiler TS 3689 ISO 7702 standardında mevcuttur. Bu standartlarda (TS 3689) kurutulacak ürünün ilk ve son nem değeri, kurutma sonrasındaki renk ve biçim yönünden kriterler verilmektedir.

Deneylerde kurutma kabininin sadece 4 rafı kullanılmış olup 4-7 kg arasında değişen miktarlarda armut kurutulmuştur. 4-7 kg arasında değişen miktarlardaki armudun hazırlanma süreci uzun sürmediği için armutlarda herhangi bir kararma söz konusu olmamıştır. Kurutma işlemi için 4 adet tepsi kullanılmıştır. İlk deney çalışmalarında 3 mm kalınlığındaki armutların kurutulması işlemi gerçekleştirilmiştir. İlerleyen deneylerde ise farklı kalınlıklara sahip 5 mm-10 mm arasında değişen armut dilimleri kurutulmuştur. Kurutma deneyleri sırasında armut dilimlerinin kütle kaybı, kurutma sisteminin belirlenen noktalarından sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı ölçümü TESTO ölçüm cihazları ile yapılmıştır. Ölçümler datalogger veri tabanı üzerinden bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu sayede belirli bir zaman dilimi içerisinde bilgisayar ortamına 5 dakikada bir veri aktarımı ve depolaması söz konusu olmuştur. Ayrıca, kurutma sisteminin dışında yer alan ve 0,01 gr. hassasiyete sahip terazi ile kuruma hızının en düşük olduğu rafa yerleştirilen numunenin 30 dakika arayla kütle değişimleri ölçülmüştür. Deney düzeneği İzmir Çiğli Atatürk Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Türkoğlu Makine San. ve Tic. Ltd. Şti. Firmasından alınıp Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nün arka bahçesine montajı yapılmıştır. Deneyler bu bahçede gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sırasında kurutma kabininin 6 farklı noktasından sıcaklık ölçümü yapılmıştır.. Ayrıca kurutma kabininin giriş ve çıkış noktalarından bağıl nem ve sıcaklık, reküperatör ünitesinden (ısı geri kazanım ünitesi) hava hızı, sıcaklık ve bağıl nem, ısıtıl enerji depolama ünitesinden bağıl nem ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Isıl enerji depolama sisteminin 5 farklı noktasından sıcaklık ölçümü yapılmış olup bu sayede depolanan ısıtıl enerji miktarı belirlenmiştir. Sistemde toplamda 11 adet sıcaklık sensörü, 4 adet bağıl nem sensörü ve 1 adet hava hızı sensörü kullanılmıştır. Ölçüm noktaları daha önce Şekil 4.1'de verilen akış şemasında gösterilmiştir. Akış şeması üzerinde ölçüm alınan noktaları kısaca aşağıdaki gibi açıklamak mümkündür:

Sıcaklık sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

T₁- Kurutma kabin giriş sıcaklık değeri (sağ üst kısım), T₂- Kurutma kabin çıkış sıcaklık değeri (sağ alt kısım),

T₃- Isı geri kazanım ünitesi atık ısı çıkış sıcaklık değeri (sağ üst kısım), T₄- Isı geri kazanım ünitesi taze hava giriş sıcaklık değeri (sağ alt kısım),

T₅- Isı geri kazanım ünitesi atık ısı giriş sıcaklık değeri, T₆- Isı geri kazanım ünitesi taze hava çıkış sıcaklık değeri,

T₇-Isıl enerji depolama ünitesi giriş sıcaklık değeri, T₈- Isıl enerji depolama ünitesi- kurutma kabini üst kısım giriş sıcaklık değeri,

T₉- Isıl enerji depolama ünitesi çıkış sıcaklık değeri, T₁₀- Isıl enerji depolama ünitesi- kurutma kabini alt giriş sıcaklık değeri,

T₁₁- Isıl enerji depolama ünitesi iç kısmı sıcaklık değeri.

Bağıl nem sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

Ø₁-Kurutma kabin girişi bağıl nem değeri, Ø₂- Kurutma kabin çıkışı bağıl nem değeri, Ø₃-Isıl enerji depolama ünitesi iç kısmı bağıl nem değeri, Ø₄-Isı geri kazanım ünitesi bağıl nem değeri

Hava hızı sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

V₁- Isı geri kazanım ünitesi (atık ısı) giriş hava hızı değeri,

Isı pompalı sistemin akış şeması üzerinde belirtilen ölçüm noktaları ise;

Sıcaklık sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

T₁- Kurutma kabin giriş sıcaklık değeri, T₂- Kurutma kabin çıkış sıcaklık değeri,

T_3 - Buharlaştırıcı (evaporator) giriş sıcaklık değeri, T_4 - Yoğuşturucu (condenser) giriş sıcaklık değeri,

Bağıl nem sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

H_1 -Kurutma kabin girişi bağıl nem değeri, H_2 - Kurutma kabin çıkışı bağıl nem değeri,

5.1 Kurutma Deneyleri

5.1.1 Güneş destekli ısı enerjisi depolama sistemi kurutma deneyleri

Armut kurutulması deneyleri için armutlar bir gün önceden Uygur Alışveriş Merkezi'nden alınmıştır. Armutlar deney öncesi yıkanıp, çekirdekleri çıkarılarak elle kesme aleti ile 3, 5 ve 10 mm gibi değişen kalınlıklarda dilimlenmiştir. Toplamda kurutma kabininin 4 rafı kullanılarak 4-7 kg arasında değişen miktarlarda armut kurutulmuştur. Armutlar uzun süre bekletilmediği için kararırma gözlemlenmediğinden herhangi bir ön işleme tabi tutulmamıştır. İlk gün yapılan deneylerde armutlar 3 ± 1 mm kalınlığında doğranıp dizilmiştir (Şekil 5.2-Şekil 5.7 arası). Her rafa konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak kurumanın her rafta eşit olup olmadığına bakılmıştır. Yapılan deneylerde kuruma hızının en düşük olduğu rafa 100 ile 300 gram arasında değişen numune konularak bu numune üzerinden 30 dakika ara ile numunenin ağırlık değişimleri ölçülmüştür. Böylece armutlardan uzaklaşan su miktarının belirlenmesi sağlanmıştır. Ancak uzaklaşması beklenen su miktarı hassas terazideki kayıplardan dolayı net olarak belirlenememiştir. Sistemin belirli bölgelerine yerleştirilen sensörler 5 dakika ara ile dataloggerda depolanması sağlanmıştır. Kurutma deneylerine 23 Eylül tarihinde başlanılıp 10 Ekim tarihinde bitirilmiştir. Bu süre zarfında yağmurların yağması sebebi ile deneylere ara verilmiş olup güneşli günlerde deneylere devam edilmiştir. Deneylere sabah 10:00 ile akşam 19:00 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir. Isıl enerji depolama sistemi ise 16:00 - 19:00 saatleri arasında kurutma sistemi ile beraber çalıştırılmıştır. Ayrıca elde edilen bulguların karşılaştırılması yönünden Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Labovatuvarında yer alan ısı pompalı

kurutma kabininde de deneyler yapılmıştır. Böylelikle farklı kalınlıklardaki (3 mm, 5 mm, 10 mm) armut dilimlerinin iki farklı sistem kullanılarak armutların kuruma davranışları ve kuruma süreleri tespit edilmiştir.



Şekil 5.2. Kurutma işlemine tabi armutlar.



Şekil 5.3. Çekirdek yuvaları çıkartılmış armut numuneleri.



Şekil 5.4. Dilimlenerek tepsilere yerleştirilmiş armut numuneleri.



Şekil 5.5. Kuruma öncesi armut dilimlerinin görünüşü.



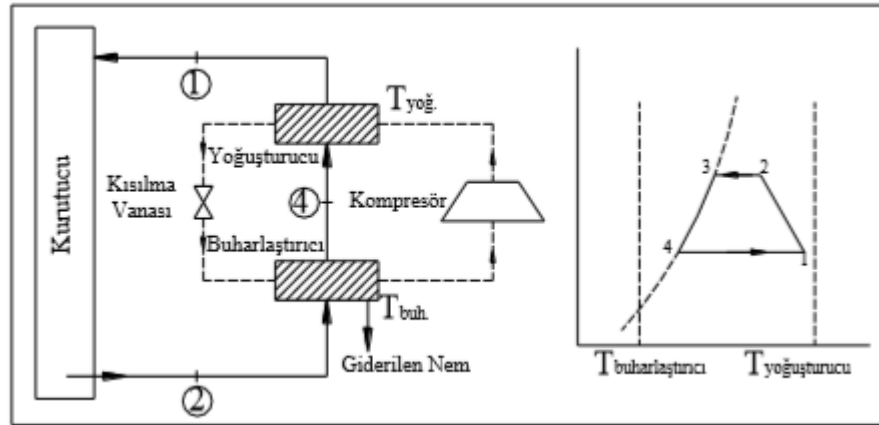
Şekil 5.6. Kuruma sonrası armut dilimlerinin görünüşü.



Şekil 5.7. Armut numune çalışması.

5.1.2 Isı pompalı kurutma deneyleri

Kapalı sistem ısı pompaları uygulamasının temel prensibi şeması Şekil 5.8’de görülmektedir. Burada kurutucudan gelen düşük sıcaklıktaki hava yardımıyla buharlaştırıcıda, ısı pompası devresindeki soğutucu akışkan (R404a) buharlaşır. Aynı zamanda egzoz (kurutma) havasından yoğuşan nem uzaklaştırılır. Soğutucu akışkan kompresörde sıkıştırılır ve yoğuşturucudan geçirilerek taşıdığı enerji kurutma havasına transfer edilir. Sıcaklığı yükselen kurutma havası da kurutucuya verilir. Soğutucu akışkan ise adyabatik olarak buharlaştırıcı basıncına genişletilir. Bu uygulamada kurutucudan gelen egzoz havası, taşıdığı nemin uzaklaştırılabilmesi için yoğuşma sıcaklığının altına soğutulmalıdır. Bu sürecin izlediği yol psikrometrik diyagramda görülmektedir. Kurutucudan gelen egzoz havasının ısı pompası buharlaştırıcısına giriş koşulları 2 noktası ile belirlenir. Buharlaştırıcıda önce egzoz havasının sıcaklığı düşer (3), ardından içerdiği nem yoğuşarak 4 noktası ile gösterilen koşullara ulaşılır.



Şekil 5.8. Isı pompalı kurutucu prensip şeması ve psikrometrik diyagramda gösterimi.

Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği binasında kurulan Terkan Isı Sanayi Ve Ticaret Lmt. Şti.’den tedarik edilen ısı pompalı kurutucu Şekil 5.9’da verilmektedir.



Şekil 5.9. Isı pompalı kurutucunun deney düzeneği.

Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Labovartvarında yer alan ısı pompalı kurutma kabininde yapılan deneylerde ise armutlar deney öncesi yıkanıp, çekirdekleri çıkarılarak elle kesme aleti ile 3, 5 ve 10 mm gibi değişen kalınlıklarda dilimlenmiştir. Toplamda kurutma kabininin 2 rafı kullanılmıştır. Sistemde 3-5 kg arasında değişen miktarlarda armut kurutulmuştur. Armutlar uzun süre bekletilmediği için kararma gözlemlenmediğinden herhangi bir ön işleme ihtiyaç duyulmamıştır. Deneylerde armutlar 3, 5 ve 10 mm kalınlığında doğranıp tepsilere dizilmiş olup kuruma öncesi ve sonrası armut dilimlerinin kuruma davranışları irdelenmiştir (Şekil 5.10-Şekil 5.12 arası). Her rafa konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak her rafın kuruma hızı belirlenmiştir. Deneylerde 100 ile 300 gram arasında değişen miktarlarda numune kullanılarak hassas terazi ile 30 dakikada bir numunenin ağırlık değişimleri ölçülmüştür. Kurutma kabinine giren ve çıkan havanın sıcaklık ve nem değerleri, buharlaştırıcı ve condenser giriş sıcaklıkları TESTO ölçüm cihazları kullanılarak on beş dakikada bir veri alınmıştır.



Şekil 5.10. Dilimlenerek tepsilere yerleştirilmiş armut numuneleri.



Şekil 5.11. Kuruma öncesi armut dilimlerinin görünüşü.



Şekil 5.12a. Kuruma sonrası armut dilimlerinin görünüşü.



Şekil 5.12b. Kuruma sonrası armut dilimlerinin kabin görünüşü.



Şekil 5.12c. Kuruma öncesi armut numunesi.



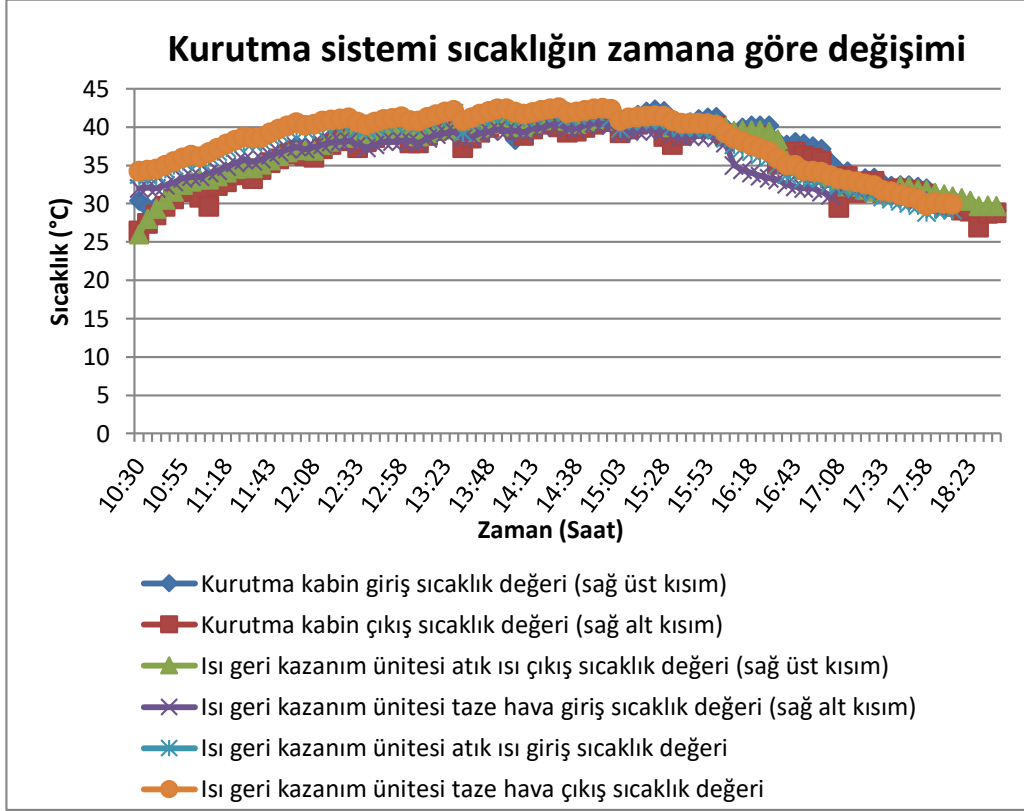
Şekil 5.12d. Kuruma sonrası armut numunesi.

5.2 Güneş Destekli Isıl Enerji Depolama Sistemi Kurutma Deneyleri Sonuçları

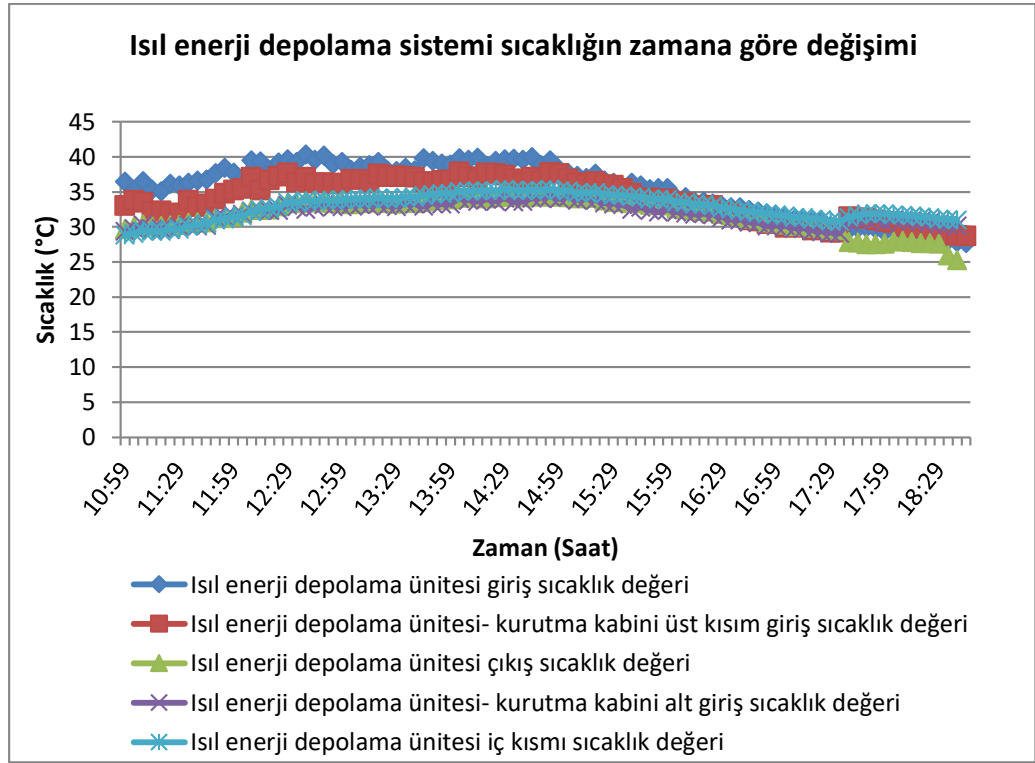
5.2.1 1. kurutma deneyi sonuçları

Kurutma sisteminin montajı tamamlandıktan sonra yapılan ilk deney çalışmasında kabinin sadece 4 rafı kullanılmış olup armutlar 3 ± 1 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Başlangıçta 4050 gram armut alınmıştır. Armutların çekirdekleri çıkartıldıktan sonra kurutma işlemine tabi armut numunelerinin çöpsüz ağırlığı 3440,89 gramdır. Kurutma işlemi 7 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 502,36994 gr olarak ölçülmüştür. Bu çalışma kapsamındaki deneylerde %20 nem içeriği değerine kadar kurutma yapılmış olup deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 73,01 gr numune ağırlığı kurutma sonrasında 6,82 gr olduğu gözlemlenmiştir. Bu da kuru ürünlerdeki nem içeriği %9 olarak hesaplanmıştır. Kurutulmuş armut dilimlerinin kuru baza göre 9,7052 gsu/gkuru madde miktarından 0,0571 gsu/gkuru madde miktarına 7 saatte indirilmiştir. Kurutma kabini içindeki sıcaklık $41,8^{\circ}\text{C}$ 'yi geçememiştir. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerlerinde büyük farklılıklar görülmemiştir.

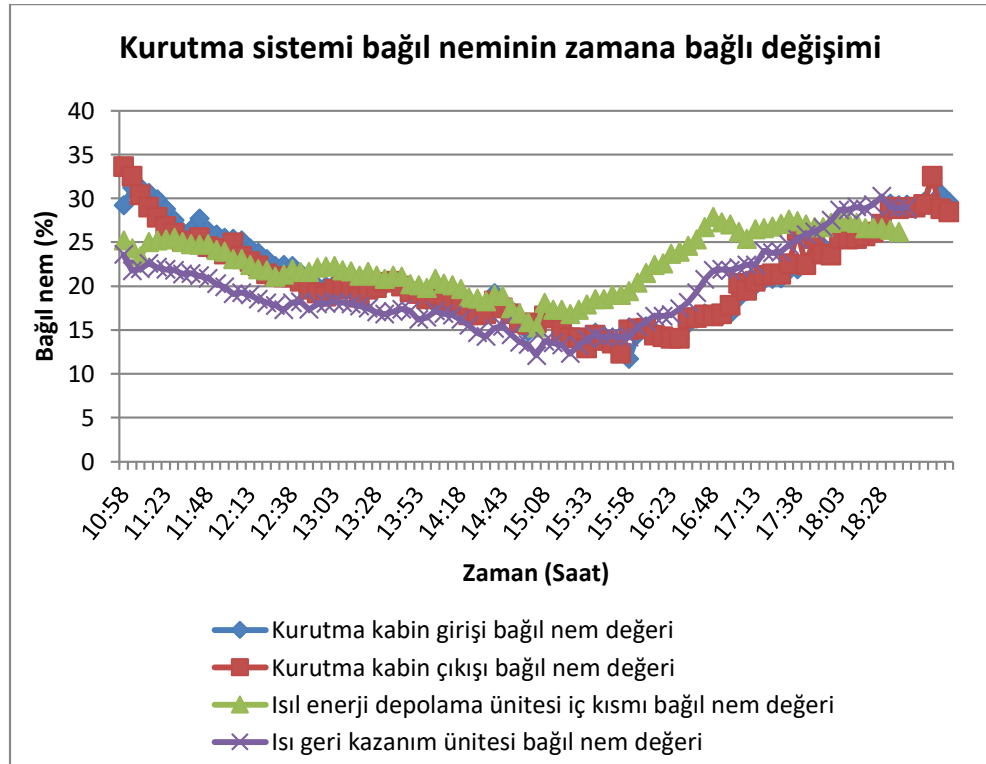
Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.13 - Şekil 5.14 'te, bağıl nem değerleri Şekil 5.15'de, Isı geri kazanım ünitesi giriş hava hızı değeri Şekil 5.16'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



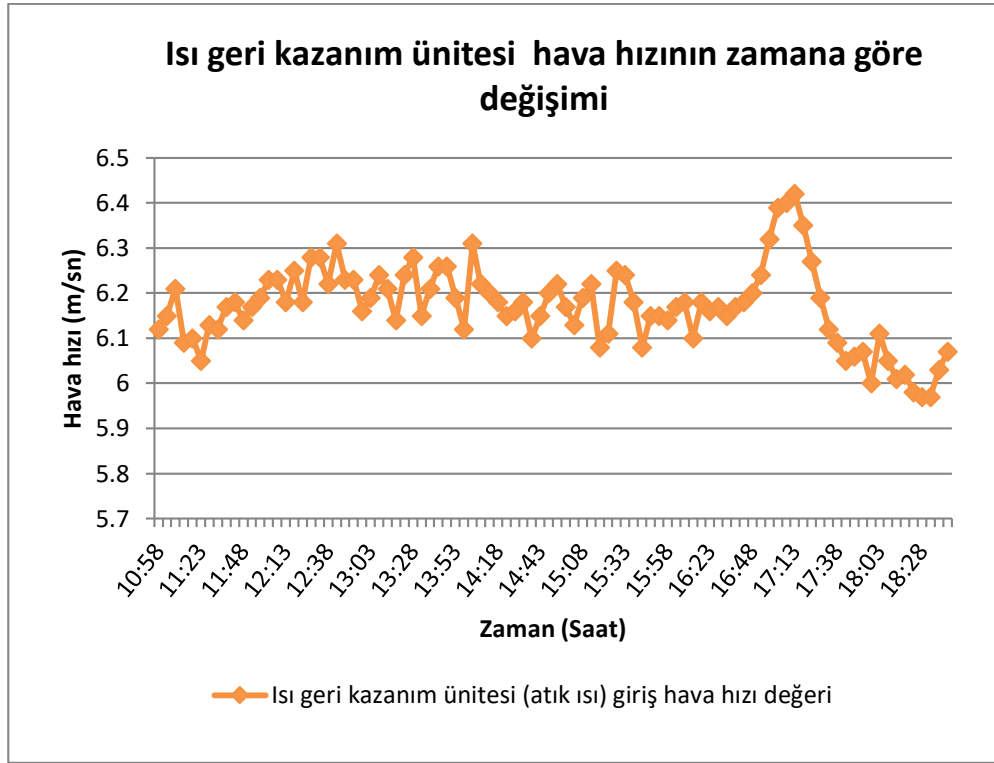
Şekil 5.13. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 5.14. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.

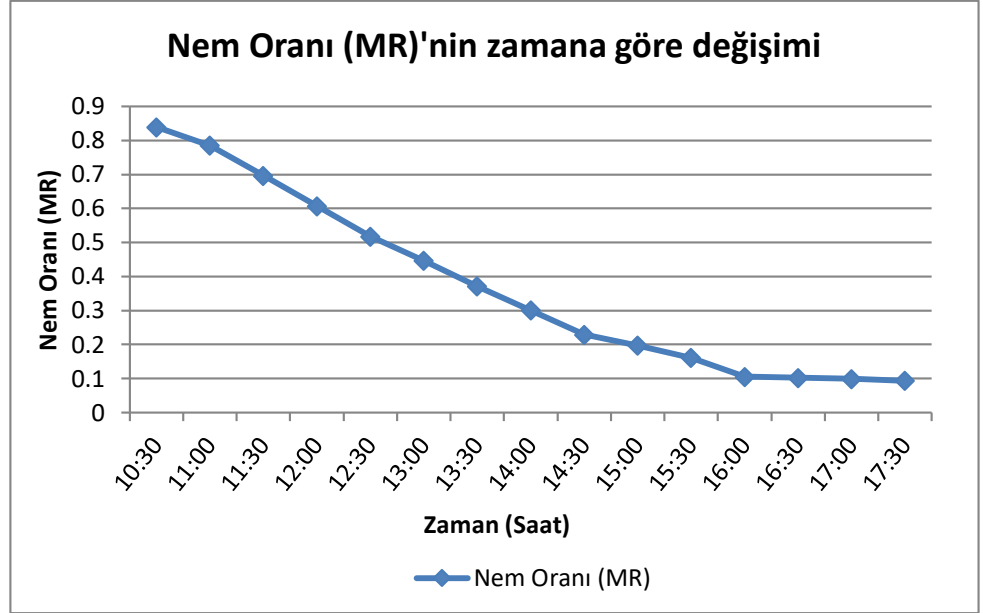


Şekil 5.15. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.

