



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VİYOL KURUTMADA KURUTMA HAVASI ÖZELLİKLERİNİN KURUTMA KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Mustafa AL-BAYATİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2017
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

VİYOL KURUTMADA KURUTMA HAVASI ÖZELLİKLERİNİN KURUTMA KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Mustafa AL-BAYATİ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şefik BİLİR
İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Selçuk DARICI

2017, 54 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Şefik BİLİR
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Yrd. Doç. Dr. Şükrü Ulaş ATMACA

Viyol (yumurta kolisi) üretim tesislerinde en fazla enerji tüketimi kurutma ünitesinde olur. Bu nedenle, viyol imalatının en önemli süreçlerinden birisi kurutma işlemidir. Bu çalışmada, yaş halde yaklaşık % 68'i su olan viyoller, konveksiyon tipi bir kurutucuda kurutuldu. Viyolün kuruma karakteristiklerini belirlemek için kurutma havasının 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s hız, 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklık ve % 9, % 18 ve % 27 bağıl nem değerlerinde deneyler yapılmış ve bu özelliklerin kurumaya etkileri incelenmiştir. Kurutma havasının % 9 bağıl nem, 1.5 m/s hız, 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarındaki deneylerden elde edilen nem oranı (MR) değerleri, literatürden 12 farklı kuruma modeli seçilerek EXCEL eğri uydurma programında kullanılmıştır. Modeller arasında Parabolik ile Wing ve Singh modelleri için en yüksek korelasyon katsayısı (R^2) ile en düşük hataların karelerinin toplamı (SSE) ve en düşük hataların karelerinin karekök ortalaması (RMSE) elde edilmiştir. Viyolün etkin difüzyon katsayıları (D_{eff}) belirlenmiş, aktivasyon enerjileri Arrhenius eşitliği ile hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Kuruma karakteristiği, Kuruma modeli, Viyol.

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF DRYING AIR PROPERTIES ON DRYING CHARACTERISTICS OF VIYOL

Mustafa AL-BAYATİ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY

THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Şefik BİLİR
Second Advisor: Asst. Prof. Dr. Selçuk DARICI
2017, 54 Pages

Jury
Prof. Dr. Şefik BİLİR
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Asst. Prof. Dr. Şükrü Ulaş ATMACA

The highest energy consumption in viol (egg tray) production facilities is in the drying unit. Therefore, the drying process is one of the most important processes of viol production. Viols with approximately 68% water in wet basis were dried under controlled conditions in a convective dryer. Experiments were conducted with drying air at 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 m/s velocities, 50, 60, 70 and 80°C temperatures and 9%, 18% and 27% relative humidities, and the effects of these properties on viol drying characteristics are investigated. Moisture ratio (MR) values, obtained from the experiments with drying air at 9 % relative humidity, 1.5 m/s velocity and 50, 60, 70 and 80°C temperatures are used in the EXCEL curve fitting program by selecting 12 different drying models from the literature. Among the models, the highest correlation coefficient (R^2) and the lowest sum of squared errors (SSE) and the root mean square error (RMSE) are obtained for the Parabolic and the Wing and Singh Models. The effective diffusion coefficients (D_{eff}) of the violes are determined and the activation energies are calculated by the Arrhenius equation.

Keywords: Drying, Drying Characteristics, Drying model, Viyol.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteklerini esirgemeyen, Sayın Danışman Hocalarım Prof. Dr. Şefik BİLİR'e ve Yrd. Doç. Dr. Selçuk DARICI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni hiç bir zaman yalnız bırakmayan babama, anneme ve abilerime de teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca yardımını hiç esirgemeyen değerli arkadaşım Makine Bölümünde Yük. Mühendis Jasim ALENZY'e ve arkadaşım M.Ziauhaq MAHMOOD 'a teşekkür ederim.

Mustafa AL-BAYATİ
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT v
ÖNSÖZ vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
ÇİZELGE LİSTESİ xi
SİMGELER VE KISALTMALAR xii
1. GİRİŞ 1
2. KURUTMA TEORİSİ VE YÖNTEMLERİ 3
2.1. Kurutma Teorisi 3
2.2. Kurutmanın Temel Kavramları 7
2.2.1. Nem İçeriği 7
2.2.2. Nem Oranı 7
2.2.3. Kuruma Hızı 7
2.2.4. Kurutma Verimi 8
2.3. Kurutmanın Matematiksel Analizi 8
2.4. Kurutma Sistemleri 11
2.4.1. Kızılötesi (İnfrared) Işınımlı Kurutma 11
2.4.2. Morötesi Radyason Kurutma 11
2.4.3. İletimle Kurutma 11
2.4.4. Dondurarak (Şoklama İle) Kurutma 11
2.4.5. Spray (Püskürtmeli) Kurutucular 12
2.4.6. Vakumda Kurutma 12
2.4.7. Döner Kurutucular 12
2.4.8. Taşınım İle Kurutma 12

2.4.9. Mikrodalga Kurutma..... 12
2.4.10. Dielektrik Kurutma..... 13
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI..... 14
4. MATERYAL VE YÖNTEM..... 17
4.1. Materyal..... 17
4.1.1. Deneylerde kullanılan ürün..... 17
4.2.Yöntem..... 18
4.2.1. Deney seti..... 18
4.2.2. Viyol hazırlanması ve deney yapılışı..... 20
4.2.3. Ağırlık ölçümünde kullanılan terazi cihazı..... 22
4.2.4. Dijital anemometre..... 23
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... 24
5.1. Kurutma Havası Hızının Kurumaya Etkisi..... 24
5.2. Kurutma Havası Sıcaklığının Kurumaya Etkisi..... 28
5.3. Kurutma Havası Bağıl Nem Değerinin Kurumaya Etkisi..... 33
5.4. Etkin difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi..... 36
5.5.Belirsizlik analizi..... 38
5.5.1. Nem içeriğindeki belirsizlik..... 39
5.5.2. Nem oranındaki belirsizlik..... 40
5.5.3. Kuruma hızındaki belirsizlik..... 40
5.5.4. Kurutma verimindaki belirsizlik..... 41
5.6. Matematiksel Modeller ile karşılaştırma..... 43
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 48
KAYNAKLAR..... 49
ÖZGEÇMİŞ..... 54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No **Sayfa No**

Şekil 2.1. Tarım Ürünlerinin Kinetik Kuruma Eğrileri 4

Şekil 4.1 Yumurta kolisi (viyol) 17

Şekil 4.2 Deney düzeneğinin şematik görünümü 18

Şekil 4.3 Deney düzeneğinin görünümü 19

Şekil 4.4 Viyol kurutmadan önce 21

Şekil 4.5 Viyol kuruduktan sonra 21

Şekil 4.6 Deneylerde kullanılan terazi 22

Şekil 4.7 Dijital anemometre 23

Şekil 5.1 Kuru baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (T=60°C, RH=% 9). 25

Şekil 5.2 Yaş baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (T=60°C, RH=% 9). 25

Şekil 5.3 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (T=60°C, RH=% 9). 26

Şekil 5.4 Kuruma hızının zamanla değişimi (T=60°C, RH=% 9). 27

Şekil 5.5 Kurutma veriminin zamanla değişimi (T=60°C, RH=% 9). 27

Şekil 5.6 Ortalama kurutma veriminin hava hızı ile değişimi (T=60°C, RH=% 9). 28

Şekil 5.7 Kuru baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (V=1.5 m/s, RH=% 9). 29

Şekil 5.8 Yaş baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (V=1.5 m/s, RH=% 9). 30

Şekil 5.9 Kuruma hızının zamanla değişimi (V=1.5 m/s, RH=% 9). 30

Şekil 5.10 Kuruma hızının kuru baza göre nem içeriği ile değişimi (V=1.5 m/s, RH=% 9). 31

Şekil 5.11 Kurutma veriminin zamanla değişimi (V=1.5 m/s, RH=% 9). 32

Şekil 5.12 Ortalama kurutma veriminin sıcaklıkla değişimi (V=1.5 m/s, RH=% 9). 32

Şekil 5.13 Kuru baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (T=60°C, V=1.5m/s). 33

Şekil 5.14 Yaş baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (T=60°C, 34

V=1.5m/s).
Şekil 5.15 Kuruma hızının zamanla değişimi (T=60°C, V=1.5m/s). 34
Şekil 5.16 Kuruma hızının kuru baza göre nem içeriği ile değişimi (T=60°C, V=1.5m/s). 35
Şekil 5.17 Kurutma veriminin zamanla değişimi (T=60°C, V=1.5m/s). 35
Şekil 5.18 Ortalama kurutma veriminin bağıl nem ile değişimi (T=60°C, V=1.5m/s). 36
Şekil 5.19 Etkin difüzyon katsayısı ile kurutma havasının ters mutlak sıcaklığı arasındaki ilişki(1.5m/s, RH = % 9). 38
Şekil 5.20 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9). 45
Şekil 5.21 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9). 46
Şekil 5.22 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9). 46
Şekil 5.23 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9). 47
Şekil 5.24 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9). 47

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No	Sayfa No
Çizelge 2.1: Kullanılan kurutma modelleri	9
Çizelge 4.1: Deneylerde kullanılan cihazların teknik özellikleri	20
Çizelge 4.2: Seçilen deney şartları	22
Çizelge 5.1 : Viyolün difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjisi	37
Çizelge 5.2 :Deneylerdeki ölçme hataları	39
Çizelge 5.3:Tüm deney şartlarında hesaplanan belirsizlikler.	42
Çizelge 5.4: Matematik modeller kullanılarak hesaplanan değerler (1.5 m/s kuruma hava hızı, % 9 bağıl nem)	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Sembol	Açıklama	Birim
a, b, c, d, e, f, g, h	Model katsayıları	
D_0	Referans noktasında difüzyon katsayısı	m / s^2
D	Difüzyon katsayısı	m / s^2
DR	Kuruma hızı	g_{su} / g_{km} dk
E_a	Aktivasyon enerjisi	kJ/mol
K	Eğim	
k, k_0, k_1	Kuruma sabitleri	s^{-1} veya h^{-1}
L	Levha yarı kalınlığı	m
m	Kütle	g
M	Nem içeriği	g_{su} / g_{km}
MR	Boyutsuz nem oranı	
n	Model denklemlerindeki üsteller	
N	Gözlem sayısı	
R	Hesaplanan büyüklük	
R^2	Korelasyon katsayısı	
RH	Bağıl nem	%
RMSE	Hataların karelerinin karekök ortalaması	
R_u	Evrensel gaz sabiti	kJ/mol.K
SSE	Hataların karelerinin toplamı	
t	Zaman	dakika
T	Mutlak sıcaklık	K
V	Hava hızı	m/s
W	Hata değeri	±
x	Ölçümü etkileyen bağımsız değişken.	
Δt	Kuruma zamanı	dakika
η	Kurutma verimi	%

İndisler

Sembol	Açıklama
0	Başlangıç
d	Denge
DR	Kuruma hızı
M_{kb}	Kuru bazda nem içeriği
MR	Nem oranı
η	Kurutma verimi

deneysel	Deneysel
model	Model
R	Toplam
eff	Etkin
f	Son
i	İlk
k	Kuru
n	Bağımsız değişken adedi
kb	Kuru baz
su	Su
t	t anında
t+Δt	(t+Δt) anında
y	Yaş
yb	Yaş baz

Kısaltmalar

AHE	Azalan hızla kuruma evresi
BKN	Birinci kritik nokta
IE	Isınma evresi
İKN	İkinci kritik nokta
km	Kuru madde
MW	Mikrodalga
SHE	Sabit hızla kuruma evresi

1. GİRİŞ

Günümüzde doğal enerji kaynaklarının azalması nedeniyle farklı yöntemler üzerinde çalışmalar yapmak, farklı sistem ve teknikler geliştirmek ve sonuçta mevcut enerji tüketimini azaltmak, enerjiyi verimli kullanmak için önemli adımlardır. Genellikle doğal enerji kaynakları (kömür, doğal gaz vb) kurutma sistemlerinde tüketilen enerjinin büyük bir kısmını oluşturur (Ekin 2013).

Kurutma, bir madde içerisindeki suyun çeşitli yöntemler kullanılarak uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir. Bu işlemde amaç, nemli maddedeki serbest suyu uzaklaştırarak istenilen nem düzeyinde ve özellikte ürünün elde edilmesini sağlamaktır. Atık kağıtlardan elde edilen yumurta kolilerinin, doğal yöntemler ile kurutulmasında hem uzun zamana hem de geniş bir alana ihtiyaç vardır. Bu nedenle kurutma işleminin çeşitli kurutma yöntemlerini kullanan makinalar ile yapılması kaçınılmazdır.

Bu çalışmada amaçlanan, atık kâğıtlardan yapılan viyollerin kurutulması ve kurutma havası hızının, sıcaklığının ve bağıl neminin farklı değerlerinde denemeler yapılarak viyolün kuruma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesidir.

Yumurta kolisinin hammaddesi atık ve iade kâğıtlardır ve içerisine çok az miktarda alüminyum oksit ve parafin katılarak elde edilmektedir. Hamur haline getirilen karışım, kalıplarda viyol şeklini aldıktan sonra kurutma işlemi için ya serilmekte ya da çeşitli enerji kaynağı kullanan fırınlara gönderilmektedir. Elde edilen bu yaş ürünün kurutulmasında havanın sıcaklığı, hızı ve bağıl neminin kuruma süresi ve etkinliği açısından önemi çok büyüktür. Bu nedenle viyol kurutma karakteristiklerinin, çeşitli kurutma şartlarından hangi ölçüde etkilendiğinin bilinmesi zaman, kalite ve enerji tüketimi açısından önem arz etmektedir.

Kurutma işlemine tabi tutulacak viyolün en doğru biçimde ve ekonomik olarak kurutulabilmesi için, viyolün özelliklerinin bilinmesi ve o viyol için uygun kurutma tekniklerinin, kurutma verilerinin ve kullanılacak kurutma modelinin tespitinin doğru yapılması gerekmektedir. Viyol kalitesini etkilememek şartı ile, kurutma prosesinin olabildiğince hızlı bir şekilde yapılması ile, bu işlem için tüketilen enerji miktarı en aza indirilebilir.

Yapılacak deneyler ile viyollerin kuruma karakteristik eğrilerinin, optimum kurutma şartlarının belirlenmesine çalışılacaktır. Elde edilecek sonuçlar ile kurutulacak viyollerin kalitesinde de artış olabilir. Bu çalışma ile, viyoller için uygun şekilde ekonomik kurutma koşullarının belirlenmesi, söz konusu ürüne dayalı ticari faaliyetleri artırabilir.

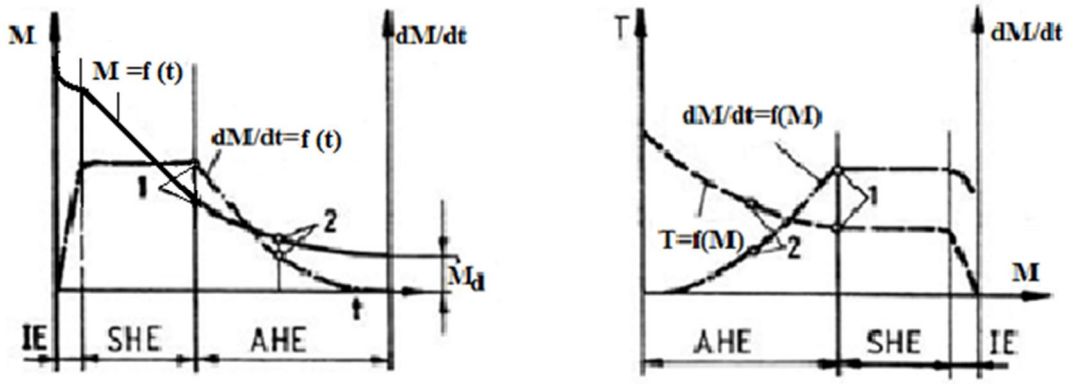
2 KURUTMA TEORİSİ VE YÖNTEMLERİ

2.1. Kurutma Teorisi

Kurutma, katı yüzeyine ısı transfer edilerek suyun buharlaşması yolu ile gerçekleştirilir. Isı gözeneklerindeki nemin buharlaşmasına harcanır. Kurutma işleminde kütle ve ısı transferi aynı anda gerçekleşmektedir. Isı ve kütle transferi işlemlerinin her ikisi de kuruma hızının çözümlenmesinde etken faktörlerdir. Bu iki olay incelenirken; katı bünyesindeki sıvının katı yüzeyine gelmesi sürecinde oluşan iç difüzyon ve kılcallık gibi koşullar ve kurutucu gazın hızı, sıcaklığı ve nemi gibi dış koşullar ele alınır.

Kurutma yöntemi genel olarak gerekli ısının transfer yöntemine dayanmaktadır. Buna göre kontakt kurutma, konveksiyonla kurutma ve radyasyonla kurutma olmak üzere başlıca üç kurutma yöntemi mevcuttur.

Konveksiyonla kurutmada suyun buharlaşması için gerekli ısı, bir gaz tarafından yani çoğunlukla hava tarafından taşınır. Sıcak hava kurutulacak maddenin içinden, üzerinden ve arasından geçirilir. Bu yöntem genellikle sıcak hava ile kurutma tekniği olarak bilinir. Kontakt kurutma yönteminde ise, ürünün içindeki suyun buharlaşması için gerekli ısı iletim ile taşınır. Yani kurutulacak madde hareketsiz kalırken veya hareket ederken bu sırada temas ettiği sıcak yüzeyden maddeye ısı taşınır. Radyasyonla kurutmada kurutulacak maddeye ısı, herhangi bir maddi taşıyıcıya ihtiyaç duyulmaksızın, radyasyon kaynağından ulaştırılır. Gıda kurutmada bu yöntemin kullanımı pek yaygın değildir. Şekil 2.1’ de tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri verilmiştir.



Şekil 2.1 Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri (Yağcıoğlu 1999).

Şekilde görüldüğü gibi, kuruma olayının kinetik olarak belirlenmesi için aşağıda belirtilen karakteristikler arasındaki ilişkiler dikkate alınmaktadır:

- Kuruma süresi ile materyalin nemi: M=f(t)
- Materyalin nemi ile kuruma hızı: dM/dt=f(M)
- Kuruma süresi ile kuruma hızı: dM/dt=f(t)
- Materyalin nemi ile sıcaklığı: T=f(M)

Kuruma olayının gerçekleşmesi esnasında üç evre ile karşılaşılmaktadır. Bu evreler;

- Materyalin ısınma evresi (IE),
- Sabit hızla kuruma evresi (SHE),
- Azalan hızla kuruma evresi (AHE)'dir.

