T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BALKABAĞININ FARKLI KURUTMA ŞARTLARINDAKİ KURUMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Ömer Faruk ÖZEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

AĞUSTOS 2010
Konya
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

BALKABAĞININ FARKLI KURUTMA ŞARTLARINDAKİ KURUMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Ömer Faruk ÖZEL
Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Selçuk DARICI
2010, 96 sayfa

Juri: Prof. Dr. Saim KOÇAK
Yrd. Doç. Dr. Selçuk DARICI
Yrd. Doç. Dr. Ali ATEŞ

Bu çalışmada, balkabağının (*Cucurbita moschata*) tek tabaka kuruma kinetiği deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde konveksiyon tipi bir kurutma deney seti tasarlanıp imal edilmiştir. Deneyler, yaş baza göre nem içeriği % 93,48 olan balkabağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kurutma havası sıcaklıkları 50 ºC, 60 ºC, 70ºC, kurutma havası hızı 0.5, 1, 2 m/sn ve kurutma havası bağıl nemi de %5, %10, %20 olarak alınmıştır.

Balkabağı kabukları soyulduktan sonra 30mmx30mm şeklinde kare dilimlere ayrılmış bu dilimler de 4 mm kalınlıklarında parçalara ayrılarak kurutulmuşlardır. Elde edilen veriler ile balkabağına ait kuruma eğrileri çizilmiş ve kurutma havası koşullarının kuruma işlemine etkisi belirlenmiştir.

Deney sonuçları balkabağının kuruma davranışını ifade eden ve edebileceği düşünülen literatürde mevcut modellerden on farklı model sonuçları ile karşılaştırılmış, balkabağının kuruma davranışını ifade etmedeki uygunluğun veya deneysel sonuçlara en yakın modelin Midilli ve ark. modeli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, konvektif kurutucu, kuruma kinetiği, kuruma sabiti

ABSTRACT

DETERMINATION OF DRYING CHARACTERISTICS OF PUMPKIN (*CUCURBITA MOSCHATA*) UNDER DIFFERENT DRYING CONDITIONS

Ömer Faruk ÖZEL
Selçuk University
Institute of the Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assist.Prof.Dr. Selçuk Darıcı
2010, 96 Pages

Jury:
Prof.Dr. Saim KOÇAK
Assist.Prof.Dr. Selçuk DARICI
Assist.Prof.Dr. Ali ATEŞ

In this work, single layer drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata)* was experimentally investigated. For this purpose, a convection type drying experimental setup was designed and installed at Mechanical Engineering Department of Selcuk University. Experiments were carried out by using pumpkin which had %99,48 moisture content with regard to wet base. Drying air temperatures, velocities and relative humidity in experiments were taken as 50 ºC, 60 ºC, 70ºC, 0.5, 1, 2 m/s, %5, %10, %20 respectively.

After pumpkin was peeled, it was sliced to square-shaped pieces at 30mm x 30mm dimensions, and these slices were dried as divided parts at 4mm thickness. Drying curves of pumpkin were drawn by using obtained data and effect of drying air to drying process was determined.

Experimental results were compared with results of ten different models from literature which can define or are thought to be define drying characteristics of pumpkin, and it was seen that model of Midilli et al. is the nearest model to experimental results.

Key Words: Drying, convective dryer, drying kinetics, drying constant

TEŞEKKÜR

Lisansüstü çalışmamda her türlü desteği vererek yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Selçuk DARICI ’ya katkılarından ve yardımlarından dolayı Sayın Arş. Gör. Soner ŞEN’e, bu araştırmanın bir yüksek lisans tezi olabilmesi için değerli zamanlarını bizler için ayıran hocam Sayın Prof. Dr. Şefik BİLİR’ e ve maddi ve manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim aileme teşekkürü borç bilirim.

Ömer Faruk ÖZEL

Konya 2010

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No **Sayfa No**

1.1. Yurtiçi kuru sebze ve meyve üretimi ……...….2
1.2. Türkiye'den en çok ihraç edilen ürünler …….…..3
1.3. Türkiye'nin son yıllarda en çok ihraç ettiği tarım ürünleri ……...3
1.4. Türkiye'nin en çok kurutulmuş ürün ihracatı yaptığı ilk on ülke ……..…4
5.1. Balkabağının kimyasal bileşimi…….31
5.2. 2005 yılında Dünyada balkabağı üretim değerleri …….…..33
5.3. Bazı Tarım Ürünlerinin ilk ve Son nem içeriği…….....35
5.4. Bazı Meyve ve Sebzelerin Kuruma Sıcaklıkları……....35
5.5. Deneylerde kullanılan ölçme cihazları ve özellikleri …….……..37
6.1. Ölçüm cihazlarından ve okumadan kaynaklanan belirsizlik değerleri …….44
7.1. Kuruma eğrilerinin matematiksel modellerini veren denklemeler……70
7.2. Matematik modeller kullanılarak hesaplanan değerler …….……71

EK ÇİZELGE LİSTESİ

Ek Çizelge No **Sayfa No**

1. Nem oranı (MR) değerleri (1 m/sn hava hızı, % 20 bağıl nem) ……...80
2. Page modelinin hesaplanması sonucu elde edilen veriler ve MR değerleri..…….81
3. Midilli modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (50 ºC)……...…82
4. Midilli modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (60 ºC)……...83
5. Midilli modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (70 ºC)**……...**84
6. Difüzyon yaklaşım modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (50 C).…85
7. Difüzyon yaklaşım modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (60 C)….86
8. Difüzyon yaklaşım modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (70 C).…87
9. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(0,5 m/sn, %5 RH)……..88
10. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(1 m/sn, %5 RH)...…….…….89
11. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(2 m/sn, %5 RH)...…….90
12. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(0,5 m/sn, %10 RH)……..……..…...91
13. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(1 m/sn, %10 RH).……..…92
14. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(2 m/sn, %10 RH).……..……93
15. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(0,5 m/sn, %20 RH)….....94
16. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(1 m/sn, %20 RH)….…….95
17. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(2 m/sn, %20 RH).…….....96

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No **Sayfa No**

2.1. Sorpsiyon izotermi…….7
2.2. Adsorpsiyon ve Desorpsiyon eğrileri…….8
2.3. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statiği açısından anlamı……10
2.4. Tarım Ürünlerinin Kinetik Kuruma Eğrileri……11
2.5. Özgül Nemin Fonksiyonu olarak Kurutma Hızı Eğrileri…….13
2.6. Kuruma esnasında ısı ve kütle geçişi……...15
4.1. Deneysel ve logaritmik model ile hesaplanan nem oranı……22
4.2. Isı pompalı PID kontrollü kurutucu…….24
4.3. Farklı sıcaklık ve hızlarda kayısının kuruma süresi…….26
4.4. Kayısı kurutma deney düzeneği……...27
5.1. Balkabağı bitkisi ve sebzesi(*Cucurbita moschata*)…….....30
5.2. Deney seti…….34
5.3. Sıcaklık ve nem ölçerlerin deney tesisatında yerleri…..……..37
5.4. Deney setinin görünüşü……..……..38
5.5. Kurutma öncesi balkabağı dilimleri……..……...40
5.6. Kurutma sonrası balkabağı dilimleri……40
5.7.Kurutma havası sıcaklığının kuruma süresince değişimi…..……41
5.8. Kurutma havası bağıl neminin kuruma süresince değişimi ……41
5.9.Kurutma havası hızının kuruma süresince değişimi ……42
7.1. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)……..48
7.2. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(% 10 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)……49
7.3. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)……...….49
7.4. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)…….50
7.5. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(% 10 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)…….…..50
7.6. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi

(% 20 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)……51
7.7. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)……..51
7.8. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(% 10 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)……52
7.9. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)……52
7.10. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (50 ºC sıcaklık, %10 bağıl nem)…53
7.11. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (60 ºC sıcaklık, %10 bağıl nem)…54
7.12. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (70 ºC sıcaklık, %10 bağıl nem)…54
7.13. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi
(60 ºC sıcaklık, 0.5 m/sn hava hızı)……55
7.14. Nem içeriğinin kuruma zamanı ile değişimi
(60 ºC sıcaklık , 1 m/sn hava hızı)…….....56
7.15. Nem içeriğinin kuruma zamanı ile değişimi
(60 ºC sıcaklık , 2 m/sn hava hızı)……..……56
7.16. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(%5 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)……..……..57
7.17. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(% 10 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)……58
7.18. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)……58
7.19. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)……..59
7.20. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(% 10 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)……59
7.21. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)……60
7.22. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)……..60
7.23. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(% 10 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)……61

7.24. Kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi
(% 20 hava hızı, 2 m/sn hava hızı)……..……61
7.25. Nem içeriğinin kuruma zamanı ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı) …….....……...62
7.26. Nem içeriğinin kuruma zamanı ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)……...…...63
7.27. Nem içeriğinin kuruma zamanı ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)……...……...63
7.28. Nem içeriğinin kuruma zamanı ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)……...…..64
7.29. Nem içeriğinin kuruma zamanı ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)…….……...64
7.30. Nem içeriğinin kuruma zamanı ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)……...…….65
7.31. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)…….…….66
7.32. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi
(% 10 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)…...…….66
7.33. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)…….……...67
7.34. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi
(% 5 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)…….…….67
7.35. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi
(% 10 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)…….……...68
7.36. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi
(% 20 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)…….……...68
7.37. Page modeli ile 50, 60, 70 ºC sıcaklık, %20 RH ve 1m/sn hava hızında yapılan deneyden elde edilen verilerin karşılaştırılması……..73
7.38. Midilli modeli ile 50, 60, 70 ºC sıcaklık, %20 RH ve 1m/sn hava hızında yapılan deneyden elde edilen verilerin karşılaştırılması…….73
7.39. Difüzyon yaklaşım modeli ile 50, 60, 70 ºC sıcaklık, %20 RH ve 1m/sn hava hızında yapılan deneyden elde edilen verilerin karşılaştırılması……74

İÇİNDEKİLER

ÖZET i

ABSTRACT ii

TEŞEKKÜR iii

İÇİNDEKİLER x

ÇİZELGE LİSTESİ v

EK ÇİZELGE LİSTESİ vi

ŞEKİL LİSTESİ vii

SİMGELER xiii

1. GİRİŞ 1

2. KURUTMANIN TEORİSİ 5

2.1. Temel Kavramlar 5

2.1.1. Tarım ürünlerinin termodinamik özellikleri 5

2.1.1.1. Ürün nem miktarı 5

2.1.1.2. Ürün denge nemi 6

2.1.1.3. Ürün sorpsiyon izotermi 6

2.1.2. Nemli havanın termodinamik özellikleri 8

2.1.2.1. Özgül nem 8

2.1.2.2. Bağıl nem 8

2.1.2.3. Buhar basıncı 9

2.1.2.4. Mutlak nem 9

2.1.2.5. Kuru termometre sıcaklığı 9

2.1.2.6. Yaş termometre sıcaklığı 9

2.1.2.7. Çiğ noktası sıcaklığı 9

2.1.2.8. Entalpi 9

2.1.2.9. Nemli havanın özgül ısısı 10

2.2. Kurumanın Statiği 10

2.3. Kurumanın Kinetiği 11

2.4. Kuruma Evreleri 12

2.4.1. Isınma dönemi 12

2.4.2. Sabit kuruma hızı 12

2.4.3. Azalan kuruma hızı devresi 12
2.5. Kurutma Esnasında Isı Ve Kütle Geçişi 14
2.6. Kurutma Yöntemleri 15
3. KURUTMA SİSTEMİ TİPLERİ 17
3.1. Morötesi Radyasyon Kurutma 17
3.2. İletimle Kurutma 17
3.3. İnfrared (Kızılötesi) Radyant Kurutma 17
3.4. Dondurarak Kurutma 17
3.5. Vakumda Kurutma 18
3.6. Karıştırmalı Yatakta Kurutma 18
3.7. Akışkan Yatakta Kurutma 18
3.8. Kızgın Buhar Atmosferinde Kurutma 18
3.9. Flaş Kurutma 19
3.10. Tünel Kurutucu 19
3.11. Püskürtmeli Kurutucular 19
3.12. Taşınım Kurutucu (Direkt Kurutucu) 20
3.13. Döner Kurutucular 20
3.14. Kabin Kurutucular 20
3.15. Mikrodalga Kurutma 21
3.16. Dielektrik Kurutma 21
4. KAYNAK ARAŞTIRMASI 22
5. MATERYAL VE YÖNTEM 30
5.1. Balkabağı (*Cucurbita moschata*) 30
5.2. Deney Seti 33
5.3. Ürün Başlangıç Neminin Belirlenmesi 38
5.4. Örneklerin Hazırlanması ve Deneylerin Yapılışı 39
6. BELİRSİZLİK ANALİZİ 43
6.1. Hata ve Belirsizlik Kavramı 43
6.2. Belirsizlik Analizi 43
6.2.1. Nem İçeriğindeki Belirsizlik 44
6.2.2. Nem Oranındaki Belirsizlik 45
6.2.3. Kuruma Hızındaki Belirsizlik 45

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 47
7.1. Kurtma Havası Sıcaklığının, Neminin, Hızının Kurutmaya Etkisi 47
7.2. Deney Sonuçlarının Kuruma Modelleri ile Karşılaştırılması 69
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 74
9. KAYNAKLAR 76
10. EKLER 80

SİMGELER

a, b, c, g	:Katsayı
DR	:Kuruma hızı
k	:Kuruma sabiti
M_s	:Yaş kütle (gr)
M_k	:Kuru kütle (gr)
MR	:Nem oranı
N	:Nem miktarı (grsu/grkm)
N_{deney}	:Deneysel veri adeti
N_0	:Ürünün ilk nemi (%)
N_y	:Yaş baza göre nem miktarı (grsu/grkm)
N_k	:Kuru baza gör nem oranı (grsu/grkm)
N_d	:Ürün denge nemi (%)
N_{dk}	:Kuruma bölgesi ürünün ulaşabileceği en küçük denge nemi (%)
P_b	:Nemli havadaki su buharının kısmi basıncı (Pa, mmHg)
P_{bs}	:Doymuş buhar basıncı (Pa, mmHg)
$P_ü$	:Ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı (Pa, mmHg)
P'_b	:Yaş termometre sıcaklığında su buharı kısmi buhar basıncı (Pa, mmHg)
R^2	:Regresyon katsayısı
RMSE	:Hesaplamanın tahmini standart hatası
t	:Süre (dk)
T	:Sıcaklık (°C)
W_{MR}	:Nem oranındaki belirsizlik
W_N	:Nem içeriğinde belirsizlik
W_{DR}	:Kuruma hızındaki belirsizlik
W_x	:Toplam belirsizlik
V	:Hız (m/sn)
z	:Modeldeki katsayı adeti
φ	:Bağıl nem (%)
X^2	:Ki kare

1. GİRİŞ

Tarım ürünlerinin hasat edilmesinden sonra uzun süre bozulmadan tüketilinceye kadar saklanabilmesi için uygulanan yöntemlerden olan kurutma; tahıl, sebze ve meyvelerin bünyelerindeki suyun belirli yöntemler kullanarak uzaklaştırılma işlemi olarak tanımlanabilir.

Gıda işleme teknolojisi bakımından önemli bir yer tutan kurutma işlemi, matematiksel anlamda ısı ve kütle veya ısı ve kütlenin aynı anda transferi esasına dayanmakta ve modellemesi yapılmaktadır. Kurutma işleminin amacı, gıdadaki suyun uzaklaştırılmasıdır (Çınar, 2006). İşlem sırasında kurutma havasından ürüne doğru ısı transferi gerçekleşir. Ürünün kullanım kalitesi ile dayanım özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden dolayı, bu işlemde son kurutma derecesinin çok önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle kurutmanın kontrollü şartlarda gerçekleştirilmesi önemlidir (Başaran ve ark., 2004). Bu amaçla, yaygın olarak belirli sıcaklık, bağıl nem ve akış hızına sahip hava kullanılır. Belirli nitelikteki kurutucu hava aynı anda hem gıdanın hissedilen sıcaklığının ve buharlaşma gizli ısısının artmasını, hem de buharlaşan suyun buharlaşma yüzeyinden uzaklaştırılmasını sağlar. Böylece, sıcak hava akımına dayalı kurutmada kütle transferi için temel mekanizmalar şu şekilde gerçekleşir:

- Gıdadaki suyun yüzeye difüzyonu
- Yüzeyde buharlaşma
- Su buharının hava akımıyla yüzeyden uzaklaştırılması

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 (Çınar, 2006).

Kurutma işleminde gıda içinde mevcut olan su, gıdanın bozulmasına neden olmayacak şekilde azaltıldığı için gıdanın uzun süre bozulmadan saklanabilmesine olanak vermektedir. Bu işlemle gıdada bulunan C vitamini dışında bütün minerallerin korunduğu bilinmekle birlikte, besin öğeleri bakımından da gıda yoğunlaştırılmış bir nitelik kazanır. Aynı zamanda kurutulmuş olarak tüketilen gıdalar vücudu yüksek antioksidant potansiyeller ile serbest radikallere karşı korur.

Kurutma işlemi gıdanın üretilmesi, saklanması, depolanması ve taşınması bakımından diğer gıda saklama yöntemlerine göre daha ekonomiktir. Son yıllarda

kurutulmuş ürünler taze ürün pazarında etkili bir alternatif oluşturmaktadır. Ülkemizde kurutularak değerlendirilen ürünlerin % 63'ü yurtdışına ihraç edilmektedir ve bu miktar tüm ihracat gelirimizin % 80'ini oluşturmaktadır (Yıldız, 2001). Kurutulmuş ürünler hem kuru olarak tüketilmekte, hem de hazır çorba, bebek maması, hazır yemekler gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır (Cemeroğlu, 2004).

Dünyada kurutulmuş ürün üretimi her geçen gün artmakta ve bu üretimin büyük bölümü A.B.D (297.557 ton) ve Türkiye'de (190.000 ton) gerçekleştirilmektedir. Kurutulmuş meyve ve sebze pazarı Japonya'da 7,6 milyar dolar (1998'den bu yana) ve Çin'de 800 milyon dolar (1990'ların başlarından bu yana) olarak belirlenmiştir. Bu eğilimin tüm ülkeler için gelecek yüzyılda da artması ve ekonomik değerini artarak koruması beklenmektedir (Zhang ve ark., 2006). Çizelge 1.1'de yurtiçinde kurutulmuş ürünlerin üretim miktarları yıllara göre gösterilirken, günümüzde üretimi hızla artmakta olan kurutulmuş gıda maddelerinin diğer ihraç kalemleri arasındaki oranı Çizelge 1.2'de, en çok ihraç edilen kurutulmuş ürünler Çizelge 1.3'de, en çok ihracatı yapılan ilk 10 ülke ise Çizelge 1.4'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Yurtiçi kuru sebze ve meyve üretimi (Anonim, 2009)

Ürün Tanımı	**Üretim Yılı**		
	2006	**2007**	**2008**
Kurutulmuş sebze ve meyveler	**Üretim Miktarı (kg)**	**Üretim Miktarı (kg)**	**Üretim Miktarı (kg)**
Patates, soğan, mantar ve yer mantarı dışında kalan, tüm, parça, dilim, kırık veya toz olarak kurutulmuş, fakat daha fazla hazırlanmamış diğer sebze ve sebze karışımları (kurutulmuş tatlı mısır, domates, havuç, sarımsak, pırasa, ıspanak, kuşkonmaz, bamya)	237.448,75	114.066,12	168.379,08
Kuru üzümler	243.108,851	258.692,914	261.460,348
Kayısı - kurutulmuş	748.298,35	748.085,87	760.528,77
Diğer meyveler (muz, hurma, incir, ananas, avakado, guava, mango, mangosteen, turunçgiller, üzüm, fındık ve ceviz hariç) - kurutulmuş	379.362,44	320.881,39	312.111,31

Çizelge 1.2. Türkiye'den en çok ihraç edilen ürünler (Anonim, 2010)

Sektörler	OCAK			01 ŞUBAT-31 OCAK (12 AYLIK)			
	2009	2010	Değ. (%)	2008-2009	2009-2010	Değ.	Pay
						%	
Ağaç mamülleri	172.050	116.313	-32,4	2.599.111	1.881.573	-27,60	46,10
Fındık ve mamulleri	22.183	23.433	5,6	407.902	376.853	-7,60	9,20
Hububat, bakliyat, yağlı tohum	104.588	97.376	-6,9	1.323.959	1.255.723	-7,40	30,00
Kuru meyve ve mamulleri	8.164	6.834	-16,3	74.348	88.481	19,00	2,20
Su ürünleri ve hayvansal mamüller	18.165	24.939	37,3	246	278.195	13,00	6,80
Yaş sebze-meyve	12.242	15.015	22,7	245.841	233.984	-4,80	5,70
Genel toplam	337.398	283.920	-15,9	4.897.601	4.085.048	-16,60	100,00

Çizelge 1.3. Türkiye'nin son yıllarda en çok ihraç ettiği tarım ürünleri (Anonim, 2010)

Ürün Grubu	TON		Değişim	Pay
	2008-2009	2009-2010	(%)	(%)
Kuru Kayısı	4.799	6.406	33,5	29,1
Çekirdeksiz Kuru Üzüm	1.479	4.251	187,4	19,3
Bademler	2.681	3.575	33,3	16,3
Diğer Meyve Kuruları	2.488	3.300	32,6	15
Diğer Kavrulmuş Meyveler	595	971	63,3	4,4
Kuru İncir	319	875	174,1	4
Leblebi	1.062	746	-20,4	3,8
Cevizler	341	686	101	3,1
Antep Fıstığı	688	476	-30,8	2,2
Elma Kurusu	338	348	2,8	1,6
Değirmencilik Ürünleri	5	164	3307,8	0,7
Kayısı ve Zerdali Çekirdeği	187	79	-57,9	0,4
Çamfıstığı	0	7	2448,3	0
Toplam	**14.986**	**21.985**	**46,7**	**100**

Çizelge 1.4. Türkiye'nin en çok kurutulmuş ürün ihracatı yaptığı ilk on ülke (Anonim, 2010)

Ülkeler	**Bin $**		**Değişim**	**Pay**
	2009	**2010**	**(%)**	**(%)**
Almanya	11.757	12.895	9,7	16,8
İngiltere	6.654	8.586	29	11,2
Fransa	7.168	6.485	-9,5	8,4
Avustralya	3.295	5.879	78,4	7,6
Rusya	3.321	5.461	64,4	7,1
ABD	5.789	4.886	-15,6	6,4
İtalya	3.878	3.993	3	5,2
Hollanda	5.689	3.664	-35,6	4,8
İspanya	1.537	1.391	-9,5	1,8
Mısır	1.904	1.363	-28,4	1,8
İlk On Ülke Toplamı	50.992	54.603	7,1	71,1
Diğer Ülkeler	27.249	22.246	-18,4	28,9
Genel Toplam	78.241	76.849	-1,8	100

2. KURUTMANIN TEORİSİ

2.1. Temel Kavramlar

2.1.1. Tarım ürünlerinin termodinamik özellikleri

2.1.1.1. Ürün nem miktarı

Tarım ürünlerinde nem miktarı, ürün içerisinde tutulan su ağırlığı olarak ele alınır. Su miktarı, % olarak oransal biçimde tanımlanır. Nem miktarının belirlenmesinde "Yaş baz" (yb) ve "Kuru baz" (kb) olmak üzere iki tanımdan biri kullanılmaktadır (ASAE, 1983).

Yaş baza göre nem, üründeki su ağırlığının ürünün toplam ağırlığına oranı olarak tanımlanır.

$$\%N_{yb} = \frac{M_s}{M_s + M_k} x100 \qquad (2.1)$$

Kuru baza göre nem ise, üründeki su ağırlığının ürünün kuru ağırlığına oranıdır.

$$\%N_{kb} = \frac{M_s}{M_k} x100 \qquad (2.2)$$

Kuru ve yaş baza göre nem oranları aşağıda verilen eşitlikler yardımı ile birbirine çevrilebilir.

$$\%N_{kb} = \frac{N}{100 - N_{yb}} x100 \qquad (2.3)$$

Kuruma sırasında herhangi bir anda üründe kalan buharlaşabilecek nem miktarının $N - N_d$, üründen buharlaşabilecek tüm nem miktarına $N_o - N_d$ oranına nem oranı (MR) denir (Demir ve Günhan, 2001).

$$MR = \frac{N - N_d}{N_o - N_d} \tag{2.4}$$

Kuruma hızı ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$\frac{dN_{kb}}{dt} = \left[\frac{N_{t+dt} - N_t}{dt} \right]_{kb} \tag{2.5}$$

2.1.1.2. Ürün denge nemi

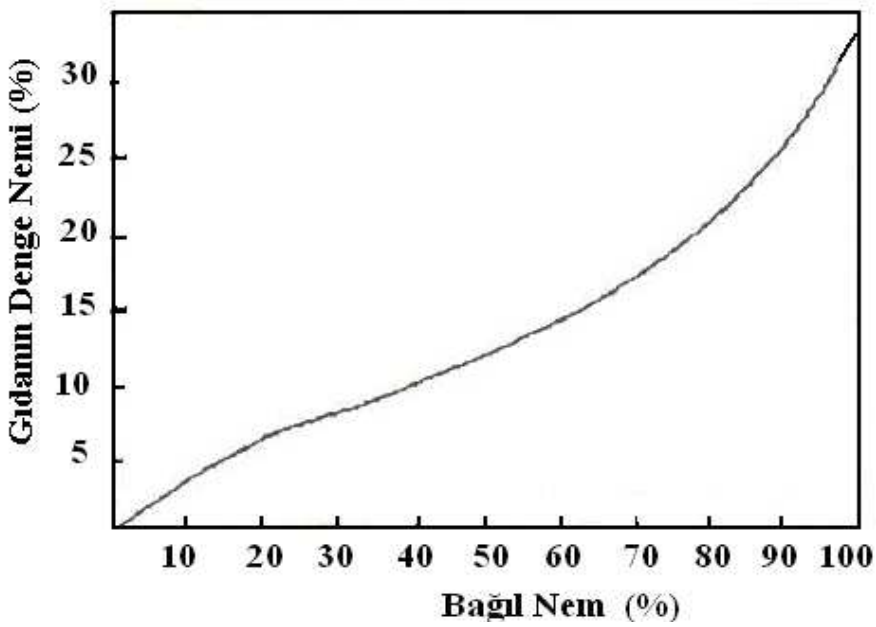
Su daima bulunduğu koşullara bağlı olarak faz değişimi eğilimindedir. Bunun anlamı suyun, çevresindeki havaya buhar olarak karışması anlamına gelir. Havada serbest bulunan su moleküllerinin bir kısmı da buhar halinden sıvı hale dönüşür. Bu dönüşümün hızı çevre koşullarına ve sıcaklığına bağlıdır. Bunun için su hangi fazda olursa olsun özellikle sıcaklığa bağlı olmak üzere, bulunduğu çevre şartlarına bağlı olarak belirli bir buhar basıncına sahiptir. Bir ortamdan diğerine suyun transfer hızında buhar basıncı etkilidir. Basınç farkı ortadan kalktığında ortamlar arasında denge kurulmuş ve iki ortam arasında su miktarları eşitlenmiş olur. Tarım ürünleri içerisindeki su nedeni ile çevreleri ile nem alışverişinde bulunurlar. Nem transfer yönü şu şekilde açıklanabilir:

- Ürünün içerisindeki suyun buhar basıncı, çevre havasında bulunan su buharının kısmi buhar basıncından büyükse, nem üründen çevreye taşınır.
- Ürünün içerisindeki suyun buhar basıncı, çevre havasında bulunan su buharının kısmi basıncından daha küçük ise, nem çevreden ürüne taşınır (Yağcıoğlu, 1999).

2.1.1.3. Ürün sorpsiyon izotermi

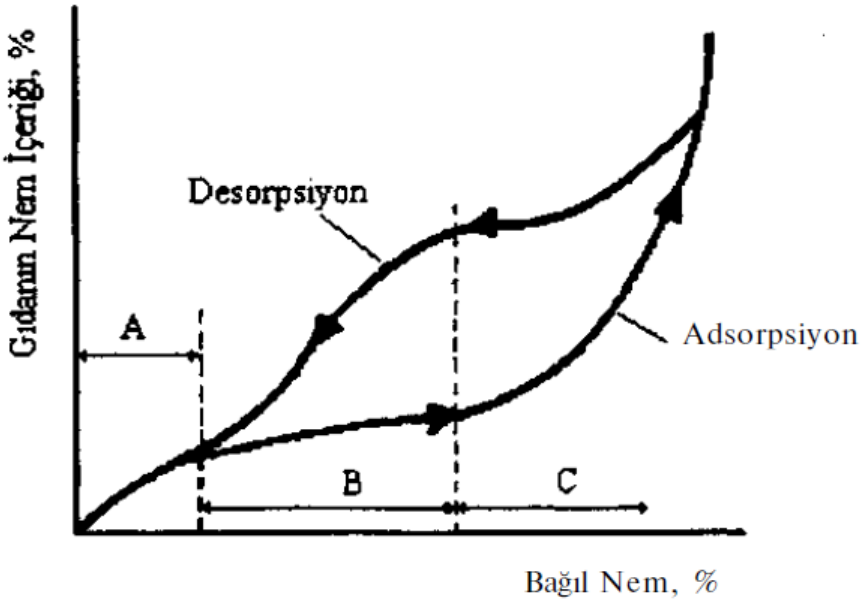
Sabit sıcaklıkta gıdanın su içeriğinin su aktivitesi ile değişimini gösteren grafiğe sorpsiyon izotermi denir (Erbaş, 2008). Su aktivitesi ise sorpsiyon ile iç içe bir kavramdır. Bir gıda maddesinin su aktivitesi değeri, havanın denge neminin 100’ e oranıdır (Kavak ve ark., 1999).

Sorpsiyon izotermine ait eğrilerin saptanmasında (Şekil 2.1) gıdanın yaş ve kuru olması farklı sonuçlar verir. Çünkü yaş gıdanın nem kaybetmesi (desorpsiyon) ile kuru gıdanın nem kazanması (adsorpsiyon) tam olarak aynı yolu izleyen bir dönüşüm değildir. Buna göre, ıslak maddenin farklı bağıl nemli atmosferlerde tutulup dengeye erişmesi beklendikten sonra tartılarak, ağırlık kaybının saptanmasıyla bulunan eğriye "desorpsiyon" izotermi denir (Kavak ve ark., 1999). Buna karşın, başlangıçta tam anlamıyla kuru olan aynı materyalin, yine değişik bağıl nemli ortamlarda tutularak dengeye erişmesi beklendikten sonra tartılarak ağırlık artışının saptanması ile elde edilen eğriye "adsorpsiyon " izotermi denir. Her iki işleme genel olarak, "sorpsiyon izotermi" denir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermleri Şekil 2.2' de görülmektedir.



Şekil 2.1. Sorpsiyon izotermi (Cemeroğlu ve Acar, 1986)

Desorpsiyon izoterminin, adsorpsiyon izotermi ile aynı yolu izlemeyerek bir bombe yapması olayına "histeresis" denir. Sorpsiyon izotermlerinden değişik amaçlarla yararlanılmaktadır. Desorpsiyon izotermi, ürünlerin kurutulma işlemini izleme ve incelemede yararlı bilgiler vermektedir. Buna karşın adsorpsiyon izotermi kurutulmuş ürünlerin higroskopik nitelikleri ile bunların depolanma şartlarını ortaya koymaktadır (Cemeroğlu ve Acar, 1986).