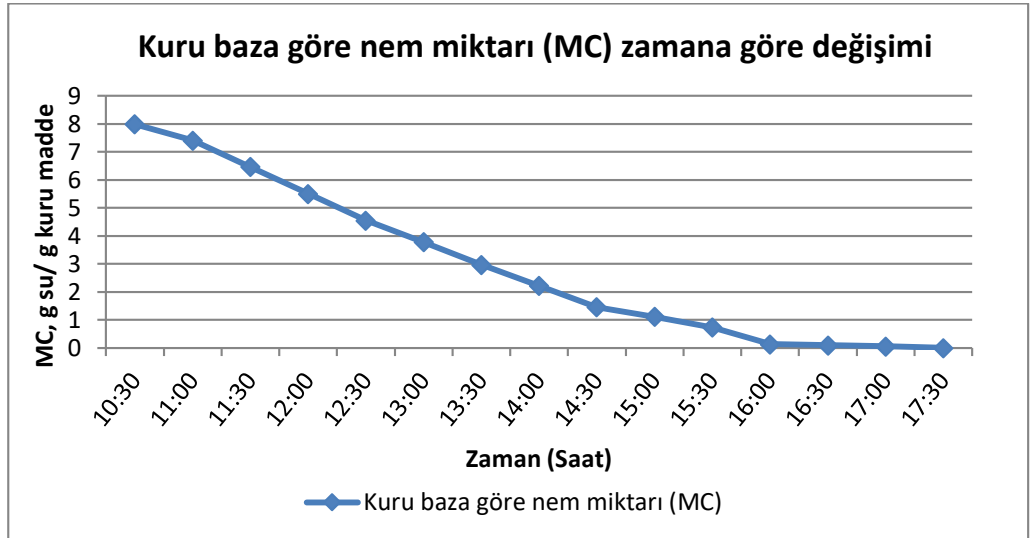


Şekil 5.16. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.

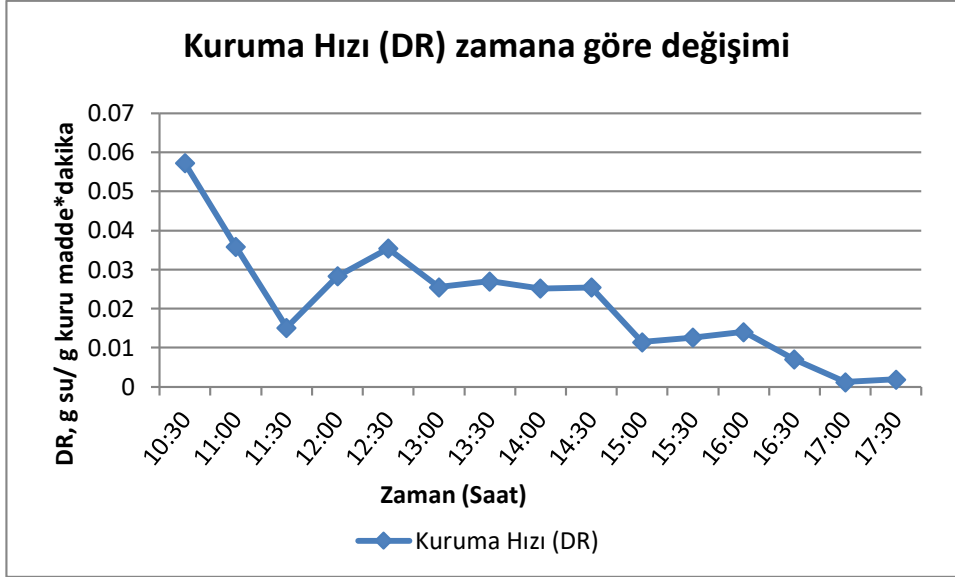
Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.17’de görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Şekil 5.19’da ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.17. MR'nin zamana göre değişimi.



Şekil 5.18. MC nin zamana göre değişimi.

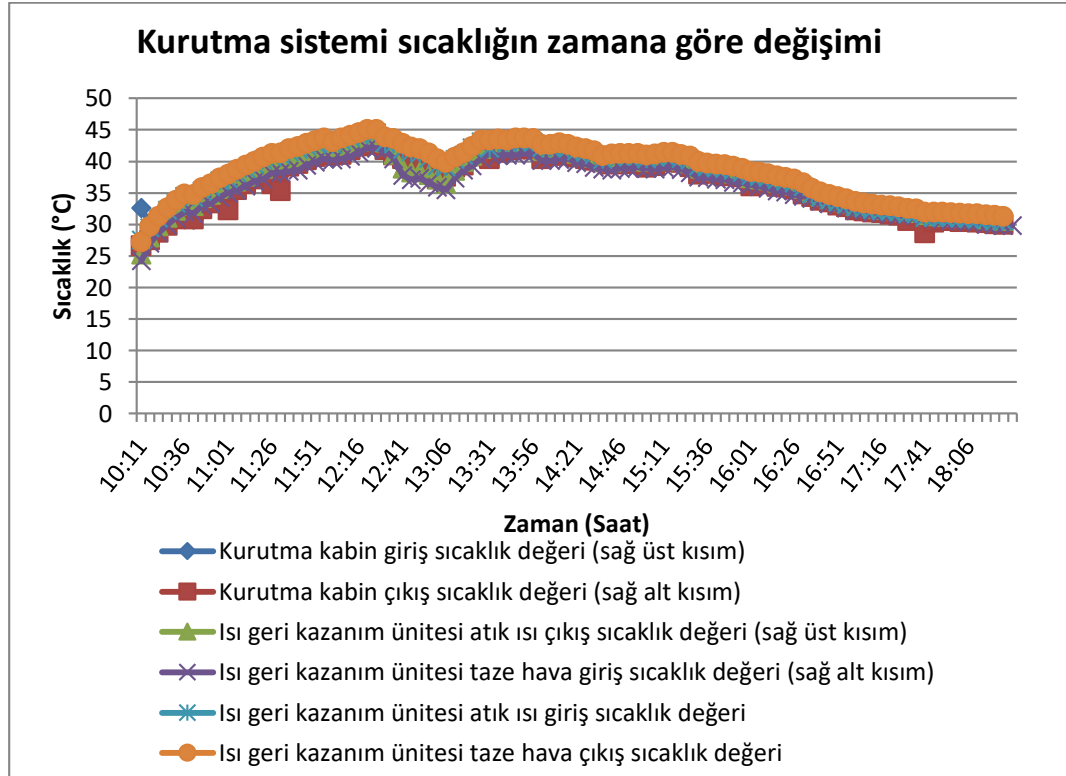


Şekil 5.19. DR nin zamana göre değişimi.

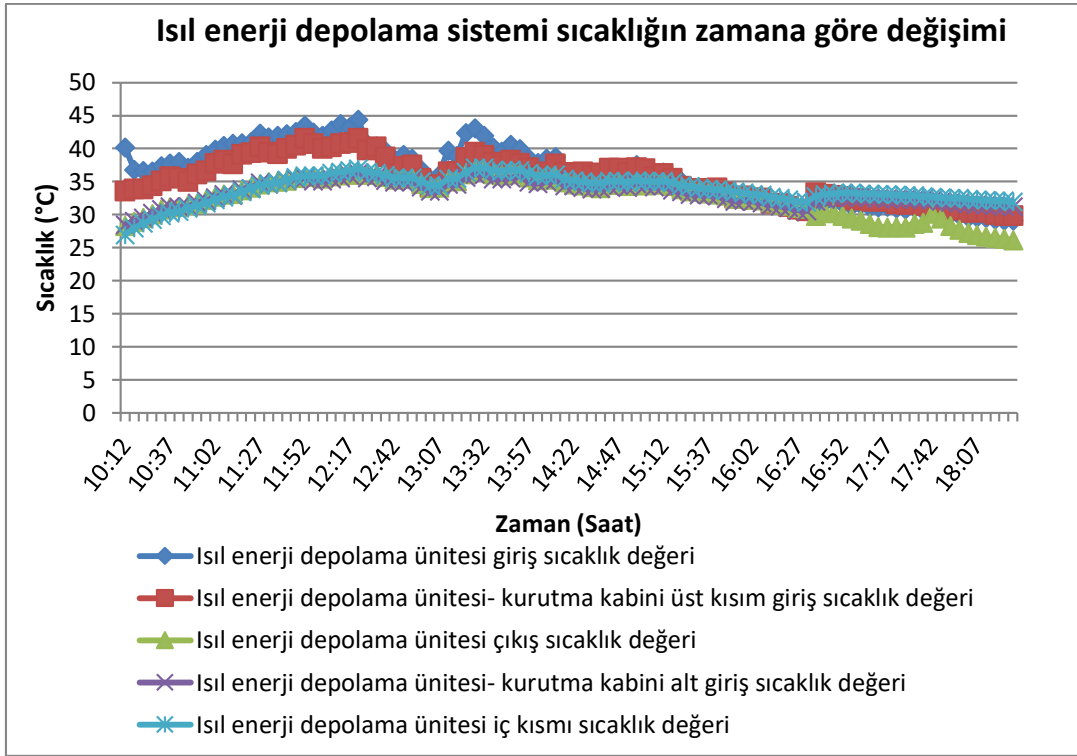
5.2.2 2. kurutma deneyi sonuçları

İkinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin sadece 4 rafı kullanılmış olup armutlar 3 ± 1 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Armutların çekirdekleri çıkartıldıktan sonra kurutma işlemine tabi armut numunelerinin çöpsüz ağırlığı 3709,31 gramdır. Kurutma işlemi 8 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında armutların toplam ağırlığı 630,24 gr olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 227,76 gr numune ağırlığı kurutma sonrasında 37,608 gr olduğu gözlemlenmiştir. Bu da kuru ürünlerdeki nem içeriği %16 olarak hesaplanmıştır. Kurutulmuş armut dilimlerinin kuru baza göre 5,0561 gsu/gkuru madde miktarından 0,00382 gsu/gkuru madde miktarına 8 saatte indirilmiştir. Kurutma kabini içindeki sıcaklık 43,3°C'yi geçememiştir. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerlerinde büyük farklılıklar görülmemiştir. Ayrıca her rafta konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak kuruma hızı 1.rafta 1,36 gsu/gkuru madde dk, 2. rafta 1,41 gsu/gkuru madde dk, 3. rafta 1,46 gsu/gkuru madde dk ve 4. rafta ise 1,49 gsu/gkuru madde dk olarak hesaplanmıştır.

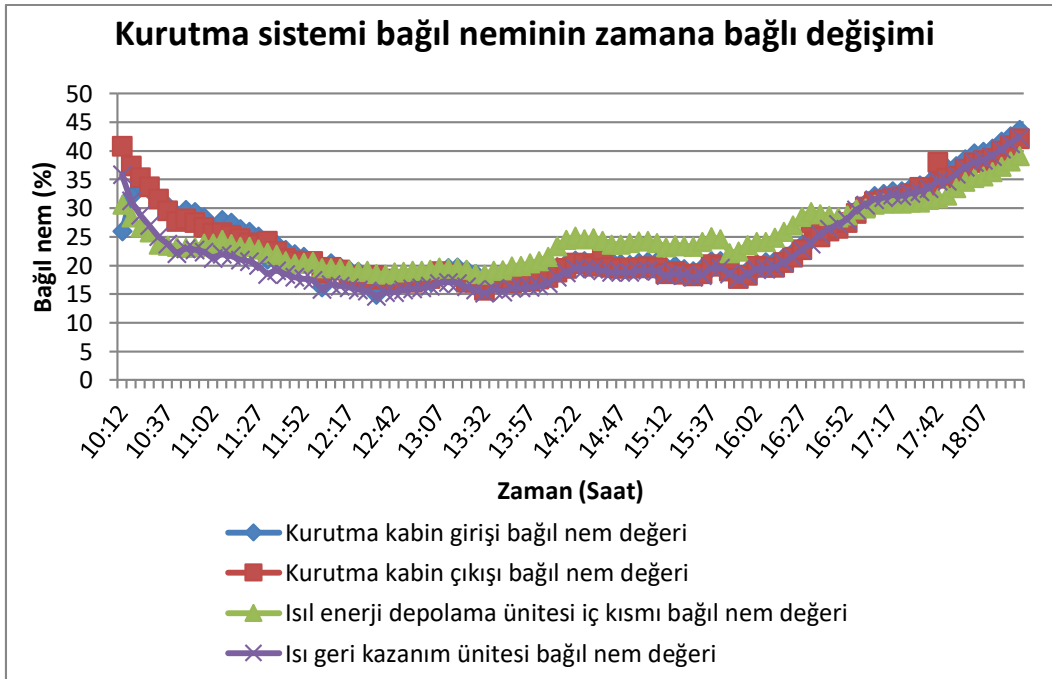
Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.20 - Şekil 5.21'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.22'de, ısı geri kazanım ünitesi giriş hava hızı değeri Şekil 5.23'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 5.21. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.

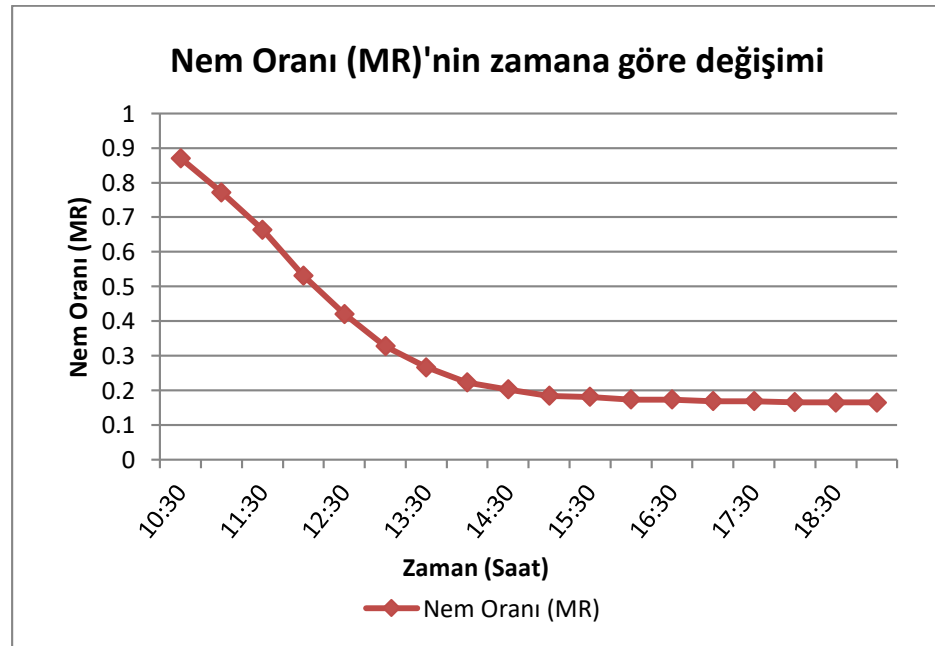


Şekil 5.22. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.

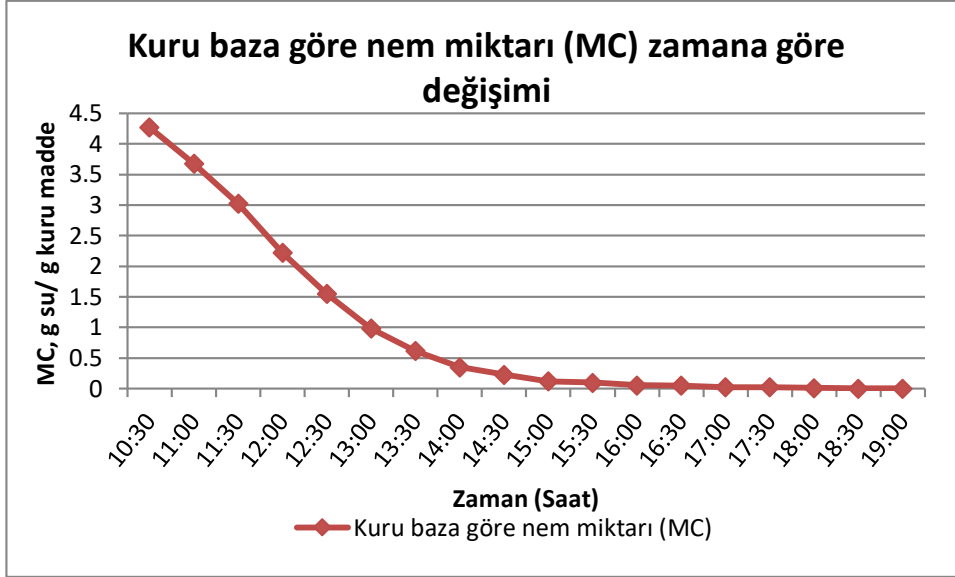


Şekil 5.23. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.

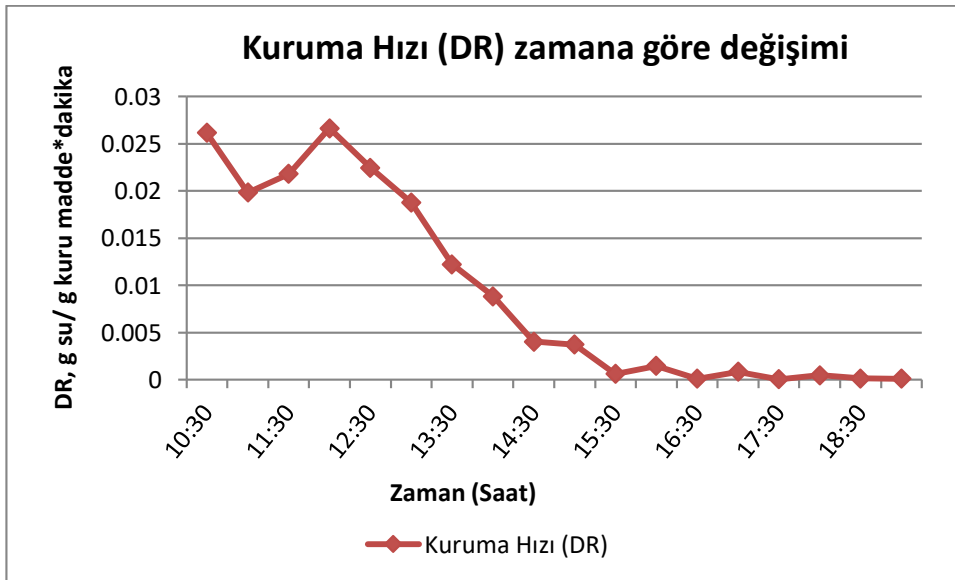
Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.24'te görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.25'de gösterilmiştir. Şekil 5.26'da ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.24. MR'nin zamana göre değişimi.



Şekil 5.25. MC'nin zamana göre değişimi.



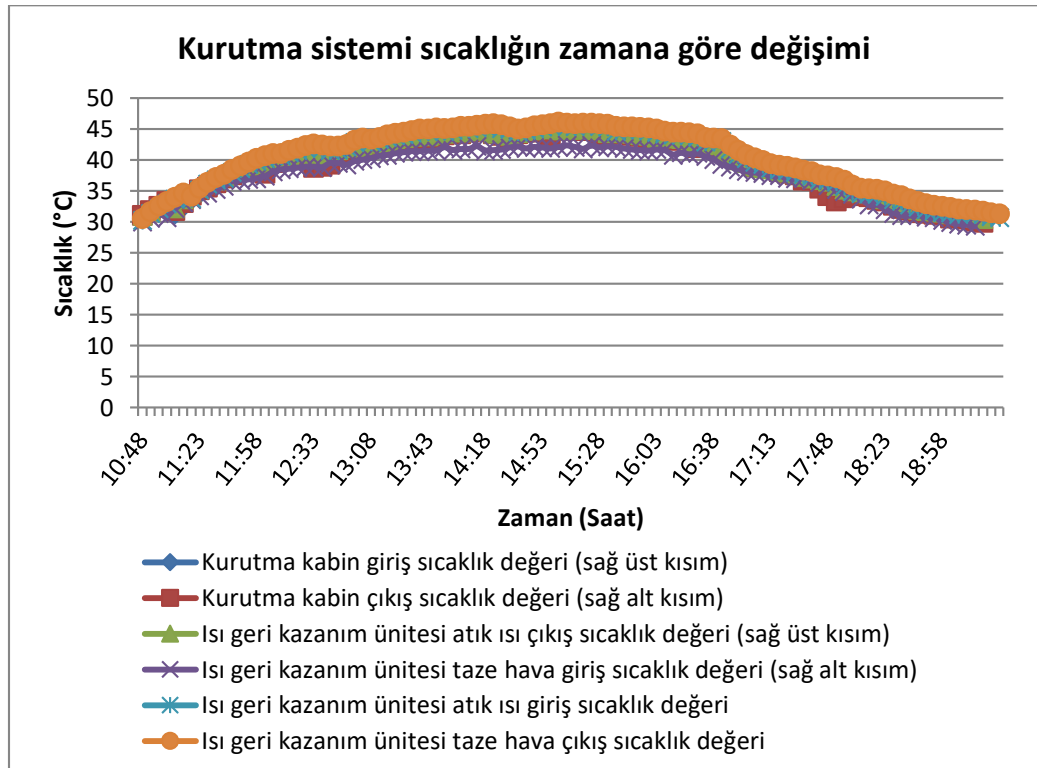
Şekil 5.26. DR'nin zamana göre değişimi.

5.2.3 3. kurutma deneyi sonuçları

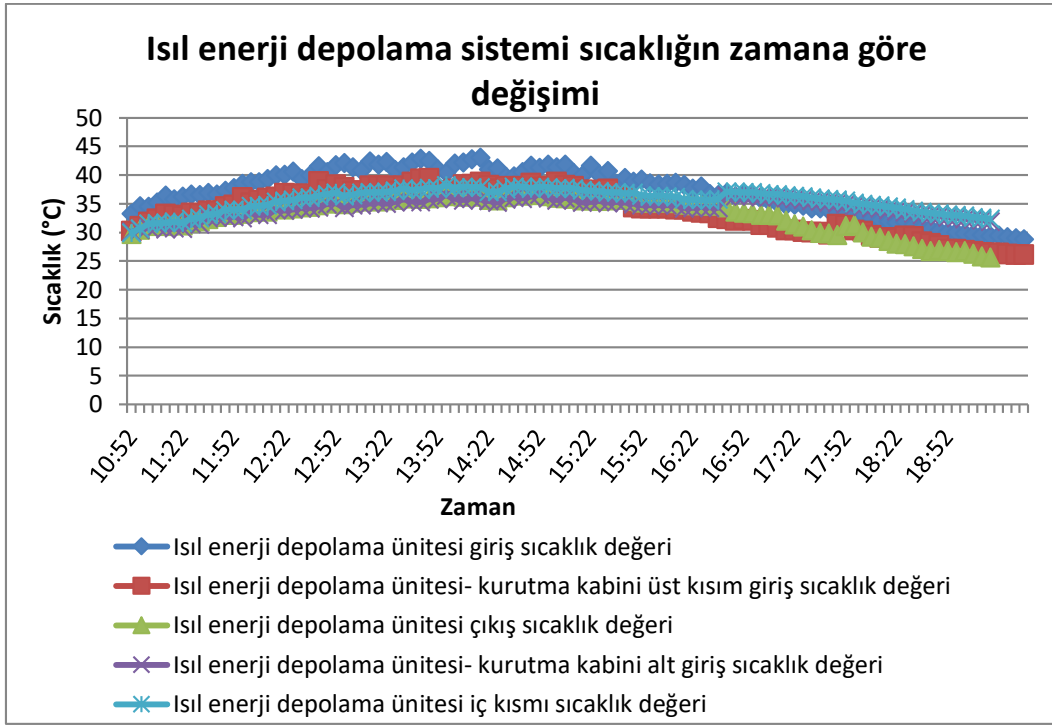
Üçüncü gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin 4 rafı kullanılmış olup armutlar 5 ± 2 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Armutların çekirdekleri çıkartıldıktan sonra kurutma işlemine tabi armut numunelerinin çöpsüz ağırlığı 4693,02 gramdır. Kurutma işlemi 9 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında armutların toplam ağırlığı 907,49 gr olarak

ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 270,04 gr numune ağırlığı kurutma sonrasında 46,59 gr olduğu gözlemlenmiştir. Bu da kuru ürünlerdeki nem içeriği %17 olarak hesaplanmıştır. Armut dilimlerinin kuru baza göre 4,796 gsu/gkuru madde miktarından 0,009658 gsu/gkuru madde miktarına 9 saatte indirilmiştir. Kurutma kabini içindeki sıcaklık 45,4°C'yi geçememiştir. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerlerinde büyük farklılıklar görülmemiştir. Ayrıca her rafta konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak rafların kuruma hızları belirlenmiştir.

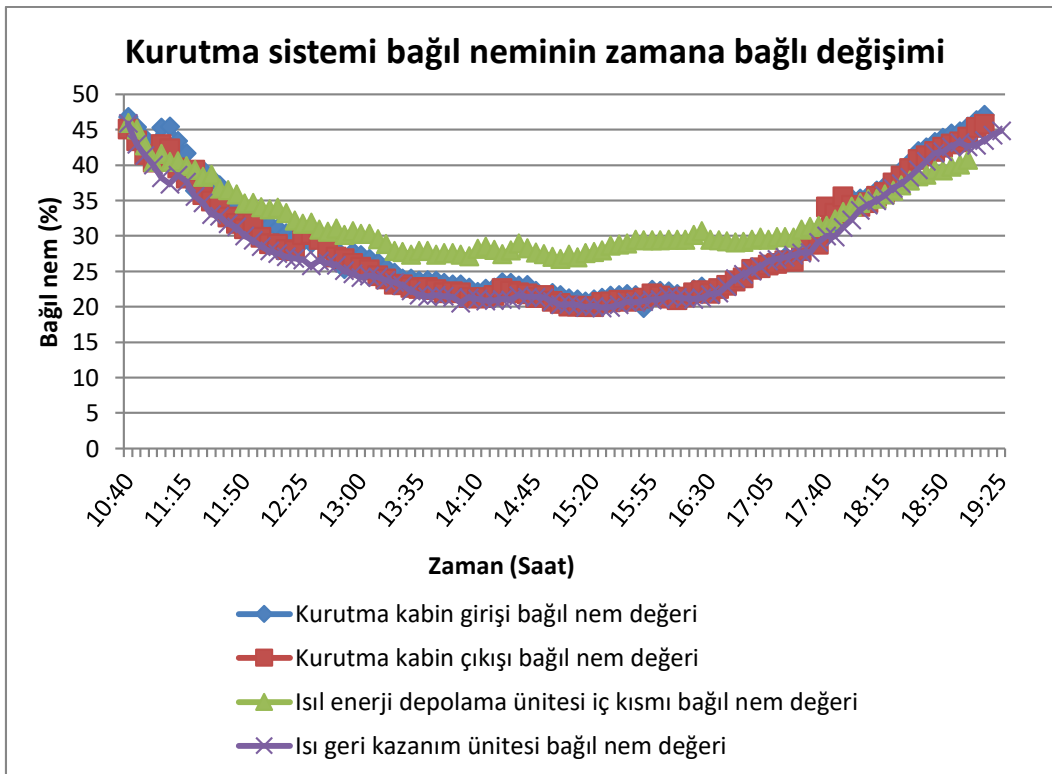
Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.27 - Şekil 5.28 'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.29'de, ısı geri kazanım ünitesi giriş hava hızı değeri Şekil 5.30'da verilen grafiklerde gösterilmiştir.