Isınma evresi (IE) kuruma başlangıcında, kurutulacak ürünün sıcaklığı, kurutma ortamının sıcaklığı ile dengeye gelinceye kadar sürmektedir. Bu evrede kuruma hızı artarak bu evrenin nihayetinde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu evre kuruma eğrilerinde bazen gösterilmemektedir. Çünkü ısınma evresi (IE) süresi, toplam kurutma süresine göre çok kısadır.

Kurutulacak materyalin yüzeyi sabit hızla kuruma evresinde (SHE) başlangıçta ince bir su tabakası ile kaplıdır. İlk kez bu su tabakası buharlaşmaya başlar. Ürünün

özelliklerine bağlı olmayan bu buharlaşma, tamamen dış hava koşulları ile belirlenir ve herhangi bir serbest su tabakasının yüzeyinden olduğu gibi nemli malzemenin yüzeyinden buharlaşmaktadır. Serbest su tabakasının yüzeyi sabit bir kuruma hızı ile buharlaşırken sürekli olarak hücre aralarındaki hava boşluklarının meydana getirdiği kılcal borularla beslenmektedir, başka bir ifadeyle, sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, yüzeyden buharlaşan suyun hızı ile suyun materyal yüzeyine iletim hızı birbirine eşit olmaktadır.

Materyalin iç kısımlarından yüzeye doğru sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, bir nem taşınması söz konusu olduğundan, iç katmanlardaki nem miktarı giderek azalmaktadır. Bu nedenle, materyalin yüzeyinden birim zamanda buharlaşarak ayrılan suya eşit miktarda su, artık iç kısımlardan yüzeye taşınamamaktadır. Bunun nihayetinde, serbest su ile materyalin yüzeyinin tamamen kaplanması durumu sona ermektedir. Materyalin bu anda sahip olduğu nem düzeyine birinci kritik nem ve kuruma eğrilerinde bu durumu belirleyen noktaya ise birinci kritik nokta (BKN) denir. Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere, sabit hızla kuruma evresi (SHE), ısınma evresi (IE) ile birinci kritik nokta (BKN) arasında yer almaktadır.

Tarım ürünlerinin, özellikle tahılların, hasat esnasında sahip oldukları nem genellikle birinci kritik nokta BKN değerinden daha azdır. Bu nedenle, meyvelerin ve sebze dışında kalan çoğu tarım ürününün kurutulmasında sabit hızla kuruma evresi (SHE) görülmemektedir. Birinci Kritik Nokta (BKN) değerinden sonra, azalan yönde kuruma eğrisinin eğimi hızla değişim göstermektedir. Kuruma hızının zaman içinde, bu noktadan itibaren giderek azaldığı başka bir faz başlamaktadır. Bu faz, birim zaman aralıklarında buharlaşan nem miktarının bir önceki zaman dilimine göre azalma göstermesi sebebiyle, azalan hızla kuruma evresi (AHE) olarak tanımlanmaktadır.

Azalan hızla kuruma evresi kendi içerisinde iki aşamada gerçekleşmektedir. Materyalin yüzeyindeki su filmi kaybolmaya başlayınca, kuruma hızı da su alanı miktarı ile orantılı olarak azalma göstermektedir. “1. azalan hızla kuruma evresi” bu evreye denilmektedir. Bu evre nihayetinde, suyun materyalin iç kısımlarından yüzeye iletim hızı, yüzeyden meydana gelen buharlaşma hızından daha küçük olduğundan, materyalin yüzeyinin ince su tabakası tamamen ile kaplanması durumu ortadan kalkmaktadır. Kuruma hızı bu andan itibaren daha da yavaşlamakta ve “2. azalan hızla

kuruma evresi" başlamaktadır. Bu evre nihayetinde, çevrenin sıcaklığı ile materyal sıcaklığı eşit duruma gelerek, M=f(t) eğrisi M_d asimptot değerine, dM/dt =f(M) eğrisi ise sıfır değerine ulaşmaktadır.

Azalan hızla kuruma evresi (AHE) esnasında, kuruma hızı değişiminin doğrusallıktan sapmaya başladığı nokta ikinci kritik nokta (İKN) ve materyalin bu andaki nem değeri ise " ikinci kritik nem" olarak adlandırılmaktadır.

Eğer kurutmaya tabi tutulacak malzemenin başlangıçtaki nem miktarı, kritik nem miktarından daha düşükse, tüm kurutma prosesi azalan hızda kurutma olarak gerçekleşir.

Nemin malzeme içerisindeki hareketleri çok karmaşık olup, kontrol mekanizması ile ilgili temel bilgiler yetersiz kalmaktadır. Kurutma hızında sınırlayıcı faktörler genel olarak iki ana gruba ayrılabilir. Bunlar;

a) Malzeme yüzeyindeki statik hava film tabakasından geçmek suretiyle yüzeydeki suyun, kurutma havasına karışma hızı,

b) Yüzey tabakalarının sertleşmesi veya büzülmesi sonucu nem akışına engel olma veya malzemeye muhtelif nedenler sonucu zarar verme gibi durumlar yaratmaksızın malzemeden nem uzaklaştırma hızıdır.

Kurutma uygulamalarında deneyimlere dayanarak, minimum kurutma süresi ve dolayısıyla en az enerji kullanımı sağlayacak dış faktörleri oluşturmak mümkündür (Yağcıoğlu 1999).

2.2. Kurutmanın Temel Kavramları

2.2.1. Nem içeriği

Nem içeriği, ürün içerisinde bulunan su miktarı, "Yaş baz" (yb) ve "Kuru baz" (kb) olmak üzere iki şekilde belirtilmektedir. Yaş baza göre nem içeriği, ürün içerisinde bulunan suyun kütlesinin toplam kütleye oranı olarak ifade edilir.

$$M_{yb} = \frac{m_y}{m_y + m_k} \tag{2.1}$$

Kuru baza göre nem içeriği , ürün içerisinde bulunan suyun kütlesinin kuru madde kütlesine oranı olarak tanımlanır (ASAE 1982).

$$M_{kb} = \frac{m_y}{m_k} \tag{2.2}$$

2.2.2. Nem oranı

Kuruma sırasında herhangi bir t anında üründe kalan buharlaşabilecek nem içeriğinin, M_t, başlangıç anındaki nem içeriğine, M_0, oranına nem oranı (MR) denir. Nem oranı eşitlik (2.3) ile hesaplanabilir.

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \tag{2.3}$$

2.2.3. Kuruma hızı

Kuruma hızı ürünün kurutulmasında nem içeriğinin birim zamanındaki değişimidir. Kuruma hızı (2.4) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \tag{2.4}$$

Burada M_t kuru baza göre t anındaki, $M_{t+\Delta t}$ $t + \Delta t$ anındaki nem içeriğidir.

2.2.4. Kurutma verimi

Kurutma verimi viyolde bulunan başlangıç su miktarının ne kadarlık bir yüzdesinin viyolden uzaklaştırdığını belirtir ve eşitlik (2.5) ile hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{m_i - m_f}{m_{su}} \quad (2.5)$$

Burada m_i viyolün ilk durumdaki kütlesi, m_f kurutmadan sonraki kütlesi ve m_{su} ise viyolde ilk durumda bulunan su kütlesidir (Durmuş, Bilen et al. 2012).

2.3. Kurutmanın Matematiksel Analizi

Bu çalışmada, viyolün kuruma davranışına en uyumlu modeli belirlemek için literatürde mevcut bazı matematik modeller kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, viyolün kuruma işleminin azalan hız bölgesinde olduğunu göstermektedir. Buna göre viyol içindeki nem hareketi Fick'in ikinci difüzyon yasası ile ifade edilebilir (Crank 1975).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

Bu diferansiyel denklemin çözümü aşağıdaki gibidir (Pakowski and Mujumdar 1995).

Sınır şartları :

$t = 0, -L < X < L, M = M_0$

$t > 0, X = \pm L, M = M_d$

$$MR = \frac{M - M_d}{M_0 - M_d} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{D_{eff}\, t}{L^2}\right] \quad (2.7)$$

Bulunan serinin yalnız ilk terimi gözönüne alındığında azalan hız bölgesinde boyutsuz nem oranının (MR) zamana göre değişimini veren bir eşitlik elde edilir (Özdemir and Devres 1999, Turkut, Çakmak et al. 2015). Burada elde edilen matematik serinin çözümünde her hangi bir t anında ürün içindeki basınç ve sıcaklığın sabit olduğu kabul edilerek sadece difüzyon katsayısı dikkate alınmıştır. Bu kabuller ışığında sonsuz

levha için serinin sadece ilk terimi alındığında (2.8) denklemi (Çakmak, Kumcuoğlu et al. 2014, Turkut, Çakmak et al. 2015) elde edilmiştir.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff}\, t}{4L^2}\right] \quad (2.8)$$

Viyoldeki buharlaşma hem alt hem de üst yüzeyden olduğu için L, difüzyonun gerçekleştiği viyol kalınlığının yarısı, L=1 mm, alınmıştır.

Deney sonuçlarının, model sonuçları ile kıyaslanması için literatürden oniki farklı model seçilerek (Çizelge 2.1), EXCEL programında eğri uydurma işlemi yapılmıştır. Her model için SSE (hataların karelerinin toplamı), R^2 (korelasyon katsayısı) ve RMSE (hataların karelerinin karekök ortalaması) hesaplanmıştır. SSE ve RMSE sırası ile denklemler (2.9) ve (2.10) ile hesaplanmıştır (Turkut, Çakmak et al. 2015).

$$SSE = \sum_{i=1}^{N} (MR_{i,deneysel} - MR_{i,model})^2 \quad (2.9)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (MR_{i,deneysel} - MR_{i,model})^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

Çizelge 2.1: Kullanılan kurutma modelleri

Model adı	**Denklem**	**Kaynak**
Newton	MR = exp(-k t)	(El-Beltagy, Gamea et al. 2007)
Page	MR = exp (-k t^n)	(Akoy 2014, Tzempelikos, Vouros et al. 2015)
Henderson ve Pabis	MR = a exp(-kt)	(Meisami-Asl, Rafiee et al. 2010, Hashim, Daniel et al. 2014)
Modified Henderson ve Pabis	MR = a exp(-kt) + b exp(-gt) + c exp(-ht)	(Zenoozian, Feng et al. 2008)
Logarithmic	MR = a exp(-kt) + c	(Rayaguru and Routray 2012, Kaur and Singh 2014)
Two term	MR = a exp($-k_0$t) + b exp($-k_1$t)	(Sacilik 2007)
Two term exponential	MR = a exp(-kt) + (1-a) exp (-kat)	(Dash, S. Gope et al. 2013)
Verma ve ark.	MR = a exp(-kt) + (1-a) exp (-gt)	(Akpinar 2006)
Wang ve Singh	MR = 1 + at + bt^2	(Wang and Singh 1978)
Parabolic	MR = a + bt+ ct^2	(Sharma and Prasad 2004, Doymaz 2010)
Midilli ve ark.	MR = a exp($-kt^n$) + bt	(Midilli A., Kucuk et al. 2002)
Diffusion approach	MR = a exp(-kt) + (1 - a)exp(-kbt)	(Yaldiz and Ertekin 2001)

D_{eff} (2.11) denkleminden viyolün deneysel kuruma eğrileri uygulanarak, ln (MR) 'nin zamana bağlı grafiğinin eğiminden hesaplanmaktadır.

$$K = [\frac{(\pi^2 D_{eff})}{4 L^2}] \quad (2.11)$$

Burada:

K: Zamana bağlı Ln (MR) 'nin grafik eğimi.

Etkin difüzyon katsayısı kurutma havası sıcaklığı ve ürünün fiziksel özelliklerine bağlıdır. Etkin difüzyon katsayısının sıcaklık ile ilişkisi literatürde Arrhenius denklemi (2.12) ile ifade edilmektedir (Turkut, Çakmak et al. 2015). Viyolün aktivasyon enerjisi bu denklemden hesaplanmaktadır.

$$D_{eff} = D_0 \exp(-\frac{E_a}{R_u T}) \quad (2.12)$$

Burada:

D_0: Referans noktasında difüzyon katsayısı (m/s^2)

E_a: Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)

T: Mutlak sıcaklık (K)

R_u: Evrensel gaz sabiti.($8.314x10^{-3}$ kJ/mol. K).

2.4. Kurutma Sistemleri

2.4.1. Kızılötesi (İnfrared) Işınımlı Kurutma

Isıl ışınım, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar, gaz ısıtmalı akkor yansıtıcılar ve elektrikle ısıtılmış yüzeylerde sağlanır. Bu mekanizma sadece malzemenin yüzeyi civarında etkilidir. Bu sebeple ince levha şeklindeki malzemelerin kurutulması için uygundur (Günerhan 2005).

2.4.2. Morötesi Radyasyon Kurutma

Bu tip kurutmada elektromagnetik morötesi radyasyon kullanılır. Gıda maddeleri ultraviyole radyasyon etkisinde kurutulurlar. En büyük sorun yüksek yatırım maliyetidir (Şen 2010).

2.4.3. İletimle Kurutma

İletim ile kurutma uygulamasında ısı yüzeyinden geçerek nemli ürüne ulaşır. Isıtılan yüzey ürün ile temastadır ve malzemenin aşırı ısınmasını önlemek ve ısının homojen dağılmasını sağlamak için önlemler alınmalıdır. İletim ile kurutma sistemleri genellikle kâğıt ürünlerinin kurutulmasında uygulanmaktadır. Yüksek kuruma hızı ve üniform olmayan kütle ve ısı transfer koşulları, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri nedeniyle çok fazla tercih edilmemektedir (Günerhan 2005).

2.4.4. Dondurarak (Şoklama ile) Kurutma

Dondurarak kurutma, eczacılık ürünleri, bakteri ve virüs kültürleri, serumlar, kahve ve çay özleri, meyve suları, sebzeler, deniz ürünleri, et ve süt üretiminde uygulanır. Malzeme önce dondurulur, sonra düşük sıcaklıkta bir yoğuşturucu veya kimyasal kurutucuya bağlı yüksek vakumlu bir hacme alınır. Kızılötesi ışınım ile veya dondurulan malzemeye iletim ile ısı geçişi sağlanır. Su süblimleşir ve yoğuşur veya kimyasal kurutucu ile soğurulur. Genellikle dondurarak kurutma düşük basınçlar altında -l0 °C ile -40 °C arasında uygulanır. Bu yöntem yavaş ve pahalı olmasına rağmen, ısıya duyarlı malzemeler için uygundur.

2.4.5. Sprey (Püskürtmeli) kurutucular

Püskürtmeli kurutucular genellikle kahve, süt tozu, sabun ve deterjan üretiminde uygulanmaktadır. 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 (Şen 2010).

2.3.6. Vakumda kurutma

Bu tip kurutucu, düşük basınçlarda suyun daha düşük sıcaklıklarda buharlaşması gibi bir avantaja sahiptir. Ürün kapalı bir kap içine yerleştirerek kabin havası vakumla alınmaktadır. Vakumda kurutma kâğıt sanayinde kullanılmaktadır (Anonim 2010).

2.4.7. Döner kurutucular

Bu tip kurutucular direkt veya indirekt ısıtmalı olacağı gibi, hava akımı zıt veya paralel akışlı olarak uygulanabilir. Kurutulacak malzeme döner silindir içinde hem serbest düşmeyle, duşlama benzeri, silindir alt yüzeyine düşer, hem de taşınır. Malzeme sıcak gaz akımı ile temas ederek kuruma işlemi yapılır. Döner kurutucularda genellikle sıcak gazlar önce iç gövde ve sonra iç ve dış gövde arasından geçer ve nemli katı madde ile temas eder (Feyzioğlu 2011).

2.4.8. Taşınım ile kurutma

Taşınım ile kurutma bütün kurutucuların genelinde bir miktar gerçekleşmektedir. Isı kaynağı olarak sıcak hava veya diğer gazlar kullanılır.

2.4.9. Mikrodalga kurutma

Mikrodalga kurutma, çeşitli gıdalar, şeker, kırmızıbiber, nane, kayısı, çay, ağaç, seramik ve tekstil endüstrilerinde uygulanmaktadır. Mikrodalga kurutmada çok yüksek frekanslı (900 ile 5000 MHz) güç kaynağı kullanılır. İletken olmayan maddelerin ısıtılmasına uygulandığından bir dielektrik ısıtma formu olarak düşünülebilir. Bu tip

kurutma şerit biçimindeki ince malzemelere uygulanır. Sistemin girişi ve çıkışında alınması gerekli koruyucu önlemler sürekli çalışmayı zorlaştırır ve dielektrik kurutmaya göre daha pahalıdır.

2.4.10. Dielektrik Kurutma

Islak malzeme yüksek frekanslı bir elektrostatik alana yerleştilirse, malzeme içinde ısı üretilir. Kuru bölgelerde nemli bölgelere göre daha az ısı üretilir. Malzeme içinde nem profili otomatik şekilde düzenlenir. Malzeme içindeki su aşırı derecede ısıtmaksızın buharlaşır (Güngör and Özbalta 1997) .

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

(Akarslan 2007), hazırladığı kurutma düzeneği ile yaptığı deneysel çalışmalarda altı farklı kumaş örneklerini 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarda kurutmaya tabi tutmuştur. Yazar, elde ettiği sonuçları kullanarak kumaşların kuruma hızlarının zamana, sıcaklığa ve kumaşın iplik numarasına bağlı değişimini bulanık mantık yardımı ile analiz etmiştir.

(Coumans and Kruf 1995), konvansiyonel sürekli çok silindirli kurutucularda 120 °C sıcaklıkta kurutma sırasında kâğıdın büzülme davranışını incelemişlerdir. Kurutma işlemi sırasında kağıt büzülmesi için bir çekme katsayısı ve katı tabanlı parametreler tespit edilmiştir.

(Ekin 2013), enerji, zaman, maliyet ve makinanın kapladığı alandan tasarruf sağlamak için yumurta viyolünün farklı magnetron çıkış güçleri, bant hızları, fan hızları ve fırın sıcaklıklarında mikrodalga-fan destekli konveksiyon ısıtma sisteminde kuruma deneylerini yapmıştır. Deneyler sonucunda mikrodalga ve konveksiyon ısıtma yapılan kombine kurutmanın en uygun yöntem olduğu görülmüştür.

