

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞKAN YATAKTA FINDIK KURUTMA
PROSESİNDE ISI VE KÜTLE GEÇİŞİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Adnan TOPUZ

128128

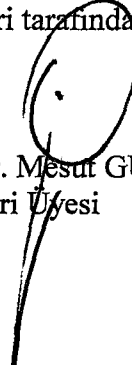
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANLARI ENSTİTÜSÜ

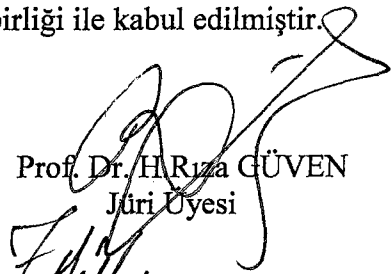
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜH.

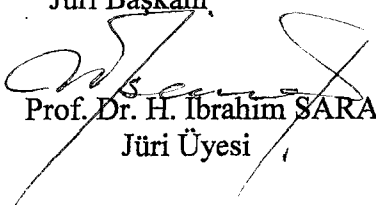
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 21/03/2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. İsmail ÇALLI
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Mesut GÜR
Jüri Üyesi


Prof. Dr. H. Rıza GÜVEN
Jüri Üyesi


Prof. Dr. H. İbrahim SARAÇ
Jüri Üyesi


Doç. Dr. M. Zafer GÜL
Jüri Üyesi

TEŞEKKÜR

İlk olarak beni bu çalışmaya yönlendiren ve tüm bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım tez danışmanım Sn. Prof.Dr. Mesut GÜR'e, 2547 sayılı YÖK yasasının ilgili 35. maddesine istinaden Zonguldak Karaelmas Üniversitesi'nden Sakarya Üniversitesi'ne geçici olarak naklen tayinimi sağlayan ZKÜ Rektörü Sn.Prof.Dr. Ramazan ÖZEN ve SAU Rektörü Sn.Prof.Dr. İsmail ÇALLI'ya, araştırmanın finansmanını üstlenen Araştırma Fonu ve tüm çalışanlarına, deney tesisatının kurulmasında yardımlarını aldığım Makina Bölümü Laboratuvar teknisyeni Sn. Metin GÜNAY'a, internet aracılığıyla sürekli yardımlarını esirgemeyen ve yurt dışı yayınlara ulaşmamı sağlayan Sn.Prof.Dr. Feridun HAMDULLAHPUR'a (Carleton Univ.), tezin model çözümünde her türlü bilgisinden istifade ettiğim Sn. Doç.Dr. Zafer GÜL'e (Marmara Üniv.), çalışmalarım esnasında yardım ve desteğini esirgemeyen Sn.Yrd.Doç.Dr. Tahsin ENGİN, Sn.Yrd.Doç.Dr. Kenan GENEL, Sn.Yrd.Doç.Dr. Vedat ARI, Sn.Öğr.Gör. Adem ÇALIŞKAN ve tüm mesai arkadaşlarıma, başından sonuna kadar çalışmam esnasında desteğini hissettiğim sevgili eşim Nazlı Emine TOPUZ'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Adnan TOPUZ

İÇİNDEKİLER

SİMGELER LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

FINDIK KURUTMA VE AKIŞKAN YATAK	3
---------------------------------------	---

2.1. Fındık Hakkında Genel Bilgiler	3
2.1.1. Fındığın tarihçesi	3
2.1.2. Fındık çeşitleri.....	3
2.1.3. Dünya’da fındık üretim ve tüketimi	4
2.2. Kurutma	6
2.2.1. Sorpsiyon izotermi.....	7
2.2.2. Kurutma hızı	8
2.2.2.1. Sabit kurutma hızı periyodu.....	9
2.2.2.2. Azalan kurutma hızı periyodu.....	9
2.2.2.3. Kurutma hızına etki eden faktörler	10
2.3. Akışkan Yatak Sistemleri	10

BÖLÜM 3.

LİTERATÜR ÇALIŞMASI	16
---------------------------	----

BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMA	32
4.1. Deney Setinin Kurulması	32
4.2. Deneylerin Yapılması	38
4.2.1. Fındığın yoğunluğunun tespiti.....	38
4.2.2. Pitot tüpünün kalibrasyonu.....	39
4.2.3. Minimum akışkanlaşma hızının tespiti.....	39
4.2.4. Deneylerin yapılışı	39
BÖLÜM 5.	
MATEMATİKSEL MODEL	42
5.1. Matematiksel Modelin Eldesi	42
5.1.1. Gaz fazı	47
5.1.2. Baloncuk fazı.....	53
5.1.3 Katı faz (fındık).....	54
5.1.3.1. Azalan kurutma hızlı periyod.....	54
5.1.3.2. Sabit kurutma hızlı periyod.....	57
5.2. Lineer Olmayan Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Nümerik Analizi	59
5.2.1. Gaz fazı	59
5.2.2. Baloncuk fazı.....	61
5.2.3. Katı faz (fındık).....	62
5.3. Çözüm Yöntemi	66
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE MODEL SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI	68
6.1. DeneySEL Sonuçların Değerlendirilmesi	68
6.1.1. Akışkan yatak havasına ait deney sonuçları	68
6.1.2. Akışkan yatakta fındığa ait deney sonuçları.....	72
6.1.3. Akışkan yatak havası giriş sıcaklığının etkisi	76
6.1.4. Akışkan yatak hava hızının fındığın kurumasına olan etkisi ..	78
6.1.5. Fındık türünün kurutmaya olan etkisi	81
6.2. Deney Sonuçları İle Matematiksel Modelin Karşılaştırılması	85
BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR	94
EKLER	106
Ek A. Çözümlenen Denklemler	106
Ek B. Akış Diyagramı.....	109
ÖZGEÇMİŞ	113

SİMGELER LİSTESİ

A	Kesit veya yüzey alanı, (m ²)
b	Buharlaştırma entalpisi, (J/kg)
C	Sabit basınçta özgül ısı, (J/kg K)
d	Çap, (m)
D	Nem difüzyon katsayısı, (m ² /s)
d _{or}	Dağıtıcı eleğin delik çapı, (m)
dt	Zaman aralığı, (s)
dv	Yataktaki kontrol hacmin hacmi, (m ³)
dy	Yataktaki kontrol hacmin yüksekliği, (m)
E	Enerji, (J)
g	Yerçekim ivmesi, (m/s ²)
h	Isı geçiş katsayısı, (W/m ² K)
H	Toplam ısı geçiş katsayısı, (1/s)
k	Kütle geçiş katsayısı, (m/s)
K	Toplam kütle geçiş katsayısı, (1/s)
m	Kütle, (kg)
M	Nem miktarı, $M_p = \frac{M_{pnemli} - M_{pkuru}}{M_{pkuru}} \times 100$, (kg su/kg katı)
q	Isı geçişi, (W)
Q _b	Baloncuk debisi, (m ³ /s)
r	Yarıçap, (m)
T	Sıcaklık, (K)
t	Zaman, (s)
u	Hız, (m/s)
V	Hacim, (m ³)
W	Yatağın içindeki partikül kütlesi, (kg)
X	Mutlak nem, (kg su buharı/kg kuru hava)

X_{py}	Partikülün yüzeyinde gaz mutlak nemi, (kg su buharı/kg kuru hava)
Y	Yatak yüksekliği, (m)

GreK Semboller

β	Termal genleşme katsayısı, (1/K)
μ	Dinamik viskozite, (kg/m s)
Δ	Fark, (-)
ε	Hacim oranı, (-)
λ	Isı iletim katsayısı, (W/m K)
∂	Kısmi türev, (-)
δ	Türev, (-)
α	Termal difüzyivite, (m ² /s)
ρ	Yoğunluk, (kg/m ³)
ΔP_b	Yatak basınç düşüşü, (Pa)
ν	Kinematik viskozite, (m ² /s)

Alt indisler

b	Baloncuk veya yatak
bu	Buhar
buh	Buharlaştırma
çık.	Çıkış
d	Duvar
dh	Duvar ile hava arası
g	Gaz (aradaki gaz)
gb	Gaz ile baloncuk arası
gd	Gaz ile duvar arası
$gir.$	Giriş
gp	Gaz ile partikül arası
h	Hava
j	Yataktaki kontrol hacmin konumu
kon	Konveksiyon (taşınım)

m	Maksimum
mb	Minimum baloncuklaşma
mf	Minimum akışkanlaşma
o	Giriş veya başlangıç
or	Orifis veya ortalama
p	Partikül
pd	Partikül ile duvar arası
pg	Partikül ile gaz arası
po	Partikül başlangıç
py	Partikül yüzeyi
t	Akışkan yatak
y	Yüzey

Üst İndisler

Birim zamanda

Boyutsuz sayılar

Ar Archimedes sayısı, $Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}$

Bi_h Isı geçişi Biot sayısı, $Bi_h = \frac{h_p R}{k_t}$

Bi_m Kütle geçişi Biot sayısı, $Bi_m = \frac{k_p R}{D}$

Re_{mf} Partikülün çapına bağlı, minimum akışkanlaşmadaki Reynolds sayısı,

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g}$$

Re_p Partikülün çapına bağlı, Reynolds sayısı, $Re_p = \frac{d_p u \rho_g}{\mu_g}$

