

**SİKLON TİPİ BİR KURUTUCUDA
ZENCEFİLİN KURUMA DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI**

Seda TORAMAN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ebru AKPINAR**

ŞUBAT-2015

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİKLON TİPİ BİR KURUTUCUDA ZENCEFİLİN KURUMA DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda TORAMAN

(101120114)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Ocak 2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Şubat 2015

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ebru AKPINAR (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Cengiz YILDIZ (F.Ü)
Doç. Dr. Filiz KAR (F.Ü)



Şubat-2015

ÖNSÖZ

Gıdaların kurutulması gıda maddesinden nemin uzaklaştırılması olarak tanımlanır. Gıdaların kurutularak dayanıklılık yöntemi ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemi ise de işlemin endüstriyel boyuta taşınması 18. Yüzyılda gerçekleşmiştir.

Gıda maddelerine uygulanan kurutmanın birçok amacı vardır. Bunlardan en önemli olanı depolama sırasında ürünün bozulmasını önlemektir. Kurutma ile ürünün nemi mikrobiyal gelişme ve diğer reaksiyonları sınırlamaya yeterli seviyeye düşürülerek bu amaca ulaşılır. Ayrıca nem miktarının düşürülmesiyle tat, koku ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin de korunması sağlanmaktadır. Kurutma işleminin diğer bir amacı da, ürün hacmini azaltarak, taşıma ve depolanmasında verimliliği arttırmaktır.

Kurutma işlemi ve kurutucu seçiminde dikkate alınması gereken temel etken, istenen niteliklere sahip ürünün elde edilmesinde minimum enerji tüketimi ve maksimum kuruma hızına ulaşmaktır. Bu çalışmada kullanılan siklon tipi kurutucuda, konveksiyonel kurutma sistemlerinden farklı olarak, örneklerin ısıtılmış hava ile teması, düz akış ortamı yerine dönel akış ortamında gerçekleşmektedir.

Kurutma işleminde bir diğer göz önünde bulundurulması gereken faktör de konvektif ısı transfer katsayıdır. Konvektif ısı transfer katsayısı hava ve ürünün arasındaki sıcaklık farkından dolayı kurutma hızı ve kurutucu tasarımı için önemli bir parametredir. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada amaç, siklon tipi bir kurutucuda zorlanmış taşınım, zencefil bitkisinin; farklı hız ve sıcaklıklar altında kuruma davranışlarının incelenmesi ve zencefilin konvektif ısı transfer katsayılarının hesaplanmasıdır. Yapılan bu çalışma süresi boyunca tüm zamanını ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ebru AKPINAR 'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Seda TORAMAN
ELAZIĞ-2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iii
SUMMARY	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
SEMBOLLER LİSTESİ	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. TEORİK BİLGİLER	11
3.1 Nemlilik Ölçüsü	11
3.2 Denge Nem İçeriği	12
3.3 Tarım Ürünlerinde Kurumanın Oluşum Kuramı ve Kurumanın Evreleri.....	13
3.4 İnce Tabaka Kuruma Kuramı.....	16
3.4.1 Sabit Hızda Kuruma Evresi	16
3.4.2 Azalan Hızla Kuruma Evresi	19
3.4.2.1 Azalan Hızla Kuruma Evresi İle İlgili Teorik Modeller.....	20
3.4.2.2 Azalan Hızla Kuruma Evresi İçin Geliştirilmiş Yarı Teorik Modeller ve Deneysel Kuruma Eşitlikleri.....	22
3.5 Kalın Tabaka Kuruma Kuramı.....	24
3.6 Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler.....	25
3.7 Kuruma Sırasında Isı ve Kütle Transferi	27
3.8 Konvektif Isı Transfer Katsayısı	28
3.9 Kurutucular ve Kurutma Yöntemleri.....	31
3.9.1 Kurutucu Seçimi.....	33
4. MATERYAL VE METOT.....	36
4.1 Materyal	36
4.2 Ölçümler	38
4.2.1 Sıcaklık Ölçümü	38
4.2.2 Hız Ölçümü	38
4.2.3 Nem Ölçümü	39
4.2.4 Kütle Tespiti.....	39
4.2.5 Kuru Madde Tayini	39
4.3 Deneyler	39
5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	40
6. KURUMA EĞRİLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	54
6.1 Zamanla Nem Oranı Değişiminin Modellenmesi	55
7. SONUÇLAR.....	58
8. KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	64

ÖZET

Bu çalışmada, siklon tipi konvektif bir kurutucuda zencefil dilimlerinin ince tabaka kuruma davranışı araştırılmıştır. Deneyler dört farklı kurutma havası sıcaklığında (40, 50, 60 ve 70 °C) ve üç farklı kurutma havası hızında (0.8, 1.5 ve 3 m/s) yapılmıştır. Kuruma kinetiğini belirlemek için zencefil dilimlerinin kütle değişimi bütün kurutma havası şartlarında kaydedilmiştir. Kurutma havası sıcaklığı ve hızının zencefil dilimlerinin kuruma hızı, boyutsuz nem oranı, difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi ve konvektif ısı transfer katsayısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Nem oranı verileri on iki farklı modele uygulanmış ve bu modellerin performansı korelasyon katsayısı (R), ki-kare (χ^2) ve tahminin standart hatası (RMSE) ile tespit edilmiştir. Midilli ve Küçük modeli zencefil dilimlerinin ince tabaka kuruma verilerini açıklayan en uygun model olmuştur. Midilli ve Küçük modelinde, $R=0.95432$, $\chi^2=0.008339581$, $RMSE=0.090408072$ olarak elde edilmiştir. Kuruma işleminin azalan hız periyodunda gerçekleştiği zencefil dilimlerinden havaya olan nem transferi deneysel olarak belirlenen difüzyon katsayısı yardımıyla ifade edilmiştir. Zencefil dilimlerinin difüzyon katsayısı değerleri 2.807×10^{-10} - 6.977×10^{-10} m²/s aralığında değişmiştir. Konvektif ısı transfer katsayısı değerleri ise 0.33-2.11 W/ m²°C aralığında değişim göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: İnce tabaka kurutma modelleri, difüzyon katsayısı, konvektif ısı transfer katsayısı, zencefil

SUMMARY

Investigation of the drying behavior of ginger in cyclone type dryer

In this work, the thin layer drying behavior of ginger slices in a cyclone type convective dryer were investigated. Drying experiments were carried out at four different drying temperatures (40, 50, 60 and 70 °C) and three drying air velocity (0.8, 1.5 and 3 m/s). In order to obtain drying data, the changes in the mass of ginger slices were recorded as well as the drying air properties. The effects of drying temperature and air velocity on the drying rate and moisture ratio, diffusion coefficient, activation energy and convective heat transfer coefficient of the ginger slices were investigated. The moisture ratio data were fitted to the twelve mathematical models and performance of these models was determined by correlation coefficient (R), reduced chi-square (χ^2) and root mean square error (RMSE). For the thin layer drying of ginger slices, the Midilli and Kucuk model was the best descriptive model. From the Midilli and Kucuk model for ginger slices, it was determined that $R=0.95432$, $\chi^2=0.008339581$, $RMSE=0.090408072$. The moisture transfer from the ginger slices occurring during the falling rate period of drying was characterized by determining experimentally the diffusion coefficient into the air. The diffusion coefficient values of ginger slices were changed in the range of 2.807×10^{-10} - 6.977×10^{-10} m²/s. The average convective heat transfer coefficient values of ginger slices were varied in the range of 0.33-2.11 W/m²°C.

Key words: Thin layer drying models, diffusion coefficient, convective heat transfer, ginger

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1	Ürün hücresinde ısı ve suyun kuruma sırasındaki hareket yönleri.....	14
Şekil 3.2	Karakteristik kuruma eğrileri	15
Şekil 3.3	Kurutucu seçimi için işlem adımları	35
Şekil 4.1	Zencefil dilimleri	36
Şekil 4.2	Siklon tipi bir kurutucunun şematik gösterimi	37
Şekil 5.1	Zencefilin V=0.8 m/s hızda, T=40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi.....	41
Şekil 5.2	Zencefilin V=1.5 m/s hızda, T=40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi.....	41
Şekil 5.3	Zencefilin V=3 m/s hızda, T=40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi.....	42
Şekil 5.4	Zencefilin T=40 °C sıcaklıkta, V= 0.8, 1.5, 3 m/s hızda kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi.....	42
Şekil 5.5	Zencefilin T=50 °C sıcaklıkta, V= 0.8, 1.5, 3 m/s hızda kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi.....	43
Şekil 5.6	Zencefilin T=60 °C sıcaklıkta, V= 0.8, 1.5, 3 m/s hızda kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi.....	43
Şekil 5.7	Zencefilin T=70 °C sıcaklıkta, V= 0.8, 1.5, 3 m/s hızda kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi.....	44
Şekil 5.8	Zencefilin V=0.8 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının kuruma süresiyle değişimi	45
Şekil 5.9	Zencefilin V=1.5 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının kuruma süresiyle değişimi	45
Şekil 5.10	Zencefilin V=3 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının kuruma süresiyle değişimi	46
Şekil 5.11	Zencefilin V=0.8 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının nem içeriği ile değişimi	46
Şekil 5.12	Zencefilin V=1.5 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının nem içeriği ile değişimi	47
Şekil 5.13	Zencefilin V=3 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının nem içeriği ile değişimi	47
Şekil 5.14	Zencefilin V=0.8 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem oranının kuruma süresiyle değişimi.....	48
Şekil 5.15	Zencefilin V=1.5 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem oranının kuruma süresiyle değişimi.....	49
Şekil 5.16	Zencefilin V=3 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem oranının kuruma süresiyle değişimi.....	49
Şekil 5.17	Sabit hava hızlarında hava sıcaklığıyla difüzyon katsayısının değişimi.....	51
Şekil 5.18	Efektif difüzyon katsayısı ve sıcaklık arasındaki arrhenius tipi bağıntı	51
Şekil 6.1	Midilli ve Küçük modeli kullanılarak elde edilen teorik ve deneysel bulunan nem oranı değerleri	57

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1	Literatürde bulunan bazı kuruma eğrisi modelleri.....	24
Tablo 5.1	Zencefil dilimleri için efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerlerinin sıcaklık ve hız ile değişimi.....	52
Tablo 5.2	Zencefil dilimlerinin konvektif ısı transfer katsayısı değerlerinin sıcaklık ve hız ile değişimi.....	53
Tablo 6.1	Zencefil örnekleri için elde edilen nem oranı değerlerine uygulanan modellerin sonuçları.....	56

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Ürünün yüzey alanı (m ²)
A _t	: Tepsi alanı (m ²)
C	: Sabit
C _v	: Nemli havanın özgül ısısı (J/kg °C)
D	: Difüzyon katsayısı (m ² /saat)
D ₀	: Sonsuz sıcaklıktaki difüzyon katsayısına eşdeğer sabit (kJ/mol °C)
D _{eff}	: Efektif difüzyon katsayısı (m ² /saat)
E	: Buharlaşma için gerekli enerji (kJ)
E _a	: Aktivizasyon enerjisi (J/kg mol °C)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
Gr	: Grashof sayısı
h, h _c	: Konvektif ısı transfer katsayısı (W/m ² °C)
h _D	: Konveksiyonla kütle iletim katsayısı (kg/sm ²)
K _h	: Kurutma havasındaki su konsantrasyonu
K _v	: Nemli havanın ısıl iletkenliği (W/m °C)
K _y	: Ürünün yüzeyindeki su konsantrasyonu
l	: Kurutulan ürün kalınlığının yarısı (m)
Le	: Lewis sayısı
M ₁	: Kurutmadan önceki nem (y.b) (%)
M ₂	: Kurutmadan sonraki nem (y.b) (%)
M _s	: Suyun mol ağırlığı (kg/mol)
n	: Sabit
Nu	: Nusselt sayısı
P _b	: Havadaki su buharının kısmi basıncı (Pa)
P _b '	: Ürün yüzeyindeki suyun, havanın yaş termometre sıcaklığındaki buhar basıncı (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
Q	: Isı Miktarı (kJ)
R	: Evrensel gaz sabiti (J/molK)
Re	: Reynolds sayısı
t	: Zaman (dk)
T _a	: Kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı (°C)
T _c	: Ürün sıcaklığı (°C)
T _e	: Ortam sıcaklığı (°C)
T _i	: Ortalama sıcaklık
T _m	: Hava sıcaklığı (K)
T _w	: Kurutma havasının yaş termometre sıcaklığı (°C)
W	: Ağırlık kaybı (gr)
W ₁	: İlk ağırlık (gr)
W ₂	: Son ağırlık (gr)
W _k	: Ürünün kuru ağırlığı (gr)
W _s	: Ürünün kuru ağırlığı (gr)
X	: Karakteristik boyut (m)
λ	: Suyun T _w sıcaklığında buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)
$\dot{m}_s$	: Birim zamanda üründen ayrılan su buharı (kg/s)
ω_2	: Havanın kurutucudan çıkış şartlarında sahip olduğu mutlak nem ($\frac{kg_{subuhar}}{kg_{kuruhava}}$)

ω_1	: Havanın kurutucuya giriş şartlarında sahip olduğu mutlak nem ($kg_{\text{buharı}}/kg_{\text{kuruhava}}$)
$\dot{m}_{ev}$	: Buharlaşmış nem miktarı (kg)
$\dot{Q}_e$	: Nemin buharlaşması için kullanılan ısı miktarı (J/m ² s)
%M _{k,b}	: Kuru baza göre nem oranı (%)
%M _{y,b}	: Yaş baza göre nem oranı (%)

Yunan Harfleri

γ	: Bağlı nem (%)
λ	: Buharlaşma gizli ısı (J/kg)
μ_v	: Nemli havanın dinamik viskozitesi (kg/m.s)
ρ_v	: Hava neminin yoğunluğu (kg/m ³)

1. GİRİŞ

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

Gıda işleme teknolojisi bakımından önemli bir yer tutan kurutma işlemi, matematiksel anlamda ısı ve kütle veya ısı ve kütlenin aynı anda transferi esasına dayanmakta ve modellenmesi yapılmaktadır. Kurutma işleminin amacı, gıdadaki suyun uzaklaştırılmasıdır [1]. İşlem sırasında kurutma havasından ürüne doğru ısı transferi gerçekleşir. Ürünün kullanım kalitesi ile dayanım özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden dolayı, bu işlemde son kurutma derecesinin çok önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle kurutmanın kontrollü şartlarda gerçekleştirilmesi önemlidir [2]. Bu amaçla, yaygın olarak belirli sıcaklık, bağıl nem ve akış hızına sahip hava kullanılır. Belirli nitelikteki kurutucu hava aynı anda hem gıdanın hissedilen sıcaklığının ve buharlaşma gizli ısının artmasını, hem de buharlaşan suyun buharlaşma yüzeyinden uzaklaştırılmasını sağlar. Böylece, sıcak hava akımına dayalı kurutmada kütle transferi için temel mekanizmalar şu şekilde gerçekleşir:

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

Isı transferi için mekanizma ise şu şekilde gerçekleşir:

- Kurutucu hava sıcaklığının gıda yüzeyine konveksiyonla taşınması
- Isının yüzeyden gıda merkezine doğru iletimle geçmesi şeklinde tarif edilebilir [1].

Kurutma, kompleks yapısıyla birçok bilim insanının uzun yıllardır ilgisini çekmiş ve hala çekmeye devam etmektedir. Kurutma işleminde uzun yıllardan beri süregelen temel araştırma alanı; kurutma havası koşulları, kurutucu tipleri, enerji maliyeti ve gıda kalitesini etkileyen parametrelerin belirlenmesi olmuştur [3].

Endüstride enerjinin yoğun olarak harcandığı kurutma prosesi, kâğıttan tekstile, seramikten gıdaya kadar çok geniş uygulama alanına sahiptir. Son yıllarda enerji tüketimindeki hızlı artışa, kurutma prosesinde harcanan enerji de önemli ölçüde katkı

sağlamıştır. Endüstriyel olarak gelişmiş ülkelerde, toplam enerjinin %25'lik gibi büyük bir kısmı kurutma prosesi için harcanmaktadır [4].

Son yıllarda kurutulmuş ürünler taze ürün pazarında etkili bir alternatif oluşturmaktadır. Ülkemizde kurutularak değerlendirilen ürünlerin % 63'ü yurtdışına ihraç edilmektedir ve bu miktar tüm ihracat gelirimizin % 80'ini oluşturmaktadır [4]. Kurutulmuş ürünler hem kuru olarak tüketilmekte, hem de hazır çorba, bebek maması, hazır yemekler gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır [5].

Dünyada kurutulmuş ürün üretimi her geçen gün artmakta ve bu üretimin büyük bölümü A.B.D (297.557 ton) ve Türkiye'de (190.000 ton) gerçekleştirilmektedir. Kurutulmuş meyve ve sebze pazarı Japonya'da 7,6 milyar dolar (1998'den bu yana) ve Çin'de 800 milyon dolar (1990'ların başlarından bu yana) olarak belirlenmiştir. Bu eğilimin tüm ülkeler için gelecek yüzyılda da artması ve ekonomik değerini artarak koruması beklenmektedir [6].

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 [7].

Uygulanabilirlik ve ekonomiklik gibi avantajları sebebiyle, gıda kurutmada konvektif kurutucular en çok tercih edilen kurutucu tipleridir [8]. Konvektif kurutmada, kaliteli kurutulmuş ürün eldesi için, optimum kurutma havası şartlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Bu da ancak ısı ve kütle transferi parametrelerinin doğru bir şekilde tespiti ile mümkün olur. Transfer parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, kaliteli kurutulmuş gıda eldesinin yanı sıra enerji tasarrufu açısından da son derece önemlidir. Bu parametrelerin tespitiyle, ideal bir kurutma için harcanması gereken enerji miktarı belirlenerek, gereğinden fazla enerji harcanması önlenmiş olur. Böylece, çevreye atılan kullanılabilir ısı önemli ölçüde azaltılacak ve ekonomik kazanç sağlanacaktır [9].

Zencefil bitkisi (*Zingiber officinale*) vatanı Güney Asya olarak bilinen bir bitki olup, tadı, keskin lezzeti ve diğer içerdiği yağlar nedeniyle hem ilaç hem de gıda sektöründe aranan katkı maddelerinden biridir. Bugün başta Hindistan ve Çin olmak üzere Asya, Afrika, Avusturalya, Güney ve Orta Amerika'da ve birçok ülkede yetiştirilmektedir. Uluslararası pazarda zencefilin tonu 300-500 Amerikan Doları arasındadır. Ülkemizde

ise 1 kg'lık yaş zencefilin perakende fiyatı 6 TL-15 TL arasında değişmektedir. Zencefil toz haline gelinceye kadar temel olarak; yıkama, soyma, kurutma ve öğütme işlemlerinden geçmekte, bu süreç beraberinde kalite ve hijyen problemlerini getirmektedir [10].

Bu çalışmanın amacıda, siklon tipi bir kurutucuda, dairesel dilimler şeklinde kesilmiş zencefilin kuruma davranışını dört farklı kurutma havası sıcaklığında ve üç farklı kurutma havası hızında incelemek, konvektif ısı transfer katsayılarını hesaplamak, nem içeriği eğrilerinin matematiksel modellemesini yapmaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tarımsal ürünlerin değerlendirilme şekilleri arasında kurutmanın yeri oldukça eski olmasına rağmen önemini halen sürdürmektedir. Kontrollü şartlar altında yapılan kurutma çalışmaları son yıllarda çok daha fazla yoğunluk kazanmıştır. Günümüze kadar, kurutma konusunda yapılan çalışmalar genellikle;

- Değişik ürünlerde en uygun kurutma koşullarının belirlenmesi,
- Kurutma süresinin kısaltılması,
- Kurutucu tiplerinin geliştirilmesi,
- Kurutucu dizaynında gerekli olan verilerin elde edilmesine yönelik olmuştur.