(Goerz Jr and Jolly 1967), tarafından kağıdın kurutulması üzerine yapılan deneylerde, konvansiyonel sistem ile mikrodalga (MW) sistem karşılaştırılmış, MW ile kurutma sisteminin ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasına rağmen toplam işletme maliyetlerinin daha düşük olduğu bulunmuştur. Mikrodalga ile kâğıdın kurutulmasında % 15-20 nem oranına daha verimli bir şekilde ulaşılmıştır. Aynı zamanda kâğıt üretim makinesinin toplam uzunluğunda % 30 azalma olacağı hesaplanmıştır.

(Gölcü and Şen 2014), çalışmalarında, kalıplara dökülen viyol hamurunun içinde bulunan suyu uzaklaştırmak için özel bir prototip konveyörlü mikrodalga fırın sistemi tasarlamış ve imal etmişlerdir. Deneyler sonucunda magnetron gücünün artması ile nem oranının azaldığı dolayısı ile viyolün kuruma süresinin kısaldığı görülmüştür.

(Hansson and Antti 2003), tarafından yapılan ve Norveç ladin ağacının MW ve konvansiyonel hava ile kurutulmasının ağacın dayanımına etkisinin karşılaştırıldığı çalışmada, her iki kurutma yöntemi ile ağacın dayanım gücünde hiçbir farklılık olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

(Kachru R. and Singh K. 1994), çizme ve ıslatma gibi ön işlemlere tabi tutulmuş yeşil fasulyelerin farklı kurutma havası sıcaklığı ve hızlarında kurutma karakteristiklerini incelemişlerdir. Kurutma havası sıcaklıkları 20-55 °C, hızları ise 0.8-2.0 m/s arasında seçilmiştir. Araştırma sonuçları, yeşil fasulyelere kurutma öncesi ön işlem uygulanmasının, kuruma süresini önemli oranda azalttığını ve ön işlem uygulanan fasulyelerin nem içeriğini % 55'den % 10'a düşürmek için ortalama 6 saat süre gerektiğini göstermektedir.

(Kalender 2013), mikrodalga ile yumurta viyolü için yaptığı kurutma deneylerinde sabit, artan ve azalan mikrodalga güçlerinde ve farklı bant hızlarında olmak üzere üç ayrı durumda kurutma işlemi gerçekleştirmiştir. Mikrodalga ile kurutma sistemlerinde ısı doğrudan kurutulan malzeme içerisine etki etmekte ve ortamın ısınmasına gerek duyulmadığından kurutma işlemi geleneksel kurutma yöntemlerine göre daha üniform ve hızlı olmaktadır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, mikrodalga çıkış gücü arttıkça bant hızına bağlı olarak viyolden uzaklaştırılan nem oranı artmakta ve sabit mikrodalga gücünde bant hızı arttıkça buharlaştırılan nem oranı azalmaktadır.

(Kumar, Mujumdar et al. 1990), 400 ve 700 W gücündeki MW kurutma sisteminde kâğıdın fiziksel ve görsel özelliklerini belirlediği deneysel çalışmada açık hava ve silindir ile yapılan kurutma ile karşılaştırma yapmıştır. Çalışma sonucunda, MW kurutma sisteminin diğer kurutma sistemlerine göre kağıdın yapısal dayanıklılığını % 5-7 artırdığı, yoğunluğunu % 2-4 arttırdığı, kopma uzama miktarının aynı yoğunlukta daha fazla olduğu, yırtılma indexlerinin üç yöntemde de değişmediği görülmüştür. Sonuç olarak MW kurutma sisteminin daha iyi kalitede kurutma işlemini gerçekleştirdiği belirlenmiştir.

(Özgen 2014)'in yaptığı çalışmada, elmanın kuruma özelliğini tespit etmek için konvektif bir kurutucu tasarlanıp imal edilmiştir. Deneylerde, 20x20x4 mm ebatlarında elma örnekleri kullanılmış, kuruma özelliğini etkileyen parametreler olarak havanın sıcaklığı 45°C ve hızı ise 0.5, 1.0 ve 1.5 m/s alınmıştır. Çalışmada, kurutma hava hızının toplam kuruma süresi üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür.

(Şen 2010), 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 yaparak, kurutma havası sıcaklığı, hızı ve bağıl neminin kurumaya etkilerini araştırmıştır. Deneylerden elde edilen nem oranı 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.

(Vieira, Estrella et al. 2007), yaptıkları çalışmada hava sıcaklığı ve hızının geri dönüşüm kağıt hamurunun kuruma kinetiği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Her iki parametrenin artışı da ürünün son nem içeriğini ve kuruma zamanını etkilemiştir. Optik ve görsel gözlemler sonucunda, yüksek hava sıcaklığı ve hızlarında kâğıt kalitesinin kötüleştiği belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca kurutucunun enerji verimliliği incelenmiş ve sonuçlar endüstrideki diğer kâğıt kurutma yöntemleriyle ilgili bir çalışmanın sonuçları ile kıyaslanmış ve uyum içinde olduğu görülmüştür.

(Yakut and Temir 2012), yaptıkları çalışmada, bir kâğıt üretim tesisinin kurutma ünitesine % 49 kuruluk derecesinde giren kâğıdın, pabuç pres ünitesi uygulanması ile kuruluk derecesi % 55'e yükseltildiğinde, hesaplamalara göre 8 adet daha az buharla ısıtılan kurutma silindiri ile istenilen kuruluk derecesinde kâğıt elde edilebildiği belirlenmiştir. Kurutma ünitesindeki pabuç pres ünitesi işletme ve yatırım masraflarını azalttığından, yeni kurulacak kağıt üretim tesislerinde bu tür bir ünitenin kullanılmasının enerji ekonomisine ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlayacağı görülmüştür.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Deneylerde kullanılan ürün

Yumurta kolisi (Viyol) :

Viyol, satış sırasında yumurtayı korumayı amaçlayan, atık malzemeden yapılmış özel bir kaptır. Viyol üretiminde hammadde iade ve toplama gazete kağıtlarıdır.

- Viyol geri dönüştürülmüş kağıttan üretilip, kendisi de tekrar geri dönüştürülebilir veya biyolojik olarak parçalanabilir. Doğal ve çevre dostu bir üründür.
- Sıkışma özelliği sayesinde viyol, titreşim ve darbelere karşı koruma sağlar, darbeyi soğurur ve yumuşatır.
- Selüloz bazlı olması nedeniyle hijyeniktir, ürünün nefes almasını sağlar.
- Sıcaklıkta ani değişimler söz konusu olduğunda, viyol büzüşmeyi absorbe eder. Birçok ürün için bu özellik son derece önemlidir.
- Farklı şekillerde tasarım yapılabilmesi, baskılı ve çeşitli renklerde üretim imkanı nedeniyle farklı pazar taleplerini karşılayabilir.
- Birbirine geçerek paketlenebilmesi nedeniyle taşıma ve depolamada ekonomiktir.
- Farklı ambalaj makinelerinde sorunsuz bir şekilde çalışır.

Yumurta kolisinin hammaddesi esas itibari ile kâğıt olup (parçalanmış), viyol şeklini aldıktan sonra kurutma işlemine tabi tutulmaktadır. Şekil 4.1'de viyol resmi görülmektedir (Kalender 2013).

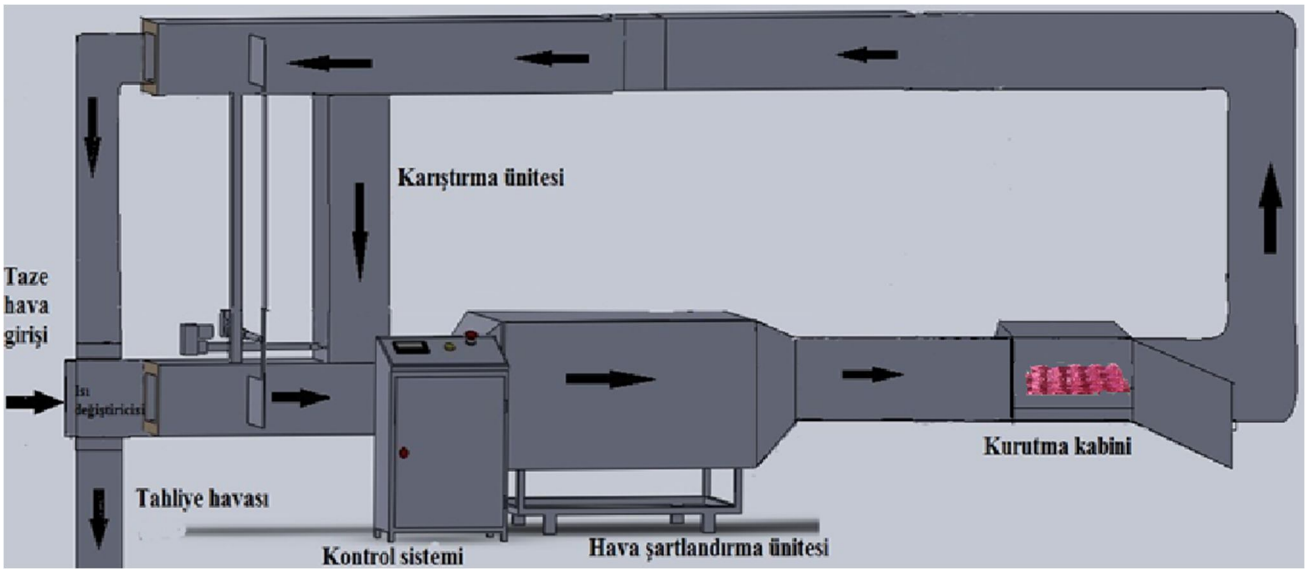


Şekil 4.1 Yumurta kolisi (viyol).

4.2. Yöntem

4.2.1. Deney seti

Viyol kurutma deneyleri, kurutma araştırmaları için Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü laboratuvarında daha önce tasarlanıp imalatı yapılan deney seti (şekil 4.2) ile gerçekleştirilmiştir. Deney seti; taze hava giriş kanalı, hava şartlandırma ünitesi, kurutma kabini, çıkış havası ile taze havanın karıştırıldığı karışım ünitesi, atık ısı geri kazanımı için kullanılan ısı değiştirici, otomatik kontrol ünitesi, radyal fan ve kanal bağlantılarından oluşmaktadır. Deney setinde ortamdan alınan taze hava, şartlandırıcı yardımı ile istenilen sıcaklık, hız ve bağıl nem değerlerine getirilebilmekte ve deney süresince ayarlanan değerlerde sabit tutulmaktadır. Deney seti, 80 °C sıcaklık, % 40 bağıl nem ve 3 m/s hava hızı değerlerine ulaşılabilecek kapasitededir.



Şekil 4.2 Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 4.3 Deney düzeneğinin görünümü

Deney setinde, % 100 taze hava ile ya da dönüş havası istenilen oranlarda taze hava ile karıştırılarak deneyler yapılabilmektedir. Sistemdeki ısıtma, soğutma ve nemlendirme ünitelerinin kapasiteleri % 100 taze hava ile çalışma şartlarına göre belirlenmiştir. Deney setinde kullanılan ünitelerin teknik özellikleri aşağıda ve çizelge 4.1'de verilmiştir.

- Soğutucu: Gerektiğinde kurutma havasını soğutmak ve nemini almak için kullanılmak üzere soğutma kapasitesi 6.78 KW olan R22 akışkanlı bir soğutma grubu kullanılmıştır.
- Isıtıcı: Havayı ısıtmak için 10 KW kapasiteli aç-kapa tip çalışan elektrikli ısıtıcı kullanılmaktadır.
- Nemlendirici: Havanın gerektiğinde bağıl nemini yükseltmek için 6 kg/h kapasiteli bir nemlendirici kullanılmaktadır.
- Fan : Kanal içinde hava akışını sağlamak için 550 m^3/h kapasiteli radyal fan kullanılmaktadır.
- Ölçme cihazları ve otomatik kontrol yöntemi : Kurutma havasının hız, sıcaklık ve bağıl nem değerleri bazı noktalarda monte edilen ölçme cihazları ile ölçülmekte, ekrandan anlık takip edilmekte, ölçülen değerler istenilen zaman aralıklarında kaydedilmektedir.
- Kabin : Kurutulan viyolün konulduğu kabin 35x20x20 cm boyutlarındadır.

Çizelge 4.1: Deneylerde kullanılan cihazların teknik özellikleri (Darıcı and Şen 2015).

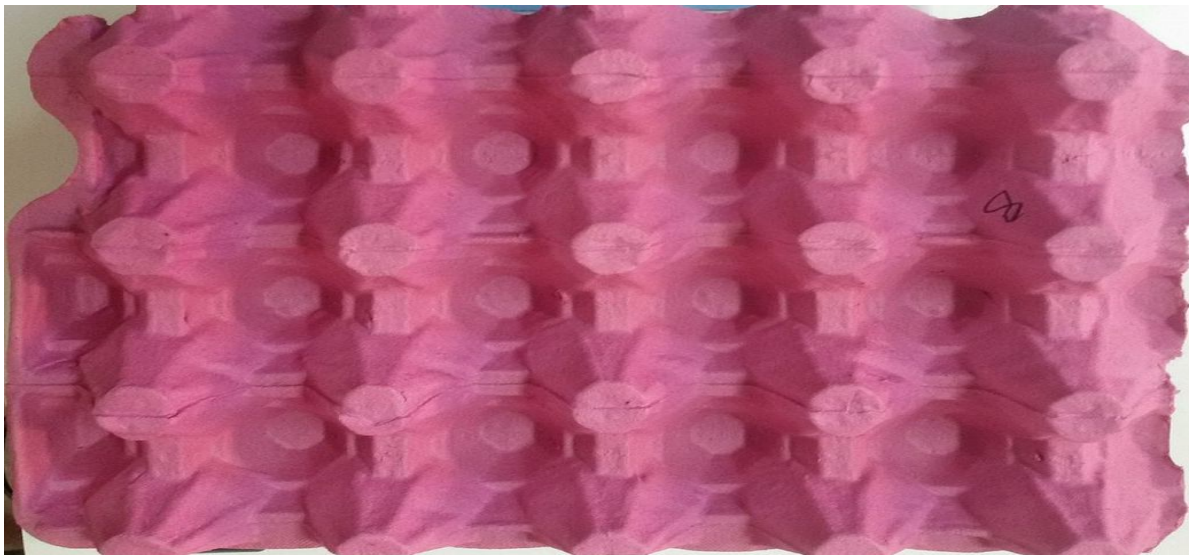
Ölçüm Cihazı	Marka	Model	Kapasite	Hassasiyet
Dijital terazi	Jadever	SKY300	300g	±0.01g
Dijital anemometre	Kestrel	4300	0.1-60 m/s	±0.1m/s
Higrometre	Dixel	XH20P	0-100 %	±0.1%
Termometre	Gemo	PT 100	0-400 ℃	±0.1℃
Isıtıcı			0-10 kW	
Soğutucu			0-6.78 kW	
Nemlendirici			6 kg/h	
Fan			0-550 m^3/h	

4.2.2. Viyol hazırlanması ve deney yapılışı

Deneylerde kurutulacak viyoller Konya ilinde üretim yapan özel bir firmadan temin edildi. Viyoller, kurutma kabini ölçüsüne uygun olarak 12 yumurta kapasiteli, 18 cm x 25 cm boyutlarında ve 30 g ağırlıkta kesilerek hazırlanmıştır. Kurutulacak viyol parçalarını, endüstride üretim sırasında kalıplardan ıslak olarak çıktığı yaş bazda % 68.09 nem içeriğine ulaştırmak için, oda sıcaklığında içi su dolu bir kabın içine daldırılmış ve ağırlığı 94 grama ulaşana kadar su içinde bekletilmiştir. Deney seti çalıştırılmış ve kurutma kabininde istenilen özellikte kurutma havası elde edilinceye ve sistem sürekli rejime gelene kadar beklenmiştir. Daha sonra kurutulacak viyol örnekleri hassas bir terazide tartılmış ve ıslak halde 94 g olarak kurutma kabinine hava akışına paralel olarak yerleştirilmiş ve deneylere başlanmıştır. Her 5 dakikada viyol örneği kabinden alınıp hassas terazide tartılmış ve ağırlık değerleri kaydedilmiştir. Deneyler, viyolün ağırlığı 30 gram kuru ağırlığa ulaştığında sonlandırılmıştır. Deneyler üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler dikkate alınmıştır. Şekil 4.4 ve 4.5'te viyolün kurutma öncesi ve sonrası görünümleri verilmiştir. Seçilen deney şartları çizelge 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Viyol kurutmadan önce



Şekil 4.5 Viyol kuruduktan sonra

Çizelge 4.2 : Seçilen deney şartları

Deney No	Kurutma Havası Özellikleri		
	Sıcaklık (^{o}C)	Bağıl nem (%)	Hava hızı (m/s)
1	50	9	1.5
2	60	9	1.5
3	70	9	1.5
4	80	9	1.5
5	60	9	0.5
6	60	9	1.0
7	60	9	2.0
8	60	9	2.5
9	60	9	3.0
10	60	18	1.5
11	60	27	1.5

4.2.3. Ağırlık ölçümünde kullanılan terazi

Deneylerde ağırlık ölçümlerinde "JADEVER" marka SKY 300 model, maksimum 300g kapasiteli ve 0.01g hassasiyetindeki dijital terazi kullanılmıştır. Şekil 4.6'de ağırlık ölçümünde kullanılan dijital terazi görülmektedir.



Şekil 4.6 Deneylerde kullanılan terazi

4.2.4. Dijital anemometre

Deneylerde kullanılan dijital anemometre, “Kestrel” marka 4300 model cep tipi, 0-%100 bağıl nem, 0.4-60 m/s hava hızı ve -45/+125°C sıcaklık kapasiteli ve % 0.1, 0.1 m/s ve 0.1°C hassasiyetindedir. Şekil 4.7 'de dijital anemometre görülmektedir.