Sc Schmidt sayısı, $Sc = \frac{\mu}{\rho D}$

Sh Sherwood sayısı, $Sh = \frac{k d}{D}$

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Örnek bir ürün için nem sorpsiyon izotermi.....	7
Şekil 2.2.a. Ürün neminin zamana bağlı değişimi, b. Kurutma hızının zamana bağlı değişimi, c. Kurutma hızının nem oranına göre değişimi.....	8
Şekil 2.3. Akışkan yatağın değişik formları.	12
Şekil 2.4. Hava hızı ile yatak basınç farkı arasındaki ilişki.	13
Şekil 2.5. Akışkan yatağın bir akışkan gibi davranışı.....	13
Şekil 4.1. Akışkan yatakta kurutma deney setinin şematik resmi.....	33
Şekil 4.2. Klima cihazının resmi.....	32
Şekil 4.3. Fan ve sürgülü vana	34
Şekil 4.4. Frekans invertörü.....	34
Şekil 4.5. Pitot tüpü ve basınç hücresi	35
Şekil 4.6. Yatağın girişindeki sıcaklık ve nem ölçer	36
Şekil 4.7. Fan ve vana çıkışından sonra basma hattı	37
Şekil 4.8. Akışkan yatağın gövdesi.....	37
Şekil 4.9. Yatak gövdesindeki sıcaklık (üstte) ve basınç ölçerler (altta).....	38
Şekil 4.10. Pitot tüpünün kalibrasyonu.....	39
Şekil 4.11. Minimum akışkanlaşma hızının belirlenmesi.....	40
Şekil 4.12. Sartorius MA30 marka nem tayin cihazı.	41
Şekil 5.1. Yataktaki baloncuk davranışı için değişik modeller: (a) ortalama Baloncuk çapı, (b) eksenel yönde değişen baloncuk çapı, (c) eksenel ve yatay yönde değişen baloncuk çapı.....	44
Şekil 5.2. Yatak içindeki faz dağılımı; (a) sabit faz kapsamları, (b) değişken faz kapsamları.	44
Şekil 5.3. Gaz fazı kütle geçiş analizi için bir boyutlu kontrol hacmin belirlenmesi.	48
Şekil 5.4. Gaz fazı ısı geçiş analizi için kontrol hacim seçimi.	50
Şekil 5.5. Baloncuk fazı ısı ve kütle geçişi analizi için bir boyutlu kontrol hacmin belirlenmesi	53

Şekil 5.6. Fındık dış yüzeyinden taşınım ile olan kütle geçişi.	55
Şekil 5.7. Fındığın dış yüzeyinden ısı geçişi.	56
Şekil 5.8. Yatak içinde düğüm noktaları ve kontrol hacmin seçimi.	60
Şekil 5.9. Küresel koordinatlarda kontrol hacim ve düğüm noktası.	62
Şekil 5.10. Yüzeydeki kütle geçişi için, sınır şartında yarım kontrol hacim.	64
Şekil 5.11. Yüzeydeki ısı geçişi için sınır şartlarında yarım kontrol hacim.	66
Şekil 6.1. Akışkan yatak havasının yatağın yüksekliğine bağlı sıcaklık değişimi.	69
Şekil 6.2. Akışkan yatak havasının yatağın yüksekliğine bağlı sıcaklık değişimi.	69
Şekil 6.3. Akışkan yatak havasının yatağın yüksekliğine bağlı sıcaklık değişimi.	70
Şekil 6.4. Akışkan yatak havasının yatağın yüksekliğine bağlı sıcaklık değişimi.	70
Şekil 6.5. Akışkan yatak havası bağıl neminin zamana bağlı değişimi.	71
Şekil 6.6. Akışkan yatak havası çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi.	71
Şekil 6.7. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	72
Şekil 6.8. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	72
Şekil 6.9. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	73
Şekil 6.10. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	73
Şekil 6.11. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	74
Şekil 6.12. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	74
Şekil 6.13. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	75
Şekil 6.14. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	75
Şekil 6.15. Akışkan yatak havasının giriş sıcaklığının eski fındığın kurumasına olan etkisi.	76
Şekil 6.16. Akışkan yatak havasının giriş sıcaklığının taze fındığın kurumasına olan etkisi.	76
Şekil 6.17. Akışkan yatakta kurutma hızının zamana bağlı değişimi.	77
Şekil 6.18. Akışkan yatakta kurutma hızının kurutma oranına bağlı değişimi.	77
Şekil 6.19. Akışkan yatak hava hızının eski fındığın kurumasına olan etkisi.	78
Şekil 6.20. Akışkan yatak hava hızının taze fındığın kurumasına olan etkisi.	79
Şekil 6.21. Akışkan yatakta kurutma hızının zamana bağlı değişimi.	80
Şekil 6.22. Akışkan yatakta kurutma hızının kurutma oranına bağlı değişimi.	80
Şekil 6.23. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	81
Şekil 6.24. Akışkan yatakta kurutma hızının zamana bağlı değişimi.	82
Şekil 6.25. Akışkan yatakta kurutma hızının kurutma oranına bağlı değişimi.	82

Şekil 6.26. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.	83
Şekil 6.27. Akışkan yatakta kurutma hızının zamana bağlı değişimi.	83
Şekil 6.28. Akışkan yatakta kurutma hızının kurutma oranına bağlı değişimi.	84
Şekil 6.29. Eski fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.	85
Şekil 6.30. Eski fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.	85
Şekil 6.31. Eski fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.	86
Şekil 6.32. Eski fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.	86
Şekil 6.33. Taze fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.	87
Şekil 6.34. Taze fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.	87
Şekil 6.35. Taze fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.	88
Şekil 6.36. Taze fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.	88

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Fındık Meyvelerinin şekil grupları ve kültür çeşitleri.....	4
Tablo 2.2. Dünya fındık üretimi	5
Tablo 2.3. Türkiye'nin yıllara göre fındık ihracatı	5
Tablo 4.1. Deney planı.....	41



ÖZET

Anahtar Kelimeler: Akışkan Yatak, Kurutma, Fındık, Akışkan Yatakta Kurutma.

Günümüzde hızla gelişmekte olan gıda sektöründe ürünlerin toplanması ve depolanması ile depo şartlarının sağlanması önemli bir yer tutar. Bu ürünlerin toplandıktan sonra depolanabilmesi için büyük oranda kurutma işlemine tabi tutulması gerekir. Kurutma işlemleri ise ürünün fiziksel, kimyasal ve diğer özelliklerine bağlı olarak çeşitlilik gösterir.

Toplanan fındıkların Güneş enerjisi ile yere serilerek kurutulması yöntemi en fazla kullanılan kurutma şeklidir. Fakat bu tarz kurutma işleminde iklim şartlarının değişikliği işlemin sonuçlandırılmasını oldukça fazla geciktirmektedir. Yapılan bu çalışmada fındık için yeni bir kurutma şekli, akışkan yatakta kurutma gerçekleştirilmiştir.

Fındık kurutulmasının, akışkan yatakta gerçekleştirilmesi bu çalışmanın temel hedefi olmaktadır. Kurutma işlemine bir sene önce toplanarak Güneş'te serme yöntemiyle kurutulan fındıklar ile henüz toplanmış fındıklar tabi tutulmuştur. Amaç; fındığın akışkan yataktaki kuruma özelliklerinin incelenmesi ve diğer sistemlere göre nasıl bir etki gösterdiğinin belirlenmesidir. Bir sene önce toplanmış ve Güneş'te sererek kurutulmuş fındıklar ülkemizde fabrika depolarında en azından 3-4 ay kadar bekletilmektedir. Bu sırada tekrar nem alan fındıklar, gereken şartları sağlamadığı için kırma işlemi sonucunda içinin de dağıldığı ve kabukla karıştığı durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu fındıkların kırma işleminden önce tekrar istenen şartları sağlamak üzere akışkan yatakta kurutulması söz konusu kayıpları azaltacaktır. Ayrıca bu yeni kurutma şeklinin henüz toplanan fındıkları kurutmak için de kullanıldığında nasıl sonuçlar elde edileceğini belirlemek üzere taze fındıklar da deney kapsamına alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında deneyleri yapmak üzere bir akışkan yatak deney seti kurulmuştur. Burada Sakarya bölgesinin çeşitli fındıkları toplanarak, kurutulması işlemi deneysel olarak incelenmiştir. Kurutma işleminin özellikle matematiksel olarak hesaplanması yönünde literatürde büyük bir eksik bulunmaktadır. Deneysel sonuçlar ile uygulanan bir matematiksel model sonuçları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu matematiksel model, sonlu farklar yöntemiyle çözülmüş ve bunun için Matlab dilinde bir program yazılmıştır. Deney sonuçları ile matematiksel model sonuçları arasında büyük bir yaklaşım sağlanmıştır.

INVESTIGATION OF HEAT AND MASS TRANSFER AT THE FLUIDIZED BED DRYING PROCESS OF HAZELNUT

SUMMARY

Keywords: Fluidized bed, hazelnut, drying, fluidized bed drying.

In the agriculture industry, harvesting and storing of grain and providing of store conditions are very important. After harvesting the grain, they must be dried enough to be store. The drying processes are different dependent on physical, chemical and other properties of the grain. It is most commonly prefer to drying of just harvested grain with spreading out and aided the solar energy. But at this processes, because of various climate conditions, it is rather delay to complete of drying. In this study, a new method for the hazelnut, fluidized bed drying has been tested.