Şekil 2.2. Adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrileri (Kavak ve ark., 1999).

2.1.2. Nemli havanın termodinamik özellikleri

2.1.2.1. Özgül nem

Havadaki 1 kg kuru havaya karşılık, kg olarak su buharı miktarına özgül nem denir. Özgül nem, su buharı kısmi basıncı ile suyun moleküler ağırlığının çarpımının, kuru havanın kısmi basıncı ile molekül ağırlığının çarpımına oranıdır.

2.1.2.2. Bağıl nem

Bağıl nem, herhangi bir sıcaklık ve basınçta 1 kg kuru hava içinde bulunan su buharı miktarının, aynı sıcaklık ve basınç şartlarında, havanın su buharıyla doymuş hale gelmesi durumunda taşıyabileceği su buharına oranıdır.

$$\varphi = \frac{P_b}{P_{bs}} x100 \qquad (2.6)$$

2.1.2.3. Buhar basıncı

Nemli havanın içinde bulunan su buharı moleküllerinin kısmi basıncıdır (P_b). Hava, içinde bulundurabileceği su buharının tamamını içerdiğinde, sahip olduğu buhar basıncı, doymuş buhar basıncı olarak tanımlanır (P_{bs}).

2.1.2.4. Mutlak nem

Herhangi bir durumda, incelenen 1 m^3 hava içindeki su buharının kg olarak ağırlığına mutlak nem denir.

2.1.2.5. Kuru termometre sıcaklığı

Havanın içindeki nemin ve güneş radyasyonunun etkisi olmaksızın herhangi bir termometre, termo eleman veya bir sıcaklık ölçerle ölçülen sıcaklıktır.

2.1.2.6. Yaş termometre sıcaklığı

Atmosfere açık bir su yüzeyinin, havadan suya verilen ısı miktarının, buharlaşan su tarafından (suyun gizli ısısı yoluyla) havaya geri verilen ısı miktarına eşit olduğu anda ulaştığı dinamik denge sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır.

2.1.2.7. Çiğ noktası sıcaklığı

Nemli havanın sabit mutlak nem ve sabit atmosfer basıncı koşullarında soğutulması durumunda, belirli bir sıcaklık değerinden sonra hava, içinde bulunan su buharının hepsini taşıyamaz hale gelir ve su buharının bir miktarı yoğuşarak havadan ayrılır. Yoğuşmanın başladığı andaki sıcaklığa çiğlenme sıcaklığı denir.

2.1.2.8. Entalpi

1 kg kuru havanın duyulur ısısı, hava içerisindeki su buharının enerjisi ve eğer kızgın buhar ise onun kısmi buhar basıncından oluşan toplam enerjidir. Değerlendirmeye alınan nokta doyma eğrisi üzerinde ise, buharın kızgın olması söz

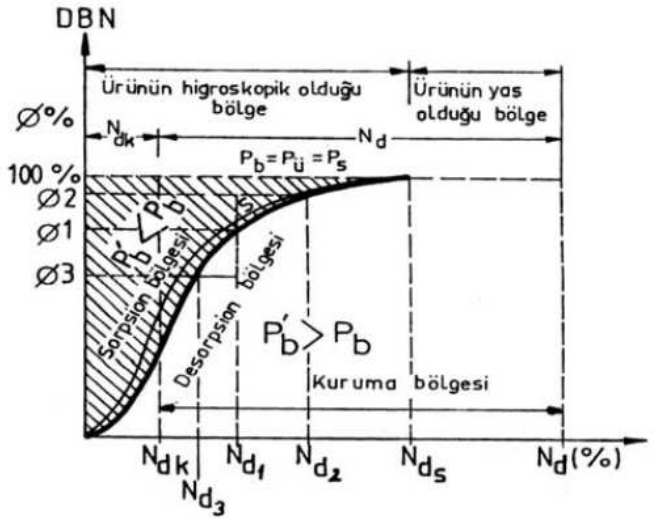
konusu değildir. Kolaylık açısından, genellikle psikrometrik diyagramlarda doygun havanın toplam enerjisine ait değerler, yaş termometre sıcaklık doğrularına paralel doğrular halinde gösterilmiştir. Örneğin 45 ^{o}C 'nin altındaki değerler için bu durum büyük hatalar oluşturmamaktadır, ama pek çok kurutma probleminde yüksek sıcaklıklar söz konusu olduğundan gerçek ve doğru toplam enerji doğrularının belirtilmesi gereklidir.

2.1.2.9. Nemli havanın özgül ısısı

Bir maddenin sıcaklığındaki artış miktarına göre içinde depoladığı ısı enerjisi, özgül ısı olarak tanımlanır. Kuru havanın özgül ısısı ile 1 kg kuru havanın içerdiği su buharı miktarının özgül ısıları toplanarak nemli havanın özgül ısısı bulunur.

2.2. Kurumanın Statiği

Denge durumunda havada bulunan su buharının kısmi basıncı (P_b) ile ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ($P_ü$) birbirine eşittir. Materyalin yüzey sıcaklığı yaklaşık çevre havası yaş termometre havası sıcaklığına eşit olduğundan ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ile ($P_ü$),havanın yaş termometre sıcaklığındaki su buharının kısmi buhar basıncı (P'_b) eşit alınabilmektedir. Bu nedenle denge durumunda materyalin ulaştığı nem (N_d), havanın kısmi buhar basıncına yani bağıl nemine (φ) bağlıdır (Yağcıoğlu, 1999).

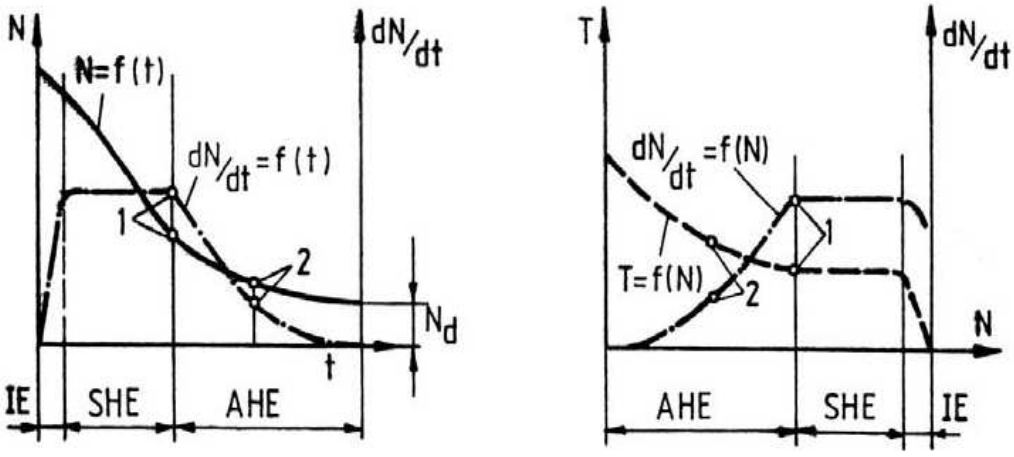


Şekil 2.3. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statiği açısından anlamı (Yağcıoğlu 1999)

Sorpsiyon ve desorpsiyon bölgeleri Şekil 2.3'de verilmiştir. İzoterm denge bağıl nemi (DBN) ekseni ile arasında kalan bölge (taralı alan) içindeki her noktada ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı havada bulunan suyun buhar basıncından daha küçük olduğundan bu bölge, materyalin bünyesine nem aldığı şartları belirtmektedir. İzoterm denge nemi ekseni ile arasında kalan bölge içinde ise durum tam ters olduğundan bu bölge materyalin çevreye nem verdiği şartları belirtmektedir. Tarım ürünlerinde bulunan suyun tümü, kurutma sırasında üründen tamamen alınmadığından gerçek kuruma bölgesi şekilde görülen alandan daha küçüktür. Bu nedenle kuruma bölgesi ürünün ulaşabileceği en küçük denge nemi N_{dk} değerinden geçen bir eksenden başlatılarak gösterilmektedir.

2.3. Kurumanın Kinetiği

Tarım ürünü ile bulunduğu ortamdaki nemli hava arasında nem transferi ile kuruma süresi boyunca geçen zaman dikkate alındığında Şekil 2.2' de verilmiş olan eğriler çizilebilir. Bu eğriler kinetik kuruma eğrileridir.



Şekil 2.4. Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri (Demir ve Günhan, 2002)

Herhangi bir ürün kuruma kinetiği açısından incelendiğinde aşağıdaki ilişkiler dikkate alınır (Yağcıoğlu, 1999):

- Materyalin nemi ile kuruma süresi: N=f(t)
- Kuruma hızı ile materyal nemi: dN/dt=f(N)
- Kuruma hızı ile kuruma süresi: dN/dt=f(t)
- Materyal sıcaklığı ile nemi: T=f(N)

2.4. Kuruma Evreleri

Kuruması için yeterli sıcaklıktaki bir ortama konan bir maddenin kuruma sürecinde genel olarak üç evre vardır. Bunlar ısınma evresi, sabit kuruma hızı evresi ve azalan kuruma hızı evreleridir (Doğantan, 1986). Kurumakta olan bir maddenin nem miktarındaki değişim Şekil 2.4' de verilmiştir.

2.4.2. Isınma evresi

Şekil 2.5'de AB ile gösterilen ısınma evresinde, ürünün sıcaklığının artışı kurutma havasının sıcaklığı ile dengeye ulaşıncaya kadar sürer (Doğantan, 1986). Bu evrede verilen ısı miktarı, ürünün ve bu ürünün bünyesindeki suyun sıcaklığını yükseltir. Bu evrede buharlaşma hızı yaklaşık t değişkenli bir fonksiyon uyarınca, sıcaklıkla birlikte artar (Güneş, 1994).

2.4.3. Sabit kuruma hızı

Sabit kuruma hızı evresi, Şekil 2.5'de BC çizgisi ile belirtilmiştir. Burada ürünün üzeri ince bir su tabakası ile kaplı olduğundan, önce su tabakası buharlaşmaya başlar. Başlangıçta çok hızlı olan buharlaşma, bir süre sonra yüzeyin hemen üzerinde oluşan buhar tabakası nedeniyle yavaşlar. Bu evrede kurutma hızı sabittir ve sadece katı maddenin yüzeyine etki eden değişkenler tarafından kontrol edilir. Bu değişkenler genellikle havanın hızı, akış şekli, sıcaklığı ve nemidir (Güneş, 1994). Şekil 2.5'deki C noktası, ürünün yüzeyinde serbestçe buharlaşabilen nemin sona erdiği noktayı belirtir, bu noktada sabit hızda kuruma sona erer ve bu noktadaki neme "kritik nem" adı verilir. Meyvelerde ve sebzelerde sabit kuruma hızı evresi, genellikle çok kısa sürmektedir (Doğantan, 1986).

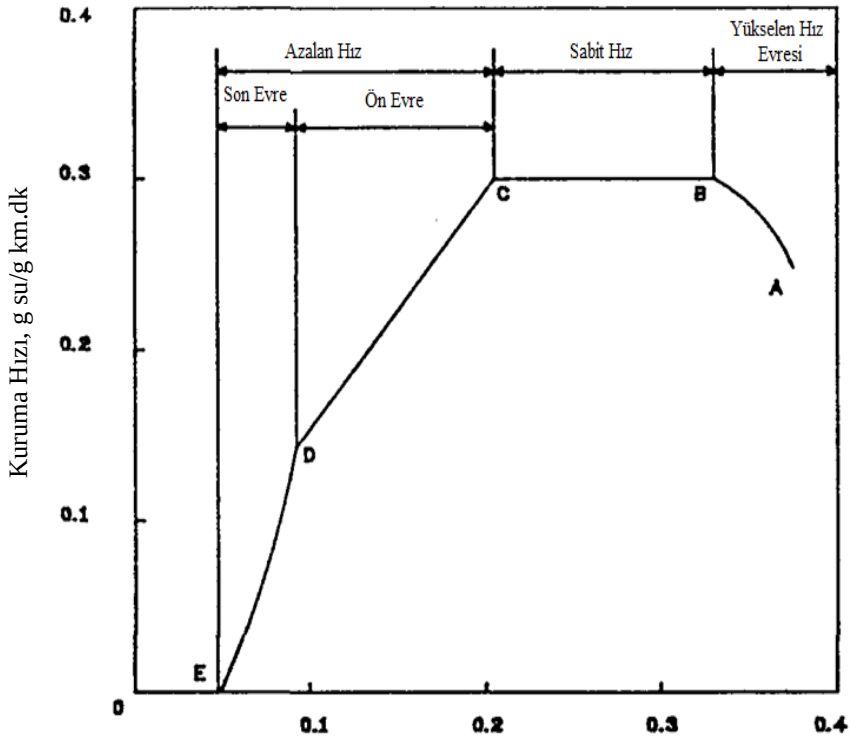
2.4.4. Azalan kuruma hızı evresi

Bu evre iki bölgeye ayrılabilir; azalan hızla kuruma ön evresi (CD) ve azalan hızla kuruma son evresi (DE) (Güneş, 1994). Bu iki evrede buharlaşma, ürünün içinde başlar. Su yüzeye difüzyon ile ulaşır. Yüzeye yakın bölümler, hem doğrudan yüzeye ve hem de kılcal (kapiler) nem verdiklerinden, iç katmanlara göre daha çok su kaybederler.

Bunun sonucu olarak ürünün dış yüzeyinde kabuk bağlama, büzüşme, çatlama ve yarılmalar görülür (Doğantan, 1986).

Malzeme yüzeyi üzerinde kuru lekeler görülmeye başladığı anda kritik nemlilik derecesine erişilmiş ve azalan hız ön evresine girilmiş demektir. Bu evrede hem yüzeyden serbest buharlaşma ve hem de iç kısımlardaki buharlaşan suyun hareketi etkili olmaktadır. Bu evrede katı yüzeyine ulaşan su buharlaşmaktadır. Malzemenin ıslak yüzey alanı azaldıkça buharlaşma hızı da düşer. Malzemenin tüm açık yüzeyi kuruduğu zaman bu evre de sona erer (Güneş, 1994).

Havanın hızı, sıcaklığı ve nemi azalan hız son evresinde daha etkili olmaktadır. Bu bölümde kuruma hızı tamamen içerisindeki nem hareketine bağlı olarak oluşur (Doğantan, 1986).



Şekil 2.5. Özgül nemin fonksiyonu olarak kuruma hızı eğrileri (Treybal, 1980)

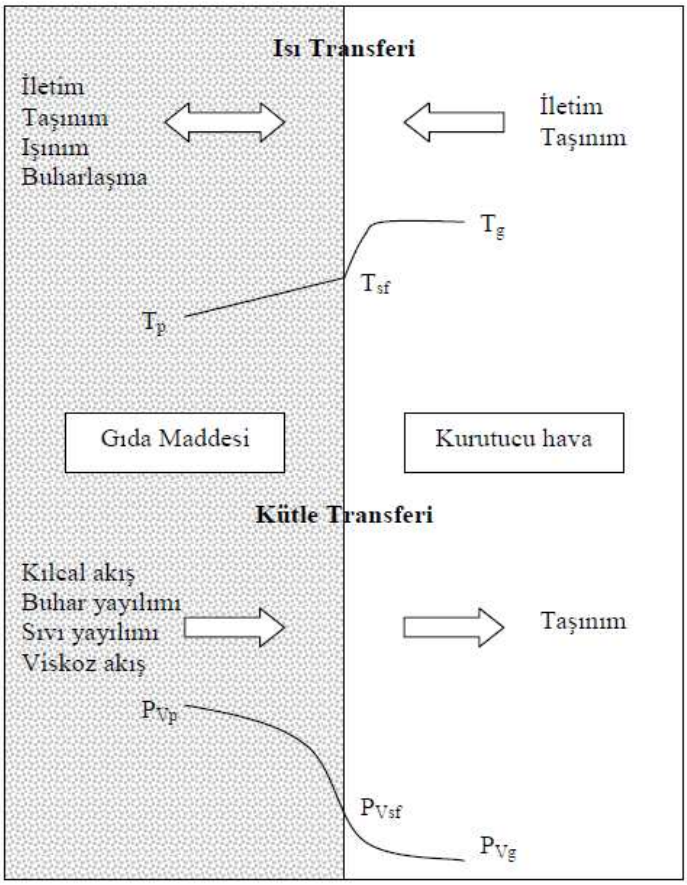
2.5. Kurutma Esnasında Isı ve Kütle Geçişi

Kurutma sırasında kurutulacak malzemenin içindeki suyu buhar haline getirip sonrada bu buharı uzaklaştırmak için, buharlaştırma gizli ısısı kadar bir ısı vermek gerekir. Konveksiyonla kurutulacak ürüne ısı geçişi, sıcaklık ürünün dışından hücrelere doğru olurken, buharlaşma hücreden dışa doğrudur.

Kurutma esnasında iki geçiş işlemi aynı anda gerçekleşir (Şekil 2.6). Bunlardan birincisi dış çevreden kurutulacak ürünün yüzeyine ısı geçişi ile birlikte malzeme içine ısı iletimi, ikincisi ise ürünün içinden yüzeye doğru olan ve yüzeye gelen nemin ürünü çevreleyen çevreye yayılması ile devam eden kütle geçişidir. Kurutulan ürüne ve kuruma şartlarına bağlı olan buharlaşma, yüzeyde ya da ürünün içinde olabilir. Ürün içine ısı geçişi, malzeme içindeki sıcaklık dağılımından dolayı iletimle ve daha az miktarda da nem hareketinden dolayı taşınımla olur.

Gıda maddelerindeki nem hareketi farklı iletim mekanizmaları ile olabilir. 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 (Erçetin, 2007).



Şekil 2.6. Kuruma esnasında ısı ve kütle geçişi (Erçetin, 2007)

2.6. Kurutma Yöntemleri

Kurutma, yöntem olarak “güneşte kurutma” ve “yapay kurutma” olarak iki gruba ayrılabilir (Cemeroğlu, 1986).

Yapay kurutma yönteminin esasını, kurutmaya tabi tutulan üründeki nemin uzaklaştırılması amacı ile sağlanan ısının transfer şekli oluşturmaktadır.

Kurutmada üç şekilde ısı geçişi olmaktadır:

- Taşınımla ısı geçişi
- İletimle ısı geçişi
- Işınımla ısı geçişi

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

Gıdalarda bulunan suyun miktarı, kendini çevreleyen havanın bağıl nemi ile ilişkilidir. Ayrıca gıdalarda bulunan su değişik fiziksel özeliklerdedir. Gıdalardaki suyun miktarı, suyun özeliklerine etki eden en önemli faktördür. Her gıdanın belli koşullarda ulaştığı ve çevresindeki ortama bağlı olan denge nemi, farklı ve kendine özgü olmaktadır (Cemeroğlu, 1986).

Gıda maddesi (meyve, sebze gibi) bulunduğu ortam şartlarında kendisini çevreleyen atmosferle nem açısından bir dengeye ulaşır. Şekil 2.1'de belirli sıcaklıklarda ve farklı bağıl nemli koşullarda tutularak dengeye erişmiş bir gıdada, gıdanın nem içeriği ile çevre havasının bağıl nemi arasındaki ilişki gösterilmiştir (Kavak ve ark., 1999). Gıdaların bulundukları ortam ile arasındaki nem dengesi; su tutma kavramını ortaya çıkarır. Bu kavram da her gıda maddesinin yapısındaki heterojenlikler, koligatif özellikler, kılcallık (kapillerite) ve yüzey etkileşimleri nedeniyle birbirinden farklılık gösterir.

3. KURUTMA SİSTEMLERİ

3.1. Morötesi Radyasyon Kurutma

Morötesi kurutmada elektromagnetik radyasyon kullanılır. Monomer yapılı kaplamalar ve boyar maddeler UV radyasyon etkisinde kurutularak işlenirler. Morötesi kurutmanın uygulanmasında en büyük sorun yüksek yatırım maliyetidir (Güngör ve Özbalta, 1997).

3.2. İletimle Kurutma

İletimle kurutmada, ısıtılan yüzey ürün ile temastadır ve malzemenin aşırı ısınmasını önlemek, ısıtmanın homojen olmasını sağlamak için gereken önlemler alınmalıdır. İletimle kurutma kâğıt ürünlerinin kurutulmasında ve üretiminde yaygın olarak kullanılır. Ancak iletimle kurutmada, yüksek kuruma hızlarına ulaşamama, üniform olmayan ısı ve kütle transfer koşulları, kontrol problemleri, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gibi sorunlarla karşılaşabilir. Tüm bu olumsuzluklara karşın iletimle kurutmanın diğer kurutma sistemlerine dönüştürülmesi ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetleri nedeniyle tercih edilmemektedir.

3.3. İnfrared (Kızılötesi) Radyant Kurutma

Termal radyasyon, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar, elektrikle ısıtılmış yüzeyler tarafından sağlanır. Bu mekanizma ile malzemenin yüzeyine yakın bölgeleri ısındığından, ince levha yapısındaki malzemelerin kurutulması için uygundur. Isı transferi termal radyasyon yayan malzemenin yapısı ve karakteristiği ile kurutulan maddenin özelliklerine bağlıdır ve ısıl verim düşük olabilir (Güngör ve Özbalta, 1997).

3.4. Dondurarak Kurutma

Dondurarak kurutma farmakolojik ürünler, serumlar, bakteri kültürleri, meyve suları, sebze, kahve ve çay özlerinin elde edilmesinde, et ve süt üretiminde uygulanabilir. Malzeme önce dondurulur. Ardından kimyasal nem alıcı veya düşük sıcaklık yoğuşturucusu ile bağlantılı yüksek vakum uygulanan hacme alınır. Dondurulan malzemeye iletim veya kızılötesi radyasyon ile ısı geçişi sağlanır. Bu

esnada uçucu element genellikle su süblimleşir ve yoğuşur, ya da nem alıcı madde tarafından absorplanır. Dondurarak kurutma genellikle -l0 °C ile -40 °C arasında uygulanır. Dondurarak kurutma pahalı ve yavaş gerçekleşen bir işlemdir, ısıya duyarlı malzemeler için uygundur.

3.5. Vakumda Kurutma

Vakumda kurutma düşük basınçlarda suyun düşük sıcaklıklarda (buharlaşması) kaynaması gibi avantaja sahiptir. Kurutulacak ürün kapalı kap içine konularak kabın havası vakumla alınmaktadır. Basınç düştüğünden ürün içindeki suyun daha düşük sıcaklıklarda buharlaştırılarak kurutulması esasına dayanır. Kağıt sanayinde kısmen uygulanmaktadır (Anonim, 2010).

3.6. Karıştırmalı Yatakta Kurutma

Titreşimli raf veya konveyör kullanılarak malzemenin sürekli ve belli aralıklarla titreştirilmesi sonucu üniform bir kuruma elde edilir. Aynı sonuç delikli raf veya konveyör üzerindeki yatağın kısmi akışkanlaştırılması ile de elde edilir. Tahıl kurutulması için uygundur.

3.7. Akışkan Yatakta Kurutma

Akışkanlaştırılmış yatakta tanecik yapısındaki maddeler arasından kurutma ortamı gaz akımı geçirilir. Gaz hızı çok dikkatli ayarlanmalıdır. Toz veya taneli yapıdaki kurutucular malzeme ile akışkanlaştırma gazı arasında temas çok iyi olduğundan, kurutma havası ve tanecikler arasında ısı transferi de etkin şekilde gerçekleşir. Bu mekanizma ile yüksek sıcaklıklarda sakıncası olmaksızın malzemelerin kurutulması mümkündür. Otomatik yükleme ve boşaltmanın mümkün olduğu bu sistemin en önemli avantajı, kurutma işleminin kısa sürede tamamlanmasıdır.

3.8. Kızgın Buhar Atmosferinde Kurutma

Kızgın buhar ortamında kurutma işleminde, ürünün hava veya bir başka gaz ile kurutulması işlemi sırasında buharlaştırılan çözücü (su veya organik sıvı) yığın gaz

akımına ulaşmak için durgun bir gaz filmine yayılmalıdır. Gaz filmi, kütle transferine karşı bir direnç gösterir ve kurutma miktarı, çözücü buharı yayılım oranına bağlı olarak değişir. Eğer gaz, çözücü buharı ile yer değiştirirse, buhar fazındaki kütle transferine olan direnç ihmal edilir ve kurutma oranı yalnızca ısı transfer oranına bağlı olarak alınır. Çözücü buharındaki kurutma oranı (kızgın buhar gibi), kurutucu akışkanının sıcaklık ve kütle akışı oranından daha büyüktür. Bu yöntemin ısıl verimi oldukça yüksektir, çözücünün sisteme geri kazanılması mümkündür. Ayrıca aşırı kurutma ve havanın oluşturduğu oksitlenme ve diğer kimyasal reaksiyonlar gözlenmez. Kumaş kurutmada kızgın buhar kullanılırsa, reçine ve boya maddelerinin bir yerde birikmesi önlenir. Kızgın buharla kurutma, yüksek sıcaklıklar nedeniyle ısıya dayanıklı olmayan malzemelere uygulanmaz.

3.9. Flaş Kurutma

Düzgün şekilde bölünmüş katı parçacıklar, sıcak gaz akımı içerisine yayılarak hızlı ve düzgün bir şekilde kurutulabilir. Ticari uygulamalarda pigment (boya maddesi), sentetik reçine, yiyecek maddeleri, sulu bileşikler, alçılar, kil ve tahta kurutulması gözlenmektedir (Günerhan, 2005).

3.10. Tünel Kurutucu

Sürekli veya yarı sürekli olarak çalıştırılan tünel kurutucu modifiye edilmiş kurutucudur. Kurutma ortamı olarak kullanılan sıcak hava fan yardımı ile sistemde dolaştırılır. Malzeme, raf veya bantlar üzerinde kurutulur. Hava akımı, malzeme ile paralel zıt akışlı veya her ikisinin birlikte uygulaması olarak sistemden geçirilir. Kurutucuda havanın tekrar ısıtılması veya tekrar kullanılması ile sistemi terk etmeden önce daha fazla nem alması sağlanabilir.

Tünel kurutuculardа farklı hava hızı, sıcaklığı ve akış yönü ile kurutma yapmak mümkündür. Giriş ve çıkışta sıcak hava kayıplarını önlemek için gereken önlemler alınmalıdır.

3.11. Püskürtmeli Kurutucular

Püskürtmeli kurutucular genellikle süt tozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılır. Kurutulan ürünler üniformdur ve kuruma süreleri (5 ile l5 saniye arasında)

değişir. Bu sistemlerde sıcak kurutma ortamına, malzeme bir püskürtücü yardımıyla gönderilir. Gazın giriş sıcaklığı 93 ºC ile 760 ºC arasında değişir. Isıl verimlilik, kurutma ortamının giriş sıcaklığı ile arttığından, kurutmada yüksek sıcaklıklar tercih edilir. Püskürtmeli kurutucular, kuruma süresinin çok kısa olması nedeniyle ısıya duyarlı malzemelerin kurutulması için de uygundur. Kurutma ortamı, besleme akımı ile paralel veya zıt yönde sistemden geçirilebilir. Çıkış gazı ile sürüklenebilen toz halindeki malzeme siklon seperatör veya torba filtrelerde tutulur.

Kurutulan ürünün tanecik büyüklüğü, yoğunluğu gibi özellikleri kurutma gazının sıcaklığı ve püskürtme karakteristiklerinden etkilenir. Ürünün son nem içeriği kurutma ortamından çıkan gazın sıcaklık ve nemi ile kontrol edilir. Ortalama tanecik çapı, kuruma süresi, sistem hacmi, giriş ve çıkış sıcaklıkları ile ilgili deneysel eşitlikler ile ilgili literatürden sağlanabilir.

3.12. Taşınım Kurutucu (Direkt Kurutucu)

Taşınım etkisiyle kurutma tüm kurutuculardа gözlenmekle birlikte, ısı kaynağı olarak sıcak hava veya diğer gazların kullanıldığı kurutucular bu sınıfa girer. Kurutucuların genelinde bir miktar taşınım ile kurutma olayı gerçekleşmektedir.

3.13. Döner Kurutucular

Kurutucu ısıtılması direkt veya endirekt olacağı gibi hava akımı paralel veya zıt akışlı olabilir. Silindirik kısımlar, kurutulacak malzemeyi hava akımı içerisine fırlatarak kurutma yaparlar. Kurutmayı yapacak kısımlar doğrudan veya dolaylı olarak ısıtılır, hava akışına paralel veya ters akımlı olarak uygulanabilir. Döner raflı kurutucuda hava, rafların altına verilir (Günerhan, 2005).

3.14. Kabin Kurutucular

Bu tip kurutuculardа kurutulacak malzeme temas yüzeyini arttıracak şekilde raflara serilir. Eğer kurutulmakta olan ürünün içerdiği nem patlayıcı-yanıcı özellikte ise kurutma işleminin başında veya yüksek hızda buharlaşmanın gözlendiği anlarda çıkış havasının tamamı sisteme geri gönderilmeden dışarı verilmelidir. Normal çalışma koşullarında ise çıkış havasının bir bölümünü sisteme geri göndermek ekonomik bir yöntemdir.

3.15. Mikrodalga Kurutma

Mikrodalga kurutmada çok yüksek frekanslı (900 ile 5000 Mhz) güç kaynağı kullanılır. İletken olmayan maddelerin ısıtılmasına uygulandığından bir dielektrik ısıtma formu olarak nitelenebilir. Mikrodalga kurutma şerit şeklindeki ince malzemelere uygulanır.

Sistem giriş ve çıkışında alınması gerekli koruyucu önlemler sürekli çalışmayı zorlaştırır. Sistemi çalıştırmak için gerekli emniyet önlemleri mikro dalga kurutmayı, dielektrik kurutmaya göre daha pahalı hale getirir.

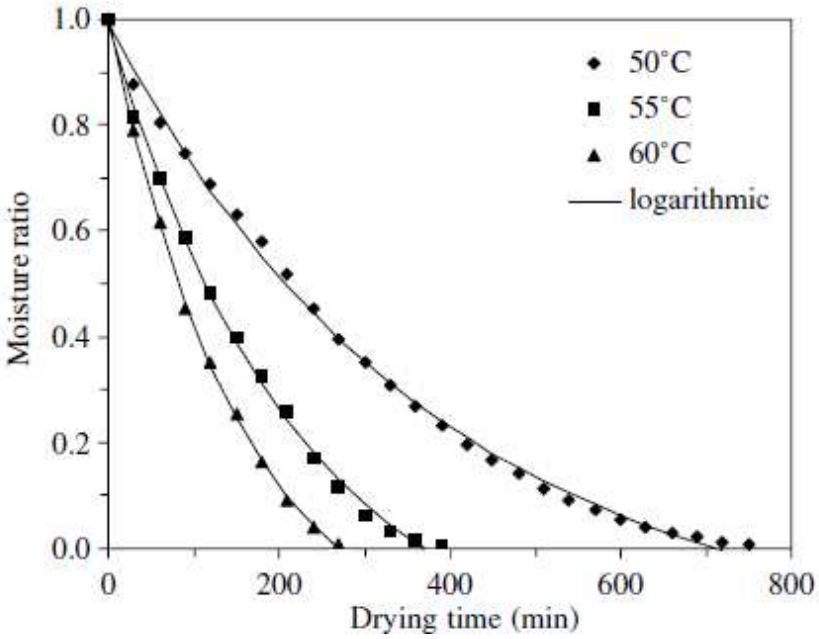
3.16. Dielektrik Kurutma

Nemli malzeme yüksek frekanslı elektrostatik alana yerleştirilirse, malzeme içinde ısı üretilir. Nemli bölgelerde kuru bölgelere göre daha fazla ısı üretilir. Bu şekilde malzeme içinde nem profili otomatik düzenlenir. Su, malzeme aşırı derece ısıtılmaksızın buharlaşır.

4. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Garcia ve ark. (2007), çalışmalarında balkabağının ozmotik ve hava kurutucuda kurutulmasının kinetiğini incelemişlerdir. Deneyler kabak dilimlerinin (3,97 ± 0,15 mm kalınlığında ve yaklaşık 20-25 cm² alanında) %40 ,%50 ve %60 w / w 15 kg ağırlığında sükroz (Şeker kamışı ve şeker pancarının işlenmesiyle elde edilen basit şeker) solüsyonunun içinde, 27 º C sıcaklıkta gerçekleştirmişlerdir. Sıcak hava ile yapılan deney ise ön işlemli ve ön işlemsiz olarak ve iki farklı sıcaklıkta 50 ve 70 °C, 2 m/sn hızda ve yine 3,97 ± 0,15 mm kalınlığında ve yaklaşık 20-25 cm² alanında kesilmiş kabak dilimleri ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerle, kurutulmamış ürünün özgül hacmi, ozmotik ve sıcak hava ile kurutulmuş örneklerin özgül hacim ve büzülme oranları hesaplanmıştır.

Doymaz (2007), sıcak hava akımı ile kurutulan kabak dilimlerinin (0.7 ± 0.03 cm kalınlığında) kinetiğini incelediği çalışmasında 50, 55 ve 60 ºC olarak seçilen hava sıcaklıklarında, 1 m/sn hava hızında, %15 ve %25 bağıl nem şartlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçları Fick's difüzyon modeli ile karşılaştırarak grafikler çizmiş ve difüzyon katsayısını hesaplamıştır.



Şekil 4.1. Deneysel ve logaritmik model ile hesaplanan nem oranı (Doymaz, 2007)

Akpınar ve ark. (2003), siklon tipi bir kurutucuda kabağın kuruma davranışını incelemişlerdir. Deneyler 60, 70 ve 80 °C 'lik üç farklı hava sıcaklığında, 1 ve 1,5 m/sn

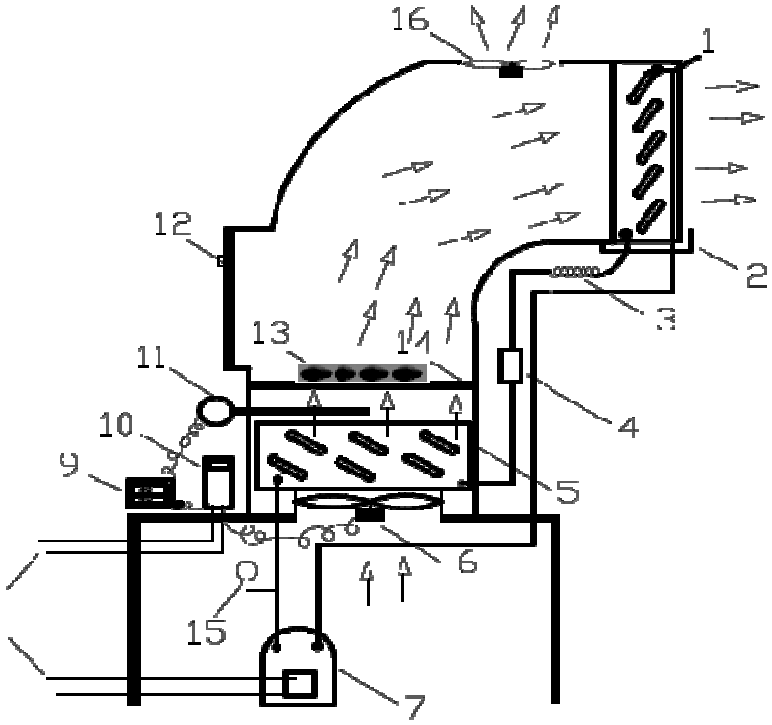
hava hızlarında, 35 mm çapında ve 5 mm kalınlığında kesilmiş kabak dilimleri ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrileri lineer olmayan regresyon analizi kullanılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Deneyde kullanılan ekipman ve ölçümlerden doğabilecek hatalar hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklarda, farklı hava akış hızlarında kurutulan örneklerde kuruma hızında, hava hızından çok, hava sıcaklığının etkisinin daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrileri üssel bir eşitlikle modellenmiştir. Modelin deney sonuçlarına uygulanması sonucunda yapılan istatiksel analizde korelasyon katsayısı, modelin modelleme yeterlilik değerlerinin yüksek, tahmini standart hatasının ve khi-kare değerlerinin çok düşük olduğu görülmüştür.

Nasıroğlu (2007), çalışmasında kırmızı biber, elma ve pırasayı kızılötesi bir kurutucuda kurutmuştur. Deneyde ısı kaynağı olarak 250 W gücünde 2 adet kızılötesi lamba kullanılmış ve deneyler 300, 400, 500 W güçlerinde ve 1,0 – 1,5 – 2,0 m/sn hava hızlarında yapılmıştır. Deneylerde elma ve kırmızıbiberi 20x20 ± 0,5 mm pırasa ise 6 ± 0,5 mm olarak dilimlere ayrılarak kurutulmuştur. Deneyler sonucunda nem-kuruma süresi, kuruma hızı-nem içeriği grafikleri çizilmiştir. Kırmızı biberin 1,0-1,5-2,0 m/sn hava hızlarında 300 W kızılötesi lamba gücünde 315-455 dakika arasında, 400 W infrared lamba gücünde 213-297 dakika arasında, 500 W infrared lamba gücünde 196-230 dakika arasında kuruduğu görülmüş, elmanın ise yine aynı hız ve sırası ile aynı infrared lamba gücünde 198-274 dak., 171-261 dak., 137-170 dakikada kuruduğu ve en son pırasa için bu değerin sırası ile 305-341 dak., 195-244 dak., 183-241 dakikada kuruduğu görülmüştür. Deneyde ürünün kuruma süresi hava hızının artırılması ile artış gösterirken infrared lamba gücünün artırılması ile azalmıştır.

İzli (2007), mısırın sıcak hava akımı ile kurutulmasını deneysel olarak incelemiştir. Deney seti olarak laboratuar tipi sıcak hava kurutma düzeneği kullanarak mısırın (ürün yüksekliği 0,03 mm, ürün miktarı 250 kg) bağıl nemini % 16,4 den % 10 değerine indirmiştir. Deneyler 1 m/sn sabit hava hızında, farklı sıcaklıklarda (ısıtılmamış çevre havası, 45 ºC, 55 ºC, 65 ºC, 75 ºC), karıştırıcılı (37 dev/dk) ve karıştırıcısız olarak yapılmıştır. En kısa süreli kurutma karıştırıcısız olarak 75 ºC sıcaklıkta ve 375 dakikada, karıştırıcılı olarak is 300 dakikada yapılan deneylerde elde edilmiştir. En uzun kurutma süresi ise karıştırıcısız olarak 3120 dakika ve karıştırıcılı olarak 2520 dakika süren ısıtılmadan yapılan deneylerde elde edilmiştir. Ayrıca

deneylerde farklı sıcaklıklarda kurutulan mısırın çimlenme hızı ve çimlenme gücü de ölçülmüştür.

Ceylan ve ark. (2008), çalışmalarında ısı pompası destekli bir kurutucuda fındığın kurumasını incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 4.2'de görülmektedir.



1. Evaporatör, 2. Yoğuşan su 3. Kılcal boru 4. Kurutucu filtre 5. Kondenser 6. Eksenel fan (F1)
7. Kompresör 8. Besleme 9. Proses kontrol ekipmanı 10. Invertor (AC farklı hız sürücülü)
11. Termokupl (T, Pt-100) 12. Kapak 13. Kurutulacak ürün 14. Raf 15. Manometre 16. Eksenel Fan (F2)

Şekil 4.2. Isı pompalı PID kontrollü kurutucu

Deneyler başlamadan önce fındıkların tam kuru ağırlığı etüv fırınında nem kaybı sonucu ürünün ağırlığındaki değişim ele alınarak tespit edilmiştir. Daha sonra 1000 gram fındık ısı pompalı kurutucuda kurutma kabinine yerleştirilerek, 40 ºC sıcaklıkta ve 0.3 m/s hızındaki kurutma havası ile kurutulmuştur. Fındıklar 40 ºC kuru termometre sıcaklığında, ortalama %25 bağıl nemde ve 0.38 m/s hava hızında, %35 nem (kuru esas) miktarından %5 nem (kuru esas) miktarına 30 saatte indirilmiştir. Deneyler neticesinde nem miktarı- kuruma süresi; su aktivitesi-kuruma süresi grafiklerini çizmişlerdir.

Akpınar (2005), siklon tipi bir kurutucuda cihazlardan (kalibrasyon, hassasiyetleri vb), kişisel hatalardan (hatalı değer okuma, değer okuma tekrar

sürelerindeki hatalar vb) ve tablolardan kaynaklanan hataların analizini ele almıştır. Hata analizi konusunu teşkil eden ölçüm cihazları ile ilgili oluşabilecek hatalara yer verilmiştir. Sıcaklık ölçümünde yapılan hatalar, zaman ölçümünden kaynaklanan hatalar, kütle kaybının ölçülmesinden kaynaklanan hatalar, hız ölçümünden kaynaklanan hatalar, havanın bağıl neminin ölçülmesinden kaynaklanan hatalar, örneklerin bünyesindeki nem miktarının tespit edilmesinde ortaya çıkan hatalar ve deneyler sırasında elde edilen deneysel verileri kullanarak yapılan hesaplamalarda ihtiyaç duyulan tablo değerlerinin ya da fiziksel değerlerin okunması sırasında yapılabilecek hatalar ele alınmış ve bu hataların analitik ifadelerine yer verilmiştir.

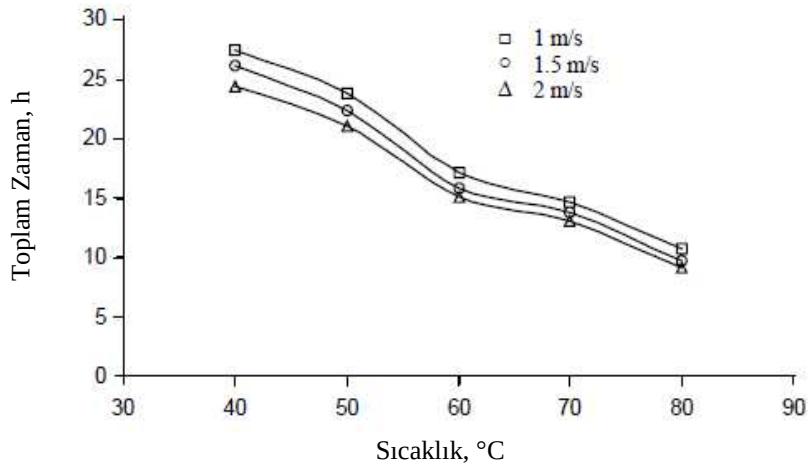
Doymaz ve ark. (2000), çalışmalarında maydanozu APV & PASILAC firması yapımı kabin kurutucuda ve İ.T.Ü KOSGEB Teknoloji Geliştirme Merkezi'nde bulunan, MAKİMSAN firması yapımı mikrodalgalı kurutucuda kurutmuşlardır. Maydanozun nem içeriğinin belirlenmesinde AOAC, 920.151 yöntemi uygulanmıştır. Kurutmadan önce yapılan nem içeriği analizleri sonucunda örneklerin % 78,3-83,4 oranında nem içerdiği belirlenmiştir. Maydanozlar her iki kurutucuda yaklaşık % 6–8 nem içeriğine kadar kurutulmuşlardır. Kurutma deneyleri her iki sistemde de 40, 45, 50, 55, 60 ve 70°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Her denemede 200 g taze maydanoz kurutulmuştur. En kısa sürede kuruma (25 dk), deneydeki en yüksek sıcaklık olan 70°C'de gerçekleşmiştir. Deney sonucunda ağırlık-süre, nem içeriği –kuruma süresi grafikleri çizilmiştir. Ayrıca maydanozun farklı kuruma sıcaklıklarında görsel kalitesindeki değişim de tablo halinde verilmiştir.

Aktacir ve ark. (2006), nın çalışmasında, şerit şeklinde kesilmiş gıda maddeleri için bir boyutlu kütle transfer teorisi kullanılarak, basit bir kurutma modeli elde edilmiştir. Model sonuçları ile kırmızıbiber için gerçekleştirilen kuruma deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Deney düzeneği; elektrikle ısıtılan, termostatlı ve dijital göstergeli bir etüv ile dijital göstergeli (hassasiyeti 0.01 g) bir teraziden oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan yaklaşık 0,2 cm kalınlığındaki kırmızıbiber örnekleri, bir boyutlu kütle transfer modeline uygun olarak, şerit geometride (kütle transfer alanı A=10 cm^2) hazırlanmıştır. Her bir deney için, yaklaşık aynı boyutlarda, üç numune kullanılarak, matematik modelin uygulanmasında bu üç numuneye ait ağırlık değişiminin aritmetik ortalaması alınmıştır. Numuneler, 70±1°C sıcaklıktaki etüvde kurutulmaya bırakılmıştır. Örneklerin ağırlıklarındaki değişim, yarım saat aralıkla tespit edilmiştir. Biberlerin başlangıç nemi, ağırlık metoduna göre belirlenmiştir. Kuru ağırlığın bulunması için,

biberlerden alınan örnekler, 110°C sıcaklığındaki etüve konularak, zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Ölçümler; bir önceki ölçüm ile son ölçüm arasındaki fark 0.05 g oluncaya kadar sürdürülerek, kuru ağırlık belirlenmiştir. Transfer edilen nem miktarı ve kuruma eğrileri için deney ve model karşılaştırılmalı olarak grafiklerde verilmiştir. Deneysel ölçüm ve model sonuçları arasındaki uyum mükemmele yakındır. Model ile elde edilen anlık kuruma hızlarında *v(t)* ilk anda çok yüksek kuruma hızları öngörmekte ve giderek azalan bir hızda devam etmektedir.

Mirzaee ve ark. (2009), kayısının kurutulmasında nem difüzyonunu ve enerji aktivasyonunu incelemişlerdir. 40, 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklıkta ve 1, 1,5 ve 2 m/sn hava hızı ile deneyler yapmışlar ve sonuçları grafikler halinde vermişlerdir. İkinci Fick yasasına göre denklem katsayıları hesaplanmıştır. Nem difüzyonu $1{,}7x10^{-10}$ ve $1{,}15x10^{-9}$ m²/sn arasında değişmiş ve enerji aktivasyonu ise farklı hızlarda 29,35-33,78 kJ/mol arasında değişmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler sayesinde farklı hava hızlarında ve sıcaklıklarında kayısının kuruma süresini gösteren grafik
Şekil 4.3'de verilmiştir.

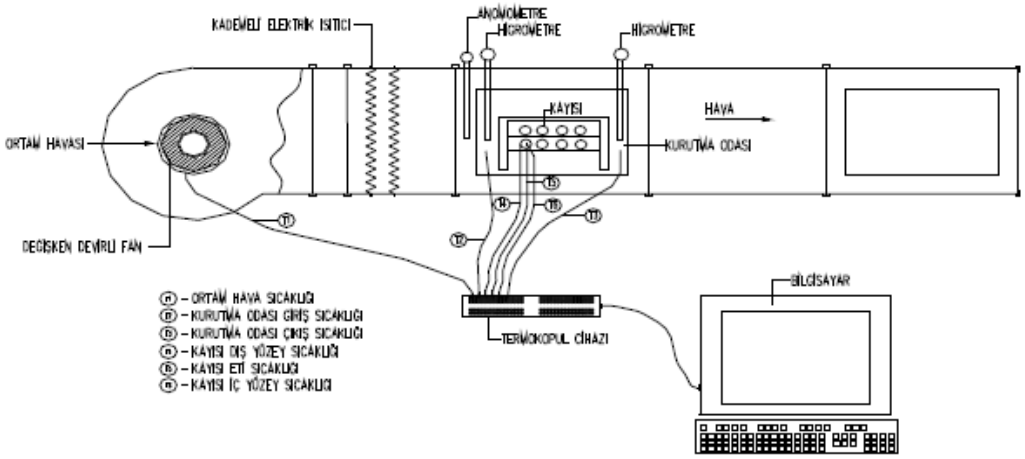


Şekil 4.3. Farklı sıcaklık ve hızlarda kayısının kuruma süresi (Mirzaee ve ark., 2009)

İsaeva (2007), kayısı kurutma işlemini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Deneylerin yapıldığı düzenek Şekil 4.4.'de verilmiştir. Deneyde Hacıhaliloğlu ve Kabaaşı kayısı çeşidi örnekleri, ön işlem uygulandıktan sonra farklı sıcaklık (40 °C, 50

°C, 60 °C, 70 °C) ve hızdaki hava (1,5 m/s, 2,5 m/s, 3,5 m/s) koşullarında kurutulmuştur.

Kurutma odasında kurutma işlemine tabi tutulan kayısılar üzerinde, ilk iki saat için yarım saatte, sonrasında ise birer saatlik zaman aralıklarında terazi ile tartımlar gerçekleştirilmiş, ortam sıcaklığı, kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıkları, kayısının iç ve dış yüzey sıcaklıkları ±0.1 °C hassasiyetli ısıl çiftler ile ölçülerek bilgisayar programı yardımı ile kaydedilmiştir. Deneyde en hızlı kurumanın 70 °C sıcaklıkta ve 3,5 m/sn hava hızında, en yavaş kurumanın ise 40 °C sıcaklıkta ve 1,5 m/sn hava hızında gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4.4. Kayısı kurutma deney düzeneği (İsaeva, 2007)

Lahsasni ve ark. **(2004),** çalışmalarında konvektif bir güneş enerjili kurutucuda Frenk incirinin kuruma kinetiğini incelemişlerdir. Marakkeş'te yapılan deneyde ortam hava sıcaklığı 32-36 °C ve bağıl nem % 23-34 olarak ölçülmüştür. Deneyler 50, 55 ve 60 °C hava sıcaklığında, 0.0227, 0.0556 ve 0.0833 m/s hava debisinde ve 0.5667, 1.1333 ve 1,7 m/s hava hızlarında 9 adet varyasyon denenerek yapılmıştır. İncirler kurutulmadan önce 1 g ağırlığında ve 0,5 cm x 2 cm çap ve yüksekliğinde parçalara ayrılmıştır. Marquardt-Levenberg lineer olmayan optimizasyon yöntemi kullanılarak ''Curve Expert 3.1'' bilgisayar programı ile eğriler elde edilmiştir. Hava hızı ve sıcaklığının kurutmaya etki eden en önemli faktörler olduğu görülmüştür.

Alibas (2006), çalışmasında pazı yapraklarının mikrodalga, konveksiyonel tip kurutucu ve birleştirilmiş (mikrodalga-konveksiyonel) kurutucudaki kurutma karakteristiği incelenmiştir. 25 g ağırlığında ve nem oranı % 9,35 olan pazı yaprakları mikrodalga, konveksiyon ve mikrodalga–konveksiyon tip kurutucularda kurutulmuştur.

Kurutma işlemleri yapraklardaki nem oranı % 0,1'e düşünceye kadar devam etmiştir. Kurutma periyotları ise 5 – 9,5, 22 – 195 ve 1,5 – 7,5 dakika olarak belirlenmiştir. Optimum değer 75 ºC sıcaklıkta ve 500 W mikrodalga kurutucuda elde edilmiştir.

Aktaş ve ark. (2008), çalışmalarında ısı pompası destekli kurutma fırınında fındık kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Kurutma sonrası fındıklar duyusal olarak analiz edilmiş ve nem değişimi kütle ölçüm metodu ile takip edilmiştir. 1000 gram fındığın ısı pompalı kurutucuda kurutma havasının sıcaklık değeri 40 ºC ve hızı 0.3 m/s olarak alınmıştır. Yapılan deneyler neticesinde kuruma süresi–nem miktarındaki değişim, kuruma esnasında havanın bağıl neminin ve sıcaklığının değişimi grafik halinde verilmiştir.

Koç ve ark. (2004), çalışmalarında zorlanmış konveksiyonel güneş enerjili bir kurutucu tasarlamışlar ve kırmızıbiberin (*Capsicum annum*) kurutulmasında kurutma performansını incelemişlerdir. Kurutma işlemi, havanın kurutma odasına giriş hızı 1.25 m/s ve her bir biber 8 eşit parçaya dilimlenerek gerçekleştirilmiştir. Kurutma odasına konulan 5 kg taze biberin ağırlığı, başlangıç ağırlığının % 20'sinin altına düşene kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Havada daha hızlı bir kurutma sağlanmasına karşın, L-askorbik asit (C-Vitamini) ve renk seviyeleri incelendiğinde kurutucu ile kurutulan biberlerde elde edilen değerler açıkta kurutulan biberlerden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Mengeş (2005), çalışmasında patatesin havanın farklı sıcaklıklarında ve ön işlem şartlarında gösterecekleri kurutma karakteristiklerini belirlemiştir. Kurutma işlemi 60 ºC, 70 ºC ve 80 ºC hava sıcaklığında ve 2 m/sn hava hızında yapılmıştır. Patatesler 20x10x4 mm, 12.5x12.5x12.5 mm ve 25x12.5x12.5 mm boyutlarında kesilerek kurutulmuştur. Patateslere ait kuruma sabiti (k) değerleri 20x10x4 mm boyutundaki patates örneklerinde 1,997-3.787, 12.5x12.5x12.5 mm boyutundaki patates örneklerinde 0,851-1,341 ve 25x12.5x12.5 mm boyutundaki patates örneklerinde ise 0,601-0,833 arasında tespit edilmiştir.

Arıcı (2006), çalışmasında mantarın *(Agaricus bisporus)* kurutma havasının farklı sıcaklık ve hızlarda gösterecekleri kurutma karakteristiklerini belirlemeye çalışmıştır. Denemelerde hava sıcaklığı olarak 50 ºC, 60 ºC ve 70 ºC, hava hızı olarak 1.0 , 2.0 ve 3.0 m/s alınmıştır. Mantarın *(Agaricus bisporus)* kuruması esnasında belirli bir andaki nem içeriğini belirlemek amacı ile Newton, Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Papis, Logaritmik, iki terimli, iki terimli ve eksponansiyel, Wang ve Sign,

Thompson, difüzyon yaklaşımı, Geliştirilmiş Henderson ve Papis, Verma ve ark. ve Midilli ve ark. modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Sacılık (2007), çalışmasında ince dilimlenmiş domateslerin kurutma prensibini incelemiştir. Kurutma çeşidi olarak konveksiyonel bir kurutucuda çalışılmıştır. Konveksiyonla kurutma deneyinde kurutma havasının hızı 0,8 m/sn ve sıcaklığı 50 – 70 ºC olarak seçilerek domatesin kuruma karakteristiği incelenmiştir. Bu deneyde Page, Henderson ve Pabis, logaritmik ve iki terimli modellerden faydalanılmış ve logaritmik modelin domateslerin kurutma karakteristiği için en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir.

Doymaz (2005), çalışmasında bamyanın kurutma kinetiği ve karakteristiğini incelemiştir. Kurutma havası sıcaklığını 50 ve 70 ºC, kurutma havası bağıl nemini % 8 ve % 25 seçerek konveksiyonel bir deney sisteminde bamyanın kuruma karakteristiğini incelemiş ve grafikler elde etmiştir. Deneyler 1 m/sn kurutma havası hızında ve 30x30 cm deney düzeneği haznesine yerleştirilmiş olan 100 gr bamya ile yapılmıştır. Deney sonucunda kuruma eğrilerinin zamanla azaldığı görülmüştür. Bamyanın nem transferi Fick difüzyon modeli uygulanarak tanımlanmış ve etkili difüzyon hesaplanmaya çalışılmıştır.

Mengeş ve ark. (2007), çalışmalarında 60, 70, 80 ºC hava sıcaklığında, 1.0, 2.0 ve 3.0 m/s kurutma havası hızında vişnenin kuruma davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar kuruma süresinin belirli bir anındaki nem içeriğini belirlemek için kullanılan Newton, Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Papis, logaritmik, iki terimli, iki terimli ve eksponansiyel, Wang ve Sing, Thompson, difüzyon yaklaşımı, geliştirilmiş Henderson ve Papis, Verma ve ark. ve Midilli ve ark. modellerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tahmini standart hatası (RMSE) ve khi-kare (χ^2) değerleri kullanılarak vişnenin kuruma davranışını açıklayan en uygun modelin Midilli ve ark. modeli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Fick'in II. Yasası kullanılarak yapılan hesapta her bir sıcaklık için difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisinin sıcaklıkla arttığı tespit edilmiştir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Balkabağı (*Cucurbita moschata*)

Kabakgiller (*Cucurbitacea*) familyasına dâhil olan balkabağının Latince adı *Cucurbita moschata*'dır (Şekil 5.1.). Özellikle Asya ve Amerika'da çokça yetiştirilmekte olan balkabağı, uzun silindirik, basık yuvarlak ve armut şekillerinde olabilir (Kaya, 2006). Kabuk rengi sarı, turuncu sarı ve turuncu olup et rengi ise açık turuncudan koyu turuncuya kadar değişebilir. Kabuğu düz olanlar yanında oluklu ve dilimli olanlara da rastlanır. Ortalama ağırlıkları 5-60 kg arasında değişmektedir (Vural ve ark., 2000). Kabak, tek yıllık bir kültür sebzesidir. Köklerin %60-70'i toprağın 30 cm'lik derinliğinde bulunur. Balkabaklarının kökleri 1-1,5 m derinliğe kadar inebilir. Balkabakları 6,5-7,5 pH aralığındaki toprakta en iyi ve en verimli şekilde meyve verir. İklim şartlarının ise ılıman olması gerekir ve 18-27 °C arasındaki sıcaklıklara ihtiyaç duyarlar. Olgunlaşmaları için yaklaşık 3-4 ay gibi bir süre gereklidir (Salunkhe ve Kadam, 1998).



Sekil 5.1 Balkabağı bitkisi ve sebzesi (*Cucurbita moschata*)

Balkabağı, karbonhidrat ve protein bileşimi ile besleyici bir meyve olup yüksek miktarda da vitamin ve mineral içeriğine sahiptir. Yüksek miktarda potasyum, kalsiyum, fosfor ve magnezyum içermesinin yanında yapısında çinko, demir, bakır

ve mangan da bulundurduğu, önemli miktarda A vitamini ve karotenoid maddeler ile C ve B_2 vitaminlerini de içerdiği belirtilmektedir. Balkabağının yağ içeriği düşük olmakla birlikte yağ bileşiminin büyük bir kısmı doymuş ve tekli doymuş yağlardan oluşmaktadır (Kaya, 2006). Çizelge 5.1. de balkabağının kimyasal bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Balkabağının kimyasal bileşimi (Kaya, 2006)

Besin Ögeleri	**Birim**	**Miktar /100g**
Enerji	kcal	26,00
Protein	g	1,00
Toplam Yag	g	0,10
Kül	g	0,80
Karbonhidrat	g	6,50
Lif	g	0,50
Mineraller		
Kalsiyum	mg	21,00
Demir	mg	0,80
Magnezyum	mg	12,00
Fosfor	mg	44,00
Potasyum	mg	340,00
Sodyum	mg	1,00
Çinko	mg	0,32
Bakır	mg	0,13
Mangan	mg	0,13
Selenyum	µg	0,30
Vitaminler		
C Vitamini	mg	9,00
Tiyamin	mg	0,05
Riboflavin	mg	0,11
Niasin	mg	0,60
Pantotenik asit	mg	0,298
B6 Vitamini	mg	0,061
Toplam Folat	µg	16,00
Folik asit	µg	0,00
B12 Vitamini	µg	0,00
A Vitamini	IU	1600,00
Retinol	µg	0,00
Vitamin A	µg (RAE)	80,00
Vitamin E	mg (ATE)	1,06

Aminositler		
Triptofan	g	0,012
Treonin	g	0,029
Izoleusin	g	0,031
Leusin	g	0,046
Lisin	g	0,054
Metionin	g	0,011
Sistein	g	0,003
Fenilalanin	g	0,032
Tirosin	g	0,042
Valin	g	0,035
Arjinin	g	0,054
Histidin	g	0,016
Alanin	g	0,028
Aspartik asit	g	0,102
Glutamik asit	g	0,184
Glisin	g	0,027
Prolin	g	0,026
Serin	g	0,044

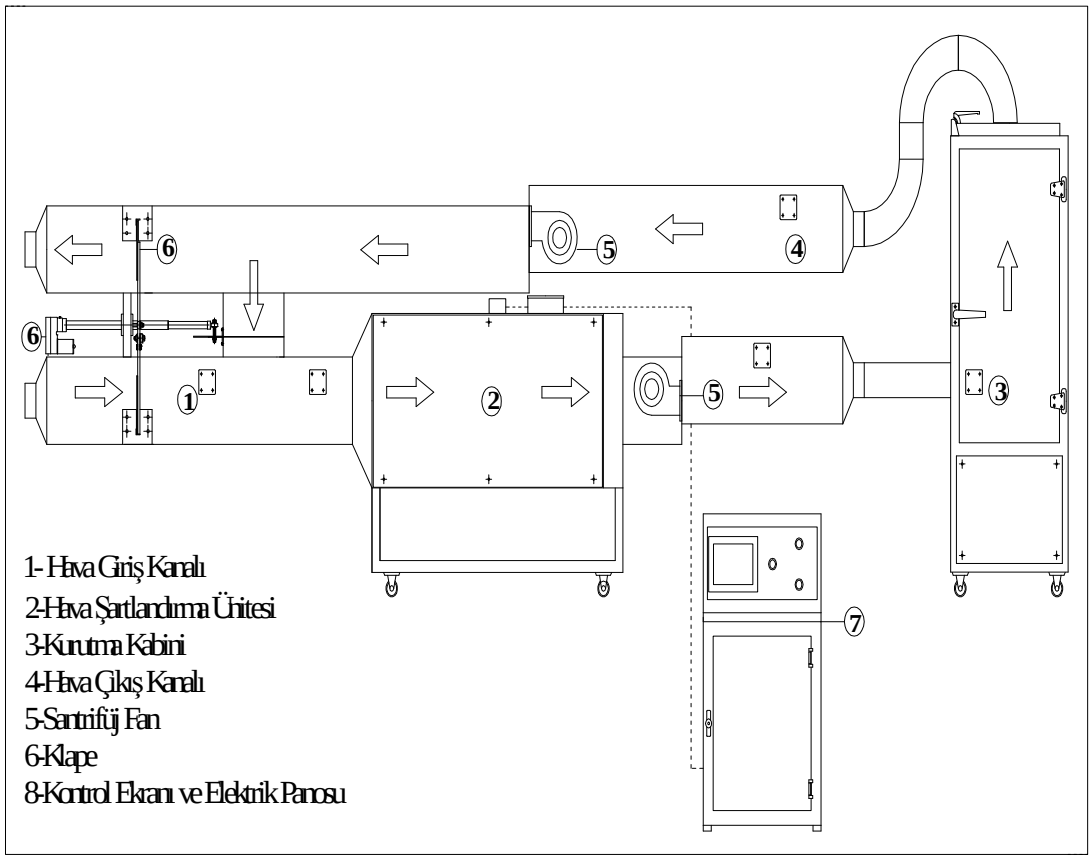
Çizelge 5.2. de görüleceği üzere dünyada en çok Çin'de üretilen balkabağı Hindistan, Ukrayna, Amerika Birleşik Devletleri, Mısır, İran, Meksika ve Küba gibi ülkelerde de çok miktarda üretilmektedir.