Şekil 4.7 Dijital anemometre

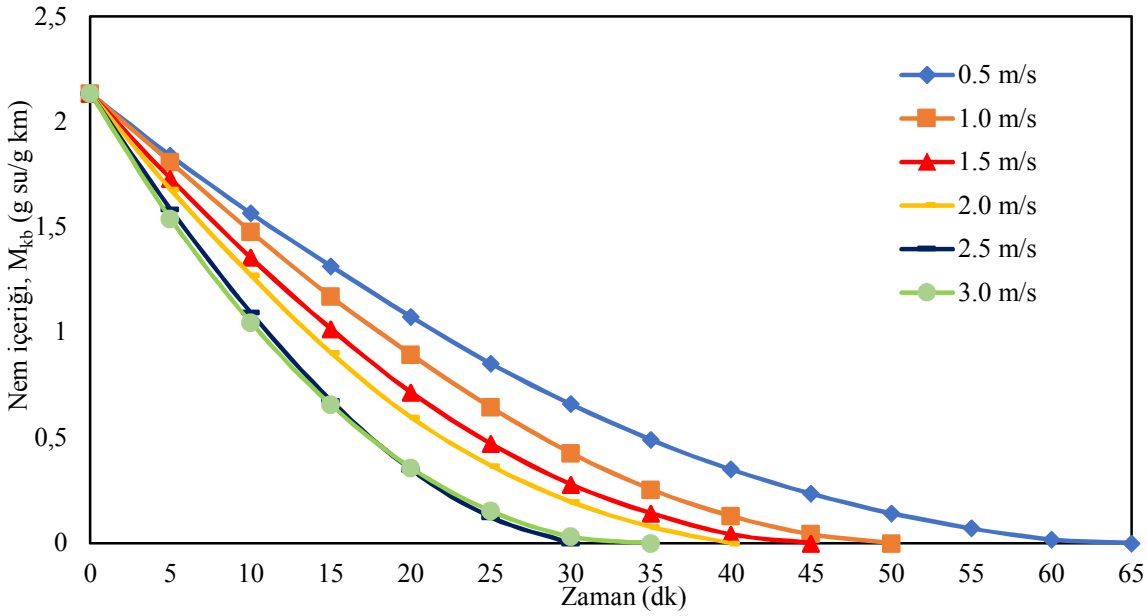
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Viyol için kurutma havası hızının 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s; sıcaklığının 50, 60, 70 ve 80°C ve bağıl neminin % 9, % 18 ve % 27 değerleri için deneyler yapılarak, her bir parametrenin kurumaya etkileri incelenmiştir.

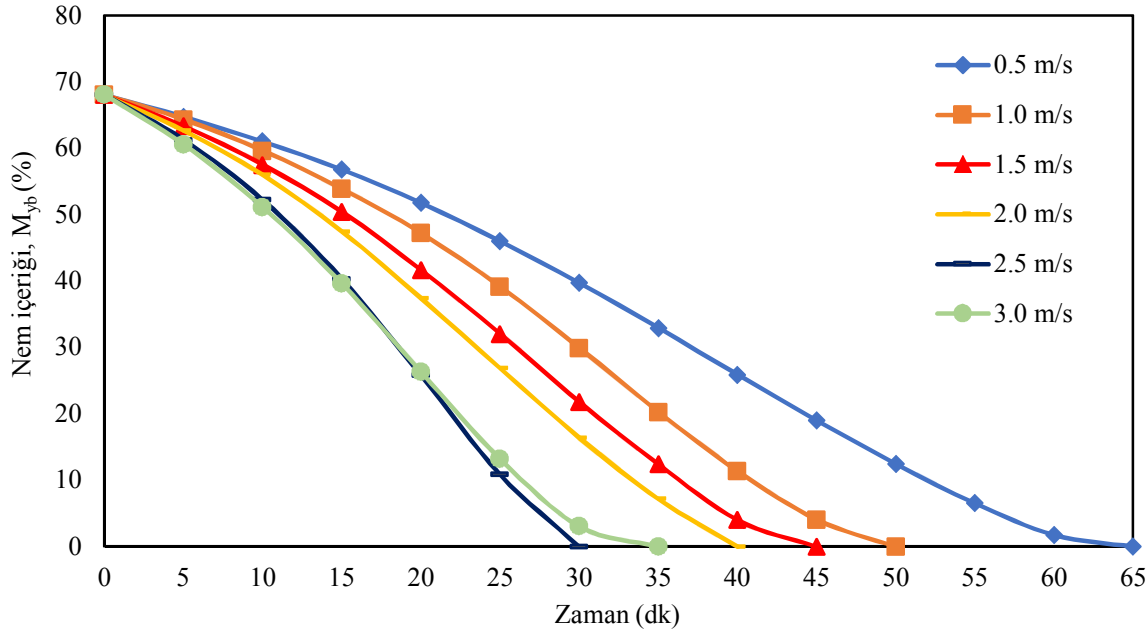
5.1. Kurutma Havası Hızının Kurumaya Etkisi

Hava hızının etkisinin incelemek için deneyler kurutma havasın sıcaklığı 60°C, bağıl nemin % 9 ve hızın farklı değerleri için yapılmıştır. Elde edilen kuru baza göre nem içeriği değerlerinin (M_{kb}) zamana göre değişim eğrileri şekil 5.1'de görülmektedir. Şekil 5.2 'de de hava hızının kurumaya etkisi yaş bazda nem içeriği cinsinden verilmiştir.

Şekiller incelendiğinde, 0.5 m/s kurutma havası hızında kuruma süresi 65 dakikayı bulurken bu değer 1.0 m/s hava hızında 50 dakika, 1.5 m/s hava hızında 45 dakika, 2.0 m/s hava hızında 40 dakika, 2.5 m/s hava hızında 30 dakika ve 3.0 m/s hava hızında ise 35 dakika olmaktadır. Bu değerlere göre kurutma havası hızının 2.5 m/s 'ye kadar kurutmayı kontrol ettiği ve kuruma süresini azalttığı, sonrasında ise hızın artmasının kuruma süresini artırdığı görülmektedir.



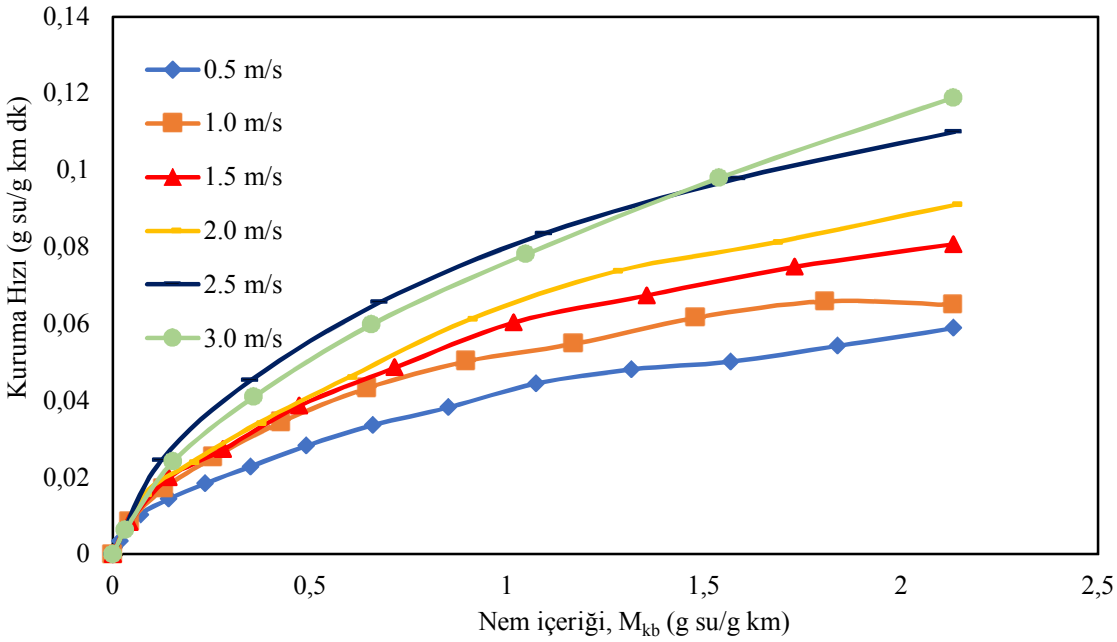
Şekil 5.1 Kuru baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (T= 60°C, RH=%9).



Şekil 5.2 Yaş baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (T= 60°C, RH=%9).

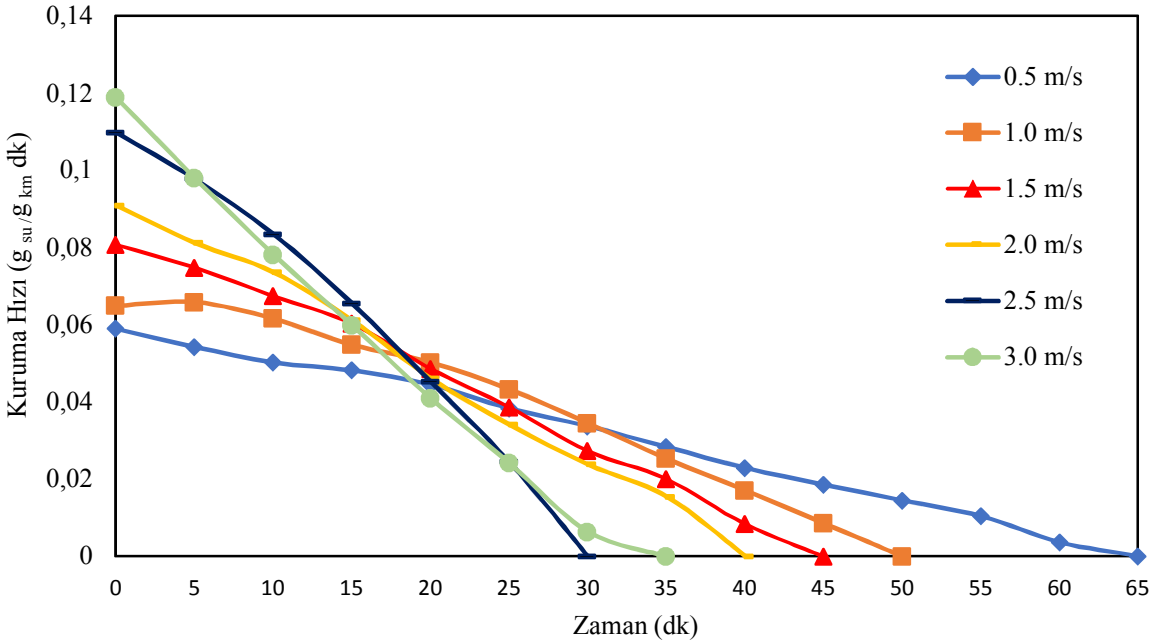
Şekil 5.3 'de farklı kurutma havası hızlarında, kuruma hızının nem içeriği ile değişimi verilmektedir. 0.5 m/s kurutma havası hızı ve 2.134 g_{su} / g_{km} kuru baza göre nem içeriğinde kuruma hızı 0.059 g_{su} / g_{km} dk iken, 1.0 m/s kurutma havası hızında 2.134 g_{su} / g_{km} nem içeriğinde bu değer 0.065 g_{su} / g_{km} dk'dır. Nemin azalması ile viyol

içerisindeki difüzyon hızının azaldığı, viyol yüzeyine nem transferinin zorlaştığı, kuruma havası hızı artsa bile, kuruma hızında önemli bir artışın olmadığı görülmektedir.



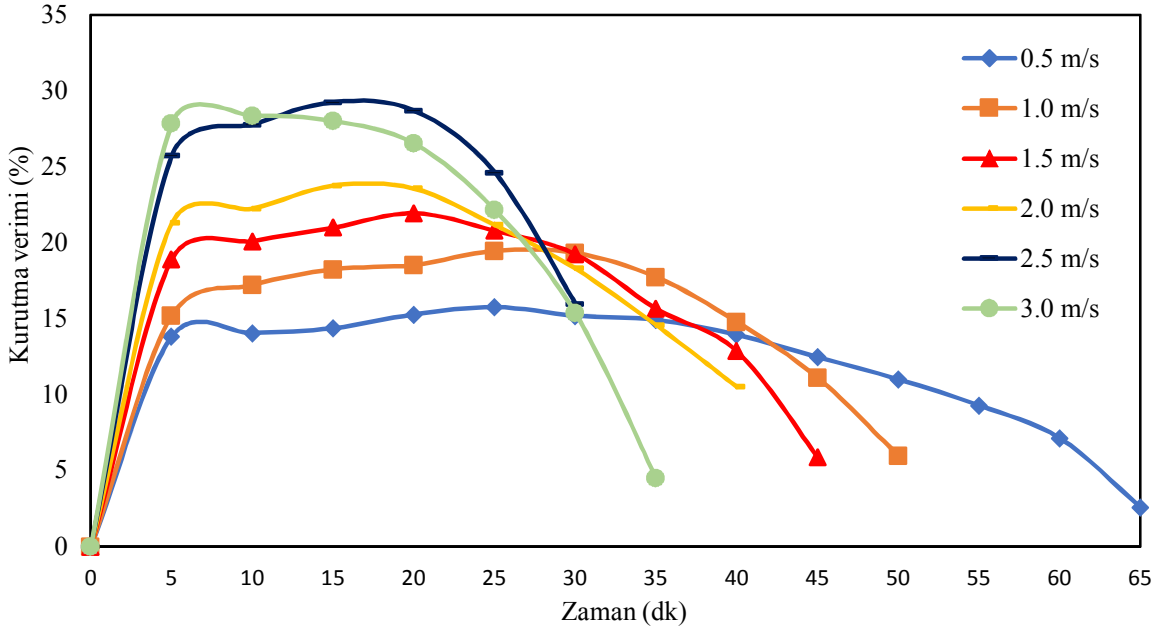
Şekil 5.3 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (T= 60°C, RH=%9).

Şekil 5.4'de kuruma hızının zamanla değişimi görülmektedir. Kurutma havası hızındaki artışla birlikte kuruma hızında da artış görülmüştür. 2.5 m/s'den daha yüksek kurutma havası hızı, kuruma hızını fazla etkilememektedir ve bu nedenle 2.5 m/s 'den daha yüksek hava hızında kurutma yapılmaması tavsiye edilebilir.



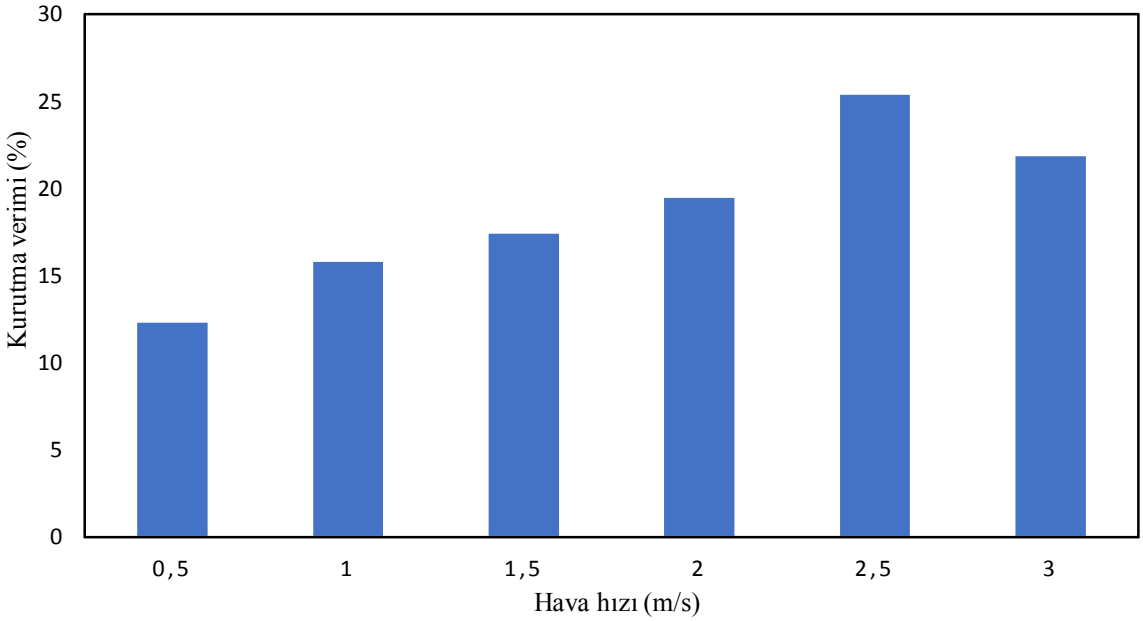
Şekil 5.4 Kuruma hızının zamanla değişimi (T= 60°C, RH=%9).

Şekil 5.5'de kurutma veriminin zamanla değişimi verilmiştir. Tüm hız değerleri için kurutma veriminin önce arttığı ve bir maksimum değere ulaştığı, daha sonra ürün kurudukça verim değerlerinin azaldığı görülmektedir. Yine, hava hızı arttıkça anlık kurutma verimi değerlerinin de arttığı görülmektedir. Kuruma havası hızının 2.5 m/s değerinde kurutma veriminin 15.dakikada % 29.3 ile en yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.5 Kurutma veriminin zamanla değişimi (T= 60°C, RH=%9).

Şekil 5.6'da her hız değeri için ortalama kurutma verimleri verilmiştir. Ortalama kurutma veriminin 2.5 m/s kurutma havası hızında en yüksek olduğu görülmektedir.

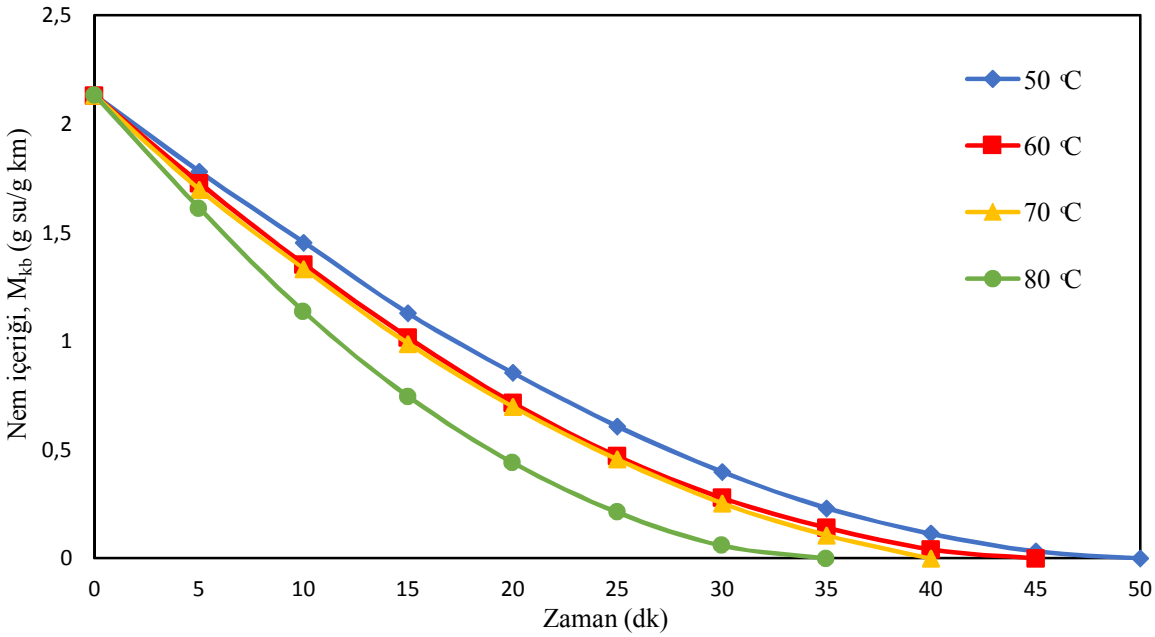


Şekil 5.6 Ortalama kurutma veriminin hava hızı ile değişimi (T= 60°C, RH=%9).

