T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIM ÜRÜNLERİNİN KURUMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Soner ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2010

T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIM ÜRÜNLERİNİN KURUMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Soner ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2010

Bu tez 02 / 07 / 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından

oy birliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şefik BİLİR	Yrd. Doç. Dr. Ali KAHRAMAN	Yrd. Doç. Dr. Selçuk DARICI
(Üye)	(Üye)	(Danışman)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARIM ÜRÜNLERİNİN KURUMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Soner ŞEN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Selçuk DARICI

2010, 80 sayfa

Jüri: Prof. Dr. Şefik BİLİR
Yrd. Doç. Dr. Selçuk DARICI
Yrd. Doç. Dr. Ali KAHRAMAN

Kurutma, gıdaların uzun süre bozulmadan saklanabilmesi için en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Genel olarak kurutma, tarım ürünlerinin içerdikleri suyun (nemin) büyük bir kısmının kontrollü şartlar altında uzaklaştırılarak ürünün bozulmasını önleyecek bir düzeye indirilmesi işlemidir. Doğal ortamdaki kurutma uygulamalarında kurumanın uzun sürmesi ve ürünün çevresel etkilere açık olması besin değerlerinin azalmasına, ürünlerde kalitenin düşmesine ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle kurutma işleminin özel amaçlı yapay kurutucular ile yapılması, hem kuruma süresini kısaltmakta, hem de uzun raf ömrüne sahip daha kaliteli ve temiz ürün elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, kivi meyvesinin kuruma karakteristiklerini belirlemek için kurutma havasının 50, 60, 70, ve 80 °C sıcaklık, 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s ve 2.0 m/s hız ve % 5, % 10 ve % 20 bağıl nem değerlerinde deneyler yapılarak kurutma havası sıcaklığı, hızı ve bağıl neminin kurumaya etkileri araştırılmıştır. Kivinin kurutulmasında, kurumayı açıklamak için kurutma havasının 0.5 m/s hız, % 10 bağıl nem, 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklıklarındaki deneylerden elde edilen nem oranı (MR) değerleri literatürden seçilen bazı modellere MATLAB programında uygulanmıştır. Korelasyon katsayısı (R^2) ve hata karelerinin ortalamasının karekökü (RMSE) değerleri hesaplanarak ayrılabilir nem oranı hesabını en düşük hata ile veren model belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kivi, Kurutma, Kuruma Karakteristiği, Kuruma hızı, Kuruma modeli

ABSTRACT

Master Thesis

DETERMINATION OF DRYING CHARACTERICTICS OF AGRICULTURAL PRODUCTS

Soner ŞEN

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assist. Prof. Selçuk DARICI

2010, Page: 80

Jüri: Prof. Şefik BİLİR

Assist. Prof. Selçuk DARICI

Assist. Prof. Ali KAHRAMAN

Drying is one of the most widely used methods for storing and preserving foods without being deteriorated. In general, drying is a process that decreases the water (moisture) in agricultural products to a level which prevent deterioration, under controlled circumstances. In natural drying processes, products dry in long time periods while they are open to environmental effects and which in turn decrease their nutrition values, qualities and economical values. Therefore, performing drying process with specific artificial dryers would provide decrease in the drying time and increase in the quality and shelf life of the products.

In this work, effects of velocity, temperature and relative humidity of drying air to drying kiwi fruit are investigated to experimentally. Experiments were repeated for 50, 60, 70 and 80 ^{0}C of air temperature, 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s and 2.0 m/s of air velocity and for % 5, % 10 and % 20 of air relative humidity. Moisture ratio values of the experimental results obtained for 0.5 m/s velocity, 10 % relative humidity and 50, 60, 70, and 80 ^{0}C temperatures, are applied to some models in the literature with MATLAB software. According to the analysis of correlation coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE) values, it has been seen that resolvable humidity rate is obtained by one of the models with the least error.

Key Words: Kiwi, Drying, Drying Characteristics, Drying Rate, Drying Model

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın planlanmasında ve yürütülmesinde, çalışmalarım süresince benden destek ve ilgisini esirgemeyen, Sayın Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Selçuk DARICI' ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın bir proje olarak yürütülmesini sağlayan ve çalışmanın her aşamasında desteğini hissettiğim Sayın Hocam Prof. Dr. Şefik BİLİR'e, proje arkadaşım Makine Yük. Mühendisi Osman BABAYİĞİT'e ve çalışmalarımda desteğini gördüğüm mesai arkadaşım Arş. Gör. Eyüb CANLI'ya teşekkür ederim.

Konya, 2010 **Soner ŞEN**

İÇİNDEKİLER

ÖZET……i
ABSTRACT……iii
TEŞEKKÜR……v
İÇİNDEKİLER……vi
ŞEKİLLER LİSTESİ…….....viii
ÇİZELGELER LİSTESİ……..…xi
EK-ÇİZELGELER…….xii
SİMGELER……...xiii
1. GİRİŞ 1
2. KURUTMA TEORİSİ VE KURUTMA YÖNTEMLERİ..... 4
2.1. Kurutma İşlemi..... 4
2.1.1. Kurumanın Statiği..... 4
2.1.2. Kurumanın Kinetiği 6
2.2. Kurutma Prosesindeki Temel İfadeler..... 7
2.2.1. Nem içeriği 7
2.2.2. Nem oranı 8
2.2.3. Kuruma hızı 8
2.2.4. İnce tabaka kuruma modelleri..... 9
2.3. Kurutma Yöntemleri..... 10
2.3.1. Morötesi radyasyon kurutma 11
2.3.2. İletimle kurutma..... 11
2.3.3. İnfrared (Kızılötesi) radyant kurutma 11
2.3.4. Dondurarak kurutma..... 11
2.3.5. Vakumda kurutma..... 12
2.3.6. Karıştırmalı yatakta kurutma 12
2.3.7. Akışkan yataklı kurutma..... 12
2.3.8. Flaş kurutma 12
2.3.9. Tünel kurutma..... 13

2.3.10. Püskürtmeli kurutma 13
2.3.11. Dielektrik kurutma 13
2.3.12. Mikrodalga kurutma 13
2.4. Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler 14
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI 15
4. MATERYAL ve YÖNTEM 19
4.1. Materyal 19
4.1.1. Deneylerde kullanılan ürün 19
4.1.2. İlk nem tayin cihazı 20
4.1.3. Ağırlık ölçümünde kullanılan tartım cihazı 20
4.2. Yöntem 21
4.2.1. Deney seti 21
4.2.2. Deney setinin hassasiyeti ve belirsizlik analizi 26
4.2.3. Kurutulacak kivi örneklerinin hazırlanması 30
4.2.4. İlk nemin belirlenmesi 31
4.2.5. Deneylerin yapılışı 32
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA 35
5.1. Kurutma Havası Sıcaklığının Kurumaya Etkisi 35
5.2. Kurutma Havası Hızının Kurumaya Etkisi 43
5.3. Kurutma Havası Bağıl Nem Değerinin Kurumaya Etkisi 51
5.4. Farklı Koşullarda Kurutulan Kiviye Ait Kuruma Sabitinin Hesaplanması ve Bazı Modellerle Karşılaştırılması 57
6. SONUÇ 64
7. KAYNAKLAR 66
EKLER 69

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No **Sayfa No**

Şekil 2.1 Sorpsiyon eğrisinin kurumanın statiği açısından anlamı……..…..5

Şekil 2.2 Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri ……..…...6

Şekil 4.1 Deneylerde kullanılan kivi meyvesi …….....19

Şekil 4.2 Nem tayin cihazının genel görünümü …….....20

Şekil 4.3 Deneylerde kullanılan dijital terazi …….....21

Şekil 4.4 Kurutma deney seti……....22

Şekil 4.5 Deney setinden bir görünüm……..22

Şekil 4.6 Deney seti üzerinde ölçme elemanlarının yerleşimi …….25

Şekil 4.7 Kurutma havası sıcaklığının zaman ile değişimi……26

Şekil 4.8 Kurutma havası hızının zamanla değişimi…….27

Şekil 4.9 Kurutma havası bağıl neminin zamanla değişimi …….27

Şekil 4.10 Deney numunelerinin kurutulmadan önceki görünümü …….31

Şekil 4.11 Nem tayini yapılmış kivi örneklerinin görünümü ……...32

Şekil 4.12 Deney numunelerinin kuruduktan sonraki görünümleri …….34

Şekil 5.1 Nem içeriğinin zamanla değişimi (4 mm dilim k.) ……...36

Şekil 5.2 Nem içeriğinin zamanla değişimi (6 mm dilim k.) ……...36

Şekil 5.3 Nem içeriğinin (% N_{yb}) zamanla değişimi (4 mm dilim k.) …….....37

Şekil 5.4 Nem içeriğinin (% N_{yb}) zamanla değişimi (6 mm dilim k.)…….. 37

Şekil 5.5 Kuruma hızının zamanla değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim k.) ……...38

Şekil 5.6 Kuruma hızının zamanla değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim k.) …….39

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No **Sayfa No**

Şekil 5.7 Kuruma hızının zamanla değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim k.) ….....39

Şekil 5.8 Kuruma hızının zamanla değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim k.) ….....40

Şekil 5.9 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi(Alt tepsi, 4 mm dilim k.)…….....41

Şekil5.10 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi(Üst tepsi, 4 mm dilim k.)…...…41

Şekil 5.11 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim k.)…....42

Şekil 5.12 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim k.) ……42

Şekil 5.13 Nem içeriğinin zamanla değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim k.) ……..44

Şekil 5.14 Nem içeriğinin zamanla değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim k.) ……...44

Şekil 5.15 Nem içeriğinin zamanla değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim k.) ……..45

Şekil 5.16 Nem içeriğinin zamanla değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim k.) …….. 45

Şekil 5.17 Nem içeriğinin ($\%N_{yb}$) zamanla değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim k.) …..46

Şekil 5.18 Nem içeriğinin ($\%N_{yb}$) zamanla değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim k.)…...47

Şekil 5.19 Nem içeriğinin ($\%N_{yb}$) zamanla değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim k.) …...47

Şekil 5.20 Nem içeriğinin ($\%N_{yb}$) zamanla değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim k.) …..48

Şekil 5.21 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim k.)…… 49

Şekil 5.22 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim k.) ……49

Şekil 5.23 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim k.) ……50

Şekil 5.24 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim k.) …...50

Şekil 5.25 Nem içeriğinin zamanla değişimi (4 mm dilim k.) ……..51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No **Sayfa No**

Şekil 5.26 Nem içeriğinin zamanla değişimi (6 mm dilim k.) ……..……..….52

Şekil 5.27 Nem içeriğinin (%N_{yb}) zamanla değişimi (4 mm dilim k.)……..53

Şekil 5.28 Nem içeriğinin (%N_{yb}) zamanla değişimi (6 mm dilim k.) …….....53

Şekil 5.29 Kuruma hızının zamanla değişimi (4 mm dilim k.) ……....54

Şekil 5.30 Kuruma hızının zamanla değişimi (6 mm dilim k.) ……....55

Şekil 5.31 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (4 mm dilim k.) ……..56

Şekil 5.32 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (6 mm dilim k.)…….....56

Şekil 5.33 Nem oranının zamanla değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim k.) ……....62

Şekil 5.34 Nem oranının zamanla değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim k.) ……...62

Şekil 5.35 Nem oranının zamanla değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim k.) ……....63

Şekil 5.36 Nem oranının zamanla değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim k.) ……...63

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge No **Sayfa No**

Çizelge 1.1 Bazı tarım ürünlerinin ilk ve son nem değerleri ……..2

Çizelge 2.1 Literatürdeki bazı kuruma modelleri ……..10

Çizelge 4.1 Deneylerdeki ölçme hataları……29

Çizelge 4.2 Belirsizlik analizi için kullanılan değerler…….....30

Çizelge 4.3 Seçilen deney şartları……...33

Çizelge 5.1 Seçilen modellere ait katsayılar ve istatistiksel veriler ……..58

Çizelge 5.2 Seçilen modellere ait katsayılar ve istatistiksel veriler ……...59

Çizelge 5.3 Seçilen modellere ait katsayılar ve istatistiksel veriler ……...60

Çizelge 5.4 Seçilen modellere ait katsayılar ve istatistiksel veriler ……..61

EK-ÇİZELGE

Ek-Çizelge No **Sayfa No**

Ek Çizelge 1. Havanın 50 °C sıcaklık, 0.5 m/s hız ve %10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri ……69

Ek Çizelge 1. Havanın 50 °C sıcaklık, 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri (Devam) ….70

Ek Çizelge 2. Havanın 60 °C sıcaklık, 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri ……71

Ek Çizelge 2. Havanın 60 °C sıcaklık, 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri (Devam) …..72

Ek Çizelge 3. Havanın 70 °C sıcaklık, 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri …….....73

Ek Çizelge 4. Havanın 80 °C sıcaklık, 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri …….74

Ek Çizelge 5. Havanın 60 °C sıcaklık, 1.0 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri……..75

Ek Çizelge 6. Havanın 60 °C sıcaklık, 1.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri ……....76

Ek Çizelge 7. Havanın 60 °C sıcaklık, 2.0 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri …….77

Ek Çizelge 8. Havanın 60 °C sıcaklık, 1.0 m/s hız ve % 5 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri ……....78

Ek Çizelge 9. Havanın 60 °C sıcaklık, 1.0 m/s hız ve % 20 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri …….79

Ek Çizelge 9. Havanın 60 °C sıcaklık, 1.0 m/s hız ve % 20 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri (Devam) …..80

SİMGELER

Simge	Simgenin açıklaması	Birimi
a, b , n	Katsayılar	
DR	Kuruma hızı	gr_{su} / gr_{km} dk
k	Kuruma sabiti	h^{-1} veya s^{-1}
M_k	Ürün içerisindeki kuru madde kütlesi	gr
M_s	Ürün içerisindeki suyun kütlesi	gr
M_o	Başlangıç kütlesi	gr
MR	Nem oranı	
N_o	Ürünün ilk nem içeriği	gr_{su} / gr_{km}
$N_{t+\Delta t}$	Ürünü t+Δt anındaki nem içeriği	gr_{su} / gr_{km}
N_t	Ürünün *t* anındaki nem içeriği	gr_{su} / gr_{km}
N_{yb}	Yaş bazda nem içeriği	%
N_{kb}	Kuru bazda nem içeriği	% veya gr_{su} / gr_{km}
R^2	Korelasyon katsayısı	
RMSE	Hata karelerinin ortalamasının karekökü	
t	Zaman	dk
w_1, w_2, w_3,…, w_n	Hata değerleri	±
w_R	Toplam hata	±
φ	Bağıl nem	%

1. GİRİŞ

Tarım ürünlerinin belirgin özelliklerinden birisi, yılın belirli dönemlerinde ürün elde edilmesidir. Bu dönemlerde yoğun olarak üretilen ürünlerin genellikle çok azı kısa bir zaman içerisinde taze olarak tüketilebilir. Bu nedenle ürünlerin önemli bir bölümünün tüketiciye ulaşana kadar geçecek süre içinde depolanması gerekir. Meyve ve sebzelerin içerdikleri yüksek orandaki su ve bazı organik maddeler, mikrobiyolojik ve kimyasal bozulmalara neden olmaktadır. Ürünlerin hasat edildikten sonra, korunması ve depolanmasında büyük sorunlarla karşılaşılmaktadır. Bu nedenle tüketim fazlası ürünlerin bozularak atılması engellenememektedir. Ülkemizde meyve ve sebze üretiminin artmasıyla ürün özelliklerinin korunması ve kolaylıkla depolanabilmesi için çeşitli işlemler (konserve, dondurma, kurutma vb.) yapılmaktadır. Bu şekilde hasat sonrası oluşan kalite kayıpları azaltılmakta ve insanların tüketimine yeterli miktarda ve yüksek kalitede ürün sunulabilmektedir.

Kurutma, bir madde içerisindeki su veya sıvının uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir. Kurutmada amaç, yaş ürünlerdeki serbest suyu uzaklaştırarak ürünlerde meydana gelebilecek biyokimyasal reaksiyonları ve mikroorganizmaların gelişmesini durdurmak ve üreyemeyeceği bir orana indirerek gıda maddelerinin bozulmadan uzun süre dayanmalarını sağlamaktır. Doğal ortamdaki kurutma uygulamalarında kurumanın uzun sürmesi, ürünün çevresel etkilere açık olması ve besin değerlerinin azalması, ürünlerde kalite ve ekonomik değer kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle kurutma işleminin özel amaçlı yapay kurutucular ile yapılması, hem kuruma süresini kısaltmakta, hem de uzun raf ömrüne sahip daha kaliteli ve temiz ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Kurutma işleminin faydalarını kısaca şöyle sıralayabiliriz;

- Kurutma işlemi tarım ürünlerinin erken hasat edilmesine imkân verir.
- Kurutulmuş tarım ürünlerinde hasat sonrası sahip oldukları nem içeriğinin çok büyük bir kısmı üründen uzaklaştırıldığı için tarım ürünlerinin bozulmadan saklanabilme süreleri oldukça uzamaktadır.

- Kurutulan tarım ürünlerinin ağırlıkları azalıp hacimleri küçüleceği için taşıma masrafları da azalacaktır.
- Kurutma işlemi diğer saklama yöntemlerine göre en ucuz saklama yöntemlerindendir.
- Kuru gıdaların besin ve kalori değerleri aynı miktardaki yaş besinlere göre çok daha yüksektir.
- Kurutulmuş ürünler tüketime daha kolay ve kısa sürede hazırlanır.

Ülkemizde kurutma işlemi uygulanan sebze ve meyveler çok çeşitlidir. Kurutma işleminin uygulandığı bazı sebze ve meyveleri; üzüm, erik, kayısı, dut, vişne, kiraz, elma, armut, incir, fındık, ceviz, patlıcan, biber, fasulye, kabak, maydanoz, nane, kekik, ıhlamur, pirinç ve mısır şeklinde sıralamak mümkündür. Çeşitli tarım ürünleri için kurutma işlemi öncesi ve sonrası nem değerleri Çizelge 1.1' de verilmiştir.

Çizelge 1.1 Bazı tarım ürünlerinin ilk ve son nem değerleri (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	Kayısı	85.3	25
Bamya	81	6	Kekik	72.9	7.5 – 11.4
Bezelye	60–70	5–10	Kiraz	81	30
Biberiye	70	10	Lahana	90–95	5 – 10
Dereotu	70–80	10	Maydanoz	83	12
Domates	93	7	Muz	80	15
Elma	84.8	24	Nane	80	11
Erik	78.7	35	Oğulotu	77	11
Fasulye	60–70	5–10	Patates	77	7
Fesleğen	80	6	Pirekapan	70	10-13
Havuç	80–90	5 – 10	Sarımsak	80	4
Hindistan Cevizi	45–50	5	Soğan	84	6
Hint yerelması	70	15	Şeftali	75–80	20
Hurma	65	40	Üzüm	74-81.6	15–18
Ispanak	80	10	Vişne	83.7	25
İncir	77.5	26	Y.Biber	80	10

Ülkemizin bir tarım ülkesi olması, çok çeşitli meyve ve sebzelerin üretimine imkân vermektedir. Üretilen sebze ve meyveler yaş olarak tüketilebildiği gibi yılın diğer zamanlarında da kullanılmak üzere kurutulmakta ve saklanmaktadır. Ayrıca kurutulmuş ürünlerin ihraç edilmesi ülkemize büyük bir ekonomik kazanç sağlamaktadır. Bu nedenle tarım ürünlerinin kuruma şartlarının belirlenmesi kurutulan ürünün kalitesi ve ekonomisi açısından büyük önem arz etmektedir.

2. KURUTMA TEORİSİ VE KURUTMA YÖNTEMLERİ

Kurutma teriminin en yaygın kullanımı; nem içeren materyallerden çeşitli yöntemlerle suyun uzaklaştırılması işlemidir. Kısaca kurutma, çeşitli materyallerin içerdikleri nem miktarlarının belirli bir seviyeye getirilmesidir.

2.1. Kurutma İşlemi

Kurutma işlemlerinde çevre ortam olarak genelde hava kullanılmaktadır. Kurutma işleminde katı yüzeye ısı transfer edilmekte ve bu ısı kurutulan materyalin gözeneklerinden suyun buharlaşması için harcanmaktadır. Bu nedenle kurutma işlemi ısı ve kütle transferinin eş zamanlı olarak gerçekleştiği bir işlemdir. Bir katı maddenin kuruması esnasında aynı anda iki işlem geçekleşir. Bunlar;

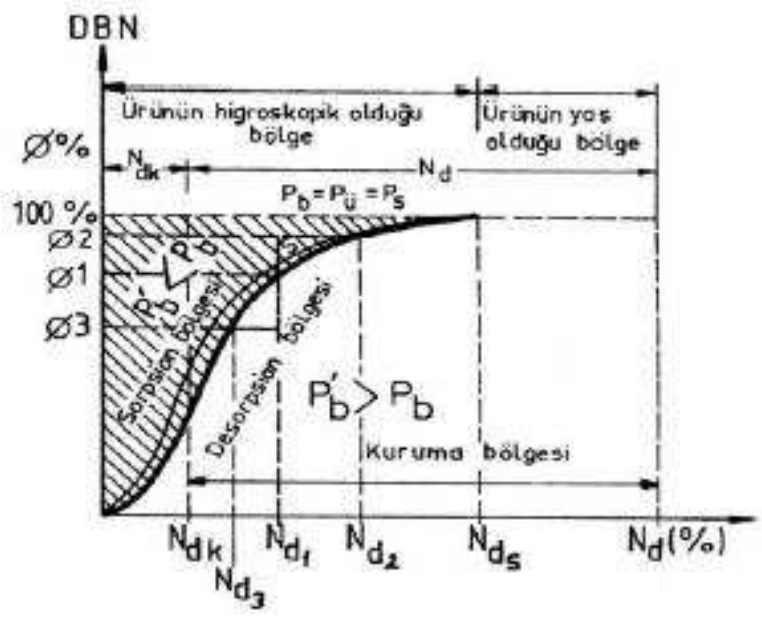
- Sıvının buharlaşması için ısının kurutulan maddeye transfer edilmesi
- İç sıvı ve buhar transferi olarak gerçekleşen kütle transferi

Isı ve kütle transferi işlemlerinin her ikisi de kuruma hızının hesaplanmasında kullanılan etkin faktörlerdir.

2.1.1. Kurumanın Statiği

Kurumanın statiği, kurutma işleminde materyal ve çevre havası arasındaki nem dengesinin zaman dikkate alınmaksızın incelenmesidir. Hava ile kurutulan ürün arasındaki bu nem dengesi materyalin çevre havasına nem vermesi (desorpsiyon) veya materyalin çevre havasından nem alması (sorpsiyon) şeklinde gerçekleşmektedir. Materyal ile çevre havası denge durumuna ulaştığında havada bulunan su buharının kısmi basıncı (P_b), ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar

basıncına ($P_ü$) eşit olmaktadır. Bu nedenle buhar basıncı denge halinde materyalin nem miktarı (N_d), kurutma havasının kısmi buhar basıncına dolayısıyla havanın bağıl nem (φ) değerine bağlıdır. Herhangi bir materyalin sorpsiyon eğrisi kurutma açısından incelendiğinde, sorpsiyon ve desorpsiyon bölgeleri Şekil 2.1' deki gibi belirtilebilir (Yağcıoğlu 1999).