Güner [11], çalışmasında kayısı kurutmada teorik ve meteorolojik verileri kullanarak 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200 ve 400 L/s hava debisi değerlerinde, kuruma hızı, kuruma zamanı ve kuruma için ihtiyaç duyulan hava ve ısı miktarlarını belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışma raf tipi bir güneşli kurutucuda yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- Hava debisi arttıkça ısı ve kütle transferi artmıştır.
- Kuruma zamanı sıcaklık arttıkça azalmıştır.
- Hava debisi arttıkça, kuruma zamanı azalmıştır.
- Hava debisi arttıkça, kuruma hızı artmış, ancak kurumanın ileri evrelerinde hava debisinin etkisi ihmal edilebilecek düzeye gelmiştir.
- Hava sıcaklığı arttıkça kuruma hızı artmıştır.
- Tabla alanının büyütülmesi ihtiyaç duyulan gücü etkilemiştir.
- Rafli kurutucularda güneş ışınımından çok, hava akımının özellikleri etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Barbanti ve ark. [12], yaptıkları çalışmada, 3 erik çeşidinin (Blue free, Stanley ve Ente 707) kuruma karakteristiğinde beslenme miktarı (yükleme miktarı), kurutma havası sıcaklığı, hava hızı ve ön işlem gibi bazı işlem parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Yapılan denemeler neticesinde, aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Farklı beslenme miktarlarında, kurutma boyunca oluşan değişimin önemsiz olmuştur.
- Sodyum Hidroksit (NaOH) bandırma çözeltisine bandırılarak kurutulan erik çeşitlerinin kuruma zamanı önemli ölçüde kısalma göstermiştir.

- 4.5 m/sn hava hızında kurutma ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisine bandırma kombinasyonu, stanley erik çeşidi için en iyi deneme sonuçlarını vermiştir.
- Oda sıcaklığında depolanmış bazı kurutulmuş eriklerin incelenmesi sonucunda, % 20 daha az nem içeren kurutulmuş eriklerin 150 günden fazla bir raf ömrüne sahip oldukları belirlenmiştir.

Özgöz [13], sera içinde ve dış ortamda fasulye, biber ve soğanın kuruma karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Denemeler süresince fasulye ve biberler bütün ve kıyılmış halde, soğan ise sadece kıyılarak kurutulmuştur. Sonuçta, sera içerisinde ve kıyılarak kurutulan ürünlerin kuruma sürelerinin normal olarak kurutulan ürünlere göre daha kısa olduğu belirlenmiştir. Her ürün için ayrı ayrı kurutma sabiti değerleri hesaplanmış ve üssel modelin kurumayı daha iyi ifade ettiği belirtilmiştir.

Akbaba [14], laboratuvar tipi bir kurutucuda kabağın kuruma karakteristiğini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada kabağın dış kabuklarını soyup, çekirdeklerini çıkarmış 4x25x60 mm boyutlarında kurutmuştur. Deneyleri 38-60 °C arasındaki hava sıcaklığında, 4 m/ s hava hızında yaparak hava sıcaklığının kuruma hızı üzerindeki etkisini incelemiştir.

Zhang ve ark. [15], gözenekli malzemelerin konveksiyonla kurutulmasında sabit hız ve azalan hız periyotları esnasındaki ısı ve kütle transferini tanımlamak için bir matematiksel model geliştirmişlerdir.

Midilli ve ark. [16], mantar ve polenin kuruma periyotlarını araştırmışlardır. Mantar kurutma deneylerini hem laboratuvar tip bir kurutucuda hem de atmosferik şartlarda güneşte ve gölgede yapmışlardır. Poleni ise laboratuvar şartlarında ve güneşte kurutmuşlardır. Deneylerde ürünlerin kuruma eğrilerini, bu eğrilerin denklemlerini, kütle değişim oranlarını ve ortalama deneysel belirsizlik oranını tespit etmişlerdir. Mantarların 50 °C sıcak hava kullanılarak laboratuvar tip bir kurutucuda 5-6 saatlik bir kuruma periyodunda kurutulabileceği, kurutulan ürünlerin ise vakum altında korunması gerektiği belirlenmiştir. Polenin ise 40-45 °C lik bir sıcaklıkta 2.5-3 saat gibi bir kuruma periyodunda renk, lezzet, koku ve yapı değişikliği olmaksızın kuruduğu tespit edilmiştir.

Özdemir ve Devres [17] fındığın 100-160 °C sıcaklık aralığında ince sergide kuruma karakteristiğini yarı teorik ve ampirik kurutma modelleri ile açıklamaya çalışmışlardır.

Can [18], kabak çekirdeğinin kurumasını hem çevre şartlarında hem de güneş enerjili bir kurutucuda incelemiştir. Kabak çekirdeklerini ince sergide doğal ve zorlanmış konveksiyon da kurutmuştur. Kabak çekirdeğinin kuruma kinetiğini etkileyen ve kuruma hızını artıran en önemli parametrenin kurutma havası sıcaklığı olduğunu, kurutma havası hızının ise nem transferi üzerinde ikinci bir etkiye sahip olduğunu bildirmiştir.

Yaldız ve Ertekin [19], sultani çekirdeksiz üzümünü ince tabaka halinde güneş enerjili kurutucular ile kurutulmasını modellemişlerdir. Kurutma havası güneş enerjili hava ısıtıcı yardımıyla ısıtılmış ve kurutma odasında bulunan rafın üzerindeki ürünün içinden geçirilerek kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemine kurutma havası hızının etkisini belirlemek amacıyla üç farklı hava hızı (0.5, 1, 1.5m/s) kullanılmıştır.

Yaldız ve Ertekin [20], yaptıkları çalışmada güneş enerjili kabinet tip bir kurutucuda bal kabağı, yeşil biber, yeşil fasulye ve soğanın ince sergide kurutulmasını incelemişlerdir. Karşılaştırma yapabilmek için ürünleri güneşli ortamda da kurutmuşlardır. Deneylerde üç farklı hava hızı kullanarak, hızın kuruma süresi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hızın kuruma süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, güneş enerjili kabinet tipli kurutucuda kurutma süresinin 30.29-90.43 saat arasında, güneşte kurutma da ise 48.59-121.81 saat arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca kurutma eğrilerini ince sergideki kurutma modelleriyle açıklamaya çalışmışlar, kurutulan her ürün için en uygun modeli tespit etmişlerdir.

Midilli [21], kabuklu ve kabuksuz fıstık örneklerini hem güneş enerjili bir kurutucuda hem de açıkta güneşte kurutarak bu ürünün kuruma şartlarını ve davranışını tespit etmiştir. Fıstığın kuruma eğrisi denklemini en küçük kareler metoduyla bulmuştur. Kabuklu ve kabuksuz fıstık örnekleri güneş enerjili konveksiyonel kurutucuda 50 ± 10 °C de altı saatte kurduğunu tespit etmiştir. Açıkta kurutma da ise kuruma süresinin çok uzadığını, çevre ve iklim şartlarının olumsuz etkileri olduğunu aynı zamanda kurutulan ürünlerin hijyenik açıdan güven verici olmadığını bildirmiştir.

Akpınar ve Biçer [22], farklı boyutta kesilmiş elma dilimlerinin kuruma hızı üzerinde hız ve sıcaklık gibi parametrelerin etkisini ampirik bağıntılarla açıklamışlardır.

Akpınar ve arkadaşları [23], siklon tipi konvektif bir kurutucuda patatesin kuruma kinetiğini incelemişler ve deneysel olarak buldukları nem oranı eğrileri ve difüzyon katsayılarının matematiksel modellemesini yapmışlardır.

Akpınar ve arkadaşları [24], tünel tipi bir kurutucuda kırmızı biber dilimlerini farklı sıcaklıklarda kuruma davranışını araştırmışlardır.

Günhan [25], Rio Grande çeşidi domateslerin değişik hava sıcaklığı, hava hızı ve ön işlem koşullarında göstereceği kuruma karakteristikleri belirlenmeye çalışmıştır. Bu amaçla denemelerde 50-60- 70 ve 80 °C hava sıcaklıkları, 0.6-0.9 ve 1.2 m/s hava hızları kullanılarak kükürtlenmiş ve tuzlanmış domatesler kurutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan domateslerin kurutulması sırasında sahip oldukları nem miktarını belirlemekte kullanılabilecek eşitlikler geliştirilmiştir.

Gürlek [26] tünel tipi güneş enerjili ürün kurutucu tasarlamış ve imal etmiştir. Kurutucu, sera tipi tünel ve güneş enerjili hava ısıtıcısından oluşmaktadır. Kurutma ürünü olarak Rio Grande cinsi domates kullanılmıştır. Denemeler sırasında kurutucuda değişik bölgelerde sıcaklık, nem, hava hızı, yatay yüzeye gelen güneş ışınlamı ve ürün kütle kayıpları ölçülmüş ve grafikler halinde sunulmuştur. Kütle kesri ile kuruma süresi arasındaki ilişkiler üstel ve polinom bağıntılar olarak incelenmiştir. Toplayıcı ve kurutma sisteminin verimlilik analizleri yapılmış ve toplayıcı verimliliğinin %50-60 arasında, kurutucu verimliliğinin ise %10 değerine yaklaştığı görülmüştür.

Özel [27], balkabağının (Cucurbita moschata) tek tabaka kuruma kinetiğini deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde konveksiyon tipi bir kurutma deney seti tasarlanıp imal edilmiştir. Deneyler, yaş baza göre nem içeriği % 93.48 olan balkabağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kurutma havası sıcaklıkları 50 °C, 60 °C, 70°C, kurutma havası hızı 0.5, 1, 2 m/sn ve kurutma havası bağıl nemi de %5, %10, %20 olarak alınmıştır. Balkabağı kabukları soyulduktan sonra 30mmx30mm şeklinde kare dilimlere ayrılmış bu dilimler de 4 mm kalınlıklarında parçalara ayrılarak kurutulmuşlardır. Elde edilen veriler ile balkabağına ait kuruma eğrileri çizilmiş ve kurutma havası koşullarının kuruma işlemine etkisi belirlenmiştir. Deney sonuçları balkabağının kuruma davranışını ifade eden ve edebileceği düşünülen literatürde mevcut modellerden on farklı model sonuçları ile karşılaştırılmış, balkabağının kuruma davranışını ifade etmedeki uygunluğun veya deneysel sonuçlara en yakın modelin Midilli ve arkadaşları modeli olduğu görülmüştür.

Bayhan [28], farklı iki kabin tipi kurutucuda eşit ağırlıklardaki nane numunelerinin kurutulması incelemiştir. Böylece aynı tip ve aynı miktarda numuneler her iki deney setinde de kurutularak kurutma sürecini etkileyen parametreler karşılaştırılmış ve grafiksel olarak incelenmiştir. 1. deney setinde yapılan kurutma deneyi 40-60-70°C

sıcaklık ve 0.8-1.5 m/s hava hızlarında ızgara altından, 2. deney setinde yapılan kurutma deneyi 60°C sıcaklık ve 0.8-1.5 m/s hava hızlarında ızgara üzerinden üflenerek incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda 2.deney setinde yapılan kurutma da, 1. deney setinde yapılan kurutmaya göre daha kısa sürede kuruma gerçekleştiği ve kuruma hızının da daha yüksek olduğu görülmüştür. 60°C sıcaklık ve 0.8m/s hava hızındaki sıcak havanın iki farklı kurutucuda yapılan kurutmaya ait deney sonuçları, literatür de verilen ve sıkça kullanılan bağıntılar üzerinde uygulanmış ve nane için uygun model belirlenmiştir.

Ertuğrul [29] ekonomik değeri yüksek aromatik bitkilerden olan melisayı (*Melissa officinalis* L.) beş farklı kurutma havası sıcaklık profillerinde hassas kurutucuda kurutmuştur. Seçilen profiller sabit düşük sıcaklık (35 °C) , sabit yüksek sıcaklık (60 °C), üçgen sıcaklık profili, artan sıcaklık profili ve azalan sıcaklık profilidir. Kurutma denemeleri üç tekerrürlü yapılmıştır. Çalışma kapsamında kurutma süresi, ürün renk değişimi, ürün uçucu yağ oranı değişimi, özgül enerji tüketimi belirlenmiştir. Ayrıca, kuruma eğrileri çıkarılmış ve Page eşitliğine uydurulmuştur. Melisa bitkisi kurutma denemelerinin tamamlanma süreleri 3 saat ile 21 saat arasında değişmiştir. Sabit düşük sıcaklıkta kurutma denemeleri en uzun sürede (ortalama 18 saat) tamamlanırken sabit yüksek sıcaklıkta kurutma denemeleri en kısa sürede (ortalama 3 saat) tamamlanmıştır. Farklı model iyilik kriterleri Page eşitliğinin bu çalışmada elde edilen kuruma eğrilerini başarıyla temsil ettiğini göstermiştir.

Literatürde zencefilin kuruma kinetiği üzerine değişik kurutma sistemlerinde, değişik kurutma ortamlarında birçok çalışmalar mevcuttur, ancak zencefilin kuruma kinetiğinin belirlenmesi, kuruma eğrilerinin modellenmesi üzerine yapılan çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmüştür..

Schweiggert ve ark. [30], sprey kurutucu kullanarak kuruttıkları zencefilin gıda analizlerini gerçekleştirmişler ve bu tür problemlerin önüne geçmek için alternatif kurutma yöntemlerine ihtiyaç olduğu sonucuna varmışlardır.

Alakalı vd., [31], zencefilin uygun depolama şartlarının belirlenmesi için denge nemi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Denge nemi içeriğinin su aktivitesi ile doğru orantılı, sıcaklıkla ters orantılı olduğunu rapor etmişlerdir.

Phoungchandang ve Saentaweek [32], dilimlenmiş zencefile ait desorpsiyon izotermelerini deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneylerde tepsi kurutucu kullanmışlar, diffüzyon katsayılarını kurutma eğrilerinden elde etmişlerdir. Dilimlenmiş zencefilin

kuruma davranışının, literatürde Page modeli olarak bilinen modelle uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir.

Ganesapillai ve ark., [33], tarafından mikrodalga kurutma yöntemi kullanılarak yapılmıştır. 1 mm kalınlığında dilimlenmiş zencefil örneklerinin difüzyon katsayısını $9.17 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak rapor etmişler, bu değerin zencefil örneklerinin kalınlığı ile değiştiğini belirtmişlerdir.

Thorat ve ark. [34], 5 mm kalınlığında dilimlenmiş zencefilin kuruma karakteristiğini vakum kurutma yoluyla farklı sıcaklıklarda (40 °C, 50 °C, 60 °C, ve 65 °C) incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel verileri eğri uydurma metodu ile modellemişler ve efektif difüzyon katsayılarını bu kurutma metodu için belirlemişlerdir. Ortalama efektif difüzyon katsayılarının sıcaklıkla 1.859×10^{-8} ila $4.777 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ değerleri arasında değiştiğini rapor etmişlerdir.

Jayashree ve Visvanathan [35], tepsi kurutucu kullanarak başlangıçta kuru baza göre % 419.93 nem içeren zencefil dilimlerini, %10 nem içeriğine kurutmuşlardır. Tipik kuruma eğrilerini çıkararak, ortalama efektif difüzyon katsayısını $1.59 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak rapor etmişlerdir.

Parlak [10], zencefilin akışkan yataklı kurutucuda kuruma kinetiği incelemiştir. Yaş baza göre başlangıç nemi %88-89 olan zencefil kökleri, 2 mm kalınlığında dilimlenmiş ve % 4-5 nem içeriğine kadar kurutulmuştur. Kurutma havasının sıcaklığı, hızı ve bağlı neminin kuruma kinetiğine olan etkisini incelemek üzere, deneyler farklı kurutma havası (40, 50, 60 °C) sıcaklıklarında ve farklı (3 ve 4 m/s) hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma esnasında belli zaman aralıklarında alınan numunelerin kuru baza göre nem değerleri ölçülmüş ve daha sonra belirlenen nem oranları kullanılarak difüzyon katsayılarını hesaplamıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, kurutma havası sıcaklığının, hızının ve neminin kuruma hızında oldukça etkili bir parametre olduğunu göstermiştir. Ayrıca deneysel veriler literatürde var olan ince tabaka kuruma kinetiği modelleri ile karşılaştırılmış, verilerin Page modeli ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Kar ve Bicer [36] siklon tipi bir kurutucuda 30, 45, 60 °C kurutma havası giriş sıcaklığında, 0.5, 1 ve 1.5 m/s kurutma havası hızlarında farklı boyutlardaki zencefil örneklerinin kuruma kinetiğini incelemişlerdir. Kurumanın başlangıç aşamalarında hava hızının etkisinin daha fazla olduğunu, ileri ki aşamalarda ise bu etkinin azaldığını belirtmişlerdir. Özellikle 60°C kurutma havası giriş sıcaklığında yapılan kurutmada hızın

etkisinin daha belirgin olduğu, 45°C ve 30 °C de ise hızın etkisinin daha az olduğu, 30°C nin daha altındaki sıcaklıkların kurutma için elverişli olmadığı sonuçlarına varmışlardır.

Literatürde tarımsal ürünlerin kurutulması üzerine teoriksel ve deneysel çalışmalar yoğun bir şekilde yapılmasına karşın konvektif ısı transfer katsayısını incelemek için sınırlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Zencefilin konvektif ısı transfer katsayısı ile ilgili mevcut literatürde çalışmalar bulunamamıştır.

Anwar ve Tiwari [37] doğal taşınımında direkt güneş altında kurutmada ısı transfer katsayısının bulunması için çalışma yapmışlardır. Altı farklı tarımsal ürün için elde edilen deneysel verilerden yararlanmış ve lineer regresyon analizini kullanarak ısı transfer katsayısını hesaplamışlardır. Anwar ve Tiwari [38] benzer bir çalışmayı da zorlanmış taşınımında kurutmada altı farklı tarımsal ürün için yapmışlardır ve regresyon analizi yardımıyla da ısı transfer katsayılarını hesaplamışlardır.

3. TEORİK BİLGİLER

3.1. Nemlilik Ölçüsü

Tarım ürünlerinde bulunan nem miktarları, bünyede tutulmuş bulunan su ağırlığı olarak ele alınır. Su miktarı, % olarak oransal biçimde tanımlanır. Nem miktarının belirlenmesinde “Yaş baz” (y.b.), “Kuru baz” (k.b.) olmak üzere iki tanımdan biri kullanılmaktadır [39].

Yaş baza göre nem, ürünlerdeki su ağırlığının ürünün tüm ağırlığına oranı olarak tanımlanır.

$$\%M_{y.b} = \frac{W_s}{W_s + W_k} \cdot 100 \quad (3.1)$$

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

$$\%M_{k.b} = \frac{W_s}{W_k} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Bu eşitliklerde,

W_s : Su ağırlığı (gr)

W_k : Ürünün kuru ağırlığı (gr)

$\% M_{y.b}$: Yaş baza göre nem oranı (%)

$\% M_{k.b}$: Kuru baza göre nem oranı (%)

dır. Kuru ve yaş baza göre saptanan nem oranları aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla birbirine çevrilebilir.

$$\%M_{k.b} = \frac{M_{y.b}}{100 - M_{y.b}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Yaş baza göre saptanan nem miktarı genel olarak ürün alım satımlarında, kuru baza göre saptanan değerler ise kurutma çalışmalarında kullanılmaktadır.

Kurutma sırasında ürün nem kaybedeceğinden ağırlığı azalacaktır. Nem kaybı nedeniyle oluşacak ağırlık azalması aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir [40].

Ürünün ilk ağırlığı biliniyorsa,

$$W = W_1 \frac{M_1 - M_2}{100 - M_2} \quad (3.4)$$

Ürünün son ağırlığı biliniyorsa,

$$W = W_2 \frac{M_1 - M_2}{100 - M_1} \quad (3.5)$$

Bu eşitliklerde,

W : Ağırlık kaybı (gr)

W₁ : İlk ağırlık (gr)

W₂ : Son ağırlık (gr)

M₁ : Kurutmadan önceki nem (y.b) (%)

M₂ : Kurutmadan sonraki nem (y.b) (%)

olarak verilir.