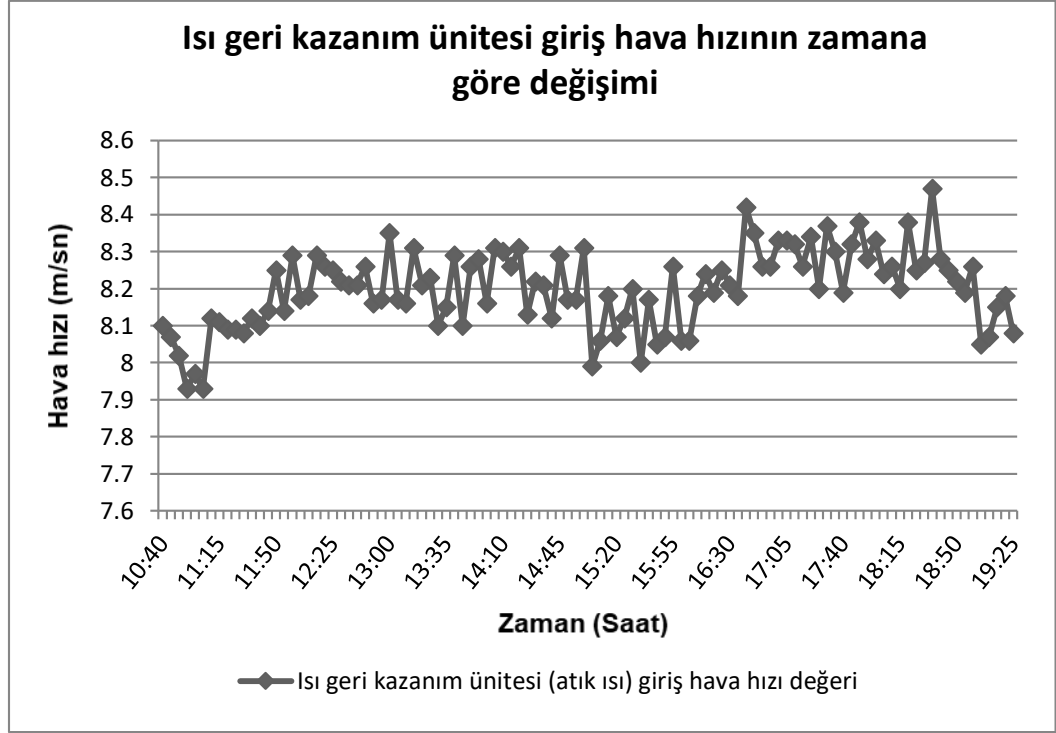
Şekil 5.27. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 5.28. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.

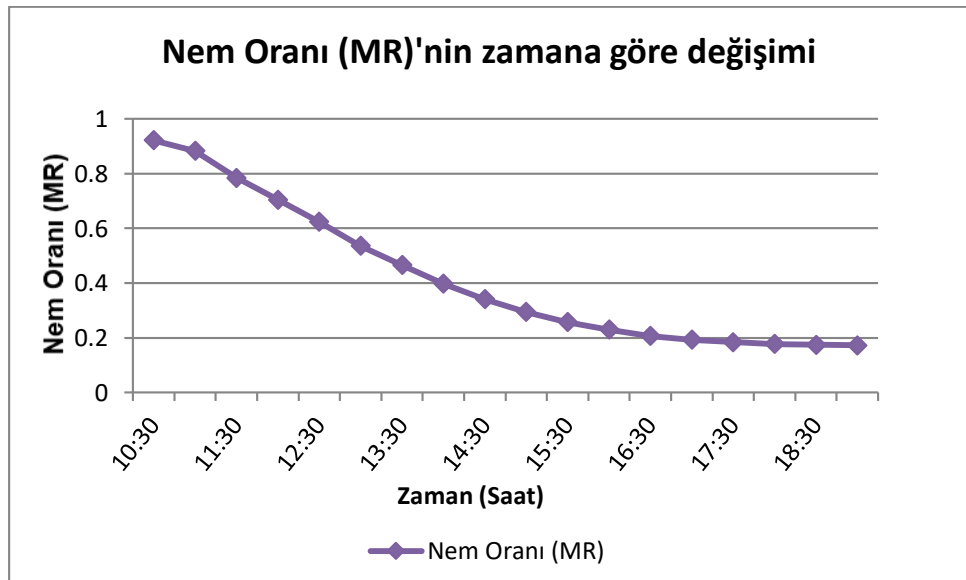


Şekil 5.29. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.

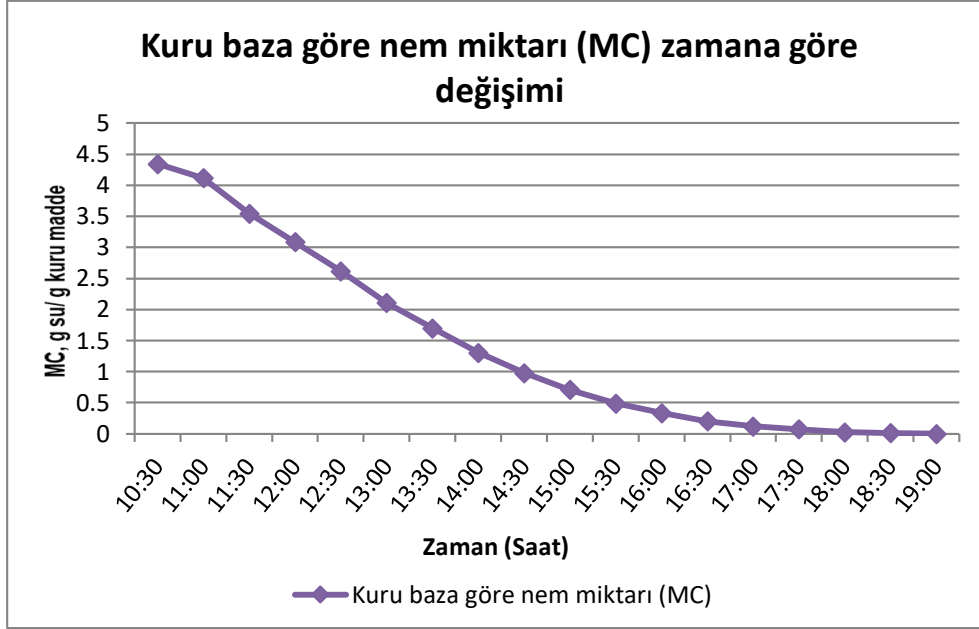


Şekil 5.30. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.

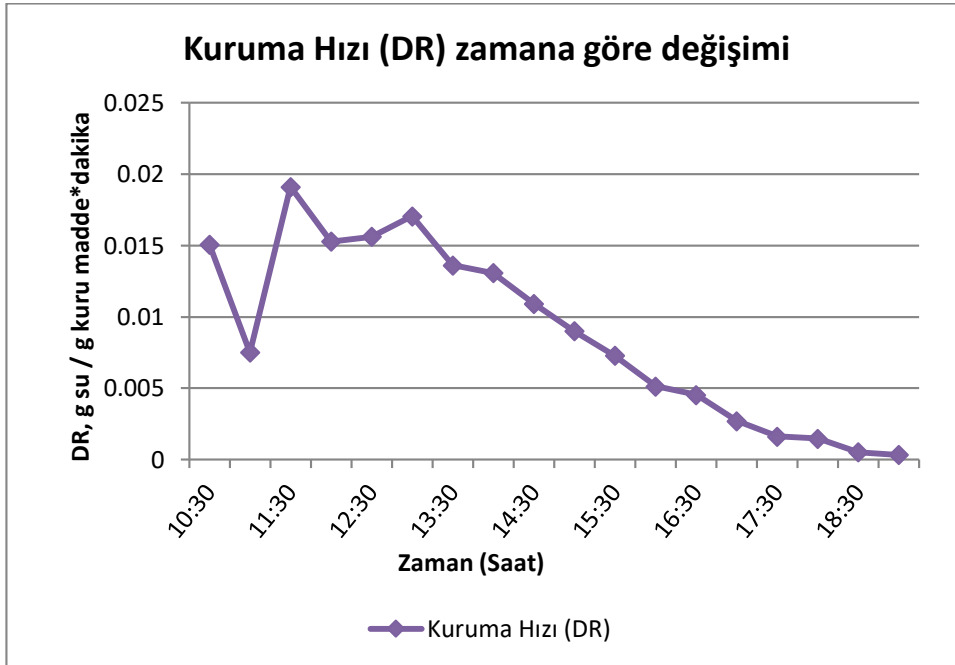
Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.31’de görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.32’de gösterilmiştir. Şekil 5.33’te ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.31. MR’nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.32. MC'nin zamana göre değişimi.

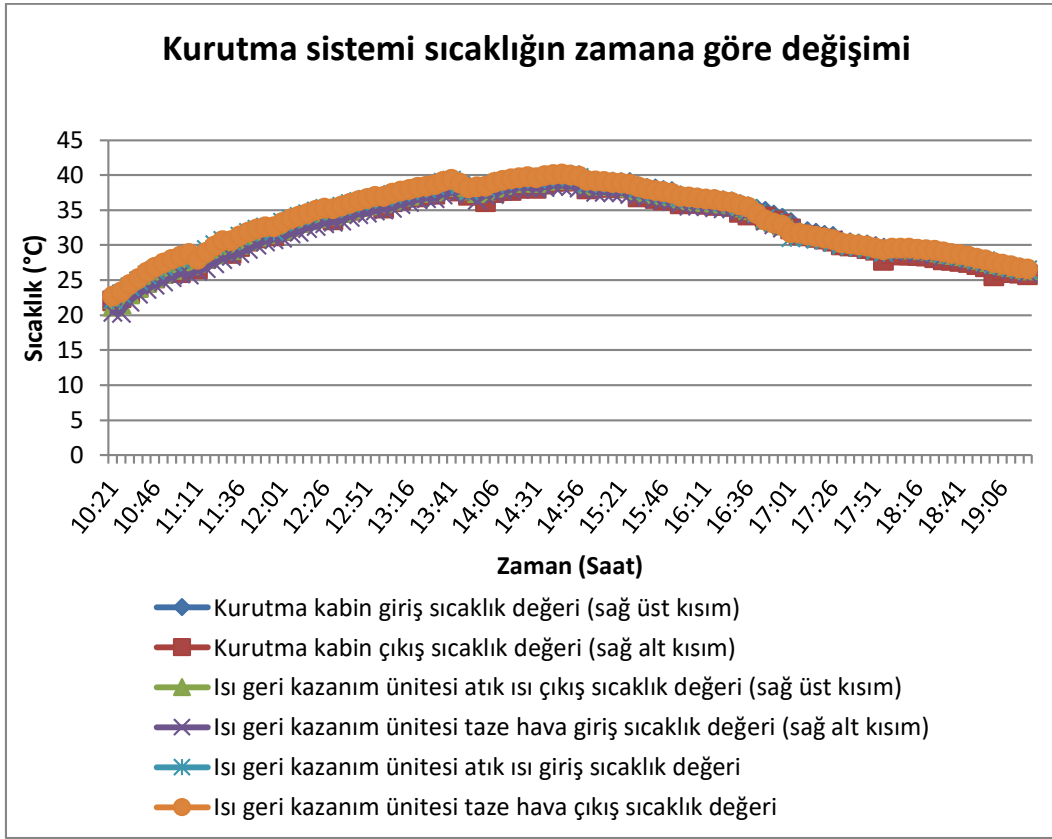


Şekil 5.33. DR'nin zamana göre değişimi.

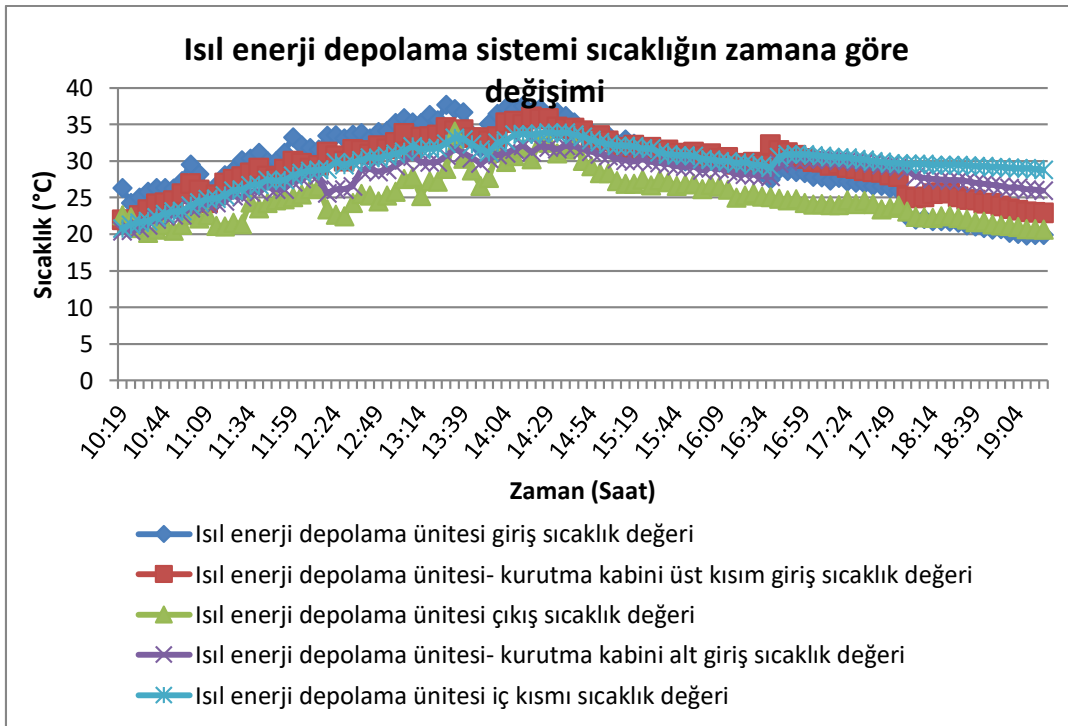
5.2.4 4. kurutma deneyi sonuçları

Dördüncü gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin 4 rafı kullanılmış olup armutlar 5 ± 2 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Armutların çekirdekleri çıkartıldıktan sonra kurutma işlemine tabi armut numunelerinin çöpsüz ağırlığı 4609,45 gramdır. Kurutma işlemine 9 saat devam edilmiş olup dış hava sıcaklığının diğer günlere oranla düşük ve havanın kapalı olması sebebiyle kurutma sonrası armutların toplam ağırlığı 1419,13 gr olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 316,59 gr numune ağırlığı kurutma sonrasında 85,24 gr olduğu gözlemlenmiştir. Bu da kuru ürünlerdeki nem içeriği %26,92 olarak hesaplanmıştır. Armut dilimlerinin kuru baza göre 2,7141 gsu/gkuru madde miktarından 0,049 gsu/gkuru madde miktarına 9 saatte indirilmiştir. Kurutma kabini içindeki sıcaklık 39°C'yi geçememiştir. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerlerinde büyük farklılıklar görülmemiştir. Ayrıca her rafta konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak rafların kuruma hızları belirlenmiştir.

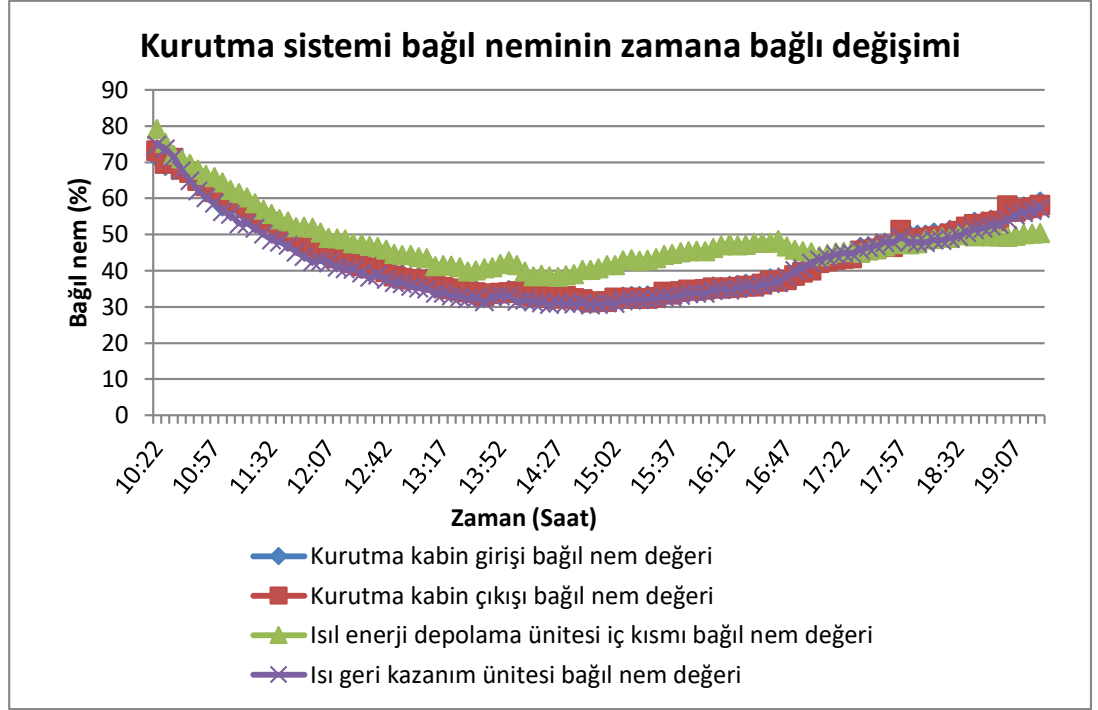
Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.34 - Şekil 5.35 'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.36'de, ısı geri kazanım ünitesi giriş hava hızı değeri Şekil 5.37'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



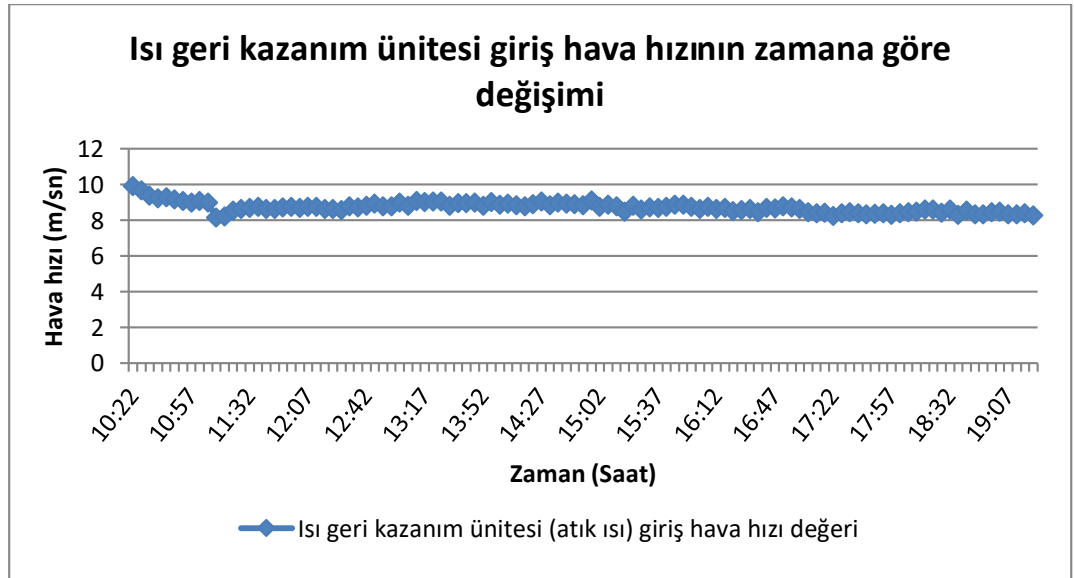
Şekil 5.34. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 5.35. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.



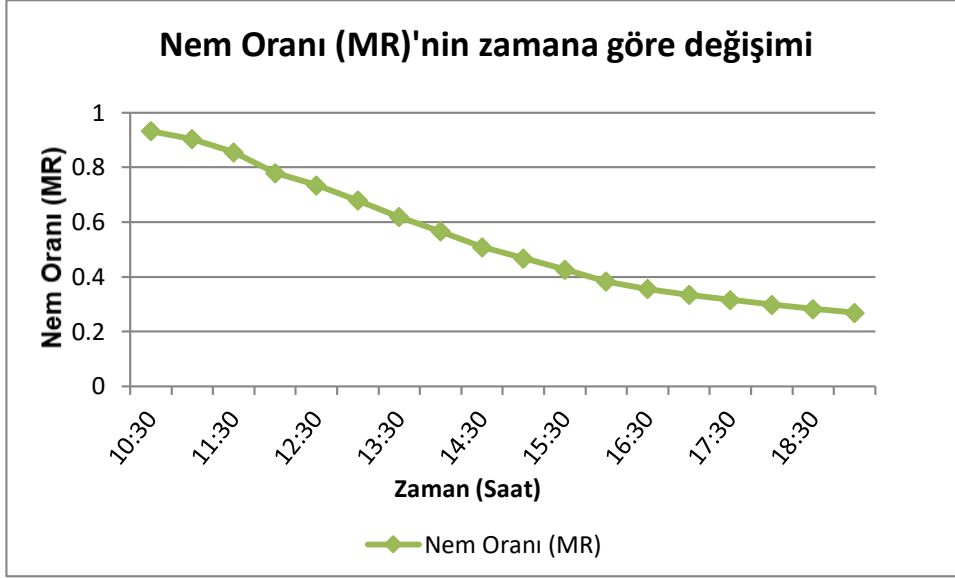
Şekil 5.36. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.



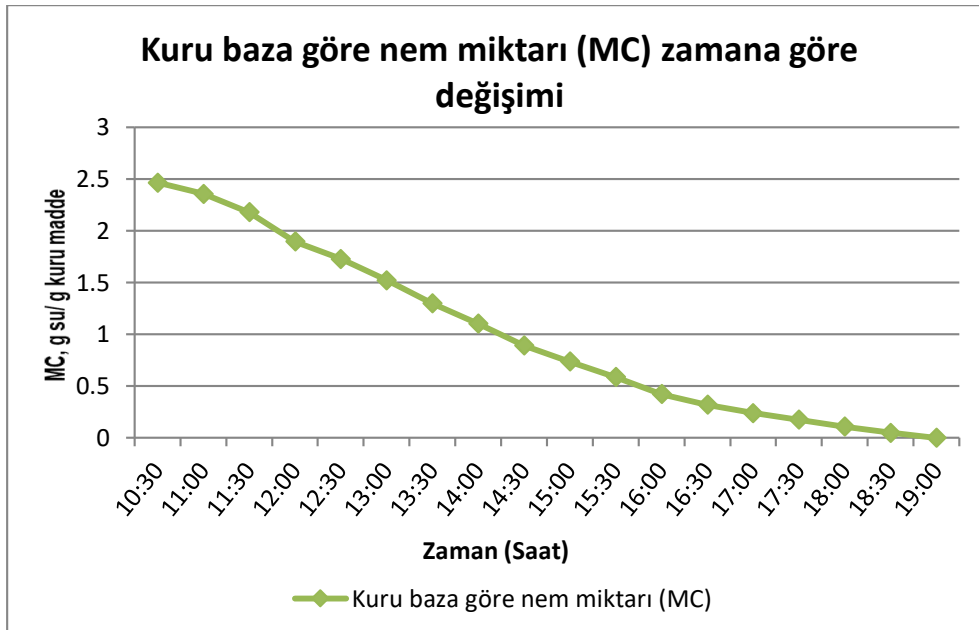
Şekil 5.37. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.

Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.38’de görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.39’da gösterilmiştir. Şekil

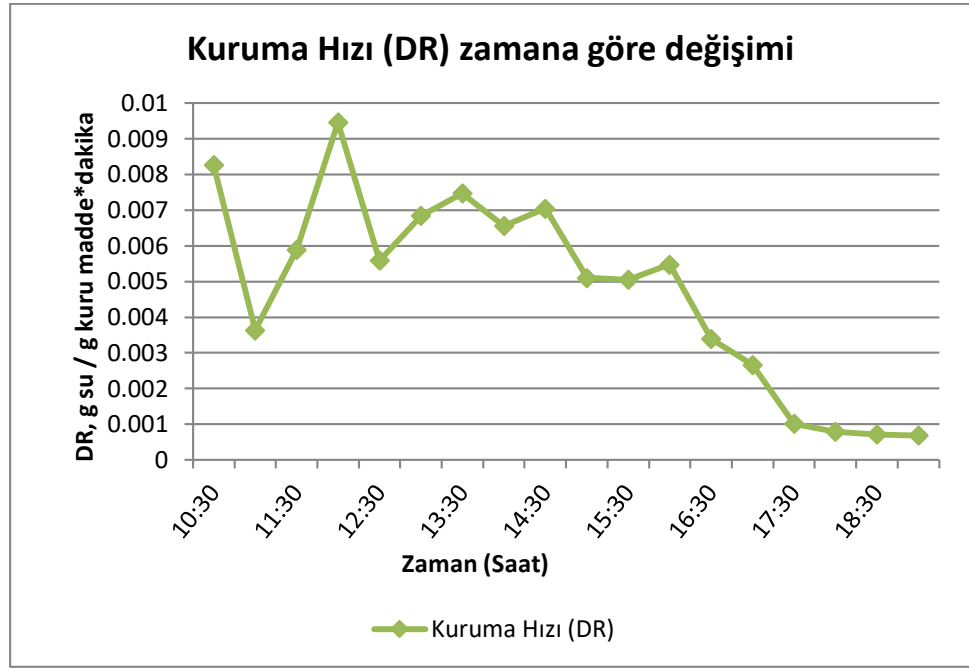
5.40'da ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.38. MR'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.39. MC'nin zamana göre değişimi.