Drying of the hazelnuts in the fluidized bed is principle aim of this study. In the experiments, two groups of hazelnut have been used. First group is harvested 5-6 months ago, dried with spreading out and stored, second group is just harvested hazelnuts. In our country, first group of hazelnuts are stored for 3-4 months. Therefore, the hazelnuts are taken moisture and the breakage of them is not done enough productive. Before breaking of hazelnuts, last drying operation in the fluidized bed is reduced the losses. Also, just harvested hazelnuts have been used the experiments to obtain the results of the new drying methods dependent on fresh grain.

In this study, a laboratory scaled fluidized bed has been constructed. Drying process of the hazelnuts harvested from Sakarya, has been experimentally investigated. In the literature, mathematical modeling of fluidized bed drying of the hazelnuts is not adequate. Experimental and model results have been comparative evaluated.

This model has been solved by using finite difference approximation, therefore a new computer program has been produced in the matlab. There is a good agreement between experimental and model results.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişmekte olan gıda sektöründe ürünlerin toplanması ve depolanması ile depo şartlarının sağlanması önemli bir yer tutar. Bu ürünlerin toplandıktan sonra depolanabilmesi için büyük oranda kurutma işlemine tabi tutulması gerekir. Kurutma işlemleri ise ürünün fiziksel, kimyasal ve diğer özelliklerine bağlı olarak çeşitlilik gösterir.

Fındık gıda sektöründe özellikle çikolata ve şekerleme endüstrisinde çokça tüketilen bir üründür. Fındığın ülkemiz açısından da büyük önemi vardır. Çünkü Dünya’da en fazla fındık üretimine sahip ülkelerden biri Türkiye’dir. Türkiye’nin en çok ihraç ettiği mallardan biri olma özelliğini taşıyan fındığın yeterince verimli olarak toplandığını ve depolandığını henüz söylemek mümkün değildir. Toplanan fındıkların Güneş enerjisi ile yere serilerek kurutulması yöntemi en fazla kullanılan kurutma şeklidir. Fakat bu tarz kurutma işleminde iklim şartlarının değişikliği işlemin sonuçlandırılmasını oldukça fazla geciktirmektedir. Yapılan bu çalışmada fındık için yeni bir kurutma şekli, akışkan yatakta kurutma gerçekleştirilmiştir.

Akışkan yatak sistemleri yüksek ısı transferi ve kontrol edilebilme özelliklerinden ötürü gerek yurt içi ve gerekse yurt dışında daha çok yanma proseslerinde kullanılmıştır. Sonraları çeşitli maddelerin kurutulması için de elverişli olduğu kanaatine varılarak bu amaçla da araştırmalar yapılmıştır. Tarım ürünlerinin kurutulmasını içeren çalışmalar içinde fındık için yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bu nedenle Türkiye için önemli bir yer tutan fındığın, akışkan yatakta kurutulması bu çalışmada incelenmek istenmiştir.

Kurutma işlemine bir sene önce toplanarak Güneş’te serme yöntemiyle kurutulan fındıklar ile henüz toplanmış fındıklar tabi tutulmuştur. Amaç; fındığın akışkan yataktaki kuruma özelliklerinin incelenmesi ve diğer sistemlere göre nasıl bir etki

gösterdiğinin belirlenmesidir. Bir sene önce toplanmış ve Güneş'te sererek kurutulmuş fındıklar ülkemizde fabrika depolarında en azından 3-4 ay kadar bekletilmektedir. Bu sırada tekrar nem alan fındıklar, gereken şartları sağlamadığı için kırma işlemi sonucunda içinin de dağıldığı ve kabukla karıştığı durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu fındıkların kırma işleminden önce tekrar istenen şartları sağlamak üzere akışkan yatakta kurutulması söz konusu kayıpları azaltacaktır. Ayrıca bu yeni kurutma şeklinin henüz toplanan fındıkları kurutmak için de kullanıldığında nasıl sonuçlar elde edileceğini belirlemek üzere taze fındıklar da deney kapsamına alınmıştır.

Çalışma kapsamında deneyleri yapmak üzere bir deney seti kurulmuştur. Setin ayrıntılı bilgileri ilerideki bölümlerde verilmiştir. Deneysel çalışmanın yanında konu ile alakalı matematiksel modellerde incelenmiş ve yeni üç fazlı bir model fındığa uygulanarak deneysel sonuçlar ile model sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara bağlı olarak yeni bir kurutma şekli geliştirilmesine yardımcı olmak ve bu deneysel değerlerin de teorik sonuçlarla nasıl bir uyum gösterdiğini belirlemek ana hedeflerdir.

BÖLÜM 2. FINDIK, KURUTMA ve AKIŞKAN YATAK

2.1. Fındık Hakkında Genel Bilgiler

2.1.1. Fındığın tarihçesi

Fındığa ait ilk bulgular Milat'tan önce Doğu Asya'ya ait olsa bile, ilk olarak ele alınışı yaklaşık 25 asır öncesine dayanır ve bu bölgelerin de Trabzon ve çevresinden kaynaklandığı bilinmektedir.

Fındık tarımı öncelikle uzun yıllar Doğu Karadeniz kıyı şeridinde sınırlı olarak Giresun, Ordu, Trabzon, Rize, Artvin illerinde yapılmış ve daha sonra Karadeniz'in kıyı şeridinde yayılmış ve batıda Bolu, Sakarya, Kocaeli ve Zonguldak illerinde de fındık tarımı yapılmaya başlanmıştır.

Dünya ülkeleri incelendiğinde, 1992 istatistiklerine göre 657 bin ton toplam fındık üretiminin %75'ini Türkiye, %11'ini İtalya, %6'sını İspanya, %2'sini ABD, %1'ini Yunanistan gerçekleştirmiştir. Dolayısıyla Dünya üretiminin %70-80'ini Türkiye yapmaktadır. (Demirtaş, [20])

2.1.2. Fındık çeşitleri

Fındığı sınıflandırırken en başta dikkat edilen; nitelik, şekil ve yapıdır. Aynı türe giren fındıklarda bile meyve ve şekil değerleri değişik olabilir. Standartlarda fındıklar meyve, şekil ve biçimlerine göre üç gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Fındık Meyvelerinin şekil grupları ve kültür çeşitleri. (Ayfer, [5])

FINDIK ŞEKİL GRUPLARI	ŞEKİL GRUPLARINA GÖRE KÜLTÜR ÇEŞİTLERİ
Yuvarlak	Tombul Palaz Foşa Mincane Karafındık Kalın Kara Çakıldak Uzun Musa Cavcava Kan Kargalak
Sivri	Sivri İncekara
Uzun	Yuvarlak Badem Yassı Badem

Fındık sahip olduğu yağ ve protein içeriği nedeniyle çok kıymetli bir gıda maddesidir. Türk fındıklarında yağ oranı %60'ın üzerinde ve proteinin ise yeterli düzeyde olduğu ayrıca fındığın bol miktarda vitamin de içerdiği bilinmektedir.

2.1.3. Dünya'da fındık üretim ve tüketimi

Fındık Dünya'da en çok Kuzey Anadolu bölgesinde yetiştirilmektedir. Kuzey Anadolu'nun fındık üretimine elverişli ekolojik özelliklere sahip olması, Dünya'nın en kaliteli fındıklarının burada yetiştirilmesinde etkin bir faktördür.

Dünya'da Türkiye başta olmak üzere İtalya, İspanya, ABD, İran, BDT, Yunanistan, Portekiz, Fransa, Macaristan gibi ülkelerde fındık üretimi yapılmaktadır. Bunun yanında Dünya'da en fazla fındık üretimini yapan ülke Türkiye'dir. Toplam üretimin %70'ini yapan ülkemizde üretim alanları artmakta fakat verimlilik aynı oranda yükselmemektedir.

Türkiye'deki fındık ihracatında Fiskobirlik ve diğer özel kuruluşların 1991-2000 yılları arasında ihraç ettiği ürün miktarları ve elde edilen gelir tablo 2.2 ve 2.3'de görülmektedir.

Tablo 2.2. Dünya fındık üretimi (bin ton kabuklu / yıl) (Demirtaş, [20])

ÜLKELER	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Türkiye	301	280	400	560	400	375	531
İtalya			80	80	80	70	73
İspanya			38	38	37	33.6	35.5
ABD			11.66	11.66	12	12.2	12.5

Tablo 2.3. Türkiye'nin yıllara göre fındık ihracatı (Demirtaş, [20],[102])

YIL	İHRACAT (TON)	DÖVİZ (\$)
1991	196.079	545.238.052
1992	164.856	461.555.238
1993	194.814	453.563.256
1994	176.425	698.891.402
1995	245.270	798.377.653
1996	154.296	470.049.292
1997	151.139	664.387.323
1998	144.847	607.891.199
1999	130.426	462.156.920
2000 (Ocak-Eylül)	60.866	247.206.287
TOPLAM	1.619.018	5.409.316.622

Dünya'da sert kabuklu meyveler içinde %26-28 oranıyla en fazla fındık tüketilmektedir. Bunu sırasıyla badem, Hint bademi, ceviz, Brezilya bademi, Antep fıstığı ve Amerikan cevizi izlemektedir.

Fındık, herhangi bir işlem görmeden, doğrudan taze olarak tüketildiği gibi, diğer yiyeceklere katkı maddesi olarak ilave edilerek de tüketilmektedir. Fındık, çikolata sanayisinin en önemli maddelerinden biridir. Aynı zamanda fındık şekerleme sanayisinde de kayda değer bir yere sahiptir.