3.2. Denge Nem İçeriği

Ürün kurutma işlemlerinde, denge nem içeriğinin bilinmesi oldukça önemlidir. Ürünün denge nemi, o andaki çevre koşullarında ürünün bünyesinde bulundurabileceği sınır nem miktarını belirtmede kullanılmaktadır. Denge nemi, çevre havasının nem ve sıcaklık koşullarıyla olduğu kadar, ürünün tür, cins ve olgunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir [41].

Her bir ürünün, belirli sıcaklık ve nem içeriğinde, kendine özgü bir su buharı basıncı vardır. Ürün nemli hava ile karşılaştığında ya nem kazanmakta, ya da nem kaybetmektedir. Bu durumu saptamak için ürünün farklı nem içeriği ve sıcaklık düzeylerinde buhar basıncının bilinmesi gerekmektedir. Eğer ürün neminin buhar basıncı, içinde bulunduğu havanın buhar basıncından fazla ise ortama nem verecek, az ise ortamdan nem alacaktır. Ortamın koşulları değişmedikçe ürün nem içeriğinde bir değişim olmaz [41]. Ürün, içinde bulunduğu ortam ile arasında nem açısından bir

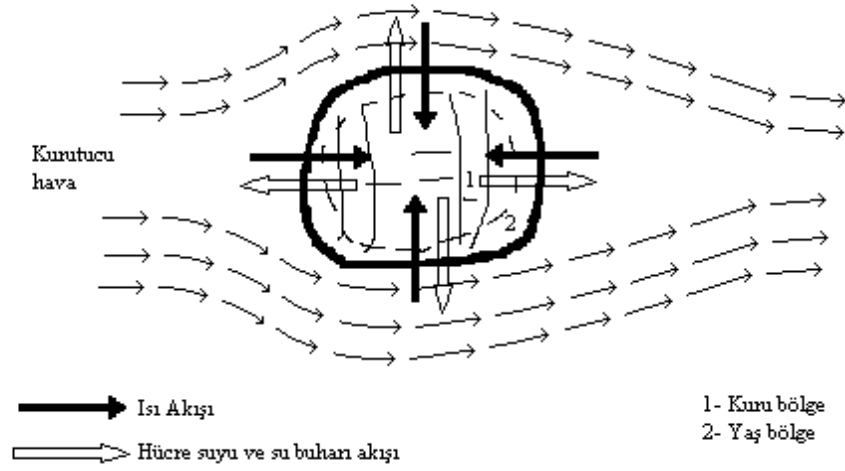
dengein oluşması durumunda bünyesindeki nemi *Denge Nemi*, o anda havanın içerdiği bağıl nem değerine de *Denge Bağıl Nemi* denilmektedir. Denge nemi içeriğindeki değişimler şunlardan kaynaklanmaktadır; ürün çeşidi, ürün olgunluğu, bağıl nemi ölçme teknikleri ve denge nem içeriği saptama yöntemleridir [41].

3.3. Tarım Ürünlerinde Kurumanın Oluşum Kuramı ve Kurumanın Evreleri

Kurutmada esas, kurutulacak malzemenin içindeki suyu önce buhar haline getirip sonrada bu buharı uzaklaştırmaktır. Suyu sıvı halden buhar haline getirmek için, buharlaştırma gizli ısısı kadar bir ısı vermek gerekmektedir. Bu ısı, normal sıcaklıklarda buharlaştırılacak her gram su için yaklaşık 2.5 kJ'dür. Malzemeye bu ısıyı vermek için klasik ısı transfer yöntemleri ile di-elektrik ısıtma metotları kullanılır. Klasik ısı transfer yöntemleri kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyondur. Bu ısının verilmesi sırasında ısı transfer metotlarından biri veya birkaçı etkili olabilir. Hava akımı yardımıyla yapılan kurutmada konveksiyonla ısı iletimi daha etkilidir [42].

Şekil 3.1' de görüldüğü gibi bu ısıtmada, sıcaklık dokunun dışından hücrelere doğru olurken, buharlaşan su hücreden dışa doğrudur. Di-elektrik yolla ısı transferi ise bunun tam tersi olup, ısı içeriden dışa doğrudur. Su buharının ürünü terk edişi difüzyon, kapillar veya bu iki mekanizma ile olur.

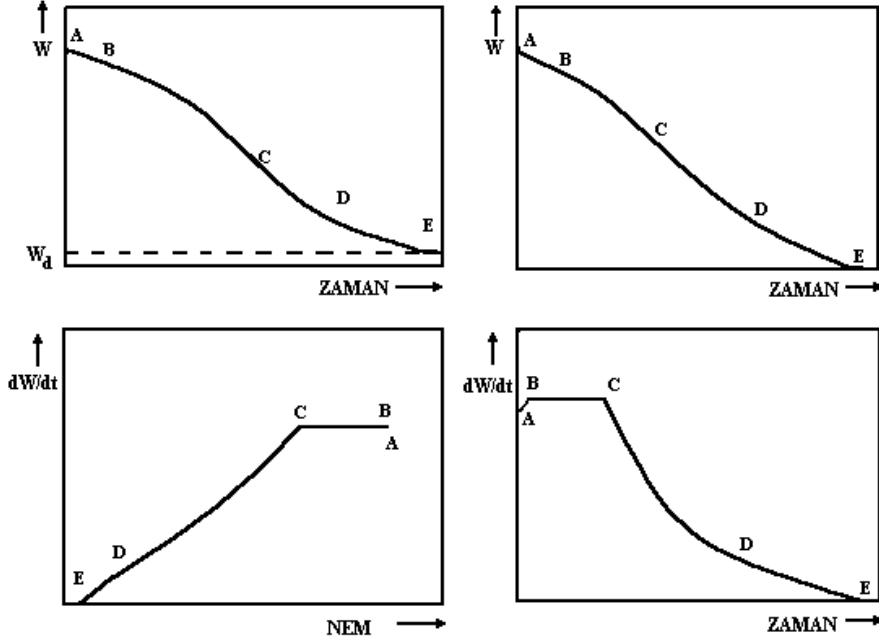
Kuruma amacıyla yeterli ısının bulunduğu bir ortama konan nemli bir maddenin kuruma sürecinde genel olarak üç evre vardır. Bunlar ısınma evresi, sabit kuruma hızı ve azalan kuruma hızı evreleridir [42].



Şekil 3.1. Ürün hücresinde ısı ve suyun kuruma sırasındaki hareket yönleri [42].

Kurumakta olan bir maddenin nemliliğinde olan değişim Şekil 3.2 'de verilmiştir. Şekillerde AB ile gösterilen ısınma evresinde, ürünün sıcaklığı kurutma havasının sıcaklığı ile dengeye ulaşınca kadar sürer. Ürün kalınlığı azaldıkça, ısınma evresi süresince oluşan nem kaybı dikkate alınmayacak ölçüde azalır [42].

Sabit kuruma hızı evresi, şekillerde BC çizgisiyle belirtilmiştir. Burada ürünün üzeri ince bir su tabakası ile kaplı olduğundan, önce bu su tabakası buharlaşmaya başlar. Aslında bu durgun bir su yüzeyinden olan serbest buharlaşmaya benzer. Başlangıçta çok hızlı olan bu buharlaşma, bir süre sonra yüzeyin hemen üzerinde oluşan buhar tabakası nedeniyle yavaşlar. Kurumanın devam etmesi için, bu buhar filminin, Şekil 3.1' de görüldüğü gibi hareketli bir hava akımı ile dağıtılıp taşınması gerekir. Şekildeki C noktası (ürünün yüzeyindeki serbestçe buharlaşabilen nem sona erdiği zaman), sabit hızdaki kurumanın sona erdiğini belirtmekte olup, bu noktadaki nem “kritik nem” olarak bilinir. C noktasının görülebilmesi için, ürünün başlangıç nemi, kritik nem değerinden daha yüksek olmalıdır. Meyvelerde ve sebzelerde sabit kuruma hızı evresi, genellikle çok kısa sürer [42].



Şekil 3.2. Karakteristik kuruma eğrileri [42].

Şekildeki CDE eğrisi, sabit kuruma evresinden sonra başlayan azalan hızda kuruma evresini göstermektedir. Bu evrede buharlaşma ürünün içinde başladığından su yüzeye difüzyon ile ulaşır. Yüzeye yakın bölümler, hem doğrudan doğruya yüzeye ve hem de kapıllarla nem verdiklerinden, iç katmanlara göre daha çok su kaybederler. Bunun sonucu olarak ürünün dış yüzeyinde kabuk bağlama, buruşma, çatlama ve yarılmalar görülür. Bu evrede kuruma süresi uzadıkça, birim zamanda buharlaşan nem miktarı azalmaktadır. Bu nedenle bu evreye azalan hızda kuruma evresi denir ve nem uzaklaşması sona erene kadar (E) devam eder. Birinci azalan hız evresinde, hem yüzeyden serbest buharlaşma ve hem de iç kısımlardaki buharlaşan suyun hareketi etkili olmaktadır. Bu bölüm bir geçiş aşamasıdır (CD arası). Hava hızı, sıcaklık ve nem bu bölümde etkili olmaktadır. İkinci bölümde kuruma hızı, bütünüyle içsel nem hareketine bağlı olarak oluşur. DE ile gösterilen bu bölüm denge nemine ulaşmaya kadar devam eder [42].

3.4. İnce Tabaka Kuruma Kuramı

İnce tabaka kavramı, kurutulacak ürünün yalnızca bir tanesinin kalınlığına sahip olacak şekilde serilmesiyle elde edilen, kuramsal bir ürün tabakasını belirtir. Bu kavram, kurutma havasının bu tabakanın içinden geçerken sıcaklık ve nem değerlerinde bir değişikliğin olmadığı kabulünün yapılabilmesini sağlamaktadır [41].

Tarım ürünlerinin ince tabaka halinde kurutulması sırasında ısı ve kütle iletimi sabit ve azalan kuruma evreleri için ayrı ayrı incelenir [41].

3.4.1. Sabit Hızda Kuruma Evresi

Sabit hızda kuruma evresi, ürünün içerdiği nem kritik nem değerinden daha fazla olduğunda görülebilir. Sabit hızla kuruma evresi süresince [40],

- Ürün yüzeyinin ince bir su filmiyle kaplı olduğu
- Kuruma hızının, kurutma havasının sıcaklığından, bağıl neminden ve hızından etkilendiği
- Kuruma hızının, ürünle ilgili unsurlardan etkilenmediği
- Ürün yüzey sıcaklığının, kurutma havasının yaş termometre sıcaklığına eşit olduğu
- Ürün yüzeyindeki su buharı basıncının, yüzey sıcaklığına eşit sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına eşit olduğu kabul edilir. Bu ön kabullerden de anlaşılacağı gibi, sabit hızla kuruma evresinde buharlaşan su miktarının aynı koşullardaki serbest su yüzeyinden buharlaşan su miktarına eşit olduğu varsayılmaktadır. Oysa yapılan gözlemler, bu evrede üründen buharlaşan suyun serbest su yüzeyinden buharlaşandan %30 daha az olduğunu göstermektedir [40].

Bu evre sırasında, kurutma havası ile ürün arasındaki ısı ve kütle iletimi aşağıdaki eşitliklerle belirtilebilir [40]:

Kurutma havasından ürüne iletilen ısı miktarı;

$$Q = h \cdot A \cdot (T_a - T_w) \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte,

Q : Isı miktarı (kJ)

h : Konvektif ısı transfer katsayısı (W/m^2K)

T_a : Kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_w : Kurutma havasının yaş termometre sıcaklığı ($^{\circ}C$)

A : Ürünün yüzey alanı (m^2)

Üründen kurutma havasına birim zamanda iletilen su buharı miktarı,

$$m_s = h_D \cdot A \cdot (K_y - K_h) = \frac{h_D \cdot A \cdot M_s}{R \cdot T_m} (P_b' - P_b) \quad (3.7)$$

Burada,

m_s : Birim zamanda üründen ayrılan su buharı (kg/s)

h_D : Konveksiyonla kütle iletim katsayısı (kg/sm^2)

K_y : Ürünün yüzeyindeki su konsantrasyonu

K_h : Kurutma havasındaki su konsantrasyonu

M_s : Suyun mol ağırlığı (kg/mol)

R : Evrensel gaz sabiti (J/molK)

T_m : Hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)

P_b' : Ürün yüzeyindeki suyun, havanın yaş termometre sıcaklığındaki buhar basıncı (Pa)

P_b : Havadaki su buharının kısmi basıncı (Pa)

ile ifade edilir.

Üründen ayrılan suyun buharlaşabilmesi için gerekli enerji;

$$E = m_s \cdot \lambda \quad (3.8)$$

E : Buharlaşma için gerekli enerji (kJ)

λ : Suyun T_w sıcaklığında buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)

(3.6), (3.7) ve (3.8) denklemlerinden faydalanarak, birim zaman içinde üründen ayrılan nem miktarı (kuruma hızı) aşağıda belirtilen eşitlik yardımıyla bulunur:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h.A.(T_a - T_w)}{\lambda} = h_D.A.(\omega_2 - \omega_1) \quad (3.9)$$

Burada,

ω_1 : Havanın kurutucuya giriş şartlarında sahip olduğu mutlak nem ($\text{kg}_{\text{subuhar}}/\text{kg}_{\text{kuru hava}}$)

ω_2 : Havanın kurutucudan çıkış şartlarında sahip olduğu mutlak nem ($\text{kg}_{\text{subuhar}}/\text{kg}_{\text{kuru hava}}$) olarak tanımlamaktadır.

Isı ve kütle iletiminin birlikte yer aldığı işlemlerin analizinde Lewis sayısı (Le) önemli bir rol oynar. (3.9) eşitliğinde, kütle transfer katsayısı (h_D) kolaylıkla ölçülemediği için Lewis sayısından faydalanılır.

$$Le = \frac{h}{h_D.C} \quad (3.10)$$

Hava–su sistemlerinde Le sayısının 1' e eşit olduğu kabul edilir [40],

Burada,

C, Havanın ısı kapasitesi, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{kuru hava}} \text{ } ^\circ\text{C}$

Buna göre, $C = 1.007 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$

$$1 = \frac{h}{h_D.1.007}$$

ve buradan $h_D = 0.093h \text{ kg}_{\text{kuru hava}}/\text{m}^2\text{s}$ bulunur. Sabit kuruma hızı döneminde kuruma hızının hesaplanmasında h_D yerine $0.093h$ kullanılır.

(3.9) numaralı eşitlikte yer alan konveksiyonla ısı ve kütle iletimi katsayılarının kurutma işlemi sırasındaki değişimleriyle ilgili deneysel çalışmalar, bu katsayıların yaklaşık olarak,

- Hava akımının materyal yüzeyine paralel olması durumunda, hava hızının 0.8 kuvvetiyle,
- Hava akımının ürün tabakasının içinden geçirilmesi durumunda 0.6 ya da daha küçük bir kuvvetiyle orantılı olduğunu belirtmektedir.

Kurutma işlemi sırasında, kuruyan materyale konveksiyon yoluyla ısı iletiminin dışında, kondüksiyon ve/veya radyasyon yoluyla da ısı iletimi söz konusu olduğunda

(3.9) numaralı eşitlikte bu yollarla olan ısı iletimini belirlemek için geliştirilmiş ifadelerin eklenmesi gerekir [40].

Bu çalışmada, azalan hızla kuruma işlemleri gerçekleştiğinden, sabit hızla kuruma evresi hakkındaki bilgiler konu bütünlüğü sağlanması bakımından önemlidir.

3.4.2. Azalan Hızla Kuruma Evresi

Azalan hızla kuruma evresi sırasında, kuruma hızının ve süresinin belirlenmesi, sabit hızla kuruma evresine göre daha karmaşıktır. Yalnızca materyalin yüzeyinden konveksiyonla ısı ve kütle iletimi söz konusu değildir. Bu evrede ürün içindeki ısı ve kütle difüzyonun da dikkate alınması gerekmektedir [43].

Azalan hızla kuruma evresi sırasındaki kuruma olayını incelemek amacıyla teorik, yarı teorik ve deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematiksel modellerden yararlanmak mümkündür.

Azalan hızla kuruma evresiyle ilgili teorik ve yarı teorik kuruma modellerinin geliştirilmesi sırasında, işlemleri biraz daha kolaylaştırmak amacıyla, bazı ön kabuller yapılır. Bu kabuller aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir [43]:

- Ürün içindeki nem dağılımı tek düzedir.
- Kuruma, madde içindeki nemin su veya buhar fazında difüzyonu sonucu oluşur.
- Difüzyon
 - Nem konsantrasyonu farkı
 - Sıcaklık konsantrasyonu farkı
 - Buhar basınçları konsantrasyonu farkı

gibi etkenlere bağlıdır.

- Kurutma havasının özellikleri (sıcaklık, hız, bağıl nem) kuruma süresince değişmez.
- Ürün ince bir tabaka şeklinde serilir.

3.4.2.1. Azalan hızla kuruma evresi ile ilgili teorik modeller

Luikov ve arkadaşları, herhangi bir materyalde suyun iletimi ve buharlaşarak ayrılmasını kontrol eden unsurları dikkate alarak kılcal borulu yapıya sahip, gözenekli materyaller için teorik bir model geliştirmişlerdir. Bu matematiksel model üç kısmi diferansiyel denklem takımından oluşmaktadır [43].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \quad (3.11a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \quad (3.11b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P \quad (3.11c)$$

Yukarıdaki (3.11,a,b,c) eşitliklerinde yer alan M, nemi, T sıcaklığı, P basıncı, t zamanı ve K ürün ve çevre ile ilgili doğal katsayıları belirtmektedir. Günümüzde, bu katsayıların tarım ürünleriyle ilgili olanlarının pek azı belirlenebilmiştir. Bu nedenle, yukarıdaki denklem takımlarını kullanılabilir duruma getirebilmek amacıyla bazı terimlerden vazgeçilip, sadeleştirmeler yapılır. Örneğin, toplam basınç farkı nedeniyle oluşacak nem iletimi, tarım ürünlerinin kurutulması sırasında söz konusu dahi olmayacak derecede yüksek sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek büyüklüğe geleceğinden, denklem takımlarındaki basınç terimi ihmal edilir [43]. İkinci bir sadeleştirme, sıcaklık konsantrasyonu farkından ötürü meydana gelen nem iletiminin ihmal edilmesiyle yapılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, nem konsantrasyon farkına bağlı olarak meydana gelen nem iletimiyle karşılaştırıldığında, sıcaklık farkına bağlı iletim, dikkate alınmayabilecek ölçülerdedir [43].

Yukarıda sıralanan sadeleştirmeler sonucunda, azalan hız evresi sırasındaki kuruma hızı, yalnızca bir kısmi diferansiyel denklemle ifade edilebilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M \quad (3.12)$$

(3.12) numaralı eşitlikte “K” katsayısı yerine, difüzyon katsayısı “D” kullanılabilir. Bu durumda elde edilen denklem D nin sabit değeri için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \cdot \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (3.13)$$

Kartezyen koordinatlar da c=0, silindir koordinatlar da c=1, küresel koordinatlar da c=2 değerlerini almaktadır. (3.13) eşitliğinin değişik şekilli katı cisimler için çözümü yapılarak kurutma denklemi olarak kullanılabilir. (3.13) denklemi aşağıdaki başlangıç ve sınır şartları kullanılarak çözülebilir.

$$M(r, 0) = M_0$$

$$M(r_0, t) = M_e$$

(3.13) numaralı eşitliğin sonsuz yassı levha cisimlerin, herhangi bir “t” anındaki ortalama nem düzeyleri dikkate alınarak yapılan analitik çözümü aşağıda verilmektedir [44,45]. Bu çözümde, difüzyon katsayısının sabit olduğu, katıyı çevreleyen ortamda kütle transferine karşı direnç olmadığı ve katı ve çözünen arasında kimyasal bir reaksiyon olmadığı kabulleri yapılmaktadır.