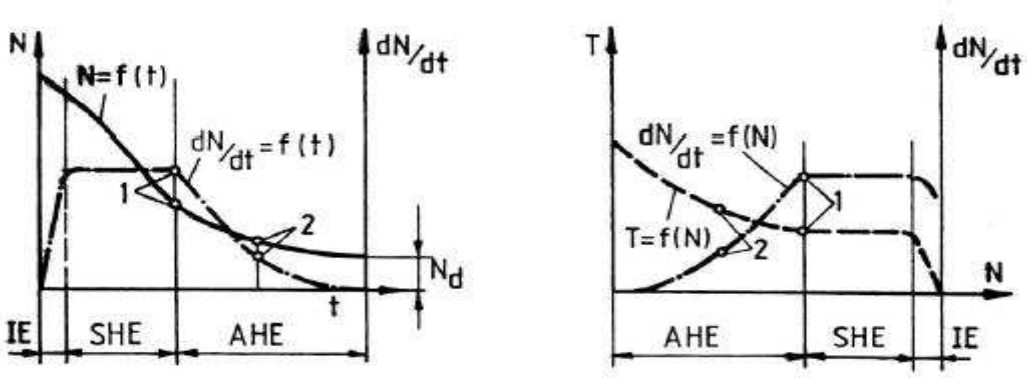


Şekil 2.1 Sorpsiyon eğrisinin kurumanın statiği açısından anlamı (Yağcıoğlu 1999)

Şekil 2.1' deki sorpsiyon eğrisi ile denge bağıl nem (DBN) ekseni arasında kalan her noktada materyalin yüzeyindeki suyun buhar basıncı, havada bulunan suyun buhar basıncından daha küçüktür. Bu nedenle taralı bölge ürünün çevre havasından nem aldığı durumu ifade etmektedir. Tam tersine izoterm eğrisi ile denge nemi (N_d) ekseni arasında kalan bölgede ise ürünün yüzeyindeki suyun buhar basıncı, havanın sahip olduğu suyun buhar basıncından daha büyüktür. Dolayısıyla bu bölgede materyal çevre havasına nem vermekte yani kurumaktadır.

2.1.2. Kurumanın Kinetiği

Kurumanın kinetiği; kurutulacak ürün ile kurutma havası arasındaki nem alışverişinin, kuruma işlemi boyunca geçen zaman dikkate alınarak incelenmesidir. Şekil 2.2' de tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.2 Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri (Yağcıoğlu 1999)

Kuruma işleminin kinetik olarak incelenmesi sırasında aşağıdaki ilişkiler dikkate alınmaktadır.

- 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)

Kuruma işlemi üç ayrı periyotta gerçekleşmektedir. Bu periyotlar;

- Isınma evresi (IE)
- Sabit hızla kuruma evresi (SHE)
- Azalan hızla kuruma evresidir (AHE)

Isınma evresi (IE), kuruma işleminin ilk aşamasıdır. Bu evrede kurutulacak olan ürünün sıcaklığı kurutma havası sıcaklığına ulaşmakta ve bu evrede kuruma hızı hızlı bir şekilde artmaktadır. Kuruma başlangıcında ürünün yüzeyi ince bir su tabakasıyla kaplıdır ve öncelikle bu su tabakası buharlaşmaya başlar. Ürün yüzeyinde bulunan bu su tabakası buharlaşırken sürekli olarak hücre aralarındaki kılcal borulardan beslenmekte ve dolayısıyla sabit bir hızda kuruma (SHE) gerçekleşmektedir. Bu evrede ürünün iç kısımlarından yüzeye sürekli olarak bir nem transferi gerçekleşmekte ve bu nedenle ürünün iç kısımlarındaki nem miktarı giderek azalmaktadır. Ürün iç nemindeki bu azalmadan dolayı bir süre sonra kurumakta olan materyalin yüzeyinden birim zamanda buharlaşarak ayrılan suya eşit miktardaki su ürün yüzeyine taşınamamaktadır. Bu aşamadan sonra ürünün yüzeyinin tamamen su tabakası ile kaplı olma durumu sona ermektedir. Bu andaki ürünün sahip olduğu nem değerine birinci kritik nokta (BKN) denilmektedir.

Birinci kritik nokta değerinden sonra, kuruma eğrisinin eğimi azalan yönde hızla değişim göstermektedir. Bu noktadan itibaren yeni bir kuruma evresine geçilmektedir. Geçilen bu yeni evrede birim zaman aralıklarında buharlaşan su miktarının bir önceki zaman aralığına göre azalma göstermesi nedeniyle, bu evre azalan hızla kuruma evresi (AHE) olarak adlandırılmaktadır.

2.2. Kurutma Prosesindeki Temel İfadeler

2.2.1. Nem içeriği

Nem içeriği, ürün içerisinde bulunan bağlı nemin bir ölçüsüdür. Nem içeriği % yaş baz ve % kuru baz olmak üzere iki şekilde ifade edilmektedir.

% yaş baza göre nem içeriği: $$\%\ N_{yb} = \frac{M_s}{M_s+M_k}\ x100 \quad (2.1)$$

% kuru baza göre nem içeriği: $$\%\ N_{kb} = \frac{M_s}{M_k}\ x100 \quad (2.2)$$

Denklem 2.1 ve 2.2' de bulunan M_s ürün içerisindeki suyun kütlesi, M_k ise ürünün kuru kütlesini ifade etmektedir.

2.2.2. Nem oranı

Ürünün herhangi bir *t* anında sahip olduğu nem içeriğinin (N_t), başlangıç anındaki nem içeriğine (N_o) oranına "Nem oranı (MR)" denilmektedir.

Nem oranı: $$MR = \frac{N_t}{N_o} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

2.2.3. Kuruma hızı

Kurutulan üründeki nem içeriğinin birim zamandaki değişimine "kuruma hızı" denilmektedir. Kuruma hızı denklem 2.4 ile hesaplanmaktadır.

Kuruma hızı: $$DR = \frac{N_t - N_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (2.4)$$

N_t t anı için kuru baza göre nem içeriğini, $N_{t+\Delta t}$ ise $t+\Delta t$ anı için kuru baza göre nem içeriğini ifade etmektedir.

2.2.4. İnce tabaka kuruma modelleri

Tarım ürünlerinin kurutulmasında genellikle azalan hızla kuruma evresi görülmektedir. Kuruma prosesinde azalan hızla kuruma evresinde ürünün içerisinde oluşan nem hareketi Newton'un soğuma yasasına benzetilerek açıklanabilmektedir. Bu yasa, cisim ile çevresi arasındaki sıcaklık farkının çok büyük olmadığı düşünülürse, sıcaklığı sabit kabul edilen bir ortam içine konulan bir cismin sıcaklığındaki değişimin, cisim ve çevre sıcaklıkları arasındaki farkla orantılı olduğunu belirtmektedir (Brooker ve ark. 1974, Hall 1974). Bu ifade;

$$\frac{dT}{dt} = -k\,(T - T_e) \qquad (2.5)$$

şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Nem içeriği sabit kabul edilen bir ortam içinde bulunan herhangi bir materyalin neminde meydana gelen değişim, 2.5 denklemine benzetilerek aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dM}{dt} = -k\,(M - M_e) \qquad (2.6)$$

ya da,

$$\frac{dM}{M - M_e} = -kdt \qquad (2.7)$$

Denklem 2.7 deki diferansiyel eşitlikten MR değeri aşağıdaki gibi bulunur;

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \qquad (2.8)$$

2.8 nolu eşitlikte bulunan "k" kuruma sabitidir ve birimi h^{-1} veya s^{-1} dir. Kuruma sabiti kurutulacak ürün ve kurutma şartlarına göre değişiklik göstermekle birlikte deneysel verilerden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Yarı teorik modeller

içinde en yaygın kullanıma sahip olan 2.8 numaralı eşitlik Newton modeli olarak tanımlanmaktadır. Bu denklem yardımıyla hesaplanan sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, elde edilen değerlerin azalan hız evresinin birinci bölümü ile iyi bir uyum gösterdiği, ancak ikinci bölümde bazı sapmaların ortaya çıktığı görülmektedir (Devahastin 2000). Bu nedenle, kuruma eğrilerini açıklamak için bazı araştırmacılar tarafından yarı teorik ve ampirik modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modellerden bazıları Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Literatürdeki bazı kuruma modelleri

MODEL ADI	MODEL
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Geliştirilmiş Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two Term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Two Term Exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Midilli ve ark.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

2.3. Kurutma Yöntemleri

Kurutulacak ürünlerin farklı özelliklere sahip olması nedeniyle kurutma işlemi de çeşitlilik göstermektedir. Bunun yanında ürünlerin içerdikleri nemi uzaklaştırmanın da farklı yöntemleri bulunmaktadır. Kurutma işleminde genel olarak kullanılan yöntemler başlıklar altında aşağıda verilmiştir.

2.3.1. Morötesi radyasyon kurutma

Morötesi kurutmada elektromagnetik radyasyon kullanılır. Gıda maddeleri ultraviyole radyasyon etkisinde kurutulurlar. Morötesi kurutmanın uygulamada en büyük sorunu yüksek yatırım maliyetidir.

2.3.2. İletimle kurutma

İletimle kurutmada, ısıtılan yüzey, malzeme ile temasta halindedir ve malzemenin aşırı ısınmasını önlemek, ısının homojen bir şekilde transferini sağlamak için gereken önlemler alınmalıdır. İletimle kurutma kağıt ürünlerinin kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.3.3. İnfrared (Kızılötesi) radyant kurutma

Bu kurutma yönteminde termal radyasyon; kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar, elektrikle ısıtılmış yüzeyler tarafından sağlanmaktadır. Bu kurutma yöntemi ince levha yapısındaki malzemelerin kurutulmasında kullanılmaktadır.

2.3.4. Dondurarak kurutma

Dondurarak kurutmada ürün öncelikle dondurulur ve sonrasında kimyasal nem alıcı veya yoğuşturucu ile bağlantılı yüksek vakumlu hacme alınır. Dondurulmuş olan bu malzemeye iletim veya kızılötesi radyasyon ile ısı geçişi sağlanır. Bu esnada su süblimleşir ve yoğuşur ya da nem alıcı tarafından absorplanır. Dondurarak kurutma -l0 °C ile -40°C arasında uygulanır. Bu kurutma yöntemi tıbbı serum ve bakteri kültürlerinin, meyve suyu, sebze ve çeşitli çayların üretiminde kullanılmaktadır.

2.3.5. Vakumda kurutma

Vakumda kurutma suyun düşük sıcaklıklarda buharlaşmasına dolayısıyla daha kısa sürede, daha düşük sıcaklıklarda kurutma işleminin yapılmasına imkan vermektedir.

2.3.6. Karıştırmalı yatakta kurutma

Bu tip kurutma sistemlerinde kurutulan ürünlerin sürekli veya belirli aralıklarla titreştirilmesi çeşitli raf veya konveyörlerle sağlanmaktadır. Bu şekilde daha üniform bir kurutma işlemi yapılabilmektedir.

2.3.7. Akışkan yataklı kurutma

Akışkan yataklı kurutma sisteminde, tanecik yapısındaki kurutma ürünü arasından kurutma havası geçirilmektedir. Akışkanlaştırılmış yatakta gaz hızı çok dikkatli ayarlanmalıdır. Bu sistemlerde kurutma havası ve tanecikler arasında ısı transferi çok daha etkin bir şekilde gerçekleştiğinden kuruma işlemi çok daha etkin ve homojen olarak gerçekleşmektedir.

2.3.8. Flaş kurutma

Flaş kurutmada çok küçük yapıdaki malzemeler sıcak hava akımında dağıtılmaktadır. Bu kurutma türünde kurutma işlemi saniyeler içinde tamamlanmaktadır. Flaş kurutmanın sentetik, reçine, gıda ürünleri üretiminde uygulama örnekleri vardır.

2.3.9. Tünel kurutma

Tünel kurutuculardа kurutma ortamı olarak kullanılan sıcak hava fan yardımıyla sistemde dolaştırılır. Ürün raf veya bantlar üzerinde kurutulur. Hava akımı, kurutma ürünü ile paralel, zıt akışlı veya her ikisinin birlikte uygulaması olarak sistemden geçirilir. Tünel kurutuculardа değişik hava hız ve yönü, sıcaklık, nem uygulamaları mümkündür.

2.3.10. Püskürtmeli kurutma

Püskürtmeli kurutucular genellikle süt tozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılır. Kurutma süreleri 5-10 saniye arasında değişmektedir. Bu sistemlerde sıcak kurutma ortamına, ürün bir püskürtücü yardımıyla gönderilir. Giriş havası sıcaklıkları oldukça yüksektir. Kuruma süresinin çok kısa olması nedeniyle ısıya duyarlı malzemelerin kurutulması için de uygundur.

2.3.11. Dielektrik kurutma

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

2.3.12. 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 seklindeki ince

malzemelere uygulanır. Sistemi çalıştırmak için gerekli emniyet önlemleri mikro dalga kurutmayı, dielektrik kurutmaya göre daha pahalı hale getirir.

2.4. Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler

Kuruma hızı; kurutma havasının sıcaklığı, nemi, akış hızı, kurutulacak malzemenin yüzey alanı ve kalınlığı gibi dış etkilere, madde yoğunluğunun ve kimyasal yapının su (nem) difüzyonuna etkisi gibi iç etkilere bağlıdır.

Hava sıcaklığının yükselmesi, kurutma havasından ürüne olan ısı transferini arttırmakta ve bunun sonucunda yüksek buharlaşma hızları oluşmaktadır. Dolayısıyla kurutma havasının sıcaklığının yükselmesi ile malzeme içindeki nem daha kolay ve hızlı bir şekilde yüzeye ulaşmaktadır.

Yüksek kurutma hızları, kurutma havasındaki nem miktarının en az olduğu durumlarda elde edilebilmektedir. Herhangi bir sıcaklıkta havanın içinde bulundurduğu su miktarının artması havanın buhar basıncını arttırmakta ve dolayısıyla ürün yüzeyinden buharlaşmayı zorlaştırmaktadır.

Kurutma havası hızının yükselmesi, havadan nemli yüzeye olan ısı transferini arttırmakta ve buharlaşmayı hızlandırıcı etki yapmaktadır. Kuruma hızı, ürün parçacıklarının yüzey alanı ile doğru, kalınlıklarıyla ters orantılıdır. Bu nedenle kurutulacak maddeler ne kadar küçük parçalara ayrılırlarsa yüzey alanları o derece artacak ve kalınlıkları azalacak, dolayısı ile daha hızlı bir kuruma gerçekleşecektir.

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Doğantan ve Tuncer (1988), kırmızıbiberin karakteristik kuruma özelliklerinin belirlemek için bir çalışma yapmışlar, ayrıca üreticilerin kolayca imal edip kullanabileceği bir biber kurutucusu tasarlamışlardır. Bölgenin koşulları dikkate alınarak, güneş enerjisinden yararlanılması yoluna gidilmiş, kurutma masrafları az, maliyeti ucuz, taşınabilir bir kurutucu tipi geliştirilmiş ve uygulamadaki geçerliliğini araştırılmıştır. Araştırmacılar, geliştirdikleri kurutucu ile yaptıkları denemeler sonucunda, biber için ideal kurutma sıcaklığını 55 ^{o}C, bunun yanında özellikle biberlerin kurutma öncesi kesilerek kurutulmasıyla, kurutma süresinde % 60 oranında bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir.

Vagenas ve Marinos (1991), tarafından yapılan bir çalışmada, 40 ve 60 ^{o}C kurutma havası sıcaklığı, 0.5 ve 1.0 m/s hava hızı şartlarında; ön işlem, sıcaklık ve hızın kayısı kurutulmasına etkileri incelenmiştir. Örneklerin bir kısmı 80 ^{o}C sıcaklıkta % 0.5’ lik NaOH solüsyonuna 30 saniye süreyle daldırılmış, bir kısmı da ön işlemsiz olarak uygulamaya alınmıştır. Araştırma sonuçlarına göre; kurutma havası sıcaklığının artması ile gerekli kurutma süresinin azaldığı ve kuruma hızının daha yüksek olduğu, kayısıların ortadan ikiye bölünerek kurutulması durumunda ön işlemin kurutma süresine etkili olmadığı belirlenmiştir.

Zhang ve Litchfield (1991), mısır ön kurutma ve kurutma proseslerini incelemek için ince tabakalı kurutucu tasarlamışlardır. Kuruma hızı ve enerji verimliliği dikkate alınarak denemeler yapılmıştır. Çalışmanın sonunda yüksek kuruma hızı elde etmek için, aralıklı olarak yani ön kurutma, tavlama, son kurutma uygulanmasının en uygun yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Kachru ve Singh (1994), ön işleme tabi tutulmuş (çizme ve ıslatma) yeşil fasülyelerin farklı kurutma havası sıcaklığı ve hava hızlarında kurutma karakteristiklerini incelemişlerdir. Kurutma havası sıcaklıkları 20-55 ^{o}C, hava hızları

ise 0.8-2.0 m/s arasında seçilmiştir. Araştırma sonuçları, yeşil fasulyelere kurutma öncesi ön işlem uygulamanın, kurutma zamanını önemli oranda azalttığı ve ön işleme tutulmuş fasulyelerin nem içeriğini %55'den %10'a indirmek için ortalama 6 saat süre gerektiğini göstermiştir.

Madamba ve ark. (1996), tarafından yapılan bir çalışmada, kurutma havası sıcaklığı 50 – 90 ^{o}C, bağıl nemi % 8 – 24 ve hızı 0.5 – 1.0 m/s olarak alınmış, dilim kalınlığı 2 – 4 mm arasında değiştirilerek sarımsağın kurutma karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlara göre; özellikle düşük bağıl nem değerlerinde, sıcaklık ve dilim kalınlığının kurutma için önemli faktörler olduğu, hava hızının ise önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Ratti ve Mujumdar (1997), yaptıkları çalışmada silindir şeklinde dilimlenmiş havuç ve elmaları kurutarak kurumayı tanımlayan bir model geliştirmişlerdir. Bu model ile yapılan hesaplamalardan elde ettikleri sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Sarsavadia ve ark. (1999), yaptıkları çalışmada çapları 55 ile 70 mm arasında değişen beyaz soğanları 50, 60, 70 ve 80 ^{o}C sıcaklık, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1.0 m/s hava hızı ve % 10, 15 ve 20 bağıl nem koşullarında kurutmuş ve bu parametrelerin kurumaya etkilerini incelemişlerdir. Kurutma havası sıcaklığının artması ile kurutma için gerekli sürenin azaldığı, kuruma hızının yüksek sıcaklıklarda ve kurumanın başlangıcında fazla olduğu, kuruma işleminin ilerlemesi ile azaldığı, kurutma havası hızının ve havanın mutlak neminin artması ile kurutma işleminin daha kısa sürede tamamlandığı tespit edilmiştir.

Yağcıoğlu ve ark. (1999), yapmış oldukları çalışmada; farklı kurutma durumlarında defne yaprağının kuruma karakteristiklerini incelemişlerdir. Geleneksel güneşte kurutma metodunda uygun olmayan hava koşulları ile karşılaşıldığını, kayıpların meydana geldiğini ve ayrıca uzun kuruma zamanı gibi durumların ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Kontrollü koşularla kurutmanın geleneksel kurutmaya göre birçok problemi ortadan kaldırdığını gözlemlemişler ve 50 ^{0}C ya da 60 ^{0}C sıcaklıkta

kurutma ile defne yapraklarının temel yağ bileşim miktarları ve kalitesinde bir kayıp olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca yaprakların % 10 nem içeriğine kadar kurutma zamanının, geleneksel kurutmaya göre 120 kez ve 40 ^{0}C sıcaklıkta kurutma şartlarına göre 8 kez daha kısaldığını ve hiçbir kayıp olmadığını ifade etmişlerdir.

Midilli (2001), çalışmasında kabuklu ve kabuksuz fıstık örnekleri için, güneş enerjisi destekli ve güneşte kurutma deneyleri yapmıştır. Güneş enerjisi destekli konvektif kurutucudaki kurutma işleminde kabuklu ve kabuksuz fıstıkları 40 ^{0}C sıcaklıkta 6 saatte tam olarak kuruduğunu gözlemlemiştir. Güneş altında kurutulan fıstık örneklerinin ise 24 ^{0}C sıcaklıkta çok daha uzun bir zamanda kuruduğunu ve çevresel etkilere maruz kaldığını belirtmiştir.

Maskan (2001), kivi meyvesinin sıcak hava ve mikrodalga ile kurutulması esnasındaki renk değişimini incelemiştir. Sıcak hava ile kurutmanın, sıcak hava - mikrodalga ve mikrodalga kurutmaya göre en az renk değişimine neden olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca sadece mikrodalga ile kurutma yapıldığında ürün renginin kahverengiye yaklaştığını belirtmiştir.

Akpınar ve Biçer (2003), kabağın kuruma davranışını siklon tipi bir kurutucuda deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, 60, 70 ve 80 ^{o}C' lik üç farklı hava giriş sıcaklığı ve 1.0 ve 1.5 m/s'lik hava hızları seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre, siklon tipi kurutucuda dönel akış ortamında kurutulan kabak örneklerinin kuruma hızının yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek kuruma hızı 80 ^{0}C kurutma havası giriş sıcaklığında ve 1.5 m/s kurutma havası hızında, en düşük kuruma hızı ise 60 ^{0}C kurutma havası giriş sıcaklığında ve 1.0 m/s kurutma havası hızında elde etmişlerdir. Farklı giriş sıcaklıklarında ve hızlarında kurutulan örneklerde kuruma hızına, hava hızından çok hava sıcaklığının etkisinin daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Velic, Planinic, Tomas ve Bilic (2004), tasarladıkları deney seti ile konveksiyon tipi bir kurutucuda elma için kurutma havası hızının etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar 0.64, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 2.75 m/s kurutma havası hızı ve 60 ^{o}C sabit kurutma havası sıcaklığında deneyler yaparak kurutma havası hızının kuruma karakteristiğine etkisini incelemişlerdir.

Saçılık ve Eliçin (2006) çalışmalarında organik elmanın ince tabaka kuruma karakteristiklerini belirlemek için konveksiyon tipi bir kurutucu tasarlamış ve imal etmişlerdir. Araştırmacılar 0.8 m/s sabit hava hızında ve 40, 50, 60 ^{o}C hava sıcaklığında deneyler yaparak elmanın kuruma davranışlarını incelemişlerdir. Düşük sıcaklıktaki elma kurutmasının ürünün renk ve kalitesi açısından daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Ceylan, Aktaş ve Doğan (2007) araştırmalarında ısı pompalı bir kurutucu tasarlamışlar ve çeşitli tropik meyveler (kivi, avokado, muz) için kuruma deneyleri yapmışlardır. Deneylerde kurutma havası sıcaklığını 40 ^{o}C de sabit tutmuşlar ve 0.03 m/s – 0.39 m/s hava hızında denemeler yapmışlardır. Araştırma sonucunda Page Modelinin yapılan deneyler için en iyi kurutma modeli olduğuna ve tropik meyve kurutmak için ısı pompalı kurutucuların uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Prachayawarakorn, Tia, Plyto ve Soponronnarit (2008) çalışmalarında muz dilimlerinin yüksek sıcaklıktaki kuruma karakteristiklerini belirlemek ve yüksek sıcaklığın ürün kalitesine etkisini araştırmak için; elektrikli ısıtıcı, santrifuj fan ve kurutma tepsisinden oluşan bir deney seti kurmuşlardır. Kurutma havasının 110, 120, 130 ve 140 ^{o}C sıcaklığı ve 0.9 m/s sabit hızıda denemeler yaparak yüksek sıcaklığın muzun yapısında ne gibi değişiklikler meydana getirdiğini elektron mikroskobu yardımıyla fotoğraflayarak incelemişlerdir.