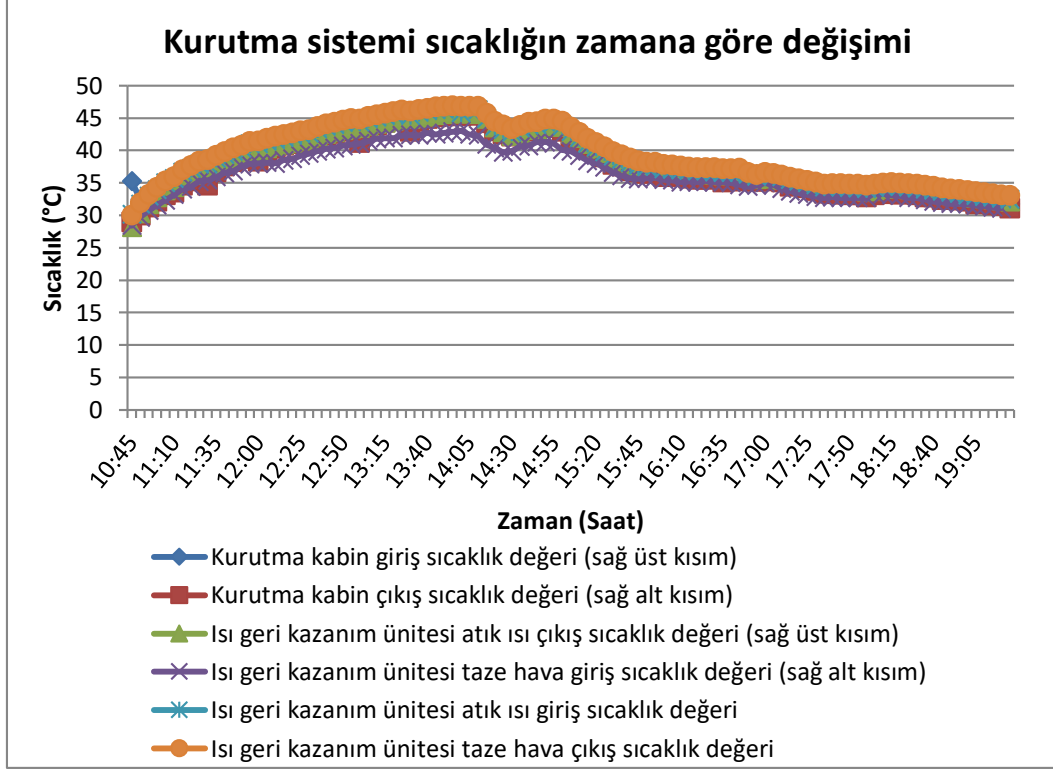


Şekil 5.40. DR'nin zamana göre değişimi.

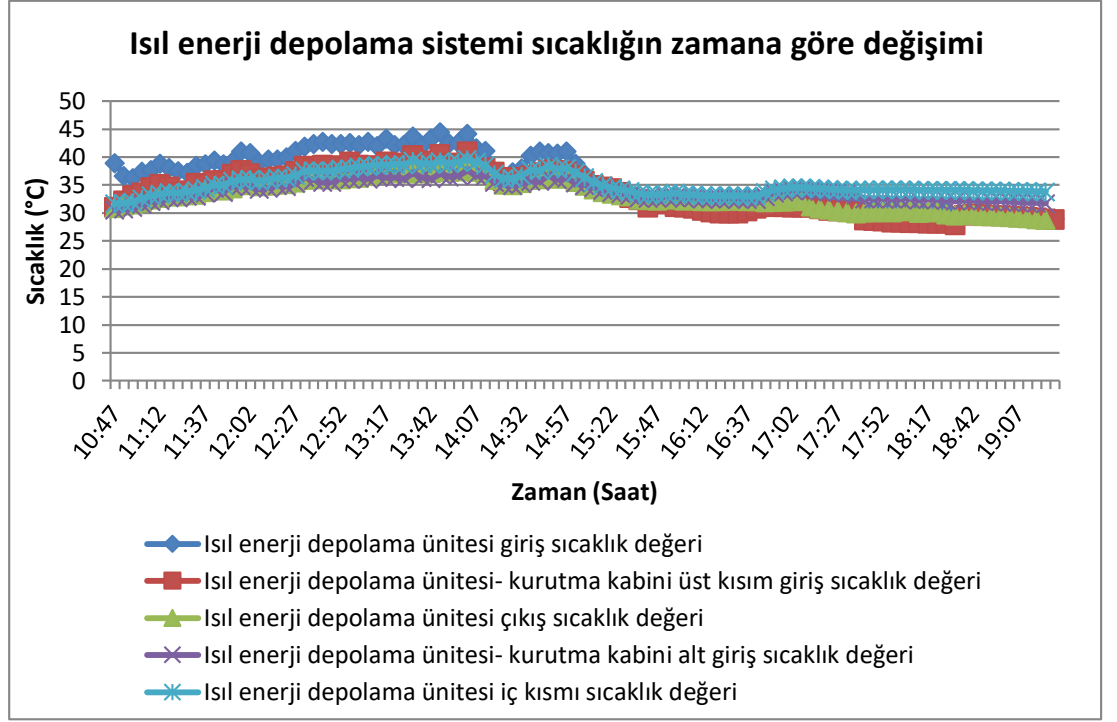
5.2.5 5. kurutma deneyi sonuçları

Beşinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin 4 rafı kullanılmış olup armutlar 10 ± 3 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Armutların çekirdekleri çıkartıldıktan sonra kurutma işlemine tabi armut numunelerinin çöpsüz ağırlığı 7093,02 gramdır. Kurutma işlemine 9 saat devam edilmiş olup kurutma işlemi sonrasında armutların toplam ağırlığı 2630,07 gr olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 479,74 gr numune ağırlığı kurutma sonrasında 178,76 gr olduğu gözlemlenmiştir. Bu da numune ürün nem içeriğinin %37,2 olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla ürünlerin kuruması tam anlamıyla sağlanamamıştır. Havanın yağmurlu olması sebebiyle ertesi gün kurutma işlemine devam edilememiştir. Armut dilimlerinin kuru baza göre 1,6837 gsu/gkuru madde miktarından 0,1239 gsu/gkuru madde miktarına 9 saatte indirilmiştir. Kurutma kabini içindeki sıcaklık $46,1^{\circ}\text{C}$ 'yi geçememiştir. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerlerinde büyük farklılıklar görülmemiştir. Ayrıca her rafta konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak rafların kuruma hızları belirlenmiştir.

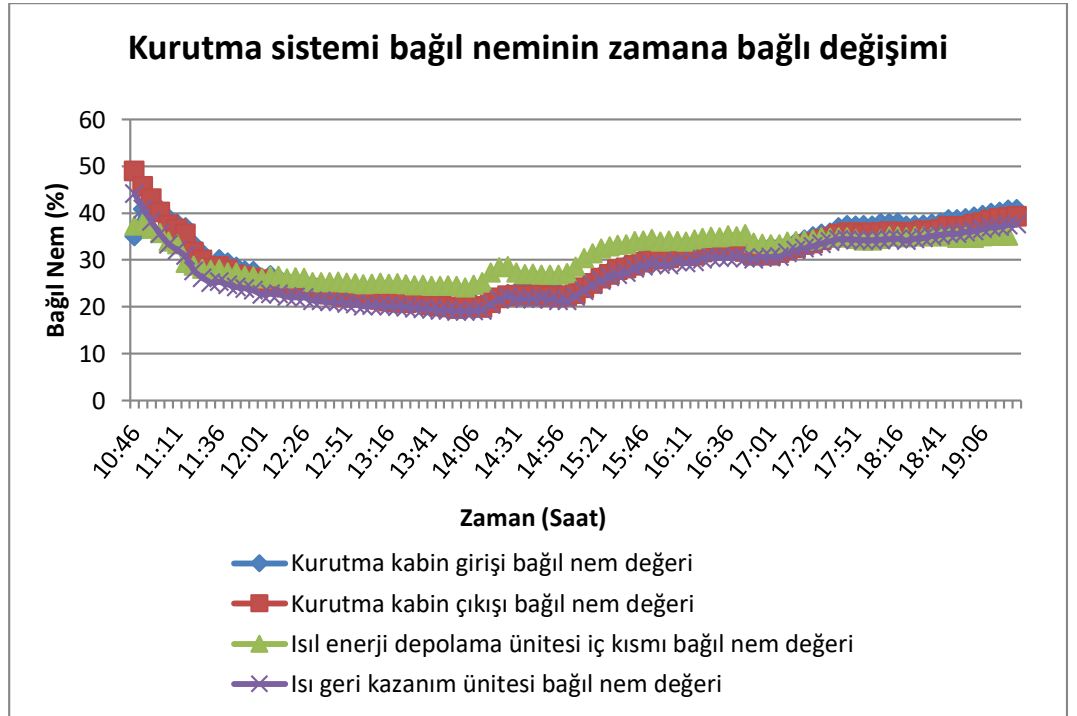
Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.41 - Şekil 5.42 'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.43'te, ısı geri kazanım ünitesi giriş hava hızı değeri Şekil 5.44'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



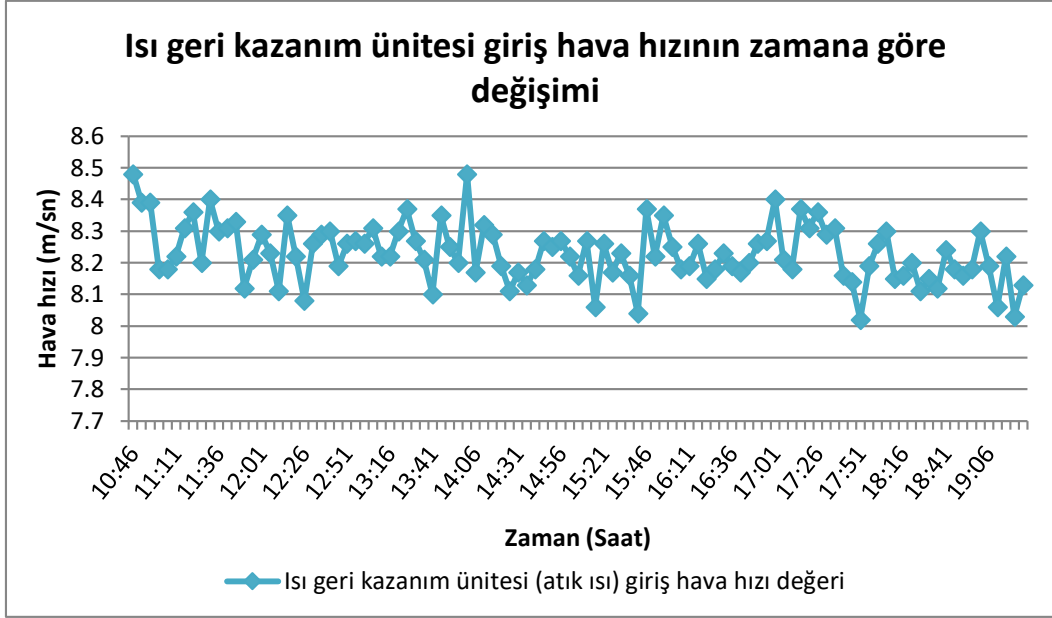
Şekil 5.41. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 5.42. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.

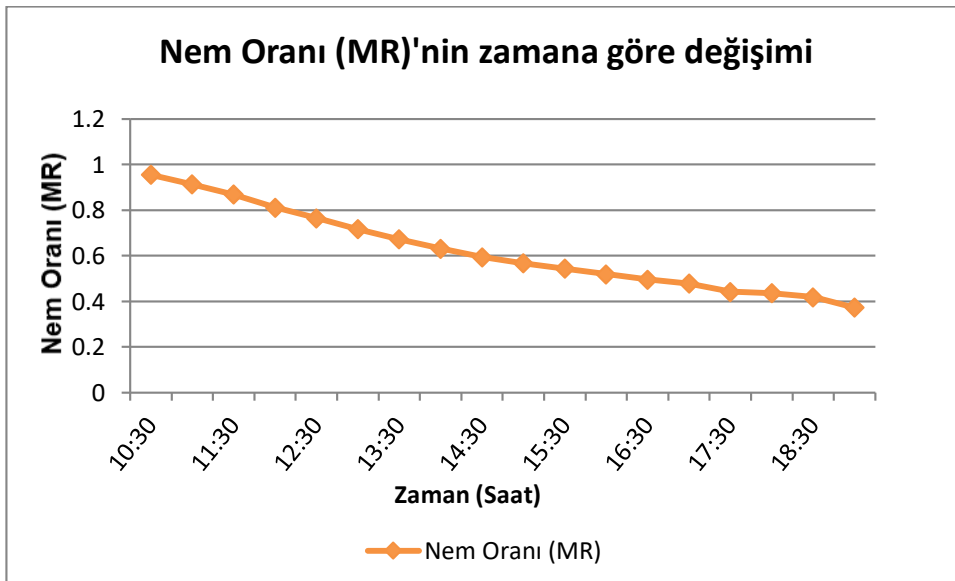


Şekil 5.43. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.

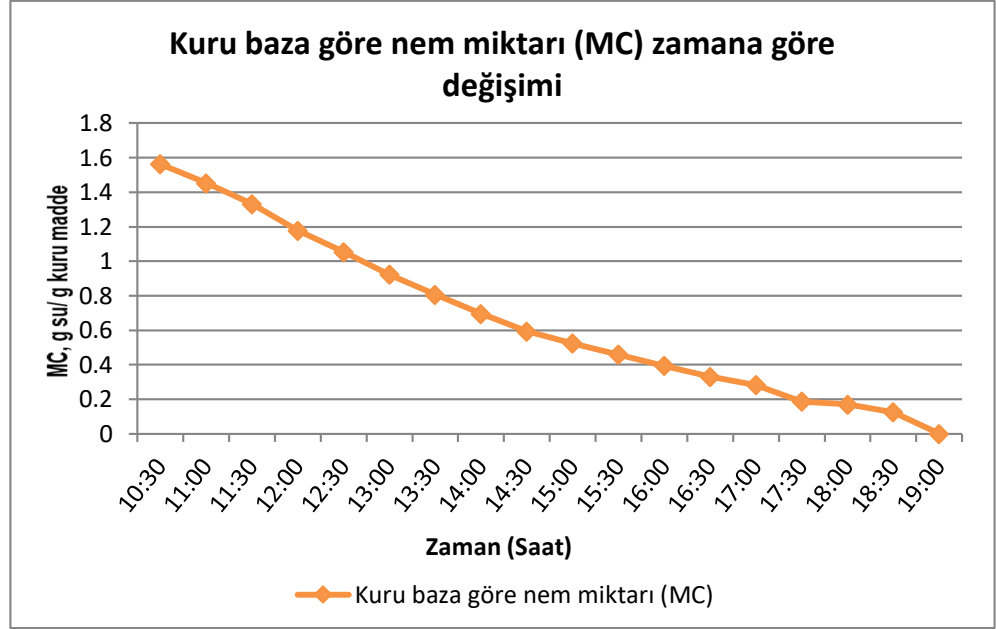


Şekil 5.44. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi.

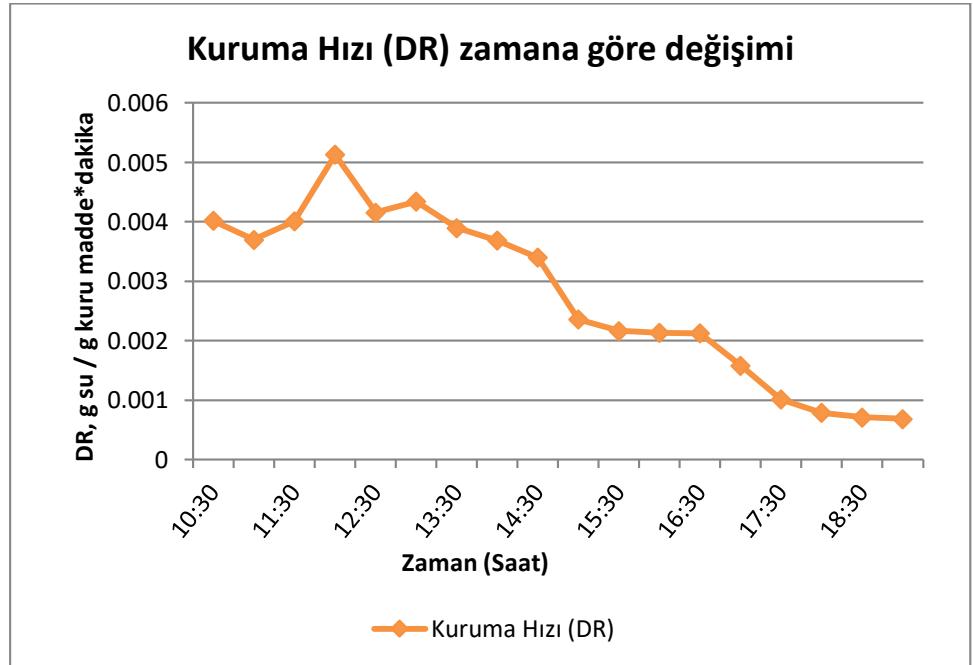
Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.45'te görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.46'da gösterilmiştir. Şekil 5.47'de ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.45. MR'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.46. MC'nin zamana göre değişimi.



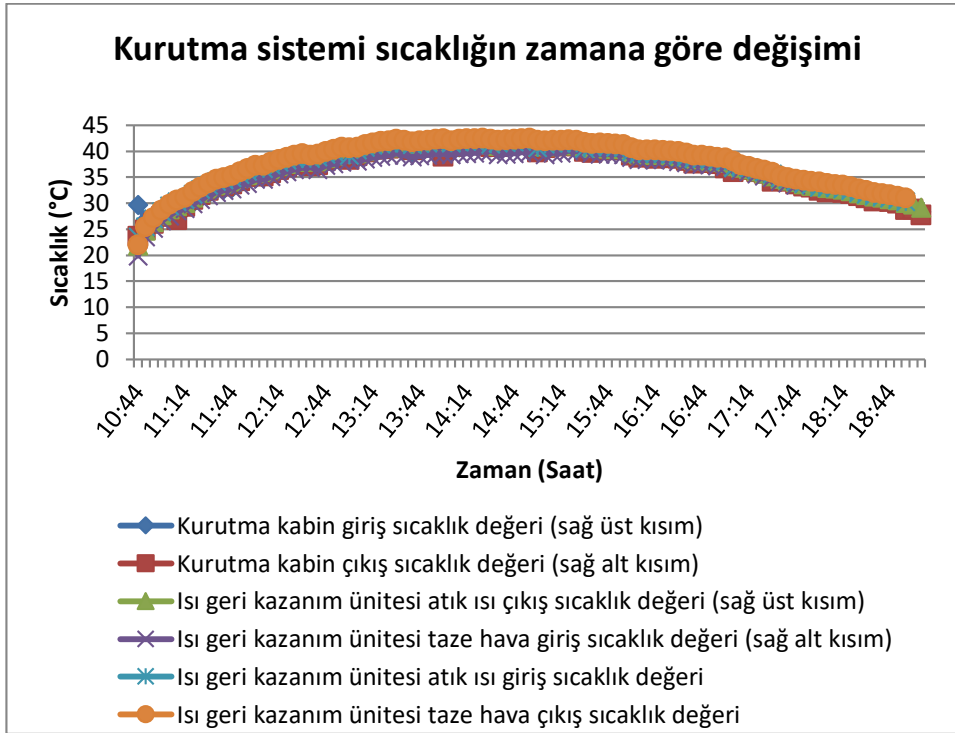
Şekil 5.47. DR'nin zamana göre değişimi.

5.2.6 6. kurutma deneyi sonuçları

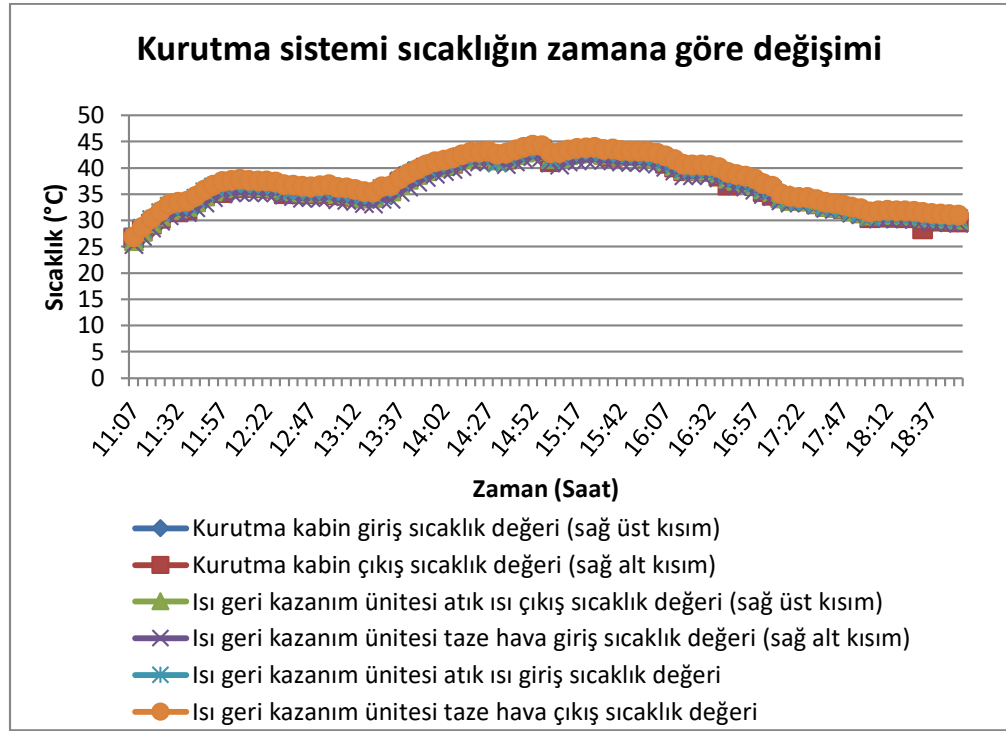
Altıncı gün gerçekleştirilen deneylerde diğer deneysel çalışmalardan farklı olarak toplamda 5123 gram armut 1 rafta 3 mm, 1 rafta 7 mm ve 1 rafta 9 mm

kalınlıkta olacak şekilde farklı kalınlıklarda dilimlenerek kurutulmuştur. Deney süresince sürekli değişen güneş ışınlamı verilerinden dolayı kurutma kabini içindeki sıcaklık 45,6°C'ye kadar ulaşmış ve kurutma kabinine havanın giriş ve çıkış bağıl nem değerlerinde önceki günlerde yapılan deneylere göre artış olduğu gözlemlenmiştir. Kurutma işlemi havanın kapalı olması ve hava sıcaklıklarının yüksek olmaması nedeniyle ilk gün tam anlamıyla kurumayan armutlar bir gece kabin içerisinde bekletilerek ertesi gün kurutmaya devam edilmiştir. Bu kurutma işlemi 3 günde tamamlanmıştır. 3 ve 5 mm armut dilimleri 2 günde, 10 mm armut dilimleri ise 3 günde kurumuştur. Kurutma işlemi sonrasında armutların toplam ağırlığı 679,76 gr olarak ölçülmüştür. 3, 5 ve 10 mm armut numunelerinin kuru baza göre nem içerikleri hesaplanmış olup grafiklerle gösterilmiştir.

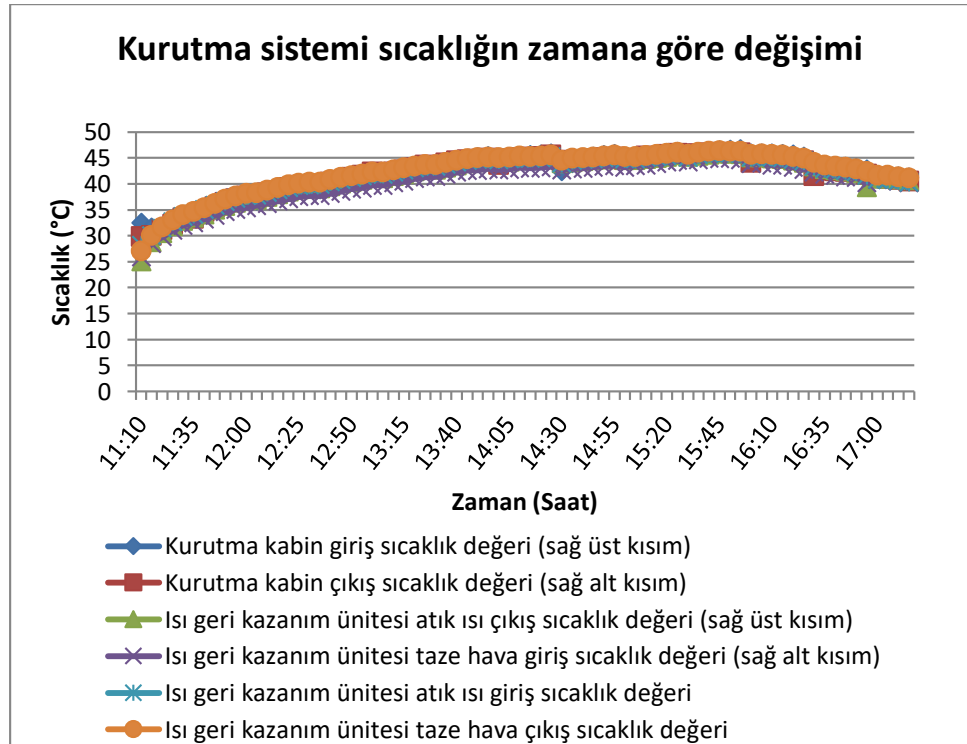
Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.48 - Şekil 5.49'da, bağıl nem değerleri Şekil 5.50'de, ısı geri kazanım ünitesi giriş hava hızı değeri Şekil 5.51'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



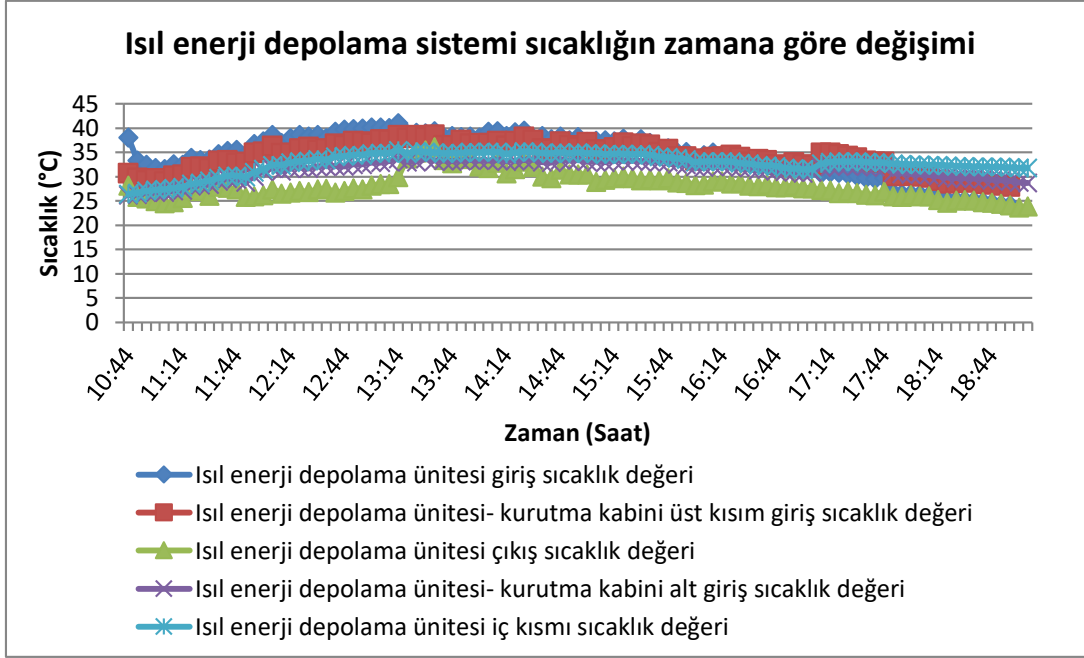
Şekil 5.48a. 6. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ilk gün).