5.2. Kurutma Havası Sıcaklığının Kurumaya Etkisi

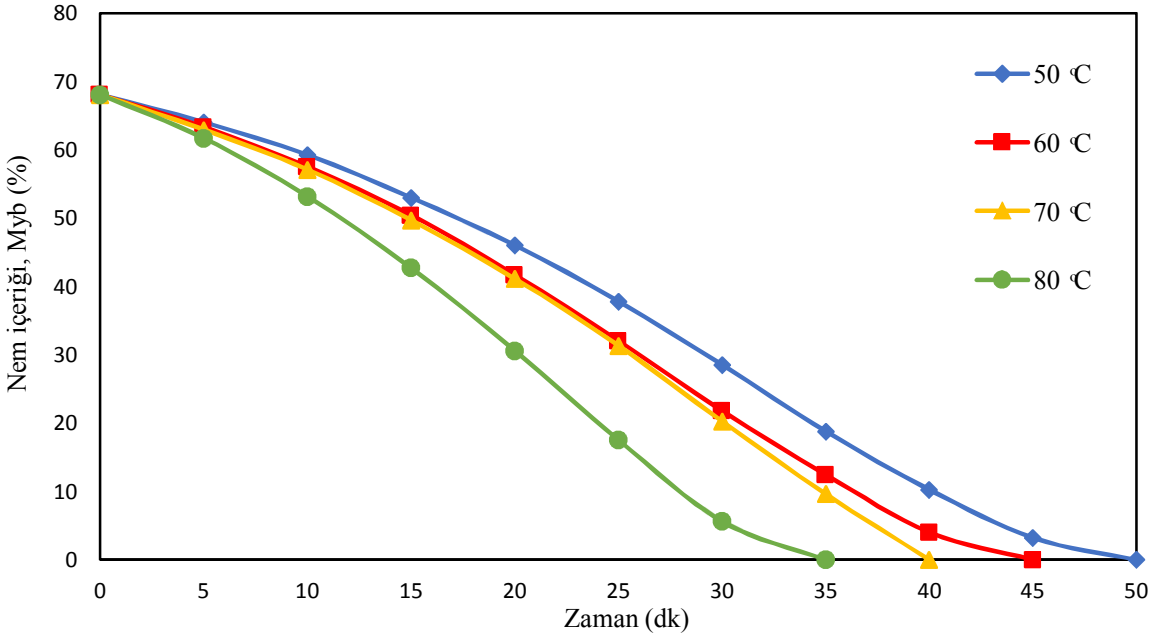
Kurutma havası sıcaklığının kurumaya etkisini görmek için kurutma havasının % 9 bağıl nem ve 1.5 m/s hızında 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. Şekil 5.7 ve 5.8'de farklı kurutma havası sıcaklıkları için kuru ve yaş baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi görülmektedir.

Şekil 5.7 incelediğinde kurutma havası 50°C sıcaklıkta iken kuruma süresi 50 dakika, 60 °C'de 45 dakika, 70°C 'de 40 dakika, 80°C 'de ise 35 dakikadır. Şekil 5.7'de sıcaklığın artışı ile ısı transferinin arttığı, nem transferinin de hız kazandığı görülmektedir.



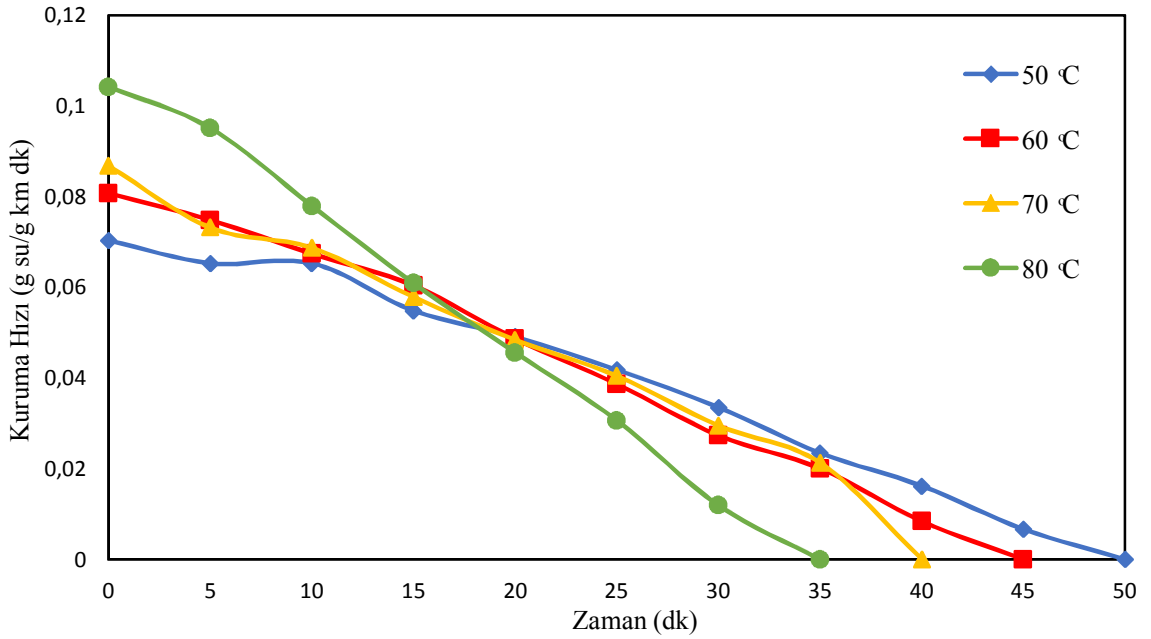
Şekil 5.7 Kuru baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (V= 1.5 m/s, RH=%9).

Kurutma havası sıcaklığındaki artış ile kuruma süresi önemli ölçüde azalmaktadır. Viyolün son nem içeriğine ulaşması için gerekli kuruma süresi 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda sırası ile 50, 45, 40 ve 35 dakikadır. Kurutma havası sıcaklığının 50°C'den 80°C'ye yükseltmesi ile toplam kuruma süresinde % 30 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Hava sıcaklığının artışı ile, viyol yüzeyindeki buhar basıncı ile kurutma havasının kısmi buhar basıncı arasındaki fark artmakta ve bunun sonucunda buharlaşma hızlanmaktadır. Kurutma havası sıcaklığındaki artış ile kuruma süresinde azalma benzer çalışmalarda da gözlenmiştir (Özel 2010, Darıcı and Şen 2015).



Şekil 5.8 Yaş baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (V= 1.5 m/s, RH=%9).

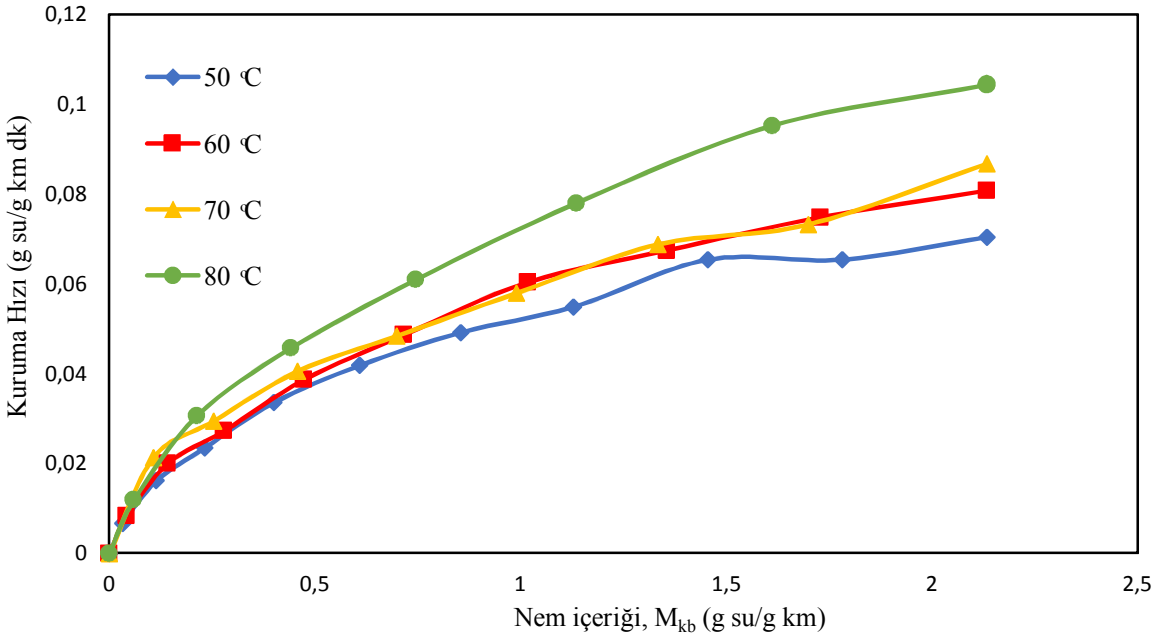
Şekil 5.9'de farklı kurutma havası sıcaklıkları için kuruma hızının zamanla değişimi görülmektedir. Kurutma havası sıcaklığı arttıkça kuruma hızının da arttığı görülmektedir.



Şekil 5.9 Kuruma hızının zamanla değişimi (V= 1.5 m/s, RH=%9).

Şekil 5.10, kurutma havasının farklı sıcaklıkları için kuruma hızının nem içeriği ile değişimini göstermektedir. Eğrilerden de görüldüğü gibi, genel olarak viyolün kurumasında sabit hızla kuruma evresi gözlenmemiştir. Kuruma prosesi genel olarak azalan kuruma evresinde gerçekleşmektedir. Bu durumda viyolün kuruma işleminin kontrol mekanizmasının büyük ölçüde ürün içindeki kütle transferi yani nem difüzyonu hızı olduğu kabul edilebilir.

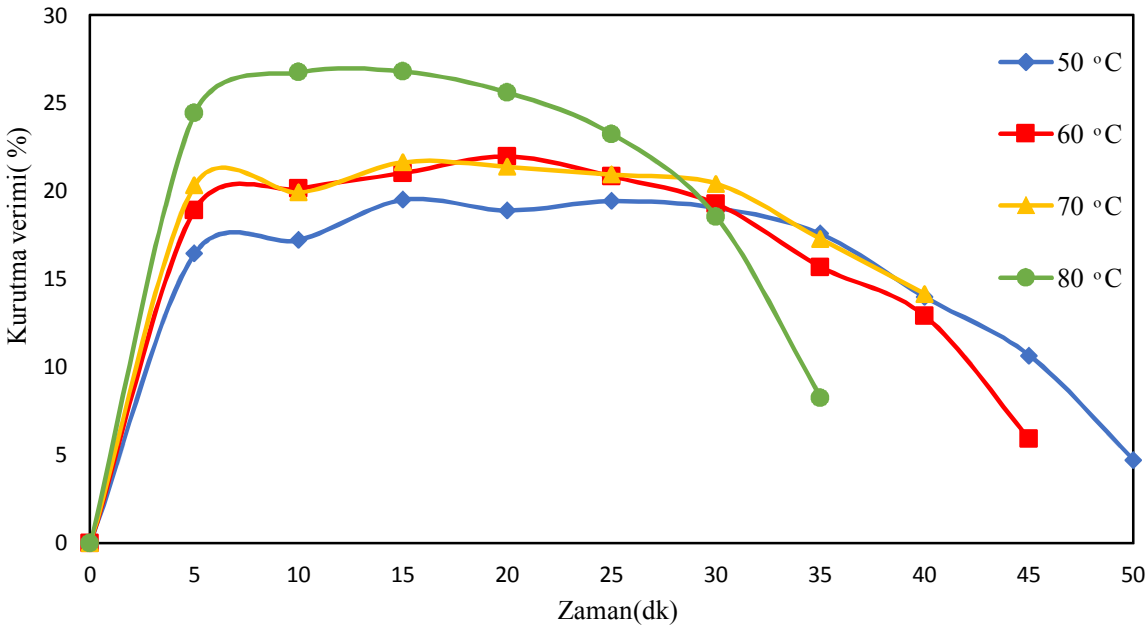
Kurutma havası sıcaklığının yüksek değerlerinde viyolün kuruma hızına daha fazla etkisi olduğu görülmektedir. Kuruma hızındaki bu artış, hava sıcaklığının artışının doğal bir sonucu olarak kurutma havası bağıl neminin azalması ve havanın kurutma potansiyelinin artmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.10 Kuruma hızının kuru baza göre nem içeriği ile değişimi (V= 1.5 m/s, RH=%9).

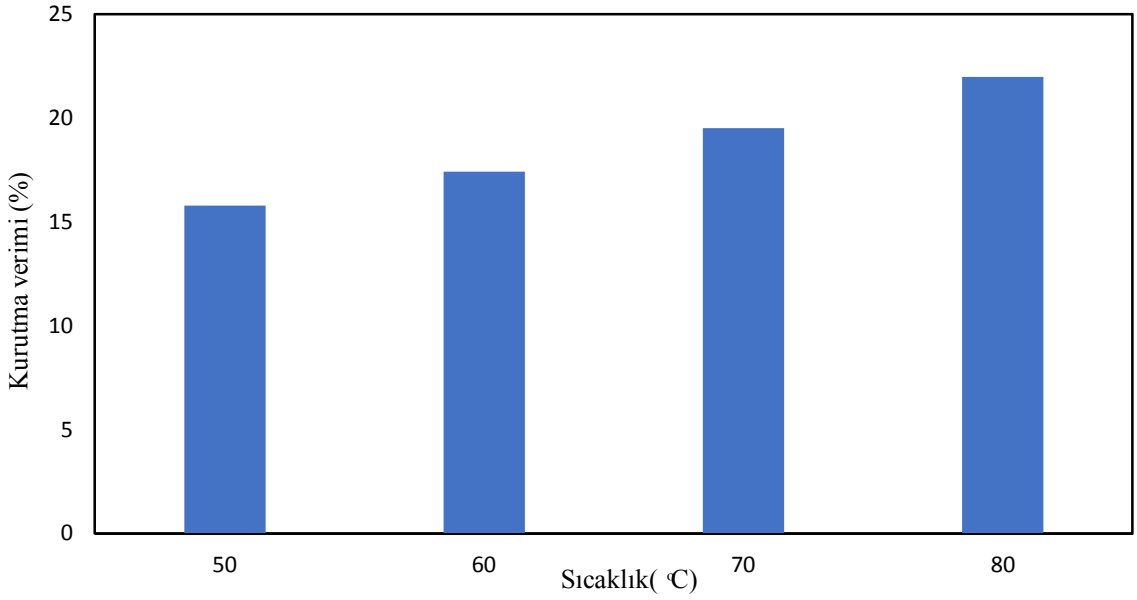
Farklı hava sıcaklıklarında kurutma veriminin zamana göre değişimi Şekil 5.11'de verilmiştir. Verim değerlerinin kurumanın başlangıcından itibaren artarak belirli bir değere ulaştığı görülmektedir. 80°C kurutma havası sıcaklığı için kurutma verimi 5. dakikada en yüksek değerine ulaşırken, diğer sıcaklıklarda en yüksek verim 15-20 dakika arasında gerçekleşmektedir. Daha sonra eğriler hemen hemen doğrusal olarak azalmakta ve viyolün beklenen son kütleye ulaşması ile kurutma işlemi sona

ermektedir. Kurutma havası sıcaklığı arttıkça kurutma verimi de artmıştır. En yüksek kurutma verimi 80°C hava sıcaklığında elde edilmiştir.



Şekil 5.11 Kurutma veriminin zamanla değişimi (V= 1.5 m/s, RH=%9).

Şekil 5.12'de farklı hava sıcaklıkları için kurutma veriminin ortalama değerleri verilmiştir. Kurutma havası sıcaklığı arttıkça ortalama kurutma veriminin de arttığı görülmektedir.

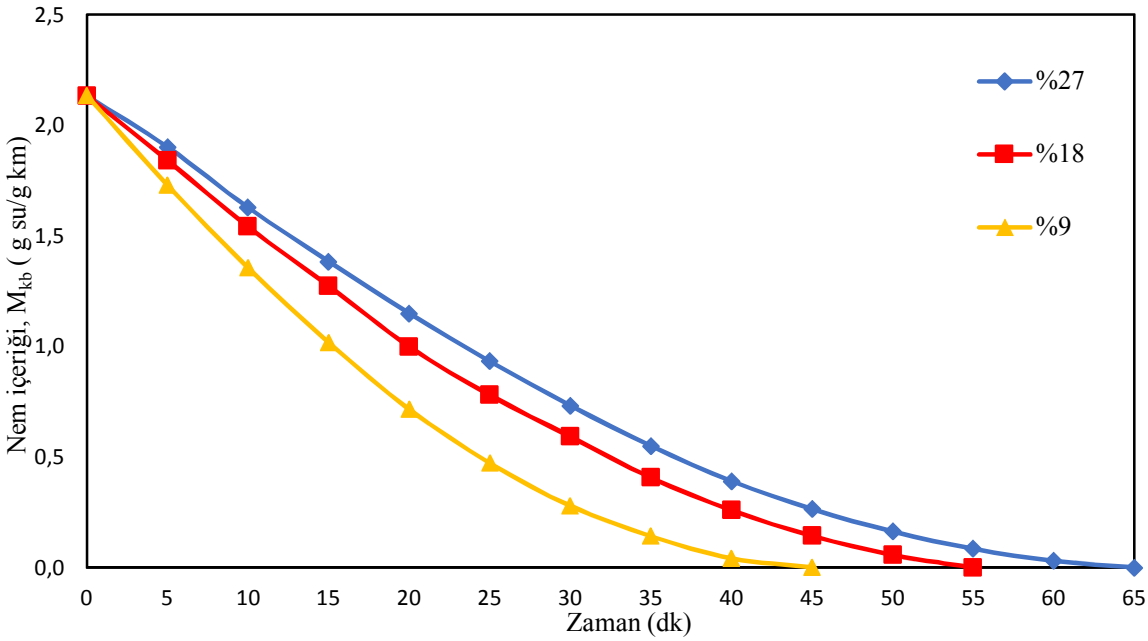


Şekil 5.12 Ortalama kurutma veriminin sıcaklıkla değişimi (V= 1.5 m/s, RH=%9).