2.2. Kurutma

Kurutma, genel anlamıyla bir maddenin bünyesinde bulunan nemin alınmasını belirtir. Teknik anlamda; bir katının bünyesinde bulunan nemin bir gaz akımı içinde buharlaştırılarak gaza geçirilmek suretiyle alınmasına kurutma denir. Katıdaki su miktarı fazla ise, en basit olarak presleme veya santrifüjleme uygulanabilir. Bu tip bir işleme uygun değilse katı yüzeyine ısı transferi uygulanarak buharlaşma yolu ile kurutma sağlanır. Transfer olan ısı katının gözeneklerindeki nemin buharlaşmasına harcanır. Bu nedenle, kurutma işleminde ısı ve kütle transferi aynı anda gerçekleşmektedir. Isı ve kütle transferinin beraber gerçekleşmesinden ötürü, kurutma prosesi araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Tarım ürünlerinin muhafazası için de kurutma çok önemlidir.

Bir katının kurutulması esnasında iki olay beraber gerçekleşmektedir. Birincisi; kurutucu gazdan katı bünyesindeki buharlaşan sıvıya ısı transferi, ikincisi; katının iç kısımlarından dışa ve buradan da kurutucu gaza doğru sıvı veya buhar olarak kütle transferi. Bu iki olay incelenirken; katı bünyesindeki sıvının katı yüzeyine gelmesi sürecinde oluşan iç difüzyon ve kılcallık gibi iç koşullar ve kurutucu gazın hızı, sıcaklığı ve nemi gibi dış koşullar ele alınır.

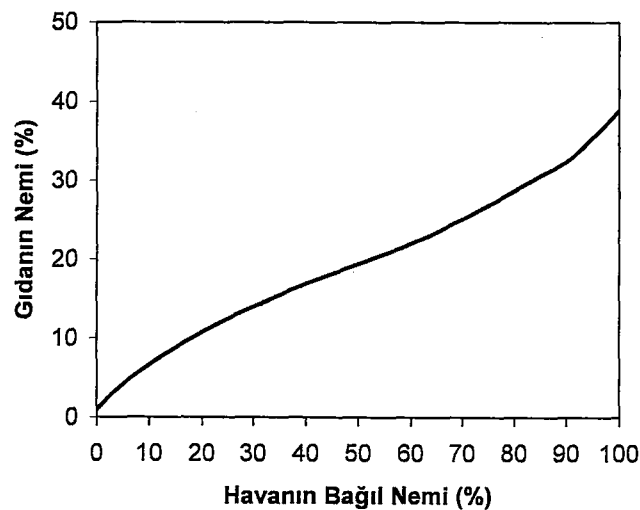
Kurutma olayında etkin olan parametrelerin bir kısmı aşağıda verilmektedir:

- 1) Isı Transferi
 - a) Isıtma ortamından sıvı yüzeyine ısı transferi
 - b) Yapışkan katmanlarda ısı transferi
 - c) Katıdan sıvıya direk ısı transferi
- 2) Kurutma Atmosferi
 - a) Kurutma atmosferi basınç ve sıcaklığı
 - b) Kurutma atmosferinin bileşimi
 - c) Kurutma yüzeyindeki havanın izafi hızı.
- 3) Katı Sıvı Sisteminin Genel Fiziksel Özelliği
 - a) Katı sıvı arasındaki yüzey gerilmesi
 - b) Katı sıvı arasındaki yapışkan film kalınlığı

- c) Gözenekler içinde yüzey alanının sıvı hacmine oranı
- 4) Katıların Özellikleri
 - a) Parçacık boyutu
 - b) Katının Etken alanı
 - c) Katının gözenekliliği vs.

2.2.1. Sorpsiyon izotermi

Bir kap içindeki su buharlaşarak kendisini çevreleyen atmosferle dengeye geldiği gibi, herhangi bir nemli madde de aynı davranışı göstererek, bulunduğu sıcaklıkta kendisini çevreleyen atmosferle nem açısından bir dengeye ulaşır. Belli bir sıcaklık derecesinde, farklı bağıl nem içeren koşullarda tutularak dengeye erişmiş bir gıdanın nem içeriği ile çevre havanın bağıl nemi arasındaki ilişkiyi gösteren grafiklere sorpsiyon izoterm eğrileri adı verilir. Her gıdanın belli koşullarda ulaştığı denge nemi farklıdır. Gıda maddesinin sorpsiyon izoterm eğrisini çizmek ve belirli sıcaklıklarda ulaştığı denge nemi değerini belirlemek üzere; gıda maddesi, bağıl nemi sabit kalabilen kavanozlarda belli sıcaklıkta dengeye erişene kadar tutulur. Bağıl nemi sabit kalabilen kavanoz için de, kavanozun içine değişik tuz çözeltileri konur. Böylece, içindeki atmosferin bağıl neminin sabit kaldığı kavanozlara gıda maddesi yerleştirilip, istenen sıcaklıktaki sorpsiyon izotermi elde edilmiş olur.

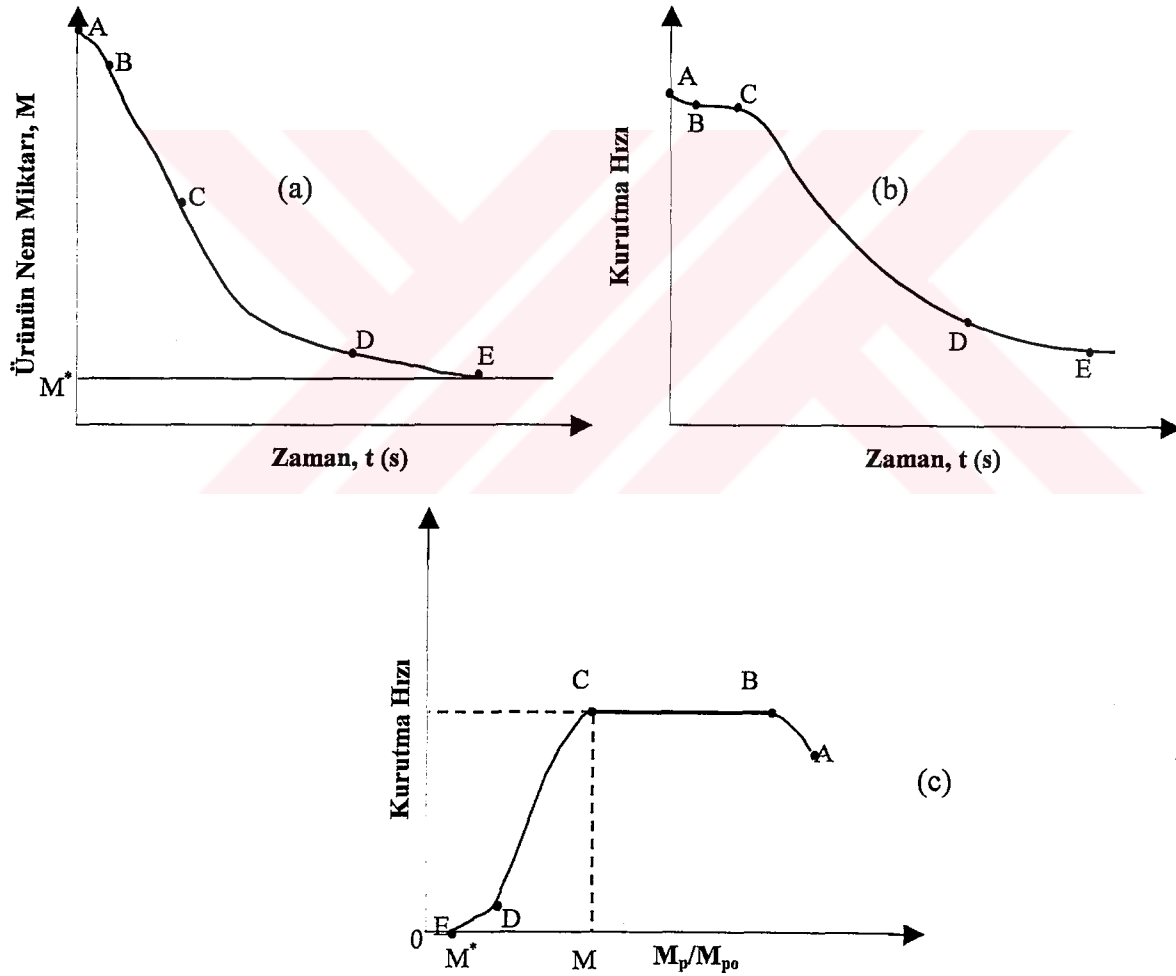


Şekil 2.1. Örnek bir ürün için nem sorpsiyon izotermi

2.2.2. Kurutma hızı

Kurutma işlemi; kurutulacak ürünlerdeki suyu buharlaştırmak ve sonra da bu buharı ortamdan uzaklaştırmaktır. Birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi kurutma hızını tanımlar. Kurutma hızı ürün kalitesi ve enerji ekonomisi açısından önemlidir. Uygun kurutma hızını elde etmek için örnek kurutma çalışmaları yaparak, değişik kurutma eğrilerini elde etmek gerekir.

Kurutma işleminde, kurutulacak ürünün ağırlığı zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenerek (kuru madde baz alınarak) nem içeriği tespit edilir. Aşağıdaki şekil 2.2 de değişim grafikleri görülebilir.



Şekil 2.2.a. Ürün neminin zamana bağlı değişimi, b. Kurutma hızının zamana bağlı değişimi, c. Kurutma hızının nem oranına göre değişimi.