Çizelge 5.2. 2005 yılında Dünyada balkabağı üretim değerleri (Kaya, 2006)

Ülkeler	**(Ton)**	**(%)**	**Ülkeler**	**(Ton)**	**(%)**
Çin	5.767.700	29,11	Pakistan	244.713	1,23
Hindistan	3.500.000	17,66	Japonya	230.000	1,16
Ukrayna	1.072.000	5,41	Tayland	226.000	1,14
ABD	861.870	4,35	Endonezya	195.729	0,99
Mısır	690.000	3,48	Fransa	173.041	0,87
Karayip Adaları	612.203	3,09	Cezayir	120.000	0,61
Meksika	560.000	2,83	Suriye	110.000	0,56
Küba	520.000	2,62	Suudi Arabistan	103.390	0,52
İran	500.000	2,55	Avustralya	94.644	0,48
İtalya	488.083	2,46	Yunanistan	80.500	0,41
Güney Afrika	378.776	1,91	Kanada	67.570	0,34
Türkiye	376.000	1,9	İsrail	34.000	0,17
Kore	310.000	1,56	Irak	32.000	0,16
Romanya	300.000	1,51	Bulgaristan	3.712	0
Arjantin	296.000	1,49	Diğer	1.863.800	9,41
			Toplam	19.816.731	100

5.2. Deney Seti

Tarımsal ürünlerin kuruma karakteristiklerini belirlemek amacı ile laboratuar şartlarında kurulan konveksiyon tipi kurutma deney seti Şekil 5.2' de görülmektedir. Deney seti taze hava girişi, hava şartlandırma ünitesi, kurutma kabini, çıkış havası ile taze havanın karıştırıldığı karışım ünitesi, otomatik kontrol ünitesi ve kanal bağlantılarından oluşmaktadır. Deney seti ortamdan alınan havayı, kabinde istenilen sıcaklık, hız ve bağıl nem değerlerine getirebilecek ve bu değerlerde sabit tutabilecek şekilde tasarlanmıştır. Çizelge 5.3 ve 5.4' de verilen bazı sebze meyvelerin kuruma şartları göz önüne alınarak deney seti T_{max} = 80 °C, φ_{max} = % 5 , V_{max} = 3 m/s değerlerine göre imal edilmiştir.



Şekil 5.2. Deney seti

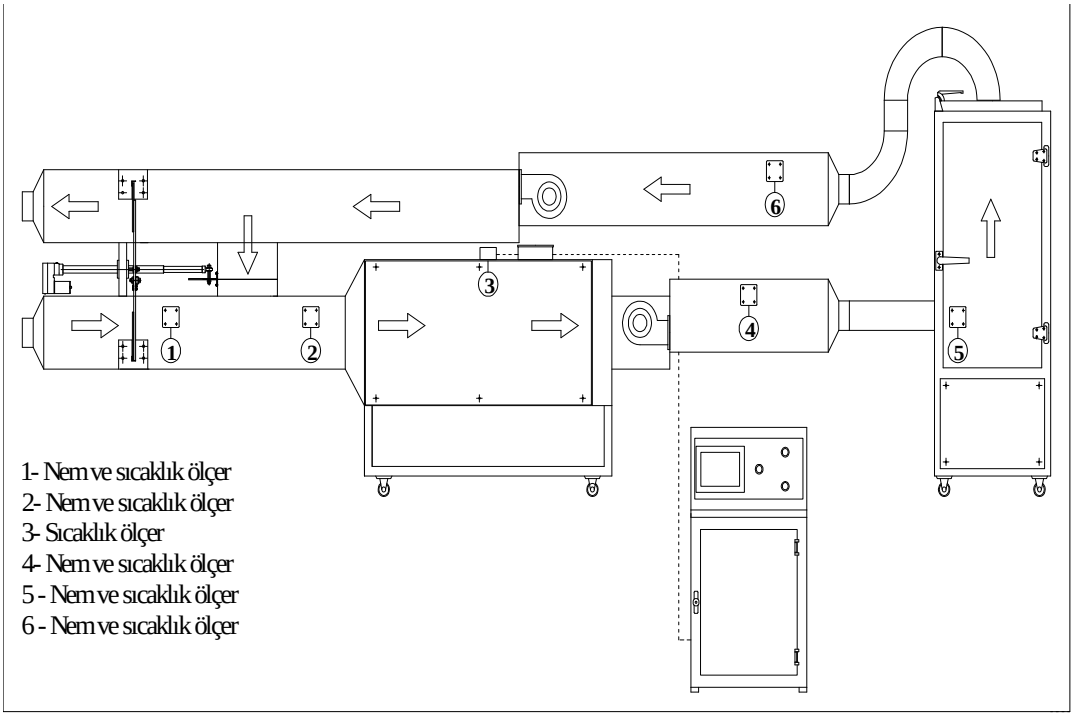
Çizelge 5.3. Bazı tarım ürünlerinin ilk ve son nem içeriği (Ertekin, 2002)

Ürün	İlk Nem İçeriği(%)	Son Nem İçeriği(%)	Ürün	İlk Nem İçeriği(%)	Son Nem İçeriği(%)
Adaçayı	62	11	Kakao	50	6–7
Armut	84	25	Kakule	80	16
Ateş çiçeği	71	11	Kaplanmış hıyar/Kırmızı turp tohumu	36	9
Bamya	81	6	Kayısı	85.3	25
Bezelye	60–70	5–10	Kekik	72.9	7.5–11,4
Biberiye	70	10	Kiraz	81	30
Dereotu	70–80	10	Lahana	90–95	5–10
Domates	93	7	Maydanoz	83	12
Elma	84.8	24	Muz	80	15
Erik	78.7	35	Nane	80	11
Fasulye	60–70	5–10	Oğulotu	77	11
Fesleğen	80	6	Patates	77	7
Frenk maydanozu	80	12	Pirekapan	70	10–13
Frenk soğanı	80–85	12	Sarıpapatya	75	7
Havuç	80–90	5–10	Sarmısak	80	4
Hindistan cevizi	45–50	5	Soğan	84	6
Hint yerelması	70	15	Şeftali	75–80	20
Hint yerelması	70	15	Şekerkamışı	40–60	20
Hurma	65	40	Şerbetçiotu	77	8
Ispanak	80	10	Üzüm	74–81,6	15–18
İncir	77.5	26	Vişne	83.7	25
K. biber	90	20	Y. biber	80	10
Kadife çiçeği	72–85	12	Yerfıstığı	45–50	13
Kahve	43–48	12	Zencefil	87–93	5

Çizelge 5.4. Bazı meyve ve sebzelerin kurutma sıcaklıkları (Ertekin, 2002)

Meyve	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Meyve	Kurutma Sıcaklığı (°C)
Elma	74	Hindistan Cevizi	35-40
İncir	71	Vişne	71-77
Üzüm	71	Erik	74-77
Şeftali	66	Armut	63
Kayısı	71	Muz	70
Fasulye	75	Patetes	66
Lahana	63	Havuç	79
Kırmızı biber	35-40	Sarımsak	55
Tıbbi Bitkiler	35-50	Soğan	88
Kakule	45-50	Biber	55

Deney setinde kurutma havasını taşıyan gidiş ve dönüş hava kanalları 200x200 mm boyutlarında imal edilmiştir. Isıtıcılar istenen şartları sağlaması için 8,67 kW olarak hesap edilmiş ve bu kapasite için serpantinli termal rezistanslı ısıtıcı seçilmiştir. Deney setinde kullanılan soğutma sistemi kapasitesi 5,3 kW olup hem duyulur soğutma, hem de soğutarak kurutma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Duyulur ısıtma esnasında havanın bağıl nemi azalırken, soğutulan havanın bağıl nemi ise yükselmektedir. Düşük sıcaklık ve düşük bağıl neme sahip kurutma havası istendiği takdirde, sadece duyulur ısıtma prosesi ile psikrometrik diyagramda istenilen noktaya ulaşılamaz. Bu prosesi gerçekleştirebilmek ve havanın özgül nemini gereken değere getirebilmek için, kurutma havasının önce soğutulması daha sonra da ısıtılması gerekmektedir. Deneylerde istenen kurutma havası bağıl neminin sağlanabilmesi için 6 kg/h kapasiteli nem verme ünitesi kullanılmıştır. Deneyler esnasında şartlandırılmış havanın tamamının çıkış kanalından atılmayıp bir miktarının tekrar kullanılabilmesi için iki adet elektrik konum ayarlamalı klape kullanılmıştır. Sistemde hız kontrollü maksimum 550 m^3/h kütlesel hava debisine sahip iki adet santrifüj (radyal) fan kullanılmıştır. Birinci fan ortamdan aldığı taze havayı kabine göndermekte, ikinci fan ise kabinden aldığı havayı laboratuvar dışına tahliye etmektedir. Bu sayede kurutma havasının kabin içinde yığılması önlenmekte ve sistemin her noktasında hava akışının, sıcaklık ve nem dağılımının düzgün olması sağlanmaktadır Kurutma kabini 510x1000x400 mm boyutlarında imal edilmiş ve kabin dahil sistemin tamamı (kanallar, ısıtma ve soğutma cihazları) 50 mm kalınlığında cam yünü ile yalıtılmıştır. Deney setinde 6 adet nem ölçer, 6adet PT 100 sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Deney seti üzerine yerleştirilen sıcaklık ve nem ölçerlerin yerleri Şekil 5.3’ de, deneyde kullanılan ölçme cihazları ve özellikleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Sıcaklık ve nem ölçerlerin deney tesisatında yerleri

Sistem, psikrometrik diyagram referanslı bir yazılım programı sayesinde çalışmaktadır. Kontrol panelinden girilen kabin sıcaklığı ve bağıl nem değerlerine ulaşılabilmek için ısıtma, soğutma ve nem verme ünitesi otomatik olarak devreye girip çıkmaktadır. Havanın akış hızı fanların devri ayarlanarak artırılıp azaltılmaktadır. Sistem çalışmaya başladıktan sonra her beş dakikada (değiştirilebilir) bir belirli noktalardan sıcaklık ve bağıl nem değerleri kayıt edilmektedir. Sistem; Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda kurulmuştur (Şekil 5.4).

Çizelge 5.5 Deneylerde kullanılan ölçme cihazları ve özellikleri

Ölçüm Cihazı	**Marka**	**Model**	**Kapasite**	**Hassasiyet**	**Gösterge hassasiyeti**
Hassas Terazi	Jadever	SKY 300	300 g	0,01 g	1/30000
Nem Tayin Cihazı	Precisa	XM 60	124 g	0,1 mg	0,001%
Dijital Anemometre	CFM	AZ-8901	0.4 ~ 35m / sn.	± 2%	0.01m/sn
Nem Ölçer	Dixel	XH20P	0 ÷ 100% RH. Nem	3%	0,1
Sıcaklık Ölçer	Gemo	PT 100	0-400 °C	%1	0,1



Şekil 5.4. Deney setinin görünüşü

5.3. Ürün Başlangıç Neminin Belirlenmesi

Balkabağının ilk nemini belirlemek üzere ürünler 24 saat süre ile soğutucuda 4 ºC sıcaklıkta bekletildi. Soğutucudan alınan balkabağı ortam ile ısıl dengeye ulaşması için 2 saat ortamda bekletildi. Daha sonra dilimlenerek Precisa marka XM 60 tipinde bir infrared nem tayin cihazında 105 ºC sıcaklığında kurumaya tabii tutulmuştur (Anonim, 1990). Kuruma esnasında ağırlıktaki değişim saatte bir takip edilerek, en son iki ölçüm değeri arasındaki fark % 0,05'den daha az olana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Ağırlık değişimleri her bir saatte takip edilerek değerler kaydedilmiştir. Bu işlem üç kez tekrarlanmıştır. Her bir kurutma işlemi yaklaşık 35 saat sürmüş, üç ölçüm sonunda elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak balkabağının ilk nem içeriği % 93,48 olarak tespit edilmiştir.

5.4. Örneklerin Hazırlanması ve Deneylerin Yapılışı

Deney için Adapazarı yöresinde yetiştirilen ve bu bölgenin adı ile anılan balkabakları kullanılmıştır. Balkabakları deney yapılmadan 24 saat önce +4 °C sıcaklığındaki soğutucuda bekletilmiş ve daha sonra ortamda 2 saat bekletilerek ortam havası ile ısıl dengeye ulaşması sağlanmıştır. Balkabakları önce yıkanmış ve kabukları soyulduktan sonra orta kısımlarındaki çekirdekler çıkartılarak 30x30x4 mm boyutlarında özel bir kesici ile dilimlenmiştir.

Ürünler deney tesisatının kabinindeki raflara, numuneler arasından sıcak hava akımının geçebileceği şekilde belirli aralıklarla hava akımına dik olarak yerleştirilmiş ve kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Sistemde istenilen kurutma havası sıcaklığı, hızı ve bağıl nemi proses kontrol cihazından ayarlanarak kurutma işlemi başlatılmıştır. Balkabaklarına ait kurutma öncesi bir resim Şekil 5.4’ de, kurutma sonrası bir resim ise Şekil 5.5’ de verilmiştir.

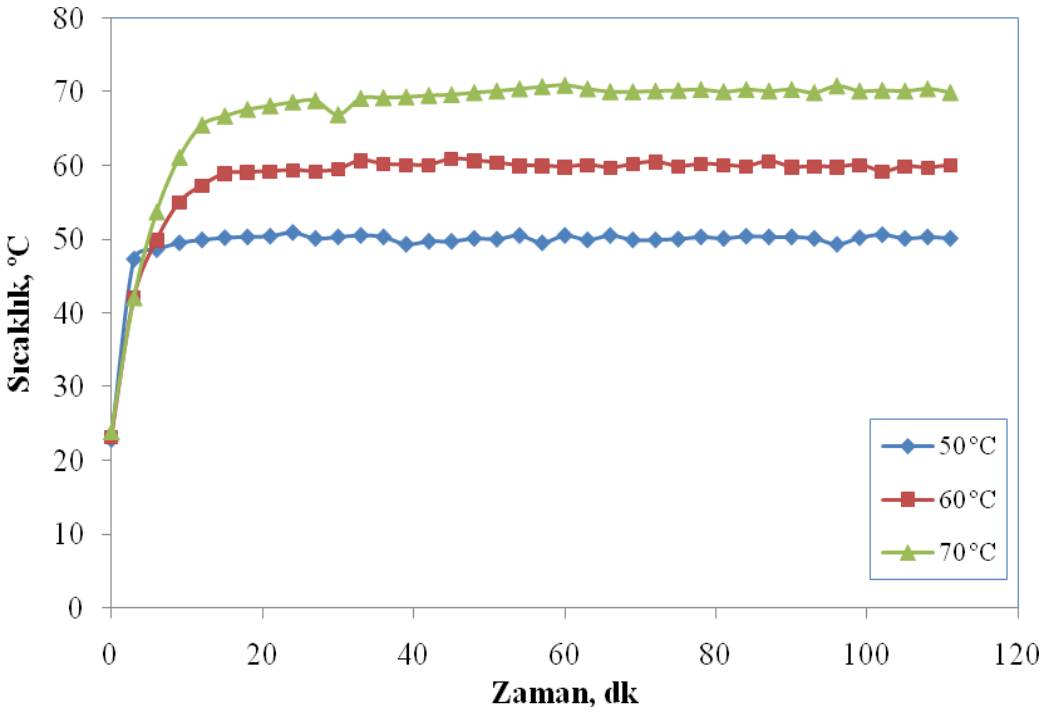
Deney seti, kabinde istenilen hava koşullarının sağlanması için belirli bir süre boşta çalıştırılmıştır. Sistem istenilen hava koşullarına göre 30–45 dakikada sürekli rejime ulaşmaktadır. Deney setinden istenilen hava koşullarının değerleri ile ölçülen değerlerin grafiği Şekil 5.6., 5.7., ve 5.8’ de gösterilmiştir. Sürekli rejime ulaşan deney setinde yapılan deneylerde balkabağı dilimleri her 15 dakikada bir JADEVER marka SKY 300 model 0,01 g dijital ağırlık ölçüm cihazı ile tartılmış ve ölçülen değerler kaydedilmiştir. İki ölçüm arasındaki fark % 1’in altına indiği durumda kurutma işlemine son verilmiştir.



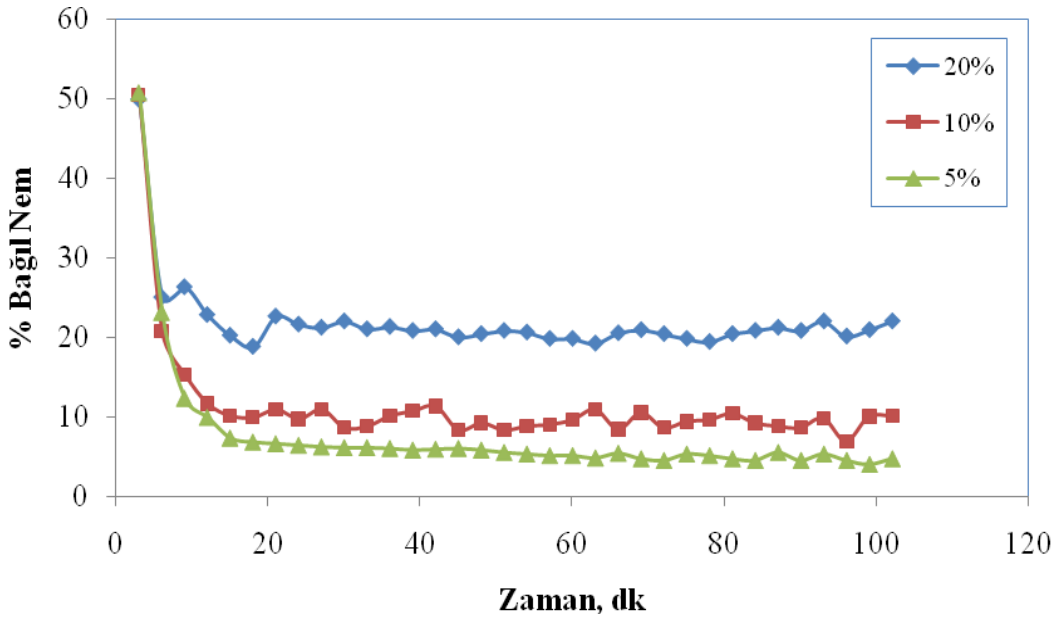
Şekil 5.5. Kurutma öncesi balkabağı dilimleri



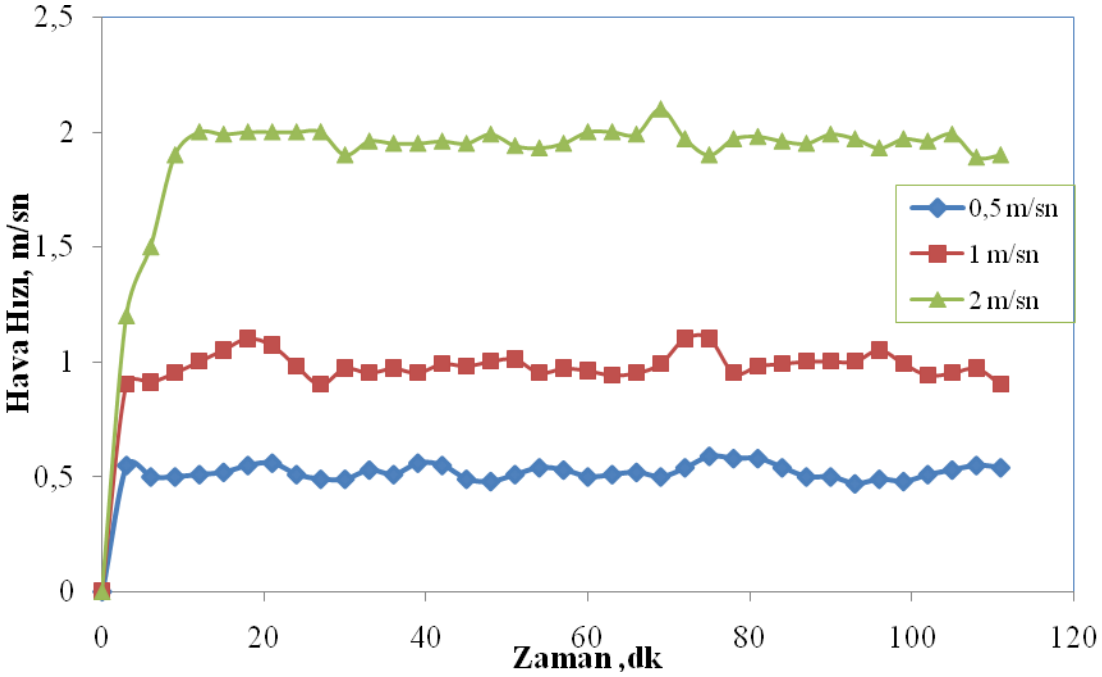
Şekil 5.6. Kurutma sonrası balkabağı dilimleri



Şekil 5.7. Kurutma havası sıcaklığının kuruma süresince değişimi



Şekil 5.8. Kurutma havası bağıl neminin kuruma süresince değişimi



Şekil 5.9. Kurutma havası hızının kuruma süresince değişimi

6. BELİRSİZLİK ANALİZİ

6.1. Hata ve Belirsizlik

Ölçüm hatası, bir niceliğin ölçülen değeri ile gerçek değeri arasındaki farktır. Belirsizlik ise; ölçümlerdeki hataların tam olarak bilinmemesidir. Standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde elde edilen verilerde iki farklı şekilde hata ortaya çıkabilir. Bunlardan biri, deney düzeneğinin ve ölçme cihazlarının yapısından kaynaklanan kaçınılmaz hatalar, diğeri ise deneyi yapan kişinin yaptığı ihmallerden kaynaklanan hatalardır (Darıcı, 1998). Bir ölçüm hatası, çoğu zaman birçok nedenden kaynaklanan çok sayıda bağımsız hataların sonucunda oluşur. Hata analizi, bu bağımsız hataların genel hata üzerindeki etkilerini değerlendirme çalışmasıdır. Ölçüm hatası hiçbir zaman tam olarak bilinemez. En iyi ihtimalle, içinde gerçek değerin yer aldığı bir bölge belirlenebilir. Bu bölge belirsizlik olarak adlandırılır ve hatanın olası bir büyüklüğünün ifadesidir. Belirsizliğin gerçekçi bir ölçümüne ulaşmak için tüm potansiyel hata kaynaklarının etkilerinin tam olarak belirlenmesi gerekir (Anonim, 1983).

6.2. Belirsizlik Analizi

Belirli sayıda deney yapıldıktan sonra bu deneye ait hata oranlarının tespiti için pratikte birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan en çok kullanılan yöntem “akılcı yaklaşım” (commensense basis), diğeri ise “belirsizlik analizi” (uncertainty analysis) yöntemleridir. Son yıllarda hata oranlarının tespitinde, araştırmacılar tarafından belirsizlik analizi daha çok tercih edilmektedir (Genceli, 2000).

Kline ve McClintock (1953) tarafından deneysel verilerin hata analizi için belirsizlik analizi (uncertainty analysis) adı verilen daha hassas bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yönteme göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken ise $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ olsun. Bu durumda,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \tag{6.1}$$

yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları U_{x_1}, U_{x_2}, U_{x_3},……, U_{x_n} ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ise,

$$U_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} U_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} U_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} U_{x_3}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} U_{x_n}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.2)$$

şeklinde verilebilir (Coleman ve Steele, 1989).

Bir parametrenin değerinin ölçülmesinde, sabit hatalar, rastgele hatalar ve imalat hataları nedeniyle ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata hesabı (6.2) denklemi ile hesaplanır.

Çizelge 6.1 de kullanılan ölçüm cihazlarının belirsizlikleri ve ölçümü yapan kişiden kaynaklanan belirsizlikler verilmiştir. Cihazdan kaynaklı belirsizlik üretici firma tarafından cihazın özellikleri arasında belirtilirken, ölçüm yapan kişinin yanlış okumasından kaynaklanan belirsizlik ise tecrübî olarak alınmıştır (Kavak, 2003).

Çizelge 6.1. Ölçüm cihazlarından ve okumadan kaynaklanan belirsizlik değerleri

Ölçülen Büyüklük	Cihazdan Kaynaklanan Belirsizlik (±)	Ölçümden Kaynaklanan Belirsizlik (±)	Toplam Belirsizlik (±)
Sıcaklık (°C)	0,1	0,1	0,141421356
Hız (m/sn)	0,1	0,1	0,141421356
Bağıl Nem (%)	0,1	0,01	0,100498756
Ağırlık (g)	0,01	0,01	0,014142136
Zaman (dk)	0,0003	0,1	0,10000045

6.2.1. Nem içeriğindeki belirsizlik

Nem içeriğinin belirsizliği,

$$W_N = \left[\left(\frac{\partial N}{\partial M} W_m\right)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial M_k} W_{m_k}\right)^2\right]^{1/2} \quad (6.3)$$

$M = 18{,}995 \pm 0{,}01$ (g)

$M_k = 3{,}5984 \pm 0{,}01$ (g)

$N = 4{,}279$ (g su/g kurumadde)

$N_0 = 14{,}385$ (g su/g kurumadde)

$W_m = \pm 0{,}01$ (g)

$M_0 = 55{,}36$ (g)

$W_{mk} = \pm 0{,}01$ (g)

Yukarıdaki değerler kullanılarak nem içeriği, N, için belirsizlik değeri,

$W_N = 0{,}014931058$ (g su/g km) veya % 0,348 bulunur

6.2.2 Nem oranındaki belirsizlik

Nem oranı için belirsizlik değeri,

$$W_{MR} = \left[\left(\frac{\partial MR}{\partial N} W_N\right)^2 + \left(\frac{\partial MR}{\partial N_0} W_{N_0}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

denklemi ile hesaplanır.

$M = 18{,}995 \pm 0{,}01$ (g)
$M_k = 3{,}5984 \pm 0{,}01$ (g)
$N = 4{,}279$ (g su/g kurumadde)
$N_0 = 14{,}385$ (g su/g kurumadde)
$W_{N_0} = 0{,}042844$ (g su/g km)
$W_N = 0{,}014931058$ (g su/g km)
$W_m = \pm 0{,}01$ (g)
$M_0 = 55{,}36$ (g)
$W_{mk} = \pm 0{,}01$ (g)
$MR = 0{,}297$

Yukarıdaki değerler kullanılarak nem oranı, MR, için belirsizlik,

$W_{MR} = 0{,}0013644629$ veya % 0,4594 bulunur.

6.2.3. Kuruma hızındaki belirsizlik

Kuruma hızındaki belirsizlik değeri,

$$W_{DR} = \left[\left(\frac{\partial DR}{\partial N_t} W_{N_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial DR}{\partial N_{t+\Delta t}} W_{N_{t+\Delta t}}\right)^2 + \left(\frac{\partial DR}{\partial \Delta t} W_{\Delta t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.5)$$

denklemi ile hesaplanabilir.

$M = 18{,}995 \pm 0{,}01$ (g)

$M_k = 3{,}5984 \pm 0{,}01$ (g)

$M_{t+\Delta t} = 13{,}83$ (g)

$\Delta t = 15\ (dk)$

$N_t = 4{,}279$ (g su/ g kurumadde)

$N_{t+\Delta t} = 14{,}385$ (g su/g kurumadde)

$W_{m_t} = \pm 0{,}01$ (g)

$W_{m_{t+\Delta t}} = \pm 0{,}01$ (g)

$W_{m_k} = \pm 0{,}01$ (g)

$DR = 0{,}1231$ g su/ gkm. dk

Yukarıdaki değerler kullanılarak kuruma hızı için belirsizlik,

$W_{DR} = 0{,}000666$ (g su/g km.dk) veya % 0,5408 bulunur.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneyler neticesinde elde edilen veriler ile balkabağının kuruma eğrileri çizilmeye çalışılmıştır. Bu eğriler kuru baza göre nem içeriği-kuruma süresi, nem oranı-kuruma süresi, kuruma hızı-kuruma süresi ve kuruma hızı-nem içeriği eğrileridir. Deneyler 50, 60 ve 70 ºC sıcaklıkta % 5, % 10, % 20 bağıl nemde, 0,5, 1. 2 m/sn hava hızında gerçekleştirilmiştir.

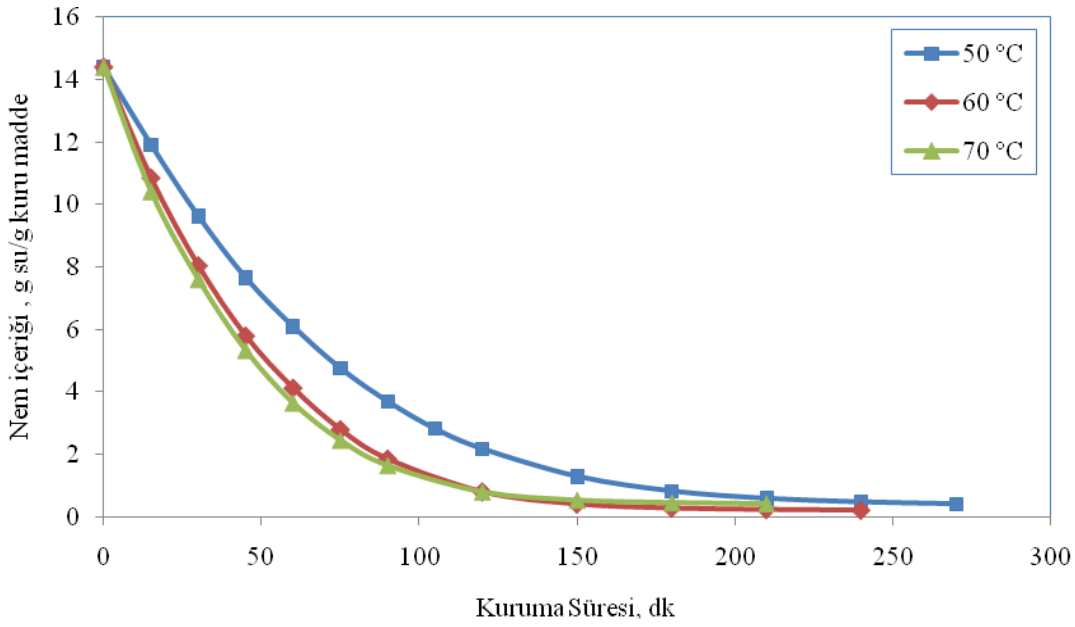
7.1. Hava Sıcaklığının, Neminin ve Hızının Kurutmaya Etkisi

Deneylerden elde edilen verilerle balkabağının kuruma eğrilerinin çizilebilmesi ve incelenebilmesi için ve kuru ve yaş baza göre nem içerikleri, nem oranları ve kuruma hızları hesaplanmış ve eğriler çizilmiştir. Sonuçlar literatürden seçilen on adet model ile karşılaştırılmıştır.