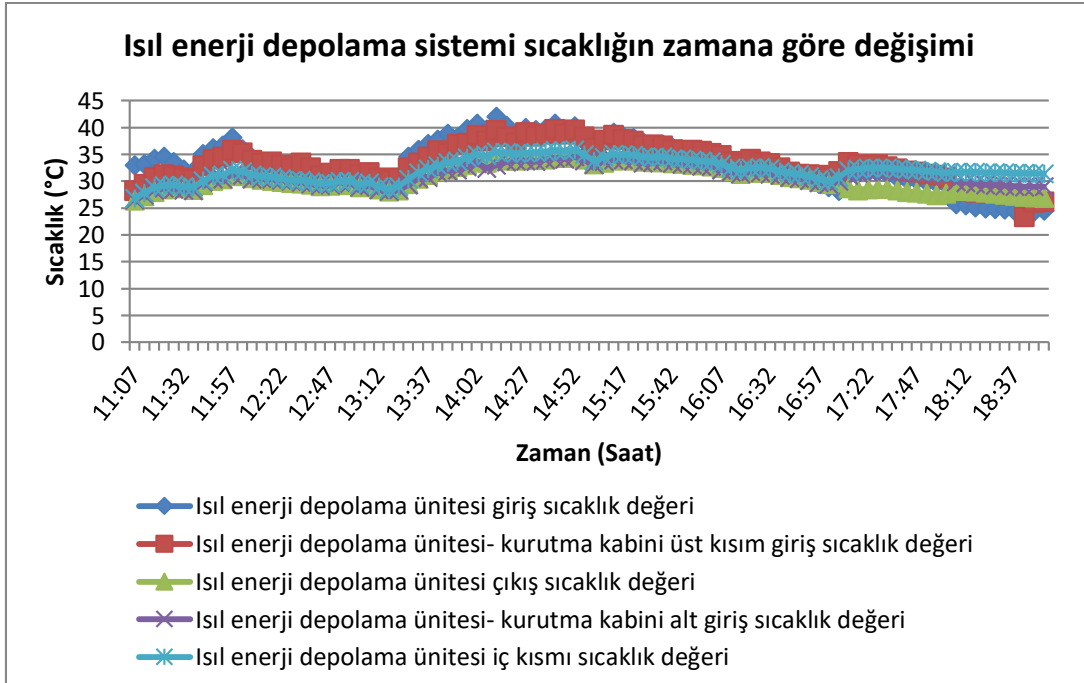
Şekil 5.48b. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ikinci gün).



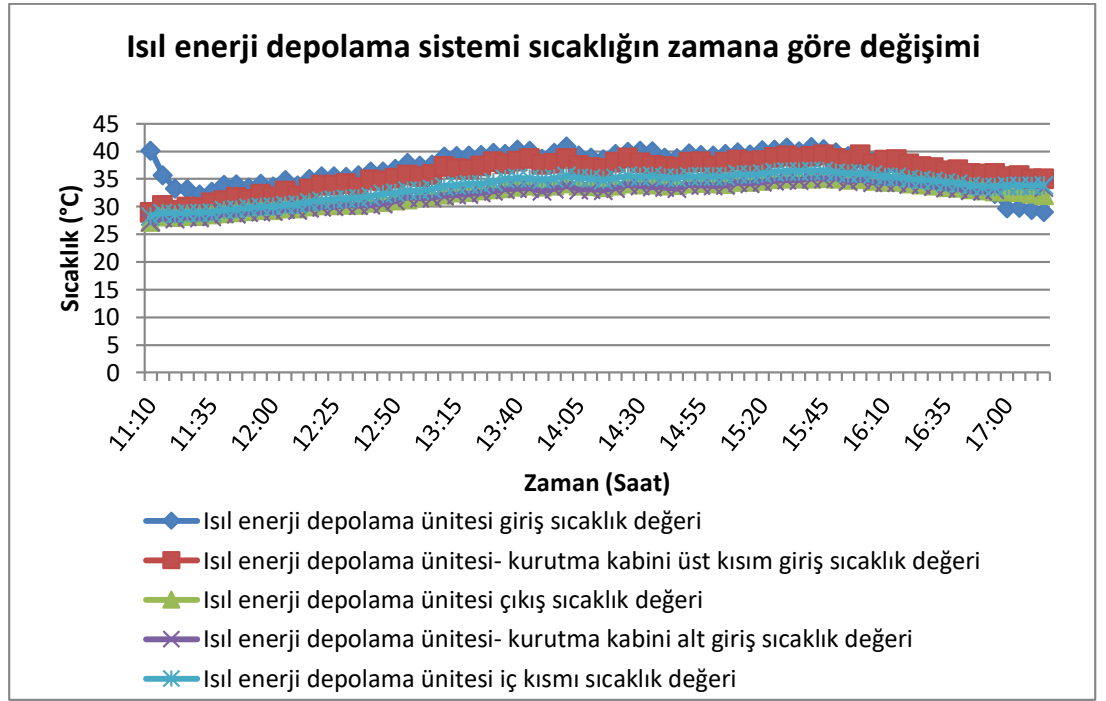
Şekil 5.48c. Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma üçüncü gün).



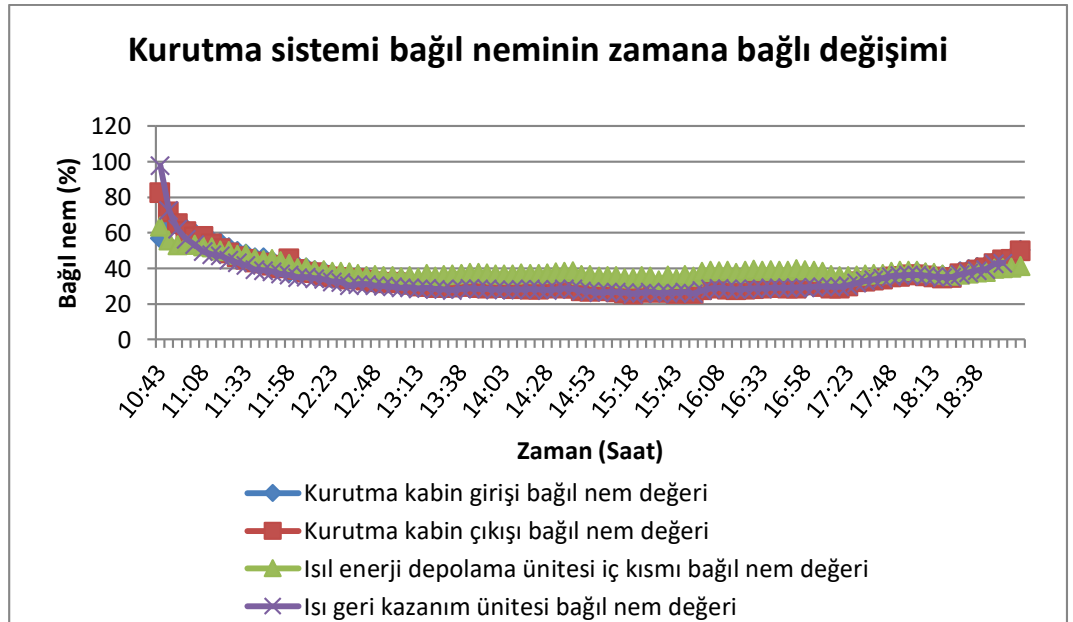
Şekil 5.49a. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ilk gün).



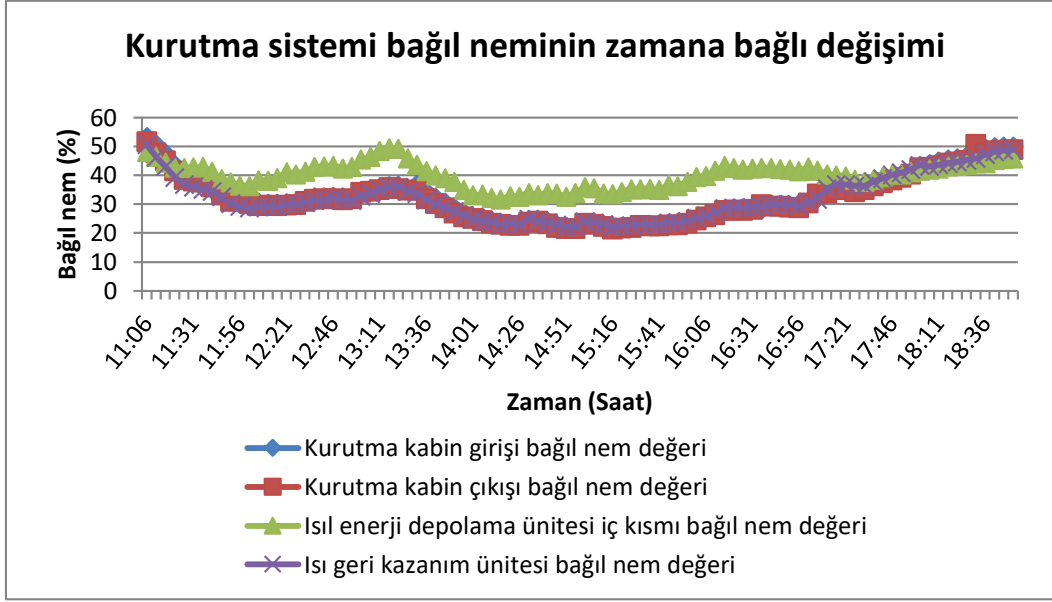
Şekil 5.49b. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ikinci gün).



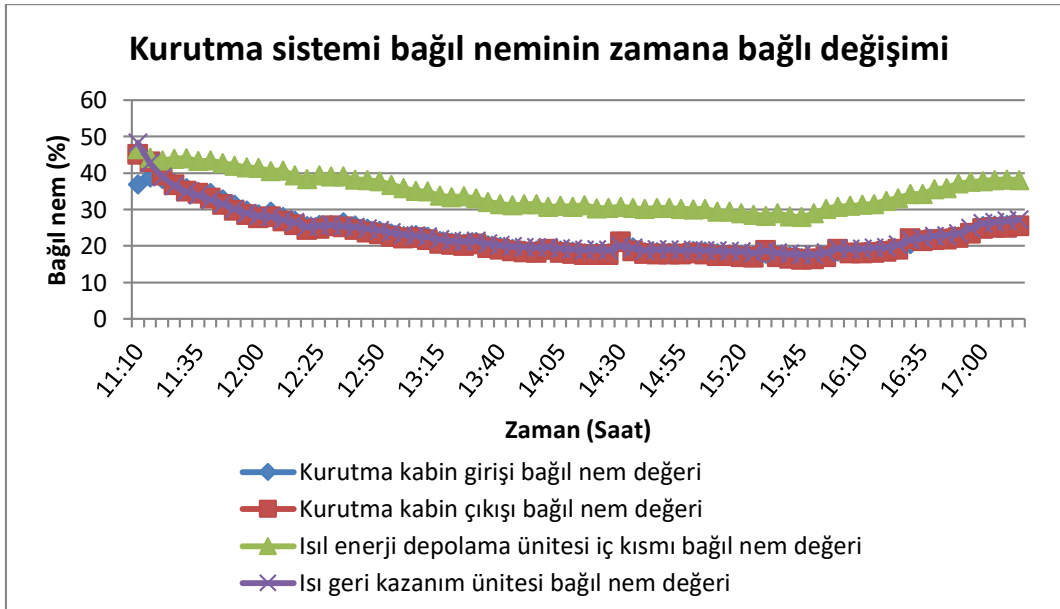
Şekil 5.49c. Isıl enerji depolama sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma üçüncü gün).



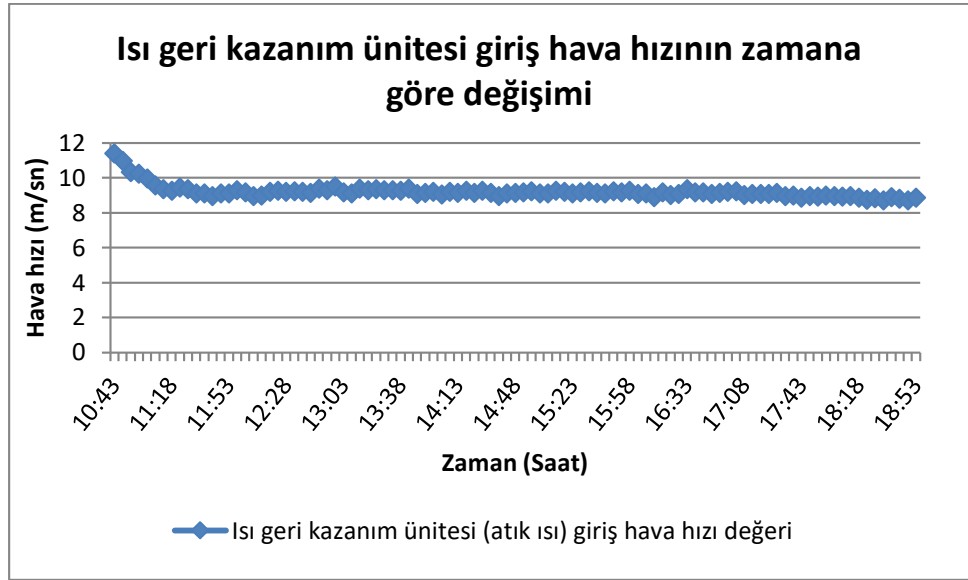
Şekil 5.50a. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ilk gün).



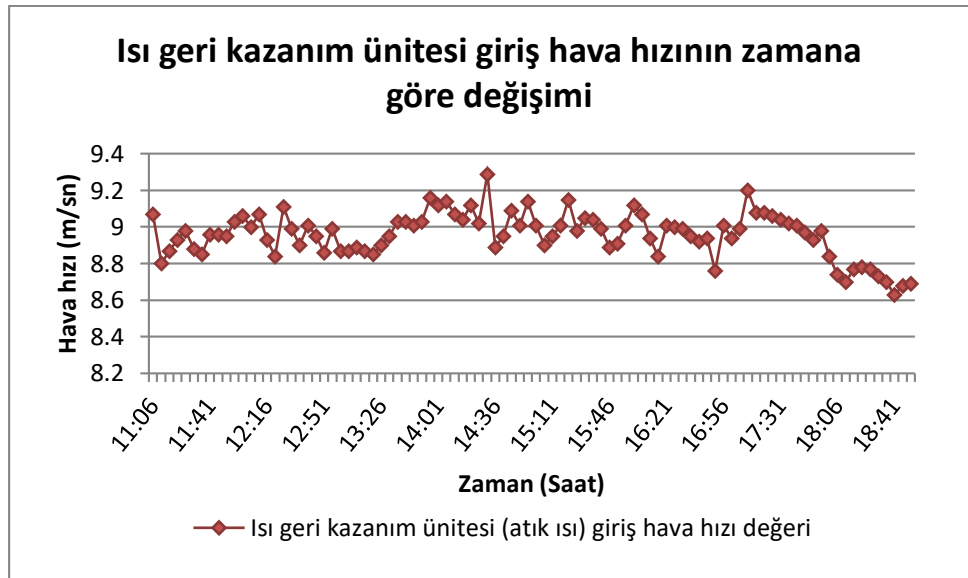
Şekil 5.50b. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma ikinci gün).



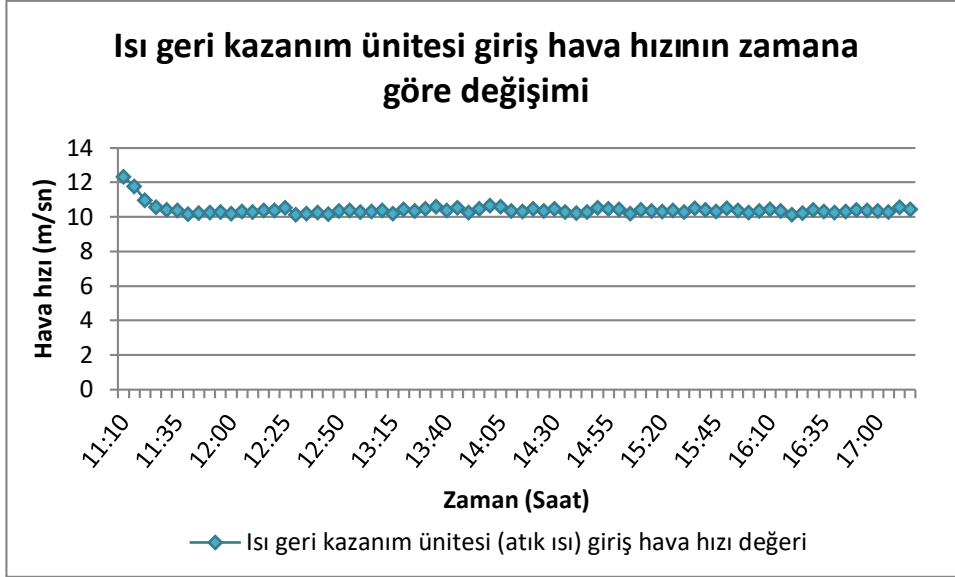
Şekil 5.50c. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi (6. Kurutma üçüncü gün).



Şekil 5.51a. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi (6. Kurutma ilk gün).

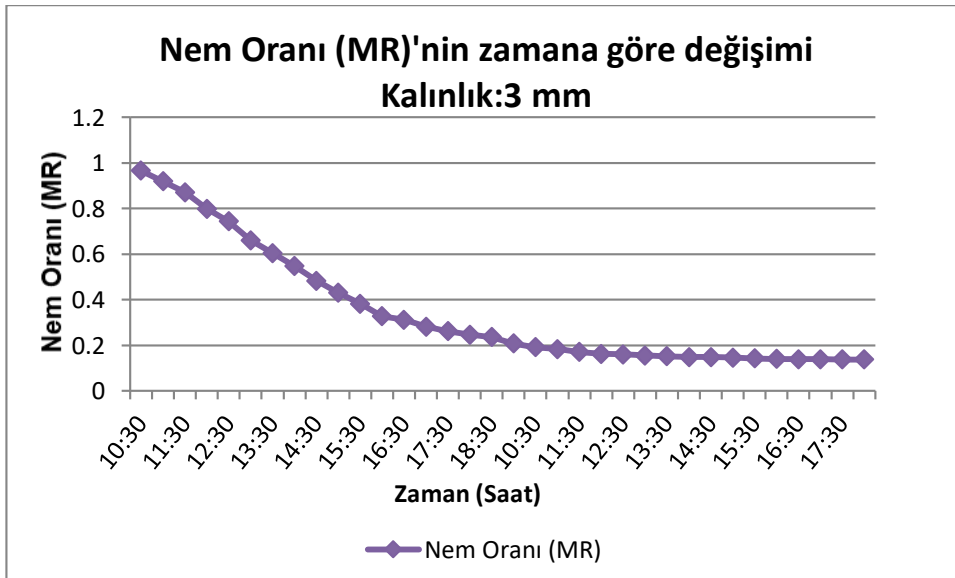


Şekil 5.51b. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi (6. Kurutma ikinci gün).

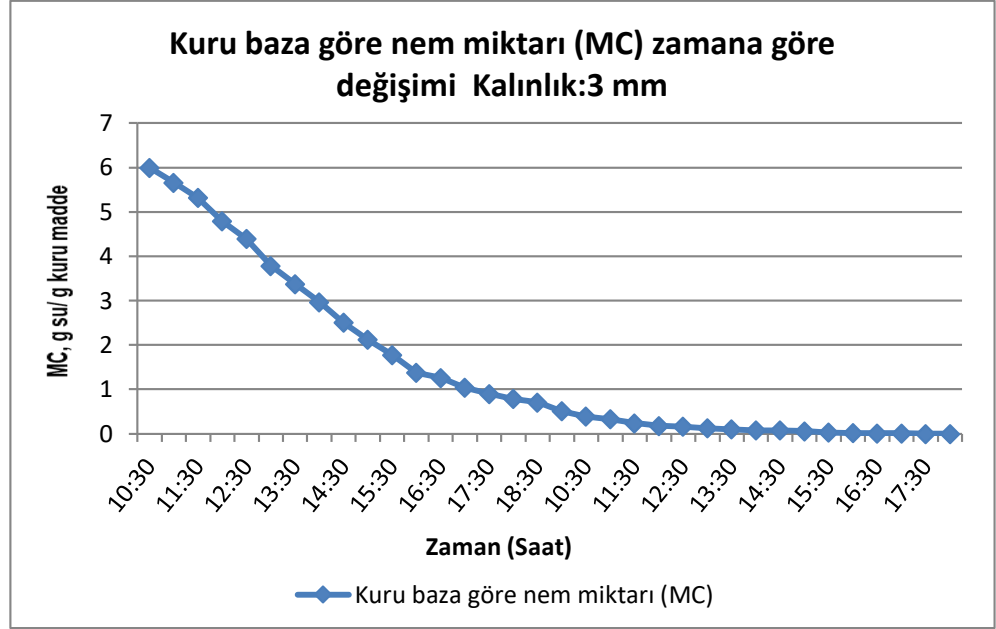


Şekil 5.51c. Isı geri kazanım ünitesi hava hızının zamana göre değişimi (6. Kurutma üçüncü gün).

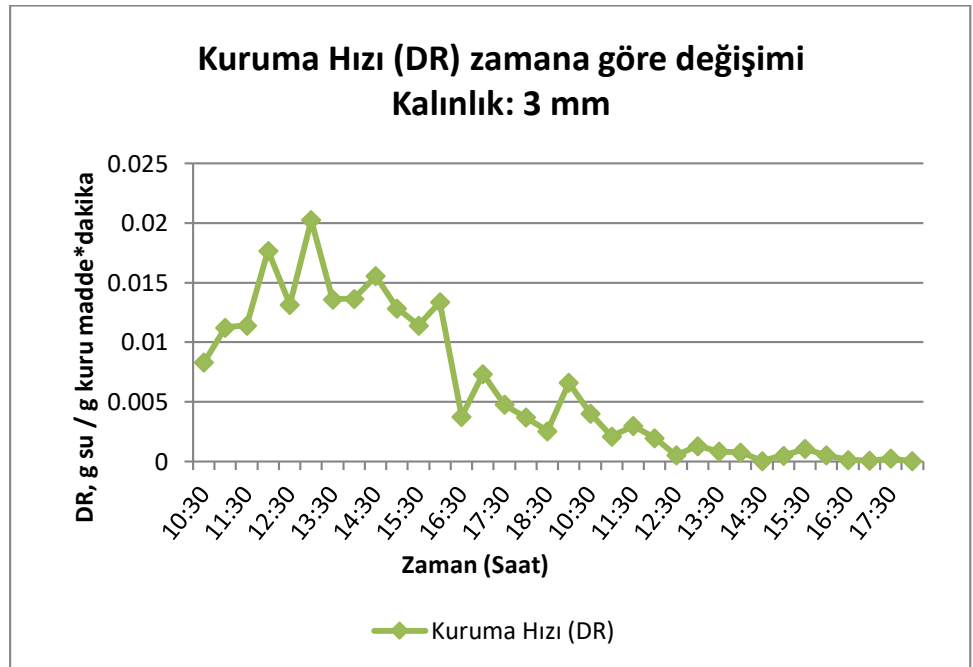
Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.52’de görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.53’te gösterilmiştir. Şekil 5.54’te ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



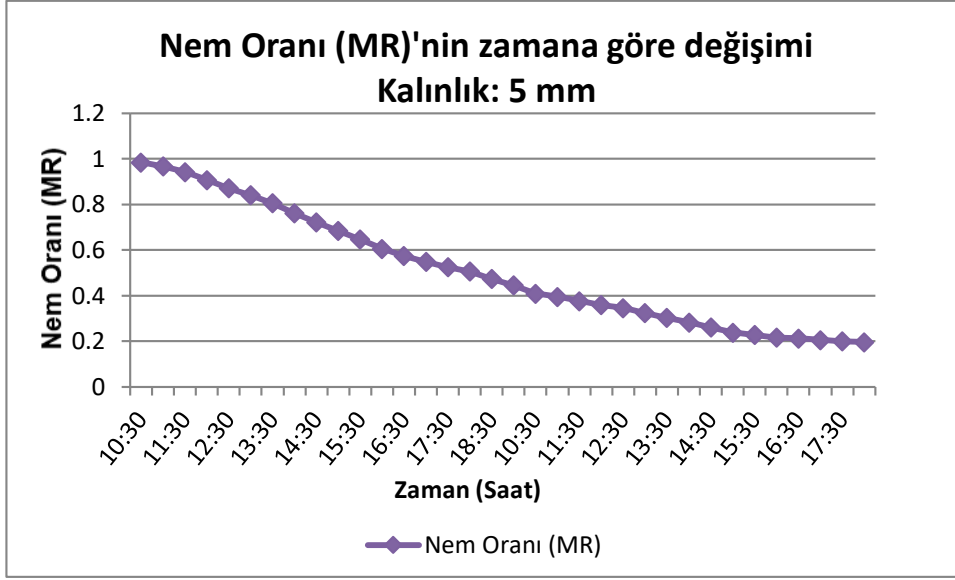
Şekil 5.52a. MR’nin zamana bağlı değişimi.