Sonsuz yassı levha için bir boyutlu durum [45],

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{D \cdot t}{L^2} \right] \quad (3.14)$$

Burada,

D, tüm azalan kuruma dönemine ait su buharının havaya difüzyon katsayısı (m²/saat)

L, Kurutulan ürün kalınlığının yarısı, m

M_e, Kurutulan ürünün denge bağıl nemi (ERH)

M₀, Ürünün başlangıçtaki nem oranı (kg_{su}/kg_{kurumadde})

olarak verilmektedir.

(3.14) eşitliğinde serinin yalnızca ilk teriminin dikkate alınmasıyla yapılan çözümde hata %5' i geçmez. Bu hata tarım ürünlerinin kurutulmasıyla ilgili işlemler için kabul edilebilir olduğundan seri açılımının ilk terimi alınıp ayrıca $\left[\pi^2 \frac{D}{4L^2} \right]$ yerine k yazılarak yassı düz levhalarda bir boyuttaki durum için aşağıda belirtilen eşitlikler elde edilir [45,46]:

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-kt) \quad (3.15)$$

Difüzyon katsayısı gerçekte sabit değildir, nem içeriği ile değişir. D değeri, küçük nem içeriklerinde daha azdır ve kuruma yüzeyi yakınında çok küçük olabilir. Pratikte kurutulan materyalde ortalama bir D değeri deneysel olarak hesaplanabilir. Bu amaçla aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$t = \frac{4L^2}{\pi^2 D} \ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)} \quad (3.16)$$

Eğer yassı düz levha için $\ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)}$ ifadesine karşı zaman grafiği çizilirse

bir doğru elde edilir ve bu doğrunun eğiminden D difüzyon katsayısı hesaplanır [45-47].

Difüzyon yavaş kuruyan materyallerin karakteristik davranışdır. Katı yüzeyinden havaya su buharının kütle transferi direnci genellikle ihmal edilir ve bütün kuruma hızını katıdaki difüzyon kontrol eder. Böylece yüzeydeki nem içeriği denge değerindedir veya denge değerine çok yakındır. Sıcaklıkla difüzyon katsayısı arttığından, katıdaki sıcaklığın artmasıyla kuruma hızı artar.

3.4.2.2. Azalan hızla kuruma evresi için geliştirilmiş yarı teorik modeller ve deneysel kuruma eşitlikleri

Azalan hızla kuruma evresi sırasında materyalin içinde oluşan nem iletimi, Newton'un soğumasıyla ilgili yasasına benzetilerek açıklanmaya çalışılır. Söz konusu yasa, cisim ile çevre arasındaki sıcaklık farkının çok büyük olmaması şartıyla, sıcaklığı

değişmez kabul edilen bir ortam içine konulan bir cismin sıcaklığındaki değişim miktarının, cisim ve çevre sıcaklıkları arasındaki farkla orantılı olduğunu belirtmektedir. Bu yasa matematik olarak aşağıdaki eşitliklerle gösterilebilir [43]:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_e) \quad (3.17)$$

Nem içeriği değişmez kabul edilen bir ortam içinde bulunan herhangi bir materyalin neminde meydana gelen değişim, (3.17) denkleminin analoguyla aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (3.18)$$

veya

$$\frac{dM}{(M - M_e)} = -k dt \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'daki diferansiyel eşitliğin çözümü aşağıdaki şekildedir,

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt) \quad (3.20)$$

(3.20) numaralı eşitlikte yer alan “ k ” kuruma sabiti olarak adlandırılır. Birimi h^{-1} veya s^{-1} dir. Kuruma sabiti kurutulacak ürün ve kurutma şartlarına göre deneysel verilerden yararlanılarak belirlenir. Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulan (3.20) numaralı eşitlik Newton modeli olarak tanımlanır. (3.20) denklemini yardımıyla hesaplanan sonuçlar, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elde edilen değerlerin azalan hız evresinin birinci bölümüyle iyi bir uyum gösterdiği, ancak ikinci bölümde bazı sapmaların ortaya çıktığı görülür [41,43,46]. Bu nedenle, kuruma eğrilerini

açıklamak için bazı araştırmacılar tarafından yarı teorik ve ampirik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Literatürde bulunan bazı kuruma eğrisi modelleri [19, 20, 23, 24, 48]

Model no	Model name	Model
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$
4	Henderson and Pabis	$MR = a.\exp(-kt)$
5	Logarithmic	$MR = a.\exp(-kt) + c$
6	Two term	$MR = a\exp(-k_o t) + b\exp(-k_i t)$
7	Two-term exponential	$MR = a\exp(-k t) + (1-a)\exp(-k at)$
8	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
9	Diffusion approach	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
10	Modified Henderson and Pabis	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-g t) + c\exp(-ht)$
11	Verma <i>et al.</i>	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-g t)$
12	Midilli and Kucuk	$MR = a.\exp(-kt^n) + bt$

3.5. Kalın Tabaka Kuruma Kuramı

Kurumakta olan ürünün oluşturduğu tabakanın kalınlığı, bir tane kalınlığını aştığında, ince tabaka formundaki kuruma için geliştirilen eşitlikler yetersiz kalır. Bunun başlıca nedeni, kurutma havası özelliklerinin, kalın ürün tabakasından geçerken sürekli olarak değişime uğramasıdır. Kalın tabaka formundaki ürün yığınının kurumasına ilişkin olarak geliştirilen yöntemler, ürün tabakasının hareketli ve hareketsiz olmasına göre de farklılıklar gösterir [43].

3.6. Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler

Kuruma hızı ısı ve kütle transferine etki eden faktörler tarafından kontrol edilir. Bu faktörlerin başlıcaları, sıcaklık , havanın nemi, kurutucudaki hızı, kurutulacak materyale maksimum yüzey alanı kazandıracak geometrik düzenleme (parça iriliği, şekli, yığın kalınlığı vs.) gibi fiziksel faktörlerle kurutulan materyalin başta bileşimi olmak üzere kendine özgü nitelikleridir [49].

Bu faktörlerin en önemlileri kurutulan ürünün kendine özgü nitelikleridir ve bu nitelikler kuruma boyunca değişkendir. Özellikle ürünün kimyasal bileşimi önem taşır. Eğer şeker, tuz ve benzeri gibi küçük moleküllü erimiş maddelerce zengin bir materyal, bu maddelerce daha fakir bir materyalle kuruma açısından kıyaslanırsa, erimiş maddelerce zengin olanın daha zor kuruduğu görülür. Çözülmüş maddeler suyun buhar basıncını düşürmekte dolayısıyla suyun buharlaşmasını zorlaştırmaktadır. Aynı şekilde, ortamda yağ bulunması kuruma hızını sınırlayıcı önemli bir faktördür. Yağın sürekli faz olduğu bir emülsiyonda, su damlacıkları yağ tarafından adeta izole edilmiş bulunduğundan böyle bir sistemde suyun buharlaştırılarak uzaklaştırılması güçtür. Diğer taraftan materyalin bileşimi onun suyu bağlama gücüyle de yakından ilişkilidir. Serbest su, gıdalarda öncelikle ve kolaylıkla uzaklaştırılabilen su olduğu halde, katı parçacıklarca adsorbsiyonla bağlanan su daha zor uzaklaşmaktadır. Nişasta, pektin gibi maddelerce zengin kolloidal jel içerisinde tutulan su ise daha zor uzaklaşmaktadır, bu nedenle nişasta ve pektince zengin maddelerin kurutulması oldukça güçtür. En zor uzaklaştırılan su ise hidrat formunda kimyasal bağlı sudur. Böylece materyalin bileşiminin suyu bağlama şekli bakımından kuruma hızına etki ettiği görülmektedir. Diğer taraftan meyve ve sebzeler hücrelerden oluşmuş doğal dokulardır ve bunlarda su hem hücre içinde hem de hücreler arasında bulunur. Hücreler arasındaki suyu uzaklaştırmak daha kolaydır. Ancak hücre ölünce hücre zarı daha fazla geçirgenlik kazanarak, hücre içindeki suyun uzaklaşmasını kolaylaştırır. Eğer doku haşlanmışsa geçirgenlik çok hızlanır. Bu nedenle haşlanmış ürünler daha hızlı kururlar [49].

Kuruma hızı parçacıkların yüzey alanı ile doğru, kalınlıkla ters orantılıdır. Bu nedenle kurutulacak maddeler ne kadar küçükse yüzey alanı o kadar fazla, kalınlığı o kadar az olacağından kuruma hızı olumlu yönde etkilenmektedir. Püskürtülerek kurutma tekniğinde, sıvı ve ezme halindeki maddelerin, ince zerrecikler haline getirildikten sonra birkaç saniyede kurutulabilmesi bu nedendendir.

Kurutulan parçaların iriliğinin, kuruma hızına önemli etkide bulunmasına karşın, meyve ve sebze gibi ürünlerde kurumanın başlangıç aşamasında iri ve daha küçük parçalar halinde doğranmış dokular arasında, kuruma hızı bakımından belirgin bir fark görülmez. Ancak zaman ilerledikçe kuruma hızı parça iriliğine göre önemli ölçüde değişir. Çünkü özellikle azalan kuruma hızı döneminde, iç tabakalardaki suyun yüzeye difüzyonu, iri parçalarda zorlaşmakta ve kuruma hızı düşmektedir. Parça iriliğinin kuruma hızına bu önemli etkisi yüzünden, kurutulacak meyve ve sebzelerin küçük parçalar halinde doğranması yararlıdır ancak bu her zaman mümkün değildir. Tüketim alanı bakımından bazı ürünlerin bütün halde kurutulması gerektiği gibi, doğranan ve kıyılan ürünlerde de belli bir irilik beklenir [49].

Kuruma hızına etki eden en önemli faktörlerden biride kullanılan sıcak havanın yaş ve kuru termometre sıcaklıkları arasındaki farktır. Kullanılan sıcak havanın sadece kuru termometre sıcaklığı çoğu kez önemli bir anlam taşımaz. Yaş ve kuru termometre dereceleri arasında herhangi bir fark olmayan havanın, sıcaklık derecesi ne olursa olsun hiçbir kurutma etkisi yoktur. Yaş ve kuru termometre dereceleri arasındaki fark arttıkça kuruma hızı da artar. Bu doğru orantılı etki kurumanın başlangıcında çok belirgin ise de kuruma ilerledikçe yaş ve kuru termometre dereceleri arasındaki fark arttıkça kuruma hızı aynı oranda artmaz. Ayrıca yaş ve kuru termometre sıcaklıkları arasındaki fark sabit kalmak koşulu ile havanın kuru termometre sıcaklığı yükseldiğinde, kurutmanın başlangıç aşamasında kuruma hızında herhangi bir değişme görülmezken ileri ki aşamalarda bir artış olur. Kurumanın ileri ki aşamalarında kuruma hızını sınırlayıcı faktör, iç tabakalardaki suyun yüzeye difüzyonudur. Sıcaklık artınca bu difüzyon olayı hızlanmakta ve buna bağlı olarak da kuruma hızı yükselmektedir [49].

Kuruma hızına etki eden diğer bir faktör, kurutucudaki hava hızıdır. Hava hızı arttıkça kuruma hızı da artmaktadır. Kurutulan maddenin yüzeyinde kuruma sırasında daima durgun bir buhar filmi oluşur. Bu film sürekli olarak uzaklaştırılırsa, suyun buharlaşmasında bir hızlanma görülür. İşte hava hızı, bu buhar filmini devamlı olarak sürüklemek suretiyle kuruma hızını artırıcı yönde etkide bulunmaktadır. Ancak bu etki belli bir hava hızına ulaşılan kadar görülmektedir. Diğer taraftan hava hızının olumlu etkisi, kurumanın bulunduğu aşamaya göre değişmektedir. Kurumanın başlangıç aşamalarında hava hızı çok etkiliyse de kurmanın ileri ki aşamalarında kuruma hızı artık, alt tabakalardaki suyun yüzeye taşınma hızı ile sınırlandırıldığından, hava hızının yüksek olmasının bu konuda bir etkisi bulunmamaktadır [49].

3.7. Kuruma Sırasında Isı ve Kütle Transferi

Yaş bir materyalin kuruması sırasında, hem materyalin içinde ve hem de kurutma ortamının materyal yüzeyine değdiği sınır tabakada, sürekli olarak ısı ve kütle iletimleri meydana gelir. Bu iletimler, genel olarak, kuruyan materyalin i  şartları ile materyalin dışındaki kurutma ortamına ait çeşitli şartlardan etkilenir. Kuruma üzerinde etkili olan bu şartların etkinlik değerleri, kuruma evresine göre değişebilir [40]. Örneğin, sabit hızla kuruma evresinde ısı ve kütle iletimleri, esas olarak, materyal yüzeyindeki sınır tabakanın iletim özelliklerine bağlıdır. Oysa azalan hızla kuruma evresinde, öteki etkenlere ek olarak, materyalin iç yapısının iletme gösterdiği direnç de önemli bir etken olarak ortaya çıkar.

Tarım  r nlerinin kurutulması sırasında bünyeden ayrılacak nemin öncelikle ürünün yüzeyine ulaşması gerekir. Nemin  r n içinde yüzeye doğru ilerlemesini sağlayan birçok etken bulunmaktadır. Bu etkenlerin önemlileri arasında [40];

- Kılcal borulardaki su hareketi,
- Kuruma sırasında materyalin büzülmesi ve bu nedenle ortaya çıkan sıkışmanın hızlandırdığı nem akışı,
- Nem ve sıcaklık konsantrasyon farkına bağlı olarak meydana gelen nem difüzyonu,
- Materyalin yüzeyinden çevreye olan buhar ve su difüzyonu,
- Materyalin yüzeyinden daha alt katmanlarda oluşan buharlaşmanın nedeniyle meydana gelen gaz difüzyonu,
- Materyalin bünyesindeki buhar basıncı ile  evre havasının kısmi buhar basınçları arasındaki fark,
-  evre havasının sıcaklığı, bağıl nemi ve basıncı sayılabilir.

Kurutma işlemleri sırasında gerekli olan ısının kuruyan materyale iletimi sırasında, konveksiyon, kondüksiyon, ışıma ve elektromagnetik enerjinin hacimsel soğurulması (absorbsiyonu) yollarından biri ya da birkaçından birlikte yararlanılabilir [40].

Tarım  r nlerinin kurutulmasında en çok kullanılan yöntem, konveksiyonla ısıtma yöntemidir. Bu yöntemde, kurutma ortamı ( evre) olarak materyalden daha sıcak hava kullanılmaktadır. Kurutucu hava, nemli materyale nemin buharlaşması için gerekli ısıyı iletir, buharlaşan suyu bünyesine alır ve ortamdan uzaklaştırır. Tarım  r nlerinin

konveksiyonla ısıtılması ve kurutulması sırasında aralarında bağıntılar bulunan bir çok olay ardışık olarak birbirini izler. Bu olaylar [40];

- Sıcak havadan kuruyacak materyalin yüzeyine ısı transferi,
- Isının, yüzeyden iç katmanlara doğru ilerlemesi,
- Nemin, iç kısımlardan yüzeye doğru ilerlemesi,
- Nemin buharlaşarak çevredeki gaz ortamına (hava) difüzyonu

şeklinde sıralanabilir.

3.8. Konvektif Isı Transfer Katsayısı

Kurutma işleminde bir diğer göz önünde bulundurulması gereken faktörde konvektif ısı transfer katsayısıdır. Konvektif ısı transfer katsayısı hava ve ürünün arasındaki sıcaklık farkından dolayı kurutma hızı ve kurutucu tasarımı için önemli bir parametredir.

Konvektif ısı transfer katsayısı (h_c) Nusselt sayısı ile tespit edilmektedir [37,38]:

$$h_c = \frac{Nu K_v}{X} \quad (3.21)$$

Konvektif ısı transfer katsayısı zorlanmış taşınım için:

$$h_c = \frac{K_v}{X} C(RePr)^n \quad (3.22)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır.

Nemi buharlaştırmak için gerekli ısı miktarı:

$$\dot{Q}_e = 0.016h_c[P(T_c) - \gamma P(T_e)] \quad (3.23)$$

eşitliğiyle bulunabilir.

Eşitlik (3.22) 'deki h_c değeri Eşitlik (3.23) 'de yerine yazılırsa,

$$\dot{Q}_e = 0.016 \frac{K_v}{X} C (RePr)^n [P(T_c) - \gamma P(T_e)] \quad (3.24)$$

eşitlikleri elde edilir.

Buharlaşan nem miktarı zaman aralığıyla (t) ve tepsinin alanıyla (A_t) çarpılarak ve buharlaşma gizli ısısına (λ) bölünerek tespit edilmektedir:

$$\dot{m}_{ev} = \frac{\dot{Q}_e}{\lambda} A_t t = 0.016 \frac{K_v}{X \lambda} C (RePr)^n [P(T_c) - \gamma P(T_e)] A_t t \quad (3.25)$$

Burada buharlaşan nem miktarı Z gibi sabit bir değere eşitlenir.

$$0.016 \frac{K_v}{X \lambda} [P(T_c) - \gamma P(T_e)] A_t t = Z \quad (3.26)$$

Bu durumda zorlanmış taşınım için eşitlik,

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{Z} = C (RePr)^n \quad (3.27)$$

olarak elde edilir.

Eşitlik (3.27)'de her iki tarafın logaritması alınırsa,

$$\ln\left[\frac{\dot{m}_{ev}}{Z}\right] = \ln C + n \ln(RePr) \quad (3.28)$$

ifadesi elde edilir.

Eşitlik (3.28) aşağıda Eşitlik (3.29) ile verilen bir doğrunun denklemine benzeşim yapılır.

$$Y = b_1 X + b_0 \quad (3.29)$$

Burada,

$$Y = \ln \left[\frac{\dot{m}_{ev}}{Z} \right], \quad b_1 = n, \quad X = \ln(RePr), \quad b_0 = \ln C \quad (3.30)$$

ile ifade edilmektedir.

Böylece

$$C = e^{b_0} \quad (3.31)$$

olarak elde edilir.

Nemli havanın farklı fiziksel özellikleri, yoğunluk (ρ_v), ısıl iletkenlik (K_v), özgül ısı (C_v), viskozite (μ_v) ve buhar basıncı (P) aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\rho_v = \frac{353.44}{(T_i + 273.15)} \quad (3.32)$$

$$K_v = 0.0244 + 0.6773 \times 10^{-4} T_i \quad (3.33)$$

$$C_v = 999.2 + 0.1434 T_i + 1.101 \times 10^{-4} T_i^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_i^3 \quad (3.34)$$

$$\mu_v = 1.718 \times 10^{-5} + 4.620 \times 10^{-8} T_i \quad (3.35)$$

$$P(T) = \exp \left[25.317 - \frac{5144}{(T_i + 273.15)} \right] \quad (3.36)$$

Burada nemli havanın elde edilen fiziksel özellikleri için T_i , ortam sıcaklığı (T_e) ve ürünün merkez yüzey sıcaklığının (T_c) ortalaması olarak alınmaktadır.

$$T_i = \frac{(T_c + T_e)}{2} \quad (3.37)$$

Nemli havanın farklı fiziksel özellikleri kullanılarak Reynolds sayısı (Re) ve Prandtl sayısı (Pr) elde edilmektedir [37,38].

Hesaplamalarda kullanılan boyutsuz sayılar ise fiziksel anlamlarıyla birlikte aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

Akışkanın taşınımıyla aktardığı ısıнын akışkanın iletimle aktardığı ısıya oranı olan Nusselt sayısı:

$$Nu = \frac{h_c X}{K_v} \quad (3.38)$$

Atalet ve viskoz kuvvetlerinin oranı olan Reynolds sayısı:

$$Re = \frac{\rho_v \cdot V \cdot X}{\mu_v} \quad (3.39)$$

Kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranı olan Grashof sayısı:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_c - T_e) X^3}{(\mu_v / \rho_v)^2} \quad (3.40)$$

Momentum ve ısı yayılım katsayılarının oranı olan Prandtl sayısı:

$$Pr = \frac{c_v \cdot \mu}{K_v} \quad (3.41)$$

3.9. Kurutucular ve Kurutma Yöntemleri

Tarım ürünlerinin kurutulması sırasında kullanılan kurutucular, ürünün özelliklerine uygun olmanın yanı sıra, kurutma işleminden beklenen özellikleri de sağlayacak yetenekte olmak zorundadır. Bu nedenle, birbirinden önemli farklar gösteren çok çeşitli tiplerde kurutucular geliştirilmiştir. Tarım ürünlerinin kurutulması için, bu işleme gerek duyulan ilk günlerden günümüze kadar geçen süre içinde, güneş ışınlarının altına sermekten, dielektrik kurutma tekniklerine kadar geliştirilmiş birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin tümünü sıralayabilmek mümkün değildir. Bazı çok uygulanan temel kurutma yöntemleri aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir.