Kaya, Aydın ve Dinçer (2008) yaptıkları çalışmada kivi meyvesinin kuruma anındaki kütle ve ısı transferini incelemişlerdir. Bu çalışma için laboratuvar şartlarında çalışacak, hava sıcaklığının, hızının, ve bağıl neminin kurutma işlemine etkilerini inceleyebilecekleri bir kurutucu tasarlayıp imal etmişler ve 25, 30, 40, 50 ve 60 ^{o}C kurutma havası sıcaklığı, 0.3 m/s, 0.6 m/s, ve 0.9 m/s hava hızı ve % 25, 40, 55 ve 70 kurutma havası bağıl neminde denemeler yapmışlardır.

Aktaş, Ceylan ve Yılmaz (2009) çalışmalarında elmanın kuruma karakteristiklerini ısı pompalı ve güneş tipi kurutucuda incelemek için deneysel kurutucular tasarlamışlar ve denemeler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda ısı pompalı kurutucunun ve güneş enerjisi destekli kurutucunun diğer sistemlerle birlikte kullanılmasının ekonomik açıdan önemli olduğunu belirtmişlerdir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Deneylerde kullanılan ürün

Deneylerde latince adı “Actinidia chinensis” olan ve Türkiye’de son yıllarda Artvin, Yalova, Adapazarı, Rize, Antalya civarında yetiştirilmeye başlanılan “kivi” meyvesi kullanılmıştır. Kivi bitkisinin bitki dalındaki yapısı Şekil 4.1’ de görülmektedir. Kivi oldukça fazla potasyum, lif ve E vitamini içermektedir. A ve C vitaminleri ile potasyum açısından çok zengin bir meyve olan kivi, ayrıca kalsiyum, demir ve magnezyum gibi mineraller açısından da zengindir. Besleyici değeri yüksek olan kivinin bir tanesi ile günlük A ve C vitamini ihtiyacı karşılanabilmektedir.



Şekil 4.1 Deneylerde kullanılan kivi meyvesi

4.1.2. İlk nem tayin cihazı

Kivi içerisinde bulunan suyun (nemin) tespiti için Precisa marka ve XM 60 model halojen ısıtmalı bir nem tayin cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.2’ de nem tayin cihazının genel görünümü verilmiştir. Cihaz maksimum 124 gr kapasitede ve 0.001 gr hassasiyetinde, 30 ^{o}C ile 230 ^{o}C arasında çalışmaktadır.



Şekil 4.2 Nem tayin cihazının genel görünümü

4.1.3. Ağırlık ölçümünde kullanılan tartım cihazı

Deneyler esnasındaki ağırlık ölçümünde, “JADEVER” marka SKY 300 model maksimum 300 gr kapasiteli ve 0.01 gr hassasiyetindeki dijital ağırlık ölçüm cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.3’ de ağırlık ölçümünde kullanılan dijital terazi görünmektedir.

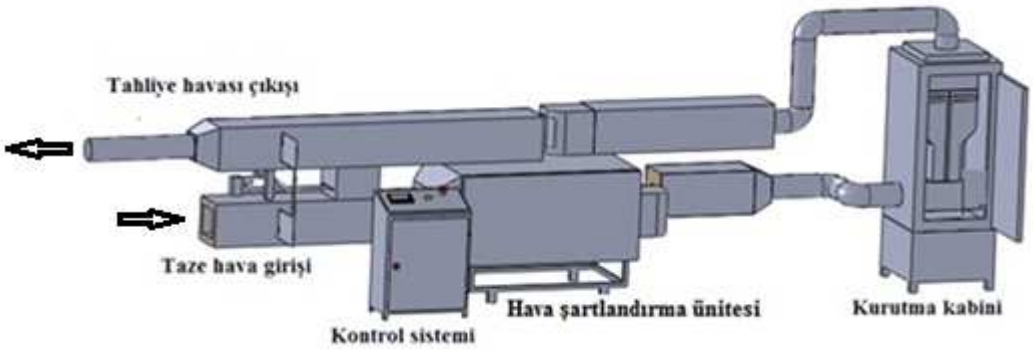


Şekil 4.3 Deneylerde kullanılan dijital terazi

4.2. Yöntem

4.2.1. Deney seti

Kivi meyvesinin kuruma karakteristiklerini belirlemek amacı ile Selçuk Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümünde laboratuvar şartlarında imalatı yapılan konveksiyon tipi kurutma deney seti kullanılmıştır. Deney setinin Solidworks programı ile çizilmiş olan tasarım resmi Şekil 4.4'de, imal edildikten sonraki görünümü ise Şekil 4.5' 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. Deney seti ile taze hava -5 ^{o}C / +100 ^{o}C sıcaklık, 0-5 m/s hız ve % 2-70 bağıl nem değerleri arasında istenilen ölçüde şartlandırılmakta ve kabin içindeki ürüne üflenmektedir.



Şekil 4.4 Kurutma deney seti



Şekil 4.5 Deney setinden bir görünüm

Tarım ürünlerinin kuruma karakteristiklerinin incelendiği çalışmalarda genellikle, kurutma havasının sıcaklık ve hız değerlerinin, ürünün geometrik şeklinin ve boyutunun kurumaya etkilerinin araştırıldığı görülmektedir. Tasarlanan deney seti ile belirtilen parametrelere ek olarak havanın bağıl nemi de hassas olarak kontrol edilebilmektedir. Söz konusu parametreler değiştirilerek yapılan deneyler sonucunda kivi meyvesinin kuruma karakteristikleri ve her bir parametrenin ürünün kuruma davranışına etkisi daha hassas olarak belirlenmiştir. Deney setini oluşturan üniteler ve cihazlar aşağıda özellikleriyle birlikte verilmektedir.

Fan

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 laboratuar dışına tahliye etmektedir. Bu sayede kurutma havasının kabin içinde yığılması önlenmekte ve sistemin her noktasında hava akışının, sıcaklık ve nem dağılımının düzgün olması sağlanmaktadır.

Damper

Taze hava ile egsoz havasını istenilen oranlarda karıştırmak için iki adet damper kullanılmıştır. Kullanılan damperler, PLC kontrol sistemi ile kontrol edilerek istenilen hava karışımına göre açılıp kapanabilmektedir.

Isıtıcı

Kabin içinde hava sıcaklığı en fazla 100 ^oC olacak şekilde ısıtıcı kapasitesi hesaplanmış ve 8 kW'lık ve oldukça sık aralıklı kanatlı bir elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır.

Soğutma sistemi

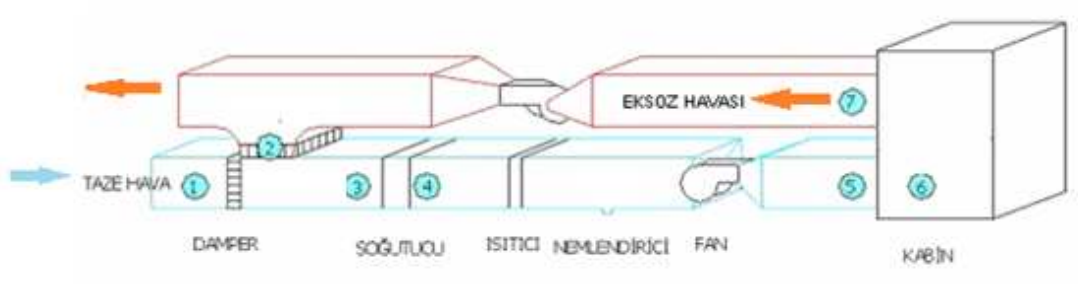
Deney setinde soğutma sistemi hem duyulur soğutma, hem de soğutarak kurutma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Duyulur ısıtma esnasında havanın bağıl nemi azalırken, soğutulan havanın bağıl nemi ise yükselmektedir. Düşük sıcaklık ve düşük bağıl neme sahip kurutma havası istendiği takdirde, sadece duyulur 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. Deney setinde kullanılan soğutma grubu için yaklaşık 3 hp (2.26 kW) gücünde kompresör kullanılmıştır.

Nemlendirme ünitesi

Herhangi bir sıcaklıkta kurutma havasının bağıl nemi, istenilen değerden düşük ise nemlendirme ünitesi havaya nem vererek bağıl nemi istenilen düzeye yükseltmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda 6 kg/h kapasitede buhar verebilen bir nemlendirme ünitesi seçilmiştir.

Ölçme cihazları ve otomatik kontrol sistemi

Sistemde dolaşan kurutma havasının sıcaklık, hız ve bağıl nem değerlerini ölçmek için deney setinin bazı noktalarına ölçme elemanları yerleştirilmiştir. Ölçülen değerler kontrol paneli aracılığı ile bir ekrandan takip edilmekte ve istenilen zaman aralıklarında kaydedilebilmektedir. Deney seti üzerinde ölçme elemanlarının yerleştirildiği bölgeler Şekil 4.6’ da görülmektedir.



Şekil 4.6 Deney seti üzerinde ölçme elemanlarının yerleşimi

Deney setinin 1 noktasında sisteme giren taze havanın sıcaklık, hız ve bağıl nemi, 2 noktasında kabinden çıkan havanın hızı, 3 noktasında karışım havasının sıcaklığı ve bağıl nemi, 4 noktasında havanın soğutucu çıkışındaki sıcaklığı, 5 noktasında havanın kabin girişindeki sıcaklığı, hızı ve bağıl nemi, 6 noktasında kabinde ürüne üflenen kurutma havasının sıcaklığı ve bağıl nemi, 7 noktasında egsoz havasının sıcaklığı ve bağıl nemi ölçülmektedir.

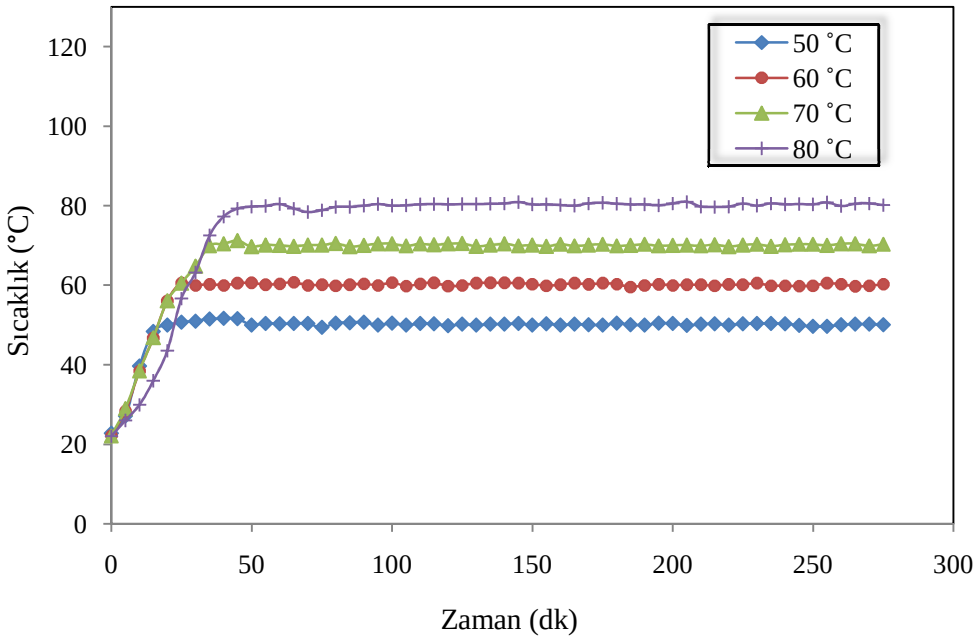
Kabin

Ürünler belirli zaman aralıklarında ağırlık ölçümü için tepsiyle birlikte kabinden alınmaktadır. Kabinin kapağı açıldığında oluşacak kayıpları azaltmak için sistemdeki kanal aynı boyutta kabin içerisinden de geçirilmiştir. Kanal kabin içerisinde eşit boyutlarda ikiye ayrılarak her bir kanala ürünlerin tepsi ile konulacağı çekmece sistemi yapılmıştır. Çekmeceler kanal ile aynı ölçülerde ve 20x20 cm boyutlarındadır. Ağırlık ölçümü için ürün tepsiden alınana kadar kabinin kapağı açıldığında oluşacak kayıplar böylece önlenmiş olmaktadır. Ayrıca iki ayrı tepside bulunan ürünler birbirlerinden etkilenmeden aynı sıcaklıktaki ve bağıl nemdeki hava ile kurutulabilmektedir.

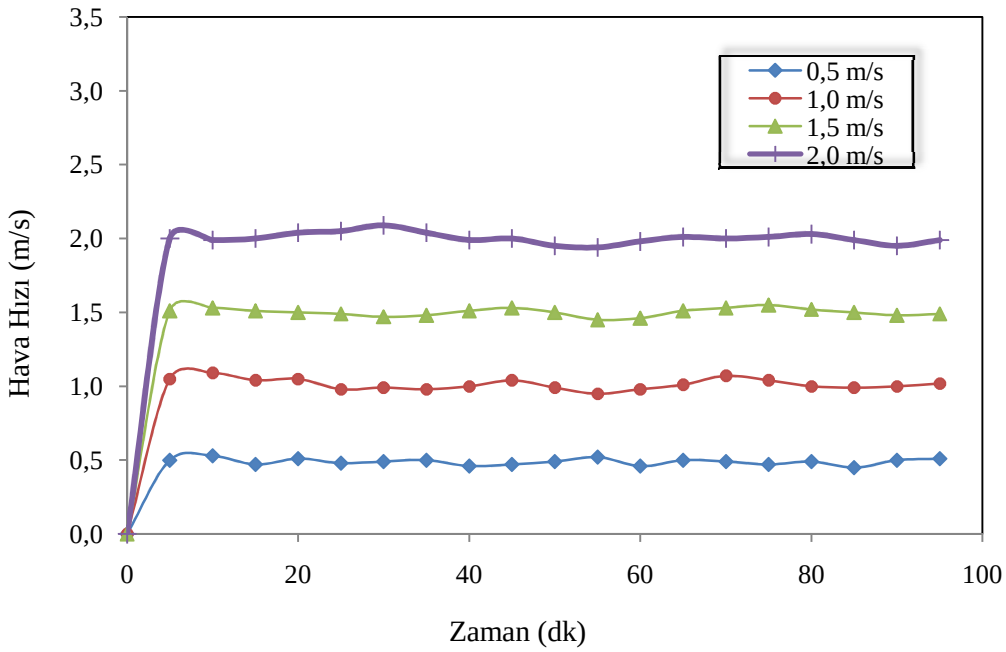
4.2.2. Deney setinin hassasiyeti ve belirsizlik analizi

Deney setinin hassasiyeti

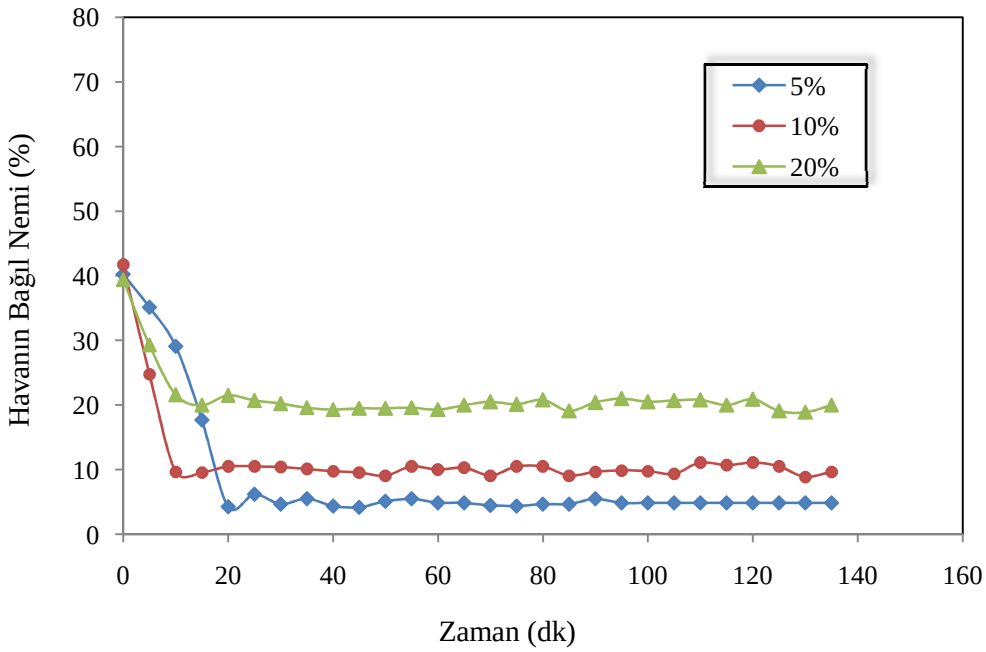
Deneyler süresince kabinde ölçülen sıcaklık, hız ve bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.7 Kurutma havası sıcaklığının zaman ile değişimi



Şekil 4.8 Kurutma havası hızının zamanla değişimi



Şekil 4.9 Kurutma havası bağıl neminin zamanla değişimi

Ürünlerin üzerine üflenen havanın sıcaklığı ± 0.33 ^{o}C, hızı ± 0.26 m/s, bağıl nem değeri ise ± 0.54 hassasiyetinde ölçülmüştür. Tüm deneylerde ürüne üflenen havanın istenilen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin belirtilen hassasiyetlerde sağlanması, tasarlanan deney setinin hava akış düzeninin, ısı yalıtımının, sızdırmazlığın ve otomatik kontrol sisteminin sağlıklı çalıştığını göstermektedir.

Belirsizlik analizi

Herhangi bir deneyde, farklı bağımsız değişkenlerden dolayı ortaya çıkan w_R belirsizliği eşitlik 4.1'deki gibi yazılabilir (Genceli 2005).

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \ldots\ldots\ldots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \qquad (4.1)$$

Yapılan deneylerdeki hatalar kurutma havasının, sıcaklık, hız ve bağıl neminin ölçülmesinden ve ayrıca kurutulacak ürünlerin ağırlıklarının ve ilk neminin ölçülmesinden kaynaklanmaktadır. Ölçümde kullanılan cihazlardan ve okumadan kaynaklanan hata değerleri ile denklem 4.1' den hesaplanan toplam hata değerleri Çizelge 4.1 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Deneylerdeki ölçme hataları

Hatanın kaynağı	Cihazdan kaynaklanan hata	Okumadan kaynaklanan hata	Birim	Toplam hata
Sıcaklık ölçümü	± 0.02	± 0.01	°C	± 0.022
Hava hızının ölçümü	± 0.1	± 0.1	m/s	± 0.140
Bağıl nem ölçümü	± 0.5	± 0.01	% RH	± 0.500
Ürün ilk nem ölçümü	± 0.001	± 0.0001	gr	± 0.001
Ağırlık ölçümü	± 0.01	± 0.01	gr	± 0.014

Deneylerde hesaplanan nem oranı (MR) ve kuruma hızı (DR) değerleri için yapılan örnek belirsizlik analizi sonuçları Çizelge 4.2’ de verilmektedir. Çizelge 4.2’ ye göre nem oranı (MR) değerinin hesabındaki belirsizlik % ± 0.0792 olurken, kuruma hızı (DR) değerinin hesabındaki belirsizlik % ± 0.0666 olmaktadır.

Çizelge 4.2 Belirsizlik analizi için kullanılan değerler

		Birim
M	32,07 ± 0,01	gr
M0	67,22 ± 0,01	gr
Mk	9,24 ± 0,01	gr
Mt	32,07 ± 0,01	gr
Mt+Δt	26,7 ± 0,01	gr
N	2,47	gr_{su} /gr_{km}
N0	6,273	gr_{su} /gr_{km}
Nt	2,47	gr_{su} /gr_{km}
Nt+Δt	1,88	gr_{su} /gr_{km}
Δt	15 ± 0,0003	dk

4.2.3. Kurutulacak kivi örneklerinin hazırlanması

Deneylerde kullanılacak kiviler yerel bir marketten alındıktan sonra en az 24 saat boyunca + 4 ^{o}C deki buzdolabında saklanmıştır. Daha sonra buzdolabından alınan meyveler laboratuvar ortam sıcaklığına erişinceye kadar yaklaşık 2 saat boyunca ortamda tutulmuş ve ortamla ısıl dengeye gelmesi sağlanmıştır. Böylece her deneyden önce kivi örnekleri için aynı başlangıç şartları gerçekleştirilmiştir. Kivi meyvesi mekanik kesiciler yardımıyla önce soyulmuş ve daha sonra 4 mm ve 6 mm kalınlıklarında dilimlenerek deneylere hazırlanmıştır. Şekil 4.10’ da deney örneklerinin kurutulmadan önceki görünümü verilmiştir.



Şekil 4.10 Deney örneklerinin kurutulmadan önceki görünümü

4.2.4. İlk nemin belirlenmesi

Deney örneklerinden alınan yaklaşık 20 gr ağırlığındaki örnekler nem tayin cihazına konularak 105 ^{o}C kurutulmuştur (Yağcıoğlu 1999). Kurutma işlemi boyunca üründeki ağırlık değişimleri 1 saat arayla kayıt edilmiştir. Son iki ölçüm arasındaki fark % 0.05 oluncaya kadar kurutma işlemi devam etmiştir. Kurutma işlemi üç kez tekrar edilerek belirlenen bağıl nem değerlerinin ortalaması alınmıştır. Deneylerin her biri yaklaşık 47 saat sürmüş ve yapılan ölçümler sonunda kivi meyvesinin ilk nemi yaş bazda % 86.25 olarak hesaplanmıştır. Kuru bazda ise kivinin ilk nemi 6.273 gr_{su} / gr_{km}' dir. Nem tayini yapılan kivi örneklerinin işlem sonundaki görünümleri Şekil 4.11' de görülmektedir.



Şekil 4.11 Nem tayini yapılmış kivi örneklerinin görünümü

4.2.5. Deneylerin yapılışı

Kivi meyvesinin kuruma karakteristiklerinin incelendiği deneyler üç başlık altında gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırası ile;

- Kurutma havası sıcaklığının kurumaya etkisi,
- Kurutma havası hızının kurumaya etkisi,
- Kurutma havası bağıl neminin kurumaya etkisi,

şeklindedir.

Deneyler alt ve üst tepsilerde ve 4 mm ile 6 mm dilim kalınlığı için yapılarak aynı anda alt ve üst tepsi kullanımının ve dilim kalınlığının kurumaya etkileri de araştırılmıştır. Sistem çalıştırılıp istenilen kurutma havası özelliklerinde rejime girdikten sonra tepsilerin boş ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra hazırlanan deney örnekleri alt ve üst tepsilere yerleştirilerek başlangıç ağırlıkları kayıt edilmiş ve kurutma kabinindeki çekmecelere yerleştirilerek deneye başlanmıştır. Her 15 dakikada bir tepsiler kurutma kabininden alınarak ağırlıkları ölçülmüştür. Tepsilerin

kabin dışına çıkarılmaları esnasında özelliklerinin bozulmaması için ölçüm işlemi toplam 20 saniyede tamamlanmıştır. Her bir deney üç kez tekrar edilmiş ve ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. Yapılan deneylerdeki kurutma havasının özellikleri Çizelge 4.3 ‘ de verilmektedir.