5.3. Kurutma Havası Bağıl Nem Değerinin Kurumaya Etkisi

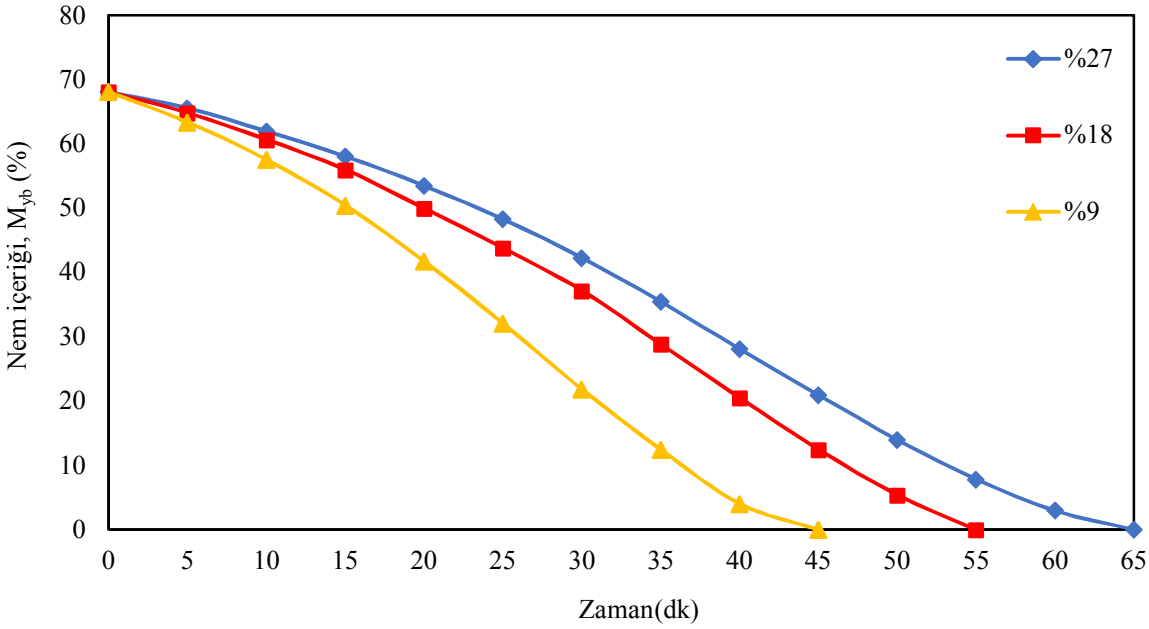
Bu amaçla kurutma havasının 60°C sıcaklık , 1.5 m/s hız ve % 9, % 18 ve % 27 bağıl nem değerlerinde deneyler yapılmıştır. Şekil 5.13 ve 5.14'te viyolün kuru ve yaş baza göre nem içeriğinin zamana göre değişimi görülmektedir.

Şekillerden, viyol % 9 bağıl nem değerinde 45 dakikada, % 18 bağıl nem değerinde 55 dakikada ve % 27 bağıl nem değerinde 65 dakikada tamamen kurutulmuştur. Havanın bağıl nem değeri artırıldığında havadaki nemin kısmi buhar basıncı yükselmekte, kütle transferi hızı azalmaktadır.



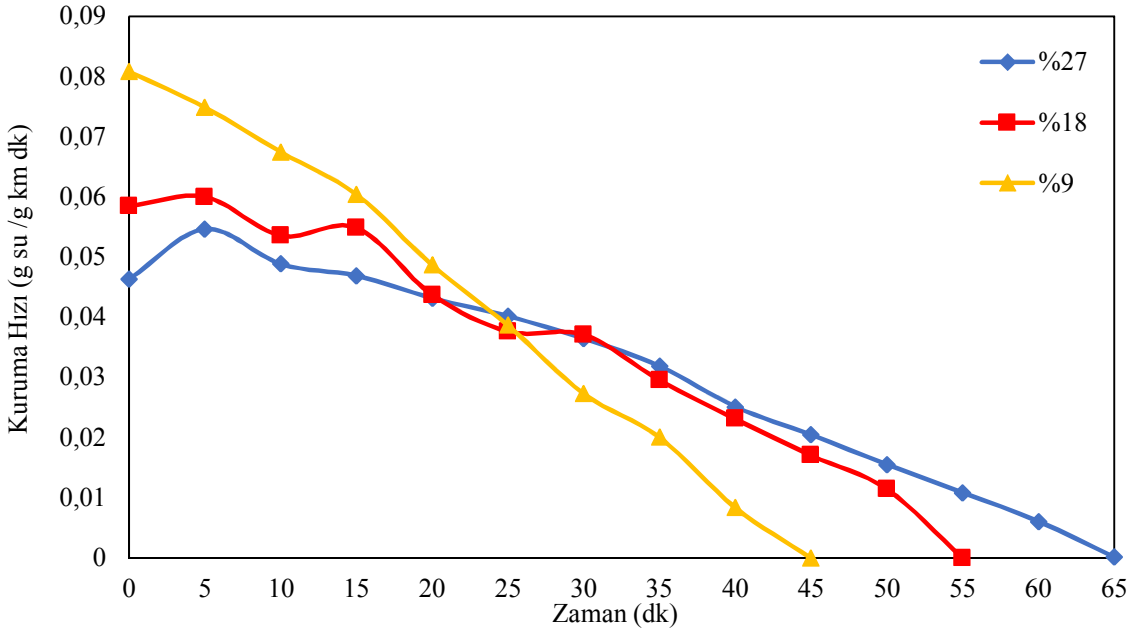
Şekil 5.13 Kuru baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (T=60°C, V=1.5m/s).

Şekil 5.14'te görüldüğü gibi başlangıçta yaş bazda nem içeriği yaklaşık % 68 mertebelerindedir.

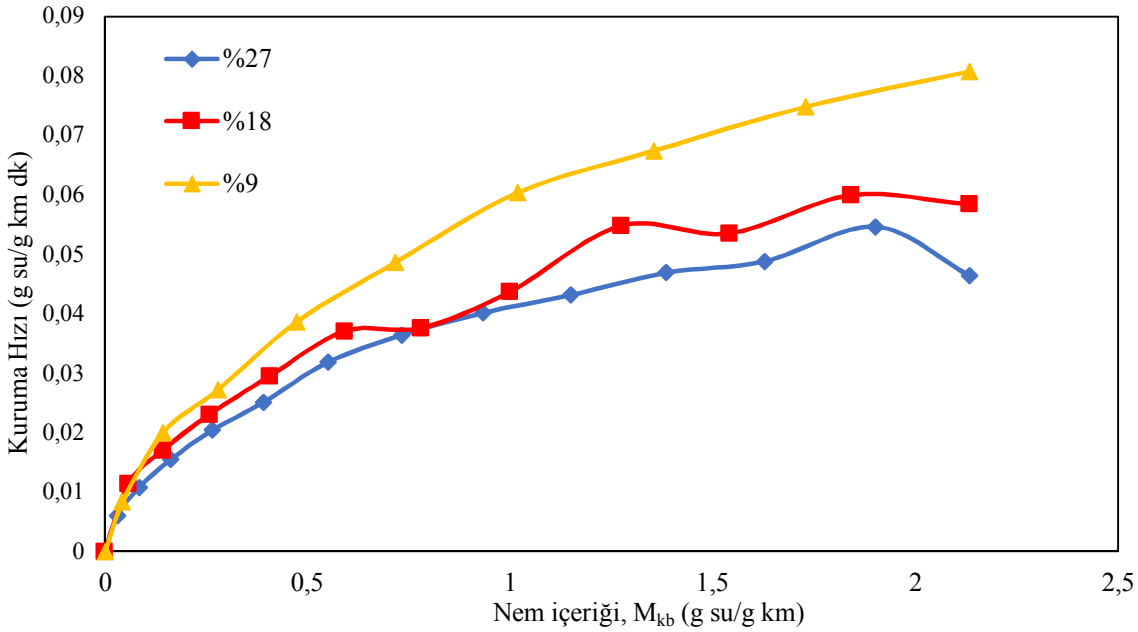


Şekil 5.14 Yaş baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi (T=60°C, V=1.5m/s).

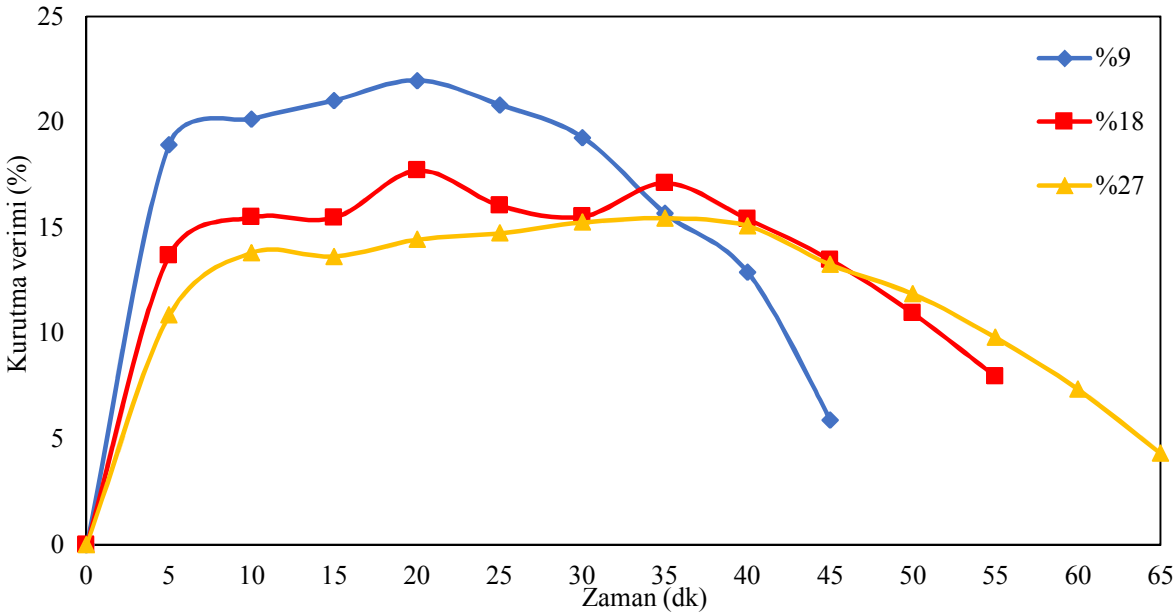
Şekil 5.15 ve 5.16'da farklı bağıl nem değerleri için kuruma hızının zamanla ve nem içeriğiyle değişimi görülmektedir. Yine farklı kurutma havası bağıl nem değerleri için, kurutma veriminin anlık ve ortalama değerleri şekiller 5.17 ve 5.18'de verilmiştir. Bağıl nemin % 9 değeri için kurutma veriminin % 21.98 ile en yüksek olduğu görülmektedir. Bağıl nem değeri arttıkça anlık ve ortalama kurutma verimin azalmaktadır.



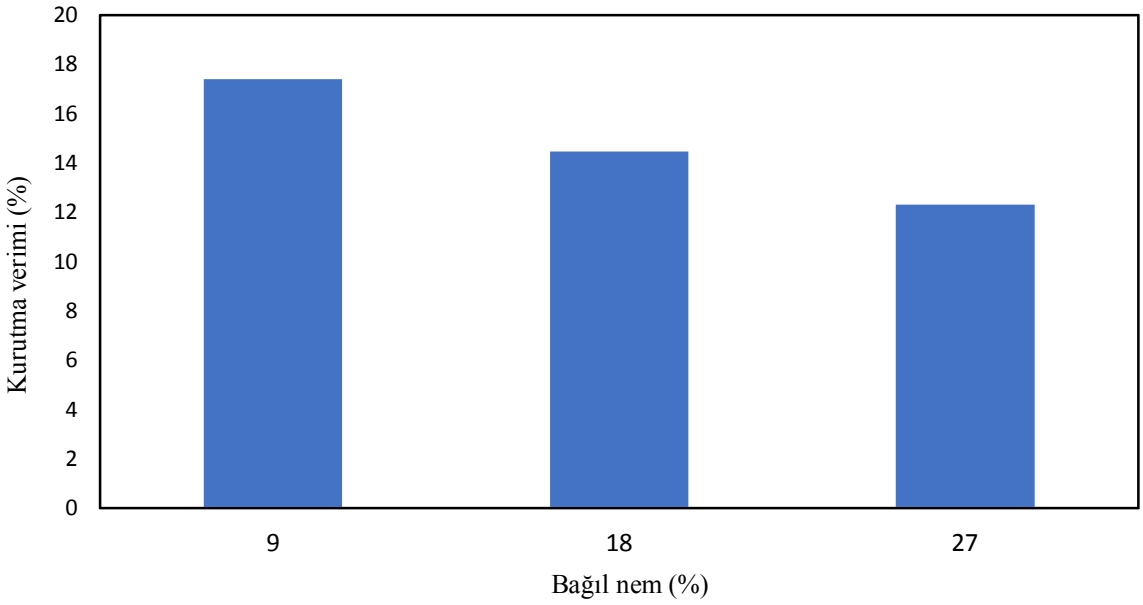
Şekil 5.15 Kuruma hızının zamanla değişimi (T=60°C, V=1.5m/s).



Şekil 5.16 Kuruma hızının kuru baza göre nem içeriği ile değişimi (T=60°C, V=1.5m/s).



Şekil 5.17 Kurutma veriminin zamanla değişimi (T=60°C, V=1.5m/s).



Şekil 5.18 Ortalama kurutma veriminin bağıl nem ile değişimi (T=60°C, V=1.5m/s).

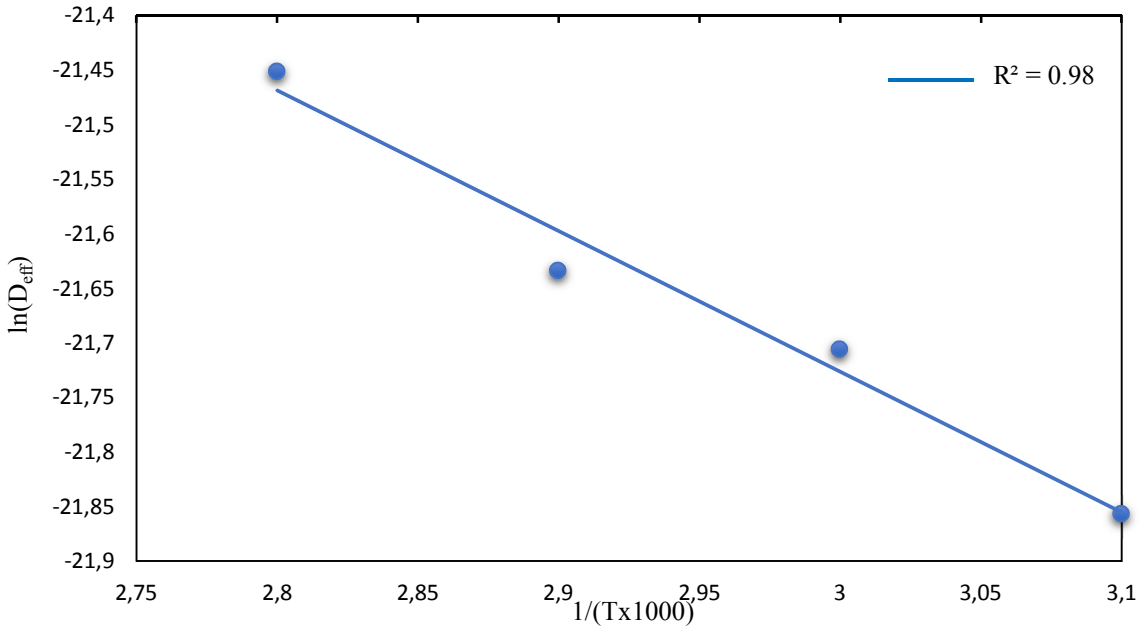
5.4. Etkin difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi

Viyol kurutmasında hesaplanan etkin difüzyon katsayıları çizelge 5.1'de verilmiştir. Kurutma havası sıcaklığının artmasıyla etkin difüzyon katsayısının arttığı görülmektedir. Kurutma hava hızı arttığında da etkin difüzyon katsayısı artmaktadır. Bağıl nem değerinin artmasıyla ise etkin difüzyon katsayısı azalmaktadır. Kurutma deneylerinde sıcaklığın 50°C'dan 60°C'a çıkarılması ile D_{eff} değerinde % 16.3, 70°C'a çıkarılması ile % 25 ve 80°C'a çıkarılması ile ise % 50 mertebesinde artışa sebep olmaktadır. Kurutma hava hızının 0.5 m/s'den 1.0 m/s'e çıkarılması ile D_{eff} değerinde % 23.08, 1.5 m/s'e çıkarılması ile % 78.86, 2.0 m/s'e çıkarılması ile % 102.94, 2.5 m/s'e çıkarılması ile % 130.77 ve 3.0 m/s'e çıkarılması ile % 158.14'lik artışa sahip olmaktadır. Ayrıca, kurutma havası bağıl nem değerinin % 9 'dan % 18'e çıkarılması ile D_{eff} değerinde % 24.03, % 27'e çıkarılması ile % 35.88'lik azalış olmaktadır. Kurutma havası sıcaklığı % 20 arttığında etkin difüzyon katsayısı % 16.3 artmış, kurutma havası hızı % 100 arttığında etkin difüzyon katsayısı % 23.08 artmış ve bağıl nem değeri % 100 arttığında etkin difüzyon katsayısı % 24.03 artmıştır. Bu nedenle etkin difüzyon katsayısının en çok kurutma havası sıcaklığına bağlı olduğu ifade edilebilir.

Aktivasyon enerjisi ürünün özelliğine ve kurutma şartlarına bağlıdır. Her hangi bir ürün için etkin difüzyon katsayısı en çok, kurutma şartlarından biri olan hava sıcaklığının değişiminden etkilenir. Bu durum dikkate alınarak kurutma havasının 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıkları için aktivasyon enerjisi E_a=12.92 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.19'da etkin difüzyon katsayısı logaritması ile, kurutmanın ters mutlak sıcaklığı ilişkisi görülmektedir. Denklem 2.12'ye göre aktivasyon enerjisi sıcaklığa ve etkin difüzyon katsayısına bağlıdır ancak sıcaklığın aktivasyon enerjisi üzerinde daha fazla etkin olduğu ifade edilebilir.