Kontakt kurutma: Bu yöntemde, kurutma için gerekli ısı enerjisi, kurutulacak materyale, ısıtılmış yüzeylerden kondüksiyon yoluyla iletilir. Kurutulan ürüne iletilen ısı, sıcak yüzeye değen yaş materyalin ısıl kondüktivitesine ve sıcak yüzeyin ısı iletim katsayısına bağlıdır.

Konvektif kurutma: Bu yöntemde ısı, kurutucu ortamdan (genellikle sıcak hava kullanılır) yaş materyale konveksiyon yoluyla iletilir. Sıcak hava, kurutulan ürün tabakasının üzerinden, ya da içinden geçirilir. Bu yöntemin ısıl iletkenliği kontakt kurutmaya göre daha düşüktür. Tünel kurutucular (tepsili kurutucular), akışkan yataklı kurutucular, püskürtmeli kurutucular bu yöntemin değişik uygulamalarıdır.

Işınım ile Kurutma: Bu yöntemde kurutma için gerekli ısı enerjisi, yaş materyale, elektromanyetik tayfin kırmızı ötesi bölgesinde yer alan ışınlarla iletilir. Bu ışınlar içinden geçtikleri ortamı ısıtmaz; kendilerini absorbe eden cisimleri ısıtırlar. Kızılötesi ışınların, yaş materyalin yüzeyinden itibaren etkilediği derinlik oldukça az olduğundan, bu yöntem ince film şeklinde serili tabakaların kurutulmasında kullanılır.

Di elektrik kurutma : Kurutulacak madde yüksek frekanslı ($2 - 100 \cdot 10^6$ Hz) bir elektrostatik alandan geçirilerek kurutulur. Bu maddenin her noktasında düzenli bir ısınma meydana getirir. Bu metot sadece kontrplak tabakalar arasındaki reçinenin polimerizasyonu ve bu suretle, tabakaların birbirine yapışmasını sağlar. Bu yönden de tam bir kurutma işlemi sayılmaz. Kurutma düşünülebilirse de çok pahalıdır [50].

Donmalı kurutma: Bu yöntemde donmuş suyun süblimasyonundan yararlanılır. Kurutulacak yaş materyal önce hızla -25, -30 °C değerlerine kadar soğutularak dondurulur. Daha sonra, ürünlerdeki donmuş suyun serbest buhar basıncına göre biraz daha düşük değerlerdeki vakum ortamında, gerekli süblimasyon ısı verilerle, donmuş suyun, sıvı fazı atlayarak, doğrudan buhar fazına geçmesi sağlanır. Yüksek kaliteli kurutulmuş ürün elde edebilen modern bir kurutma yöntemidir.

Ozmotik kurutma: Bu yöntemde, yarı geçirgen zarla kaplı olan bitki hücresi duvarının iç kısmı ile dış çevre arasında, ozmotik basınç farkı yaratılarak, materyalin nemi azaltılmaya çalışılır. Kurutulacak materyal ozmotik basıncı yüksek bir eriyiğin içine bandırılarak nemin azalması sağlanır. Ürünün içine bandırılacağı ozmoaktif ortam, çeşitli sıcaklık ve konsantrasyonlarda olmak üzere genellikle, meyveler için şeker, sebzeler için tuz (NaCl) eriyiğinden hazırlanır.

Yukarıda özetlenen yöntemler içinde, günümüzde en yaygın kullanılanı, ürünlerin, hava akımı yardımıyla konvektif kurutulmasıdır. Son yıllarda, ürünlerin dondurularak

kurutulması, alım gücü yüksek toplumlarda giderek daha yaygın kullanılmaya başlamıştır. Dielektrik kurutma teknikleri ise (kızılötesi ışınlar, mikrodalga ışınlar, radyo dalgaları vb.) henüz ticari açıdan söz edilebilecek boyutta bir uygulama alanı bulamamışlardır. Şekerli şurup içinde ozmotik basınç farkından yararlanılarak kurutma tekniği ise özellikle meyvelerin kurutulmasına uygun gibi görülmekle birlikte, istenen nem değerine inilememe, pahalılık gibi nedenlerle yaygınlaşmamışlardır.

Kurutucu tipinin seçimi sırasında, kurutulacak materyalin özellikleri, kurutmanın yapılacağı mevsim, kurutma süresi, iş gücü ve enerji gereksinimleri ile işletmede kurutucu için ayrılacak yer dikkate alınmalıdır [40].

3.9.1. Kurutucu seçimi

Kurutma işleminin gerek ürün kalitesi ve gerekse işletmenin karlılığı açılarından başarısı, uygun bir kurutucunun seçilip kullanılmasına doğrudan bağlıdır. Her türlü kurutma işlemine uygun çok amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeniyle, ilk adım olarak, kurutma yöntemi ve kurutucunun doğru seçimine en üst düzeyde önem vermek gerekir.

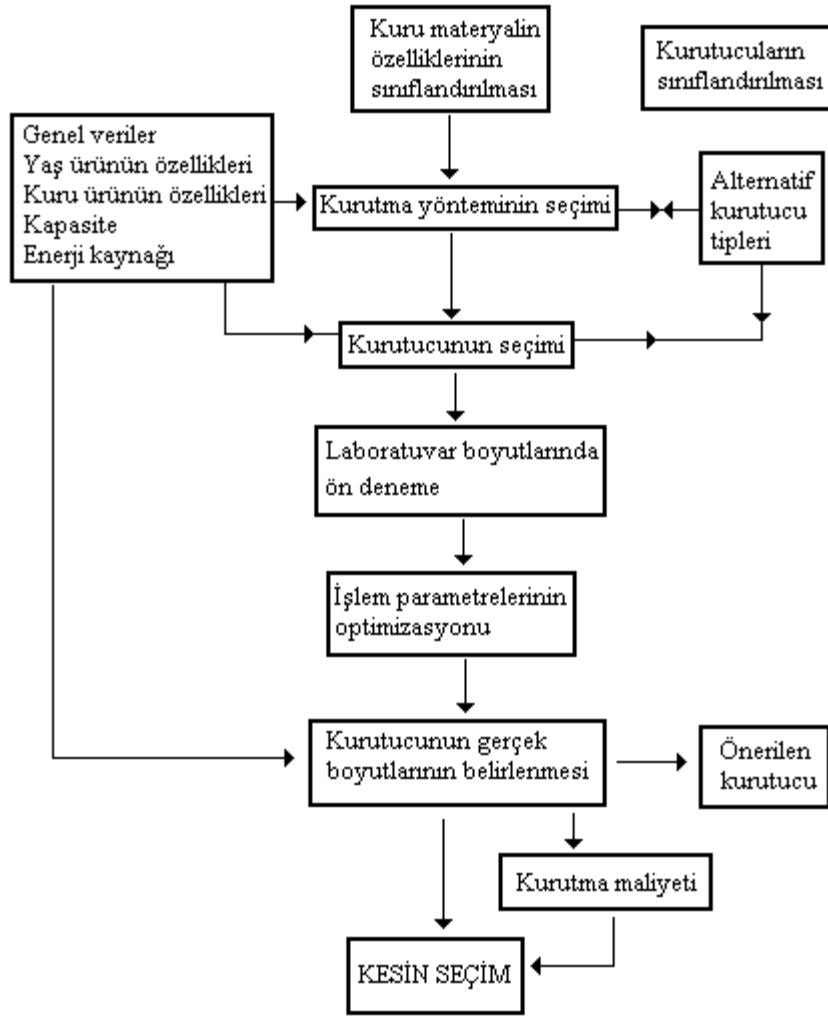
Yapılmak istenen kurutma için uygun kurutucu seçimi, bir çok faktörün dikkate alınmasını gerektiren çok zor ve karmaşık bir işlemdir. Kurutulacak materyalin özellikleri, ısıtıcı tipi, enerji kaynağı, kurutma havası ile materyal arasındaki hidrodinamik ilişkiler özellikle ele alınmalıdır. Seçim sırasında teknolojik gereksinimler, ekonomik çalışma ve elde edilen kuru ürünün kalitesi de önemli kriterler olarak ele alınmalıdır.

Kurutucu seçiminde ilk hareket noktası materyal özelliklerinin belirlenmesiyle başlar. Kurutulacak materyalin statik ve kinetik kuruma özellikleri ve kurumuş ürünlerden beklenen şekil ve dış görünüm özellikleri öncelikle belirlenmelidir. Materyalin statik ve kinetik kuruma özellikleri, sorpsiyon ve adsorpsiyon izotermi ile kritik nemi, denge nemi, kurutma sıcaklığı, kuruma hızı gibi parametrelerin belirlenmesi için bilinmesi gereken önemli unsurlardır. Kurutma yöntemleri ve kurutucular alternatifli olarak belirlendikten sonra kesin seçim için aşağıda sıralanan unsurlar dikkatle irdelenmelidir.

- a. Yıllık kurutulacak ürün miktarı
- b. Tesisin kuruluş maliyeti

- c. Tesisin işletme masrafları
- d. İşlem sırasında materyalin verdiği fire
- e. Emniyetli çalışma
- f. Kurumuş ürünün kalitesinin uygunluğu
- g. Kurumuş ürünün dış görünüşünün isteğe uygunluğu
- h. Kurutucunun çeşitli kapasitelerde çalıştırılabilme esnekliği
- i. Çevre kirliliğine etkisi olup olmadığı
- j. Çalışma sırasında etkin kontrollerin yapılmasına olanak vermesi
- k. Tamir ve bakım kolaylığı
- l. Görünüş güzelliği

Kurutucu seçimi sırasında dikkate alınacak unsurlar ve etkileşimleri Şekil 3.5' de şematik olarak görülmektedir [40].



Şekil 3.3. Kurutucu seçimi için işlem adımları

4. MATERYAL VE METOD

4.1. MATERYAL

Bu çalışmada materyal olarak zencefil kullanılmıştır. Hammadde seçilirken ezik ve çürük olmamasına, materyalin aynı ebatta olmasına dikkat edilmiştir. Zencefil yaklaşık 4 mm kalınlığında dairesel şekilde dilimlenmiştir. Deneylerde kuruma karakteristiklerinin incelenmesi için ele alınan tarımsal ürünün seçilmesindeki nedenlerden biri zencefil bitkisinin tıbbi aromatik bir bitki olmasıdır. Deneylerde kullanılan zencefil dilimlerinin fotoğrafı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Zencefil dilimleri

Kurutucu olarak siklon tipi bir konveksiyonel kurutucu kullanılmıştır. Deney düzeneği üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

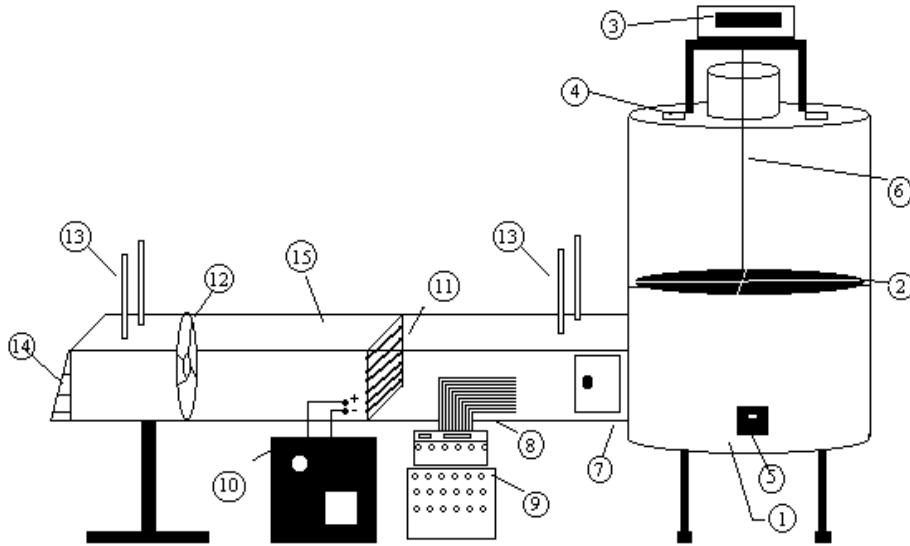
- Hava akımını sağlayan fan
- Havayı ısıtmak için rezistanslı ısıtıcı ve kontrol panosu
- Gıdaların kurutulduğu kurutma odası ve tartım işlemini sağlayan teraziden oluşmaktadır.

Havanın kurutma odasının alt kısmından teğetsel olarak girmesi ve kurutulacak zencefil dilimlerinin fileli tepside kurutulması sağlanmıştır. Hava akımını sağlayan fan ve elektrikli ısıtıcıyı muhafaza eden kanal siklon şeklindeki kurutma odasına alttan bağlantılı hale getirilmiştir. Bu konumda, ısıtılan kurutma havası siklona teğetsel olarak giriş yapmıştır. Böylelikle kurutma odasında düz bir akış yerine, dönel akış oluşturulmuştur.

Kurutma ortamı olarak kullanılan hava bir kanalın ucunda bulunan bir fan ile sağlanmaktadır. Sistemde kullanılan elektrikli ısıtıcıların elektrik akımı bir varyak yardımıyla ayarlanarak istenilen sıcaklıkta hava akışı sağlanabilmektedir. Kurutma

odası dairesel şekilde olup 600 mm çapında 800 mm yüksekliğindedir. Ayrıca sistem iç kısımdan yalıtılmıştır. Üst kapağa iki adet gözetleme camı bırakılmıştır. Numunelerin kurutma odasına konulup alınabilmesi üst kapak vasıtasıyla yapılabilmektedir. Üst kapak yaklaşık 600 mm çapındadır ve tam merkezinde kurutma havasının sistemden çıkışını sağlayan 200 mm çapında bir ekzos bulunmaktadır. Isıtıcı olarak elektrikle çalışan rezistanslar kullanılmış ve rezistanslar kurutma odasıyla bağlantılı bir kanal içerisine yerleştirilmiştir. Sistemde iki adet 2000 W' lık güce sahip ayrı ayrı çalışabilen rezistanslar kullanılmış ve rezistanslar bir varyak vasıtasıyla çeşitli ısılara ayarlanabilmektedir. Sistemde kullanılan fan sabit devirli olup 565 m³/h hava üflemeaktadır. Fanın hava debisi fan girişindeki klapa vasıtasıyla ayarlanabilmektedir.

Şekil 4.2' de deney setinin şematik resmi görülmektedir. Kurutma işlemi dairesel şekilde ve fileli tepside yapılmıştır. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi tepsi kurutma odasına üç konumda yerleştirilen pabuçlar üzerinde durmaktadır. Tepsi üzerine çapraz şekilde ince teller atılarak, orta noktalarına bir kanca yerleştirilmiştir. Tartım işlemleri bu kancaya takılan tellerle bağlantılı hale getirilen teraziyle sürekli olarak yapılmıştır. Tartım işleminde tepsinin kurutma odasının cidarına değmemesine ve iyi bir dengeleme yapılmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Siklon tipi kurutucunun şematik gösterimi.

1-Kurutma odası, 2- Tepsi, 3- Terazi, 4- Gözetleme camları, 5- İç sıcaklığı gösteren termometre, 6- Tartım çubuğu, 7- Kumanda panosu, 8- Termoelemanlar, 9- Dijital termometre ve kanal seçici, 10- Varyak, 11- Isıtıcılar, 12-Fan, 13- Yaş ve kuru termometreler, 14- Klapa, 15- Kanal

4.2. Ölçümler

4.2.1. Sıcaklık Ölçümü

Deney düzeneğinde sıcaklık ölçümleri, ölçüm yapılacak kısımlara yerleştirilen ısıl çiftlerle yapılmıştır. Isıl çiftlerin iki ucu yan yana getirildikten sonra nokta kaynağı yapılmıştır. Bu kısımlar sıcaklık ölçümü istenen noktalara yerleştirilmiştir.

- Kanal girişine, (fandan önce)
- Sıcak hava girişine (rezistanslardan hemen sonra)
- Kanaldan gelen sıcak havanın kurutma odasına giriş noktasına
- Sıcak hava çıkışına
- Ürünlerin bulunduğu ortama
- Ürünün yüzeyine
- Dış ortam sıcaklığını ölçmek için açık alana.

Isıl çift olarak 0.5 mm çapında demir-constantan kullanılmıştır. Isıl çiftlerden elde edilen değerler yirmi kanallı Elimko 6400 elle kumandalı 0.1 °C hassasiyetli dijital termometre kullanılarak okunmuştur. Sıcaklık tespitinde BS 4937 standardında J- tipi demir (+) Constantan (-) ısıl çiftleri kullanılmıştır

Ayrıca sıcaklık ölçümünde yaş ve kuru termometrelerden de faydalanılmıştır. Deney setinde belirli noktalara üç yaş , üç kuru termometre yerleştirilmiştir. Bu noktalar:

- Soğuk havanın kanala giriş noktasına(fandan hemen önce)
- Sıcak hava girişine(rezistanslardan hemen sonra)
- Sıcak hava çıkışına

4.2.2. Hız Ölçümü

Deneylerde hava hızını ölçmek için iki tip hız ölçer kullanılmıştır. Siklon içindeki hava hızlarını ölçmek için 0-15 m/s ve 0-80 °C arasında ölçüm yapabilen, hem sıcaklık hem de hız değerlerini okuyabilen TA-2 AIRFLOW markalı bir termal hız ölçer kullanılmıştır. Bu hız ölçer sayesinde siklon içindeki gerekli noktalardaki hızlar rahatlıkla ölçülmüştür. Ayrıca deneylerde birde LUTRON marka (AM- 4201) 0.4 – 30 m/s arasında $\pm$ %2 doğrulukla ölçüm yapan probu pervaneli bir hız ölçer kullanılmıştır.

4.2.3. Nem Ölçümü

Nem ölçümünde EXTECH 444731 markalı hem sıcaklık hem de %RH olarak nem değişimini veren bir termo higrometre kullanılmıştır. Böylelikle çevre havasının ve kurutucudan çıkan havanın nem değişimi ölçülmüştür.

4.2.4. Kütle Tespiti

Laboratuar tipi deney düzeneğinde kütle tespiti BEL marka 0.01 gram duyarlıklı maksimum 2000 grama kadar ölçüm yapabilen dijital bir terazi ile yapılmıştır.

4.2.5. Kuru Madde Tayini

Kurutulan ürünün başlangıç ve son nem içerikleri METTLER marka infrared nem tayin cihazıyla belirlenmiştir.