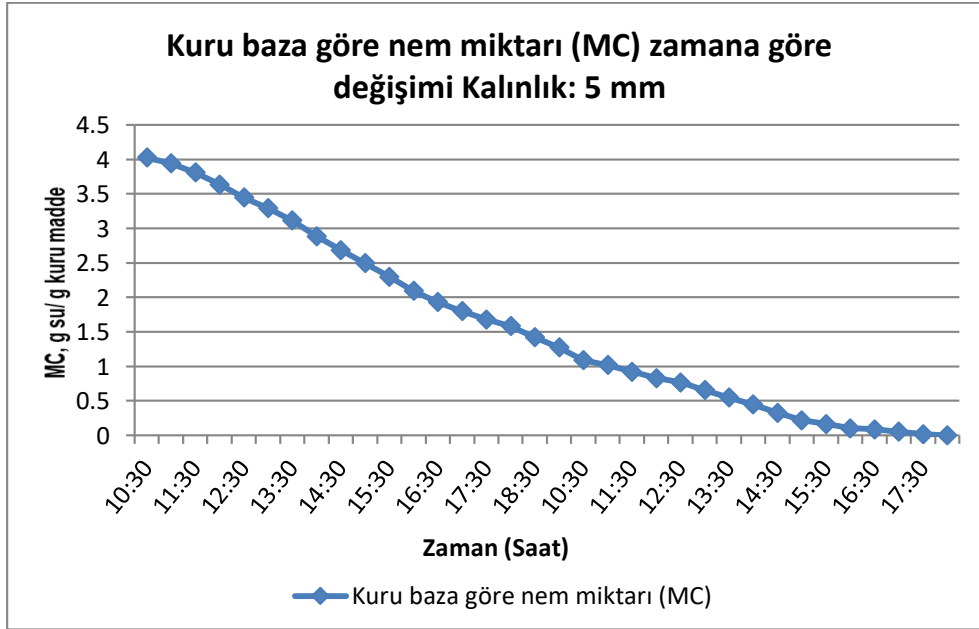
Şekil 5.52b. MC'nin zamana bağlı değişimi.



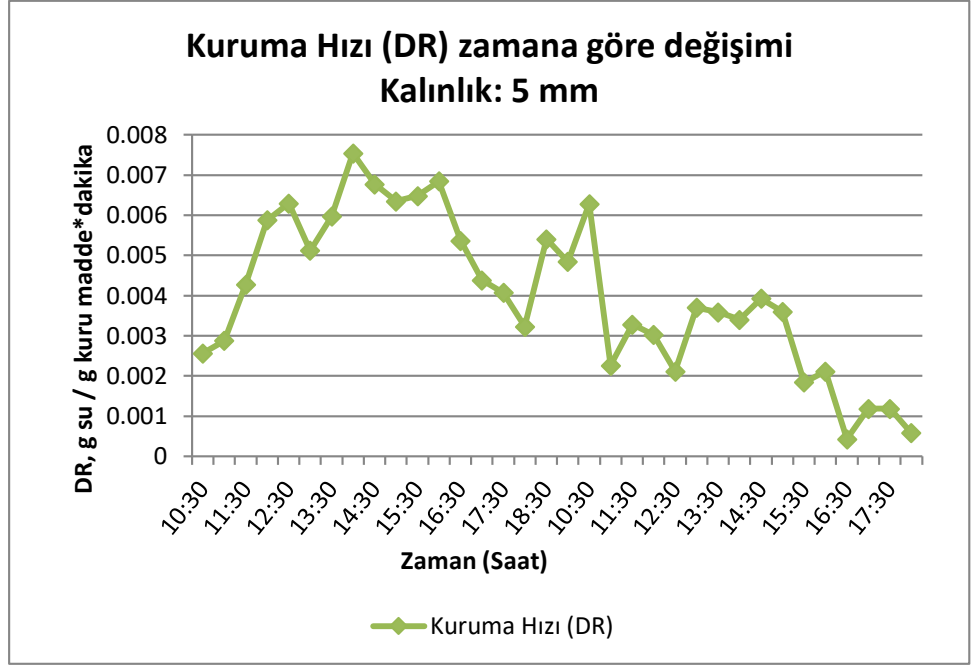
Şekil 5.52c. DR'nin zamana bağlı değişimi.



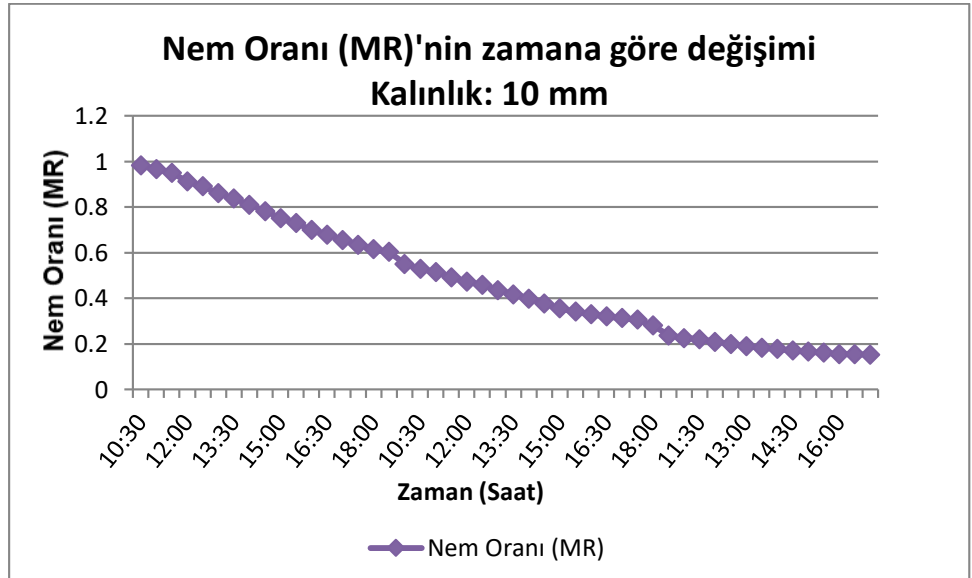
Şekil 5.53a. MR'nin zamana bağlı değişimi.



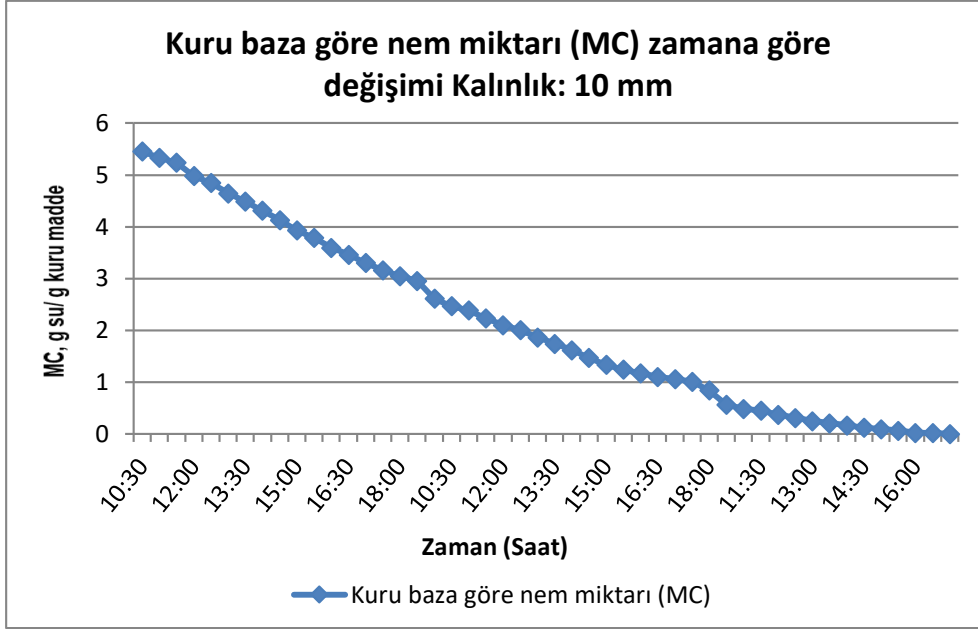
Şekil 5.53b. MC'nin zamana bağlı değişimi.



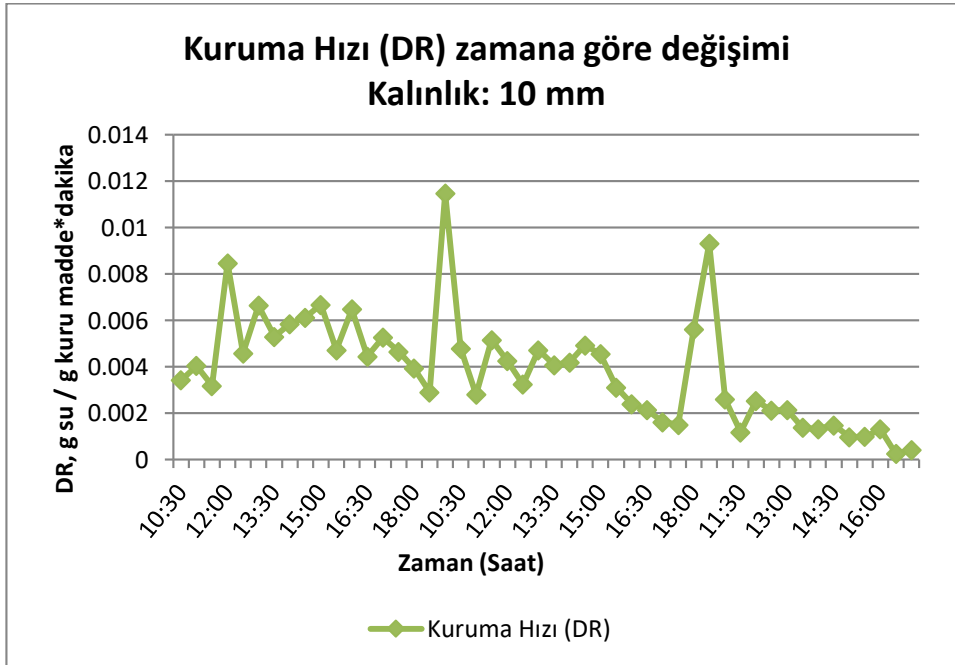
Şekil 5.53c. DR'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.54a. MR'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.54b. MC'nin zamana bağlı değişimi.



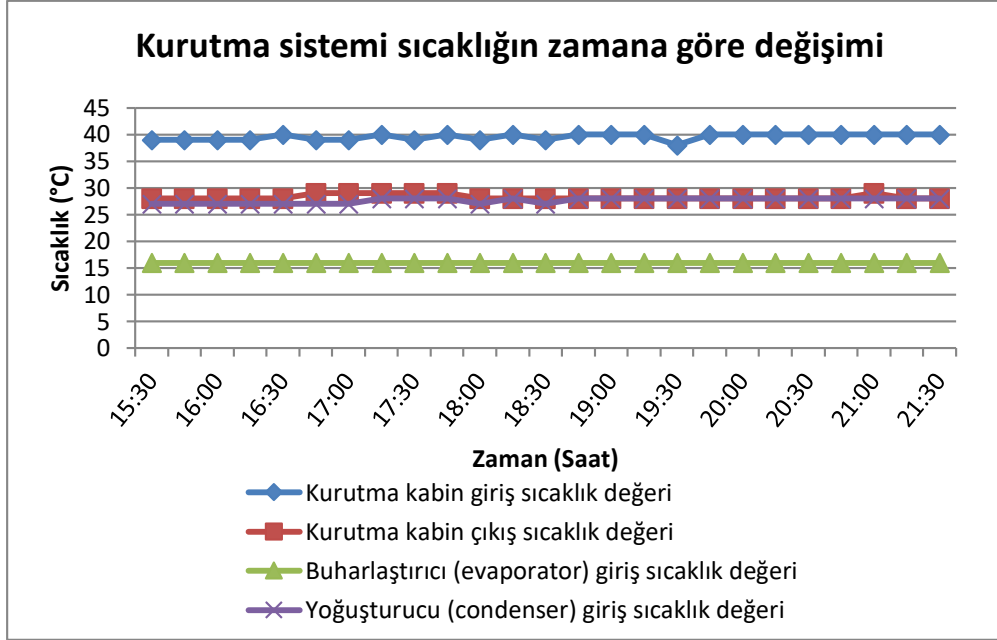
Şekil 5.54c. MC'nin zamana bağlı değişimi.

5.3 Isı Pompalı Kurutma Deneyleri Sonuçları

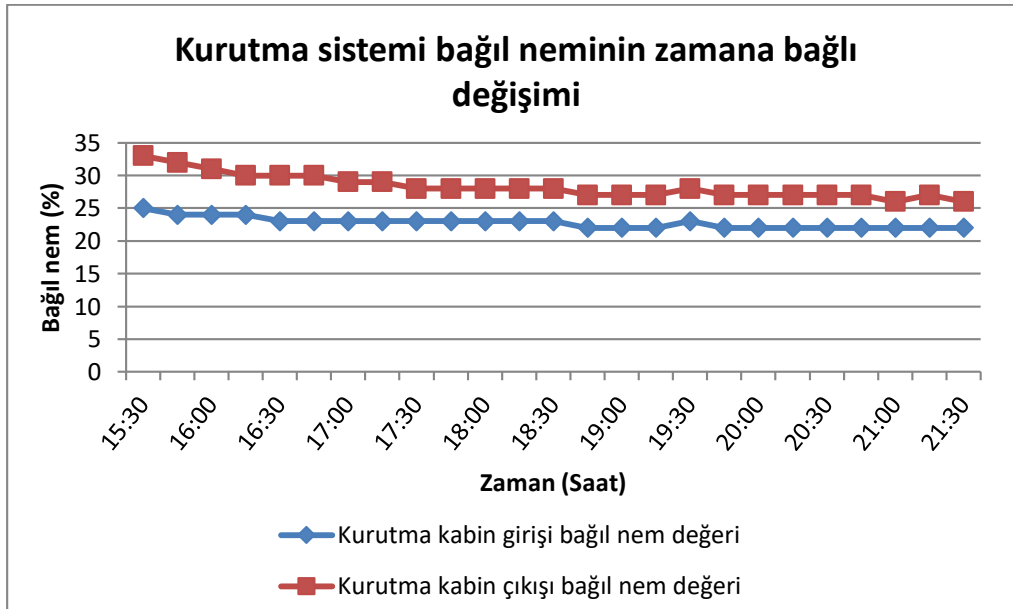
5.3.1 1. kurutma deneyi sonuçları

İlk gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin 2 rafı kullanılmış olup armutlar 3 ± 1 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Armutların çekirdekleri çıkartıldıktan sonra kurutma işlemine tabi armut numunelerinin çöpsüz ağırlığı 1413,78 gramdır. Kurutma işlemine 6 saat devam edilmiş olup kurutma işlemi sonrasında armutların toplam ağırlığı 208,13 gr olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 101,58 gr numune ağırlığı kurutma sonrasında 15,49 gr olduğu gözlemlenmiştir. Bu da numune ürün nem içeriğinin %15,2 olduğunu göstermektedir. Armut dilimlerinin kuru baza göre 5,5577 gsu/gkuru madde miktarından 0,02259 gsu/gkuru madde miktarına 6 saatte indirilmiştir. Kuru ağırlıkları belirlenen armut dilimleri ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulmuştur. Kurutma kabini içindeki sabit sıcaklık 40°C olarak ayarlanmıştır. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerlerinde büyük farklılıklar görülmemiştir. Ayrıca her rafta konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak rafların kuruma hızları belirlenmiştir.

Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.55'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.56'da verilen grafiklerde gösterilmiştir.



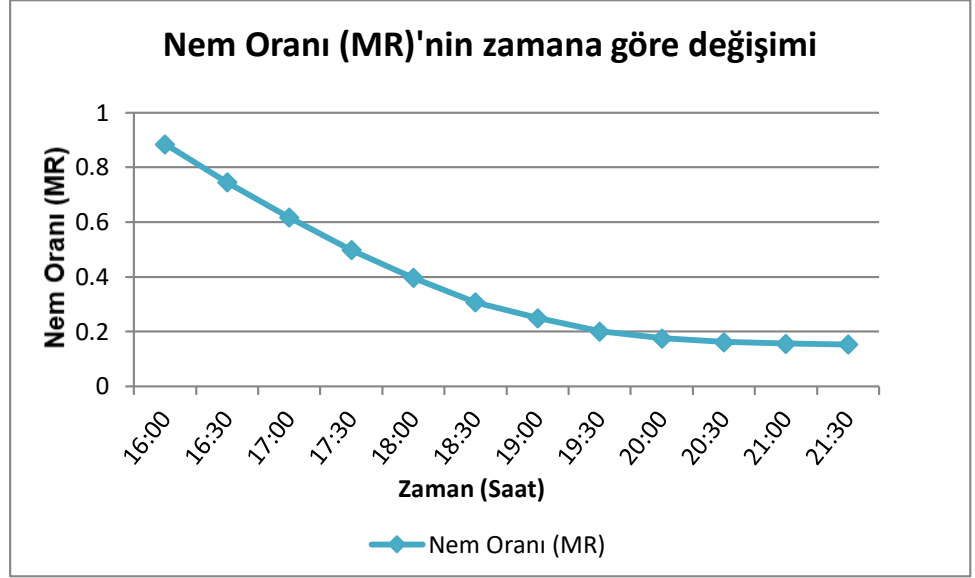
Şekil 5.55. Kurutma sistemi sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.



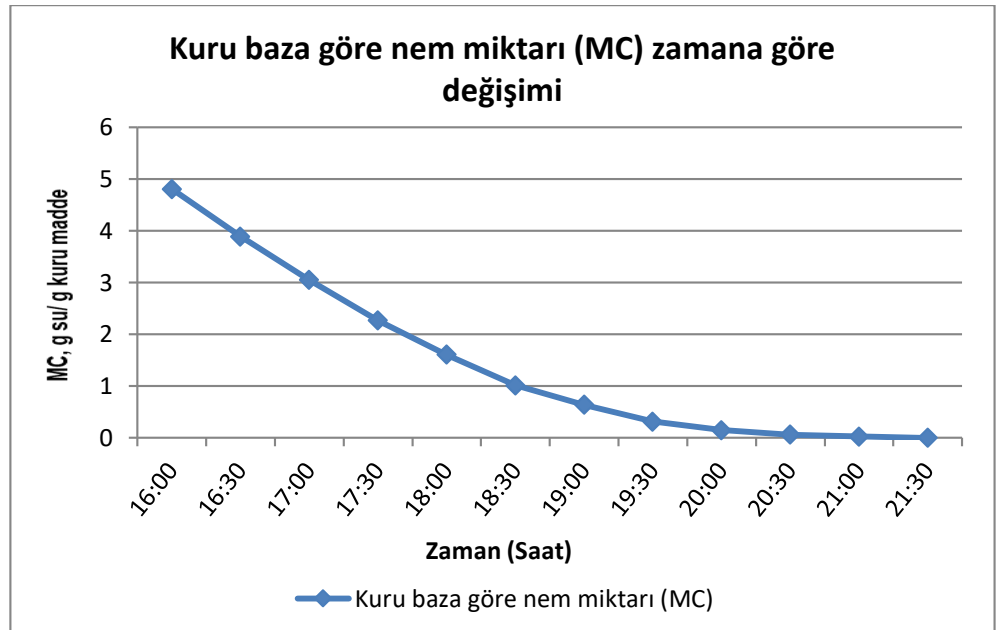
Şekil 5.56. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.

Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.57’de görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.58’de gösterilmiştir. Şekil 5.59’de ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR)

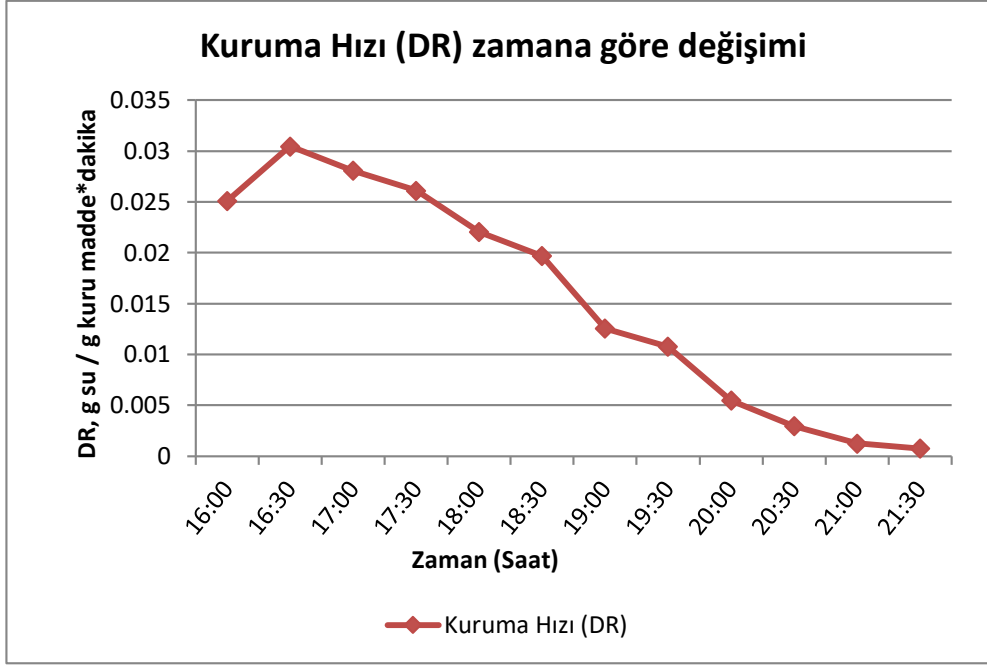
zamana göre değişimi gösterilmiştir. Ayrıca zamana bağlı artan enerji tüketimi Şekil 5.60’da görülmektedir.



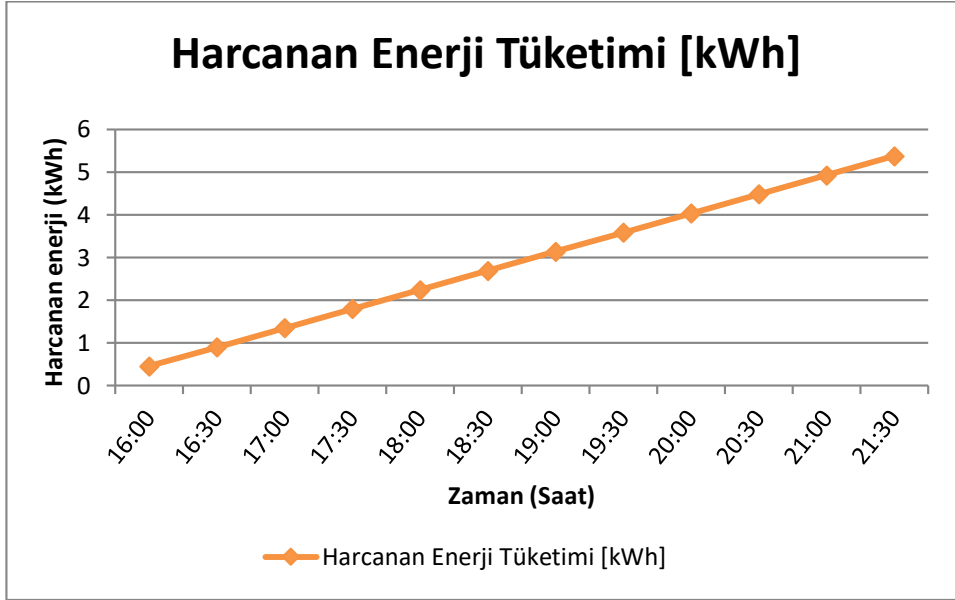
Şekil 5.57. MR'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.58. MC'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.59. DR'nin zamana bağlı değişimi.



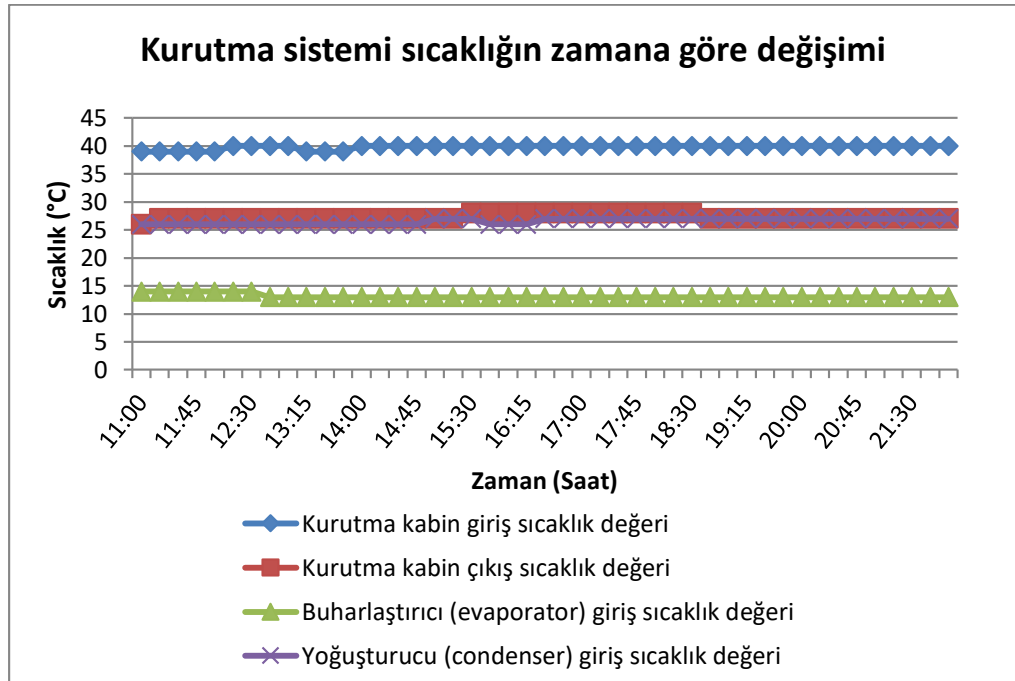
Şekil 5.60. Zamana bağlı artan enerji tüketim miktarı.