Çizelge 4.3 Seçilen deney şartları

Deney No	Kurutma Havası Özellikleri			Ürün dilim kalınlığı (mm)
	Sıcaklık (°C)	Bağıl nem (%)	Hava hızı (m/s)	
1	50	10	0.5	4
2	60	10	0.5	4
3	70	10	0.5	4
4	80	10	0.5	4
5	50	10	0.5	6
6	60	10	0.5	6
7	70	10	0.5	6
8	80	10	0.5	6
9	60	10	1.0	4
10	60	10	1.5	4
11	60	10	2.0	4
12	60	10	1.0	6
13	60	10	1.5	6
14	60	10	2.0	6
15	60	5	1.0	4
16	60	20	1.0	4
17	60	5	1.0	6
18	60	20	1.0	6

Kurutulan kivi dilimlerinin deneyler sonrasındaki görünümleri Şekil 4.12 ‘de verilmiştir.



Şekil 4.12 Deney örneklerinin kuruduktan sonraki görünümleri

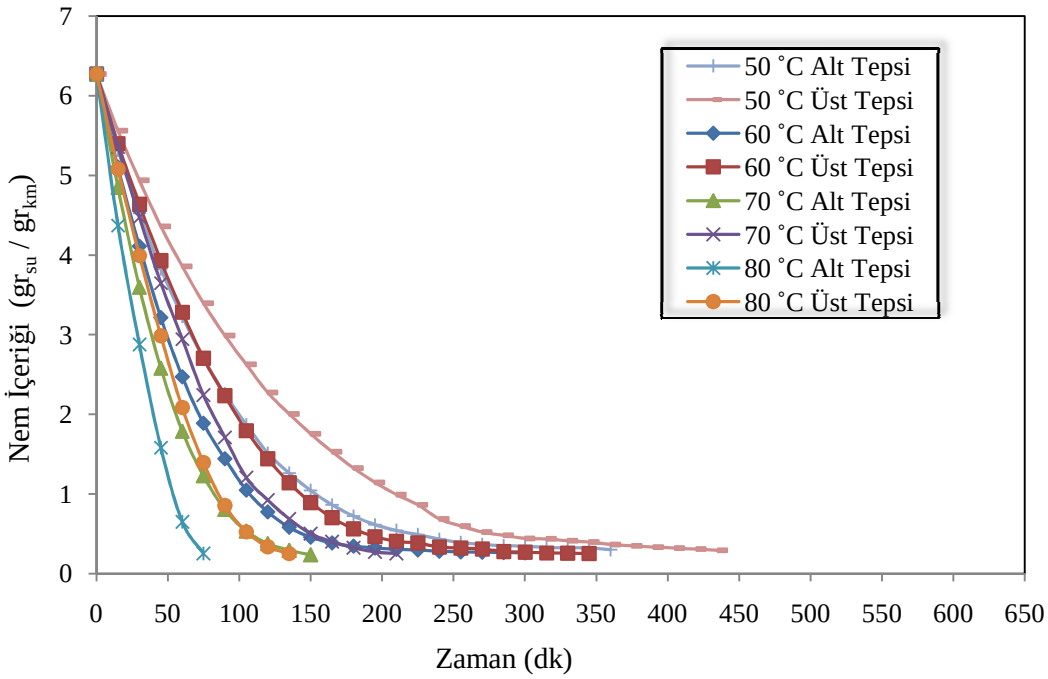
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Kivi meyvesi için kurutma havası sıcaklığının 50, 60, 70, 80 °C, hızının 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s ve bağıl neminin % 5, % 10, % 20 değerlerinde deneyler yapılarak her bir parametrenin kurumaya etkileri incelenmiştir. Ölçülen ağırlıklara göre bulunan nem oranı (MR) değerlerine seçilen kurutma modelleri uygulanarak kuruma sabitleri ve korelasyon katsayıları (R^2) hesaplanmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak en uygun model için MR grafikleri çizilmiştir.

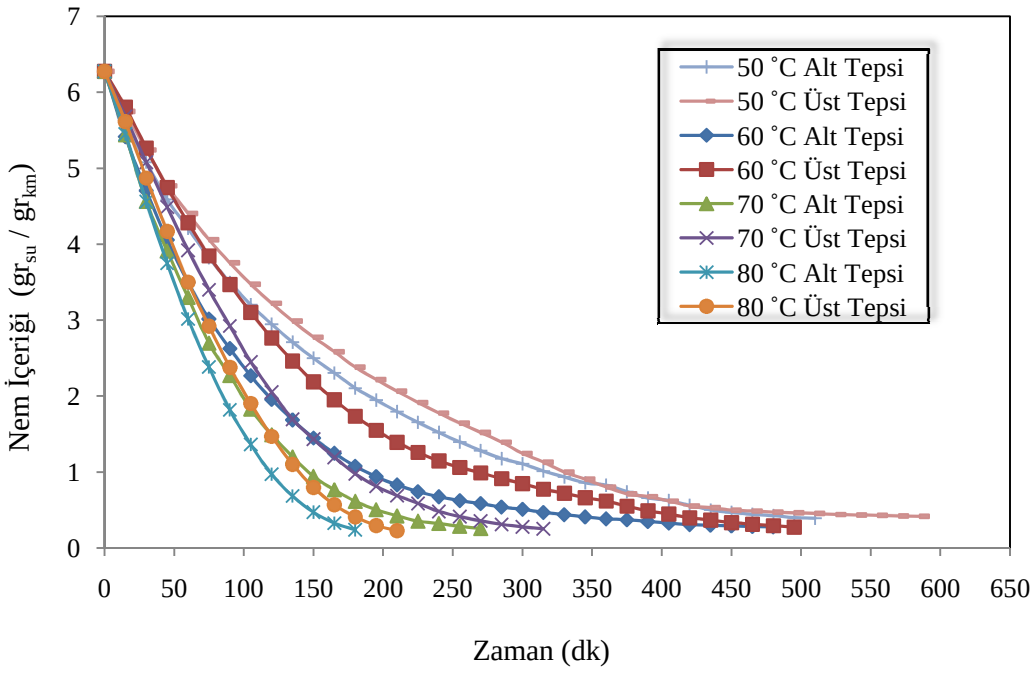
5.1. Kurutma Havası Sıcaklığının Kurumaya Etkisi

Kivi kurutma deneyinde kurutma havası sıcaklığının kurumaya etkisini incelemek amacıyla kurutma havasının 0.5 m/s hızı ve % 10 bağıl neminde 50, 60, 70, ve 80 °C sıcaklıklar için denemeler yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda elde edilen nem içeriği (N_{kb}) değerleri Ek Çizelge 1, 2, 3 ve 4'te verilmiştir. Çizelgelerin grafikler halindeki gösterimleri 4 mm dilim kalınlığı için Şekil 5.1' de, 6 mm dilim kalınlığı için ise Şekil 5.2' de görülmektedir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' de sıcaklığın kurumaya etkisi yaş bazda % nem içeriği (% N_{yb}) cinsinden verilmiştir.

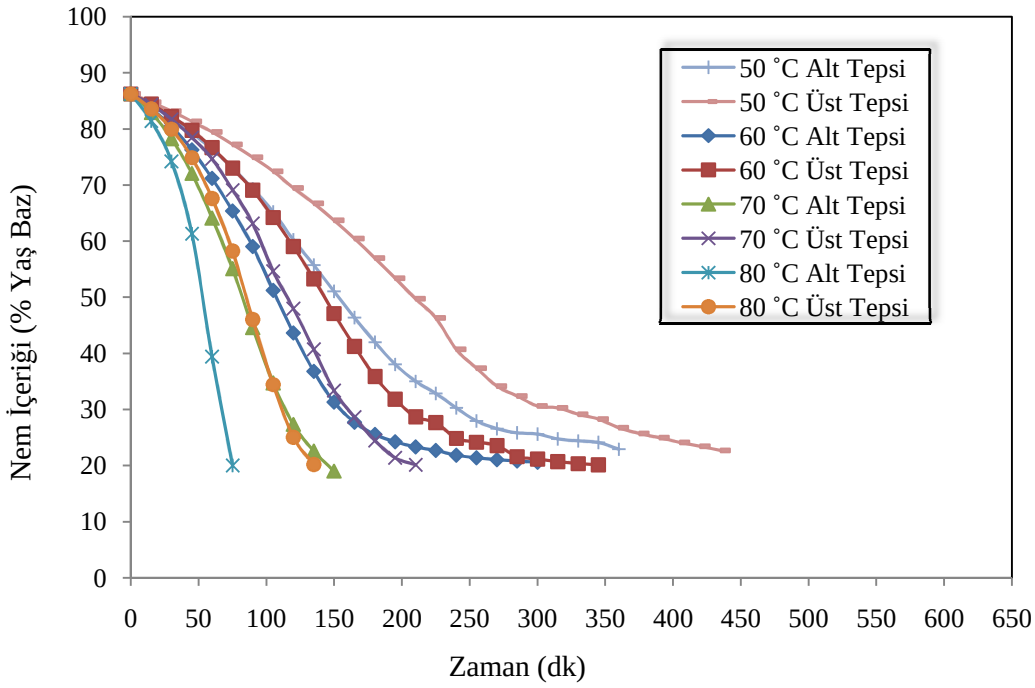
Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 incelendiğinde 4 mm dilim kalınlığında 50 °C sıcaklıktaki kurutma havası için alt tepsideki kuruma süresi 360 dakika iken, 80 °C' de bu süre yaklaşık 75 dakika olmaktadır. Aynı şekilde 6 mm dilim kalınlığı ve 50 °C kurutma havası sıcaklığı için alt tepside kuruma süresi 440 dakika olurken, 80 °C' de bu değer 140 dakika olmaktadır. Grafikler incelendiğinde sıcaklığın artması ile ısı transferinin arttığı dolayısı ile nem transferinin de hız kazandığı, dilim kalınlığının artmasının ise bu etkiyi azalttığı görülmektedir.



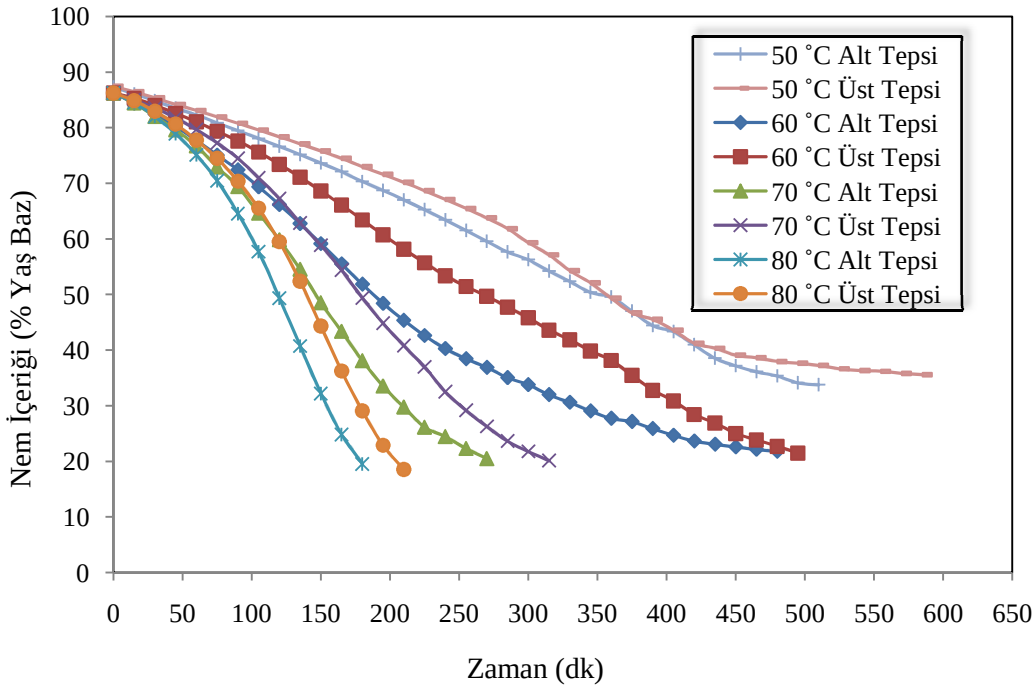
Şekil 5.1 Nem içeriğinin zamanla değişimi (4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.2 Nem içeriğinin zamanla değişimi (6 mm dilim kalınlığı)

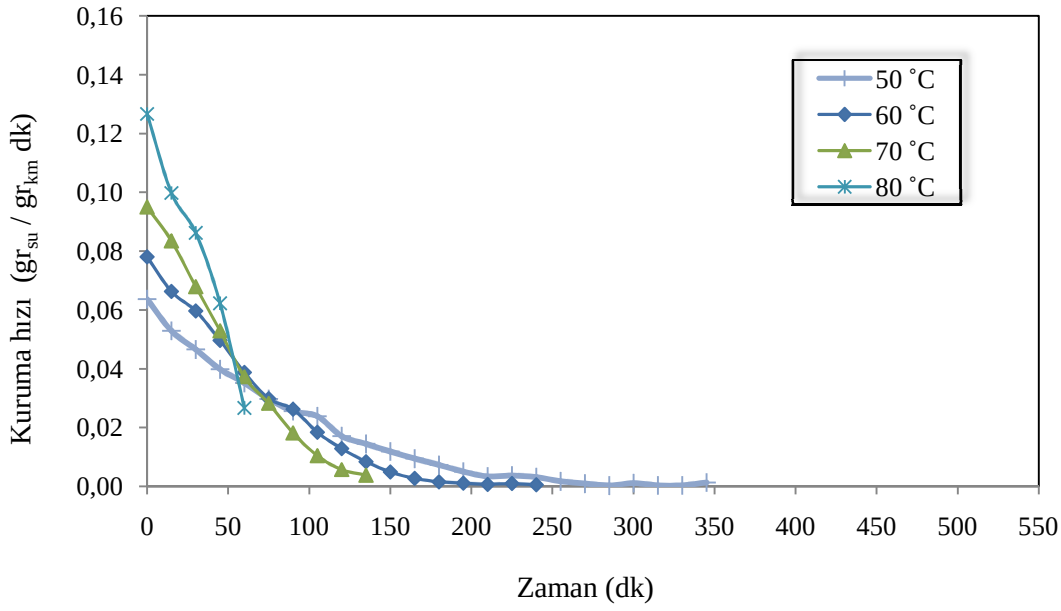


Şekil 5.3 Nem içeriğinin (% N_{yb}) zamanla değişimi (4 mm dilim kalınlığı)

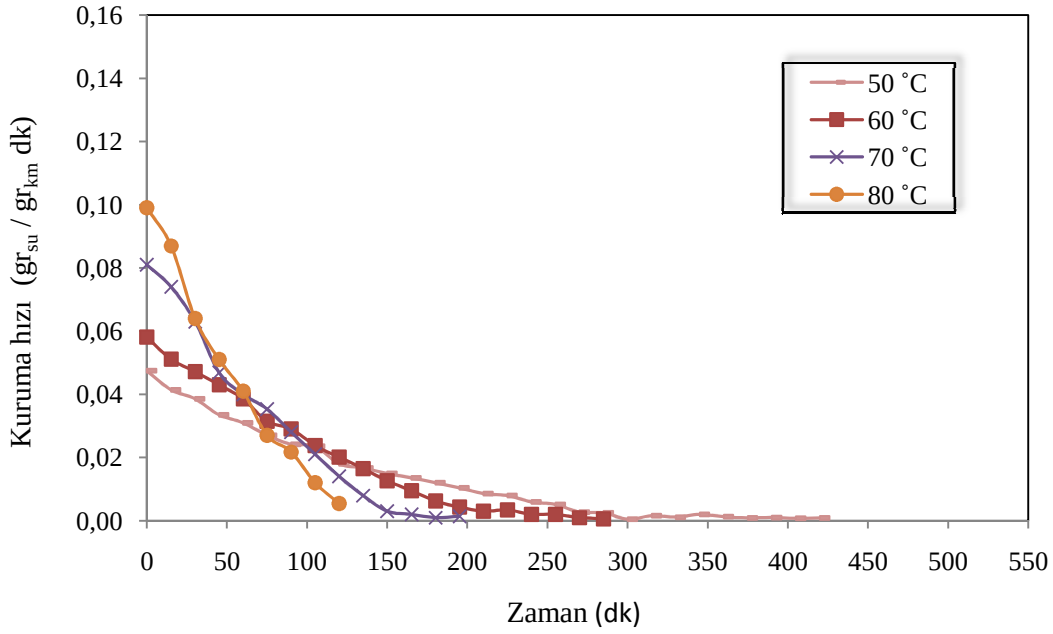


Şekil 5.4 Nem içeriğinin (% N_{yb}) zamanla değişimi (6 mm dilim kalınlığı)

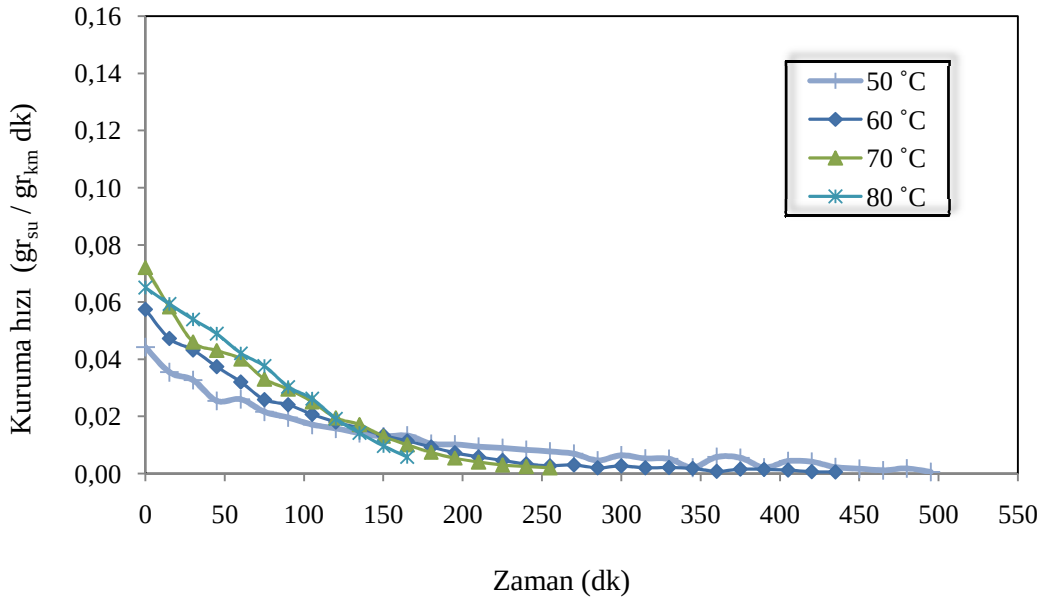
Kurutma havası sıcaklığının yükselmesiyle kuruma hızının (DR), zamanla değişimi alt ve üst tepsi ve her iki dilim kalınlığı için Şekil 5.5 - Şekil 5.8' de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde en yüksek kuruma hızının 80 °C kurutma havası sıcaklığında, alt tepside ve 4 mm dilim kalınlığında, en düşük kuruma hızı ise 50 °C kurutma havası sıcaklığında, üst tepside ve 6 mm dilim kalınlığındaki deneylerde elde edilmiştir. Buradan, sıcaklığın kuruma hızında oldukça etkili bir parametre olduğu, artan sıcaklık ile kuruma hızının arttığı, fakat bu artıştaki eğilimin dilim kalınlığı ile ters orantılı olduğu sonucuna varılabilir. Alt ve üst tepsi açısından kuruma hızı incelenecek olursa, şartlandırılmış hava ile ilk karşılaşan alt tepsi deneylerinde kuruma hızının üst tepsiye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Alt tepside bulunan üründen bir miktar nem alan ve hızı azalan hava üst tepsideki ürünlerle temas etmektedir. Ürün ile kurutma havası arasındaki buhar basıncı farkının ve temasının azalmasından dolayı kuruma hızı üst tepside oldukça düşmektedir.