4.3. Deneyler

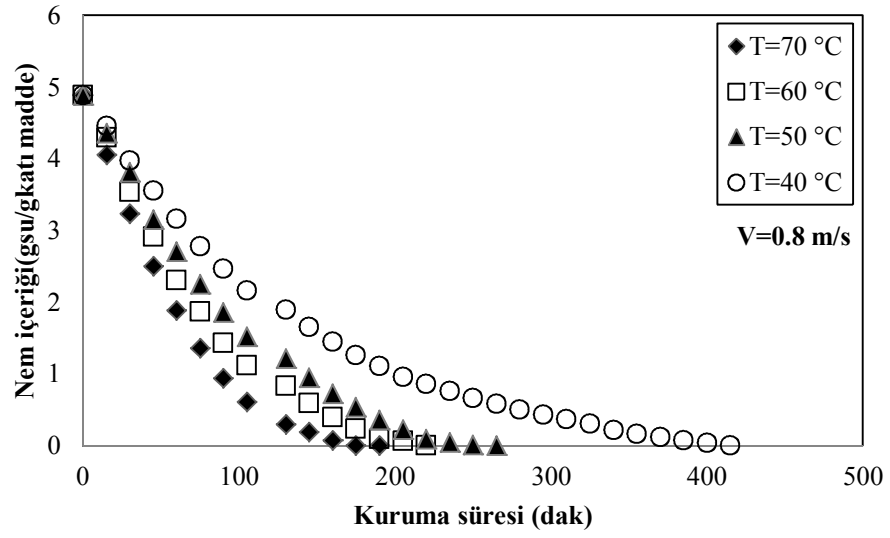
Kurutma deneylerinden önce kurutma odası içindeki hız ve sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Siklonda numunelerin yerleşeceği istasyonlarda hız ve sıcaklık ölçümlerinde, bütün istasyonlarda yaklaşık aynı sıcaklık ve hava hızı değerleri elde edilmiştir. Buradan bütün istasyonlarda üniform bir kuruma gerçekleşeceği sonucuna varılarak kurutma deneyleri yapılmıştır.

Deneyler dört farklı kurutma havası sıcaklığında (40, 50, 60, 70 °C), üç farklı kurutma havası hızında (0.8, 1.5, 3 m/s) yaklaşık 4 mm kalınlığında dilimlenen zencefilin dönel akış ortamında kuruma olayı incelenmiştir. Yaklaşık 150 g toplam ağırlığındaki dilimlenmiş zencefil tepsiye belirli bir düzende ve tek sıra halinde yerleştirilmiştir. Kurutma işleminden önce zencefil dilimlerine bir ön işlem uygulanmamıştır.

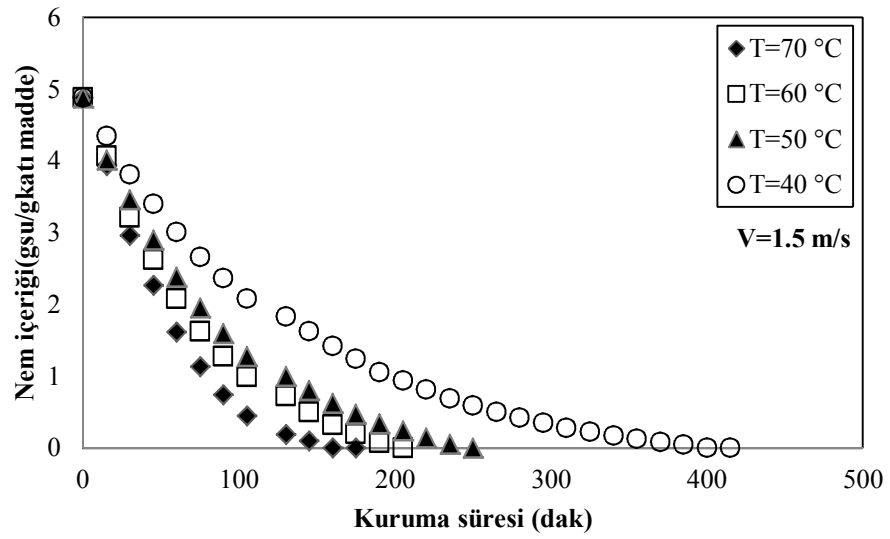
Deneylerde, ilk önce kurutulacak ürünün başlangıç toplam nem içerikleri tayin edilmiştir. Kuruma süresince örneklerin ağırlık değişimini saptamak için, örnekler siklonda çıkarılmadan 15 dakika süre ile tartım alınmıştır.

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

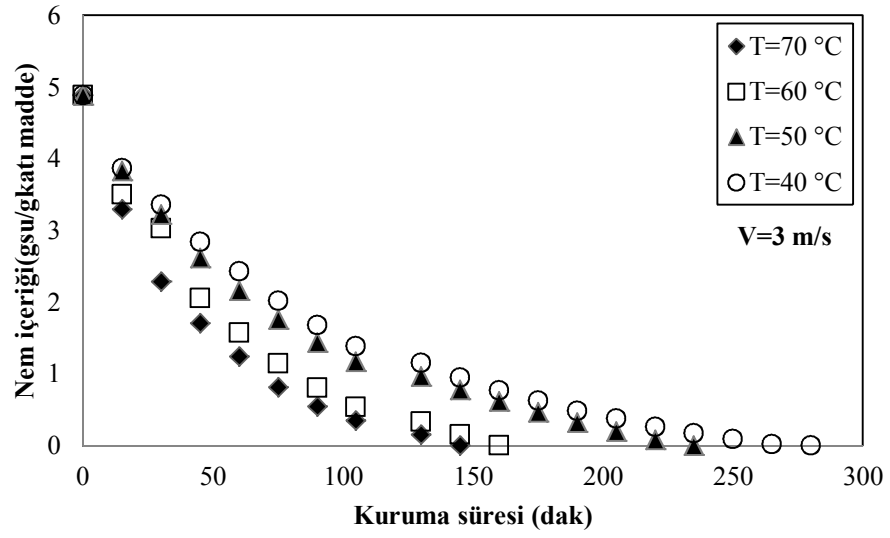
Deneylerde 4 mm kalınlığında kesilen zencefil dilimlerinin kuruma kinetiği 40, 50, 60 ve 70 °C kurutma havası sıcaklığında ve 0.8, 1.5 ve 3 m/s kurutma havası hızında incelenmiştir. Kurutulan zencefil dilimlerinin başlangıç nem içeriği infrared nem tayin cihazıyla ortalama olarak %83 (4.8 g su/g katı madde) tespit edilmiştir. Ürün ve kurutucu ortam havası arasında nem transferinin sona erdiği ve dolayısıyla nem içeriğinin sabit kaldığı %6 (0.06 g su/g katı madde)değerinde kurutma işlemine son verilmiştir. Bu değer denge nemi olarak daha sonraki hesaplamalarda kullanılmıştır. Şekil 5.1-5.7’ de zencefilin kurutulması sırasında elde edilen ağırlık kayıplarından, su miktarının kuru madde miktarına oranlanmasıyla bulunan nem içeriğinin zamanla değişimi görülmektedir. Nem içeriğinin zamana karşı deney verileri çizildiği zaman elde edilen eğrinin kurutma eğrilerinin genel karakteristiği olan eksponansiyel bir formda olduğu belirlenmiştir. Deneylerde en uzun kurutma süresi 40 °C kurutma havası giriş sıcaklığında, 0.8 m/s kurutma havası hızında kurutulan örneklerde, en kısa kurutma süresi ise 70 °C kurutma havası giriş sıcaklığında, 3 m/s kurutma havası hızında kurutulan örneklerde elde edilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere, kurutma süreleri değişik kurutma havası giriş sıcaklıklarına ve kurutma havası hızlarına bağlı olarak 145-415 dakika arasında değişmiştir. Zamanla nem içeriğindeki değişim sabit kurutma havası hızı ve farklı kurutma havası giriş sıcaklıkları için Şekil 5.1 - 5.3 ‘de, sabit kurutma havası giriş sıcaklıkları ve farklı kurutma havası hızları için Şekil 5.4 - 5.7 ‘de verilmiştir. Sabit kurutma havası hızında yapılan kurutmada sıcaklık arttıkça nem içeriğinde belirgin bir şekilde daha hızlı bir azalma görülmekte, ayrıca kurutma süresi de azalmaktadır. Kuruma hızındaki artışta kurutma havası sıcaklığı, kurutma havası hızına göre daha etkili olmaktadır. Kurumanın başlangıç aşamalarında hava hızının etkisi daha fazla olmakta, ileri ki aşamalarda bu etkinin azaldığı gözükmemektedir. Özellikle 70 °C kurutma havası giriş sıcaklığında yapılan kurutmada hızın etkisi daha belirgin olmakta, 40 ve 50 °C de ise hızın etkisi daha az olmakta bu nedenle nem içerikleri birbirine çok yakın bir azalma göstermektedir. Ancak grafiklerden kurutma havası hızı arttıkça kurutma süresinde bir miktar azalma olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 5.4 - 5.7).



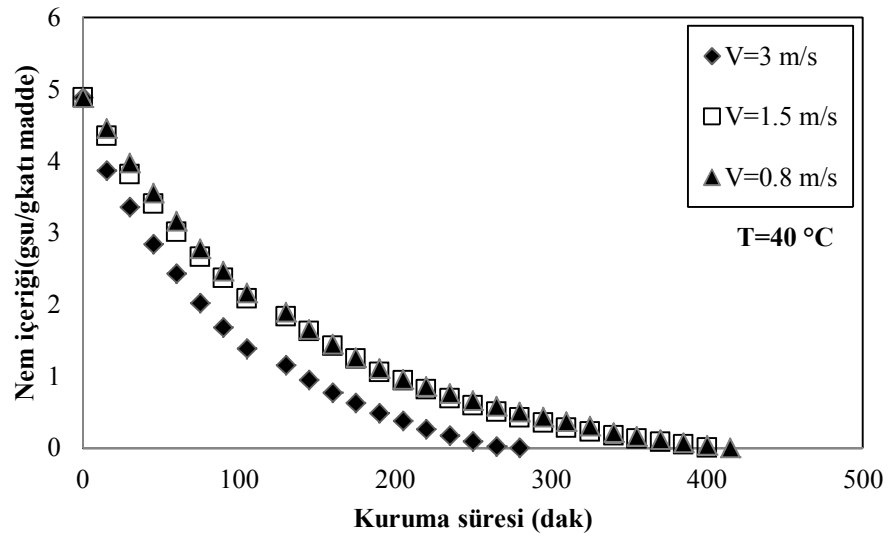
Şekil 5.1. Zencefilin V=0.8 m/s hızda, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi



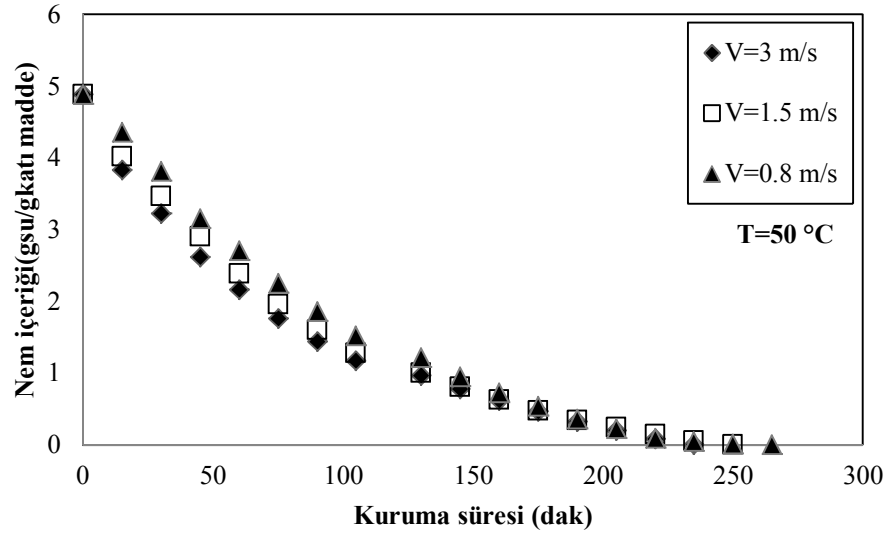
Şekil 5.2. Zencefilin V=1.5 m/s hızda, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi



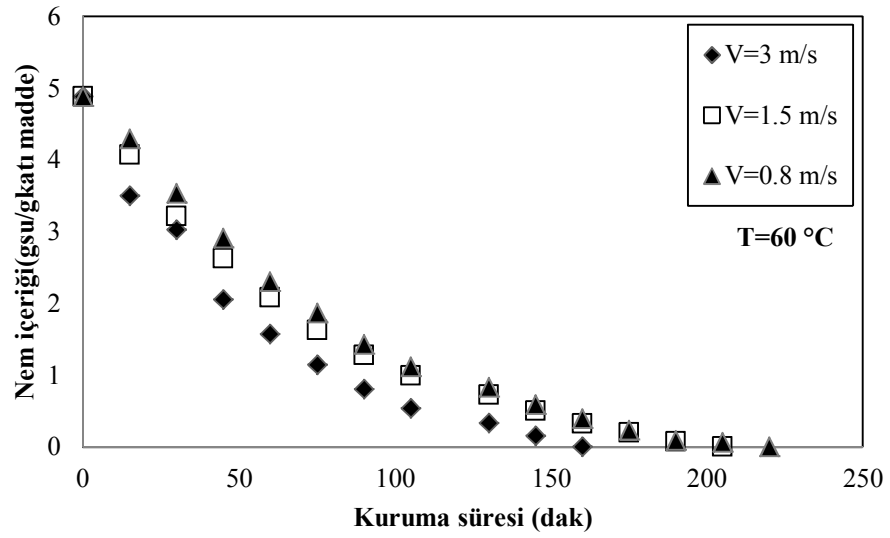
Şekil 5.3. Zencefilin $V=3$ m/s hızda, $T= 40, 50, 60, 70$ °C sıcaklıkta kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi



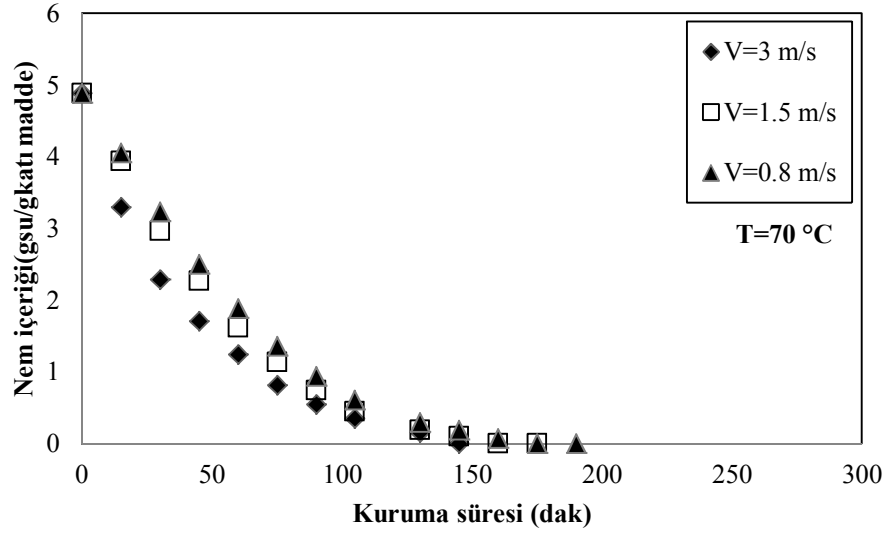
Şekil 5.4. Zencefilin $T=40$ °C sıcaklıkta, $V= 0.8, 1.5, 3$ m/s hızda kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi



Şekil 5.5. Zencefilin $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, $V=0.8, 1.5, 3\text{ m/s}$ hızda kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi



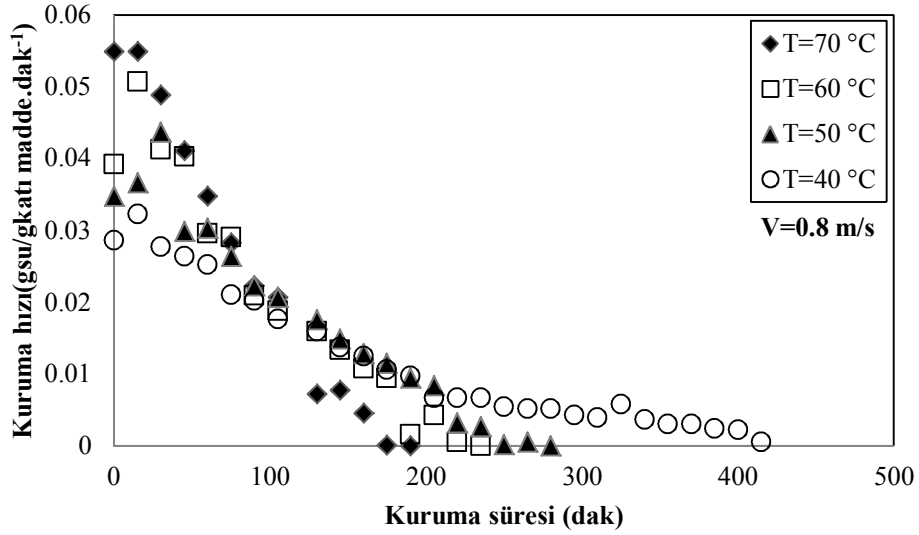
Şekil 5.6. Zencefilin $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, $V=0.8, 1.5, 3\text{ m/s}$ hızda kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi



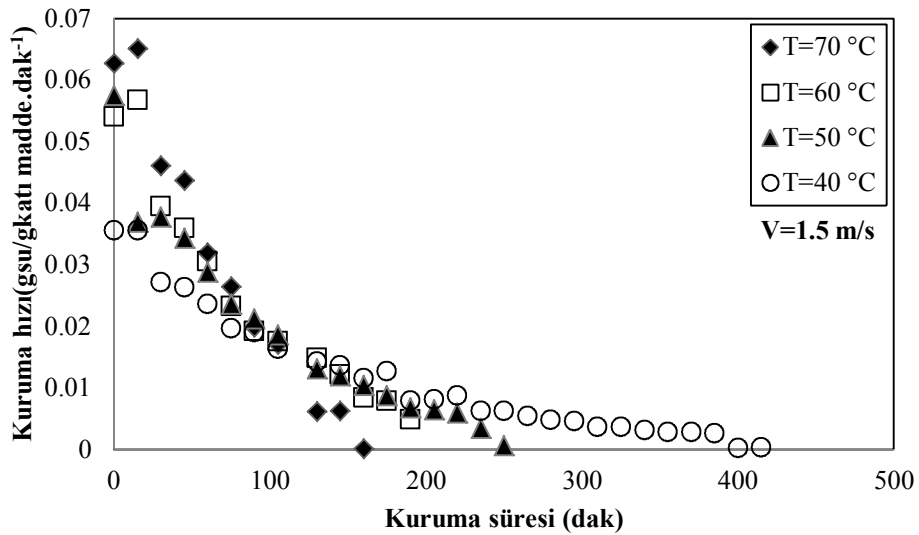
Şekil 5.7. Zencefilin $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, $V=0.8, 1.5, 3\text{ m/s}$ hızda kurutulmasında nem içeriğinin zamanla değişimi

Kuru baza göre nem içeriğindeki değişimin zamana göre türevi alınarak kuruma hızı belirlenmiş ve her bir zaman aralığı için grafiğe geçirilmiştir. Sabit kurutma havası hızı ve farklı kurutma havası giriş sıcaklıkları için kuruma hızının kuruma süresiyle değişimi Şekil 5.8-5.10' da, kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi ise Şekil 5.11-5.13' de verilmiştir. Kuruma olayı azalan kuruma hızı periyodunda gerçekleşmiş, deneysel verilerde sabit kuruma hızı periyodu gözlenmemiştir. Kurutma havası sıcaklığı ve hızı arttıkça nem içeriğinde ve kuruma süresinde belirgin bir şekilde hızlı bir azalma görülmüş, ayrıca kuruma hızı da artmıştır (Şekil 5.8-5.10). Ayrıca kurutma olayının başlangıç safhalarında kuruma hızı değişkenlik göstermekte, belirli bir süreden sonra lineer bir azalma göstermektedir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek kuruma hızı $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ kurutma havası sıcaklığında 3 m/s kurutma havası hızında, en düşük kuruma hızı ise $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ kurutma havası sıcaklığında 0.8 m/s kurutma havası hızında elde edilmiştir. Sıcaklık artışının kuruma hızı üzerindeki bu etkisi, sıcaklık artışının doğal bir sonucu olarak kurutma havası bağıl neminin düşmesinden ve dolayısıyla difüzyon olayının hızlanmasından kaynaklanmaktadır. Kuruma hızındaki artışta hava hızının etkisi hava sıcaklığına göre daha az olmuştur. Kurutulan maddenin yüzeyinde kuruma sırasında daima durgun bir buhar filmi oluşmaktadır. Hava hızı, bu buhar filmini devamlı olarak sürüklemek suretiyle kuruma hızını artırıcı yönde etkide bulunmaktadır.