5.3.2 2. kurutma deneyi sonuçları

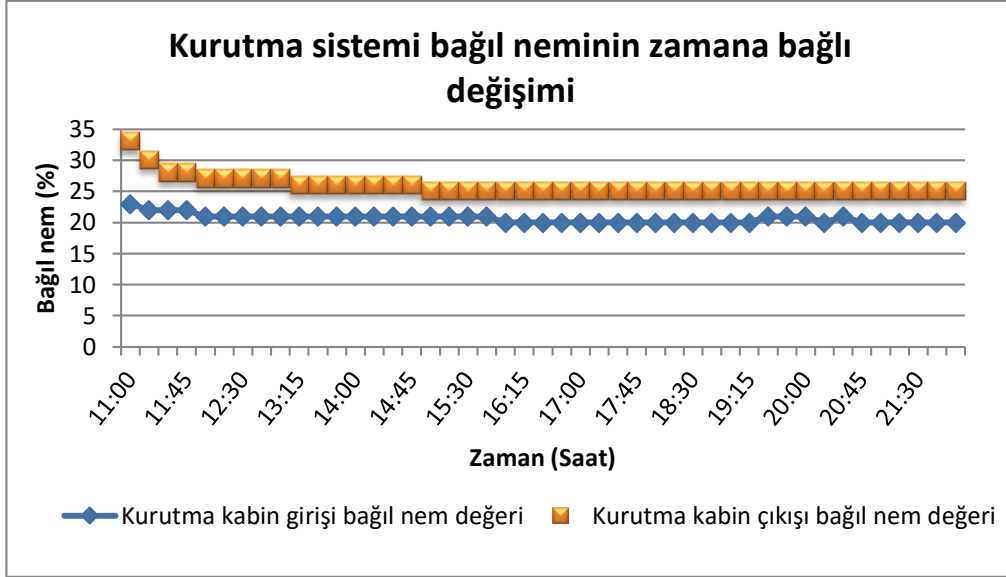
İkinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin 2 rafı kullanılmış olup armutlar 5 ± 2 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Armutların çekirdekleri çıkartıldıktan sonra kurutma işlemine tabi armut numunelerinin

çöpsüz ağırlığı 1972,7 gramdır. Kurutma işlemine 11 saat devam edilmiş olup kurutma işlemi sonrasında armutların toplam ağırlığı 289,17 gr olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 163,69 gr numune ağırlığı kurutma sonrasında 25,74 gr olduğu gözlemlenmiştir. Bu da numune ürün nem içeriğinin %15,7 olduğunu göstermektedir. Armut dilimlerinin kuru baza göre 5,3593 gsu/gkuru madde miktarından 0,009324 gsu/gkuru madde miktarına 11 saatte indirilmiştir. Kurutma kabini içindeki sabit sıcaklık 40°C olarak ayarlanmıştır. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerlerinde büyük farklılıklar görülmemiştir. Ayrıca her rafta konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak rafların kuruma hızları belirlenmiştir.

Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.61'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.62'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.

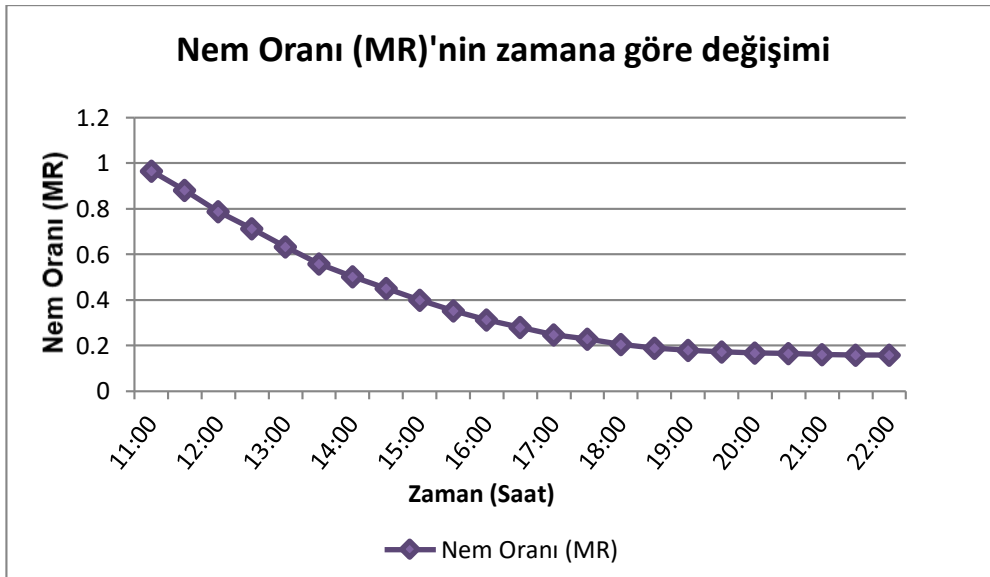


Şekil 5.61. Kurutma sistemi sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.

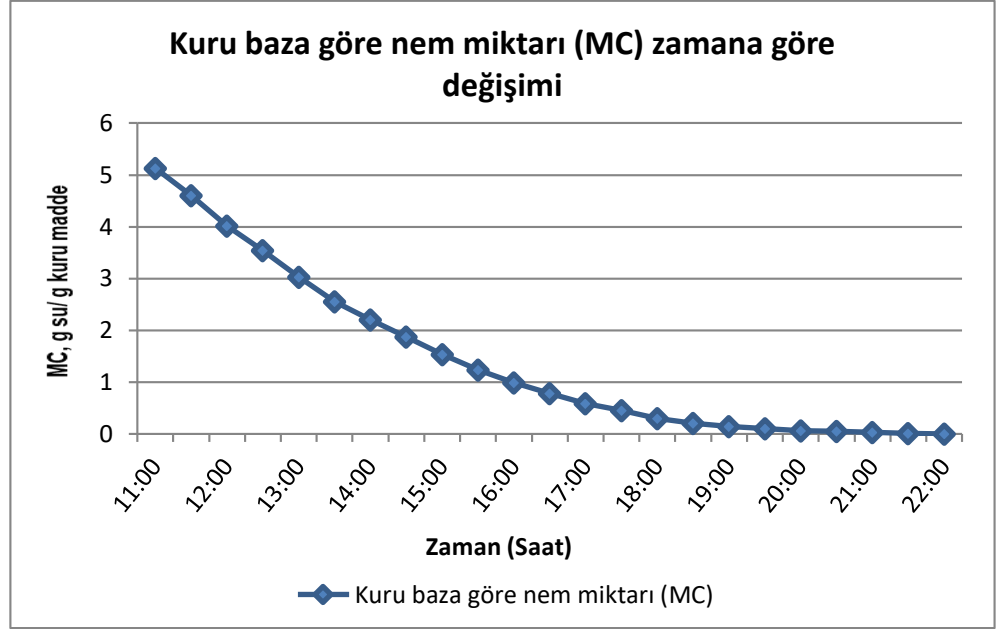


Şekil 5.62. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.

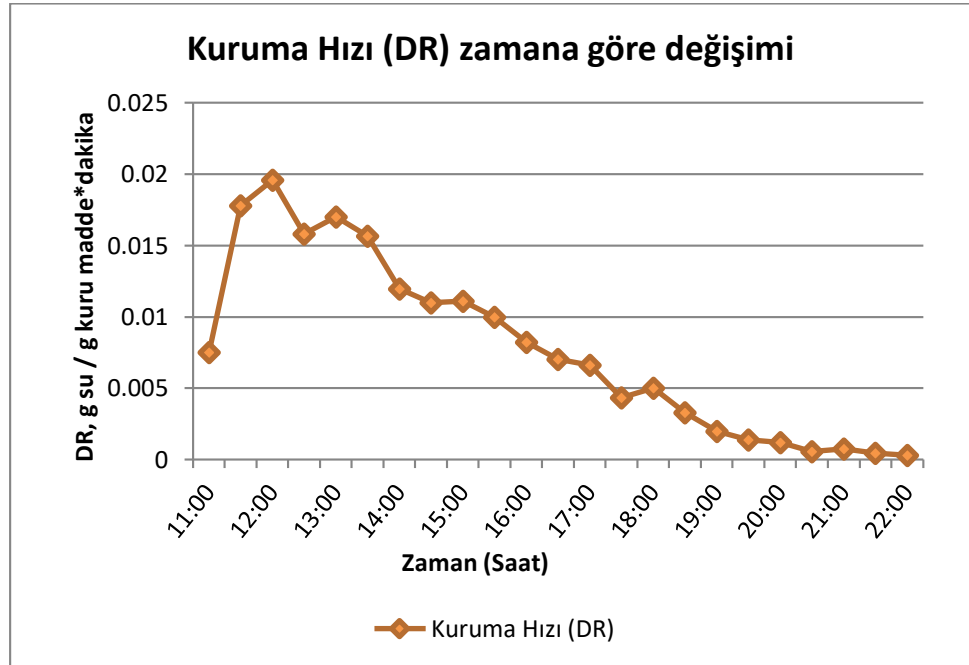
Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.63'te görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.64'te gösterilmiştir. Şekil 5.65'de ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR) zamana göre değişimi gösterilmiştir. Ayrıca zamana bağlı artan enerji tüketimi Şekil 5.66'de görülmektedir.



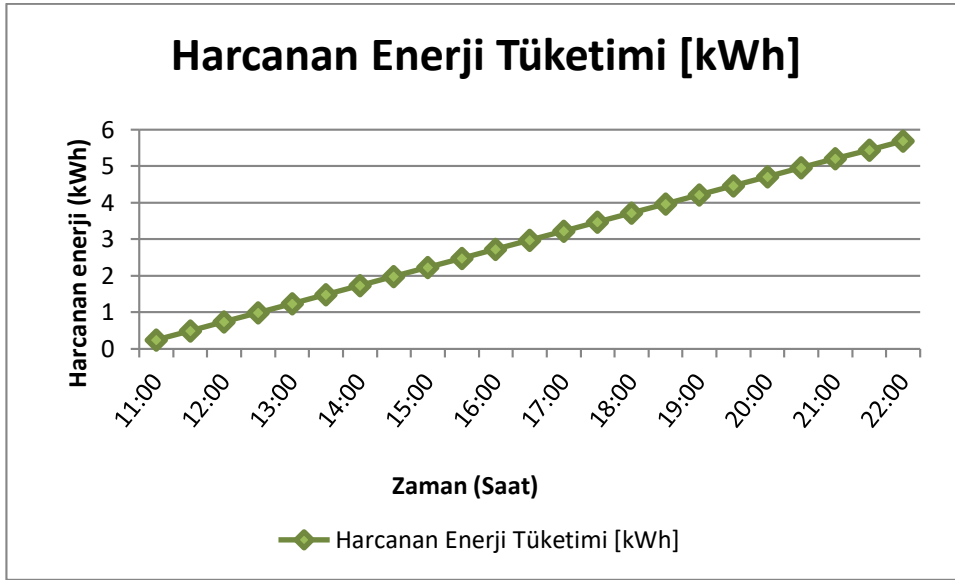
Şekil 5.63. MR'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.64. MC'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.65. DR'nin zamana bağlı değişimi.

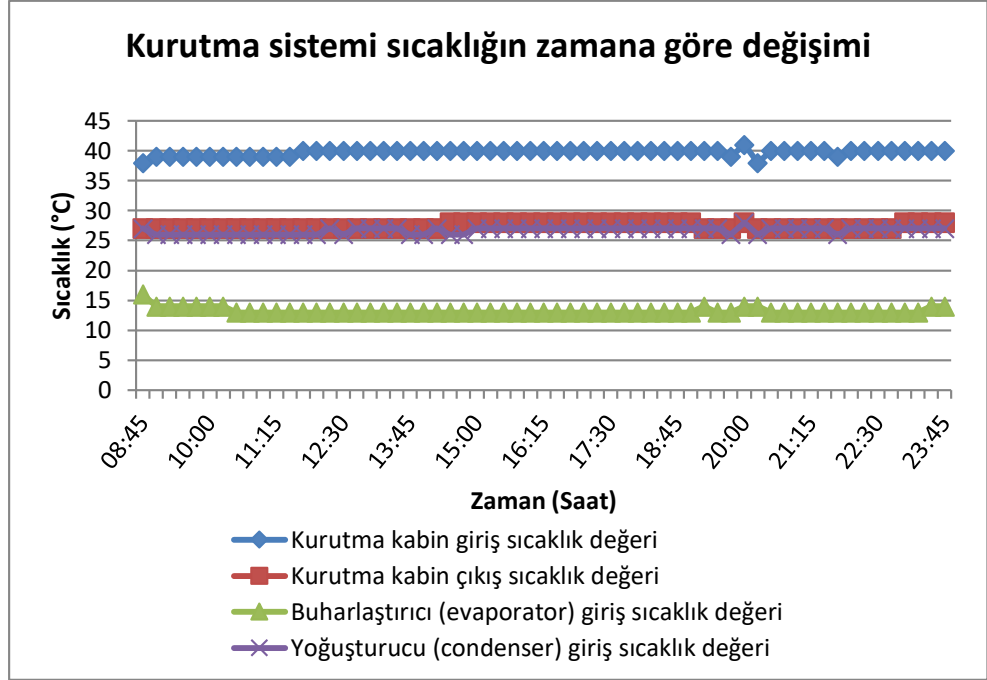


Şekil 5.66. Zamana bağlı artan enerji tüketim miktarı.

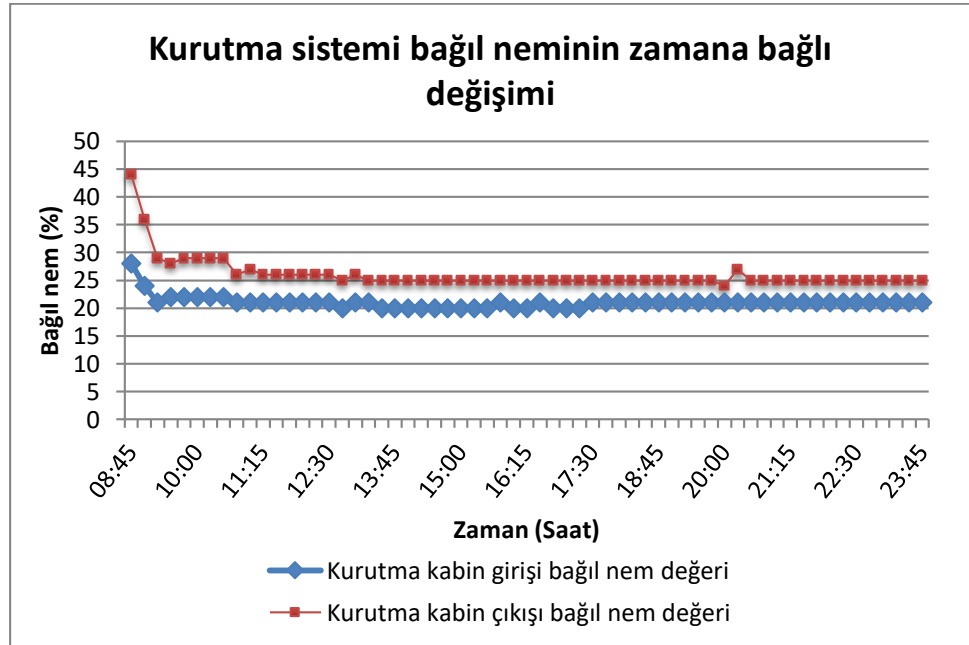
5.3.3 3. kurutma deneyi sonuçları

Üçüncü gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin 2 rafı kullanılmış olup armutlar 10 ± 3 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Armutların çekirdekleri çıkartıldıktan sonra kurutma işlemine tabi armut numunelerinin çöpsüz ağırlığı 2094,09 gramdır. Kurutma işlemine 15 saat devam edilmiş olup kurutma işlemi sonrasında armutların toplam ağırlığı 356,75 gr olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 231,72 gr numune ağırlığı kurutma sonrasında 39,14 gr olduğu gözlemlenmiştir. Bu da numune ürün nem içeriğinin %16,8 olduğunu göstermektedir. Armut dilimlerinin kuru baza göre 4,9202 gsu/gkuru madde miktarından 0,01558 gsu/gkuru madde miktarına 15 saatte indirilmiştir. Kurutma kabini içindeki sabit sıcaklık 40°C olarak ayarlanmıştır. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerlerinde büyük farklılıklar görülmemiştir. Ayrıca her rafta konan armut dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak rafların kuruma hızları belirlenmiştir.

Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.67'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.68'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.

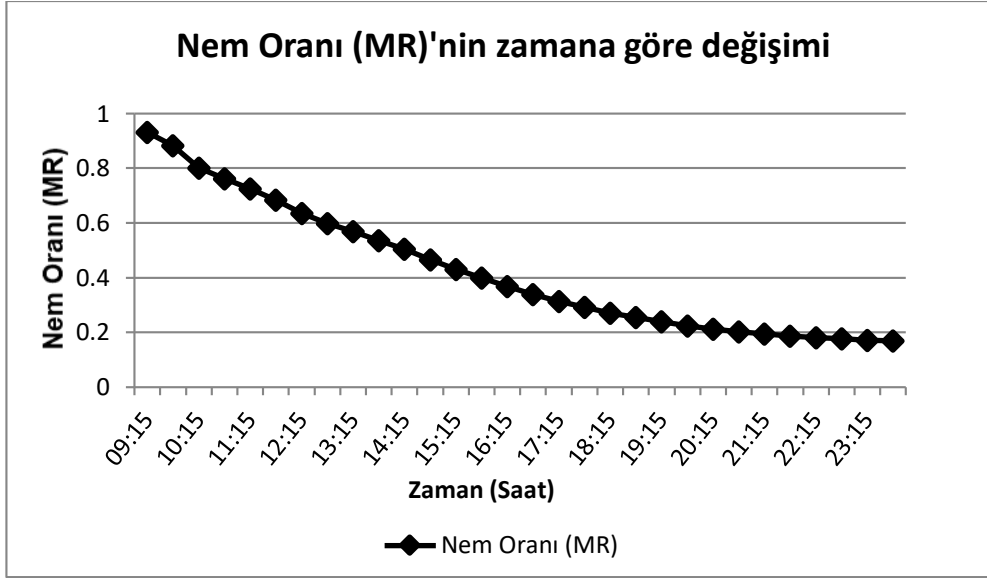


Şekil 5.67. Kurutma sistemi sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.

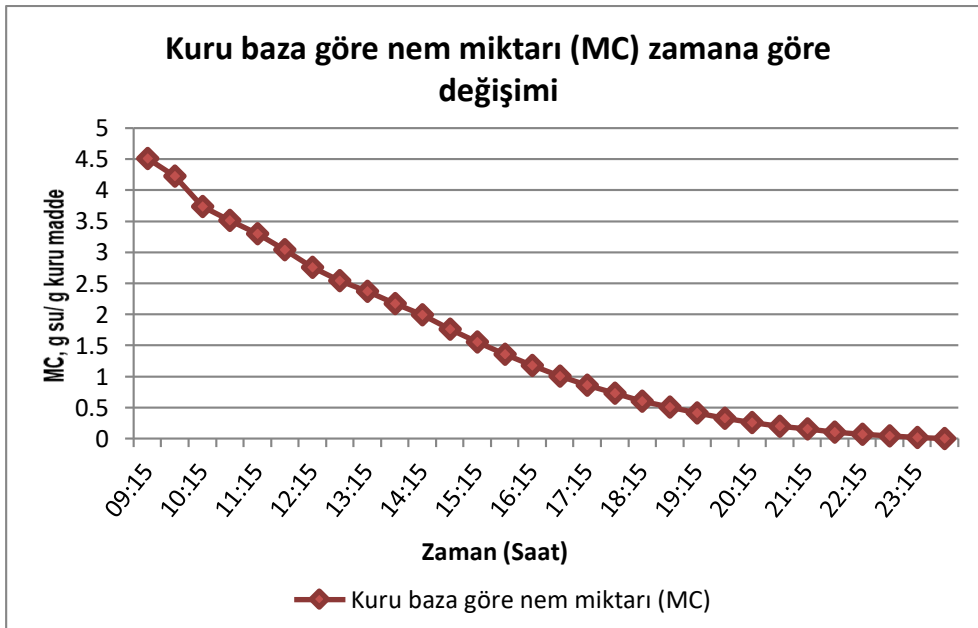


Şekil 5.68. Kurutma sistemi giriş ve çıkışındaki bağıl nem (%) değerlerinin zamana göre değişimi.

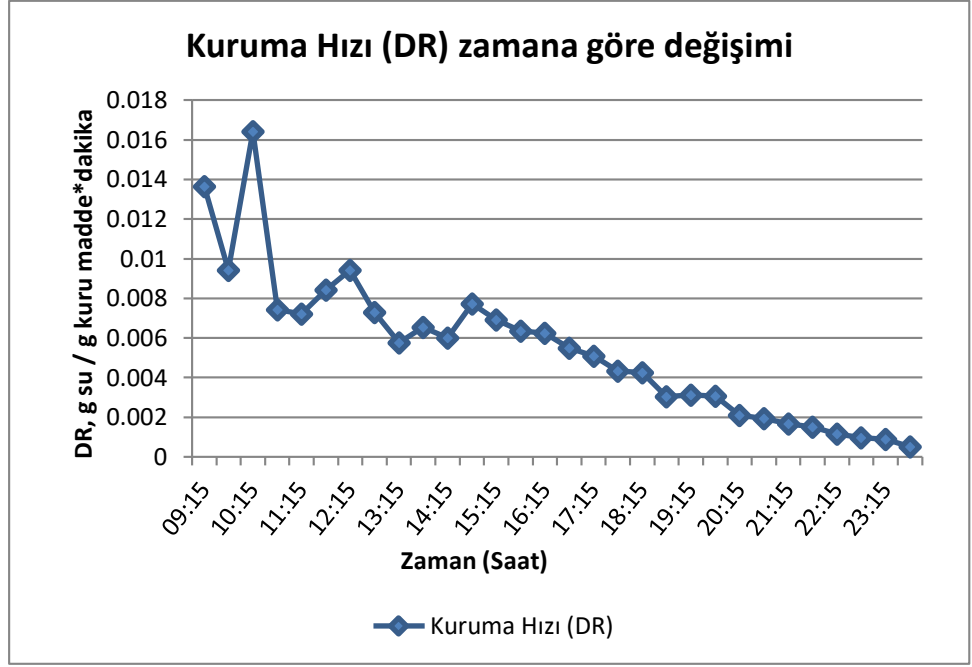
Deney sonucunda armut dilimlerinin nem oranının (MR) kurutma süresine göre değişimi Şekil 5.69’da görülmektedir. Ayrıca armut dilimlerinin kuru esasa göre zamana göre nem miktarı değişimi (MC) Şekil 5.70’de gösterilmiştir. Şekil 5.71’de ise armut dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin kuruma hızının (DR) zamana göre değişimi gösterilmiştir. Ayrıca zamana bağlı artan enerji tüketimi Şekil 5.72’de görülmektedir.



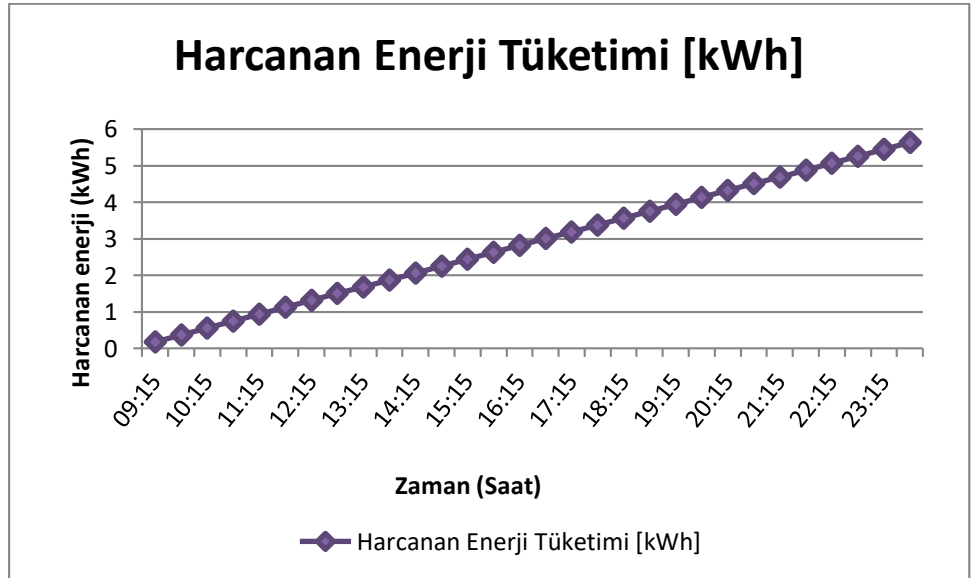
Şekil 5.69. MR’nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.70. MC’nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.71. DR'nin zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.72. Zamana bağlı artan enerji tüketim miktarı.

5.4 Kurutulmuş Ürün Gıda Analizi Sonuçları

Kurutma deneyleri sonucunda elde edilen numunelerin gıda kalitesi bakımından değerlendirilmek üzere numuneler Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'ne iletilmiş ve burada kurutulmuş armutlara koku, nem içeriği ve su aktivitesi gibi testler uygulanmıştır. Kurutulmuş armut dilimlerine ilişkin yapılan bu testleri kısaca şu şekilde açıklamak mümkündür:

5.4.1 Nem tayini

Nem tayini gıda işleme ve gıda kontrolünde en fazla kullanılan temel analizlerdendir. Nem (su) miktarı gıdanın dayanıklılığını etkileyen önemli bir faktördür. Bir gıdada kuru madde miktarı o gıdadaki su miktarı ile ters orantılıdır. Gıdadaki su miktarı arttıkça kuru madde miktarı azalır. Su miktarı azaldıkça da kuru madde miktarı artar. Sabit sıcaklıkta gıdanın nem içeriği;

- Kendini çevreleyen su buharı ile dengeye gelene kadar değişim gösterir.
- Gıda denge noktasına geldiğinde nem almaz veya nem kaybetmez. Buna gıdanın denge nem içeriği denir.

Deneyler sonucunda elde edilen kurutulmuş armut numunelerinin nem tayininde bulunurken Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü Temel İşlemler labvatuarında bulunan RADWAG WAGI ELEKTRONICZE markalı MA 50.R model nem ölçüm cihazı (Şekil 5.73) kullanılmıştır. Şekil 5.74'te görüldüğü üzere armut numuneleri küçük küçük parçalara ayrılarak cihaz içerisinde bulunan petri kabına yerleştirilmiştir. Petri kabına koyulan ürün miktarına göre 20-40 dk arasında değişen zamanlarda numunelerin nem içeriği ölçülmüştür.



Şekil 5.73. Nem içeriği ölçüm cihazı.



Şekil 5.74. Küçük parçalara ayrılmış armut numuneleri.

Ölçülen nem içeriği yüzde olarak Tablo 5.1’de görülmektedir.