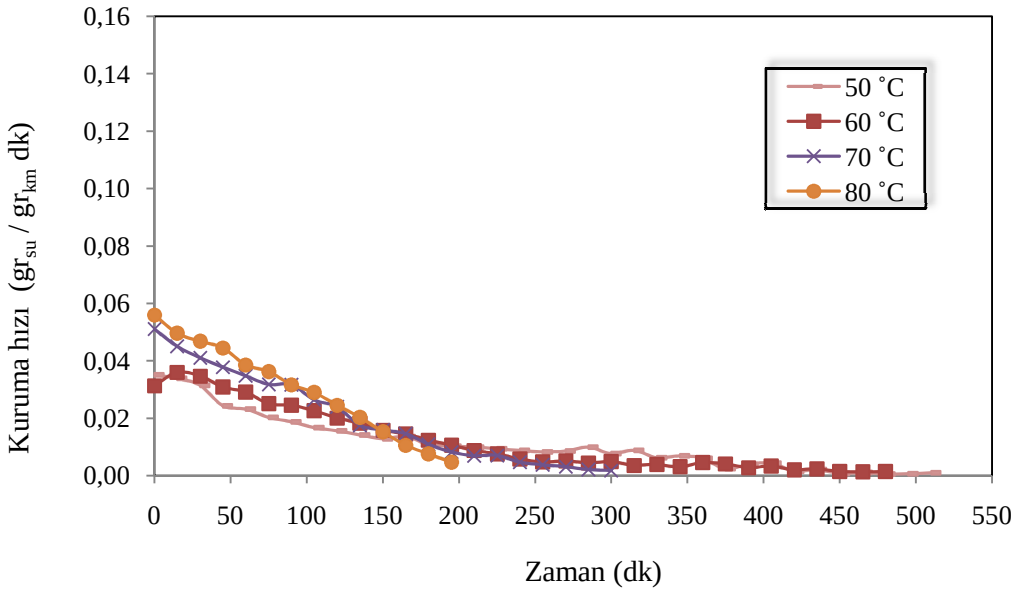
Şekil 5.5 Kuruma hızının zamanla değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.6 Kuruma hızının zamanla değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)

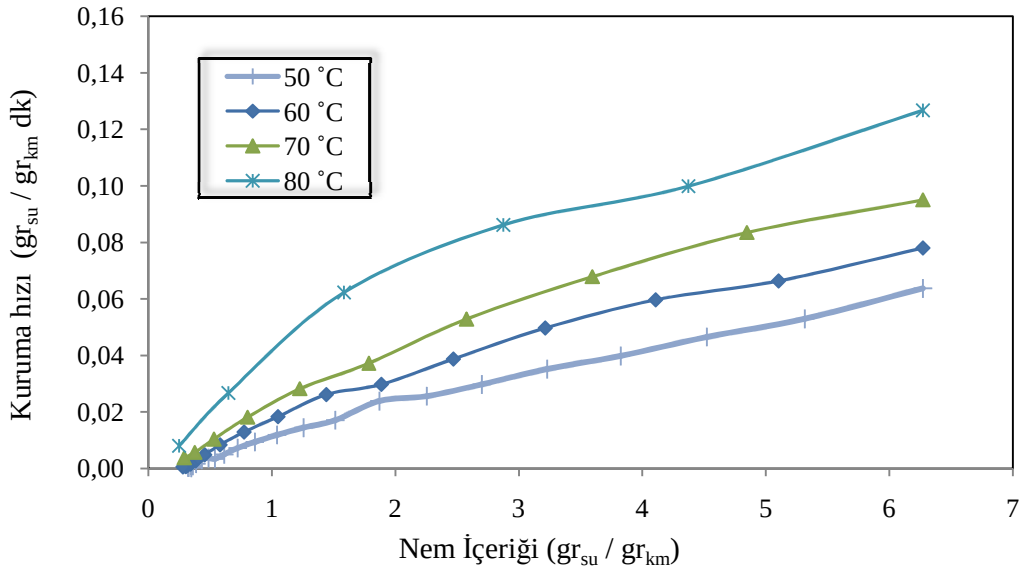


Şekil 5.7 Kuruma hızının zamanla değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

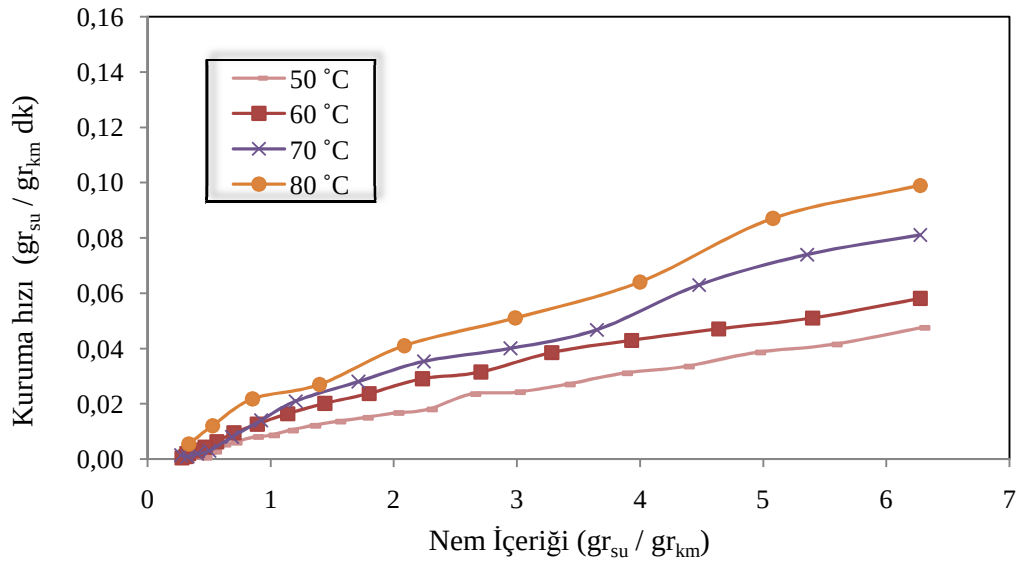


Şekil 5.8 Kuruma hızının zamanla değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

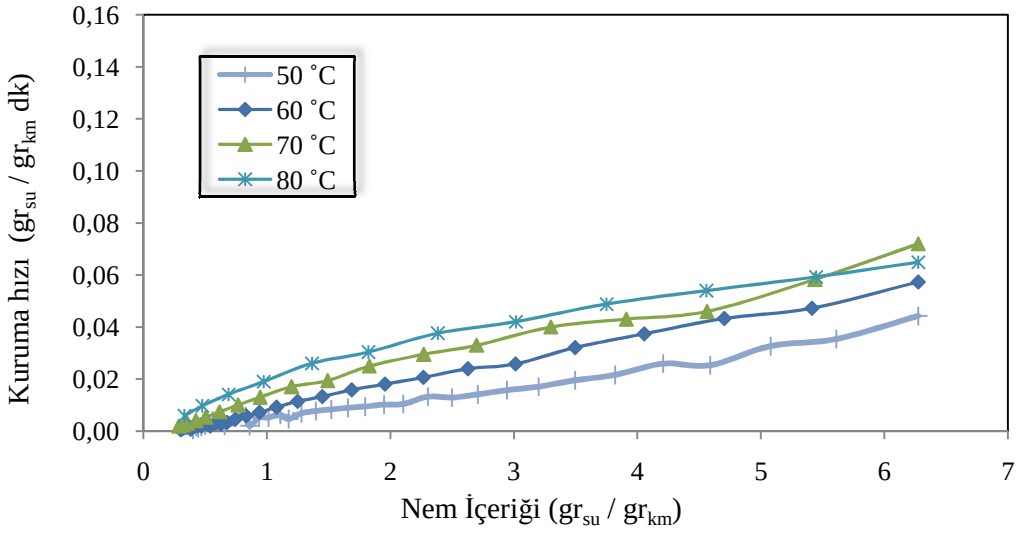
Kuruma hızının nem içeriğine göre farklı sıcaklıklardaki değişimi Şekil 5.9 - 5.12' de verilmektedir. Şekil 5.9' da 80 °C kurutma havası sıcaklığı ve 4 mm dilim kalınlığında yapılan deneyde 6.273 gr_{su} / gr_{km} nem içeriğinde kuruma hızı 0.127 gr_{su} / gr_{km} dk iken aynı sıcaklıkta 0.65 gr_{su} / gr_{km} nem içeriği için ise bu değer 0.027 gr_{su} / gr_{km} dk dır. Diğer tüm grafikler incelendiğinde de ürün içerisinde bulunan nemin (suyun) azalmasıyla ürün içindeki nem difüzyonunun azalması ile ürün yüzeyine nem transferinin zorlaştığı, kuruma hızının da bununla orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Kurutma havası sıcaklığının artması ile ise kuruma hızının arttığı kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi grafiklerinden de görülmektedir.



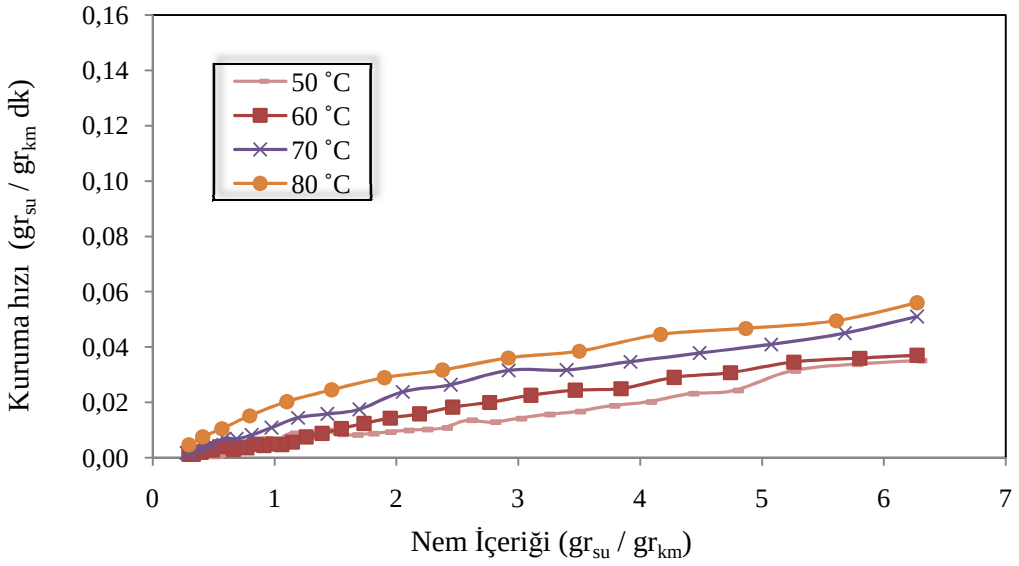
Şekil 5.9 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.10 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.11 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

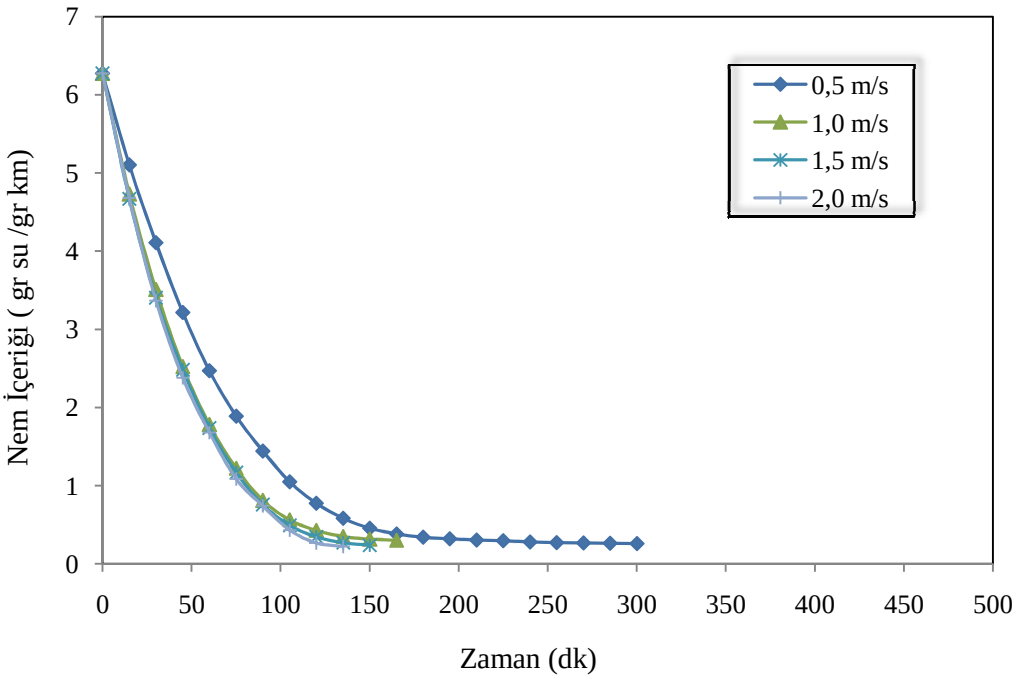


Şekil 5.12 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

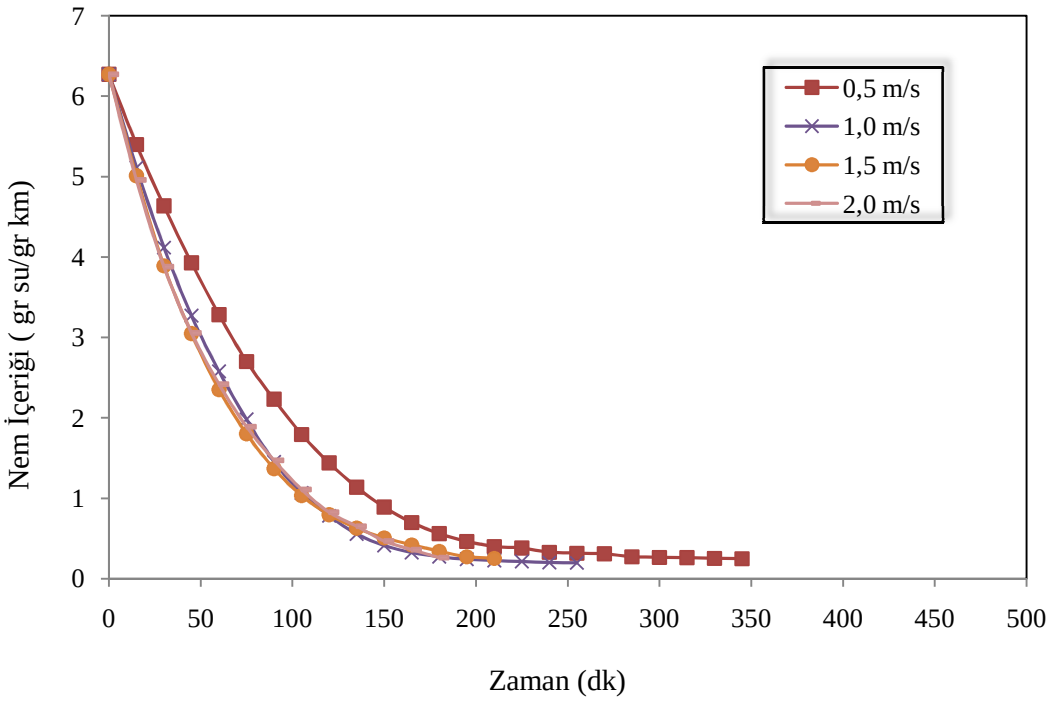
5.2. Kurutma Havası Hızının Kurumaya Etkisi

Kurutma havası hızının kurumaya etkisini incelemek amacıyla kurutma havasının 60 °C sıcaklığı ve %10 bağıl neminde 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s ve 2.0 m/s hızlar için denemeler yapılmıştır. Denemeler sonucunda elde edilen nem içeriği (N) değerleri Ek Çizelge 2, 5, 6 ve 7’ de verilmiştir. Deneylerden elde edilen zamana göre nem içeriği (N) değişim grafikleri ise 4 mm dilim kalınlığında, alt ve üst tepsiler için Şekil 5.13 ile Şekil 5.14’te, 6 mm dilim kalınlığında, alt ve üst tepsiler için ise Şekil 5.15 ile Şekil 5.16’da verilmiştir.

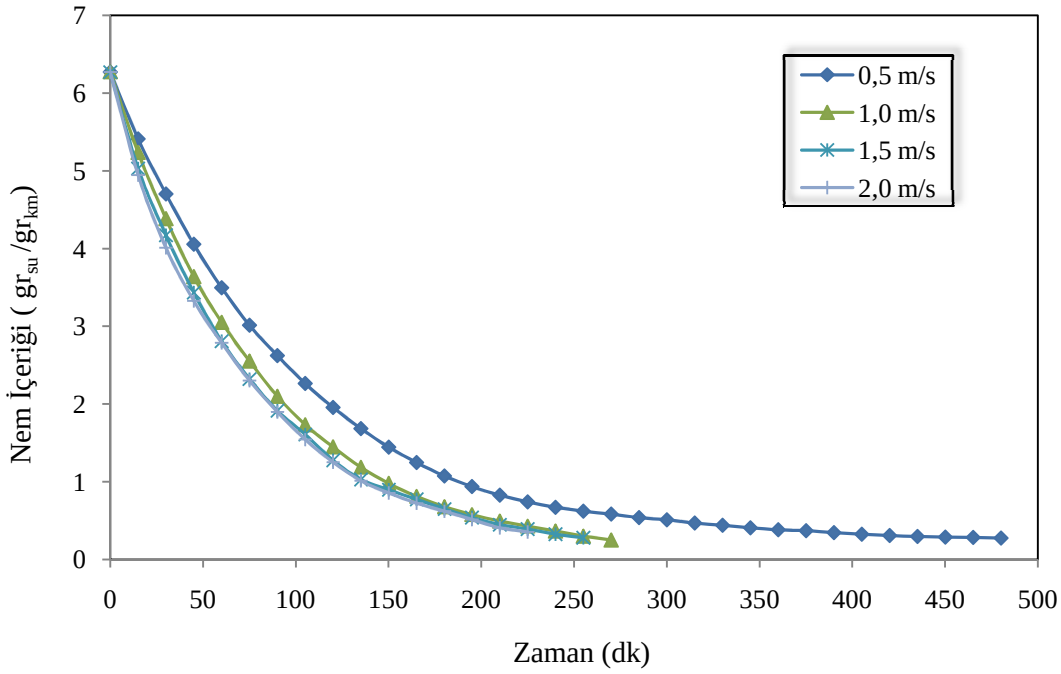
Şekil 5.13 incelendiğinde alt tepsi için 4mm dilim kalınlığı ve 0.5 m/s kurutma havası hızında kuruma süresi 300 dakikayı bulurken bu değer 1.0 m/s hava hızında 170 dakika, 1.5 m/s hava hızında 150 dakika ve 2.0 m/s hava hızında ise 130 dakika olmaktadır. Buradan kurutma havası hızının belirli bir değere kadar kurumayı kontrol ettiği, sonrasında ise hızın artmasının kuruma süresini pek etkilemediği görülmektedir. Diğer grafikler incelendiğinde de hem alt hem de üst tepsi için benzer sonuçlar görülmektedir.



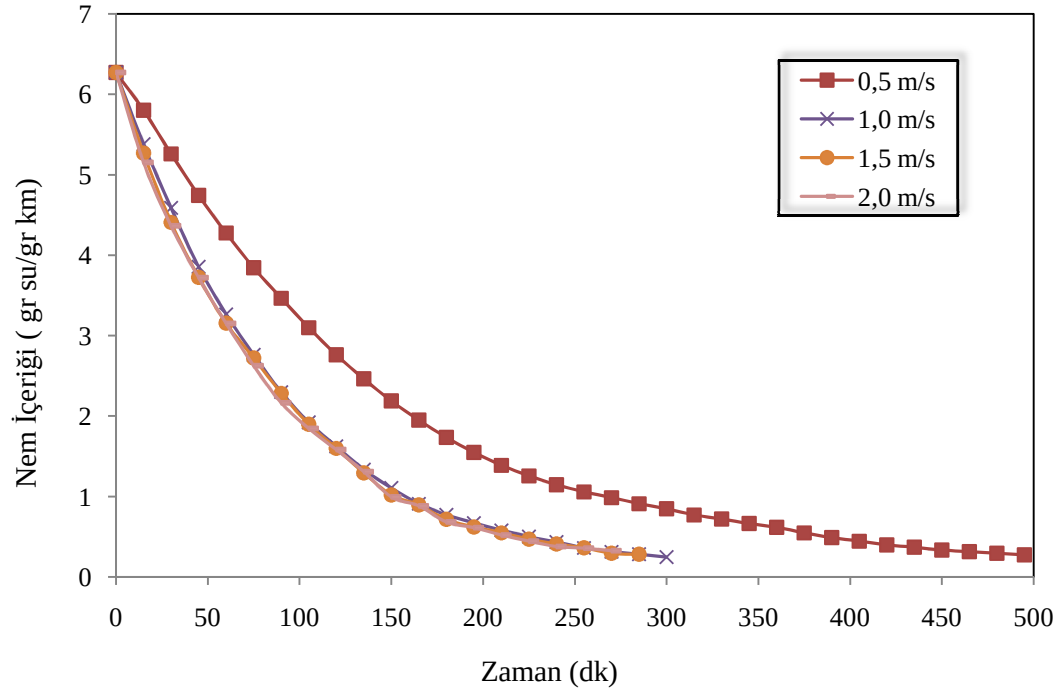
Şekil 5.13 Nem içeriğinin zamanla değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.14 Nem içeriğinin zamanla değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)

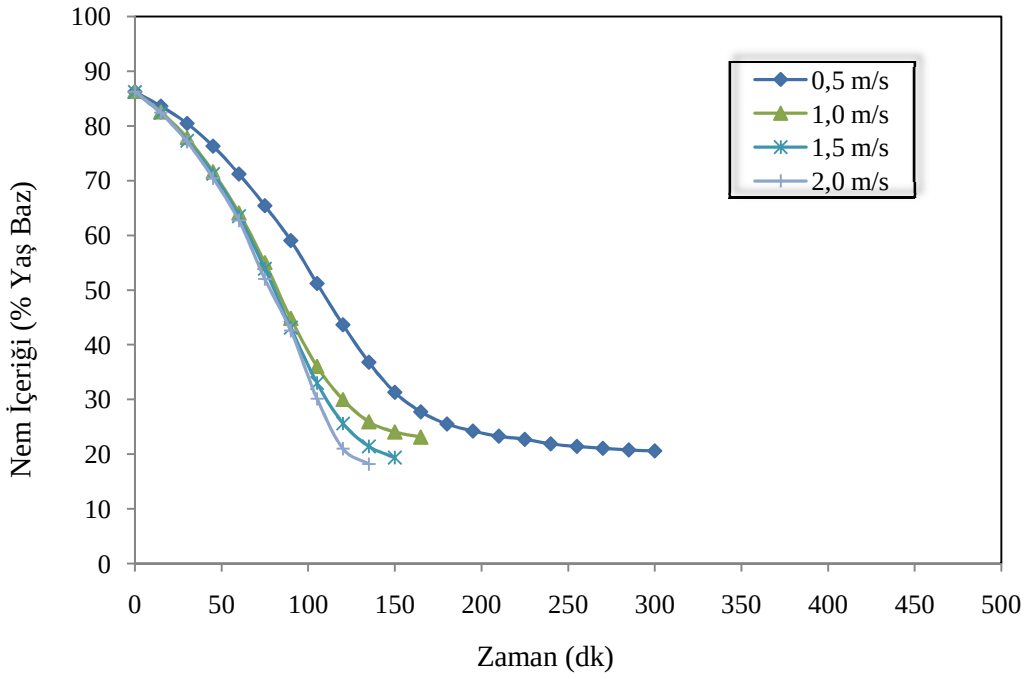


Şekil 5.15 Nem içeriğinin zamanla değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

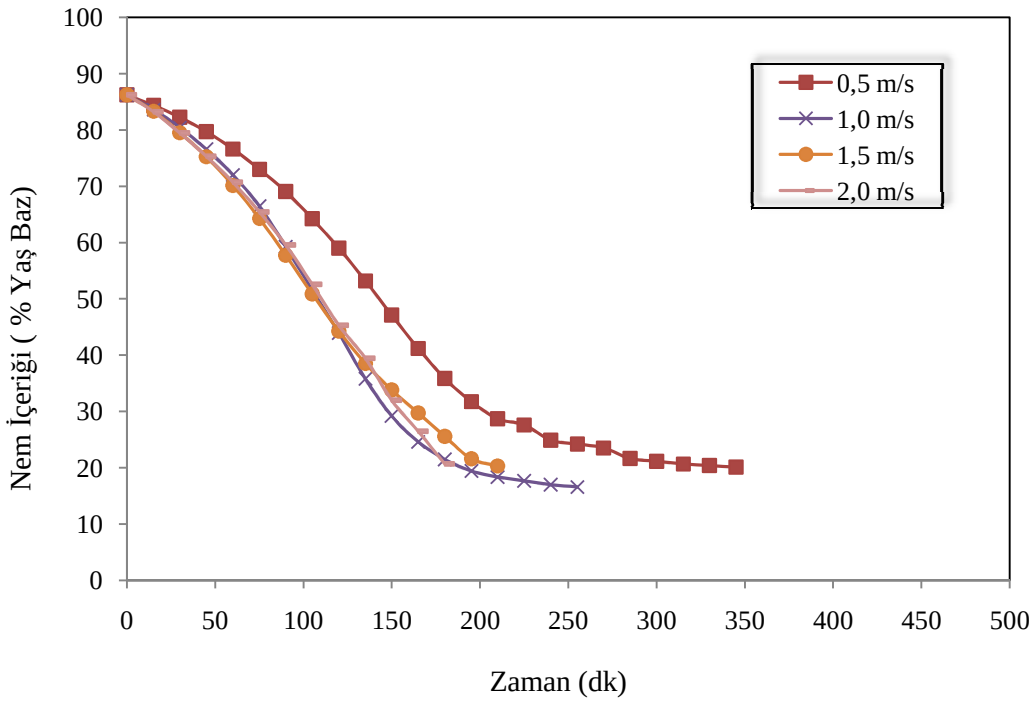


Şekil 5.16 Nem içeriğinin zamanla değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

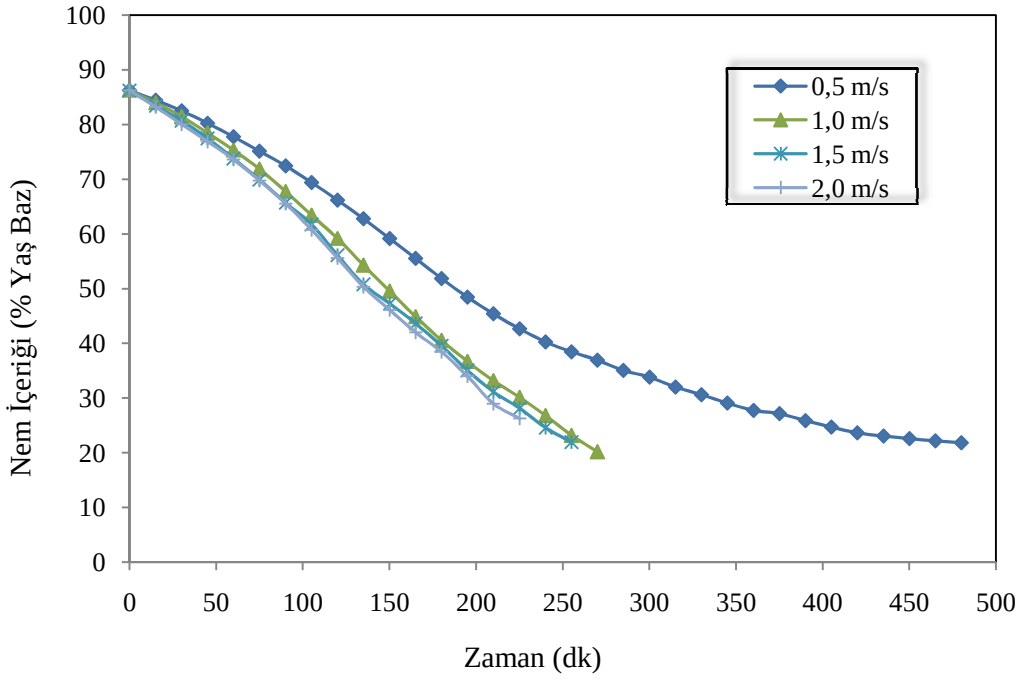
Şekil 5.17 - 5.20’ de hızın kurumaya etkisi yaş bazda % nem içeriği (%N_{yb}) cinsinden verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde dilim kalınlığındaki artışın ürün içerisindeki nem hareketini zorlaştırmaktadır. Nem hareketindeki bu azalma hava hızının kurumaya olan etkisini de azaltmaktadır. Alt ve üst tepsilerde yapılan deneyler incelendiğinde alt tepsideki ürünlerin hava akımını az da olsa kestiği ve kuruma süresinde uzamalara neden olduğu görülmektedir.