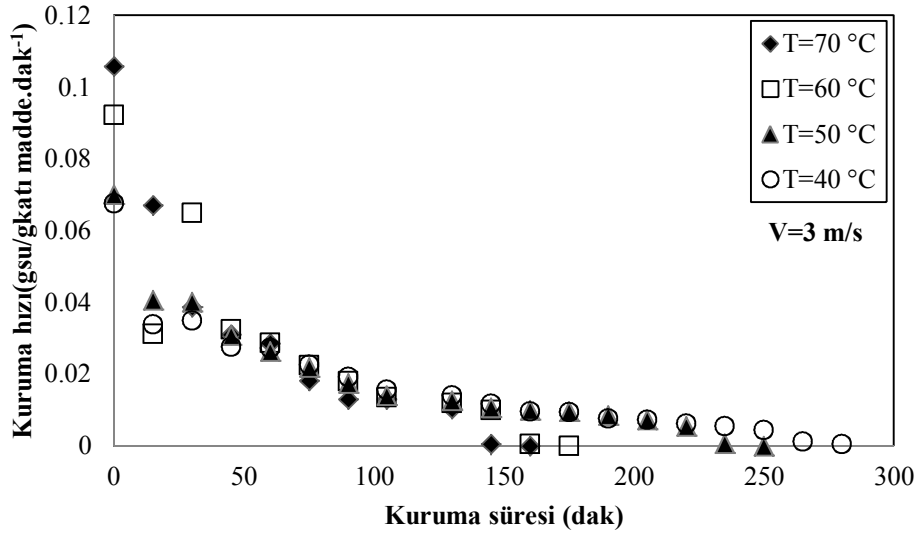
Nem içeriği–kuruma hızı ilişkisinde ise sabit kurutma havası giriş sıcaklığında kurutma havası hızının artmasıyla ve kurutma havası giriş sıcaklığının artmasıyla doğrunun eğimi artmıştır (Şekil 5.11-5.13).



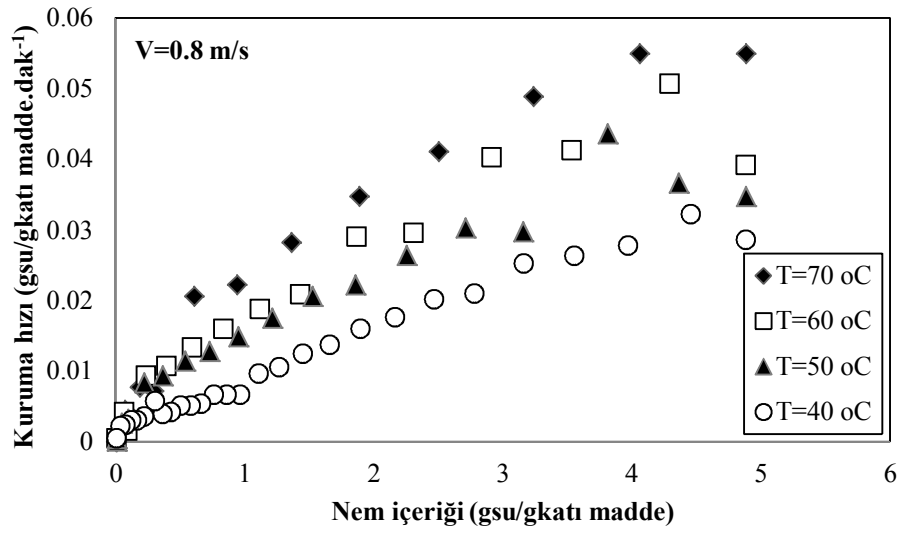
Şekil 5.8. Zencefilin $V=0.8 \text{ m/s}$, $T=40, 50, 60, 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının kuruma süresiyle değişimi



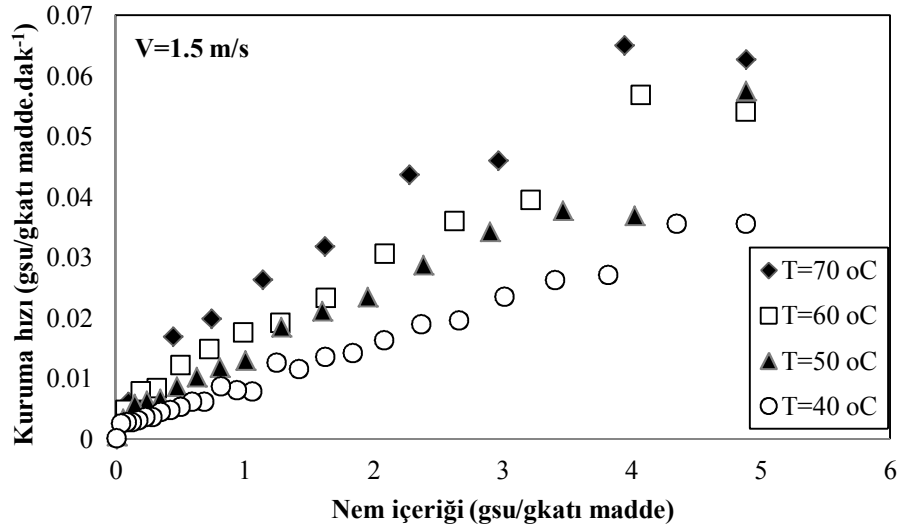
Şekil 5.9. Zencefilin $V=1.5 \text{ m/s}$, $T=40, 50, 60, 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının kuruma süresiyle değişimi



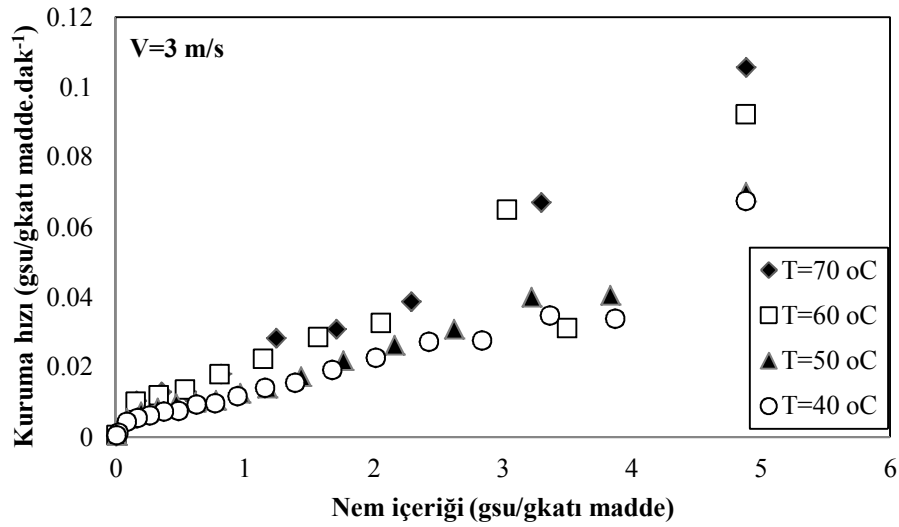
Şekil 5.10. Zencefilin $V=3$ m/s, $T= 40, 50, 60, 70$ °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının kuruma süresiyle değişimi



Şekil 5.11. Zencefilin $V=0.8$ m/s, $T= 40, 50, 60, 70$ °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi



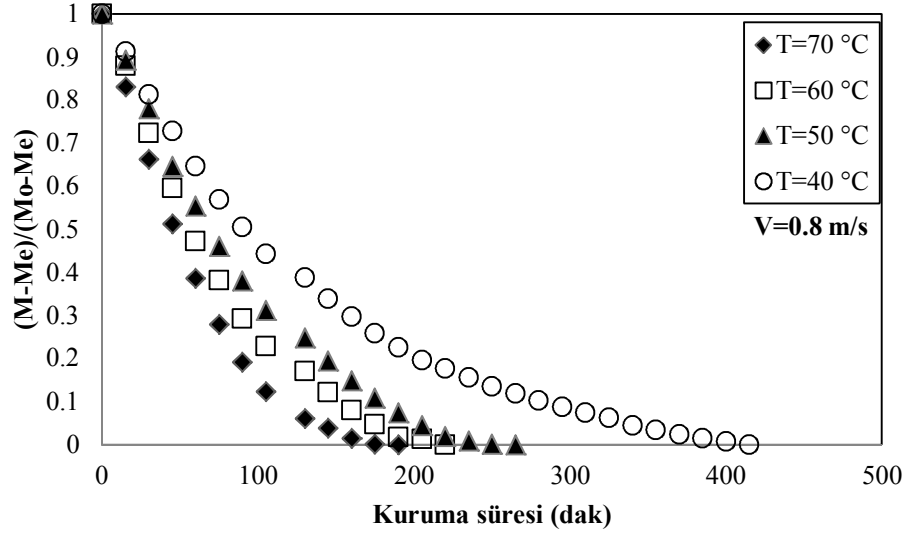
Şekil 5.12. Zencefilin V=1.5 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi



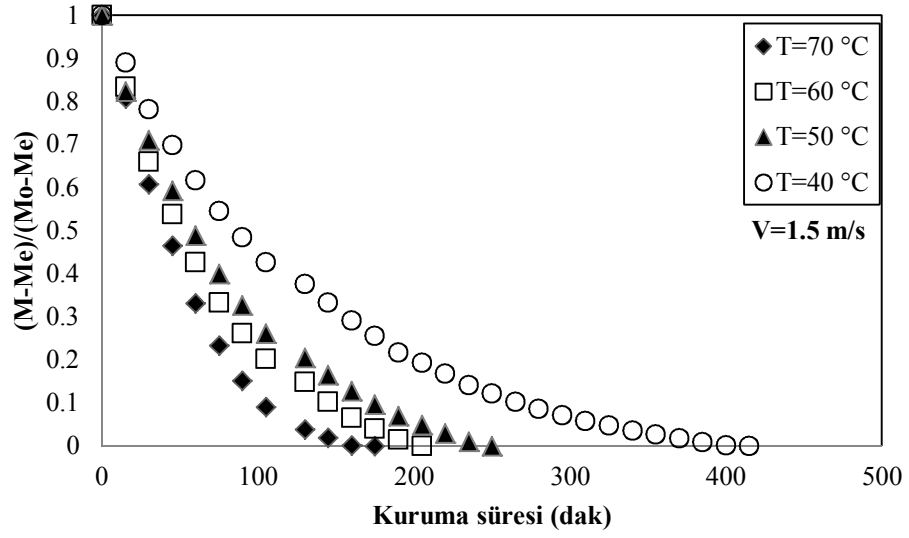
Şekil 5.13. Zencefilin V=3 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi

Nem içeriğinin zamana göre değişimi eğrilerinden kurumaya son verilen noktadaki nem içerikleri denge nem içeriği ($0.06 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{katımadde}}$) olarak kullanılmıştır. Her bir zaman dilimi için boyutsuz nem oranları $\left(\frac{M - M_e}{M_o - M_e} \right)$ belirlenmiştir. Şekil 5.14- 5.16' da aynı

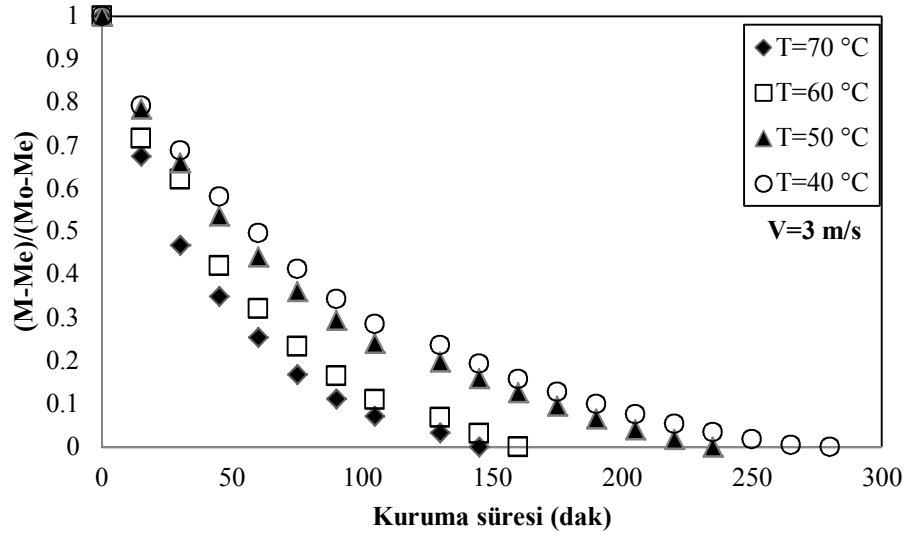
kurutma havası hızı, farklı kurutma havası giriş sıcaklıklarında kurutulan örneklerin zamanla boyutsuz nem oranındaki değişim görülmektedir.



Şekil 5.14. Zencefilin V=0.8 m/s, T= 40, 50, 60, 70 °C sıcaklıkta kurutulmasında nem oranının kuruma süresiyle değişimi



Şekil 5.15. Zencefilin $V=1.5$ m/s, $T=40, 50, 60, 70$ °C sıcaklıkta kurutulmasında nem oranının kuruma süresiyle değişimi



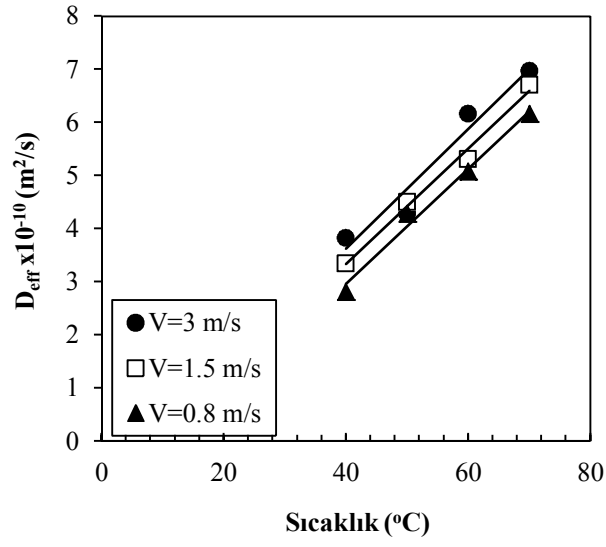
Şekil 5.16. Zencefilin $V=3$ m/s, $T=40, 50, 60, 70$ °C sıcaklıkta kurutulmasında nem oranının kuruma süresiyle değişimi

Kuruma kinetiğinin incelendiği çalışmada her bir durum için difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Bu amaçla (3.16) eşitliği kullanılmıştır. $\ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2(M - M_e)}$ ifadesine karşı zaman grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğimi $\frac{4l^2}{\pi^2 D}$ ifadesini verir. Buradan l (örnek kalınlığının yarısı) bilindiğine göre difüzyon katsayısı m²/s olarak hesaplanır. Hesaplar her bir kurutma havası giriş sıcaklığı ve kurutma havası hızında bu işlemler tekrarlandı. Difüzyon katsayısının sıcaklık ve hız arttıkça arttığı görüldü (Şekil 5.17).

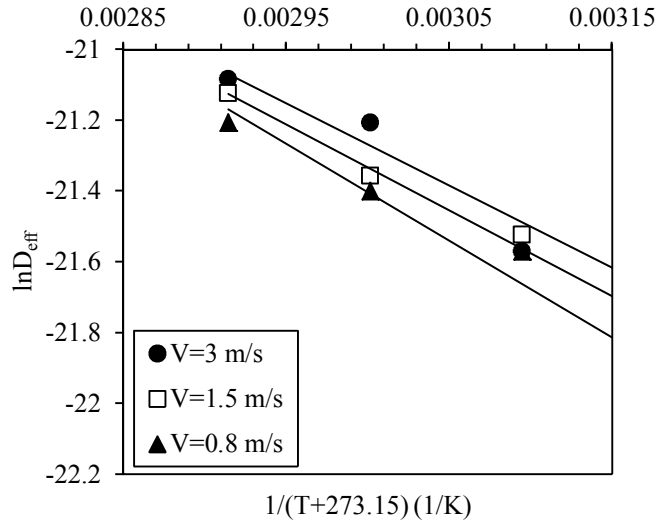
Arrhenius tipi bir denklem kullanılarak efektif difüzyon katsayısı değerleri ve kuruma şartları arasındaki korelasyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (5.1)$$

Her iki tarafın doğal logaritması alınıp $\ln(D_{eff})$ karşı T^{-1} grafiği çizdirildiğinde, doğrunun eğimini E_a/R' ye karşılık gelmektedir (Şekil 5.18). Buradan aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Efektif difüzyon katsayısı değerleri 2.807×10^{-10} - 6.977×10^{-10} m²/s, aktivasyon enerjisi değerleri ise 19.313-22.722 kJ/mol değerleri arasında değişim göstermiştir. Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerlerinin kurutma havası hızı ve sıcaklığının artmasıyla arttığı görülmüştür. Ayrıca Tablo 5.1'de bu çalışmada bulunan difüzyon katsayısı değerleri literatürde bulunan değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, bu çalışma sonucunda elde edilen efektif difüzyon katsayısı değerlerinin, Thorat ve ark.(2012) [34] tarafından vakumlu, Jayashree ve Visvanathan (2013) [35] tarafından konvektif tepsili ve Parlak (2014) [10] tarafından akışkan yatak kurutucularda kurutulmuş zencefil dilimlerine ait efektif difüzyon katsayılarından daha düşük olduğu, Ganesapillai ve ark., (2010) [33] tarafından mikro dalga kurutucuda kurutulmuş olan zencefil dilimlerinden biraz yüksek olduğu görülmüştür. Difüzyon katsayısının yüksek oluşu kütle transferinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Difüzyon katsayısı kurutucu ortam şartları, ürünlerin sahip olduğu neme ve ürünün şekline (karakteristik uzunluk) göre değişim gösterebilmektedir.



Şekil 5.17. Sabit hava hızlarında hava sıcaklığıyla difüzyon katsayısının değişimi



Şekil 5.18. Efektif difüzyon katsayısı ve sıcaklık arasındaki *Arrhenius* tipi bağıntı

Tablo 5.1. Zencefil dilimleri için efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerlerinin sıcaklık ve hız ile değişimi

Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Efektif difüzyon katsayısı (m ² /s)	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Literatürde bulunan Efektif difüzyon katsayısı değerleri (m ² /s)
3	70	6.977x10 ⁻¹⁰	19.313	Mikrodalga kurutma 9.17x10 ⁻¹¹ [33]
	60	6.166x10 ⁻¹⁰		
	50	4.284x10 ⁻¹⁰		
	40	3.829x10 ⁻¹⁰		
1.5	70	6.702x10 ⁻¹⁰	20.153	Vakum kurutma 1.86-4.78x10 ⁻⁸ [34]
	60	5.306x10 ⁻¹⁰		
	50	4.495x10 ⁻¹⁰		Tepside konvektif kurutma 1.31-1.91x10 ⁻⁷ [35]
	40	3.342x10 ⁻¹⁰		
0.8	70	6.166x10 ⁻¹⁰	22.722	Akışkan yatak kurutma 1.346x10 ⁻⁷ - 2.174x10 ⁻⁷ [10]
	60	5.079x10 ⁻¹⁰		
	50	4.284x10 ⁻¹⁰		
	40	2.807x10 ⁻¹⁰		

Tablo 5.2’ de farklı deneysel çalışma şartlarında kurutulan zencefil dilimleri için Eşitlik (3.21)-(3.41) kullanılarak hesaplanan konvektif ısı transfer katsayısı değerleri verilmiştir. Zencefil dilimlerinin konvektif ısı transfer katsayısı değerleri 0.33-2.11 W/m²°C arasında değişim göstermiştir. Konvektif ısı transfer katsayısı değerlerinin kurutma havası hızı ve sıcaklığının artmasıyla arttığı bulunmuştur.