Tablo 5.1. Armut numunelerinin nem içeriği

	Deney No	Armut Numune Kalınlığı	Nem İçeriği (%)
Güneş Destekli Kurutma Sistemi	1	3 mm	12,837
	2	3 mm	12,926
	3	5 mm	9,153
	4	5 mm	10,219
	5	10 mm	12,014
	6	3 mm	11,703
		5 mm	14,646
		10 mm	16,444
Isı Pompalı Kurutma Sistemi	1	3 mm	12,621
	2	5 mm	11,567
	3	10 mm	18,197

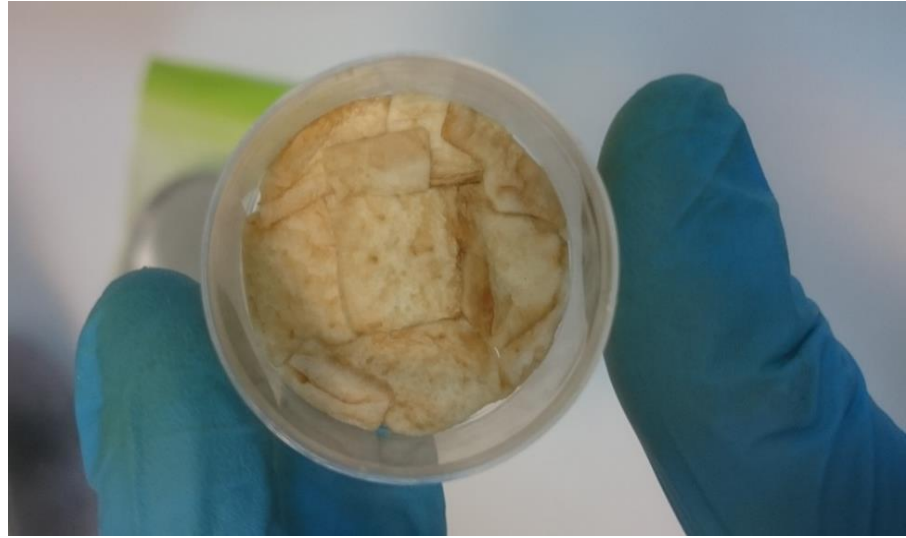
5.4.2 Su aktivitesi tayini

Gıdaların işleme ve depolamada uğradıkları bozulmalar ve kalite kayıpları arasındaki bağıntılar en iyi şekilde su aktivitesi ile izah edilir. Gıdadaki suyun buhar basıncının aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına oranına su aktivitesi denir. Denge bağıl nemi ise gıdaların atmosferden aldıkları veya verdikleri suyun bağıl nem dengesini gösterir. Ayrıca denge bağıl nemi ise numunenin dengede olduğu ortama ait bir özelliktir. Genelde kurutulmuş meyvelerde yaklaşık olarak su aktivitesi değeri $a_w = 0,6-0,7$ arasında değişmektedir.

Kurutulmuş armut dilimlerinin su aktivitesi, ± 0.001 hassasiyete sahip Şekil 5.75’te görüldüğü üzere su aktivitesi ölçüm cihazı (Testo AG 400, Germany) kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, yaklaşık 1–2 gr dilimlenmiş armut örneği hızlı bir şekilde cihazın plastic kabının yüzeyini kaplayacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 5.76). Su aktivitesi değerinde 0.001’den az bir değişim olduğunda, sistemin dengeye ulaştığı kabul edilmiş ve cihazın göstergesinden su aktivitesi değeri okunmuştur. Tablo 5.2’de su aktivitesi tayinine ilişkin deney sonuçları yer almaktadır.



Şekil 5.75. Su aktivitesi ölçüm cihazı.



Şekil 5.76. Su aktivitesi ölçümü için hazırlanan armut örneği.

Tablo 5.2'de su aktivitesi tayinine ilişkin ölçüm sonuçları yer almaktadır.

Tablo 5.2. Armut numunelerinin su aktivitesi

	Deney No	Armut Numune Kalınlığı	Su Aktivitesi (aw)
Güneş Destekli Kurutma Sistemi	1	3 mm	0,576 (27,3°C)
	2	3 mm	0,571 (27,6°C)
	3	5 mm	0,523 (27,6°C)
	4	5 mm	0,544 (26,9°C)
	5	10 mm	0,56 (27,5°C)
	6	3 mm	0,556 (27,1°C)
		5 mm	0,628 (26,5°C)
		10 mm	0,666 (26,1°C)
Isı Pompalı Kurutma Sistemi	1	3 mm	0,587 (25,95°C)
	2	5 mm	0,591 (25,9°C)
	3	10 mm	0,645 (26°C)

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında güneş enerjisi destekli ısı enerji depolamalı meyve kurutma sisteminde armut kurutulmuştur. Bunun yanı sıra sisteme entegre edilen reküperatör ünitesi (çapraz akışlı ısı değiştiricisi) ile sistem içinde meydana gelen atık ısının geri kazanımı sağlanmıştır. Ayrıca reküperatör ünitesinin ısı analizinde Java programlama dili kullanılmıştır. Öncelikle bu sisteme yönelik COMSOL programında kurutulan armut dilimi üzerinde kütle ve ısı transferi olayları irdelenmiştir. Benzer şekilde ısı enerji depolama sisteminde kullanılan parafin malzeme için zamana bağlı sıcaklık değişimlerini, depolanan enerji miktarını PYTHON programlama dili kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan bu simülasyon çalışmaları deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarına ilişkin program kodları Ek-A'da verilmiştir.

İlk yapılan deneysel çalışmalarda armutlar yıkanıp çekirdek yuvaları temizlendikten sonra kesme makinesi kullanılarak 3 mm kalınlıkta dilimlenip ve tepsilere yerleştirilmiştir. Daha sonraki deney çalışmalarında ise 5-10 mm arasında değişen farklı kalınlıklarda armut dilimleri kurutulmuştur. Kurutma denemeleri dilimlenmiş armutların yaş baza göre %83,1 nem içeriğinden %20 nem içeriğine kadar düşürülmeye çalışılmıştır. Bazı deneylerde hava kapalı ve rüzgarlı olduğu için armut dilimlerindeki nem içeriği %20'nin altına düşürülememiştir. Yapılan deneylerden kurutma ve ısı enerji depolama sistemlerine ilişkin elde edilen veriler excelde tablolar halinde oluşturulmuştur.

TSE armut kurusu için standart değerler oluşturmuştur. Bu standartlarda (TSE 3689) kurutulacak ürünün ilk ve son nem değeri, kurutma sonrasındaki renk ve biçim yönünden kıstaslar verilmektedir. Bu çalışmada 4 adet kurutma tepsisi kullanılmış olup yapılan deneylerde sadece 4 rafta 5-7 kg arasında değişen miktarlarda armut kurutulmuştur. 5-7 kg arasında değişen miktarlardaki armutların hazırlanma süreci uzun sürmediği için armutlarda herhangi bir kararın söz konusu olmamıştır. İlk yapılan deneylerde 3 mm kalınlığında ilerleyen deneylerde ise 5-10 mm arasında değişen farklı kalınlıklara sahip armut dilimleri kurutulmuştur.

Ayrıca Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarından ödünç olarak alınan sıcaklık ölçer (thermocouple), hız ölçer (anemometre), bağıl nem ölçer kurutma kabininin belirli noktalarına yerleştirilmiştir.

Kurutma deneyleri sırasında armut dilimlerinin kütle kaybı, belirlenen noktasından sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı ölçümü ölçümü yapılmıştır. Ölçümler datalogger üzerinden veri tabanına aktararak bilgisayar ortamına işlenmiştir. Bu sayede belirli bir zaman dilimi içerisinde bilgisayar ortamına 10 dakikada bir veri aktarımı ve depolaması söz konusu olmuştur. Ayrıca kurutma sisteminin dışında yer alan ve 0,01 gr. hassasiyete sahip terazi ile her bir rafta belirlenen numunelerin 30 dakika arayla ağırlık değişimleri ölçülmüştür.

Armut kurutma deneyindeki 3 mm kalınlığında dilimlenen armutlar için kuruma süresi 7 saat olarak belirlenmiştir. Farklı kalınlıklara sahip armut dilimleri için (5, 10 mm) 7-18 saat arasında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde gerçekleştirilen kurutma deneylerinde ilk etapta 4 adet rafta toplamda 5-7 kg arasındaki miktarlarda elma kurutulmuş olup sistemin giriş ve çıkış bağıl nem değerleri arasındaki en yüksek fark kurutulan ürün miktarının az olmasından dolayı yaklaşık %3 olarak belirlenmiştir.

Bunun yanı sıra kurutulacak ürünün boyutları, kuruma süresini belirlemede etkili bir diğer parametredir. Farklı kalınlıklarda yapılan deneylerde nem oranı ve nem içeriği, ürünün kalınlığı ile orantılı olarak değişmektedir. 5 mm-10mm arasında değişen kalınlıktaki armut dilimlerinin nem içerikleri farklı sıcaklıklar için değişimler göstermiştir.

Kurutulan materyalin zamana bağlı nem oranı, kurutma hızı arasındaki ilişkiler 5. bölümde grafiklerde gösterilmiştir. Armut kurutma denemelerinde teorik olarak belirtilen sabit nem periyodu gözlenememiştir. Kurutma teorisinde bulunan araştırmacılarında belirttiği gibi kuruma periyodunda kurutulan yüzeyin tamamen ıslak olması nedeniyle kuruma hızının sabit kalması gerekmektedir. Ancak armut dilimlerinin yüzeyindeki serbest kalan su zerreciklerinin oluşturduğu ıslak yüzey, ürünün kurutma işlemlerine hazırlık aşamasından itibaren kurumaya başlamakta ve bu sabit kuruma işlem basamağı kısa zamanda tamamlanmaktadır.

Isı pompalı yapılan deneylerde ise 3 mm kalınlığındaki armut dilimi 6 saatte, 5 mm kalınlığındaki armut dilimi 11 saatte, 10 mm kalınlığındaki armut dilimi ise 15 saatte kuruduğu gözlemlenmiştir. Güneş destekli kurutma sisteminde Eylül-Ekim ayında yapılan deneylerde bu sürenin daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalarda Güneş enerjisinin yüksek olduğu Temmuz ayında deneylerin yapılması halinde bu sürenin kısaldığı görülmüştür. Ayrıca ısı pompalı kurutma sisteminde kabin giriş sıcaklığı manuel olarak ayarlanabildiğinden yani kurutma kabine istenilen sıcaklıkta hava akışı sağlandığından armut dilimlerinde üniform bir kuruma gözlenmiştir. Güneş destekli kurutma sisteminde günün öğle saatlerinde istenilen kuruma sıcaklıkları elde edildiğinden ürün kuruma süresi de uzamaktadır. Güneş destekli sistemde olduğu gibi ısı pompalı kurutma sisteminde de kabin giriş ve çıkış bağıl nem değerlerinde belirgin bir fark oluşmamıştır. Ayrıca ısı pompalı kurutma sisteminde 30 dakika ile alınan kütle kaybı verilerine göre armut dilimlerinden uzaklaşan nem miktarında düzenli bir azalış göstermektedir.

Bunların yanı sıra güneş destekli ısı enerji depolamalı meyve kurutma sistemi ile ilgili iyileştirme çalışmaları mevcuttur. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

- ✓ Isıl enerji depolama sistemine entegre 3 adet havalı güneş kollektörler birbirlerine göre seri bağlanması, (Böylece güneş enerjisinden daha etkin bir şekilde faydalanıp daha yüksek sıcaklıklar elde edilir.)
- ✓ Ayrıca tasarımını yaptığımız kurutma kabine sıcak havayı alttan verilmesi,
- ✓ Parafin malzeme yerine sodium sülfat gibi düşük sıcaklıkta eriyen FDM kullanılması,
- ✓ Kurutma kabindeki 2 adet havalı kollektörün arkasına kurutma çekmecelerinin yerleştirilmesi,
- ✓ Kurutma hava debisinin artırılması

gibi iyileştirme çalışmaları yapılarak sistem daha verimli hale getirilebilir.

Kurutma alanında verimliliği ve kaliteyi kapsayan genel bir kavram tanımlamak zordur. Bu zorluğun nedenlerinden birisi de kurutulan ürünün kalitesi

ile ilgilidir. Farklı kurutma yöntemleri ile elde edilen ürünün kalitesi ön planda tutuluyorsa, kurutma işlemi sadece üründen suyun buharlaştırılması anlamına gelmemektedir. Kaliteli üründe daha çok ürünün renk, doku, besin değerleri ve su alma kabiliyeti gibi faktörler dikkate alınmaktadır. Bunlar ürünün son halinin tanımlanmasını karmaşık hale getirmektedir. Ancak kurutucuların performanslarının mukayesesi enerji tüketimine dayalı verilerle yapıldığında daha objektif bir değerlendirme söz konusu olacaktır. Bu bağlamda geliştirilen güneş enerjisi destekli zirai ürün kurutma sistemi ile aynı kapasiteye sahip ısı pompalı kurutma sistemlerinin enerji tüketimi açısından karşılaştırılması yapılması gerekmektedir. Güneş destekli kurutma sisteminde elektrik enerjisi tüketimi sadece sistemde yer alan fanlar ve reküperatör ünitesinden dolayı meydana gelmektedir. Yapılan çalışmalarda (Atalay, 2015) deney süresi boyunca çalışması durumunda sisteme entegre edilen elektrik sayacı ile günde ortalama 8,12 KWh elektrik tükettiği gözlemlenmiştir. Isı pompalı kurutma sisteminde ise elektrik tüketimi ise günde 6 KWh saat olarak gözlemlenmiştir. 1 KWh başına düşen enerji tüketim fiyatının ortalama 0,71 TL (70 kuruş) olduğu göz önüne alındığında bu çalışma kapsamında güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli meyve kurutma sistemi çalışma anında ortalama 5,7652 TL'lik, ısı pompalı kurutma sisteminde ise 4,26 TL'lik enerji tüketimine neden olduğu saptanmıştır.

Kurutma deneyleri sonucunda elde edilen numunelerin bazıları Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'ne iletilmiş ve burada kurutulmuş armutların nem ve su aktivitesi testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu testlere ilişkin detaylı bilgiler Bölüm 5'te yer almaktadır. Yapılan testler sonucunda kurutulmuş ürünlerin, özellikle nem değerlerinin deney sırasında elde edilen kütle kaybı verilerine göre daha düşük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu da ürünün zamanla nemini dış şartlara bağlı olarak kaybettiğini göstermektedir. Kurutulmuş armut dilimleri nem değerlerinin %17'nun altında olmasından dolayı kuru ürün olarak kabul edilebileceği ve uzun süre bozulmadan kalabileceği ortaya çıkmıştır.

Bu deneysel çalışma sonucunda hem güneş enerjisi destekli enerji depolama meyve kurutma sisteminin tasarım ve çalışma parametreleri hem de ısı pompalı kurutma sisteminin çalışma parametreleri incelenmiştir. Isı pompalı

sistemin daha yüksek kalitede ürünlerin elde edilebileceği bir sistem olduğu saptanmıştır. Ancak güneş destekli kurutma sisteminin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin de düşük olması göz önüne alındığında kurutma sektöründe yaygın bir şekilde kullanılabileceği açıkça görülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abraham, J.P., Sparrow, E.M. and Tong, J.C.K.**, 2009, “Heat transfer in all pipe flow regimes: laminar, transitional/intermittent and turbulent”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52: 557–563.
- Acartürk, F., Ağabeyoğlu, İ., Çelebi, N., Değim, T., Değim, Z., Doğanay, T., Takka, S. ve Tırnaksız, F.**, 2007, *Modern Farmasötik Teknoloji*, Türk Eczacıları Birliği Eczacılık Akademisi Yayını, Ankara.
- Afolabi T.J. and Agarry S.E.**, 2014, “Mathematical Modelling and Simulation of the Mass and Heat Transfer of Batch Convective Air Drying of Tropical Fruits”, *Chemical and Process Engineering Research* ISSN 2224-7467 (Paper) ISSN 2225-0913 (Online) Vol.23, Ogbomoso, Nigeria.
- Aktaş M., Şevik S., Doğan H. ve Öztürk M.**, 2012, “Fotovoltaik ve termal güneş enerjili sürekli bir kurutucuda domates kurutulması”, *Tarım Bilimleri Dergisi-Journal of Agricultural Sciences* 18: 287- 298
- Aktaş, M.**, 2007, “Isı pompası destekli fındık kurutma fırınının tasarımı, imalatı ve deneysel incelenmesi”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Atalay H.**, 2015, “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Yararlanılarak Zirai Ürünlerin Kurutulmasının İncelenmesi”, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Banchero, J.T. and Badger, W.L.**, 1973, *Kimya Mühendisliğine Giriş:Ünit operasyonlar*, (Çev:Çataltaş, İ.), İstanbul.
- Barati E., and Esfahani J.A.**, 2011, “Mathematical modeling of convective drying: Lumped temperature and spatially distributed moisture in slab”, *Energy Book*, vol. 36, issue 4, 2294-2301pp.
- Barbosa V., Canovas H., Humberto V.M.**, 1996, “Dehidration Of Foods” 330p.
- Bayhan, H.A.**, 2011, *Kabin Tipi Bir Kurutucuda Kurutma Sürecini Etkileyen Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Cemeroğlu, B.**, 1986, Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi, Gıda Teknolojisi Derneği, Ankara.
- Çınar, İ.**, 2006, “Gıda Kurutma Teknolojisinde Matematik Modellerin Kullanımı”, Türkiye 9. Gıda Kongresi, 24-26 Mayıs 2006, Bolu, 805-806.
- Çolak Güneş, N.**, 2009, Gıda Kurutma Sistemlerinin Ekserji Analizi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Crank J.**, 1991, “Determination of diffusion coefficients in volume-changing systems Application in the case of potato drying”, Journal of Food Engineering, Volume 14, Issue 4, 317-326pp.
- Darvishi H., and at al.**, 2014, “Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences”, Volume 13, Issue 2, Pages 130-138pp.
- Dinçer, İ. and Rosen, M.A.**, 2007, “Exergy Analysis Of Drying Processes And Systems” Energy, Environment and Sustainable Development Book Chapter 8 103-126 pp.
- Doboğlu, H.**, 2012, Liyofilizasyonun Karadut (Morus Nigra) Kurutmadaki Potansiyelinin Konveksiyonel ve Vakumlu Kurutma Teknikleriyle Kıyaslanarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Kahramanmaraş.
- Duffie, J.A. and Beckman W.A.**, 1991, ”Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Ed.,”John Wiley&Sons Inc
- Dündar, H.**, 2010, Bir Vakumlu Gıda Kurutma Sisteminin Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Ekechukwu O. and Norton, V.**, 1999, “Review of Solar-Energy Drying Systems An Overview of Solar Drying Technology”, Energy Conversion and Management, 40, 315-355pp.
- Erbay, B. ve Küçüköner, E.**, 2008, “Gıda Endüstrisinde Kullanılan Farklı Kurutma Sistemleri”, Türkiye 10. Gıda Kongresi, 21-23 Mayıs 2008, Erzurum.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Erbay, Z. and Icier, F.,** 2010, “A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling and Experimental Results. Critical Reviews in Food Science and Nutrition”, Scientific Research An Akademic Publisher 50, 441-464 pp.
- Ertekin, C., Heybeli, N. ve Dikici, G.,** 2013, “İnfrared Kurutucu ile Kerevizin Kurutulması”, “Tralleis Elektronik Dergisi”, 2: 16-25.
- Esper, A. and Muhlbauer W.** 1998, “Solar Drying—An Effective Means of Food Preservation”, Renew Energy, 15, 95-100pp.
- Geankoplis J.C.,** 1993, “Transport and Unit Operations” Third Edition Book 1183p.
- Günerhan, H.,** 2013, “Endüstriyel Kurutma Sistemleri”, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, Temel Bilgiler Tasarım ve Uygulama
- Güngör, A. ve Özbalta, N.,** 1997, Endüstriyel kurutma sistemleri, TMMOB, MMO, III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, İzmir.
- Güngör, A.,** 2013, “Sebze ve Meyve Kurutmada Kullanılan Kurutucular ve Kurutma Teknolojileri”, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan 2013, İzmir.
- Gürses, Ö.L.,** 1986, Gıda İşleme Mühendisliği-II, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara.
- Hastürk, F.Ş., Ülger, P., Aktaş, T. ve Orak, H.H.,** 2012, “Farklı Ön işlemlerin ve Vakum Kurutma Yönteminin Domatesin Kuruma Karakteristikleri ve Kalite Kriterleri Üzerine Etkisi”, Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 9(1): 15-25.
- Itai, A.,** 2007, Pear, “Genome mapping and moleculer breeding in plants. Fruit and Nuts”, 4: 157- 170.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Kalra S.K. and Bhardwaj K.C.,** 1981, “Solar drying of foods: Modeling and numerical simulation”, Solar Energy Volume 60, Issues 3–4, March–April 1997, Pages 151-157pp.
- Kartal, A.S.K.,** 2011, Mikrodalga ve Kuru Hava Yardımıyla Kurutma Yöntemlerinin Meyve Pestillerinin Kuruma Sürelerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Krokida H., Marinou-Kouris K., Araujo D. et al.,** January 2003, “Different Drying Methods: Their Applications and Recent Advances”, International Journal of Food Nutrition and Safety, 4(1): 34-42pp.
- Kumar, C., Karim, A., Joardder, M.U.H. and Miller, G.J.,** 2012, “Modeling Heat and Mass Transfer Process during Convection Drying of Fruit”, The 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012), Gold Coast, Australia
- Kumar, C., Karim, A., Saha, C., Joardder, M.U.H. and Brown, R.,** 2012, “Multiphysics Modelling of convective drying of food materials”, Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference, Dhaka, Bangladesh
- Lenart A.S,** 1992, “A. LenartMathematical modelling of osmotic dehydration of apple and carrot,. Pol. J. Food Nutr. Sci., 1/42 (1) (1992), 33-44pp.
- McKetta, J.J.,** 1983, Encyclopedia of Chemical Process and Design, Marcel Dekker, New York.
- Mehta G.L. and Tomar M.C.,** 1980, “Studies on dehydration of tropical fruits in Uttar Pradesh – II Guava,. Indian Food Packer 34(4): 8–11 pp
- Mengeş, G.,** 2005, Patatesin Farklı Kurutma Şartlarındaki Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Mohamad, A.A.,** 1997, “High efficiency solar air heater”, Solar Energy 60(2), 71-76.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Mujumdar, A.S.**, 2000, Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying (Edited by Sakamon Devahastin)
- Nonhebel G. and Moss A.A.H.**, 1971“Drying of Solids in the Chemical Industry”, Chemical engineering , Front Cover, Butterworths, 301 p.
- Oktay, Z.**, 2003, “Testing of a Heat Pump Assisted Mechanical Opener Dryer,” Applied Thermal Engineering, 23, 153- 162 pp.
- Olgun, H. ve Rzayev, P.**, 2000, “Fındığın Üç Farklı Sistemde Güneş Enerjisi ile Kurutulması”, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 24: 1-14.
- Özel, F.Ö.**, 2010, Balkabağının Farklı Kurutma Şartlarındaki Kuruma Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Konya.
- Pointing J. D.**, 1973, “Osmotic dehydration of fruits: Recent modifications and applications”, Food and Agriculture Organization of the United Nations Journal Article,
- Qu, Y., Wang, S., Tian, Y. and Zhou, D.**, 2019, “Comprehensive evaluation of Paraffin-HDPE shape stabilized PCM with hybrid carbon nano-additives”, Applied Thermal Engineering, 114404 China.
- Ramaswamy H. and Marcotte M.**, 2006, “Food Processing: Principles and Applications”, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 420 pp.
- Ratti C.**, 2001, “Hot air and freeze-drying of high-value foods”, September 2001 Journal of Food Engineering 49(4):311-319pp.
- Sakai N. and Mao W.**, 2006, “Infrared Heating. In Thermal Food Processing New Technologies and Quality Issues”, Edited by D.W. Sun, Boca Raton, Florida, 493-527pp.
- Saldamlı, İ. ve Saldamlı, E.**, 1990, Gıda Endüstrisi Makinaları, Birinci Baskı, Haccettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Sarı, A. and Karaipekli, A.**, 2007, “Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material”, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1271–1277, 60240 Tokat, Turkey
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı**, Gıda Teknolojisi Sebzeleri Kurutma, http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Sebzeleri%20Kurutma.pdf (Erişim tarihi: 11 Mart 2019).
- Tamer, Ş.**, 1990, Klima ve Havalandırma, Cilt 1, Meteksan A.Ş., Ankara,
- Temel, Ü.N. and Erdiş, E.**, 2019, “Size Effect of Graphene Nanoparticles on the Thermal Properties of the Doped Phase Change Materials”, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi 6. Cilt - Prof. Dr. Fuat SEZGİN Bilim Yılı Özel Sayısı 123-134, 2019, Bilecik
- Tunç, M. ve Mengeş, H.O.**, 2010, “Patlıcan Kurutmasa Kurutmanın Çeşitli Modellerle Açıklanması”, Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 24(1):1-9.
- Vakilaltojjar S.M. and Saman W.**, 2001, “Analysis and modeling of a phase change storage system for air conditioning applications”, Appl. Therm. Eng., 21 (3), 24-63pp
- Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. and Hu, X.**, 2006, “Mathematical Modelling On Thin Layer Microwave Drying of Apple Pomace With And Without Hot Air Pre- Drying”, Journal of Food Engineering, 80: 536-544.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince gerekli verilerin sağlanmasında kolaylık gösteren Türkoğlu Makine San. ve Tic. Ltd. Şti. firması sahibi Yusuf TÜRKOĞLU'na ve çalışanlarına, özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. M. Turhan ÇOBAN'a, tezin biçimlenmesinde değerli katkılarını aldığım bölüm elemanları Yrd. Doç. Dr. Gökhan GÜRLEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

22 / 07 /2020

Çiğdem ÖZÇELİK

ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı: Çiğdem ÖZÇELİK

Doğum Tarihi ve Yeri: 14/04/1993 - ÇARŞIBAŞI

Yabancı Dili: İngilizce

E-posta: cigdemozcelik1993@gmail.com

Telefon: 05367369240

EĞİTİM ÖĞRETİM

(09/2017-02/2020)

Yüksek Lisans

Enerji Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği, Ege

Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

(09/2011-07/2016)

Lisans

Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi

Not Ortalaması: 3,16/4

(09/2011-07/2016)

Lise

Fatih Sultan Mehmet Anadolu Lisesi, Fen Bilimleri

Not Ortalaması: 88,6/100

İŞ DENEYİMİ

(05.2017 - 07.2018)

Projelendirme ve Satış Mühendisi

Termokar Isıtma Soğutma Klima Cihazları A.Ş., İzmir (Türkiye)

(10.2016- 4.2017)

Satın Alma Sorumlusu

Hatsan Silah Makine Kalıp San Ve Tic. Ltd. Şti, İzmir (Türkiye)