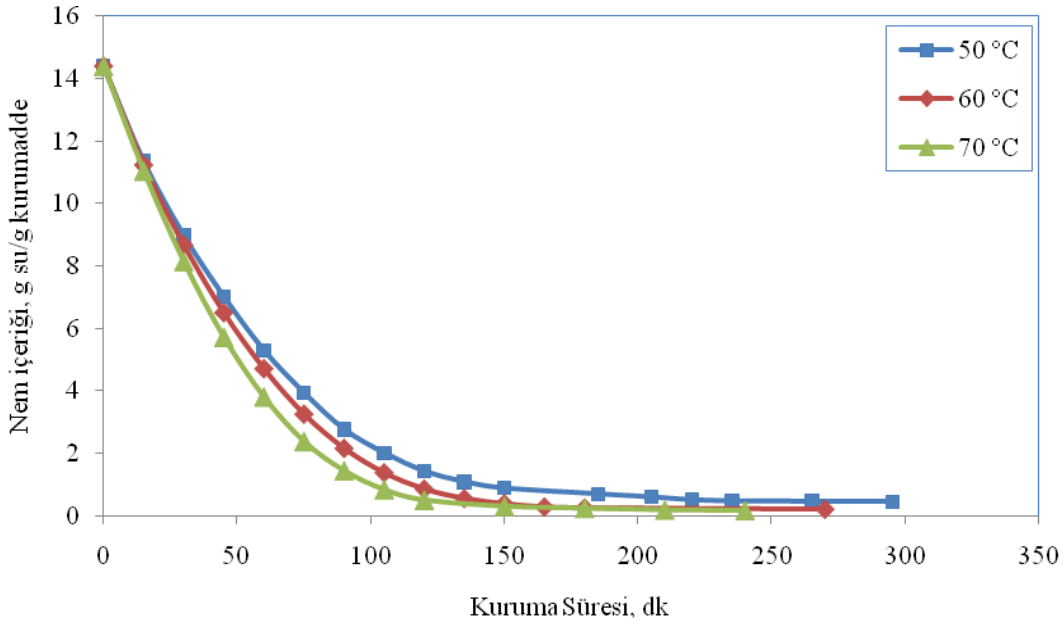
Şekil 7.1, 7.2 ve 7.3'de % 5, % 10, % 20 kurutma havası bağıl neminde ve 0.5 m/sn hava hızında ürünün farklı sıcaklıklarda nem içeriği-kuruma süresi değişim grafikleri verilmiştir. Grafikler incelenirse, en uzun kuruma süresinin en düşük sıcaklık olan 50 °C'de, havanın bağıl nemine göre tüm sıcaklıklarda % 20 bağıl nemdeki hava ile yapılan kurutma işlemlerinde kurutmanın en uzun sürdüğü gözlenmektedir. Aynı sıcaklık, farklı nem değerlerinde yapılan deneylerde de havanın bağıl nemi arttıkça kuruma süresinin arttığı gözlenmiştir. 50 ℃ sıcaklık ve 0.5 m/sn hava hızında yapılan deneylerde kuruma süresi, % 5 bağıl nemde 285 dakika, %10 bağıl nemde 300 dakika, %20 bağıl nemde 330 dakikadır.

Kurutma havasının bağıl neminin artması ile havanın nem tutma kabiliyeti azalmaktadır. Kurutma havası bağıl neminin artırılması ile kuruma süresi, daha düşük bağıl nemde yapılan kurutmaya göre daha uzundur.

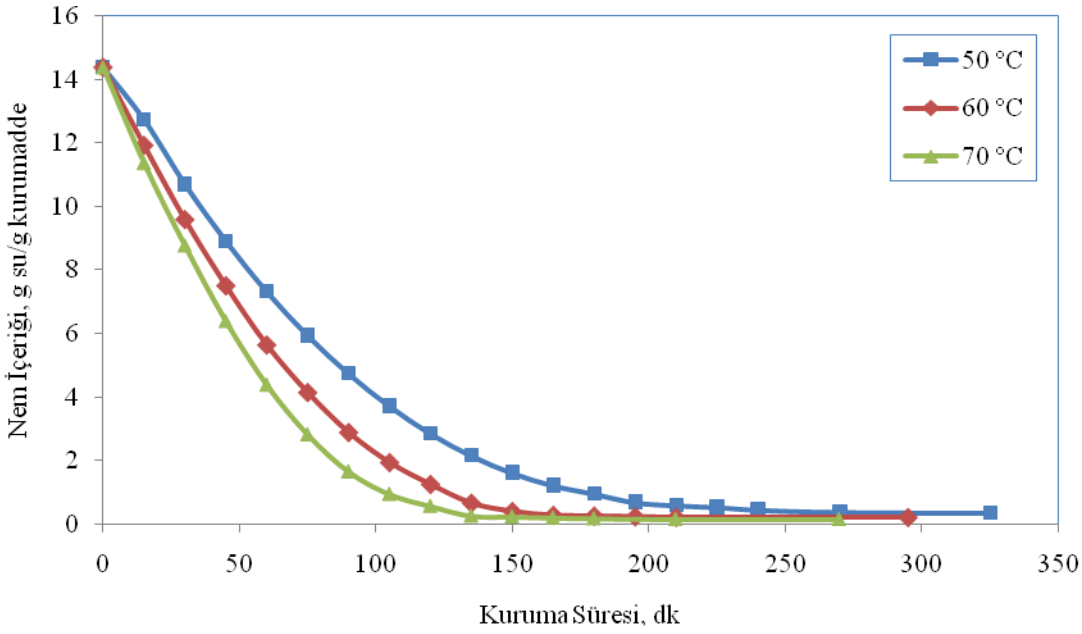
Şekil 7.4, 7.5 ve 7.6'da 1 m/sn hava hızında ve % 5, % 10 ve % 20 kurutma havası bağıl neminde, Şekil 7.7, 7.8 ve 7.9'da 2 m/sn hava hızında ve % 5, % 10, % 20 bağıl nemde farklı sıcaklıklar için nem içeriği-kuruma süresi değişimi grafikleri verilmiştir. Hava hızının artması kuruma için gerekli süreyi azaltmaktadır. Ürün ile bulunduğu ortam arasındaki nem transferi ürün merkezinden ürün yüzeyine ve yüzeyden de bulunduğu ortam havasına doğru olmaktadır. Kurutma havası hızının artması ile havanın ürün yüzeyi ile birim zamandaki temas miktarı arttığından, kuruma süresi azalmaktadır.



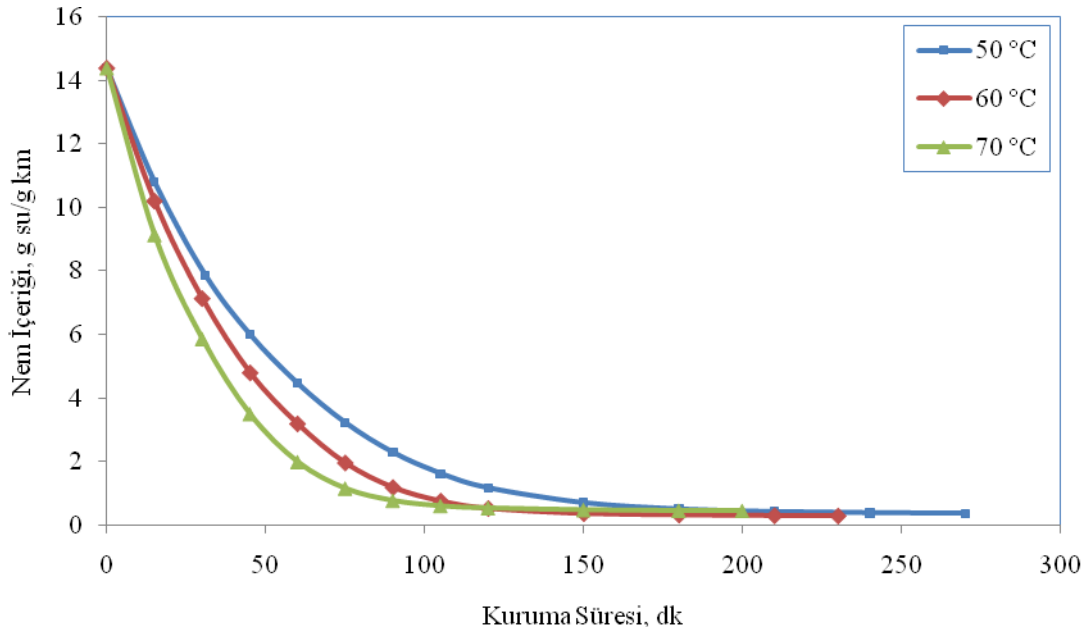
Şekil 7.1. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 5 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)



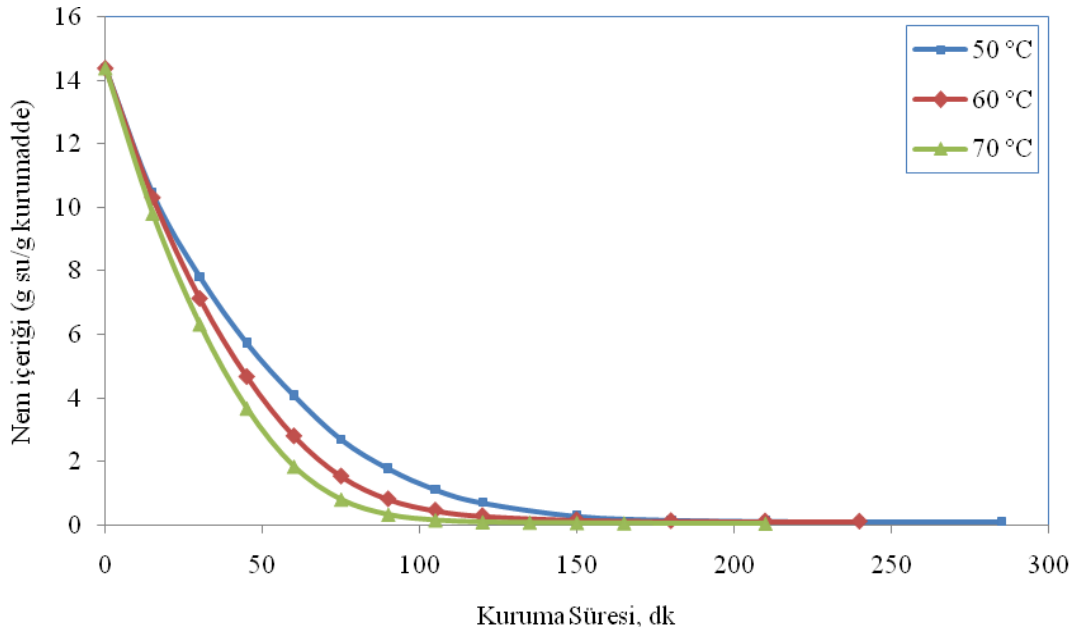
Şekil 7.2. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 10 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)



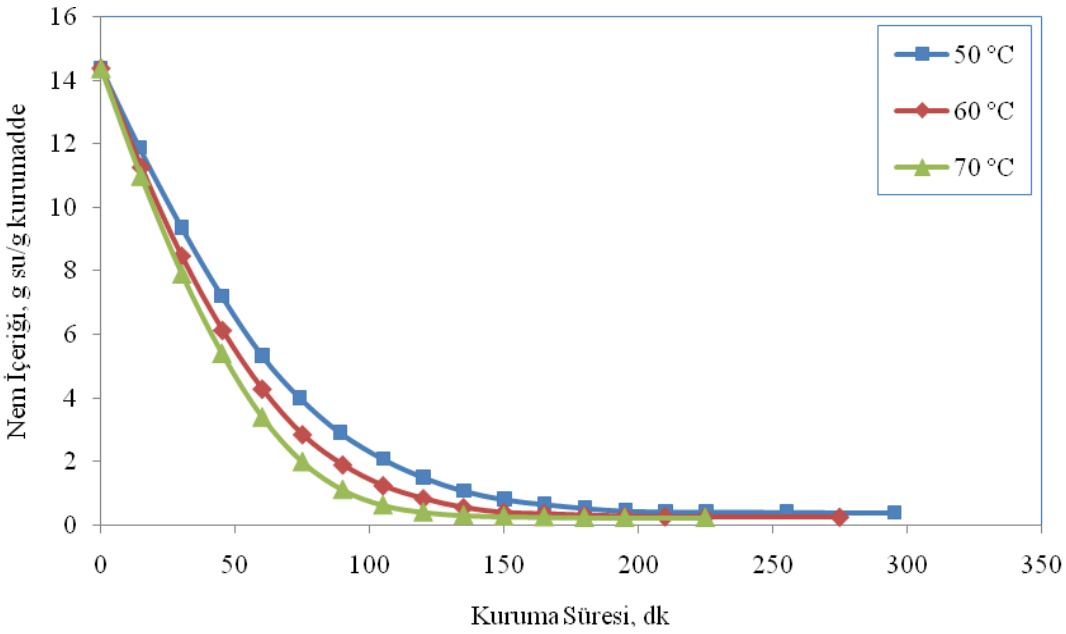
Şekil 7.3 Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)



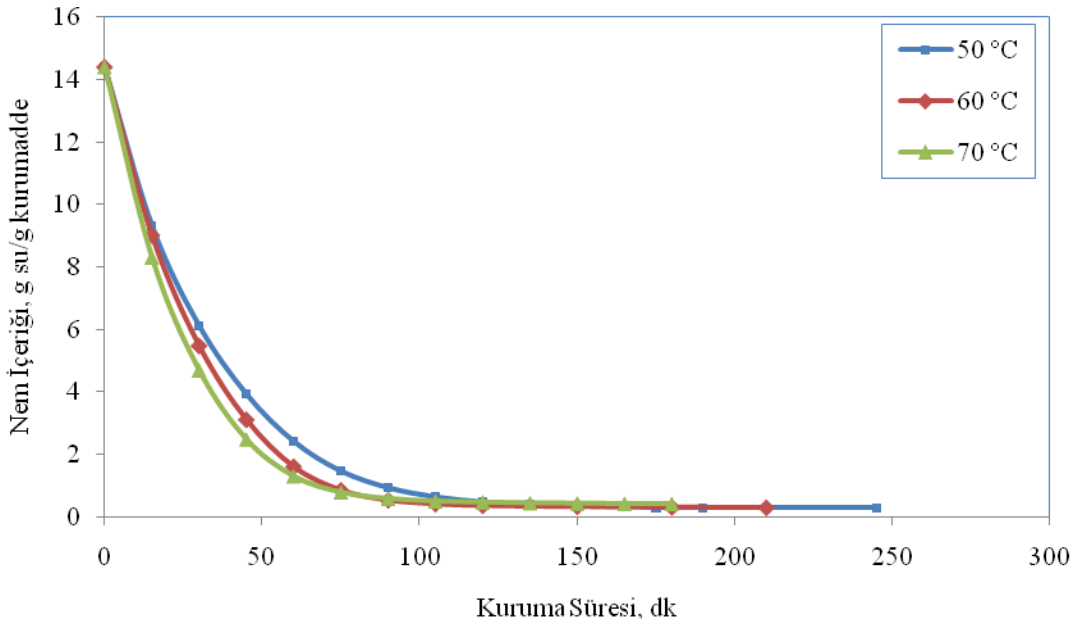
Şekil 7.4. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 5 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



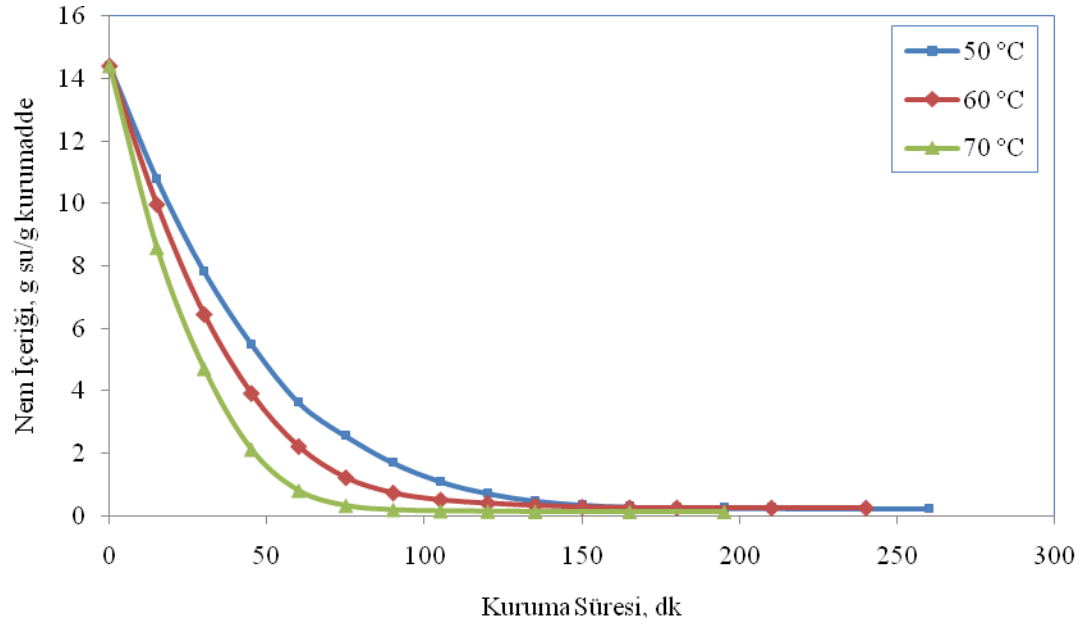
Şekil 7.5. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 10 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



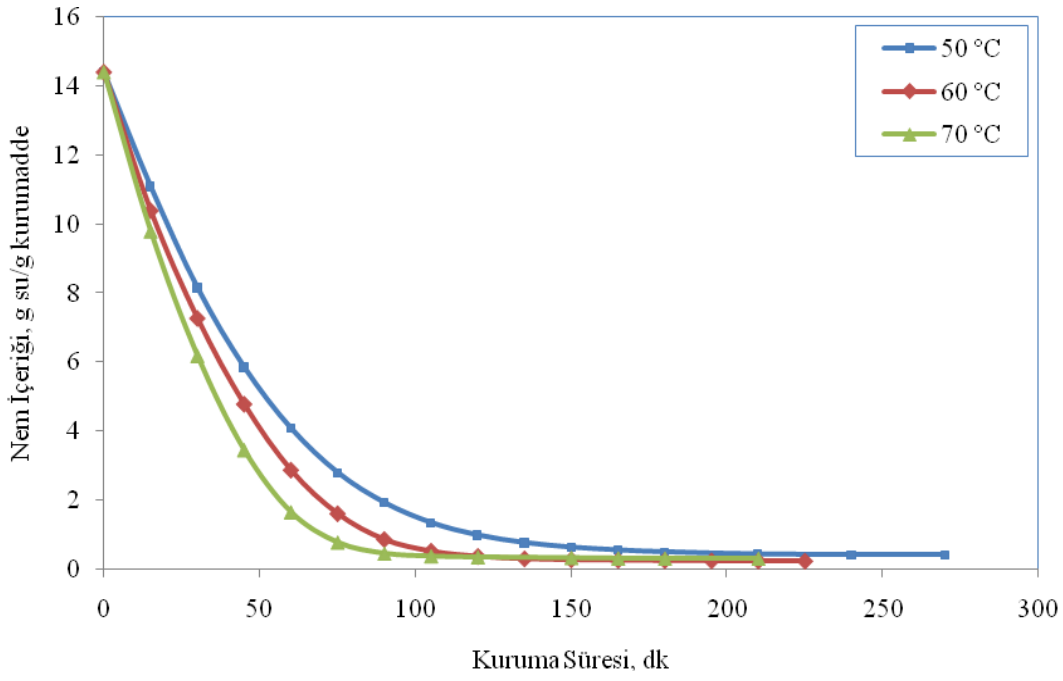
Şekil 7.6. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



Şekil 7.7. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 5 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)

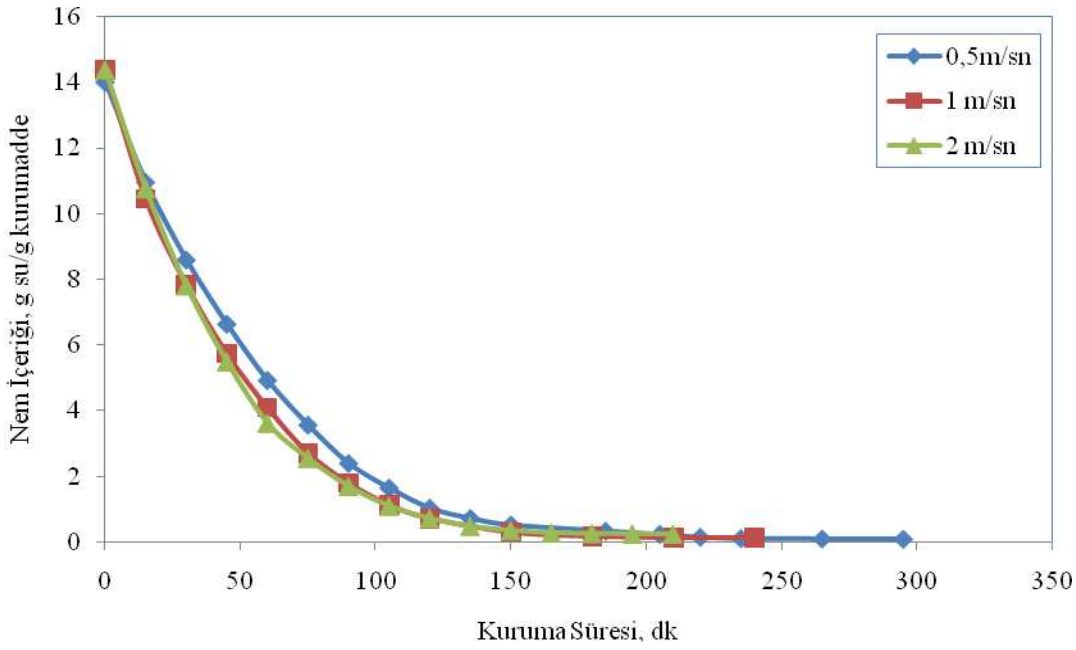


Şekil 7.8. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 10 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)

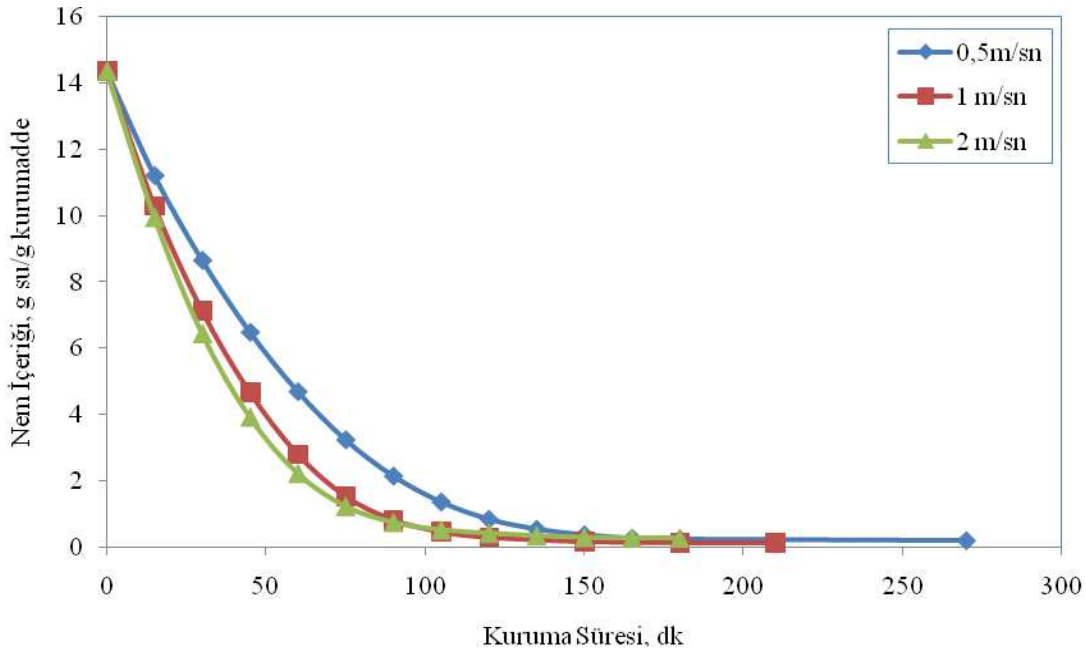


Şekil 7.9. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)

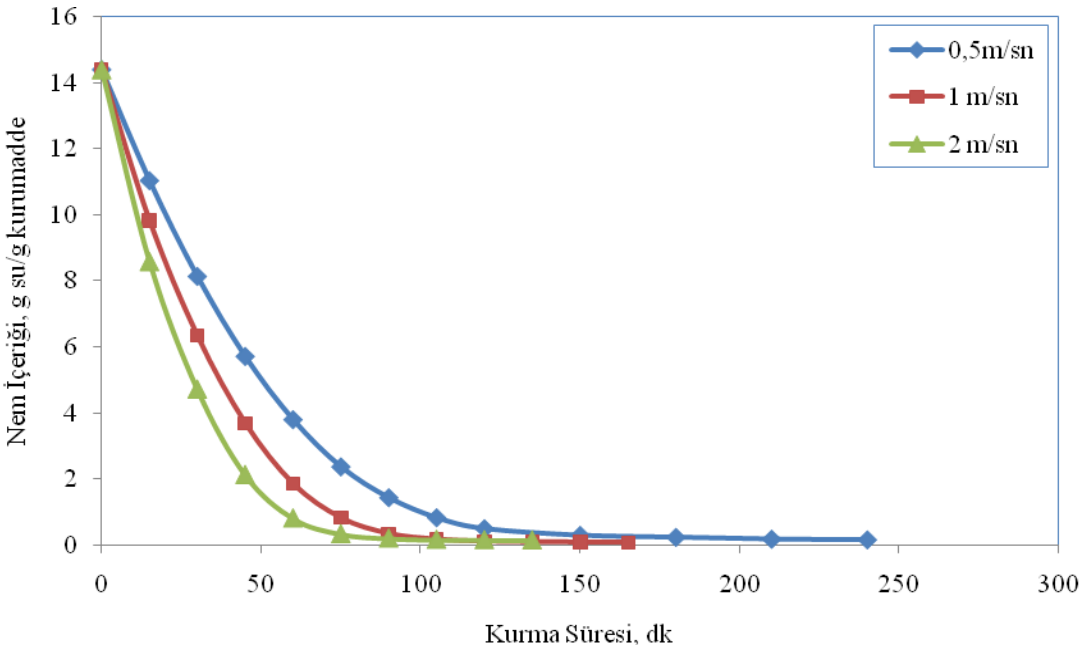
Şekil 7.10, 7.11 ve 7.12'de % 10 bağıl nemde 50, 60 ve 70 ℃ sıcaklıkta üç farklı hava hızının kurumaya etkisini incelemek için, nem içeriği - kuruma süresi grafikleri çizilmiştir. Grafikler incelendiğinde, 50 ℃ sıcaklıkta ve % 10 bağıl nemde ürünün kuruma süresi 0.5 m/sn hava hızı için 290 dakika, 1 m/sn hava hızı için 240 dakika olurken 2 m/sn hız için 210 dakikadır. 60 °C ve %10 bağıl nemdeki kurutma havasında ise 0.5 m/sn hız için 270 dakika, 1 m/sn hız için 210 dakika ve 2m/sn hız için 175 dakikalık kuruma süresi ölçülmüştür. 70 °C sıcaklık ve %10 bağıl nemdeki kurutma havasının hızındaki değişimin kuruma süresine etkisi şu şekildedir: 0,5 m/sn hız için kuruma süresi 240 dakika, 1 m/sn hız için 165 dakika ve 2 m/sn hız için 135 dakikadır. Yüksek hız ve sıcaklıktaki hava ile yapılan kurutma işleminde, kuruma süresinin daha düşük, aynı sıcaklıkta fakat daha düşük hızdaki havaya oranla daha kısa olduğu görülmektedir.