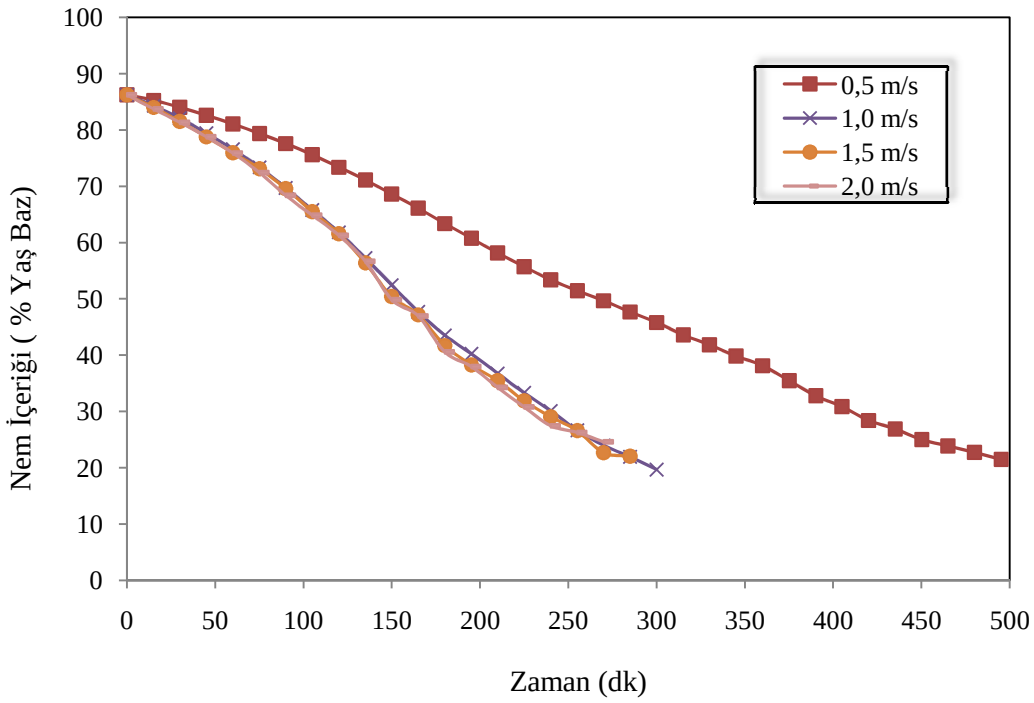
Şekil 5.17 Nem içeriğinin (%N_{yb}) zamanla değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.18 Nem içeriğinin (%N_{yb}) zamanla değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)

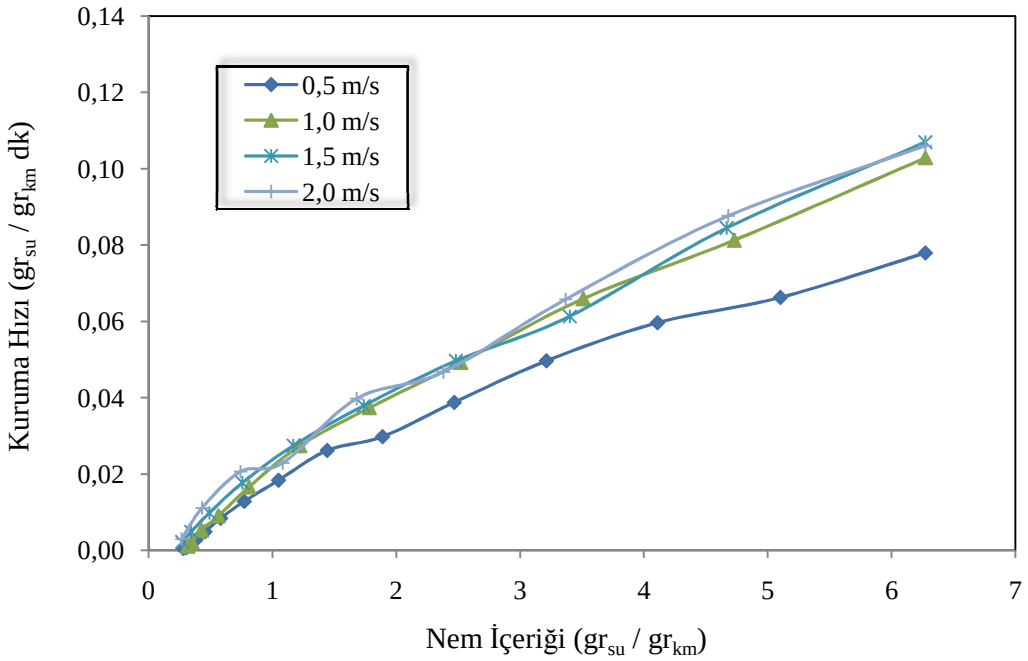


Şekil 5.19 Nem içeriğinin (%N_{yb}) zamanla değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

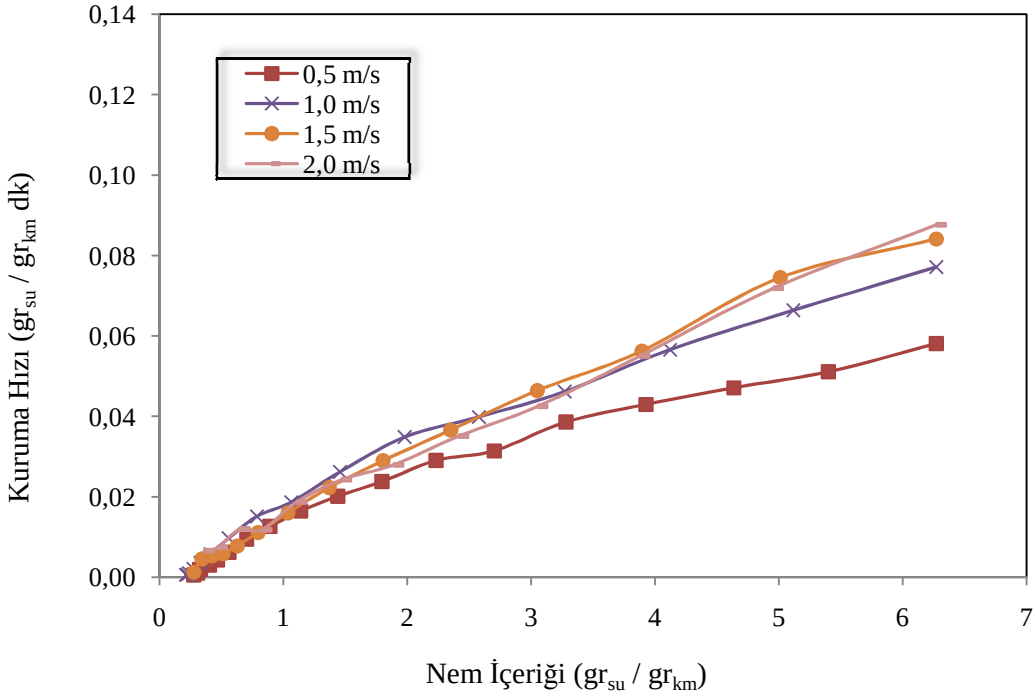


Şekil 5.20 Nem içeriğinin (%N_{yb}) zamanla değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

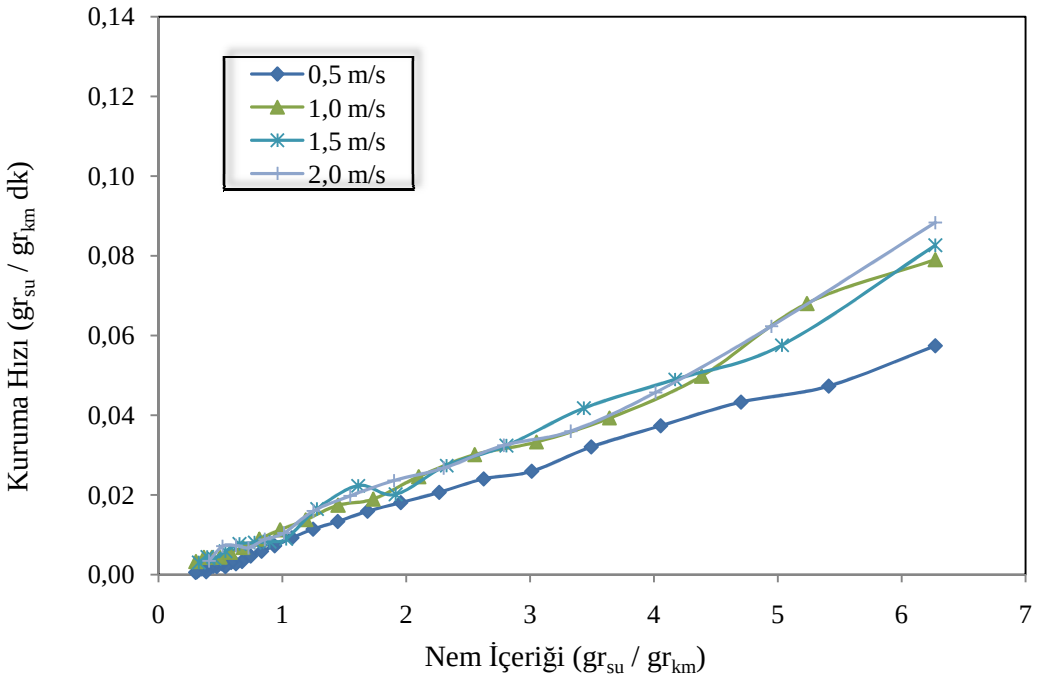
Farklı kurutma havası hızlarındaki kuruma hızının nem içeriği ile değişimi Şekil 5.21 - 5.24' de verilmektedir. Şekil 5.21' de 0.5 m/s kurutma havası hızı ve 4 mm dilim kalınlığı için yapılan deneyde 6.273 gr_{su} / gr_{km} nem içeriğinde kuruma hızı 0.078 gr_{su}/ gr_{km} dk iken, aynı kurutma havası hızında 0.568 gr_{su} / gr_{km} nem içeriğinde bu değer 0.008 gr_{su} / gr_{km} dk' dır. Benzer şekilde 1.0 m/s hava hızı için 6.273 gr_{su} / gr_{km} nem içeriğinde kuruma hızı 0.103 gr_{su} / gr_{km} dk, 0.563 gr_{su} / gr_{km} nem içeriğinde ise 0.009 gr_{su} / gr_{km} dk olduğu görülmektedir. Diğer tüm şekiller incelendiğinde de, ürün içerisinde bulunan nemin (suyun) azalması ile ürün içerisindeki difüzyonunun azaldığı dolayısı ile ürün yüzeyine nem transferinin zorlaştığı, kuruma havası hızı artsa dahi, yüzeye nem transferi yavaşladığından, kuruma hızında kayda değer bir artışın olmadığı anlaşılmaktadır.



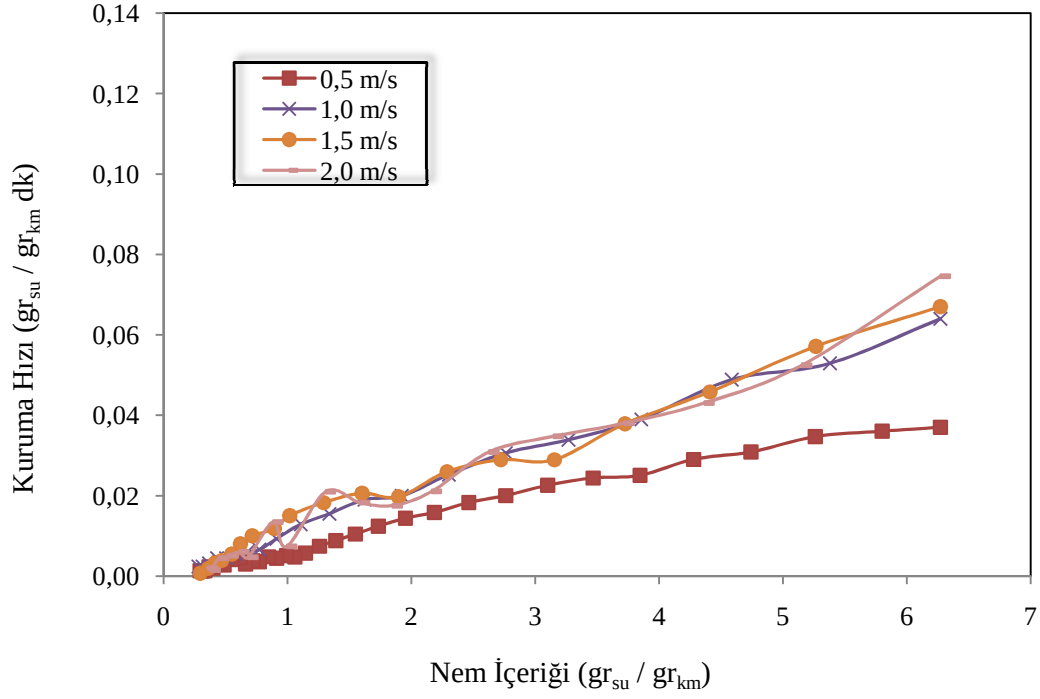
Şekil 5.21 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.22 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.23 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

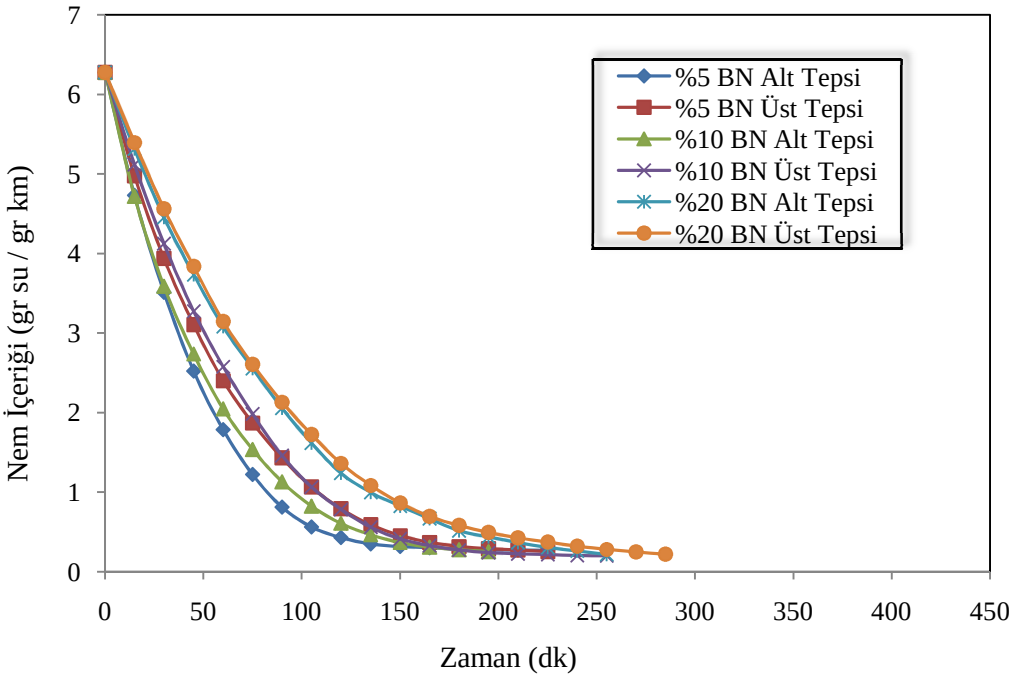


Şekil 5.24 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

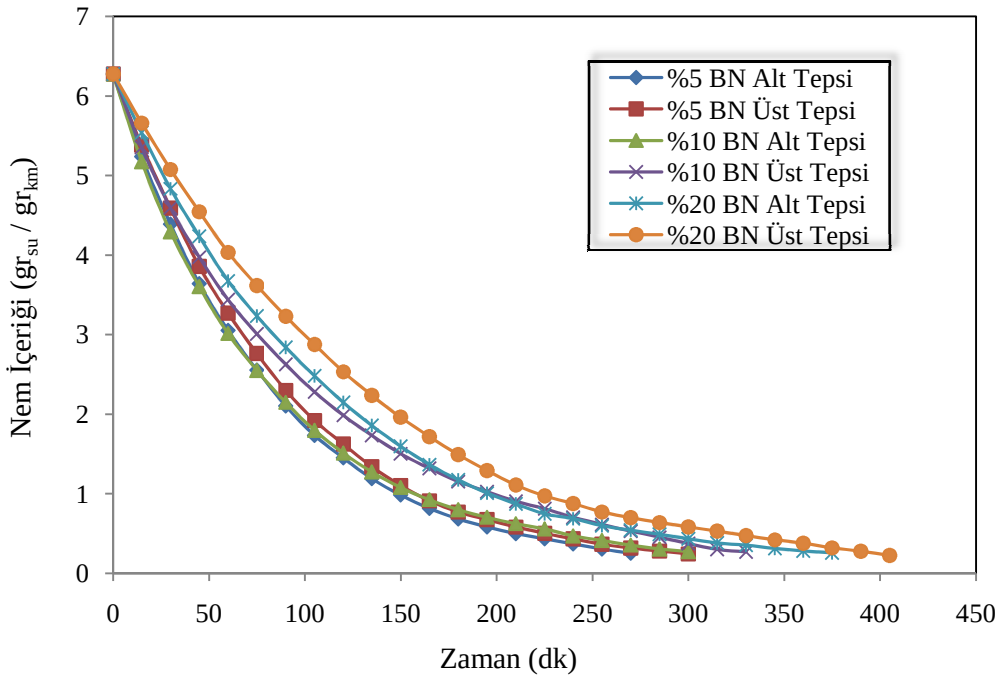
5.3. Kurutma Havası Bağıl Nem Değerinin Kurumaya Etkisi

Kurutma havası bağıl nem değerinin kurumaya etkisini incelemek için kurutma havasının 1.0 m/s hız, 60 °C sıcaklık ve % 5, % 10 ve % 20 bağıl nem değerleri için deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen nem içeriği (N) değerleri Ek Çizelge 8, 5 ve 9'da verilmiştir. Sonuçların grafikler halindeki gösterimleri 4 mm dilim kalınlığı için Şekil 5.25' te, 6 mm dilim kalınlığı için ise Şekil 5.26' da verilmektedir.

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26 incelendiğinde, 4 mm dilim kalınlığında kurutma havasının % 20 bağıl nemi için kuruma süresi alt tepside 280 dakika sürerken, % 5 bağıl nem değeri için ise bu süre yaklaşık 150 dakikadır. Aynı şekilde 6 mm dilim kalınlığı ve % 20 kurutma havası bağıl nemi için alt tepside kuruma süresi 410 dakika iken, kurutma havasının % 5 bağıl nemi için bu değer 280 dakika olarak ölçülmüştür. Kurutma havası bağıl nem değerinin artması ile havanın buhar basıncı yükselmekte, dolayısı ile kütle transferi hızı azalmaktadır. Ayrıca dilim kalınlığının artması kütle transferini daha da zorlaştırmaktadır.