Tablo 5.2. Zencefil dilimlerinin konvektif ısı transfer katsayısı değerlerinin sıcaklık ve hız ile değişimi

V (m/s)	T (°C)	h_c (W/m²°C)
3	40	0.54
	50	1.02
	60	1.44
	70	2.11
1.5	40	0.38
	50	0.84
	60	1.22
	70	1.70
0.8	40	0.33
	50	0.77
	60	1.12
	70	1.46

6. KURUMA EĞRİLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Bu çalışmada, lineer olmayan regresyon analiz yöntemi yardımıyla deney sonuçlarından elde edilen nem oranı-zaman değişimi eğrileri ve kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrilerinin modellenmesi yapılmıştır. Çoğu kurutma deneylerinde modelleme, zamanla nem oranındaki değişimi ifade eden denklem araştırılarak yapılır. Nem oranı eğrileri ($MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$) literatürde bulunan on iki farklı nem oranı denklemi ile karşılaştırılmıştır. Bunların içerisinde en uygun sonucu veren model deneysel sonuçları ifade etmek için kullanılmıştır. Kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrileri üssel fonksiyon esas alınarak modellenmiştir.

Regresyon analizleri STATISTICA programı kullanılarak yapılmıştır. Korelasyon katsayısı (R) ürünlerin kurutma eğrilerini tanımlayan en iyi denklemi seçmek için ana kriter olarak alınmıştır. Ayrıca tahminin standart hatası (RMSE) ve khi-kare (χ^2),

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{i,teorik} - MR_{i,deneysel})^2}{N}} \quad (6.1)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{i,deneysel} - MR_{i,teorik})^2}{N - n} \quad (6.2)$$

değerleri kullanılarak en uygun model saptanmıştır.

Burada MR_{teorik} model ile hesaplanan nem oranı değeri, $MR_{deneysel}$ deneme sonuçlarından elde edilen nem oranı değeridir. N deneysel veri sayısı, n kullanılan modeldeki katsayı sayısını ifade etmektedir.

Tahminin standart hatası, teorik ve deneysel değerler arasındaki sapmayı gösterir. Bu değer in sıfıra yakın olması arzu edilmektedir. Ayrıca uyumun iyilik derecesini gösteren khi-kare değerinin azalması ile uyumun arttığı belirtilmektedir.

6.1. Zamanla Nem Oranı Değişiminin Modellenmesi

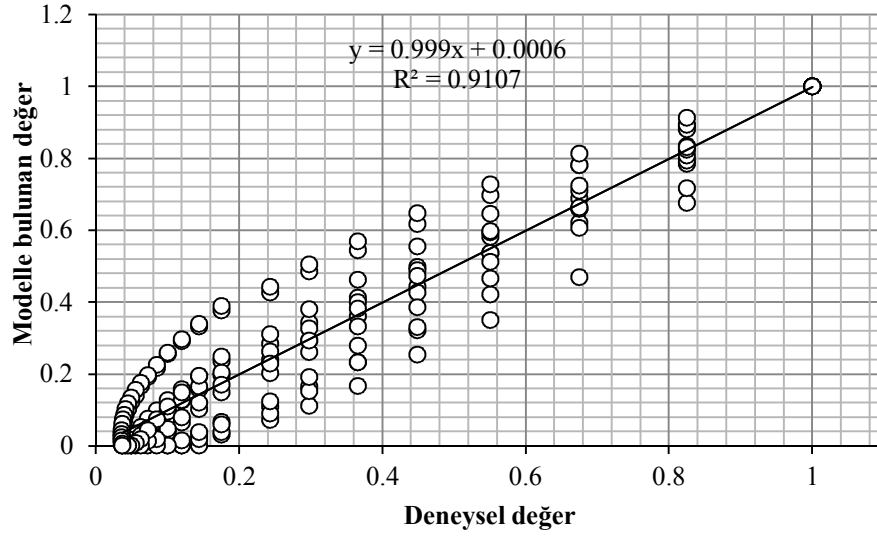
Literatürde bulunan on iki model, deney sonuçlarına göre elde edilen nem oranı değerlerinin hepsi için tek tek incelenmiştir. Korelasyon katsayısının (R) en yüksek olduğu ayrıca RMSE ve khi-kare değerlerinin en düşük olduğu model tespit edilmeye çalışılmıştır. Tablo 6.1’ de zencefil örnekleri için elde edilen nem oranı değerlerine uygulanan modeller ve bu modellerin korelasyon katsayısı ile khi-kare değerleri verilmektedir. Tablo 6.1 incelendiğinde zencefil örneklerinin nem oranının zamana göre modellenmesinde R değerleri 0.90555 ile 0.95432, χ^2 değerlerinin 0.01664503 ile 0.008339581, RMSE değerlerinin ise 0.128372145 ile 0.090408072 arasında değişim göstermiştir. Midilli ve Küçük modelinin, $R=0.95432$, $\chi^2=0.008339581$, $RMSE=0.090408072$ istatistiksel analiz sonuçları ile nem oranı zaman değişimini en iyi şekilde açıkladığı görülmektedir.

Tablo 6.1. Zencefil örnekleri için elde edilen nem oranı değerlerine uygulanan modellerin sonuçları

Model no	Sabitler	Modeldeki sabitler	R	χ^2	RMSE
1	k	0.01324	0.95378	0.008309601	0.09092997
2	k	0.014004	0.95380	0.008347778	0.090910482
3	n	0.98739			
3	k	0.01326	0.95380	0.008347778	0.090910481
4	n	0.98743			
4	a	1.00055	0.95378	0.008351326	0.090929799
5	k	0.01325			
5	a	0.98793	0.95425	0.008310649	0.090479886
6	k	0.01411			
6	c	0.021478			
6	a	0.014695	0.95425	0.00835174	0.090473952
7	ko	-0.001235			
7	b	0.99403			
7	k ₁	0.01397			
7	a	0.006795	0.95376	0.008354251	0.090945723
8	k	1.933381			
8	a	-0.0080	0.90555	0.01664503	0.128372145
9	b	0.00002			
9	a	-0.001407	0.95378	0.008393461	0.090929565
10	k	0.157456			
10	b	0.084224			
10	a	0.413114	0.95425	0.008437399	0.090473952
11	k	0.013970			
11	b	0.580933			
11	g	0.013974			
11	c	0.014680			
11	h	-0.001238	0.95378	0.008393536	0.09092997
12	a	-0.010909			
12	k	0.013247			
12	g	0.013242			
12	a	1.000071	0.95432	0.008339581	0.090408072
	k	0.011815			
	n	1.033337			
	b	0.000084			

Zencefil örnekleri için Midilli ve Küçük modeli kullanılarak elde edilen teorik ve deneyler sonucunda bulunan şartlardan elde edilen deneysel nem oranı değerleri Şekil 6.1’ de görülmektedir. Bu değerlerin düz çizginin üzerinde ve etrafında dağılım

göstermesi kullanılan modellerin bir uyum içerisinde deneysel verileri açıklayabildiğinin göstergesidir.



Şekil 6.1. Midilli ve Küçük modeli kullanılarak elde edilen teorik ve deneysel bulunan nem oranı değerleri

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada dört farklı kurutma havası sıcaklığında (40, 50, 60, 70 °C), üç farklı kurutma havası hızında (0.8, 1.5, 3 m/s) yaklaşık 4 mm kalınlığında dilimlenen zencefilin siklon tipi kurutucuda dönel akış ortamında kuruma davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Kurutulan zencefil dilimlerinin başlangıç nem içeriği %83 (4.8 g su/g katı madde) olarak tespit edilmiştir. Ürün ve kurutucu ortam havası arasında nem transferinin sona erdiği ve dolayısıyla nem içeriğinin sabit kaldığı %6 (0.06 g su/g katı madde)değerinde kurutma işlemine son verilmiştir.

Farklı giriş sıcaklıklarında ve farklı hava akış hızlarında kurutulan örneklerde, kurutma süresinde hava hızından ziyade, hava sıcaklığının daha etkili olduğu ve kuruma olayının azalan kuruma periyodunda gerçekleştiği görülmüştür. Deneylerde en uzun kurutma süresi 40 °C kurutma havası giriş sıcaklığında, 0.8 m/s kurutma havası hızında kurutulan örneklerde, en kısa kurutma süresi ise 70 °C kurutma havası giriş sıcaklığında, 3 m/s kurutma havası hızında kurutulan örneklerde elde edilmiştir. Kurutma süreleri değişik kurutma havası giriş sıcaklıklarına ve kurutma havası hızlarına bağlı olarak 145-415 dakika arasında değişmiştir.

Literatürde bulunan nem oranı zaman değişimi modelleri nem oranı eğrilerine uygulanarak, zencefil dilimlerinin kuruma kinetiğini en iyi açıklayan model araştırılmıştır. Nem içeriğinin zamana karşı deney verileri çizildiği zaman elde edilen eğrinin kurutma eğrilerinin genel karakteristiği olan eksponansiyel bir formda olduğu belirlenmiştir. Kuruma eğrisini en iyi ifade eden modelin seçiminde korelasyon katsayısı (R), tahminin standart hatası (RMSE), ki-kare (χ^2) gibi istatistiksel parametreler esas alınmıştır. Bu parametreler doğrultusunda en uygun sonuçlar Midilli Küçük modelinde elde edilmiştir.

Efektif difüzyon katsayısı değerleri 2.807×10^{-10} - 6.977×10^{-10} m²/s, aktivasyon enerjisi değerleri ise 19.313-22.722 kJ/mol değerleri arasında değişim göstermiştir. Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerlerinin kurutma havası hızı ve sıcaklığının artmasıyla arttığı görülmüştür.

Zorlanmış taşınımında siklon tipi kurutucu içinde kurutulan ürünlerin konvektif ısı transfer katsayısı değerleri 0.33-2.11 W/ m²°C arasında değişim göstermiştir. Konvektif

ısı transfer katsayısı değerlerinin kurutma havası hızı ve sıcaklığının artmasıyla arttığı bulunmuştur.

8. KAYNAKLAR

- [1] **Çınar İ.**, 2006. Gıda Kurutma Teknolojisinde Matematik Modellerin Kullanımı, Türkiye 9. Gıda Kongresi; 24-26 Mayıs 2006, Bolu, 805-806.
- [2] **Basaran, B., Bitlisli, B.O., Sarı, Ö., Özbalt, N. ve Güngör A.**, 2004. Deri kurutulmasında yeni teknolojiler: ısı pompalı kurutucular, I. Ulusal Deri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ege Üniversitesi İzmir, 634-642, 644-647s.
- [3] **Husain, A., Chen, C.S., Clayton, J.T. and Whitney, L.F.**, 1972. Mathematical simulation of mass and heat transfer in high moisture foods. TRANSACTIONS of the ASAE, 732-736.
- [4] **Mujumdar, A. S.**, 2000. Fundamentals of industrial drying. *In: Short Course Notes on Industrial drying Technology: Principles and Applications (Mujumdar A. S. and Dinçer, İ. Eds)*, İzmir, Turkey, 12 – 15 Haziran, s. 102 – 128.
- [5] **Cemeroglu, B., Acar, J.**, 1986. Meyve ve sebze isleme teknolojisi. Gıda Teknolojisi Derneği Yayın No: 6, Ankara.
- [6] **Zhang M., Tang J., Majumdar A.J., Wang S.**, 2006. Trends in Microwaverelated Drying of Fruits and Vegetables, Trends in Food Science and Technology, 17:524-534.
- [7] **Şen, S.**, 2010. Tarım Ürünlerinin Kuruma Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [8] **Baker**, 1997. C.G.J. Baker (Ed.), Industrial drying of food, Blackie Academic and Professional/Chapman and Hall, London, pp. 7–30
- [9] **Yaldız O., Ertekin C.**, 2000. Bazı Sebzelerin Güneş Enerjili Kurutucular ile Kurutulma Olanakları Üzerine Araştırmalar, Tarımsal Mekanizasyon 19. Ulusal Kongresi, 332-337, Erzurum.
- [10] **Parlak N.**, 2014. Akışkan Yataklı Kurutucuda Zencefilin Kuruma Kinetiğinin İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 29, No 2, 261-269.
- [11] **Güner M.**, 1991. “Kurutmanın bilimsel temelleri, kurutma modelleri ve güneşli kurutucular”, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi yayınları 1205, ANKARA.
- [12] **Barbanti D., Mastrocola D., Pizzirani S.**, 1995. Air drying of plums. Influence of some process parameters on the specific drying kinetics, Sciences des Aliments, vol.15, pp. 19-29.
- [13] **Özgöz, E.**, 1994. Bazı Sebzelerin Sera İçinde Kuruma Karakteristiklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. GOÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi (Yayınlanmamış) Tokat.

- [14] **Akbaba, H.**, 1998. Drying characteristic of squash with hot air. Drying '98– Proceedings of the 10th International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki, Greece, v B, 1476-1480, 19-22 Ağustos
- [15] **Zhang, Z., Yang, S., Liu, D.**, 1999. Mechanism and mathematical model of heat and mass transfer during convective drying of porous materials. Heat Transfer Asian Research. **28(5)**: 337-351.
- [16] **Midilli A., Olgun H., Ayhan T.**, 1999. Experimental Studies of Mushroom and Pollen Drying, Int. Journal of Energy Research, 23, 1143-1152.
- [17] **Özdemir M. & Devres Y. O.**, 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering* **42**: 225-233.
- [18] **Can A.**, 2000. Drying Kinetics of Pumpkinseeds, Int. Journal of Energy Research, 24, 965-975.
- [19] **Yaldız, O., Ertekin, C., Uzun, H.İ.**, 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy, 26, 457-465.
- [20] **Yaldız, O., Ertekin, C.**, 2001. Thin layer solar drying of Some Vegetables. Drying Technology, 19(3), 583-596.
- [21] **Midilli A.**, 2001. “Determination of Pistachio Drying Behavior and Conditions in a Solar Drying System”, International Journal of Energy Research, 25, 715-725.
- [22] **Kavak, A. E., Biçer, Y.** 2002. “Siklon Tipi Bir Kurutucuda Elmanın Kuruma Karakteristiklerine Etki Eden Faktörler, ”Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, sayı 22 (1), s. 8-17.
- [23] **Akpınar, E. K., Midilli, A., Biçer Y.**, 2003. Single Layer Drying Behavior of Potato Slices in A Convective Cyclone Dryer and Mathematical Modeling, Energy Conversion and Management, 44, 1689-1705.
- [24] **Akpınar, E. K., Biçer Y., Yıldız, C.**, 2003. Thin Layer Drying of Red Pepper, Journal of Food Engineering, 59, 99-104.
- [25] **Günhan, T.**, 2005. Farklı Kurutma Havası Şartlarının Rio Grande Çeşidi Domatesin Kuruma Karakteristiklerine Etkilerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [26] **Gürlek, G., Karakuş, A.A., Akdemir, Ö., Güngör, A., Özbalta, N.**, 2005. Güneş Enerjili Sera Tipi Kurutucuda Domates Kurutulmasının Deneysel Araştırılması, Yeni Ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Enerji Yönetimi Sempozyumu, Kayseri.

- [27] **Özel Ö.**, 2010. Balkabağının Farklı Kurutma Şartlarındaki Kuruma Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [28] **Bayhan H., Koyun T.**, 2011. Kabin tipi bir kurutucuda kurutma sürecini etkileyen parametrelerin deneysel olarak incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [29] **Ertuğrul M.**, 2011. Farklı Kurutma Havası Sıcaklık Profillerinin Oğulotu (*Melissa officinalis*.) Bitkisi Kuruma Süresi ve Kalitesine Etkisi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı.
- [30] **Schweiggert, U., Hofmann, S., Reichel, M., Schieber, A., Carle, R.**, 2008. "Enzyme-assisted liquefaction of ginger rhizomes (*Zingiber officinale* Rosc.) for the production of spray dried and paste-like ginger condiments", Journal of Food Engineering, Cilt 84, 28–38.
- [31] **Alakali, J., Irtwange, S.V., Satimehin, A.**, 2009. "Moisture adsorption characteristics of ginger slices", Ciencia e Tecnologia de Alimentos, Cilt 29, No 1, 155-164.
- [32] **Phoungchandang, S., Saentaweek, S.**, 2011. "Effect of Two Stage, Tray and Heat Pump Assisted Dehumidified Drying on Drying Characteristics and Qualities of Dried Ginger", Food and Bioprocess Processing, Cilt 89, No 4, 429-437.
- [33] **Ganesapillai, M., Miranda, L. R., Reddy, T., Bruno, M., Singh, A.**, 2011. "Modeling, Characterization, and Evaluation of Efficiency and Drying Indices for Microwave Drying of Zingiber Officinale and Curcuma Mangga", Asia-Pac. J. Chem. Eng., Cilt 6, 912–920.
- [34] **Thorat, I. D., Mohapatra, D., Sutar, R. F., Kapdi, S. S., Jagtap, D.D.**, 2012. "Mathematical Modeling and Experimental Study on Thin-Layer Vacuum Drying of Ginger (*Zingiber Officinale* R.) Slices, Food Bioprocess Technol., Cilt 5, 1379–1383.
- [35] **Jayashree, E., Visvanthan, R.**, 2013. "Studies on Thin Layer Drying Characteristics of Ginger (*Zingiber Officinale*) in a Mechanical Tray Drier journal of Plantation Crops", Journal of Spices and Aromatic Crops, Cilt 41, No 1, 86-90.
- [36] **Kar F., Biçer A.**, 2011. Siklon Tipi Bir Kurutucuda Zencefilin Kuruma Kinetiğinin Araştırılması, Ulusal Kimya Müh. Kongresi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [37] **Anwar, S.I., Tiwari, G.N.**, 2001. Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions. *Energy Convers. Mgmt.* 42(5): 627-637.

- [38] **Anwar, S.I., Tiwari, G.N.**, 2001. Convective heat transfer coefficient of crop in forced convection drying – an experimental study. *Energy Conversion and Management*. 42: 1687-1698.
- [39] **ASAE**, 1983. Moisture measurement-peanuts. ASAE Standart of ASAE S.410.1. *Agricultural Engineering Yearbook of Standards*, 329-331.
- [40] **Yağcıoğlu, A.**, 1999. Tarım ürünleri kurutma tekniği, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No:536, İzmir.
- [41] **Hall, C. W., Kunze, O. R., Calderwood, D. L., Maddex, R. L., Shove, G. C., Davis, D. C.**, 1980. Drying and storage of agricultural crops, Washington State Un., Pullman, WA 99164, USA.
- [42] **Doğantan, Z. S.**, 1986. Kahramanmaraş biberlerinin kurutmaya yönelik fiziksel ve kimyasal özelliklerinin saptanması ile doğal koşullarda ve plastik örtü altı güneş toplayıcılarıyla kurutma üzerine bir araştırma, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Mekanizasyonu Anabilim Dalı, Adana.
- [43] **Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W.**, 1974. Drying cereal grains. Westport AVI.
- [44] **Newman, A. B.**, 1931. The drying of porous solids: Diffusion and surface emission equations. *Transactions of the AIChE* 27:203-220.
- [45] **Crank, J.**, 1975. *The Mathematics of Diffusion*, 2nd Ed. London: Oxford University Press.
- [46] **Mujumdar, A. S. and Devahastin, S.** 2000. Fluidized Bed Drying Technology. Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying. (Devahastin, S. ed.). Exergex Corp. Canada.
- [47] **McCabe, W. L., and J. C. Smith**, 1976. *Unit Operations of Chemical Engineering*, 3rd Ed., 521, McGraw-Hill, New York.
- [48] **Akpınar E.**, 2002. Tarımsal Ürünler İçin Siklon Tipi Bir Kurutucunun Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [49] **Van Arsdel, W. B. and Copley, M. J.**, 1963. *Food dehydration*, v 1., The AVI Publishing Company, Inc. West port Connecticut, 178.
- [50] **Banchero, J.T., Badger, W.L.**, 1973. *Kimya Mühendisliğine Giriş: Ünit operasyonlar*, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Malatya’ da doğdum. İlk, orta ve lise eğitimimi Malatya’da tamamladım. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde eğitime başladım. 2010 yılında lisans eğitimimi tamamladıktan sonra aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalında yüksek lisans eğitime başlamış olup halen devam etmekteyim.