Şekil 7.10. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (50 ºC sıcaklık, %10 bağıl nem)

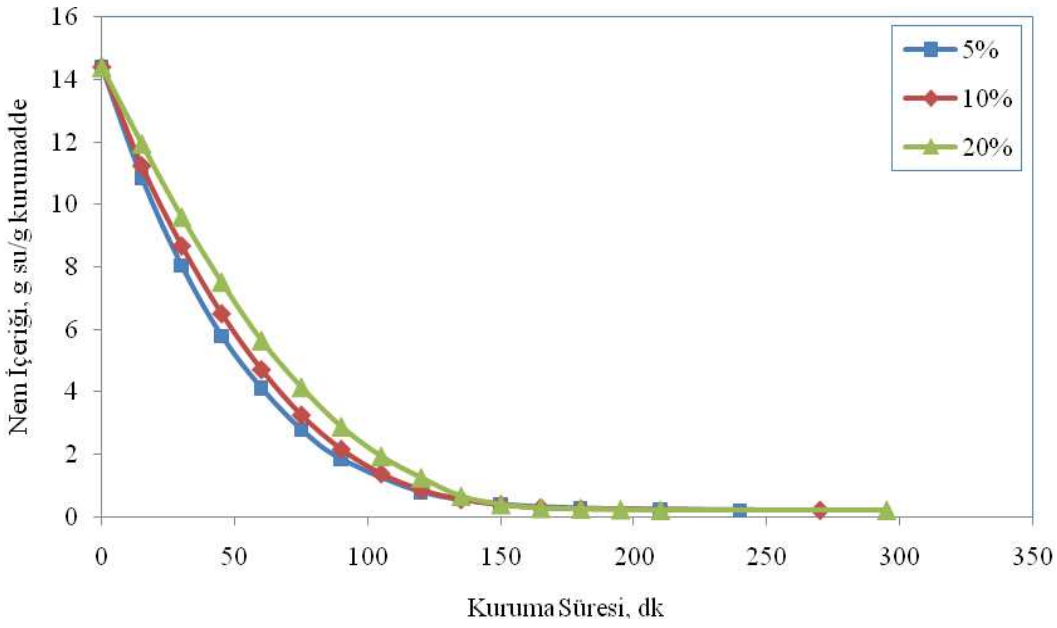


Şekil 7.11. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (60 ºC sıcaklık, %10 bağıl nem)

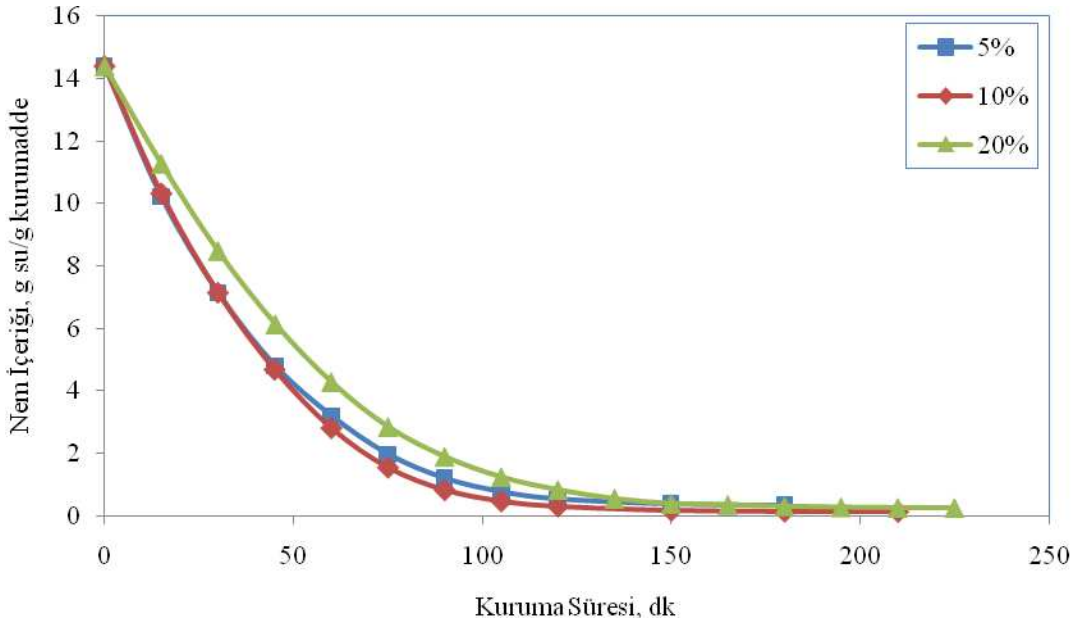


Şekil 7.12. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (70 ºC sıcaklık, %10 bağıl nem)

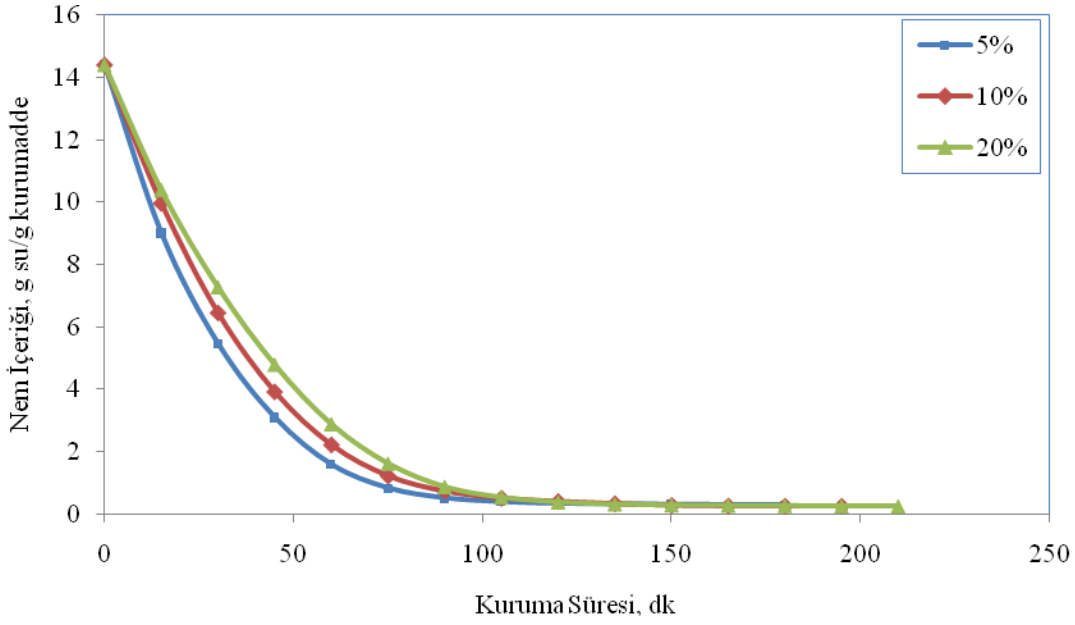
Şekil 7.13, 7.14, 7.15'de 60℃ sıcaklıkta ve 0.5, 1, 2 m/sn hava hızında farklı nem değerlerinde nem içeriği-zaman grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde, tüm sıcaklıklar için % 20 bağıl nemdeki hava ile yapılan kurutma işlemlerinde kuruma süresinin en uzun olduğu görülmektedir. Aynı sıcaklıkta, farklı nem oranları ile yapılan deneylerde ise, havanın bağıl nemi arttıkça kuruma süresinin de arttığı gözlenmiştir. 0.5 m/sn kurutma havası hızı ile yapılan deneylerdeki kuruma süresi, % 5 bağıl nemde 195 dakika, %10 bağıl nemde 275 dakika, %20 bağıl nemde 295 dakikadır. 1 m/sn hızda yapılan deneylerde ise, kuruma süresi, % 5 bağıl nemde 175 dakika, %10 bağıl nemde 210 dakika, %20 bağıl nemde 230 dakikadır. 2 m/sn hızda yapılan deneylerde kurutma süresi, % 5 bağıl nemde 165 dakika, %10 bağıl nemde 195 dakika, %20 bağıl nemde 215 dakikadır.



Şekil 7.13. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (60 ºC sıcaklık, 0.5 m/sn hava hızı)

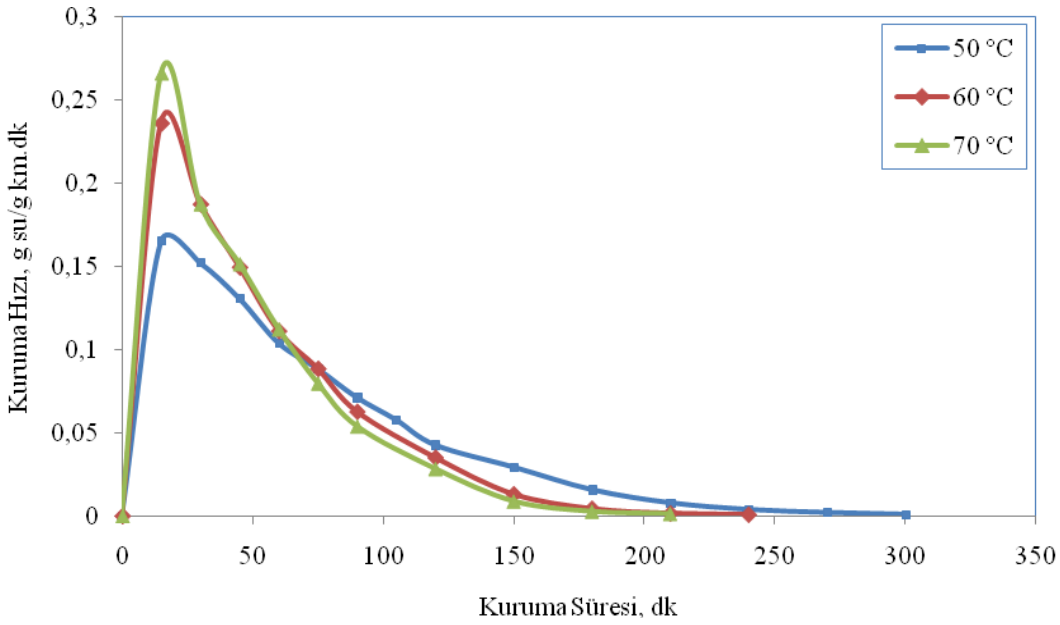


Şekil 7.14. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (60 ºC sıcaklık, 1 m/sn hava hızı)

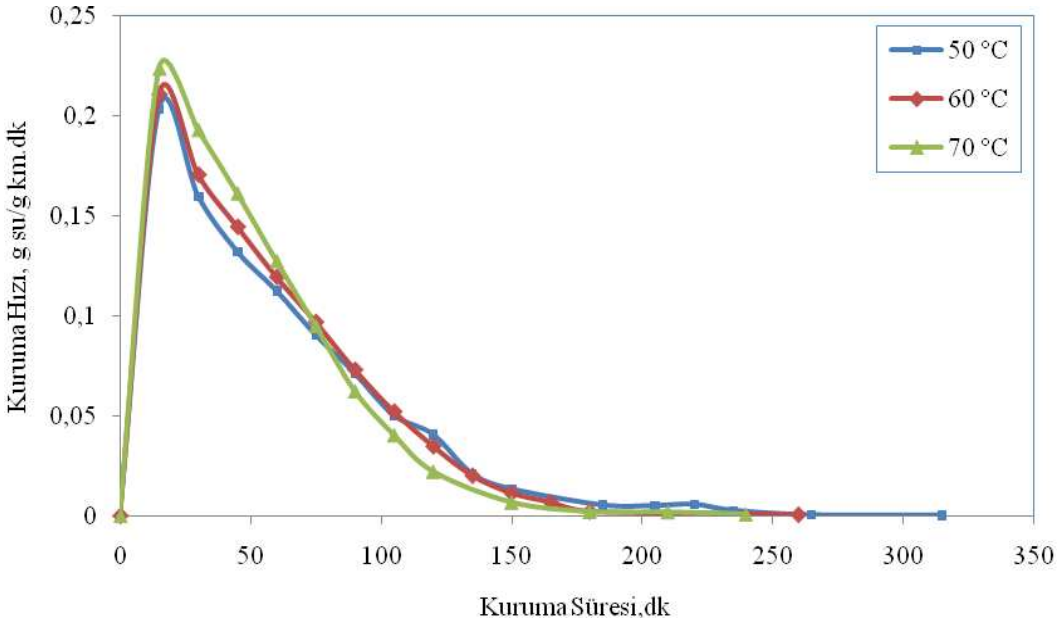


Şekil 7.15. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (60 ºC sıcaklık, 2 m/sn hava hızı)

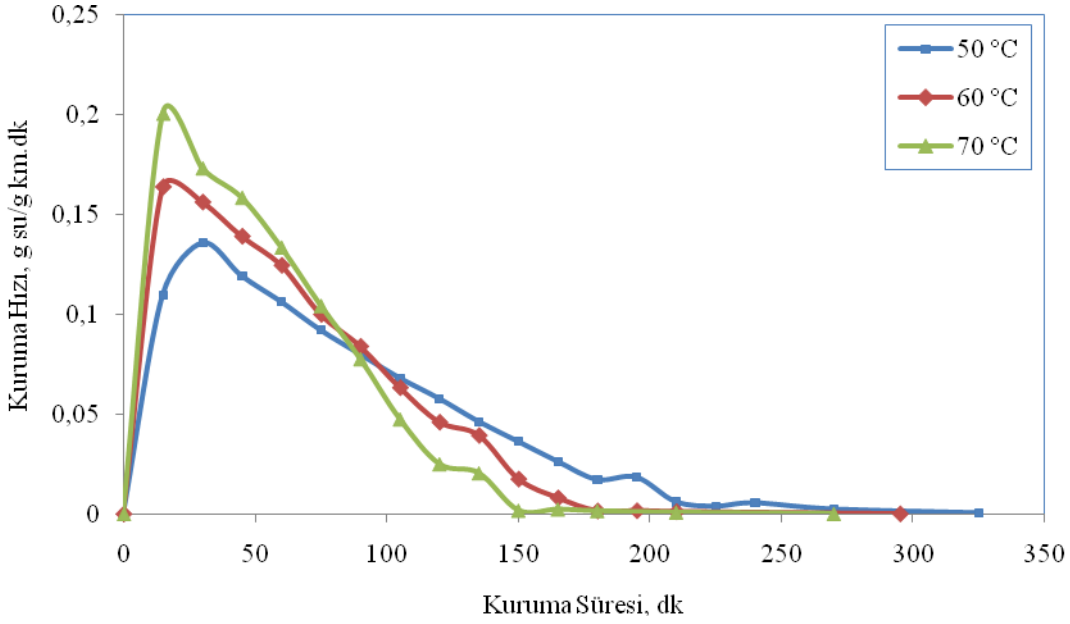
Şekil 7.16 – 7.24' de kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi 0.5, 1 ve 2 m/sn hava hızı, % 5, % 10 ve % 20 bağıl nem değerleri için ve üç farklı kurutma havası sıcaklığı için verilmiştir. 60℃ sıcaklık ve 0.5, 1 ve 2 m/sn hava hızlarında, farklı nem değerlerinde nem içeriği-kuruma süresi grafikleri verilmiştir. Grafiklerde sıcaklığın kuruma hızına etkisi görülmektedir. Kuruma hızının başlangıçtaki değeri sıfır kabul edilip hesaplamalar yapılmış ve grafikler çizilmiştir. Grafiklerde, başlangıçtan hemen sonra kuruma hızında ani bir artış olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artması ile kuruma hızında da artış meydana gelmektedir. İlerleyen zamanla tüm sıcaklıklar için kuruma hızı azalarak sıfıra yaklaşmaktadır.



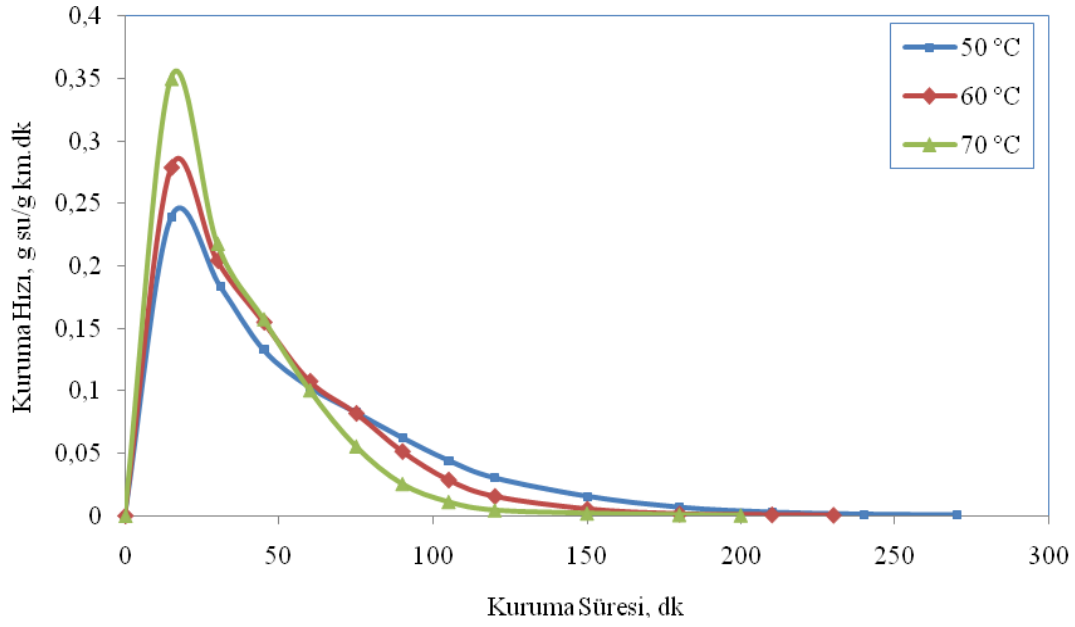
Şekil 7.16. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (%5 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)



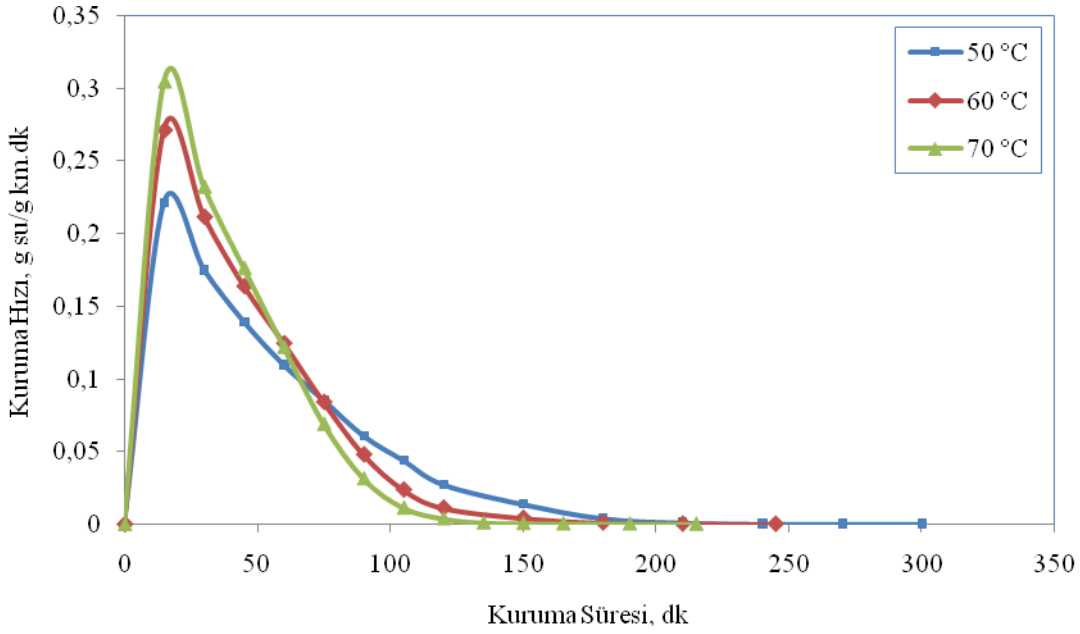
Şekil 7.17. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (% 10 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)



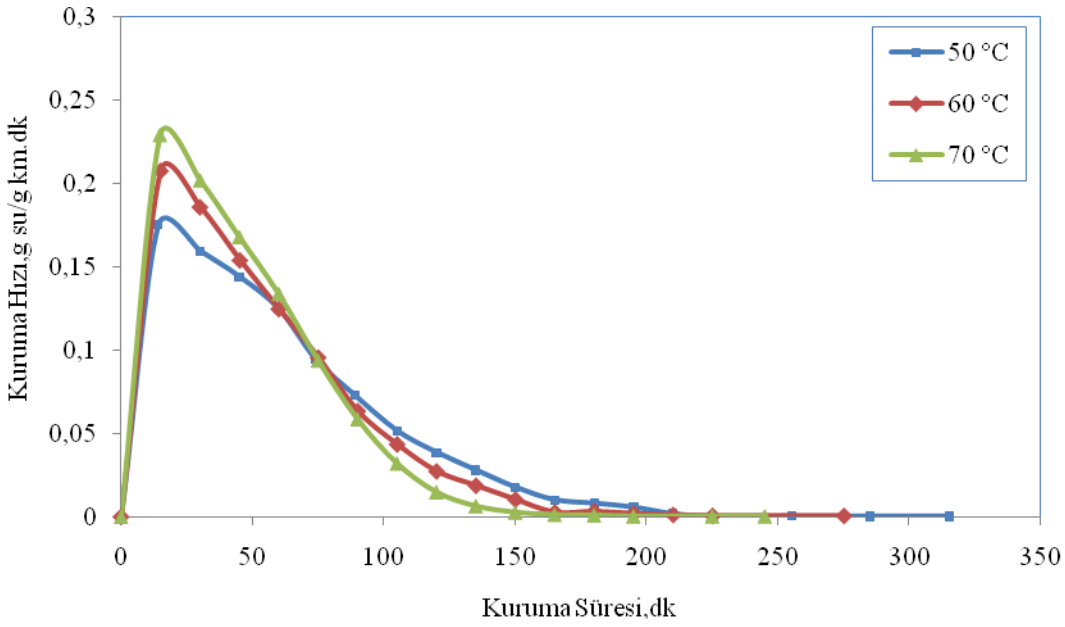
Şekil 7.18. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)



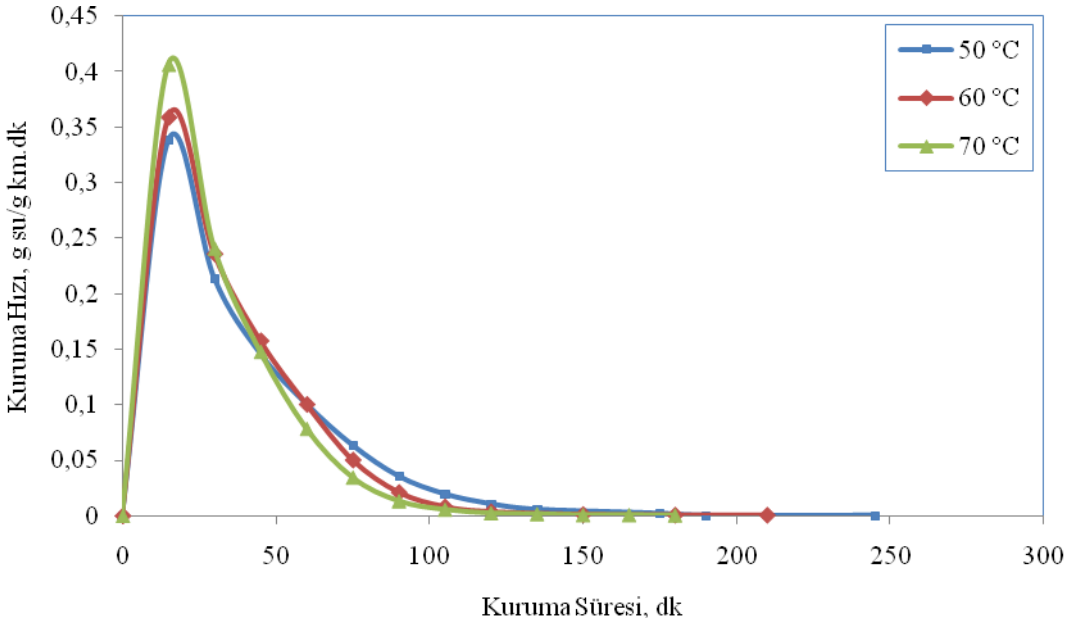
Şekil 7.19. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (% 5 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



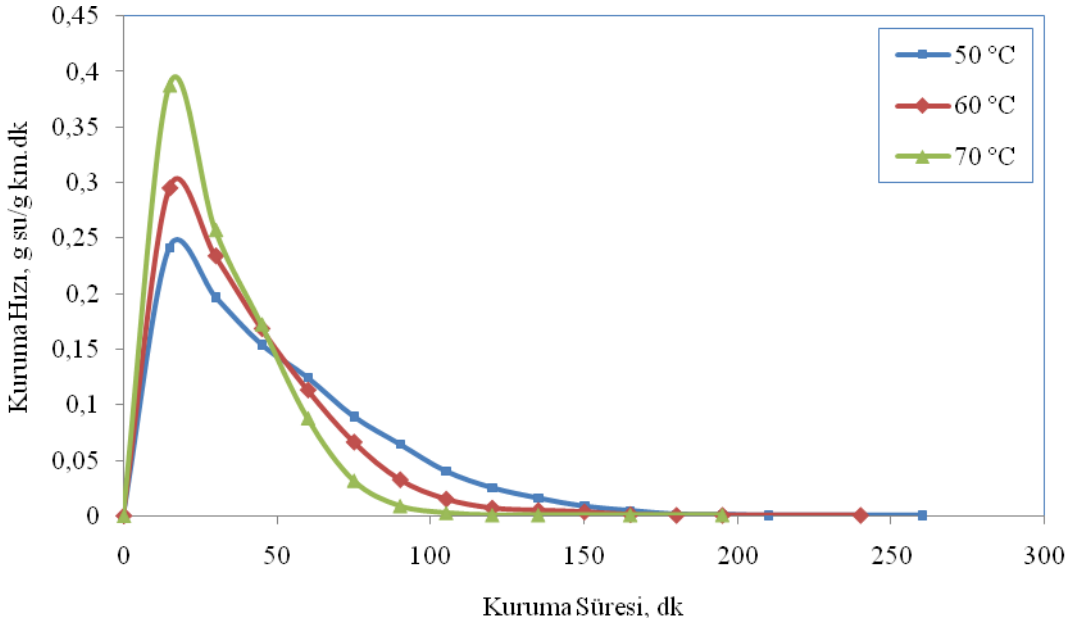
Şekil 7.20. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (% 10 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



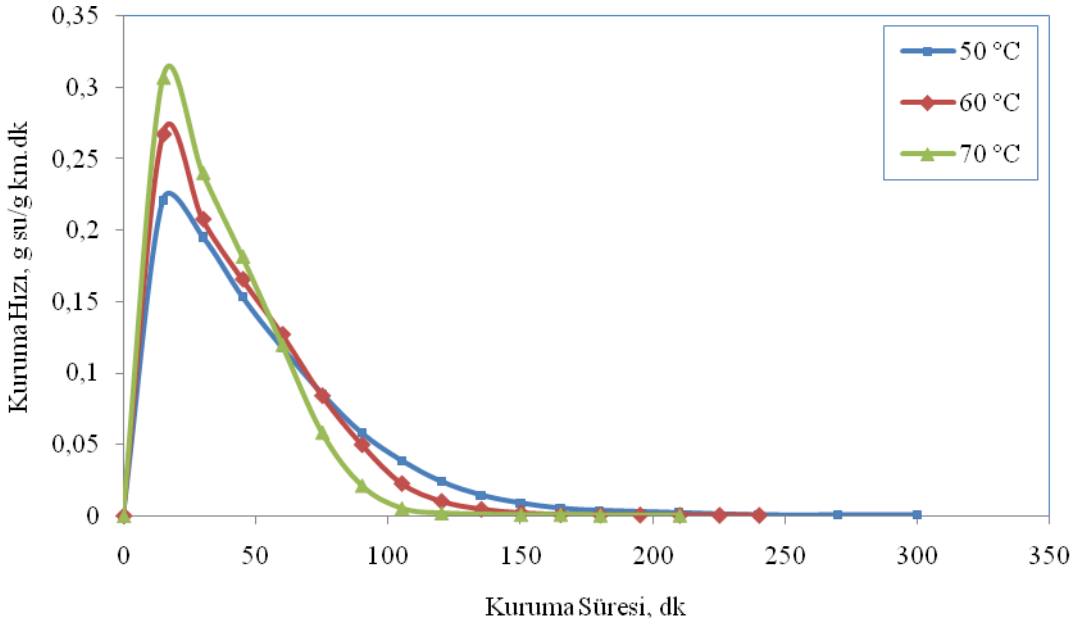
Şekil 7.21. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



Şekil 7.22. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (% 5 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)

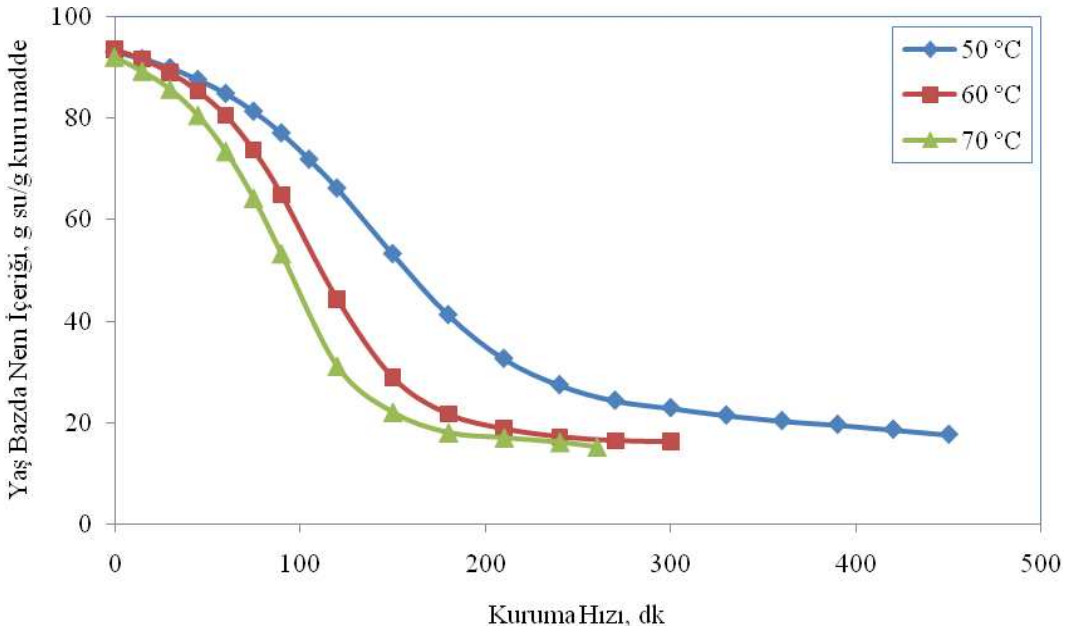


Şekil 7.23. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (% 10 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)

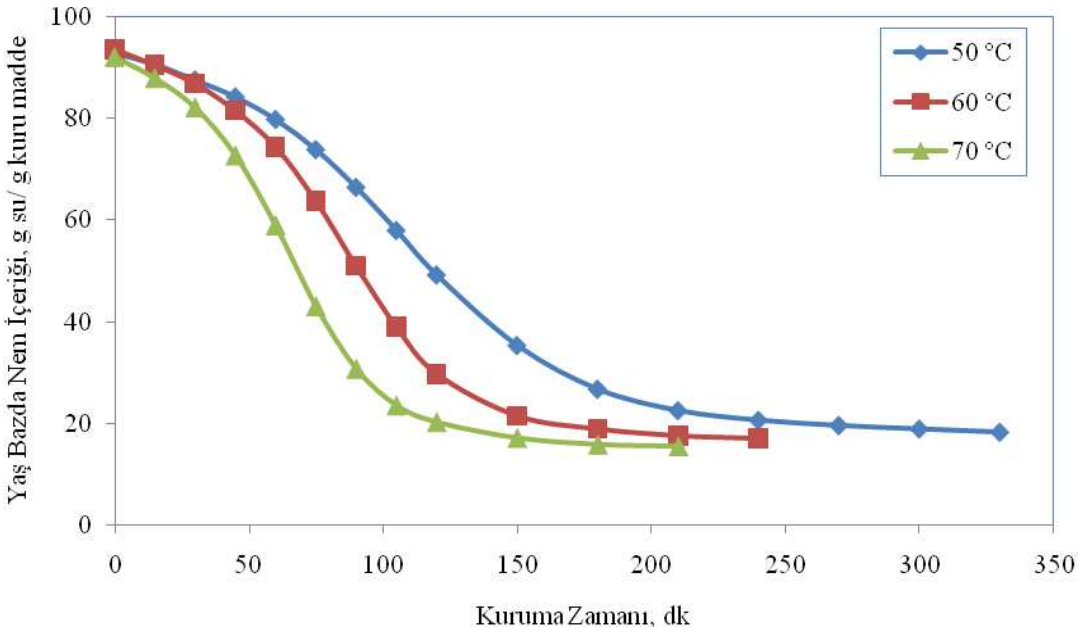


Şekil 7.24. Kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)

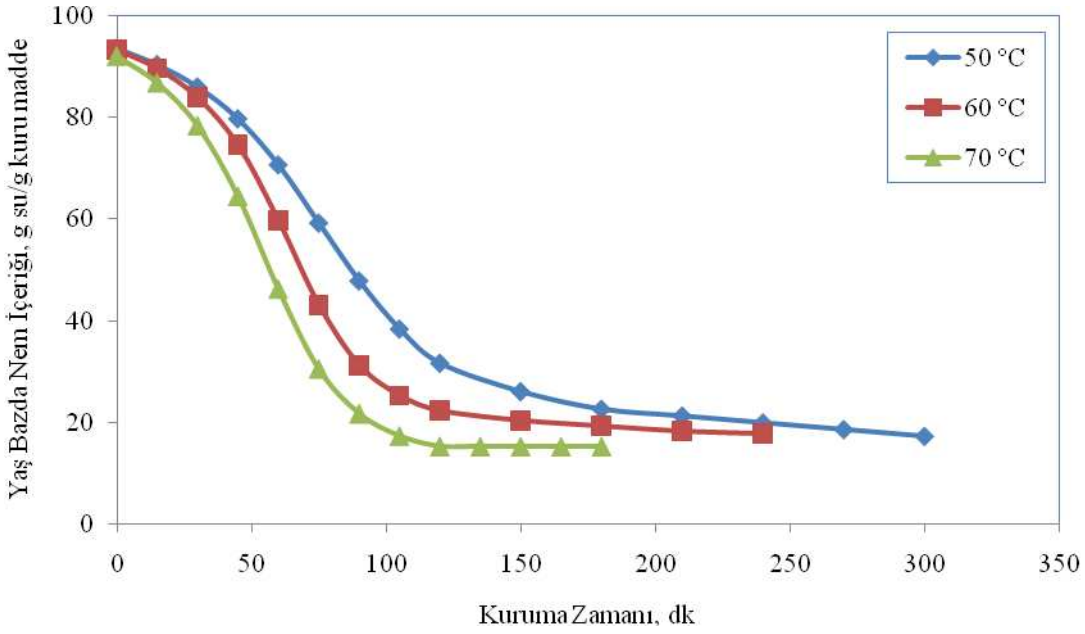
Şekil 7.25 - 7.30 da verilen grafikler 50, 60, 70 ℃ sıcaklık, % 5 ve % 20 bağıl nem ve 0.5, 1, 2 m/sn hızda kurutma havası ile yapılan kurutma işlemlerinde yaş bazda nem içeriğinin-kuruma süresi ile değişimini göstermektedir. Kuruma eğrilerinin değişimi incelendiğinde, kuruma evreleri görülmektedir. Sabit hızda buharlaşma evresinde, ürün içerisinde buhar veya sıvı şeklinde oluşan kütle transferi, yüzeyi sıvıca doygun tutmak için yeterli olmakta ve buharlaşma işleminin hızını etkilememektedir. Havanın bağıl nemi azaldıkça, ürünün ulaşabileceği kritik nem değeri de azalmaktadır.