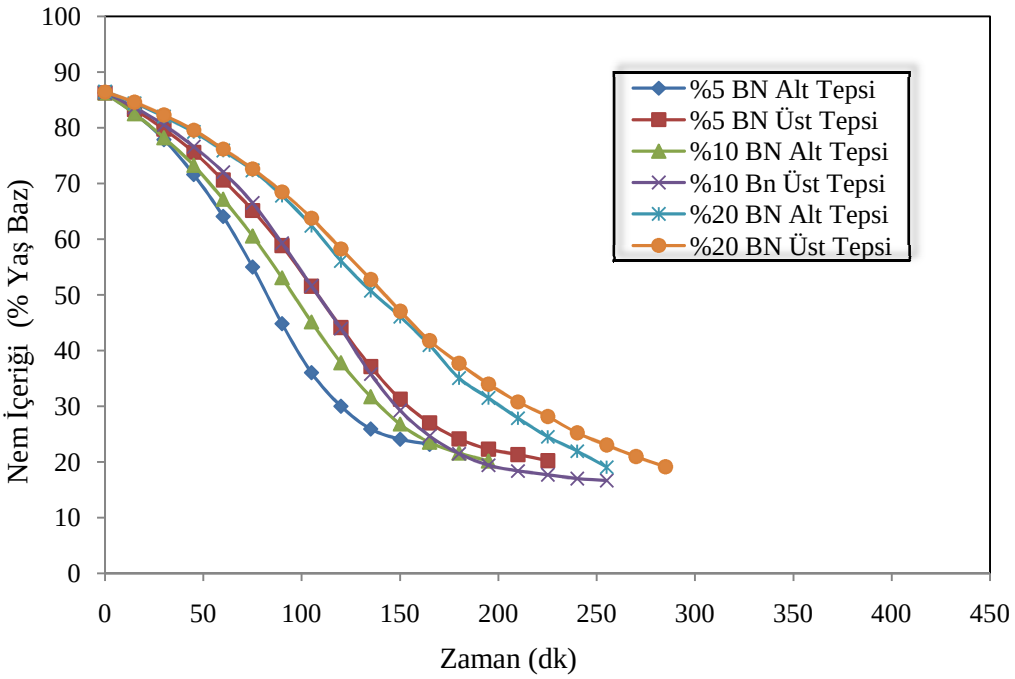


Şekil 5.25 Nem içeriğinin zamanla değişimi (4 mm dilim kalınlığı)

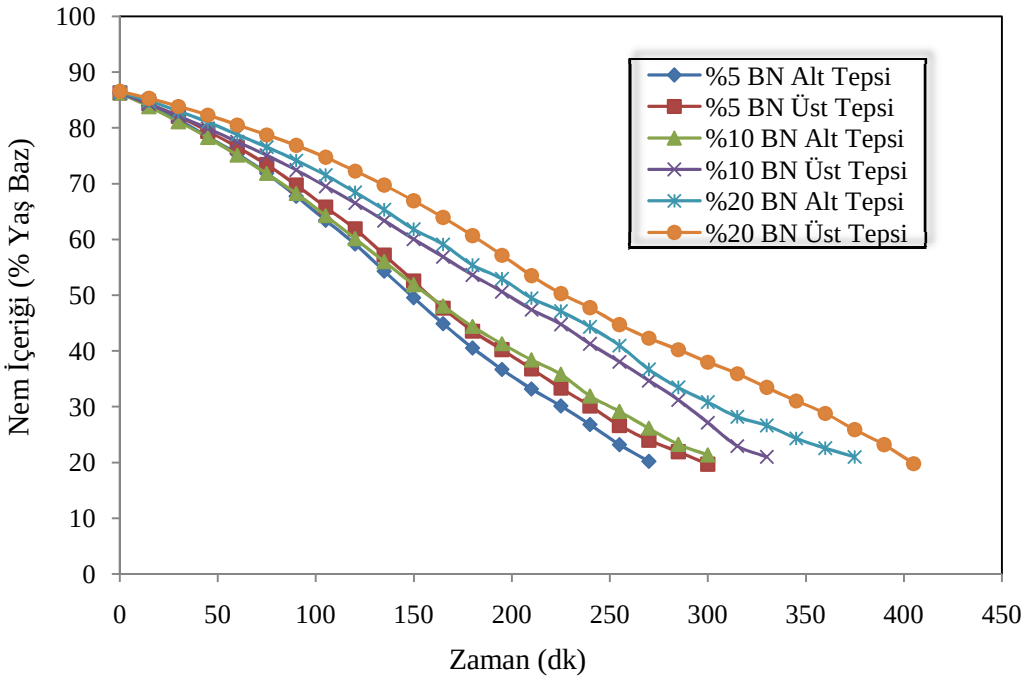


Şekil 5.26 Nem içeriğinin zamanla değişimi (6 mm dilim kalınlığı)

Kurutma havası bağıl neminin kurumaya etkisi Şekil 5.27 ve Şekil 5.28' de yaş bazda % nem içeriği (% N_{yb}) cinsinden verilmiştir. Şekiller incelenirse, kurutma havası bağıl nemindeki azalma, havanın buhar basıncını düşürmekte dolayısı ile kütle transferi artmakta ve toplam kuruma süresi her iki grafikte de görüldüğü gibi kısalmaktadır. Ayrıca dilim kalınlığının artmasının kuruma süresinin uzamasında önemli bir etken olduğu anlaşılmaktadır.

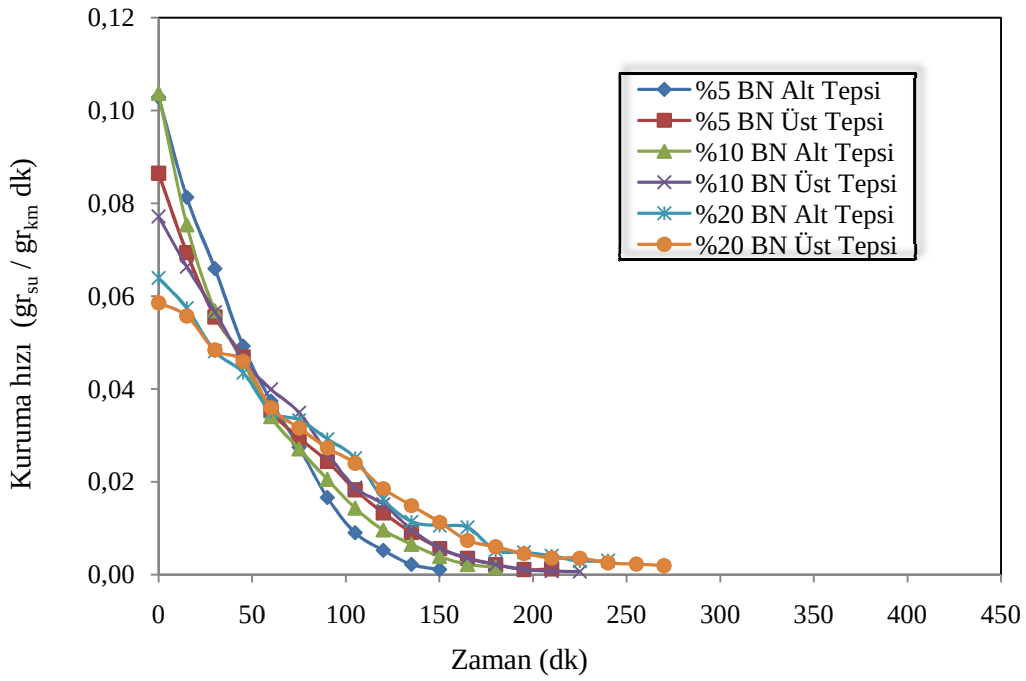


Şekil 5.27 Nem içeriğinin (%N_{yb}) zamanla değişimi (4 mm dilim kalınlığı)

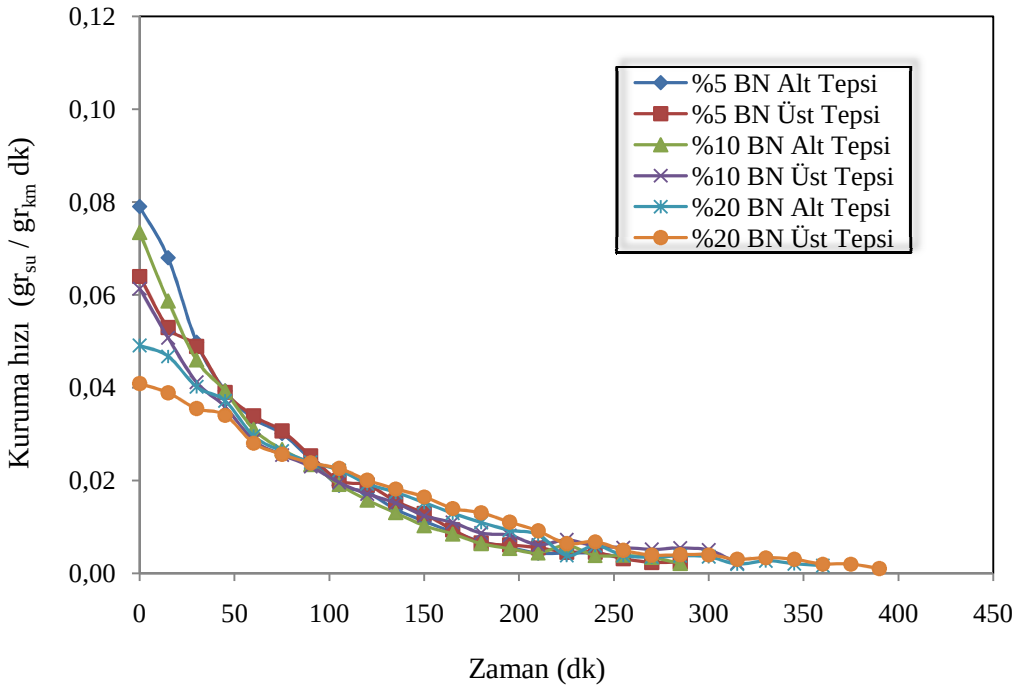


Şekil 5.28 Nem içeriğinin (%N_{yb}) zamanla değişimi (6 mm dilim kalınlığı)

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30, kurutma havası bağıl neminin azalmasının kuruma hızına etkisini göstermektedir. Şekiller incelendiğinde, kurutma havası bağıl neminin azalması ile, kurutma havası ve ürün arasındaki nem konsantrasyonu farkı artmakta ve dolayısı ile kuruma hızı da artmaktadır.

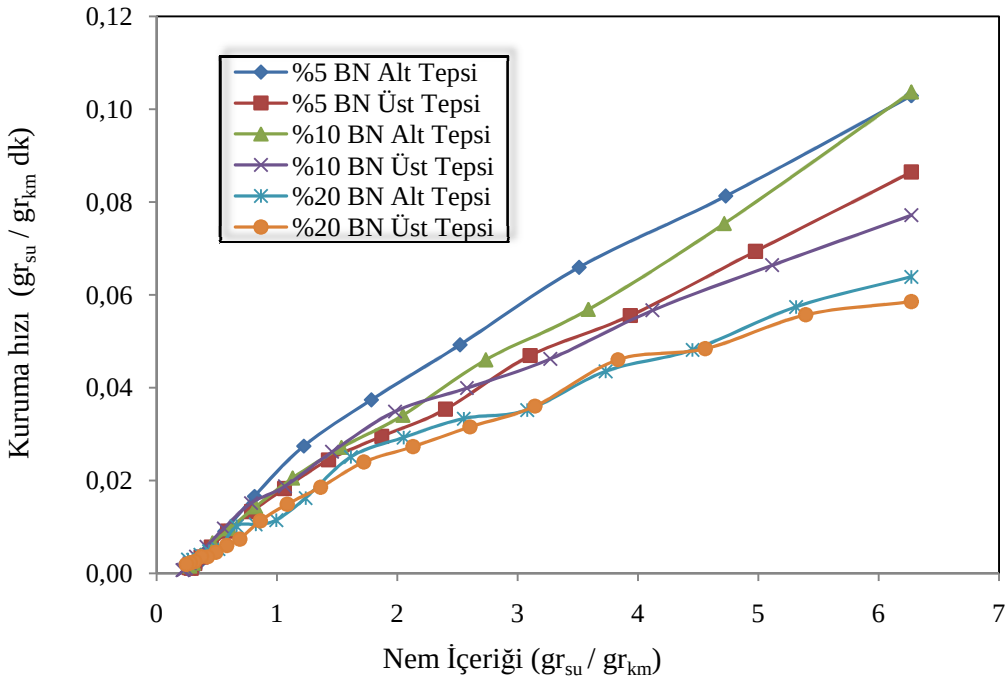


Şekil 5.29 Kuruma hızının zamanla değişimi (4 mm dilim kalınlığı)

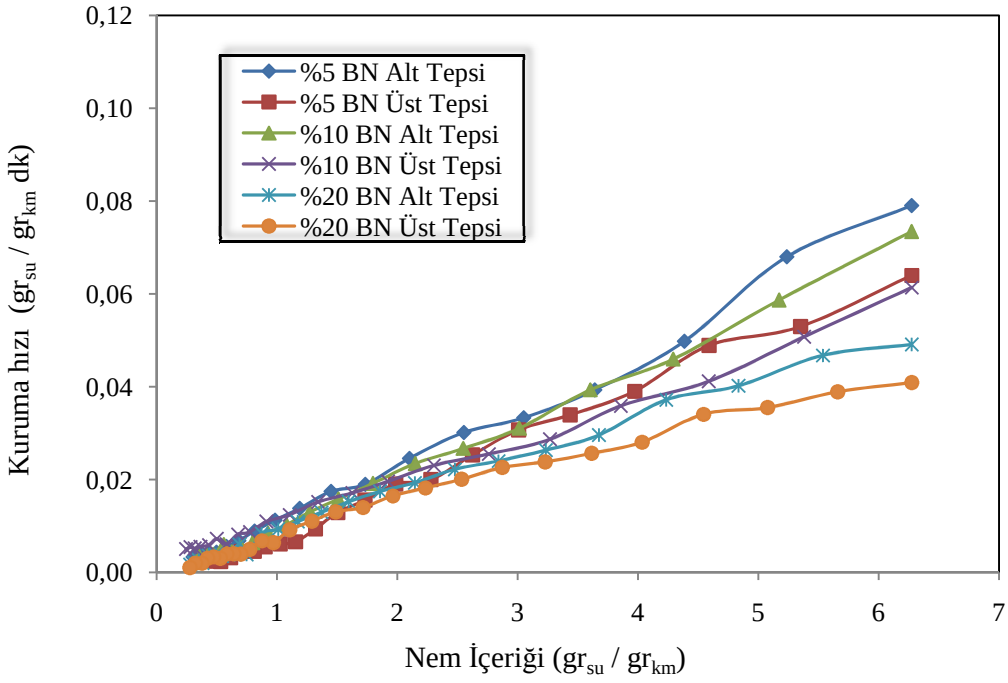


Şekil 5.30 Kuruma hızının zamanla değişimi (6 mm dilim kalınlığı)

Şekil 5.31 ve 5.32'de kurutma havası bağıl neminin farklı değerleri için kuruma hızının nem içeriğine göre değişimini göstermektedir. Nem içeriği 6.273 gr_{su} / gr_{km} olduğu durumda kuruma hızları arasındaki fark en büyük iken, nem içeriği 1.0 gr_{su} / gr_{km}' nin altına indiğinde kurutma havası bağıl neminin kuruma hızına etkisinin iyice azaldığı görülmektedir. Bu sonuç kurumada ürün içerisindeki nem miktarının büyük bir etken olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.31 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.32 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (6 mm dilim kalınlığı)

5.4. Farklı Koşullarda Kurutulan Kiviye Ait Kuruma Sabitinin Hesaplanması ve Bazı Modellerle Karşılaştırılması

Tarım ürünlerinin kurutulmasında, ısınma evresinin çok kısa olmasından dolayı kuruma genellikle sabit hızla ve azalan hızla kuruma evrelerinde gerçekleşmektedir. Bu evrelerdeki kuruma olayını açıklamak için literatürde çok sayıda model bulunmaktadır. Kivinin kurutulmasında kurumayı açıklamak için kurutma havasının 0.5 m/s hız, % 10 bağıl nem, 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklıklardaki deneylerden elde edilen MR değerleri literatürden seçilen Newton, Page, Logaritmic ve Midilli ve ark. modellerine MATLAB programında uygulanmış ve sonuçlar analiz edilerek korelasyon katsayısı (R^2) ve ortalama hata kareleri toplamının karekökü (RMSE) değerleri elde dilmiştir. Değişik kuruma şartları için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4' de verilmiştir.

Değişik şartlarda kivinin kurumasını açıklamak üzere kullanılan 4 modele ait istatistiksel veriler (R^2 ve RMSE) incelenmiş ve ayrılabilir nem oranı hesabını en düşük hata ile Midilli ve ark. modelinin verdiği görülmüştür. Midilli ve ark. modelinde korelasyon katsayısı (R^2) 0.9759 ile 0.9999 arasında değişmektedir. Ayrıca Şekil 5.33 - 5.36'da verilen deneysel ve model sonuçları karşılaştırıldığında nem oranı (MR) değerlerinin birbirleri ile oldukça uyum içinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.1 Seçilen modellere ait katsayılar ve istatistiksel veriler

0,5 m/s, %10 RH, 4 mm dilim kalınlığı, Alt tepsi					
		50 °C	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
Newton MR= exp (-kt)	R^2	0.9968	0.9943	0.9946	0.9791
	RMSE	0.01559	0.02154	0.0241	0.05358
	k	0.01137	0.01578	0.02077	0.03002
		50 °C	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
Page MR= exp ($-kt^n$)	R^2	0.9968	0.9951	0.9997	0.9972
	RMSE	0.01592	0.02039	0.005566	0.02188
	k	0.01129	0.01187	0.01095	0.00859
	n	1.001	1.066	1.158	1.344
		50 °C	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
Logaritmic MR= a exp(-kt) + c	R^2	0.9983	0.996	0.9977	0.9982
	RMSE	0.01197	0.01904	0.01738	0.02036
	a	0.9961	1.013	1.062	1.31
	c	0.02225	0.01794	-0.04416	-0.3031
	k	0.01231	0.01708	0.01911	0.0186
		50 °C	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
Midilli MR= a exp ($-kt^n$) + bt	R^2	0.9997	0.9997	0.9998	0.9991
	RMSE	0.004942	0.005744	0.005254	0.01806
	a	0.9921	0.9937	0.9974	0.9981
	b	0.000114	0.000142	0.0632	-0.00104
	k	0.007296	0.007641	0.01003	0.01274
	n	1.107	1.18	1.183	1.195

Çizelge 5.2 Seçilen modellere ait katsayılar ve istatistiksel veriler

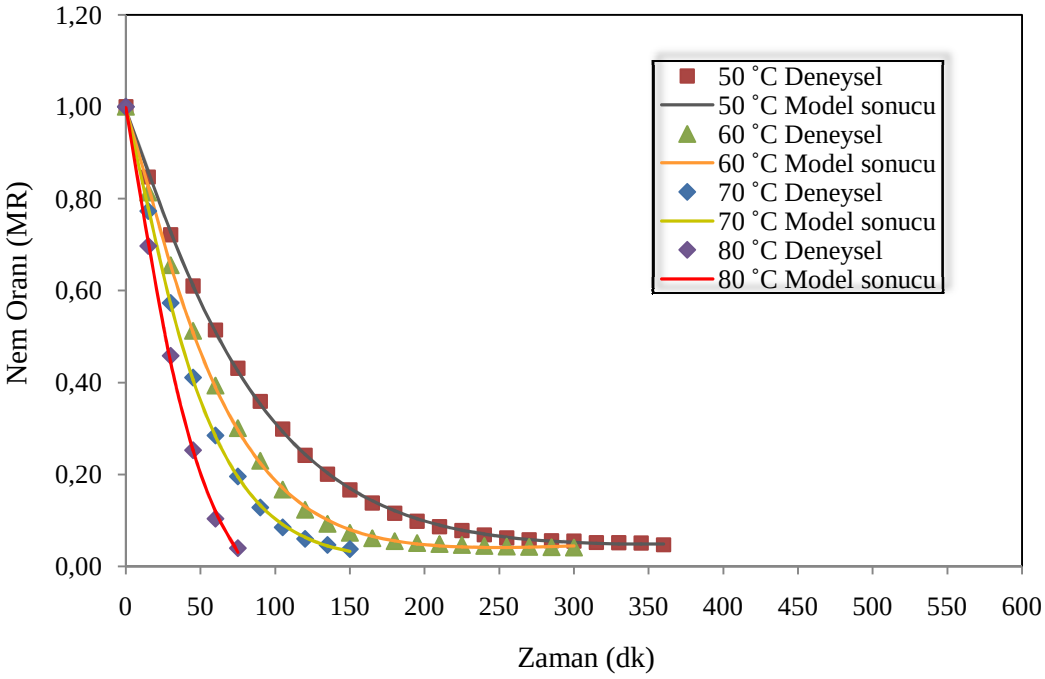
0,5 m/s, %10 RH , 4 mm dilim kalınlığı, Üst tepsi					
		50 °C	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
Newton MR= exp (-kt)	R^2	0.998	0.9944	0.9873	0.9809
	RMSE	0.01248	0.02171	0.03603	0.04704
	k	0.008464	0.01177	0.01419	0.01889
		50 °C	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
Page MR= exp ($-kt^n$)	R^2	0.9982	0.9971	0.9991	0.9989
	RMSE	0.01186	0.01601	0.009764	0.01189
	k	0.007313	0.007057	0.00493	0.005221
	n	1.029	1.111	1.239	1.313
		50 °C	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
Logaritmic MR= a exp(-kt) + c	R^2	0.9983	0.9955	0.995	0.9958
	RMSE	0.01175	0.02025	0.02449	0.02497
	a	1.008	1.032	1.103	1.12
	c	0.009394	0.002854	-0.06983	-0.1677
	k	0.008824	0.01226	0.01261	0.01419
		50 °C	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
Midilli MR= a exp ($-kt^n$) + bt	R^2	0.9995	0.9995	0.9993	0.9992
	RMSE	0.006861	0.007254	0.009216	0.0121
	a	0.9897	0.9878	0.99	0.993
	b	0.0707	0.000103	0.0687	-0.00012
	k	0.005073	0.004496	0.003978	0.005474
	n	1.111	1.218	1.291	1.293

Çizelge 5.3 Seçilen modellere ait katsayılar ve istatistiksel veriler

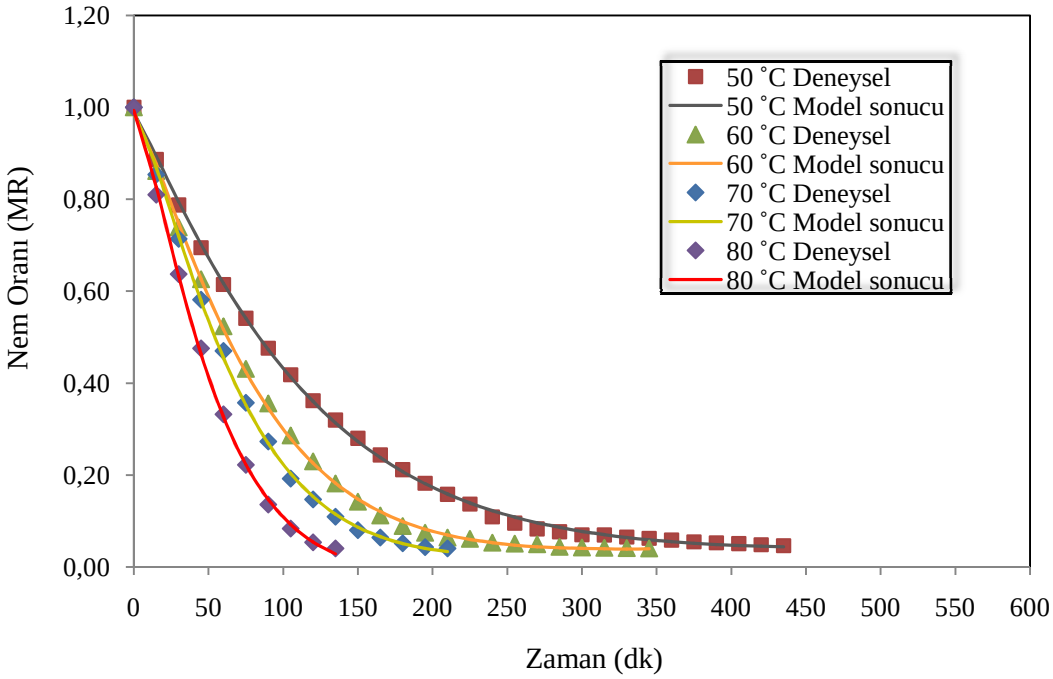
0,5 m/s, %10 RH , 6 mm dilim kalınlığı, Alt tepsi					
		50 ºC	**60 ºC**	**70 ºC**	**80 ºC**
Newton MR= exp (-kt)	R^2	0.9967	0.9939	0.9959	0.981
	RMSE	0.01487	0.02024	0.01917	0.0449
	k	0.006031	0.009418	0.01171	0.0137
		50 ºC	**60 ºC**	**70 ºC**	**80 ºC**
Page MR= exp ($-kt^n$)	R^2	0.9999	0.9959	0.9995	0.9993
	RMSE	0.002523	0.01684	0.006782	0.009208
	k	0.009511	0.01384	0.006784	0.003705
	n	0.9138	0.9207	1.118	1.297
		50 ºC	**60 ºC**	**70 ºC**	**80 ºC**
Logaritmic MR= a exp(-kt) + c	R^2	0.9993	0.9996	0.9983	0.9974
	RMSE	0.007069	0.005359	0.01333	0.01806
	a	0.9517	0.9718	1.051	1.206
	c	0.02582	0.03727	-0.03031	-0.1803
	k	0.006286	0.01061	0.01114	0.0102
		50 ºC	**60 ºC**	**70 ºC**	**80 ºC**
Midilli MR= a exp ($-kt^n$) + bt	R^2	0.9999	0.9997	0.9996	0.9997
	RMSE	0.002405	0.004338	0.006378	0.006075
	a	1.001	0.9996	0.9941	0.9956
	b	-0.00928	0.0913	0.0399	-0.00016
	k	0.009889	0.009193	0.005927	0.004319
	n	0.9051	1.019	1.15	1.249