Çizelge 5.1 : Viyolün difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjisi

Çalışma koşulları	**Etkin difüzyon katsayısı D_{eff} (m^2/s)**	**Aktivasyon enerjisi E_a (kJ/mol.K)**
50°C, % 9, 1.5 m/s	3.21974×10^{-10}	12.92
60°C, % 9, 1.5 m/s	3.74483×10^{-10}	
70°C, % 9, 1.5 m/s	4.0247×10^{-10}	
80°C, % 9, 1.5 m/s	4.82978×10^{-10}	
60°C, % 9, 0.5 m/s	2.09285×10^{-10}	
60°C, % 9, 1.0 m/s	2.57583×10^{-10}	
60°C, % 9, 2.0 m/s	4.24738×10^{-10}	
60°C, % 9, 2.5 m/s	4.82978×10^{-10}	
60°C, % 9, 3.0 m/s	5.40245×10^{-10}	
60°C, % 18, 1.5 m/s	2.84486×10^{-10}	
60°C, % 27, 1.5 m/s	2.40107×10^{-10}	



Şekil 5.19 Etkin difüzyon katsayısı ile kurutma havasının ters mutlak sıcaklığı arasındaki ilişki (1.5 m/s, RH = % 9).

5.5. Belirsizlik analizi

Herhangi bir deneyde parametre değerinin ölçülmesinde, rastgele hatalar, sabit hatalar ve imalat hataları nedeni ile ortaya çıkan hatalar göz önüne alındığında toplam hata ifadesi denklem 5.1'deki gibi yazılabilir (Holman 2007).

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \ldots\ldots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2\right]^{1/2} \quad (5.1)$$

Burada:

R: Hesaplanan büyüklük.

x_1, x_2, x_n: Ölçümü etkileyen bağımsız değişken.

n: Bağımsız değişken adedi.

w_1, w_2, w_n: Bağımsız değişkenle ilgili hata değeri.

W_R: Toplam hata.

Çizelge 5.2'de, kullanılan ölçme aletlerinin hataları ve ölçme yapan kişiden kaynaklanan hatalar belirlenmiştir. Ölçme aletlerinden kaynaklanan belirsizlikler

firmalar tarafından verilirken, ölçmeden kaynaklanan hata ise tahmini olarak belirlenmiştir (Kavak E., Biçer Y. et al. 1999).

Çizelge 5.2 : Deneylerdeki ölçme hataları

Hatanın Kaynağı	Cihazdan kaynaklanan hata	Okumadan kaynaklanan hata	Birim	Toplam hata
Hava hızının ölçümü	± 0.1	± 0.1	m/s	± 0.140
Sıcaklık ölçümü	± 0.02	± 0.01	°C	± 0.022
Bağıl nem ölçümü	± 0.1	± 0.01	% RH	± %0.1
Ürün ilk nem ölçümü	± 0.001	± 0.0001	g	± 0.001
Ağırlık ölçümü	± 0.01	± 0.01	g	± 0.014
Zaman	± 0.0003	± 0.1	dk	± 0.10000045

Belirsizlik analizi ile ilgili örnek hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

5.5.1. Nem içeriğindeki belirsizlik

Nem içeriğinin belirsizliği (T=60˚C, V=1.5m/s, RH=%9) için,

$$W_{M_{kb}} = \left[\left(\frac{\partial M_{kb}}{\partial m_y} W_{m_y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{kb}}{\partial m_k} W_{m_k}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\left(\frac{1}{m_k} W_{m_y}\right)^2 + \left(\frac{-m_y}{{m_k}^2} W_{m_k}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (5.2)$$

m_y = 21.285±0.01 (g)

m_k =9.975 ±0.01 (g)

M_{kb} = 0.042(g su/ g km)

W_{m_y} = ±0.014 (g)

W_{m_k} = ±0.014 (g)

Yukarıdaki değerler kullanılarak kuru bazda nem içeriğinin belirsizliği için:

$W_{M_{kb}}$ = ±0.003307 (g su/ g km)

veya

$$\frac{W_{M_{kb}}}{M_{kb}} = \frac{0.003307}{0.042} = \pm \,\%\, 7.8738$$

elde edilir.

5.5.2. Nem oranındaki belirsizlik

Nem oranı belirsizlik değeri için,

$$W_{MR} = \left[\left(\frac{\partial MR}{\partial M_t} W_{M_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial MR}{\partial M_0} W_{M_0}\right)^2\right]^{1/2}$$

$$= \left[\left(\frac{1}{M_0} W_{M_t}\right)^2 + \left(\frac{-M_t}{{M_0}^2} W_{M_0}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (5.3)$$

M_t =0.042 (g su/ g km)

M_0 = 2.134 (g su/ g km)

W_{M_0} = 0.00011(g su/ g km)

W_{M_t}= 0.003307 (g su/ g km)

MR= 0.02

Yukarıdaki değerler kullanılarak nem oranının belirsizliği için:

W_{MR}= ± 0.001565

veya

$$\frac{W_{MR}}{MR} = \frac{0.001565}{0.02} = \pm\% \, 7.82$$

5.5.3. Kuruma hızındaki belirsizlik

Kuruma hızının belirsizlik değeri için,

$$W_{DR} = \left[\left(\frac{\partial DR}{\partial M_t} W_{M_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial DR}{\partial M_{t+\Delta t}} W_{M_{t+\Delta t}}\right)^2 + \left(\frac{\partial DR}{\partial \Delta t} W_{\Delta t}\right)^2\right]^{1/2}$$

$$= \left[\left(\frac{-1}{\Delta t} W_{M_t}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta t} W_{M_{t+\Delta t}}\right)^2 + \left(\frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t^2} W_{\Delta t}\right)^2\right]^{1/2} \quad (5.4)$$

M_t = 0.042 (g su/ g km)

$M_{t+\Delta t}$ = 0.0001 (g su/ g km)

Δt = 15 (dk)

W_{Mt}= ±0.00334 (g)

$W_{Mt+\Delta t}$= ±0.00348 (g)

$W_{\Delta t}$= ± 0.1 (g)

DR = 0.0084 (g su/ g km.dk)

Yukarıdaki değerler kullanılarak kuruma hızının belirsizliği için:

W_{DR} = ±0.000979 (g su/ g km)

Veya

$$\frac{W_{DR}}{DR} = \frac{0.000979}{0.0084} = \pm\% \, 11.6548$$

5.5.4. Kurutma verimindaki belirsizlik

Kurutma veriminin belirsizliği için,

$$W_\eta = \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial m_i} W_{m_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial m_f} W_{m_f}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial m_{su}} W_{m_{su}}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\left(\frac{1}{m_{su}} W_{m_i}\right)^2 + \left(\frac{-1}{m_{su}} W_{m_f}\right)^2 + \left(-\frac{m_i - m_f}{m_{su}^2} W_{m_{su}}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

m_{su} = 21.285 ± 0.01 (g)

m_i = 31.26± 0.01 (g)

m_f =30.00 ± 0.01 (g)

W_{m_i} = ± 0.014

W_{m_f} = ± 0.014

$W_{m_{su}}$ = ± 0.014

η = % 5.92

Yukarıdaki değerler kullanılarak kurutma veriminin belirsizliği için,

W_η = ±0.00097

veya

$$\frac{W_\eta}{\eta} = \frac{0.00097}{0.0592} = \pm\% 1.64$$

Tüm deneyler için hesaplanan toplam belirsizlik değerleri çizelge 5.3'de görülmektedir.

Çizelge 5.3:Tüm deney şartlarında hesaplanan belirsizlikler.

Deney şartları	Nem içeriği, M_{yb} (yaş bazda)	Nem içeriği, M_{kb} (kuru bazda)	Nem oranı MR	Kuruma hızı DR	Kurutma verimi η
60°C, % 9, 0.5 m/s	%±1,95	%±18,64	%±18,65	%±27,18	%±2,64
60°C, %9, 1.0 m/s	%±0,83	%±7,72	%±7,79	%±11,48	%±1,61
60°C, %9, 1.5 m/s	%±0,84	%±7,87	%±7,82	%±11,65	%±1,64
60°C, %9, 2.0 m/s	%±0,46	%±4,12	%±4,17	%±6,46	%±0,92
60°C, %9, 2.5 m/s	%±0,29	%±2,51	%±2,53	%±4,30	%±0,61
60°C, %9, 3.0 m/s	%±1,11	%±10,50	%±10,60	%±15,44	%±2,15
50°C, %9, 1.5 m/s	%±1,06	%±9,95	%±10,06	%±14,67	%±2,15
70°C, %9, 1.5 m/s	%±0,33	%±2,91	%±2,94	%±4,83	%±0,92
80°C, %9, 1.5 m/s	%±0,59	%±5,44	%±5,49	%±8,27	%±1,17
60°C, %18, 1.5 m/s	%±0,62	%±5,67	%±5,73	%±8,59	%±0,86
60°C, %27, 1.5m/s	%±1,16	%±10,97	%±11,08	%±16,11	%±2,24

5.6. Matematiksel Modeller ile karşılaştırma

Viyol kurutulmasında, ısınma fazının çok kısa olması nedeni ile sadece azalan hızda kuruma gerçekleşmektedir. Viyolün kurutulmasında kurutma havasının % 9 bağıl nem, 1.5 m/s hız ve 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda yapılan deneylerden elde edilen MR değerleri, Newton, Page, Logaritmik, Henderson ve Pabis, Modified Henderson ve Pabis, Midilli ve ark., Diffusion approach, Two term, Two term exponential, Verma ve ark., Wang-Singh ve Parabolik modellerine EXCEL eğri uydurma programında uygulanmış ve korelasyon katsayısı (R^2) ve ortalama hata kareleri toplamının karekökü (RMSE) değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.4'de 12 modele ait istatiksel veriler (R^2 ve RMSE) karşılaştırılmış ve ayrılabilir nem oranı hesabını en düşük hata ile Parabolik, Wang-Singh, Two term exponential ve Midilli et al. modellerinin verdiği görülmüştür. Bu modeller için korelasyon katsayısı (R^2) 0.9905 ile 1 arasında değişmektedir.

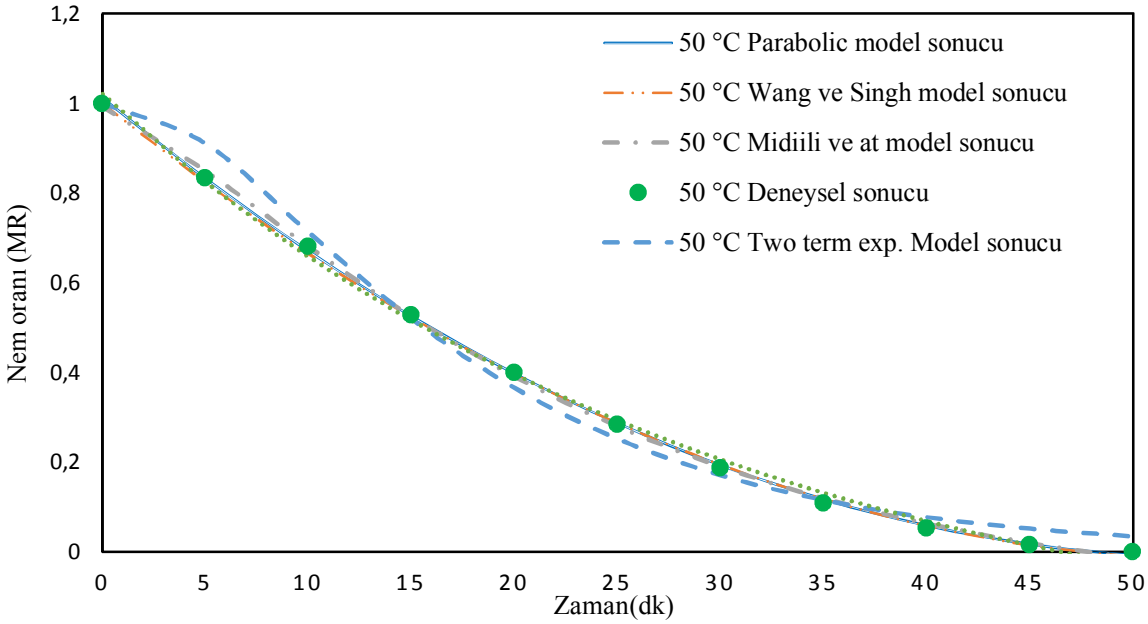
Çizelge 5.4: Matematik modeller kullanılarak hesaplanan değerler.

1.5 m/s kuruma hava hızı, % 9 bağıl nem

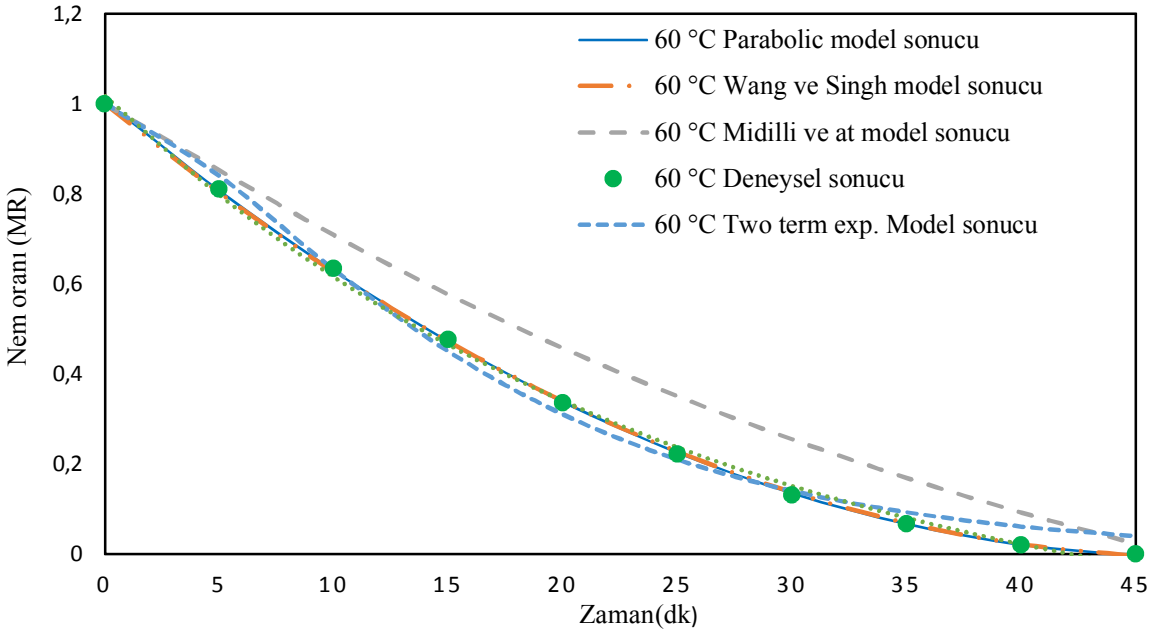
		50°C	**60°C**	**70°C**	**80°C**
Newton	R^2	0.9674	0.9717	0.9709	0.9749
	RMSE	0.06275	0.05896	0.05945	0.0576
	SSE ±	0.03938	0.03129	0.02828	0.02322
	k	0.05135	0.05801	0.05907	0.07554
Page	R^2	0.996	0.9964	0.9942	0.9968
	RMSE	0.0233	0.02225	0.02659	0.02236
	SSE±	0.004887	0.003961	0.005657	0.002999
	k	0.01417	0.01833	0.02155	0.02705
	n	1.412	1.383	1.34	1.373
Logarithmic	R^2	0.9972	0.9977	0.9994	0.9979
	RMSE	0.02065	0.01923	0.009971	0.01953
	SSE±	0.003411	0.002589	0.0005965	0.001907
	a	1.313	1.278	1.376	1.257
	c	- 0.2922	- 0.2603	- 0.3692	- 0.2434
	k	0.03233	0.03781	0.03378	0.04992
Henderson ve Pabis	R^2	0.9733	0.9763	0.9749	0.9781
	RMSE	0.05991	0.05719	0.05905	0.0581
	SSE±	0.00323	0.02616	0.02441	0.02025
	a	1.067	1.059	1.052	1.048
	k	0.05454	0.06117	0.06199	0.07878

Modified Henderson ve Pabis	R^2	0.998	0.9933	0.9839	0.9961
	RMSE	0.02196	0.04313	0.07235	0.03448
	SSE±	0.002411	0.007441	0.0157	0.003567
	a	-0.08173	-9.166	0.1075	0.7659
	b	1.082	11.8	-13.6	4.02
	c	0.002578	-0.9469	14.72	-3.79
	g	0.04417	0.08091	0.07481	0.1303
	h	1.125	0.1791	0.07401	0.1774
	k	1.406	0.07957	0.575	0.2345
Midilli et al.	**R^2**	**0.9993**	**0.9905**	**0.9997**	**0.9996**
	RMSE	**0.01087**	**0.03419**	**0.006759**	**0.007633**
	SSE ±	**0.0008266**	**0. 01052**	**0.0003198**	**0.0004079**
	a	**0.993**	**1.001**	**1.004**	**1.001**
	b	**- 0.001564**	**- 0.00491**	**- 0.00372**	**- 0.002**
	k	**0.019**	**0.02318**	**0.034**	**0.03637**
	n	**1.271**	**1.08**	**1.1**	**1.22**
Diffusion approach	R^2	0.9944	0.9952	0.9709	0.9957
	RMSE	0.02743	0.0274	0.06865	0.02563
	SSE ±	0.006771	0.005256	0.02828	0.003941
	a	- 44.5	-16.69	-0.1631	- 9.2
	b	0.9813	0.9534	0.9866	0.9189
	k	0.09972	0.1123	0.06001	0.1486
Two term	R^2	0.9916	0.9791	0.9932	0.9957
	RMSE	0.03812	0.05068	0.03625	0.03144
	SSE ±	0.01017	0.012313	0.005657	0.002999
	a	89.17	24.88	19.74	17.42
	b	- 88.12	- 23.92	- 18.74	- 16.42
	k_0	0.09454	0.0957	0.1082	0.1383
	k_1	0.09535	0.0999	0.1128	0.1451
Two term exponential	**R^2**	**0.9993**	**0.9905**	**0.9997**	**0.9996**
	RMSE	**0.03536**	**0.0286**	**0.0334**	**0.0284**
	SSE±	**0.0125**	**0.006544**	**0.00781**	**0.004838**
	a	**2.057**	**1.898**	**1.874**	**1.897**
	k	**0.08156**	**0.08514**	**0.08613**	**0.1106**
Verma et al.	R^2	0.9842	0.9869	0.9931	0.9899
	RMSE	0.04884	0.04549	0.03339	0.04318
	SSE ±	0.01909	0.01448	0.006689	0.009321
	a	-0.202	1.204	-8.992	-0.2415
	g	0.06102	5.689	0.105	0.09191
	k	4.867	0.06899	0.1139	5.3
Wang ve Singh	**R^2**	**0.9994**	**0.9998**	**1**	**0.9999**
	RMSE	**0.009104**	**0.005854**	**0.002007**	**0.003963**
	SSE ±	**0.000746**	**0.00002742**	**2.82×10^{-5}**	**9.422×10^{-5}**
	a	**- 0.03677**	**- 0.04168**	**- 0.04218**	**- 0.05418**
	b	**0.0003311**	**0.00043**	**0.0004293**	**0.0007292**
Parabolic	**R^2**	**0.9996**	**0.9998**	**1**	**0.9999**
	RMSE	**0.007999**	**0.00522**	**0.00215**	**0.003756**
	SSE ±	**0.0005119**	**0.0001907**	**2.773×10^{-5}**	**7.053×10^{-5}**
	a	**1.012**	**1.007**	**0.9994**	**1.004**
	b	**-0.03765**	**-0.04228**	**-0.04213**	**- 0.05462**
	c	**0.0007292**	**0.0004406**	**0.0004282**	**0.0007389**