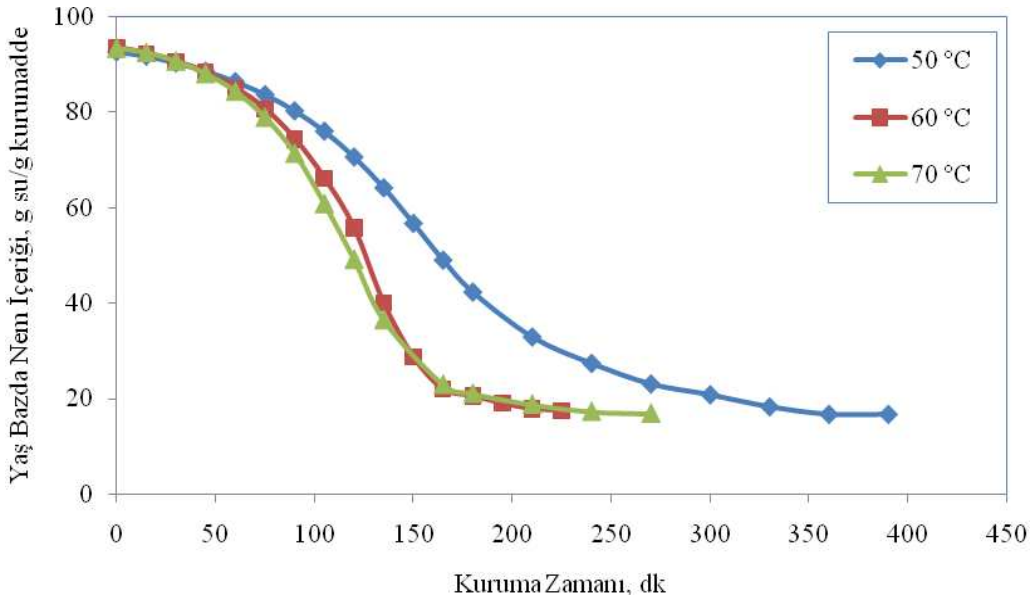
Şekil 7.25. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 5 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)



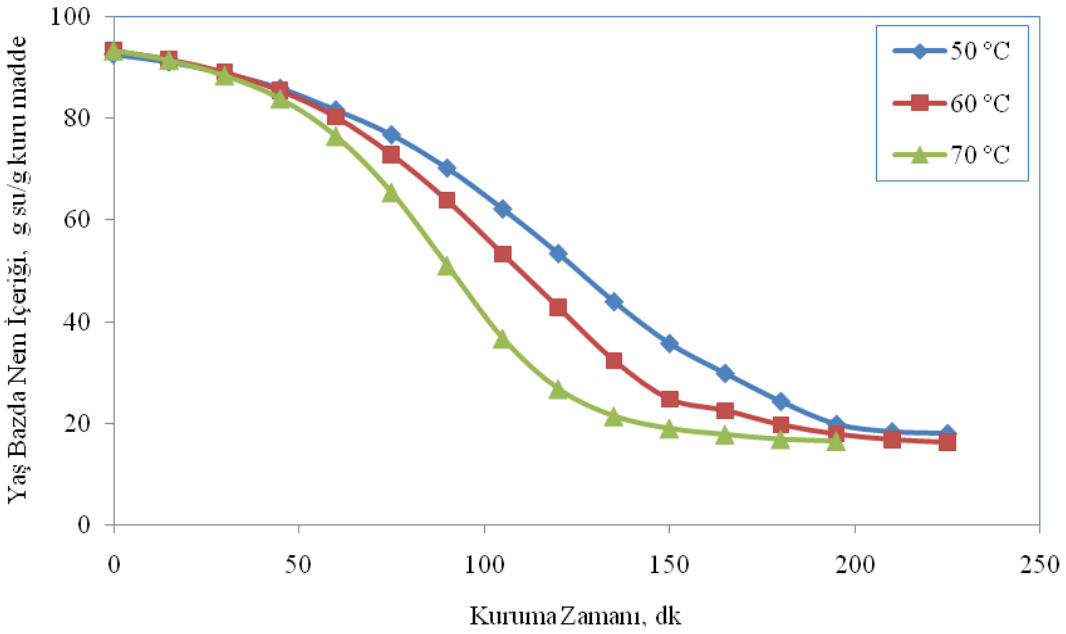
Şekil 7.26. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 5 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



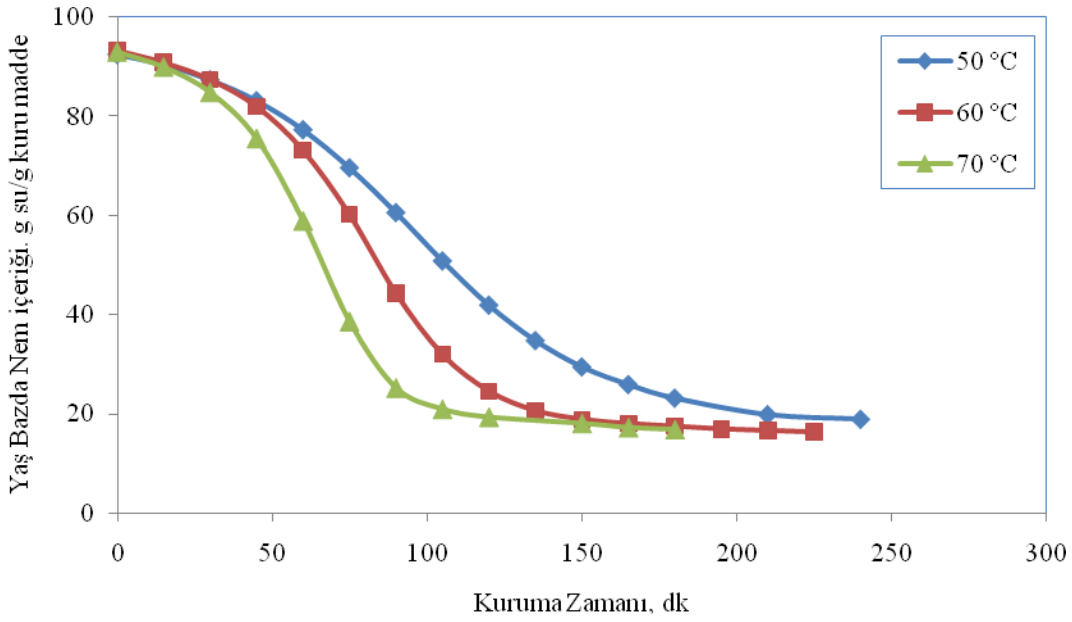
Şekil 7.27. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 5 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)



Şekil 7.28. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 0.5 m/sn hava hızı)

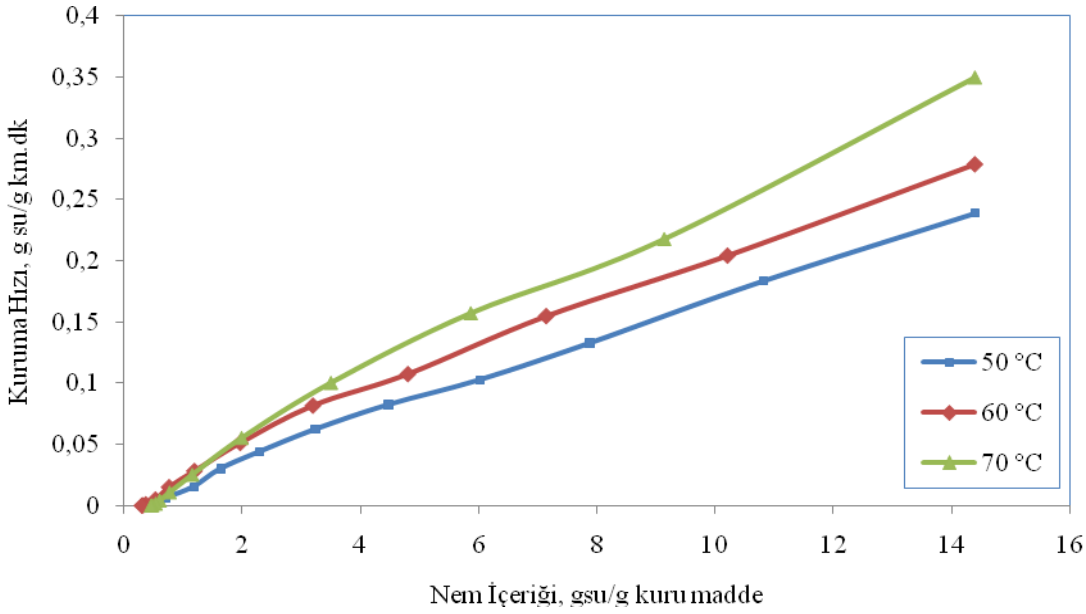


Şekil 7.29. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)

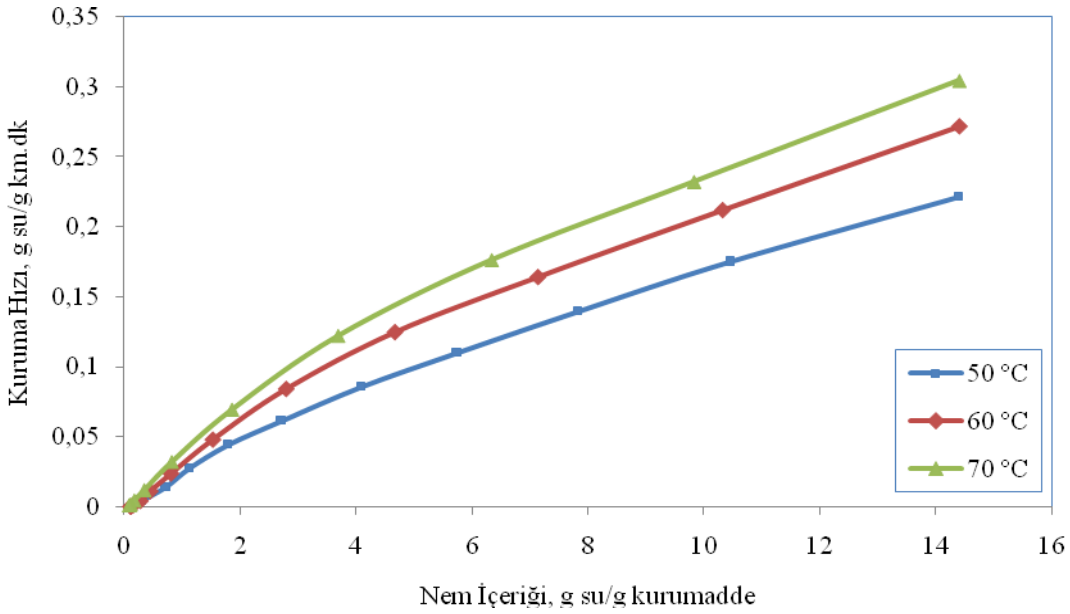


Şekil 7.30. Nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (% 20 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)

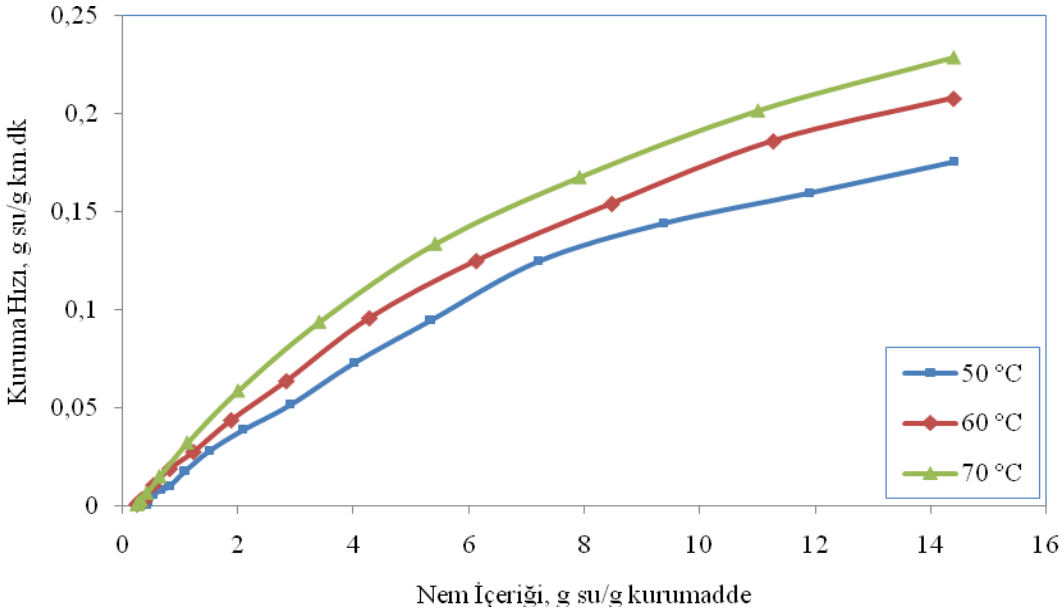
Şekil 7.31–7.35'de kuruma hızının nem içeriği ile değişimi görülmektedir. Grafikler 1 ve 2 m/sn hava hızlarında, % 5, % 10 ve % 20 bağıl nemde ve üç farklı sıcaklıkta kuruma hızındaki değişimi göstermektedir. Şekillerin incelenmesi ile, kuruma işleminin genel olarak azalan kuruma evresinde gerçekleştiği görülmektedir. Kurutma havasının sıcaklığı ve hızı arttıkça nem içeriğinde ve kuruma süresinde azalma gözlenmiştir. Deneylerde en kısa kuruma süresi 70 ºC sıcaklık ve 2 m/sn hava hızında ve % 5 bağıl nemde görülmüştür. En uzun kuruma süresi ise, 50 ºC sıcaklık, 0.5 m/sn hava hızı ve % 20 bağıl nemde gerçekleşmiştir. Sıcaklığın artması ile kuruma süresinin azalmasının nedeni, hava içerisindeki bağıl nemin sıcaklıkla azalması ve bu nedenle nem difüzyonunun hızlanması ile açıklanabilir. Kurutulan ürünün yüzeyinde kuruma sırasında daima ürün kuruyuncaya kadar bir buhar filmi mevcuttur. Bu film tabakası hava hızının şiddetine bağlı olarak er veya geç uzaklaştırılır. Hava hızının bu tür bir katkısından söz etmek mümkündür.



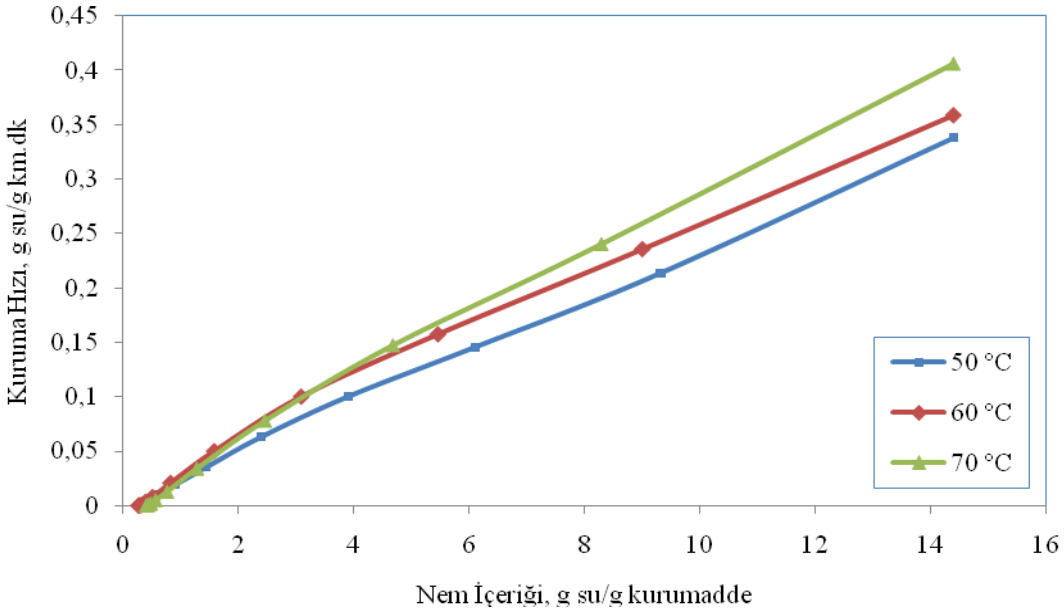
Şekil 7.31. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (% 5 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



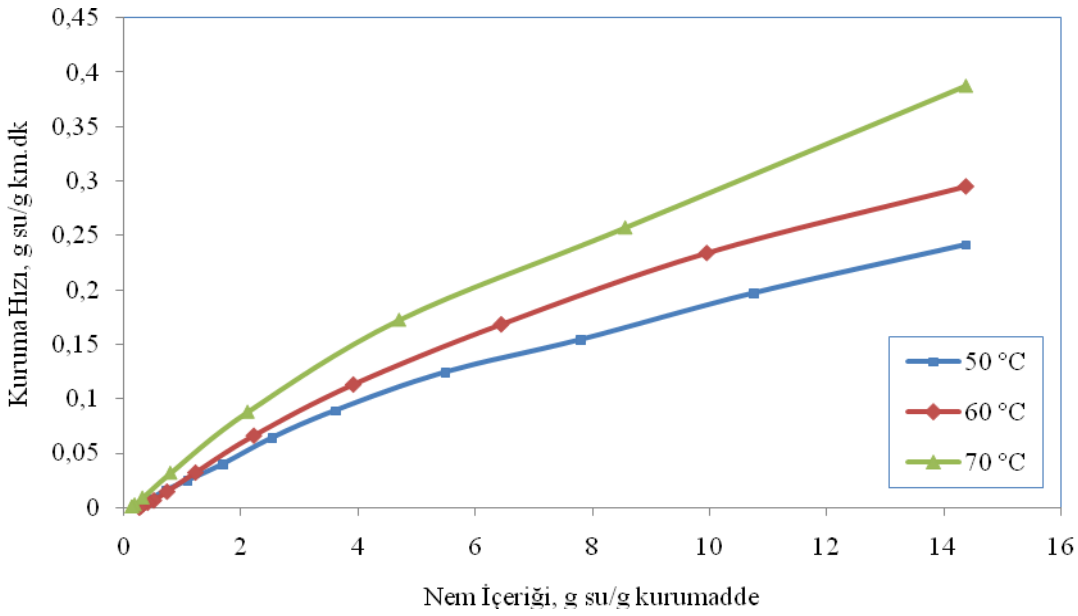
Şekil 7.32. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (% 10 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



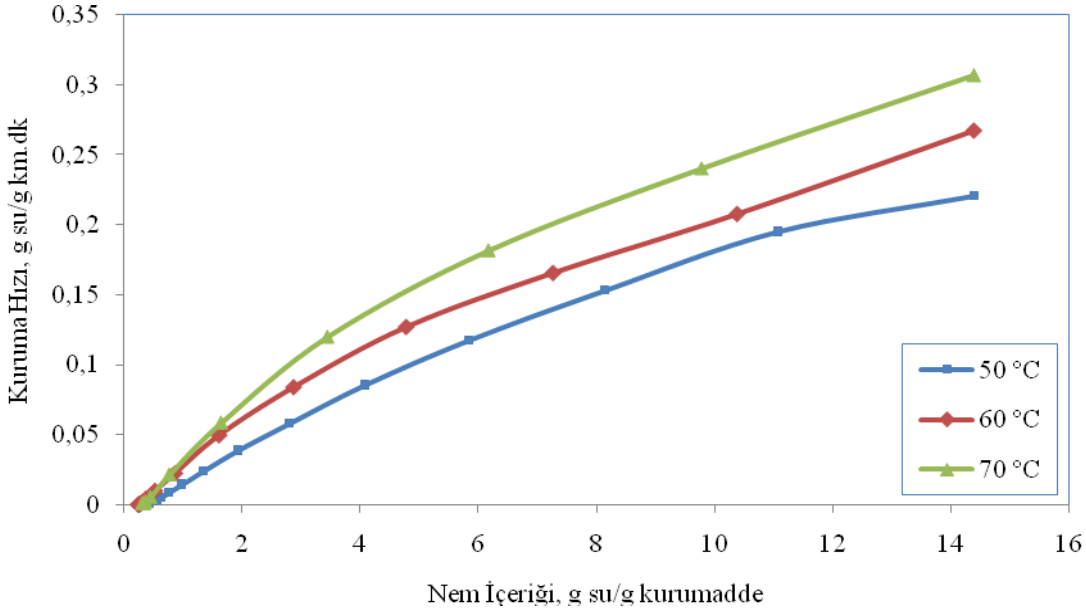
Şekil 7.33. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (% 20 bağıl nem, 1 m/sn hava hızı)



Şekil 7.34. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (% 5 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)



Şekil 7.35. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (% 10 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)



Şekil 7.36. Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (% 20 bağıl nem, 2 m/sn hava hızı)

7.2. Deney Sonuçlarının Kuruma Modelleri ile Karşılaştırılması

Tarımsal ürünlerde ürün denge nemi – denge bağıl nemi ilişkilerinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan araştırmalarda teorik, yarı-teorik ve deneysel olmak üzere 200'ün üzerinde model geliştirilmiştir. Ancak bu eşitlikler daha çok tahıl ve taneli ürünlerde kullanılmıştır (Öztekin, Soysal, 2002).

Biyolojik ürünlerin dâhil olduğu higroskopik maddelerde genellikle kurutma azalan bir hızda gerçekleşir. Azalan hızda kuruma evresinde kurutma hızının formüle edilmesi iki yolla olur.

1. Gözlemsel (Ampirik) Yaklaşım
2. Kuramsal Yaklaşım

Azalan hızda kuruma evresindeki kuruma hızı ürünün büyüklüğüne ve şekline önemli ölçüde bağlı olduğu için birinci tip yaklaşım çok sınırlı bir sonuç vereceğinden genellikle tercih edilmez. Ancak kuramsal yaklaşımın iyi bir sonuç vermediği yerlerde gözlemsel yaklaşım tercih edilmelidir. Kuramsal yaklaşımın başlıca özelliği, kurutulması istenen ürünün içyapısal özelliklerini doğru olarak ölçmek ve elde edilen bu değerleri kuruma hızı hesaplamalarında kullanmaktır. Bu gibi kurutma mekanizmalarının yardımı ile azalan hızda kuruma evresinde oluşan kuruma işlemini açıklamak için çeşitli modeller geliştirilmiştir (Kavak ve ark., 1999). Çizelge 7.1' de ayrılabilir nem oranı değerini veren matematiksel modellerden bazıları verilmiştir.

Çizelge 7.1'de verilen 10 adet matematiksel model Matlap programı kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda RMSE (hesaplamanın tahmini standart hatası) değeri, $\mathbf{X^2}$ (Chi Square), R^2 (regresyon katsayısı), k (kuruma sabiti) değerleri hesaplanarak Çizelge 7.2'de verilmiştir. Matematiksel model 50, 60, 70 ºC sıcaklıkta % 20 bağıl nemde ve 1 m/sn hava hızında yapılan deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırılmış ve deneysel verilere en uygun olan modelin Page, Difüzyon yaklaşım ve Midilli modeli olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.36' da deneysel veriler ile Page modelinden elde edilen veriler, Şekil 7.37'de Midilli modelinin ve Şekil 7.38'de Difüzyon yaklaşım modelinin karşılaştırılması verilmiştir. Denklem (7.1) ve (7.2)'de RMSE ve X^2, değerlerinin hesaplanabilmesi için gerekli bağıntılar verilmiştir.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N_i}\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{model} - MR_{deneysel}\right)^2\right]^{1/2} \qquad (7.1)$$

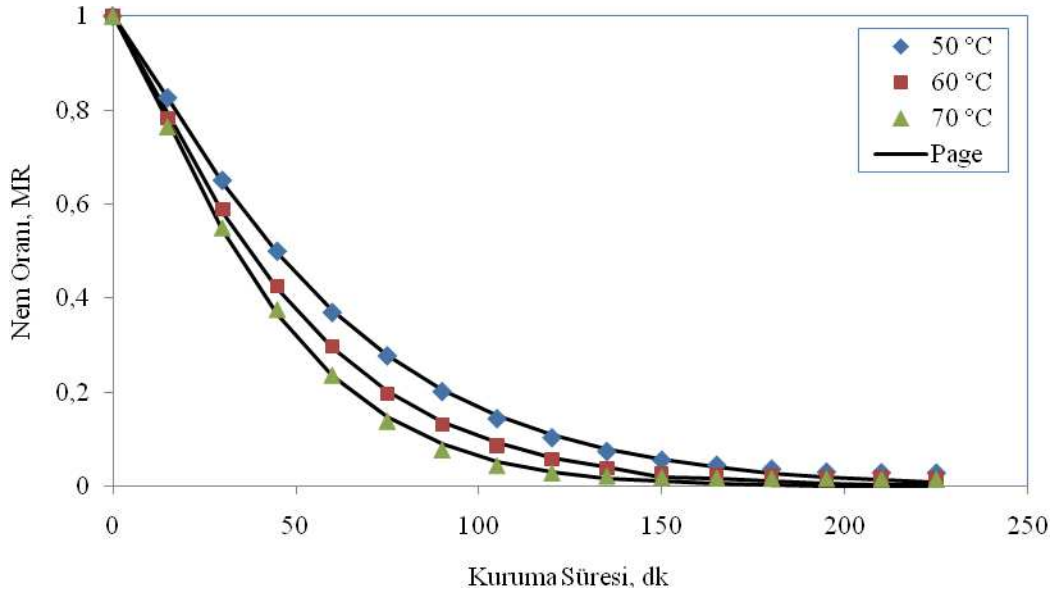
$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{deneysel} - MR_{model})^2}{N_{deney} - z} \quad (7.2)$$

Çizelge 7.1. Kuruma eğrilerinin matematiksel modellerini veren denklemler

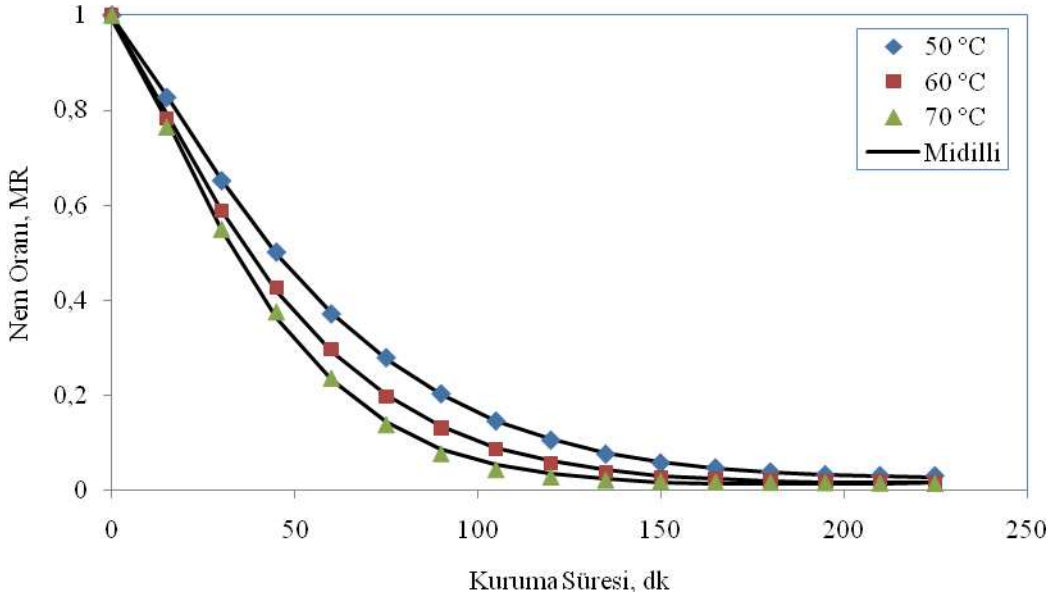
Model Adı	**Model**
Newton	*MR=exp(-kt)*
Page	$MR=exp(-kt^n)$
Geliştirilmiş Page I	$MR=exp[(-kt)^n]$
Geliştirilmiş Page II	$MR=exp[-(kt)^n]$
Henderson ve Papis	*MR=a exp(-kt)*
Logaritmik	*MR=a exp(-kt)+c*
Two-Term Exponential	MR = aexp(-kt) + (1-a)exp(-kat)
Difuzyon Yaklaşım	*MR= a exp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)*
Verma ve ark.	*MR= a exp(-kt)+(1-a)exp(-gt)*
Midilli ve ark.	$MR= a exp(-kt^n)+bt$