Çizelge 5.4 Seçilen modellere ait katsayılar ve istatistiksel veriler

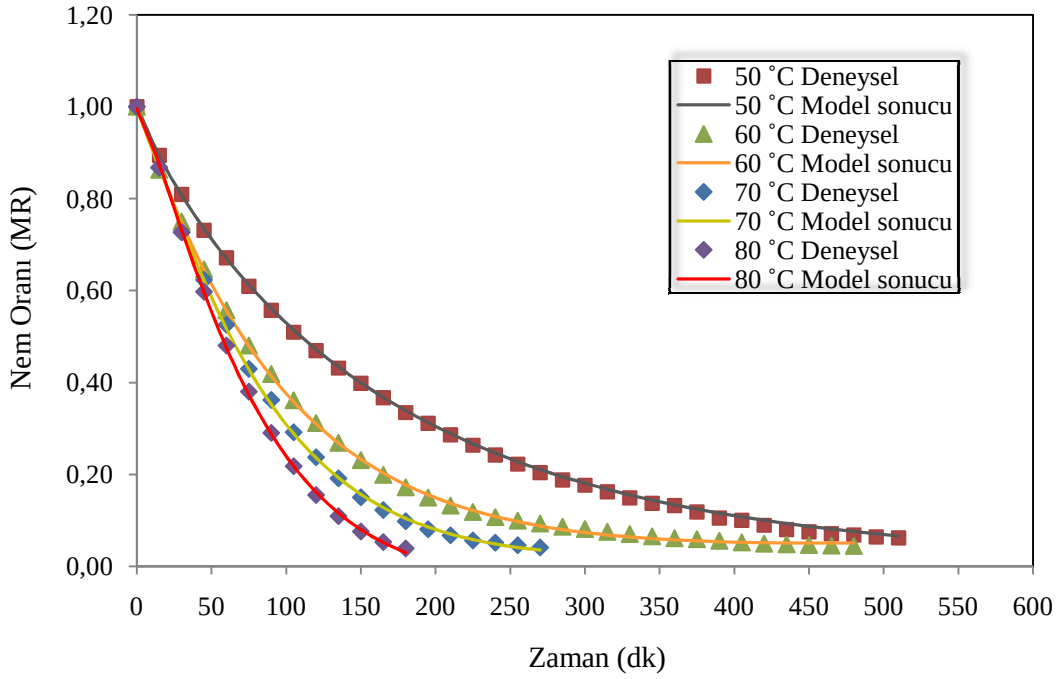
0,5 m/s, %10 RH , 6 mm dilim kalınlığı, Üst tepsi					
		50 ºC	**60 ºC**	**70 ºC**	**80 ºC**
Newton MR= exp (-kt)	R^2	0.9978	0.9981	0.989	0.9759
	RMSE	0.01247	0.01203	0.03212	0.05025
	k	0.005449	0.006799	0.009325	0.01151
		50 ºC	**60 ºC**	**70 ºC**	**80 ºC**
Page MR= exp ($-kt^n$)	R^2	0.9983	0.9982	0.9996	0.9988
	RMSE	0.01124	0.01178	0.006474	0.0118
	k	0.006573	0.006123	0.003344	0.002488
	n	0.9652	1.02	1.212	1.335
		50 ºC	**60 ºC**	**70 ºC**	**80 ºC**
Logaritmic MR= a exp(-kt) + c	R^2	0.9983	0.999	0.9963	0.9971
	RMSE	0.01133	0.009241	0.01956	0.01882
	a	0.9786	1.011	1.099	1.249
	c	0.009372	0.01652	-0.06083	-0.2204
	k	0.005508	0.007288	0.008499	0.008149
		50 ºC	**60 ºC**	**70 ºC**	**80 ºC**
Midilli MR= a exp ($-kt^n$) + bt	R^2	0.9983	0.9994	0.9998	0.9996
	RMSE	0.01136	0.006917	0.004841	0.007592
	a	0.9906	1.008	0.9908	0.9937
	b	0.0122	0.0631	0.0505	-0.00018
	k	0.005751	0.004947	0.002651	0.003031
	n	0.9904	1.073	1.264	1.275



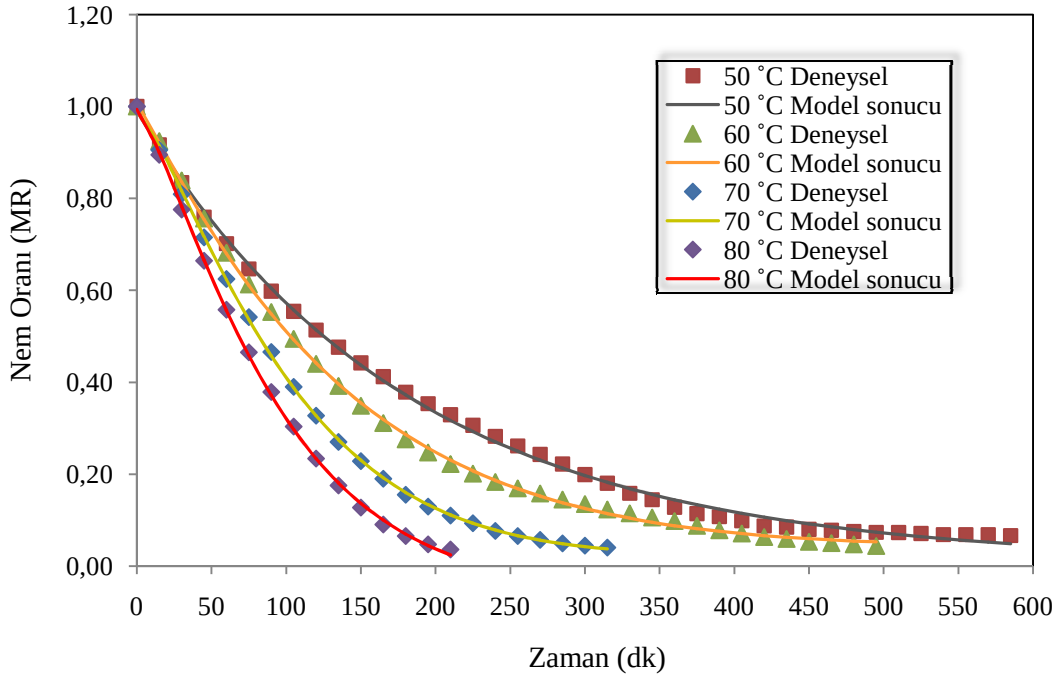
Şekil 5.33 Nem oranının zamanla değişimi (Alt tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.34 Nem oranının zamanla değişimi (Üst tepsi, 4 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.35 Nem oranının zamanla değişimi (Alt tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)



Şekil 5.36 Nem oranının zamanla değişimi (Üst tepsi, 6 mm dilim kalınlığı)

6. SONUÇ

Kivi meyvesinin kurutulması deneylerinde çeşitli hava şartlarının ve parametrelerin kuruma üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Kivinin kurutulmasında, 50, 60, 70, ve 80 °C için yapılan deneylerde sıcaklığın kuruma hızında oldukça etkili bir parametre olduğu, artan sıcaklık ile kuruma hızının arttığı, fakat dilim kalınlığının artması ile bu artış eğiliminin azaldığı görülmüştür. 70 °C kurutma havası sıcaklığının üzerine çıkıldığında, yüksek sıcaklığın üründe renk değişimlerine neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle kivi için yüksek sıcaklıklarda kurutma yapılması tavsiye edilmemektedir.

2. Kurutma deneylerinde, kurutma havası hızının kivinin kurumasına etkisini incelemek üzere, havanın 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s ve 2,0 m/s hızları için deneyler yapılmıştır. 0,5 ile 1,0 m/s hava hızının uygulandığı deneylerde 1,0 m/s hava hızında kuruma süresi, 0,5 m/s hava hızı deneyine göre % 50 azalırken 1,0 m/s' nin üstündeki değerlerde kuruma süresinde kayda değer bir kısalma olmamıştır. Bu nedenle 1,0 m/s' den daha büyük hava hızlarında kurutma yapılması ekonomik değildir denilebilir.

3. Düşük bağıl neme sahip kurutma havası ile yapılan deneylerde kuruma hızının daha yüksek, kuruma için gerekli sürenin de daha kısa olduğu belirlenmiştir. % 5 ve % 20 bağıl nemli kurutma havası ile yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında, düşük bağıl nemde kuruma daha hızlı gerçekleşmektedir.

4. Tüm parametreler için yapılan deneylerde şartlandırılmış hava ile ilk temas eden alt tepsideki kuruma hızının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

5. Farklı şartlarda, kivinin kuruma davranışını açıklamak üzere seçilen 4 modele ait istatistiksel veriler (R^2 ve RMSE) incelendiğinde, kivinin kurumasını açıklayan en iyi model Midilli ve ark. modeli olmuştur. Midilli ve ark. modelinde *(*MR = *a exp (-kt^n) + bt)* korelasyon katsayısı (R^2) 0,9759 ile 0,9999 arasında değişmektedir. Bu sonuç deneysel veriler ile hesaplanan değerlerin birbiri ile oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir.

6. Yapılan bu çalışmada kivi meyvesinin değişik şartlardaki kuruma karakteristikleri kullanılan deney seti ile incelenerek kurutma havası sıcaklık, hız ve bağıl neminin kurumaya etkileri belirlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda ise hem kivi hem de değişik tarım ürünleri için deneyler yapılarak kuruma şartlarına bağlı renk ve şekil değişimi analizleri ile duyusal tat analizi yapılacak ve bu sonuçlar ile ticari kurutma firmalarının yeni kurutucu tasarımlarına bilimsel veriler oluşturulacaktır.

7. KAYNAKLAR

Akpınar, E.K., Biçer Y., 2003, Siklon tipi bir kurutucuda kabağın kuruma davranışının incelenmesi, G. Ü. Fen Bilimleri Dergisi 16, 159-169.

Aktaş, M., Ceylan, İ.,Yilmaz, S., 2009, Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer, Desalination 239, 266–275.

Brooker, D. B., Bakker, Arkema, F. W., 1974, Drying cereal grains. The AVI Publishing Company, INC., Westport, Connecticut.

Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., 2007, Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits, Applied Thermal Engineering 27, 1931–1936.

Doğantan, Z.S., Tuncer, K., 1988, Kahramanmaraş kırmızı biberinin fiziksel ve kimyasal özellikleri saptanarak doğal koşullarda ve plastik örtü altı güneş toplayıcılarıyla kurutulması üzerine bir araştırma, Ç.Ü. Fen ve Mühendislik Fakültesi Dergisi, 1-18, Adana.

Devahastin, S., 2000, Mujumdar's practical guide to industrial drying, Exerges Corpotation, Montreal.

Ertekin C, 2002, Bazı sebze ve meyvelerin kurutulması, Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı, No: 1, 34-35, İzmir.

Genceli, O.F., 2005, Ölçme Tekniği Kitabı, Birsen yayınevi, İstanbul.

Hall, Carl W, P.E., 1980, Drying and storage of agricultural crops. The AVI Publishing Company, INC., Westport, Connecticut.

Kachru, R., Singh, K., 1994. Drying characteristics of pretreated gren gram (*Phaseolus Aureus*) drying, Proceding of the 9th İnternational Drying Symposium, Vol. B, 1093-1104.

Kaya, A., Aydın, O., Dincer, İ., 2008, Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (Actinidia Deliciosa Planch), Journal of Food Engineering 88, 323–330.

Madamba, P. S., Driscoll R. H., Buckle K. A., 1996, The thin–layer drying charecteristics of garlic slices, Journal Of Food Engineering, 29, 75 – 97.

Maskan, M., 2001, Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying, journal of Food Engineering 48, 169-175.

Midilli, A., 2001, Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system, Int J. Energy Reserch, 25, 715.

Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N., Soponronnarit, S., 2008, Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature, Journal of Food Engineering 85, 509–517

Ratti, C., Mujumdar, A.S., 1997, Solar drying of foods modeling and numerical simulation, Solar Energy, 60, 151–7.

Sarsavadia, P. N., Sawhney R. L., Pangavhane D. R., Singh S. P., 1999, Drying behaviour of brined onion slices, Journal Of Food Engineering, 40, 219-226.

Sacilik, K., Elicin A.K., 2006, The thin layer drying characteristics of organic apple slices Journal of Food Engineering 73, 281–289.

Vagenas, G., Marinos–Kouris, D., 1991, Drying kinetics of apricots, Drying Technology, 9, 735 – 752.

Velic D., Planinic M., Tomas S., Bilic M., 2004, Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying, Journal of Food Engineering 64, 97–102.

Yağcıoğlu, A., Değirmencioğlu, A., Çağatay, F., 1999, Drying characteristics of laruel leaves under different drying conditions, 7th International Congress on Agricaltural Mechanisation and Energy, 565-569, Adana.

Yağcıoglu, A., 1999, Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 536, İzmir.

Zhang, Q., Litchfield JB. 1991, An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer, Drying Technology 9, 83–95.

EKLER

Ek Çizelge 1. Havanın 50 °C sıcaklık. 0.5 m/s hız ve %10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	5.318	5.561	5.609	5.746
30	4.524	4.939	5.078	5.238
45	3.826	4.360	4.588	4.767
60	3.229	3.858	4.207	4.403
75	2.702	3.393	3.818	4.056
90	2.256	2.988	3.494	3.753
105	1.872	2.626	3.200	3.472
120	1.515	2.273	2.944	3.222
135	1.258	2.003	2.709	2.988
150	1.042	1.754	2.497	2.776
165	0.864	1.529	2.303	2.583
180	0.723	1.325	2.104	2.380
195	0.614	1.145	1.948	2.218
210	0.539	0.990	1.795	2.065
225	0.489	0.862	1.654	1.916
240	0.434	0.686	1.520	1.777
255	0.387	0.597	1.396	1.646

Ek Çizelge 1. Havanın 50 °C sıcaklık. 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri (Devam)

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
270	0.362	0.519	1.280	1.522
285	0.348	0.479	1.177	1.394
300	0.344	0.442	1.108	1.246
315	0.328	0.435	1.013	1.132
330	0.323	0.411	0.935	1.000
345	0.318	0.395	0.858	0.907
360	0.298	0.365	0.827	0.804
375		0.346	0.741	0.714
390		0.333	0.658	0.678
405		0.318	0.627	0.620
420		0.306	0.562	0.555
435		0.293	0.500	0.532
450			0.468	0.501
465			0.443	0.489
480			0.426	0.473
495			0.399	0.466
510			0.392	0.457
525				0.443
540				0.436
555				0.432

Ek Çizelge 2. Havanın 60 °C sıcaklık. 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	5.103	5.401	5.412	5.803
30	4.109	4.635	4.703	5.262
45	3.214	3.928	4.055	4.742
60	2.470	3.283	3.495	4.280
75	1.889	2.704	3.014	3.844
90	1.442	2.232	2.626	3.468
105	1.049	1.797	2.266	3.101
120	0.774	1.440	1.956	2.762
135	0.582	1.138	1.686	2.461
150	0.456	0.891	1.448	2.187
165	0.384	0.702	1.248	1.950
180	0.343	0.560	1.077	1.734
195	0.320	0.466	0.939	1.548
210	0.304	0.402	0.831	1.390
225	0.294	0.382	0.743	1.258
240	0.280	0.331	0.674	1.145
255	0.272	0.319	0.625	1.059
270	0.267	0.308	0.585	0.988

Ek Çizelge 2. Havanın 60 °C sıcaklık. 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri (Devam)

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
285	0.263	0.276	0.540	0.913
300	0.259	0.268	0.511	0.846
315		0.261	0.470	0.773
330		0.256	0.441	0.720
345		0.252	0.410	0.662
360			0.384	0.617
375			0.373	0.550
390			0.349	0.488
405			0.328	0.446
420			0.310	0.397
435			0.300	0.368
450			0.292	0.334
465			0.285	0.313
480			0.279	0.294
495				0.274

Ek Çizelge 3. Havanın 70 °C sıcaklık. 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	4.848	5.357	5.437	5.678
30	3.596	4.477	4.562	5.075
45	2.578	3.649	3.909	4.486
60	1.785	2.946	3.297	3.919
75	1.227	2.241	2.697	3.397
90	0.804	1.712	2.270	2.922
105	0.532	1.203	1.828	2.447
120	0.376	0.922	1.491	2.052
135	0.291	0.686	1.200	1.693
150	0.235	0.501	0.944	1.431
165		0.401	0.767	1.193
180		0.324	0.616	0.975
195		0.272	0.505	0.813
210		0.252	0.424	0.689
225			0.355	0.587
240			0.324	0.482
255			0.288	0.412
270			0.258	0.356
285				0.310
300				0.279

Ek Çizelge 4. Havanın 80 °C sıcaklık. 0.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	4.372	5.078	5.448	5.611
30	2.875	3.995	4.558	4.868
45	1.583	2.985	3.749	4.166
60	0.650	2.082	3.016	3.498
75	0.250	1.394	2.384	2.920
90	0.130	0.853	1.820	2.377
105		0.526	1.365	1.902
120		0.334	0.973	1.469
135		0.253	0.687	1.101
150			0.475	0.797
165			0.330	0.569
180			0.243	0.410
195				0.297
210				0.228

Ek Çizelge 5. Havanın 60 °C sıcaklık. 1.0 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	4.729	5.116	5.237	5.381
30	3.510	4.121	4.386	4.587
45	2.521	3.271	3.640	3.855
60	1.783	2.579	3.051	3.269
75	1.222	1.980	2.552	2.761
90	0.812	1.458	2.101	2.301
105	0.563	1.065	1.733	1.922
120	0.428	0.784	1.449	1.623
135	0.350	0.558	1.188	1.338
150	0.317	0.413	0.982	1.105
165	0.301	0.327	0.814	0.912
180	0.289	0.274	0.681	0.772
195	0.277	0.241	0.580	0.673
210	0.272	0.225	0.496	0.582
225	0.268	0.214	0.431	0.500
240		0.204	0.366	0.431
255		0.199	0.302	0.363
270			0.253	0.316
285				0.281
300				0.245

Ek Çizelge 6. Havanın 60 °C sıcaklık. 1.5 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	4.669	5.010	5.034	5.268
30	3.402	3.893	4.170	4.411
45	2.482	3.048	3.435	3.723
60	1.737	2.353	2.810	3.155
75	1.168	1.803	2.325	2.720
90	0.757	1.369	1.914	2.286
105	0.493	1.035	1.613	1.897
120	0.345	0.795	1.278	1.602
135	0.273	0.628	1.031	1.292
150	0.240	0.511	0.897	1.018
165		0.423	0.774	0.894
180		0.343	0.654	0.717
195		0.275	0.539	0.619
210		0.256	0.452	0.550
225			0.391	0.468
240			0.326	0.409
255			0.281	0.362
270				0.293
285				0.283

Ek Çizelge 7. Havanın 60 °C sıcaklık. 2.0 m/s hız ve % 10 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	4.682	4.959	4.948	5.154
30	3.367	3.880	4.013	4.367
45	2.381	3.055	3.328	3.721
60	1.680	2.418	2.788	3.150
75	1.085	1.892	2.302	2.628
90	0.741	1.473	1.902	2.165
105	0.432	1.109	1.547	1.848
120	0.266	0.828	1.251	1.585
135	0.223	0.652	1.013	1.310
150		0.471	0.856	0.995
165		0.361	0.725	0.885
180		0.261	0.625	0.683
195			0.516	0.612
210			0.408	0.522
225			0.356	0.446
240				0.379
255				0.356
270				0.326

Ek Çizelge 8. Havanın 60 °C sıcaklık. 1.0 m/s hız ve % 5 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	4.718	4.976	5.172	5.352
30	3.587	3.936	4.292	4.591
45	2.735	3.104	3.603	3.974
60	2.046	2.401	3.013	3.437
75	1.535	1.871	2.548	3.007
90	1.129	1.428	2.148	2.625
105	0.822	1.062	1.797	2.280
120	0.607	0.789	1.509	1.987
135	0.464	0.590	1.273	1.730
150	0.366	0.454	1.078	1.504
165	0.307	0.370	0.925	1.318
180	0.275	0.317	0.798	1.154
195	0.252	0.286	0.703	1.024
210		0.271	0.623	0.902
225		0.253	0.558	0.810
240			0.469	0.702
255			0.412	0.615
270			0.354	0.531
285			0.303	0.454
300			0.271	0.373
315				0.298

Ek Çizelge 9. Havanın 60 °C sıcaklık. 1.0 m/s hız ve % 20 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
0	6.273	6.273	6.273	6.273
15	5.315	5.395	5.537	5.660
30	4.454	4.560	4.835	5.077
45	3.732	3.834	4.233	4.545
60	3.079	3.144	3.676	4.034
75	2.552	2.604	3.233	3.613
90	2.052	2.132	2.839	3.229
105	1.614	1.723	2.479	2.873
120	1.238	1.363	2.146	2.535
135	0.994	1.085	1.856	2.235
150	0.823	0.862	1.595	1.961
165	0.665	0.693	1.368	1.714
180	0.513	0.582	1.173	1.489
195	0.435	0.493	1.009	1.288
210	0.363	0.425	0.870	1.107
225	0.303	0.372	0.745	0.970
240	0.260	0.318	0.688	0.874
255	0.215	0.281	0.598	0.772
270		0.247	0.541	0.698
285		0.219	0.489	0.639
300			0.433	0.580

Ek Çizelge 9. Havanın 60 °C sıcaklık. 1.0 m/s hız ve % 20 bağıl nem şartı için deneysel olarak elde edilen nem içeriği (N) değerleri (Devam)

Nem İçeriği (N_{kb}) gr_{su} / gr_{km}				
Zaman (dk)	ALT-4mm	ÜST-4mm	ALT-6mm	ÜST-6mm
315			0.380	0.529
330			0.350	0.472
345			0.310	0.421
360			0.279	0.376
375			0.255	0.321
390				0.275
405				0.222