Bu grafikte C noktası kurutulacak olan ürünün özellikleri ile ilgili birçok faktöre bağlı olan kritik nem miktarını gösterir. Yüzeyde ilk kuru noktanın oluştuğu duruma kritik nokta adı verilir. Kritik nokta aynı zamanda, sabit hızda kuruma periyodunun sonunu, azalan hızda kuruma periyodunun başlangıcını gösterir. Şekil 2.2a'da AB bölgesi ürünün ısınma süresini gösterir. BC bölgesinde buharlaşma ürünün yüzeyindeki sıvı filmi tabakasıyla gerçekleşir. Şekil 2.2c'de, kurutma hızı eğrisi çeşitli kuruma periyodlarını verir. Başlangıçta nem, doymuş halde bulunan yüzeyden buharlaştırarak uzaklaştırılır. Kurutma ilerledikçe doymuş halde bulunan yüzey alanı gittikçe azalır. Bundan sonra maddenin iç kısmındaki suyun buharlaşması takip eder. CD bölgesinde ise ürün yüzeyine difüze olan su buharlaşmaktadır. Bu nedenle BC bölgesinde kurutma hızı sabit olmakta, CD bölgesinde ise değişmektedir. DE bölgesi, ürün içindeki suyun dışarı difüzyonunun azaldığı bölgedir.

2.2.2.1. Sabit kurutma hızı periyodu

Sabit hızda kurutma periyodunda, sıcak havadan katı maddeye ısı geçişinde azalma olmamasına rağmen, kurutma prosesi ilerledikçe katı içindeki nem miktarında azalma meydana gelir. Bunun sonucunda, yüzeyin devamlı olarak ıslak kalması daha zorlaşır. Sıvı, katı yüzeyini buharlaşma yolu ile terkeder. Bu esnada kapiler kuvvetler sayesinde katı içerisinden yüzeye nem transferi olur. Bu periyotta kuruma, katı yüzeyden hava akımı içerisine kütle transferi şeklinde olur. Havadan katıya olan ısı transferi, taşınım ile olup, iletim ve ışıyım ihmal edilecek düzeydedir.

2.2.2.2. Azalan kurutma hızı periyodu

Azalan kurutma hızı periyodunda, yüzeydeki ıslak alan sürekli azalır. Bu durumda kurutma hızı, ürünün iç gözenek yapısının ve katının içindeki nemin yüzeye doğru akmasına neden olan kuvvetlerin etkisi altındadır. Burada, hava hızının kurutma hızına etkisi daha azdır, fakat katının iç yapı özellikleri etkindir. Katı maddenin yüzeyindeki ıslak alan azalır, kuru alan arttığından ötürü, yüzeyin yaş hava sıcaklığında kalmaması söz konusudur. Bu nedenle, kurutma hızının hesaplanmasında katının nem dağılımı yanında sıcaklık dağılımının da göz önüne alınması gerekir.

2.2.2.3. Kurutma hızına etki eden faktörler

Kurutulacak ürünün fiziki ve kimyevi yapısı, başlangıç nemi gibi özellikler kuruma hızı üzerinde etkilidir. Kurumanın ilk safhalarında kuruma hızına etki eden en önemli faktörlerden biri, kurutma havasının kuru ve yaş termometre sıcaklıkları arasındaki farktır. Başlangıçta kuruma hızı ile ters orantılı olan yaş termometre sıcaklık farkı sonra da önemini kaybeder ve kurumanın son safhalarında etkisizdir. Hava hızının kuruma hızına etkisi azdır. Hava akımı türbülanslı olduğu müddetçe hava hızının kuruma hızına etkisi önemli miktarda olmamaktadır.

2.3. Akışkan Yatak Sistemleri

Küçük katı taneciklerini, gaz veya sıvı ile temas ettirerek, akışkanların özelliklerine benzer özellikler kazandırma işlemine akışkanlaştırma denir.

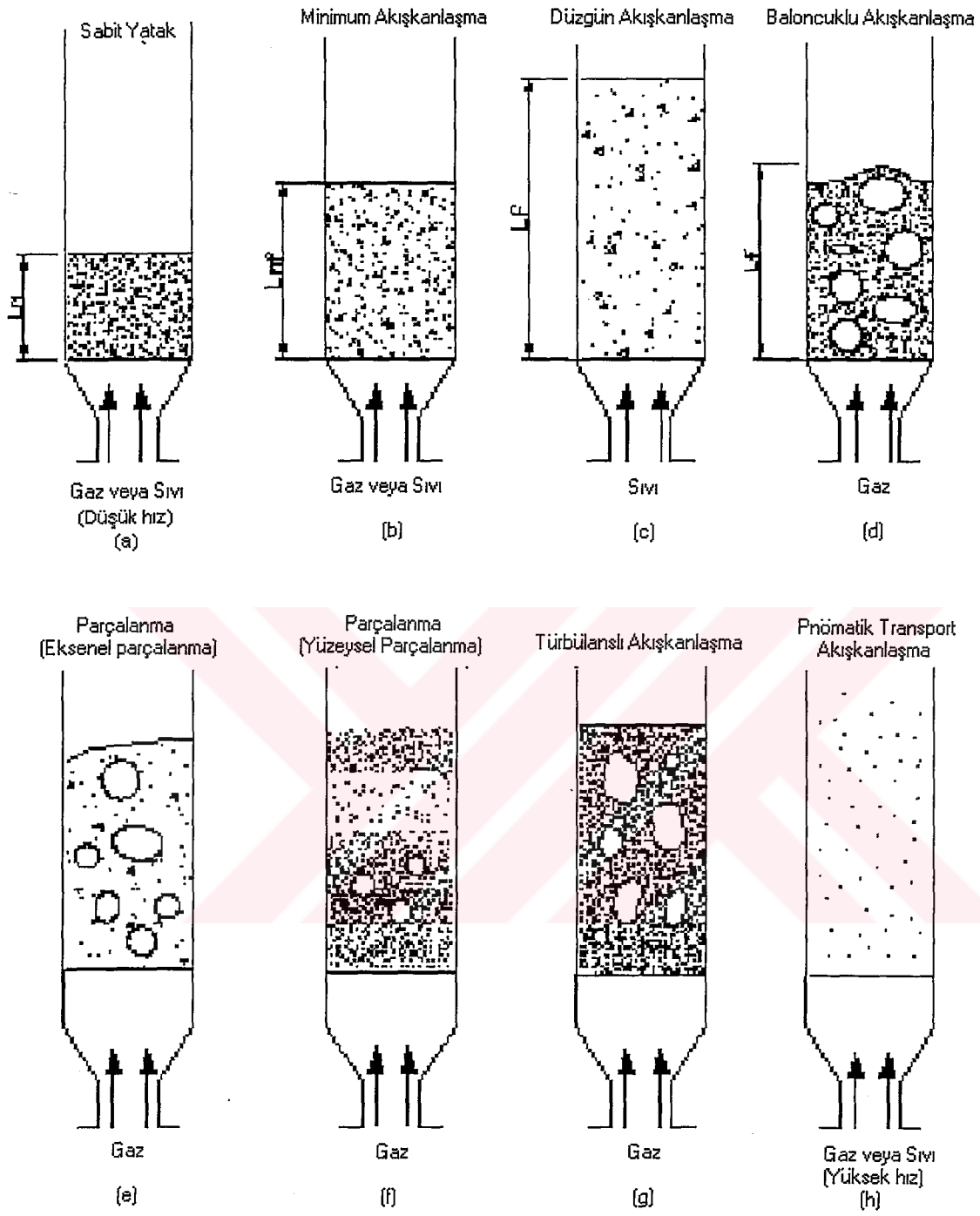
Bir kolonda, delikli olarak yapılmış bir plakanın üzerine doldurulmuş katı taneciklerinin delikli plakanın altından gönderilen gaz veya sıvı ile akışkanlaştırıldığı sisteme akışkan yatak sistemi denir. Kolonun altında bulunan delikli plaka dağıtıcı elek olarak isimlendirilir. Dağıtıcı eleğin delikleri, üzerindeki tanecikleri aşağı geçirmeyecek kadar küçük ve yatağın altından basılacak havanın yukarıya doğru geçişinde büyük bir basınç düşüşüne neden olmayacak kadar da büyüktür.