Çizelge 7.2. Matematik modeller kullanılarak hesaplanan değerler

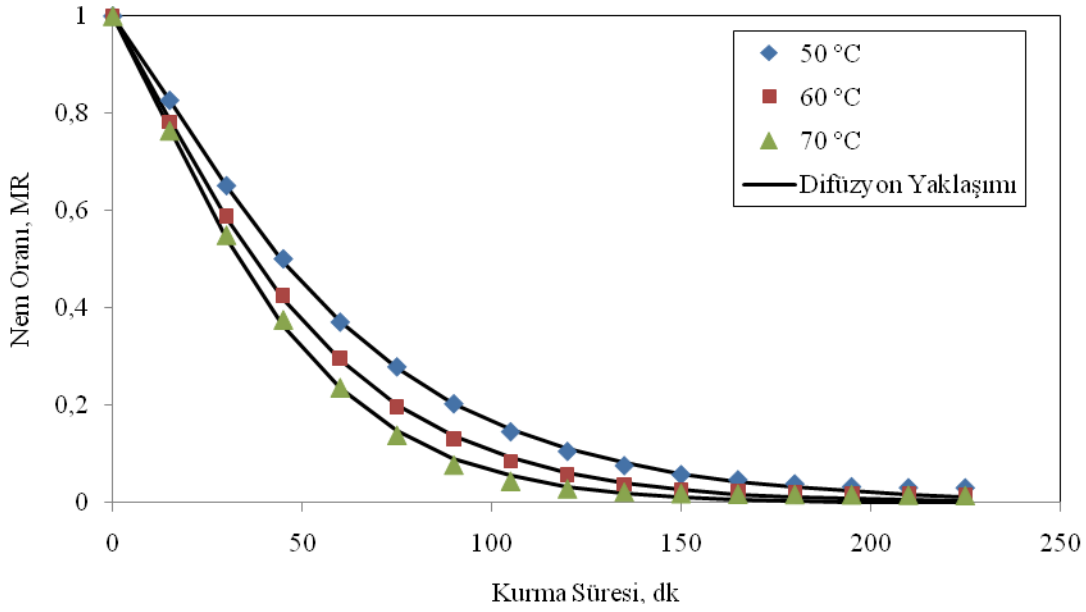
Model Adı	T (ºC)	R^2	χ^2	RMSE	k
Newton	50	0,9936	0,000619623	0,0249	0,01683
	60	0.9935	0,000618549	0.0249	0.02039
	70	0.9902	0,000926124	0.03048	0.02334
Page	**50**	**0,993**	**0,000075360**	**0,008707**	**0,008159**
	60	**0,9993**	**0,000069960**	**0,008265**	**0,009398**
	70	**0,9988**	**0,000123062**	**0,01106**	**0,008428**
Geliştirilmiş Page I	50	0,9936	0,00066387	0,02577	0,1712
	60	0,9935	0,00066277	0,02577	0,1156
	70	0,9895	0,00099228	0,03155	0,1194
Geliştirilmiş Page II	50	0,9992	0,001849192	0,008707	0,01638
	60	0,9993	0,000069960	0,008265	0,01975
	70	0,9987	0,000123062	0,01106	0,02241
Henderson ve Papis	50	0,9951	0,00035296	0,02177	0,01748
	60	0,9945	0,00042414	0,02288	0,02108
	70	0,9913	0,00069701	0,02872	0,0242
Logaritmik	50	0.9956	0,000426433	0.02068	0.01654
	60	0.9949	0,000482043	0.02201	0.02014
	70	0.9913	0,00081946	0.02867	0.02334
Two-term Exponential	50	0.9931	0,000666606	0.02582	57.31
	60	0.993	0,000667743	0.02587	31.17
	70	0.9894	0,000998576	0.03165	30.2
Difüzyon Yaklaşım	**50**	**0.9994**	**0,000054502**	**0.007396**	**0.05716**
	60	**0.9993**	**0,000061837**	**0.007949**	**0.04473**
	70	**0.9987**	**0,000127587**	**0.01128**	**0.04364**
Verma ve Ark.	50	0.9985	0,00014053	0.01189	0.01873
	60	0.9979	0,00019618	0.01404	0.02288
	70	0.9965	0,00032963	0.01809	0.02713
Midilli ve Ark.	**50**	**0,9999**	**0,00000838**	**0,002956**	**0,006715**
	60	**0,9998**	**0,00002676**	**0,005393**	**0,008134**
	70	**0,9995**	**0,00006106**	**0,007922**	**0,007232**



Şekil 7.36. Page modeli ile 50, 60, 70 ºC sıcaklık, %20 RH ve 1m/sn hava hızında yapılan deneyden elde edilen verilerin karşılaştırılması



Şekil 7.37. Midilli modeli ile 50, 60, 70 ºC sıcaklık, %20 RH ve 1m/sn hava hızında yapılan deneyden elde edilen verilerin karşılaştırılması



Şekil 7.37. Difüzyon yaklaşım modeli ile 50, 60, 70 ºC sıcaklık, %20 RH ve 1m/sn hava hızında yapılan deneyden elde edilen verilerin karşılaştırılması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Adapazarı yöresinde yetişen balkabağının (*Cucurbita moschata*) hava ile konveksiyon kurutulması deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırmada havanın farklı koşulları ile kurutma deneyleri yapılmış ve elde edilen veriler grafikler halinde gösterilmiştir.

Deneyler sonucunda kurutma hava sıcaklığı ve hızı arttıkça kuruma hızının arttığı, kuruma süresinin azaldığı görülmüştür. En kısa kuruma süresi 70 °C de ve 2 m/sn hava hızında gerçekleşmiştir. Ürünler kurutulurken boyut, şekil ve renk olarak değişim göstermiştir. Farklı kuruma şartlarında büzülme ve renk değişimi aynı zamanda meydana gelmemektedir. 60 °C sıcaklıkta, % 5 bağıl nemde ve 1 m/sn hava hızında kurutma işlemine başladıktan 30 dakika sonra ürün renginde açılmalar meydana gelmiştir. 45 dakika sonra şekil değişimi (ürün kenarlarında bükülme) meydana gelmiştir. 60 dakika sonra ise ürün merkezinden itibaren şekil bozukluğu, 105 dakika sonra da, üründe hissedilir düzeyde sertlik ve kırılganlık meydana gelmiştir.

Kurutma havasının bağıl neminin artması ile kuruma hızının azaldığı, kuruma için gerekli sürenin arttığı görülmüştür. Düşük bağıl nem değerlerinde kuruma hızının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kurumanın hızı, ürünün yüzeyindeki suyun buhar basıncı ile kurutma havasının kısmi buhar basıncı arasındaki farka bağlıdır. Ayrıca ürün ile kurutma havası arasındaki nem konsantrasyon farkı da kuruma boyunca azalmaktadır.

Kurutma havası hızı kuruma hızına etki eden başka bir etkendir. Kurutma işlemlerinde hava hızının etkisi, kurutmanın bulunduğu evreye göre değişmektedir. Başlangıçta hava hızı çok etkili iken, ileri aşamalarda kuruma hızı, ürünün iç tabakalarındaki suyun yüzeye taşınma hızı ile sınırlanmaktadır. Bu nedenle, kurutmada hava hızının yüksek olmasının önemli bir etkisi olmamaktadır.

Tarım ürünlerinin kuruma davranışını önceden tahmin edebilmek için, araştırmacılar tarafından geliştirilen çeşitli yarı teorik ve ampirik modeller literatürde mevcuttur. Bu modellerde değişken olarak kuruma zamanı yer almakta ve kuruma şartlarının kurumaya etkisi, modellerdeki kuruma sabitleri ile ifade edilmektedir. Bu çalışmada da literatürde mevcut olan Newton, Page, Geliştirilmiş Page I, Geliştirilmiş Page II, Henderson ve Papis, Logaritmik, Two-Term Exponential, Difuzyon Yaklaşım, Verma ve ark., Midilli ve ark. kuruma modelleri balkabağının kuruma davranışını önceden belirlemek amacı ile kullanılmıştır. Modellerde yer alan sabitler, deneysel

değerler ile model sonuçları arasındaki hataların kareleri toplamı minimize edilerek hesaplanmıştır.

Nem oranı eğrileri yukarıda belirtilen modeller ve literatürden seçilen on adet model ile karşılaştırılmış ve en yakın benzerliğin Page, Difüzyon Yaklaşımı ve Midilli ve ark. Modelleri ile olduğu görülmüştür.

Balkabağının konveksiyonla kurutulması konusunda yapılacak çalışmalarda, ozmotik kurutma yöntemi kullanılarak, ön işlem uygulanarak, farklı hava koşullarında ve ürünün farklı dilim kalınlığı ve boyutlarında kurutma deneyleri yapılabilir. Bu şekilde ürünün kuruma davranışı daha hassas olarak belirlenebilecektir.

Günümüzde insanlardaki gıda güvenliği bilincinin artması ile, kurutma işlemi, son yıllarda rağbet gören endüstriyel alanlardan biri olma yolunda hızla ilerlemektedir. Bu nedenle kurutma işleminin, gelecekte birçok endüstriyel gıda işleme yöntemlerinin yerini alması muhtemeldir.

Kurutma havasının sıcaklığının artmasının kurumayı hızlandırdığı bir gerçektir. Fakat sıcaklığın kurutulan ürünün kimyasal bozulmaya uğramadan kurutulması için sıcaklığın belirli bir ölçüde sabit tutulması gerekmektedir.

9. KAYNAKLAR

Akpınar E. K., 2005, Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneylerindeki Hata Analizi, Mühendis Ve Makina - Cilt: 46 Sayı: 540

Akpınar E. K., Biçer Y., 2003, Siklon tipi bir kurutucuda kabağın kuruma davranışının incelenmesi, G.Ü.Fen bilimleri dergisi, 2003 16 (1)159-169

Aktacir M. A., Yeşilata B., 2006, Şerit Biçiminde Kesilmiş Gıda Maddeleri İçin Basit Bir Kurutma Modelinin Geliştirilmesi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı: 92, S 50-55

Aktaş M., Ceylan İ., 2008, Isı Pompası Destekli Bir Kurutucuda Fındık Kurutulması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 23, No 1, 215-222

Alibas I, 2006, Characteristics of Chard Leaves during Microwave, Convective, and Combined Microwave-Convective Drying, Drying Technology, 24: 1425–1435.

Anonim, 2007, (http://gidacidede.blogspot.com/2007_10_01_archive.html

Anonim, 2010, Kuru meyve ve mamulleri ihracat değerlendirmesi, İstanbul ihracatçı birlikleri Genel sekreterliği Ar-ge şubesi, İstanbul.

Anonim, 2009, 2006-2008 yılları arası yurt içi kuru sebze ve meyve üretimi (www.tüik.gov.tr)

Anonymous, ASAE, 1983, Moisture Measurement-Peanuts. ASAE Standard of ASAE S.410.1. Agricultural Engineering Yearbook of Standards, 329-331.

Anonymous, AOAC (Association of Official Analyticel Chemists), 1990, Official Methods of Analysis, Arlington, Vol. 15, 1298

Anonymous, ASHRAE Temel El Kitabı, 1998 Bölüm 13: Ölçme Tekniği, Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınlar, İstanbul

Arıcı R. Ç., 2006, Mantarın (Agaricus Bisporus) Kontrollü Şartlar Altında Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

Başaran, B., Bitlisli, B.O., Sarı, Ö., Özbalta, N. ve Güngör A., 2004, Deri kurutulmasında yeni teknolojiler: ısı pompalı kurutucular, I.Ulusal Deri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ege Üniversitesi İzmir, 634-642, 644-647s.

Cemeroglu, B., Acar, J., 1986. Meyve ve sebze isleme teknolojisi. Gıda Teknolojisi Derneği Yayın No: 6, Ankara

Ceylan,I., Aktaş,M., 2008, Isı pompası destekli bir kurutucuda fındık kurutulması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Enginering Index,Cilt 23, No 1, 215-222.

Coleman, H. W., Steele, W. G., 1989, Experimentation and uncertainty analysis for engineers, John Wiley&Sons.

Çengel Y. A., Boles M. A., 2000 Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, McGraw-Hill – Literatür Yayınları, İstanbul, 46.

Çınar İ., 2006, Gıda Kurutma Teknolojisinde Matematik Modellerin Kullanımı, Türkiye 9. Gıda Kongresi; 24-26 Mayıs 2006, Bolu, 805-806.

Darıcı S.,1998, Borularda akış tıkanmasının türbülanslı ısı transferine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Demir V., Günhan T., 2002, Tarım ürünlerinin kurutma tekniği çalıştayı Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümü çalıştaylar dizisi no 1, İzmir.

Demirtaş C. 1996, Fındık kurutma şartlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Doymaz I., 2005, Drying characteristics and kinetics of okra, Journal of Food Engineering 69 275–279.

Doymaz I., 2007, The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, Journal of Food Engineering ,79 (2007) 243–248.

Erbaş M., Şekerci H., Gül S., 2008, Gıdaların sorpsiyon izotermlerinin belirlenmesi ve kullanımı, Türkiye 10. gıda kongresi; 21-23 Mayıs 2008, syf:1021-1022.

Erçetin Ü., 2007, Tanecikli gıda maddelerinin akışkan yatakta kurutulması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Ertekin C., 2002, Bazı sebze ve meyvelerin kurutulması, Tarım ürünlerinin kurutma tekniği çalıştayı Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümü çalıştaylar dizisi no 1, İzmir.

Garcia C. C., Mauro M. A., Kimura M., 2007, Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (Cucurbita moschata), Journal of Food Engineering, 82 (2007) 284–291.

Genceli, Ö. F., 2000, Ölçme Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Günerhan H., 2005, Endüstriyel kurutma sistemleri, Türk tesisat mühendisleri dergisi sayı 13, Ankara.

Güneş M., 1994, Bilgisayar destekli olarak çeşitli geometrik şekillere sahip gözenekli ortamlarda kurutma prosesinin incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

İsaeva J., 2007, Kayısı kurutmasının deneysel ve teorik olarak araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

İzli N., Mısırın sıcak hava akımıyla kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Kavak E., Biçer Y., Yıldız C., 1999, Kurutma Ve Kurutma Modelleri, Tmmob Makina Mühendisleri Odası, Bildiriler Kitabı, Yayın No: 221, Denizli.

Kavak E., Biçer Y., Yıldız C., 1999, Kurutma ve kurutma modelleri, 5-6-7 mayıs 1999 bilim günleri Makina mühendisleri odası yayınları, Denizli, Syf 99-105.

Kaya D., 2006, Balkabağı suyu üretim teknolojisinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Koç A. B., Toy M., Hayoğlu İ., Vardin H., 2004, Kırmızı Biber Kurutmada Kullanılan Güneş Enerjili Bir Kurutucu Performansı, Hr. Ü.Z.F.Dergisi, 8 (2):57-65.

Lahsasni S., Kouhila M., Mahrouz M., Jaouhari J.T., 2003, Drying kinetics of prickly pear fruit (Opuntia ficus indica) Abstract Journal of Food Engineering 61 (2004) 173–179.

Mengeş H. O., Ertekin C.,2007, Vişne Kurutmada Kurumanın Çeşitli Modellerle Açıklanması, Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 21 (42): (2007) 4-10.

Mirzaee1 E., Rafiee1 S., Keyhani1 A., Emam-Djomeh Z., 2009, Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots, Research in Agricultural Engineering Agricultural Journals., 55, 2009 (3): 114–120.

Nasıroğlu Ş., 2007, Kırmızı biber, elma ve pırasanın kurutulmasında infrared kurutma tekniğinin kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.

Özbalta N., Güngör A., 1997, Endüstriyel Kurutma Sistemleri, Tmmob Makina Mühendisleri Odası, 3. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Yayın No: 203/2, İzmir

Öztekin S., Yurtsever S., 2002, Denge nemi ölçüm ve hesaplama yöntemleri, Tarım ürünlerinin kurutma tekniği çalıştayı Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümü çalıştaylar dizisi no 1, İzmir.

Sacılık K., 2007, The Thin-Layer Modelling of Tomato Drying Process, Agriculturae Conspectus Scientifi cus | Vol. 72 No. 4 (343-349).

Sacılık K., 2007, Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.), Journal of Food Engineering, 79 (2007) 23–30.

Salunkhe D. K., Kadam S. S., 1998, Handbook of vegetable science and technology, Markel Dekker, New York.

Treybal, R., 1980. Mass-Transfer Operations. McGraw-Hill, New York, 3rd ed., pp. 275- 313.

Vural H., Eşiyok D. ve Duman E., 2000, Kültür sebzeleri (sebze yetiştirme). Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü. Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir.

Yağcıoğlu, A., 1999. Tarım ürünleri kurutma tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 536, İzmir.

Yıldız O, Ertekin C. 2001. Thin Layer Solar Drying of Some Vegetables. Dryıng Technology, 19: 583–597.

Zhang M., Tang J., Majumdar A.J., Wang S., 2006, Trends in Microwaverelated Drying of Fruits and Vegetables, Trends in Food Science and Technology, 17:524-534.

10. EKLER

Ek Çizelge 1. Nem oranı (MR) değerleri (1 m/sn hava hızı, % 20 bağıl nem)

Zaman, dk	**Sıcaklık**		
	50 °C	**60 °C**	**70 °C**
0	1,000	1,000	1,000
15	0,827	0,783	0,764
30	0,651	0,589	0,550
45	0,501	0,426	0,376
60	0,371	0,297	0,237
75	0,279	0,198	0,139
90	0,203	0,131	0,078
105	0,145	0,086	0,044
120	0,105	0,058	0,029
135	0,076	0,038	0,022
150	0,057	0,027	0,020
165	0,046	0,024	0,018
180	0,038	0,021	0,017
195	0,032	0,019	0,017
210	0,030	0,018	0,016
225	0,030	0,017	0,015

Ek Çizelge 2. Page modelinin hesaplanması sonucu elde edilen veriler ve MR değerleri

Zaman, dk	Page 50 °C			Page 60 °C			Page 70 °C		
	k	n	MR	k	n	MR	k	n	MR
0	0,008159	1,17	1	0,009398	1,189	1	0,008428	1,257	1
15	0,008159	1,17	0,823707	0,009398	1,189	0,79042	0,008428	1,257	0,77604
30	0,008159	1,17	0,646372	0,009398	1,189	0,58496	0,008428	1,257	0,54553
45	0,008159	1,17	0,495945	0,009398	1,189	0,41963	0,008428	1,257	0,364649
60	0,008159	1,17	0,374591	0,009398	1,189	0,29448	0,008428	1,257	0,234967
75	0,008159	1,17	0,279472	0,009398	1,189	0,20311	0,008428	1,257	0,147012
90	0,008159	1,17	0,206391	0,009398	1,189	0,13809	0,008428	1,257	0,08972
105	0,008159	1,17	0,151094	0,009398	1,189	0,09272	0,008428	1,257	0,053581
120	0,008159	1,17	0,109464	0,009398	1,189	0,06158	0,008428	1,257	0,031385
135	0,008159	1,17	0,079192	0,009398	1,189	0,0405	0,008428	1,257	0,018064
150	0,008159	1,17	0,056781	0,009398	1,189	0,02064	0,008428	1,257	0,010232
165	0,008159	1,17	0,040479	0,009398	1,189	0,01707	0,008428	1,257	0,005711
180	0,008159	1,17	0,028707	0,009398	1,189	0,010955	0,008428	1,257	0,003144
195	0,008159	1,17	0,020258	0,009398	1,189	0,006981	0,008428	1,257	0,001708
210	0,008159	1,17	0,01423	0,009398	1,189	0,004419	0,008428	1,257	0,000916
225	0,008159	1,17	0,009953	0,009398	1,189	0,002779	0,008428	1,257	0,000487

Ek Çizelge 3. Midilli modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (50 ºC**)**

Zaman, dk	**Midilli 50 ºC**			
	a	**b**	**k**	**MR**
0	0,9976	0,00009047	0,006715	1,00
15	0,9976	0,00009047	0,006715	0,83
30	0,9976	0,00009047	0,006715	0,65
45	0,9976	0,00009047	0,006715	0,50
60	0,9976	0,00009047	0,006715	0,37
75	0,9976	0,00009047	0,006715	0,28
90	0,9976	0,00009047	0,006715	0,20
105	0,9976	0,00009047	0,006715	0,15
120	0,9976	0,00009047	0,006715	0,11
135	0,9976	0,00009047	0,006715	0,08
150	0,9976	0,00009047	0,006715	0,06
165	0,9976	0,00009047	0,006715	0,05
180	0,9976	0,00009047	0,006715	0,04
195	0,9976	0,00009047	0,006715	0,03
210	0,9976	0,00009047	0,006715	0,03
225	0,9976	0,00009047	0,006715	0,03

Ek Çizelge 4. Midilli modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (60 ºC**)**

Zaman, dk	**Midilli 60 ºC**				
	a	**b**	**k**	**n**	**MR**
0	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	1,00
15	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,79
30	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,59
45	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,42
60	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,29
75	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,20
90	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,13
105	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,09
120	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,06
135	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,04
150	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,03
165	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,02
180	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,02
195	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,02
210	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,02
225	0,9952	0,00006	0,008134	1,228	0,02

Ek Çizelge 5. Midilli modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (70 ºC**)**

Zaman, dk	**Midilli 70 ºC**				
	a	**b**	**k**	**n**	**MR**
0	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,99
15	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,78
30	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,55
45	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,36
60	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,23
75	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,14
90	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,09
105	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,05
120	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,03
135	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,02
150	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,02
165	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,02
180	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,01
195	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,01
210	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,01
225	0,9937	0,00006674	0,007232	1,299	0,02

Ek Çizelge 6. Difüzyon yaklaşım modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (50 ºC**)**

Zaman, dk	**Difüzyon Yaklaşım 50 ºC**			
	a	**B**	**k**	**MR**
0	-0,304	0,3585	0,05716	1
15	-0,304	0,3585	0,05716	0,82988754
30	-0,304	0,3585	0,05716	0,65037584
45	-0,304	0,3585	0,05716	0,495281259
60	-0,304	0,3585	0,05716	0,371434144
75	-0,304	0,3585	0,05716	0,276204784
90	-0,304	0,3585	0,05716	0,204412656
105	-0,304	0,3585	0,05716	0,150870685
120	-0,304	0,3585	0,05716	0,111180033
135	-0,304	0,3585	0,05716	0,081857973
150	-0,304	0,3585	0,05716	0,060238209
165	-0,304	0,3585	0,05716	0,04431539
180	-0,304	0,3585	0,05716	0,032595903
195	-0,304	0,3585	0,05716	0,02397335
210	-0,304	0,3585	0,05716	0,01763071
225	-0,304	0,3585	0,05716	0,012965721

Ek Çizelge 7. Difüzyon yaklaşım modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (60 ºC**)**

Zaman, dk	**Difüzyon Yaklaşım 60 ºC**			
	a	**b**	**k**	**MR**
0	-0,91	0,6269	0,04473	1
15	-0,91	0,6269	0,04473	0,789421556
30	-0,91	0,6269	0,04473	0,58624686
45	-0,91	0,6269	0,04473	0,419655588
60	-0,91	0,6269	0,04473	0,293303387
75	-0,91	0,6269	0,04473	0,201664248
90	-0,91	0,6269	0,04473	0,137057379
105	-0,91	0,6269	0,04473	0,092367693
120	-0,91	0,6269	0,04473	0,061864104
135	-0,91	0,6269	0,04473	0,041241943
150	-0,91	0,6269	0,04473	0,027397816
165	-0,91	0,6269	0,04473	0,018152412
180	-0,91	0,6269	0,04473	0,012002375
195	-0,91	0,6269	0,04473	0,007923557
210	-0,91	0,6269	0,04473	0,005224559
225	-0,91	0,6269	0,04473	0,003441715

Ek Çizelge 8. Difüzyon yaklaşım modeline göre elde edilen veriler ve MR değerleri (70 ºC**)**

Zaman, dk	**Difüzyon Yaklaşım 70 ºC**			
	a	**b**	**k**	**MR**
0	-4,529	0,8714	0,04364	1
15	-4,529	0,8714	0,04364	0,771987739
30	-4,529	0,8714	0,04364	0,543807114
45	-4,529	0,8714	0,04364	0,363224239
60	-4,529	0,8714	0,04364	0,234331464
75	-4,529	0,8714	0,04364	0,147537331
90	-4,529	0,8714	0,04364	0,091233562
105	-4,529	0,8714	0,04364	0,055643397
120	-4,529	0,8714	0,04364	0,033569609
135	-4,529	0,8714	0,04364	0,020075595
150	-4,529	0,8714	0,04364	0,011919641
165	-4,529	0,8714	0,04364	0,007034828
180	-4,529	0,8714	0,04364	0,004130936
195	-4,529	0,8714	0,04364	0,002415315
210	-4,529	0,8714	0,04364	0,001406997
225	-4,529	0,8714	0,04364	0,0008170

Ek Çizelge 9. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (0,5 m/sn, %5 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**5**		
Hız (m/sn)	**0,5**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,385	14,385	14,385
15	11,901	10,841	10,396
30	9,615	8,028	7,586
45	7,650	5,784	5,317
60	6,088	4,116	3,635
75	4,759	2,789	2,441
90	3,691	1,849	1,635
105	2,823	1,326	1,212
120	2,184	0,798	0,789
135	1,69	0,604	0,667
150	1,304	0,407	0,527
165	1,069	0,342	0,485
180	0,833	0,277	0,446
195	0,701	0,256	0,411
210	0,598	0,232	0,409
225	0,529	0,211	
240	0,484	0,209	
255	0,442		
270	0,424		

Ek Çizelge 10. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (1 m/sn, %5 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**5**		
Hız (m/sn)	**1**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,385	14,385	14,385
15	10,807	10,203	9,136
30	7,873	7,139	5,867
45	6,014	4,800	3,505
60	4,472	3,196	1,996
75	3,234	1,966	1,161
90	2,298	1,194	0,778
105	1,634	0,764	0,611
120	1,180	0,532	0,544
135	0,946	0,449	0,515
150	0,713	0,371	0,486
165	0,612	0,348	0,475
180	0,512	0,327	0,464
195	0,471	0,316	0,406
210	0,430	0,306	0,458
225	0,413	0,301	
240	0,396	0,297	
255	0,376		
270	0,378		

Ek Çizelge 11. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (2 m/sn, %5 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**5**		
Hız (m/sn)	**2**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,385	14,385	14,385
15	9,312	9,001	8,291
30	6,104	5,463	4,681
45	3,914	3,097	2,466
60	2,404	1,592	1,290
75	1,451	0,838	0,773
90	0,917	0,522	0,574
105	0,623	0,401	0,490
120	0,464	0,347	0,454
135	0,421	0,331	0,430
150	0,378	0,315	0,420
165	0,335	0,306	0,409
180	0,293	0,297	0,402
195	0,289	0,282	
210	0,289	0,280	
225	0,282		
240	0,280		

Ek Çizelge 12. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (0,5 m/sn, %10 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**10**		
Hız (m/sn)	**0,5**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,012	14,385	14,385
15	10,958	11,222	11,029
30	8,590	8,661	8,133
45	6,632	6,492	5,713
60	4,915	4,699	3,802
75	3,556	3,244	2,376
90	2,386	2,148	1,441
105	1,632	1,366	0,836
120	1,021	0,844	0,504
135	0,706	0,542	0,403
150	0,505	0,373	0,304
165	0,412	0,271	0,271
180	0,319	0,240	0,242
195	0,218	0,232	0,215
210	0,171	0,225	0,188
225	0,132	0,212	0,169
240	0,092	0,205	0,166
255	0,0859	0,198	
270	0,081	0,196	
285	0,067		
300	0,064		

Ek Çizelge 13. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (1 m/sn, %10 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**10**		
Hız (m/sn)	**1**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,385	14,385	14,385
15	10,455	10,312	9,815
30	7,828	7,136	6,332
45	5,736	4,676	3,688
60	4,089	2,806	1,858
75	2,707	1,544	0,821
90	1,791	0,824	0,347
105	1,130	0,466	0,176
120	0,716	0,297	0,115
135	0,507	0,232	0,098
150	0,297	0,169	0,086
165	0,234	0,152	0,079
180	0,170	0,137	0,072
195	0,151	0,129	0,068
210	0,136	0,127	0,065
225	0,129	0,121	
240	0,124	0,119	
255	0,121		
270	0,120		

Ek Çizelge 14. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (2 m/sn, %10 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**10**		
Hız (m/sn)	**2**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,385	14,385	14,385
15	10,761	9,959	8,571
30	7,802	6,449	4,710
45	5,486	3,923	2,124
60	3,618	2,223	0,805
75	2,542	1,228	0,329
90	1,691	0,741	0,196
105	1,089	0,516	0,157
120	0,712	0,412	0,147
135	0,473	0,339	0,137
150	0,345	0,286	0,133
165	0,276	0,269	0,130
180	0,255	0,263	0,129
195	0,238	0,260	0,128
210	0,232	0,251	
225	0,225	0,246	
240	0,218	0,249	
255	0,221		

Ek Çizelge 15. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (0,5 m/sn, %20 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**20**		
Hız (m/sn)	**0,5**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,385	14,385	14,385
15	12,740	11,929	11,373
30	10,704	9,588	8,772
45	8,916	7,504	6,393
60	7,322	5,637	4,388
75	5,941	4,140	2,823
90	4,741	2,881	1,657
105	3,720	1,933	0,945
120	2,853	1,245	0,571
135	2,159	0,655	0,265
150	1,615	0,393	0,239
165	1,220	0,272	0,205
180	0,963	0,250	0,183
195	0,688	0,226	0,171
210	0,597	0,218	0,160
225	0,539	0,212	0,178
240	0,457	0,208	0,170
255	0,421	0,204	0,165
270	0,385	0,199	0,163
285	0,372	0,197	
300	0,35	0,195	
315	0,359		
330	0,357		

Ek Çizelge 16. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (1 m/sn, % 20 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**20**		
Hız (m/sn)	**1**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,385	14,385	14,385
15	11,892	11,265	10,996
30	9,368	8,472	7,909
45	7,204	6,128	5,409
60	5,332	4,279	3,404
75	4,008	2,843	1,997
90	2,915	1,890	1,119
105	2,088	1,237	0,638
120	1,508	0,827	0,417
135	1,086	0,547	0,321
150	0,820	0,391	0,281
165	0,668	0,351	0,263
180	0,546	0,303	0,249
195	0,460	0,274	0,243
210	0,434	0,258	0,241
225	0,428	0,249	0,240
240	0,418	0,241	
255	0,41	0,236	
270	0,407	0,234	
285	0,403		
300	0,401		

Ek Çizelge 17. Kuru baza göre nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi (2 m/sn, % 20 RH)

Sıcaklık (°C)	**50**	**60**	**70**
RH (%)	**20**		
Hız (m/sn)	**2**		
Zaman (dk)	**Nem İçeriği (g su/g km)**		
0	14,385	14,385	14,385
15	11,072	10,380	9,781
30	8,142	7,268	6,177
45	5,843	4,786	3,452
60	4,078	2,882	1,655
75	2,794	1,622	0,779
90	1,925	0,875	0,461
105	1,344	0,537	0,382
120	0,984	0,386	0,354
135	0,767	0,318	0,343
150	0,634	0,289	0,333
165	0,555	0,276	0,320
180	0,500	0,267	0,314
195	0,468	0,259	0,312
210	0,437	0,254	0,311
225	0,429	0,249	
240	0,421		
255	0,419		
270	0,418		