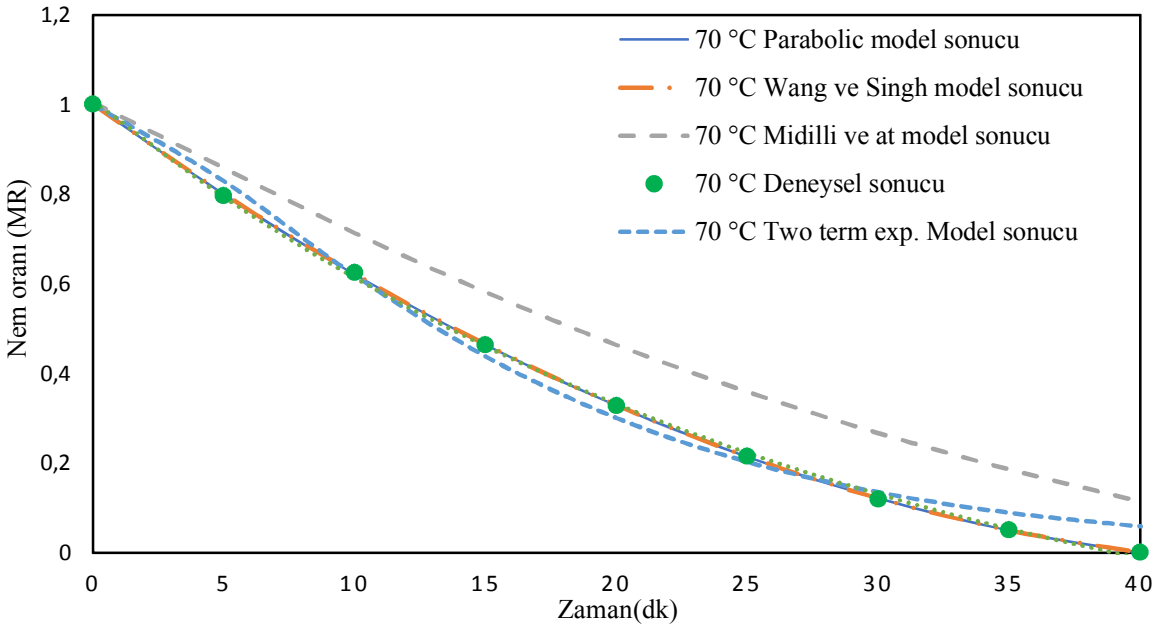
Şekiller 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 ve 5.24'te bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar ile farklı kurutma model sonuçları ile elde edilen kuruma eğrilerinin karşılaştırması verilmiştir. Nem oranının zamana göre değişimi eğrileri için en yüksek R^2 ile en düşük RMSE değerleri Parabolik ve Wang-Singh modellerinde elde edilmiştir. Her iki model sonuçlarının deneysel sonuçlara çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, bu iki modellin nem oranının zamanla değişimini açıklamada kullanılabileceğini göstermektedir.



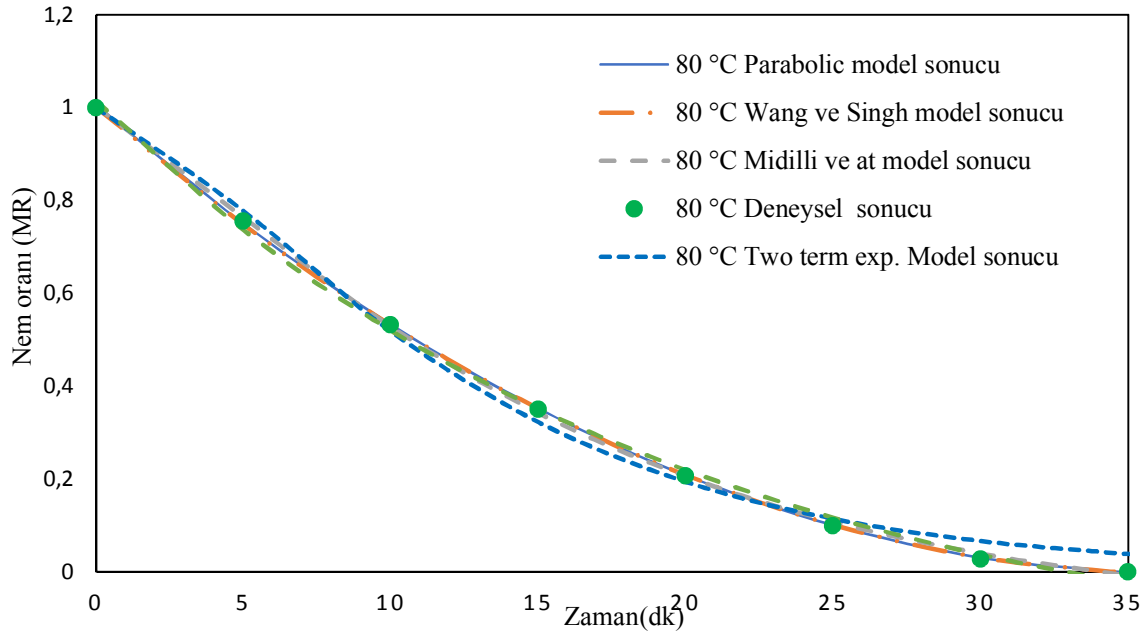
Şekil 5.20 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9).



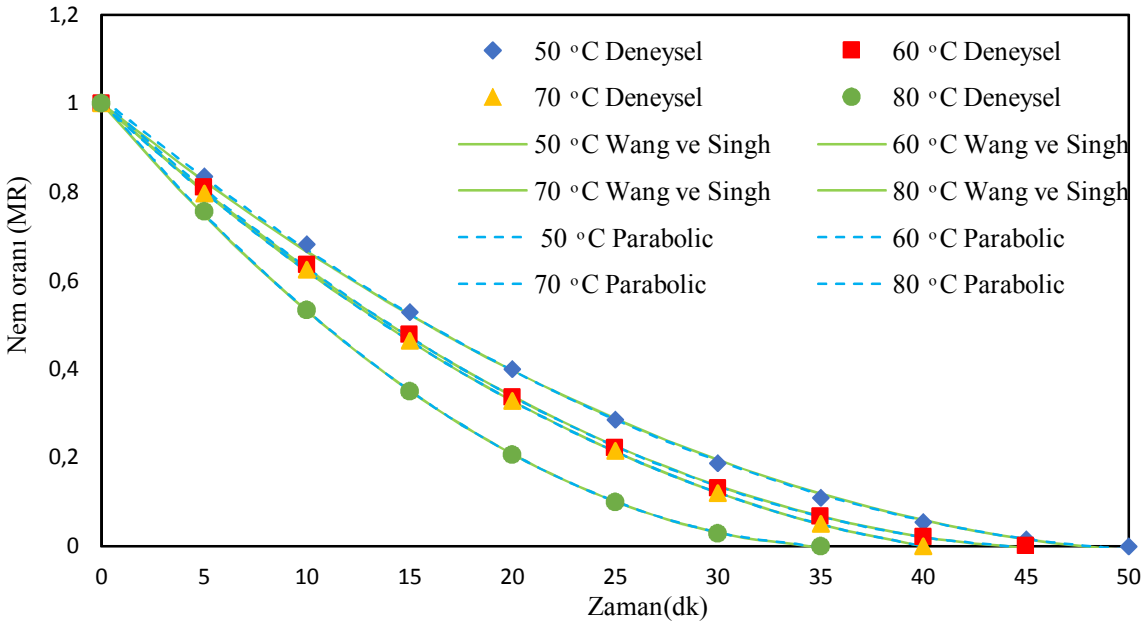
Şekil 5.21 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9).



Şekil 5.22 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9).



Şekil 5.23 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9).



Şekil 5.24 Nem oranı (MR) zamanla değişimi (1.5 m/s, RH = % 9).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada viyol kurutmada, kurutma havası özelliklerinin kuruma karakteristiklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler farklı kurutma havası hızlarında, sıcaklıklarında ve bağıl nem değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan viyoller 12'li yumurta kolisi şeklindedir ve her deney için aynı özelliklere sahip olup, ağırlığı kurutmadan önce 94 gram olarak sabit tutulmuştur. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Kurutma havası hızının etkisini görmek için 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s hızlarda deneyler yapılmıştır. 2.5 m/s hava hızında kuruma süresi, 2.0 m/s hava hızında kuruma süresine göre 10 dakika azalmaktadır. 2.5 m/s'den daha yüksek hava hızlarında ise kuruma süresi değişmediğinden, 2.5 m/s'den daha yüksek hava hızlarında viyolün kurutulması tavsiye edilmemektedir.

2. Viyolün kurutulmasına hava sıcaklığının etkisini görmek için 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Kurutma hava sıcaklığı arttıkça kuruma hızının arttığı görülmüştür. Dolayısıyla viyolün kurutulması işleminin yüksek sıcaklıklarda yapılması tavsiye edilmektedir.

3. Viyolün kurutulmasına havanın bağıl nem değerlerinin etkisini incelemek için % 9, % 18 ve % 27 bağıl nem değerlerinde deneyler yapılmıştır. % 9 bağıl nem değerinde kuruma süresi en kısa olduğu, bu nedenle düşük bağıl nem değerinde kurumanın daha hızlı olduğu belirlenmiştir.

4. Matematiksel modeller ile karşılaştırmak için 12 ayrı model incelenmiştir. Elde edilen istatiksel verilere (SSE, R^2 ve RMSE) göre, viyol kurutma için en uyumlu modeller Parabolik ile Wang-Singh olmuştur. Parabolik ve Wang-Singh modellerinde R^2 (0.9994 ile 1) arasında değişmektedir.

5. Viyol için difüzyon katsayı değerleri 2.09285×10^{-10} ile 5.40245×10^{-10} m/s^2 arasında değişirken, aktivasyon enerjisi 12.92 kJ / mol bulunmuştur.

KAYNAKLAR

Akarslan, F. (2007). "Dokuma Kumaşların Kuruma Hızı Değerlerinin Bulanık Mantık Metodu İle Belirlenmesi." Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi 2: 15-23.

Akoy, E. (2014). "Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices." International Food Research Journal 21(5): 1911-1917.

Akpinar, E. K. (2006). "Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits." Journal of food engineering 73(1): 75-84.

Anonim (2010). "Kuru meyve ve mamulleri ihracat değerlendirmesi, ." İstanbul ihracatçı birlikleri Genel sekreterligi Ar-ge şubesi, İstanbul.

ASAE , S. (1982). "Moisture measurement—peanuts." ASAE S 410 1: 679-680.

Coumans, W. and W. Kruf (1995). "Mechanistic and lump approach of internal transport phenomena during drying of paper sheet." Drying technology 13(4): 985-998.

Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion: 2d Ed, Clarendon Press.

Çakmak, H., S. Kumcuoğlu and S. Tavman (2014). "Mathematical Modeling and Thin Layer Drying of Chicken Meat Enriched Baguette Bread Slices." GIDA/The Journal of FOOD 39(3).

Darıcı, S. and S. Şen (2015). "Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions." Heat and Mass Transfer 51(8): 1167-1176.

Dash, K. K., A. S. S. Gope and M. Doloi (2013). "Study on Thin Layer Drying Characteristics Star Fruit Slices." Intl J Agric Food Sci Technol 4(7):679–86.

Doymaz, İ. (2010). "Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples." Food and Bioproducts Processing 88(2): 124-132.

Durmuş, M., K. Bilen and İ. Uzun (2012). "Isı Pompalı Tekstil Kurutma Makinelerinde Kurutma Havası Debisinin Kurutucu Performansına Etkisinin Deneysel Analiz." Mühendis ve Makina, cilt 53, sayı 635, s. 40-50.

Ekin, S. (2013). Mikrodalga-fan destekli konveksiyon ısıtma ile kurutma, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

El-Beltagy, A., G. Gamea and A. A. Essa (2007). "Solar drying characteristics of strawberry." Journal of Food Engineering 78(2): 456-464.

Feyzioğlu, G. T. (2011). "Havalı Güneş Kolektörleri İle Kurutucu Tasarımı." Bitirme Tezi, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Goerz Jr, D. and J. Jolly (1967). "The Economic Advantages of Microwave Energy in the Paper Industry." Journal of Microwave Power 2(3): 87-94.

Gölcü, M. and F. Şen (2014). "Mikrodalga İle Islak Viyolün Kurutulabilirliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi " Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 20, Sayı 4, 2014, Sayfalar 111-115.

Günerhan, H. (2005). "Endüstriyel Kurutma Sistemleri." TTMD-Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, Temel Bilgiler-Tasarım ve Uygulama Eki, Sayı 13, 12 Sayfa, Mart-Nisan 2005, Ankara.

Güngör, A. and N. Özbalta (1997). "Endüstriyel kurutma sistemleri." III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi.

Hansson, L. and A. Antti (2003). "The effect of microwave drying on Norway spruce woods strength: a comparison with conventional drying." Journal of Materials Processing Technology 141(1): 41-50.

Hashim, N., O. Daniel and E. Rahaman (2014). "A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (Cucurbita moschata) in a convective hot air dryer." Agriculture and Agricultural Science Procedia 2: 345-352.

Holman, J. P. (2007). "Experimental Methods for Engineers (7th Ed.)." New Delhi: Tata Mcgraw hill Publishing Company, 2007.

Kachru R. and Singh K. (1994). "Drying Characteristics of Pretreated Gren Gram (Phaseolus Aureus) Drying." Procedings of the 9th İnternational Drying Symposium, Vol. B, 1093-1104, Australia.

Kalender, V. (2013). Mikrodalga gücünün kurutma zamanı ve kurutma kalitesi üzerine etkisi, Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kaur, K. and A. Singh (2014). "Drying kinetics and quality characteristics of beetroot slices under hot air followed by microwave finish drying." African Journal of Agricultural Research 9(12): 1036-1044.

Kavak E., Biçer Y. and Yıldız C. (1999). "Kurutma Ve Kurutma Modelleri." Tmmob Makina Mühendisleri.

Kumar, P., A. S. Mujumdar and Z. Koran (1990). "Microwave drying: effects on paper properties." Drying Technology 8(5): 1061-1087.

Meisami-Asl, E., S. Rafiee, A. Keyhani and A. Tabatabaeefar (2010). "Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab)." Plant Omics **3**(3): 103.

Midilli A., H. Kucuk and Z. Yapar (2002). "A new model for single layer drying." Drying Technology, 20(7): 1503-1513.

Özdemir, M. and Y. O. Devres (1999). "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting." Journal of Food Engineering 42(4): 225-233.

Özel, Ö. F. (2010). "Balkabağının Farklı Kurutma Şartlarındaki Kuruma Karakteristiklerinin Belirlenmesi,." Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Konya.

Özgen, F. (2014). "Elma Kurutulmasında Kullanılan Konvektif Tip Bir Kurutma Sisteminin Tasarımı." Engineer & the Machinery Magazine(656).

Pakowski, Z. and A. S. Mujumdar (1995). "Basic Process Calculations in Drying,." pp. 71-112, in A.S. Mujumdar (Ed.) Handbook of Industrial Drying, 2nd Edition, Marcel Dekker, NewYork.

Rayaguru, K. and W. Routray (2012). "Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices." International Food Research Journal 19(4).

Sacilik, K. (2007). "Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.)." Journal of food engineering 79(1): 23-30.

Sharma, G. and S. Prasad (2004). "Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying." Journal of Food Engineering 65(4): 609-617.

Şen, S. (2010). "Tarım Ürünlerinin Kuruma Karakteristiklerinin Belirlenmesi " Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Konya.

Turkut, G. M., H. Çakmak and Ş. Tavman (2015). "Proteince zenginleştirilmiş İzmir gevreğinin kuruma davranışının incelenmesi." Pamukkale Üniv. Müh. Bilim Derg, 21(9), 421-427.

Tzempelikos, D. A., A. P. Vouros, A. V. Bardakas, A. E. Filios and D. P. Margaris (2015). "Experimental study on convective drying of quince slices and evaluation of thin-layer drying models." Engineering in Agriculture, Environment and Food 8(3): 169-177.

Vieira, M., L. Estrella and S. Rocha (2007). "Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp." Drying Technology 25(10): 1639-1648.

Wang, C. Y. and R. P. Singh (1978). "A single layer drying equation for rough rice." ASAE Paper No: 78-3001, ASAE, St. Joseph, MI.

Yağcıoğlu, A. (1999). "Tarım ürünleri kurutma tekniği." Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları(536).

Yakut, A. and G. Temir (2012). "The Effect Of Paper Dryness To The Number Of Drying Cylinder In Drying Cylinders." Sigma 30: 341-349.

Yaldiz, O. and C. Ertekin (2001). "Thin layer solar drying of some vegetables." Drying Technology 19(3-4): 583-597.

Zenoozian, M. S., H. Feng, S. Razavi, F. Shahidi and H. Pourreza (2008). "Image Analysis And Dynamic Modeling Of Thin-Layer Drying Of Osmotically Dehydrated Pumpkin." Journal of food processing and preservation 32(1): 88-102.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa AL-BAYATİ
Uyruğu : Irak
Doğum Yeri ve Tarihi : Kerkük - 26/8/1988
Telefon : 5397007423
Faks :
e-mail : Mustafamali88@yahoo.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Abo Eyup AL-Ansari, kerkük, kerkük.**	**2007**
Üniversite	:	**Tikrit ünivesitesi, Tikrit, Selahaddin.**	**2011**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk üniversitesi**	
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER: Arapça, İngilizce.

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

(Investigating The Effects of Air Temperature on Viol Drying Characteristics)