Yatağın altından basılan havanın debisi yavaş yavaş artırılsa, bu olay süresince yatak boyunca basınç düşüşü hava akış debisi ile logaritmik olarak artacaktır. Başlangıçtaki düşük hava debilerinde, hava, katı tanecikleri arasındaki boşluklardan geçerek yükselir, katı tanecikler içinde bir hareket görülmez. Diğer bir deyişle; yatağı oluşturan katı taneciklerin toplam ağırlığından doğan ve aşağı doğru olan kuvvet, aşağıdan yukarıya doğru basılan havanın sağladığı kuvvete eşit oluncaya kadar sisteme sabit yatak (fixed bed) denir. Bu noktadan sonra gaz hızının artırılması ile katı taneciklerde bir hareketlenme ve titreşim görülür. Yatak ilk akışkanlaştığı anlarda, katı tanecikler gaz molekülleri üzerinde yüzer durumdadır. Bu durumdaki yatak sabit yatağa göre genleşmiş durumdadır. Katı taneciklerinin birbirleri üzerine yüklenmeleri sona erer. Gönderilen gazın taneciklere uyguladığı kaldırma kuvveti,

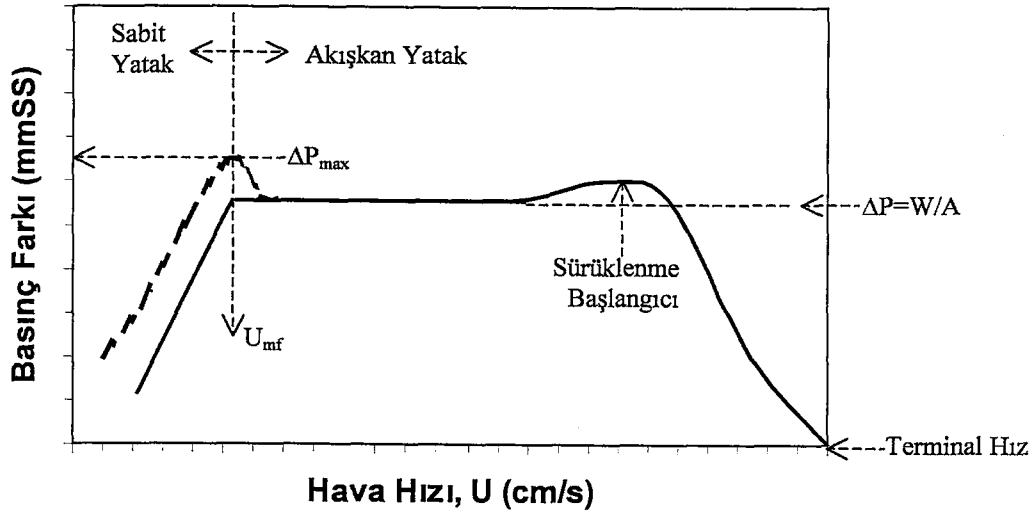
taneciklerin ağırlığına eşit olduğu anda yatak akışkanlaşmaya başlama noktasındadır, buna minimum akışkanlaşma ve bu andaki hıza minimum akışkanlaşma hızı denir. Bu anda, yataktaki basınç düşmesi, yatak ağırlığının yatağın kesit alanına bölümüne eşittir. Gaz hızı minimum akışkanlaşma hızının üzerine çıkarıldığında kabarcıklar oluşmaya ve katı tanecikler kuvvetlice karışmaya başlar, basınç düşüşü biraz azalır ve akışkan hızında artma olduğu halde basınç farkı sabit bir değere varır. Bu esnada yatak kaynayan bir sıvı görünümü alır. Yani, gaz katı karışımı bir akışkan gibi davranmaya başlar. Bu nedenle bu tür bir sisteme akışkan yatak sistemi denir. Akışkan yatak sisteminin değişik formları şekil 2.3’de görülmektedir.

Gaz hızı artırılmaya devam edilirse, önce küçük sonra daha büyük tanecikler yataktan dışarıya taşınırlar. Katı taneciklerin dışarıya taşınmaya başladığı hıza, terminal hız denir. Terminal hız üzerinde yatak, taşıma sistemi olarak kullanılır. Bunun dışında yatak, minimum akışkanlaşma hızı ile terminal hız arasında çalıştırılır. Gaz hızının değiştirilmesi ile meydana gelen basınç farkının değişimi şekil 2.4’de görülmektedir.

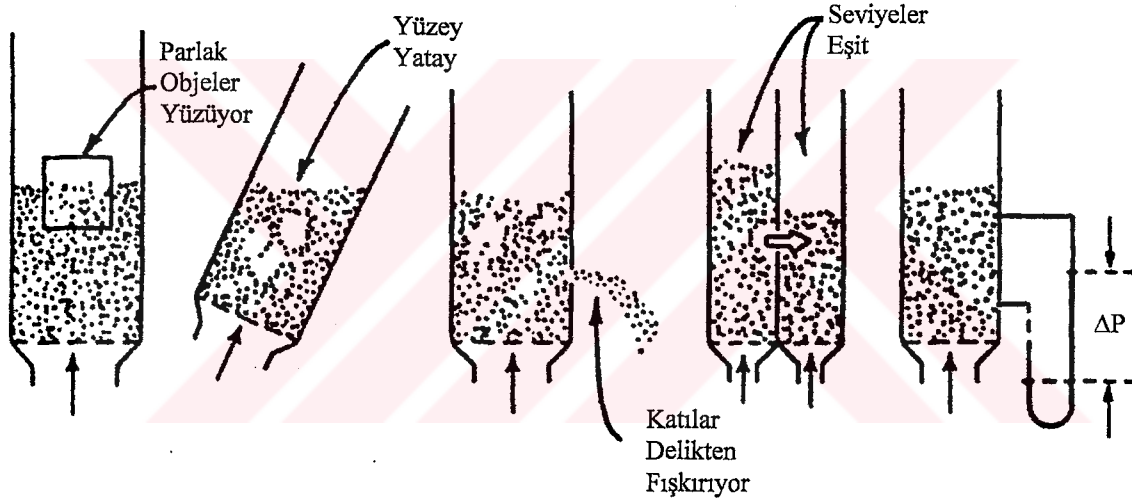
Akışkanlaştırılmış bir yatağın özellikleri aynı bir akışkanın özelliklerini gösterir. Örneğin şekil 2.5’de görüldüğü gibi; yatak bir yöne eğildiğinde yatak içindeki taneciklerin davranışı, yatak yüzeyinin sıvılarda olduğu gibi yatay kalması şeklindedir. Çünkü yatakta tanecikler birbirleriyle sürekli temas halinde olmadıkları için kayma gerilimi kuvvetlerine karşı koyamazlar. Farklı derinlikte iki yatak birleştirildiğinde sıvılar için geçerli olan bileşik kaplar kanununa uygun olarak iki yatağın boyu eşit oluncaya kadar yüksek yataktan düşük yatağa tanecik akışı sürer. Akışkan yatakta herhangi bir noktada delik açıldığında, katı ve gaz fazı, sıvı gibi delikten fışkırır.



Şekil 2.3. Akışkan yatağın değişik formları.



Şekil 2.4. Hava hızı ile yatak basınç farkı arasındaki ilişki.



Şekil 2.5. Akışkan yatağın bir akışkan gibi davranışı.

Bir akışkan yatak sisteminde iki bölge mevcuttur; yoğun bölge ve serbest bölge. Yoğun bölge; Katı taneciklerin ve kabarcıkların birlikte bulunduğu bölgedir. Serbest bölge; Yataktan gazın sürükleyebildiği katı tanecikleri ve gazın kendisinden oluşan bölgedir.

Yoğun bölge eğer iki faz teorisine göre incelenirse, bu bölgede; kabarcık fazı ve emülsiyon fazı vardır. Emülsiyon fazı; Gönderilen gaz hızından bağımsız olarak

minimum akışkanlaşma koşulundadır. Arta kalan gaz kabarcıklar yardımı ile yataktan dışarı taşınır.

İyi akışkanlaşmış bir yatak birçok bakımdan sürekli karıştırmalı bir reaktörü andırır. Herhangi bir katı taneciğin, reaktörün herhangi bir yerinde olma şansı eşittir. Bu da sisteme şu üstünlükleri getirir:

1. Sistemin sıcaklığı her noktada aşağı yukarı aynı tutulabilir.
2. Gaz ve tanecikler arasında temas çok iyi olduğundan ısı ve kütle transferi hızlıdır.
3. Gaz ve katı tanecikleri birlikte akışkan özelliği gösterdiklerinden sistemin fiziksel ve dinamik özellikleri herhangi bir işlem sırasında duyarlı olarak kontrol edilebilir.

Akışkan yatak bu özelliklerinden ötürü kimya endüstrisinde çok önemli yer tutar. Uygulama alanı çok geniştir; taşıma, ısı transferi, adsorpsiyon, kurutma, yüzey kaplama, sınıflandırma, sentez reaksiyonları yürütme, gazlaştırma, kalsinasyon, klinker yapma vb.

Akışkan yatak sisteminin dezavantajları da mevcuttur:

1. Küçük partiküllerin baloncuklu akışkanlaştırılmasında, gaz akımını tanımlamak zordur. Çünkü plug akışından farklılıklar gösterir.
2. Katı partiküllerin hızlıca karışması, reaktörde katı taneciklerin durma sürelerinin üniform olmamasını sağlar.
3. Gevrek katılar gaz tarafından pulvarize edilir, taşınır ve tekrar yerine getirilir.
4. Partikülün sebep olduğu aşınmadan ötürü boruda oluşan erozyon oldukça ciddi boyutlara ulaşabilir.

5. Yüksek sıcaklıklarda katalitik olmayan reaksiyonlar için, küçük partiküllerin yapışmasını ve aglomerasyonunu önlemek için operasyon sıcaklığını ve dolayısıyla reaksiyon oranını düşürmek gerekebilir.



BÖLÜM 3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Akışkan yatak ve bu reaktör kullanılarak yapılan işlemler (kurutma, yanma gibi.) ve bu sistemlerin çeşitli yönlerden incelenmesi hususunda literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların önemli bir bölümü aşağıda kısa deyinmeler ile gösterilmiştir.

Luikov [47], [48], [49] çeşitli tarihlerde yaptığı çalışmalarında, kapiler gözenekli cisimlerde ısı ve kütle transferini incelemiş ve kendi adı ile anılan bir kurutma modeli geliştirmiştir. Ayrıca, gözenekli ortamlarda nem ve sıcaklığın zamana ve kurutulan malzemenin içindeki konumuna bağlı olarak değişimini gösteren denklemler geliştirmiştir.

Vanecek ve arkadaşları [87], laboratuvar ölçülerindeki bir akışkan yatak sisteminde yaptıkları kurutma işlemi sonuçları ile toplam ısı ve kütle dengesini tüm sistem için inceleyerek, sonuçta, akışkan yataklı kurutma sisteminin dizaynı için yeni bir yöntem önermişlerdir.

Gupta [33] ve Mikhailov [52], bireysel çalışmalarında, her ikisi de hareketli buharlaşma cephesi tekniğini kullanarak kurutma probleminin sayısal çözümlerini vermişlerdir.

Pamuk ve Doğu [55] çalışmalarında akışkan yataklar için iki faz modeli geliştirmişler ve bu modelin parametrelerini incelemişlerdir. Parametre olarak; aksel dağılım katsayısı, fazlar arası kütle transfer katsayısı, gaz fazı tarafından doldurulan hacim oranı, toplam gaz akışının gaz fazından geçme oranını kullanmışlardır.

Whitaker [92] çalışmasında, gözenekli yapıda ısı ve kütle transferini incelemiştir. Bu incelemelerde yapıyı iki kısma ayırmıştır: Birincisi; içinde sürekli boşluğu olan sürekli katı yapı, ikincisi; içinde sürekli boşluğu olan süreksiz katı yapıdır.

Hoebink ve Rietema [36,37] akışkan yataklı kurutma ve yoğun, bulut ve baloncuk fazları arasındaki ısı ve kütle transferini açıklayabilecek bir model geliştirmişler ve modellerinde partikülün içinde difüzyon limitasyonunun olmadığını kabul etmişlerdir. Partikül ile gaz arası nem transportunu, sabit oran kurutma periyodunda kullanılan tek bir kütle transferi katsayısı ile açıklamışlardır. Yine aynı grup ikinci modellerinde ilk modellerini geliştirerek partikül içindeki difüzyon limitasyonunu da hesaba katmışlardır. Bu defa sabit kütle katsayısının partiküldeki nem transportunu tam olarak açıklayamayacağı sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, yoğun fazda kütle transferinin hızlı olduğunu ve aynı zamanda katı faz ile gaz arasındaki kütle transferi ile aynı olacağını kabul etmişlerdir.

Daloğlu [19], örnek olarak fındığı alıp, katmanlı kürede ısı transferini incelemiştir. Fındığın katmanlı bir küre özelliğini taşıdığını aradaki katmanın hava olması durumunda taşınım ile ısı transferinin çok küçük olması nedeniyle sadece iletimle ısı transferinin olduğu kabülünü yapmıştır.

Ekinci ve arkadaşları [26] çalışmalarında, yurt dışında ve ülkemizde yapılan akışkan yatakta uçucu madde davranımı konusundaki çalışmaları değerlendirmişler ve bulguların akışkan yatakta yanma ve tasarım açısından önemini incelemişlerdir. Deneylerinde, 1-5mm tanecik büyüklüğünde Çan, Gediz ve Zonguldak kömürlerini kullanmışlar ve bunların 3gr'lık numunelerinin uçucu maddelerinin yanma sürelerini 2 sn ile 14 saniye arasında bulmuşlardır. Sürekli ve kesikli deneylerde uçucu maddenin önemli bir kısmının serbest bölgede yandığı ve buradaki sıcaklık dağılımını önemli ölçüde etkilediği sonucunu bulmuşlardır.

Kemal [44], düşük değerli katı yakıtların akışkan yatakta yakılarak değerlendirilmesi ve hava kirliliğine neden olan SO_2 gazının tutulmasının mümkün olduğu konusunda bir çalışma yapmıştır.

Özkaynak [54], 45cm çapında atmosferik basınçta çalışan bir yatak içinde 800°C'a kadar varan yatak sıcaklıklarında deneyler yapmış, yatakta 1030 mikron çapında kum tanecikleri, minimum akışkanlaşma hızının 10 katına çıkan hızlarda akışkanlaştırmıştır. Çalışmasında deneysel olarak akışkanlaşmış yataklarda ısıtımın önemini araştırmıştır. Sonuç olarak; 1000 mikron üzerindeki tanecikler için 500-1000°C arasındaki sıcaklıklardaki akışkanlaşmış yatakların tasarımında ısıtım ile ısı geçişinin muhakkak dikkate alınması gerektiği sonucuna varmıştır.

Plancz [57], Kunii-Levenspiel modeline benzer üç fazlı bir modeli, sürekli akışkan yatakta kurutma prosesi için kullanmıştır. Baloncuk fazını Plug akışı kabul etmiş ve katı partiküllerin mükemmel karıştığını kabul etmiştir. Proses parametrelerinin katı partiküllerin nem konsantrasyonu üzerindeki etkilerini ele almıştır. Katı partiküller için (lumped) topak modelinin gerçekçi olmayacağını fakat partikül içindeki kütle ve ısı transferini de göz önüne alarak lumped modelinin kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Kanca [40] çalışmasında, fındığın fiziksel ve kimyasal analizlerini yapmıştır. Trabzon yöresinde yetiştirilen tombul ve sivri fındık örneklerinde, randıman, nem, protein, karbonhidrat, ham lif ve yağ tayinlerini yapıp, Fiskobirlik verileri ile karşılaştırarak sonuçların uygunluğunu ifade etmiştir.

Tolay ve arkadaşları [76], literatürde verilen yaklaşımları kullanarak bir paket akışkan yataklı kazan tasarım yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntemi; yakılacak yakıtın özellikleri, akışkanlaşma yöntemi, ısı transferi ve çeşitli kısımların ayrı ayrı tasarımlarına dayandırmışlardır.

Wang ve Fang [89] çalışmalarında, ıslak ve gözenekli ortamda ısı ve kütle transferi ve nem taşıma özelliklerinin belirlenmesi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Ayrıca, ısı ve kütle transferi için bağıntılar vermişlerdir.

Ayken [7] çalışmasında, bir akışkan yatak sistemini kurarak, kesilmiş patatesleri kızartma işlemini gerçekleştirmiştir. Çalışma bünyesinde, akışkanlaştırıcı havanın hızı ve sıcaklığı, işlem zamanı, patates boyutları, patates parçalarına uygulanan ön

işlemler gibi parametrelerin etkilerini gözlemiş ve uygun şartların tespitine çalışmıştır.

Yalçın [93], akışkan yatakta yanma sonucu olan uçucu madde davranışını, Tolay [75], akışkan yatakta ayrışma ve aglomerasyon rejimlerini incelemişler, Eskin [30], akışkan yataklı kömür yakıcısı modeli ve II kanun analizi üzerinde çalışmalar yapmıştır.

Alebregtse [3] akışkan yatakta sabit oran kurutma fazı için kütle transferi ve hidrodinamiği belirleyeceği bir model önermiş ve katı partikülün içindeki ısı ve kütle limitasyonunun olmadığını kabul etmiştir. Akışkanlaşmanın baloncuk fazı, ara gaz fazı ve katı fazdan oluştuğunu ele almıştır. Geçerli yatak yüksekliğinin daha üstünde, kurutma oranının; yatak yüksekliği ve dağıtıcı eleğin yakalama oranının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmıştır. Geliştirdiği modelin iki etkisi olduğunu belirlemiştir: Birincisi; büyük çaptaki partiküller için iki faz teorisinin iyi bir sonuç vermeyeceği, ikincisi; modelde nemli ve kuru partiküllerin farklı davranışta bulunacağı hesaba katılmamıştır.

Selçuk ve Pekyılmaz [62] çalışmalarında, daha önce yayınlanan bir çalışmada ortaya konan bir akışkan yatak yakıcı modelinin sonuçlarının deneysel bulgularla uygun olup olmadığını araştırmışlardır.

Stanisch ve arkadaşları [67] higroskopik gözenekli ortamlar için geliştirdikleri modellerini örnek bir kurutma işlemine uygulayarak teorik ve deneysel sonuçların uyum içinde olduğunu belirlemiştir.

Teoman ve arkadaşları [72] akışkan yatak sistemlerinin bir kısmı olan serbest bölgenin, akışkan yatakta ısı aktarımı açısından nasıl bir öneme sahip olduğunu inceleyen deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Teoman [71] deneysel bir set kurarak, akışkan yataklar ile transfer yüzeyleri arasında ısı aktarımına etki eden faktörlerin neler olduğunu ve nasıl etki ettiğini inceleyen bir çalışma yapmıştır.

Tulunay [79] yaptığı çalışmada, akışkan yatakta yanma sürecini kısaca tanıttıktan sonra endüstri ve yaşam ısıtması için uygulama olanaklarına değinmiştir. Bu iki tür uygulamada akışkan yataklı yanma sürecinde istenenleri belirtip, bunların yerine getirilmesi için denetimden beklenenleri ele almıştır. Denetimde beklenenlerin yerine getirilmesi için denetlenmesi, ölçülmesi ve işlenmesi gereken büyüklükleri ele almış, bunlar arasındaki etkileşimleri incelemiştir. Kısaca süreç modeline değindikten sonra otomatik başlatma, yük izleme, denetim ve otomatik kurutma ve bunlar için gerekli donanım konularına değinmiştir. Olanaklar içinde Türkiye şartlarına uygun öneriler getirmiştir.

Uçkan ve Ülkü [81] kesikli akışkan yatakta mısır kurutmada, hava hızı ve sıcaklığının etkisini incelemişler ve difüzyon teorisine dayalı bir model geliştirmişlerdir. Model ve deneysel verilere dayalı olarak mısırın kuruması için bir ampirik formül önermişlerdir. Kurutma işleminde, gazın hızının kurutma oranı üzerinde bireysel etkisi olmadığını ve mısırın kurumasında prosesin difüzyon kontrollü olduğunu belirlemişlerdir.

Urkan ve arkadaşları [83] yaptıkları çalışmada, akışkanlaşmaya ve endüstrideki uygulamalarına kısa bir giriş yapmışlar, akışkan yatakta yakma sistemlerini tanıtmışlar ve üstünlük ve sakıncalarını özetlemişlerdir. Ayrıca, tipik bir yakma sisteminin temel parçalarını tanıtmışlar ve önemli tasarım parametreleri, ölçeklendirme sonuçları ve genel sorunlar üzerine bir incelemeyi de sunmuşlardır.

Urkan ve arkadaşları [82], akışkan yatakta uçucu madde davranışı ile parçacık boyu, yatak sıcaklığı, oksijen konsantrasyonu ve kömürün nem içeriği arasındaki ilişkilerin incelendiği bir deneysel çalışma ve sonuçlarını anlatan bir bildiri sunmuşlardır.

Urkan ve arkadaşları [84], Türk linyitlerinin değerlendirilmesinde kaçınılmaz yöntem olan akışkan yataklı sistemlerin avantaj ve dezavantajları ve tasarımda dikkat edilmesi gereken parametrelerden dağıtıcı elek ile uçucu madde davranışını çalışmalarında ayrıntılı olarak ele almışlardır.

Vural ve Heperkan [88] akışkan yatak dizaynında önemli rol oynayan dağıtıcı eleğin tasarımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Açıklık oranını kolayca değiştirebilmek için çift katlı elek sistemini denemişler ve değişik açıklık oranlarında bazı katı taneciklerin davranışlarını gözlemişlerdir.

Yalkın [94] ve arkadaşları bazı illerden aldıkları kömür numunelerini değişik sıcaklıklarda, akışkan yatak sistemde yakarak uçucu madde yanma sürelerini tespit etmeye çalışmışlardır. Sonuçta; uçucu madde yanma süresinin hangi parametrelere göre ve nasıl değiştiğini tespit etmişlerdir.

Büyüktür ve arkadaşları [14] Zonguldak ve Soma kömürlerini $04 \times 0.6 \text{ m}^2$ boyutlarında dikdörtgen kesitli bir yanma odasında yakarak ön deneyler yapmışlar. Bu deneylerden faydalanarak 75kW ısı gücünde bir akışkan yatak tesisi tasarımına yönelmişlerdir. Bu defa 40cm iç çapında 75kW ısı gücünde bir akışkan yatak tasarımını gerçekleştirmişler ve deneylerini bu tesiste yapmışlardır.

Puiggali ve arkadaşları [58] fındığın hava ile kurutulmasının kinetiğini inceleyerek bu kinetiği açıklayan bir denklemin geliştirilmesi ve kullanılması için bir çalışma yapmışlar, deney sonuçları ile teoriyi karşılaştırmışlardır.

Schatler ve Kast [61] çalışmalarında higroskopik olmayan cisimleri çeşitli sıvılarla doyurduktan sonra kurutma işlemine tabi tutmuşlar, sonuçtaki deneysel bulgular ile teorik bulguları karşılaştırmışlardır.

Uçkan [80] çalışmasında, akışkan yataklı sistemlerde tanecikle gaz arasındaki ısı ve kütle geçişi karakteristiklerini incelemiş ve ısı, kütle ve momentum geçişi arasındaki benzeşimi ele almıştır.

Dutta ve arkadaşları [25] küresel taneciklerin kurutulması sonucundaki transfer katsayılarını belirlemişlerdir.

Sabır [60] çalışmasında, Türk fındığında kalite bakımından en önemli hususun kurutma olduğunu, ikincisinin ise vurgun olduğunu belirtmiştir. İyi kurutulmamış bir

findık partisinin içine sonradan harman artığı denilen findıkların, yarım kurutma işleminden sonra karıştırılmasının dahi, depolanmasının sonucunda, findıkta çürüme ve tadında bozulmaların olabileceğini belirlemektedir.

Bhagya ve Srinivasan [10] çalışmalarında, findık tozundaki enzim yapısına çeşitli kurutma yöntemlerinin nasıl etki ettiğini incelemişlerdir. Sprey kurutma, vakum raflı kurutma, ve soğuk kurutma gibi yöntemleri kullanmışlar ve aralarındaki farklılıkları karşılaştırmışlardır.

Bıçakcı [11], tasarlamış olduğu havalı Güneş kollektörü ile findık kurutma deney düzeneğini Doğu Karadeniz bölgesi için incelemiş, diğer bölgeler için de geçerli olduğunu iddia etmiştir. Bu düzeneklerinde ısıtıcı olarak kanatlı soğuruculu düzlemsel havalı kollektörler kullanmıştır. Yüksek sıcaklıklarda (250°C) kurutulan findığın tadında bozulmalar olduğunu tespit etmiştir.

Liang ve arkadaşları [46], findığın içinin çıkarılması yani kırılması işleminden önce nasıl kurutulması gerektiğini incelemişlerdir. Deneysel set kurarak, findığın neminin ve sıcaklığının nasıl değiştiğini zamana göre incelemişlerdir. Nemin izlenmesi için bir yöntem önermişlerdir.

Madral [50], akışkan yatakta yanmanın ilk anlarında ayrışma eğilimi ve kömür yapısındaki değişimleri, Katnaş [43], Elbistan linyitlerinin sürekli bir akışkan yatak kurutucuda kurutulmasını deneysel ve teorik olarak incelemiştir.

Moreira ve arkadaşları [53] yaptıkları çalışmada, findık ve bademin kurutulmasında üç adet modeli (tek terimli exponansiyel, the page ve iki terimli exponansiyel) ele alarak, hangisinin deneysel değerlere daha yakın sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. İki terimli exponansiyel modelin daha uygun olduğu ve tavsiye edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Roostaazad ve arkadaşları [59] literatürde mevcut serbest bölge içeren, atmosferik akışkan yatak yakıcıların matematiksel modellenmesi konusundaki çalışmalarını inceleyip, bir literatür çalışması olarak sunmuşlardır.

Şahin ve arkadaşları [69] Orta ve Doğu Karadeniz bölgesinde yetiştirilen fındık çeşitlerinin teknolojik özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak; fındıkların teknolojik yönden kalite etkeni olarak kabul edilen özelliklerinin öncelikle çeşidine, yıla, yöreye, bakıma, yöre ve arazinin eğimine göre az çok farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir.

Abid ve arkadaşları [1], akışkan yatakta mısır kurutma esnasında ısı ve kütle transferi mekanizmasının deneysel ve teorik analizini yapmışlardır. Modellerinde tersinmez termodinamik prensiplerini kullanmışlardır. Modellerinde nem transferinin; sıcaklık gradyan etkisi altındaki termodifüzyon ile nem konsantrasyon gradyanı etkisindeki difüzyon ile sağlandığını hesaba katmışlardır. Sonuçta; gaz hızının ve neminin kurutma oranı üzerinde küçük bir etki gösterdiğini tespit etmişlerdir. Termal gradyan katsayısının analizi sonucunda, suyun termodifüzyon ile transferinin, difüzyona oranla ihmal edilebileceğini belirlemişlerdir.

Basilico ve arkadaşları [8], bir pilot fırın deney seti kurmuşlar ve yüksek sıcaklık ile ağaç kurutarak ağacın kuruma esnasındaki değişimlerini incelemişlerdir. Sıcaklığı 180°C'a kadar ve hızı da 6m/s'nin üstüne kadar çıkarmışlardır.

Baş [9] fındığın gerek kurutma, depolama ve nakliye gerekse işleme sırasında birçok kalite kaybına ve bozulmalara uğramakta olduğunu ifade etmiştir. Bileşimlerinde yüksek oranda (%60-70) yağı içermeleri, fındıkların depolanmasında ve işlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Meydana gelen bozulmalar, diğer yağlı gıda maddelerinde olduğu gibi fındıklarda da büyük çoğunlukla, içerdikleri yüksek orandaki yağlardan meydana gelmektedir. Önemli fındık çeşitlerinin kabuklu ve iç fındık örneklerinin muhafazası üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, en iyi muhafaza koşullarının 1°C sıcaklık ve %50-60 bağıl nem olduğunu tespit etmiştir.

Chandran ve arkadaşları [17], akışkan yatakta katı partikül kurutma kinetiği için, sabit oran periyodunu azalan oran periyodunun takip ettiğini kabul ederek bir model önermişlerdir. Kurutma kinetiği ile bekleme zamanı yoğunluğunu birlikte ele alıp, yataktaki partikülün karıştığını kabul ederek, sürekli akışkan yatağın ürünün

ortalama nem konsantrasyonunu tespit etmeye çalışmışlardır. Tekil ve spiral akışkan yatakta, model ile deneysel sonuçların iyi bir uyum içinde olduğunu belirlemişlerdir.

Karabay [41], fındığın yapay kurutma çalışmalarında, kurutma havasının sıcaklığı, hızı, nemi, birim alana yüklenen ürün miktarı ve yerleştirme şeklinin, fındığın kurumasına olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışma neticesinde vardıkları sonuçlar şunlardır: Fındıklar başlangıç nemine bağlı olmakla birlikte yaklaşık 2-3 günde kurutulabilmektedir. Kuruma şartlarına bağlı olarak yeşil fındığın yapay kurutulması sonucunda fındık tadında istenilmeyen bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Ancak, kademeli ısıtma uygulandığı takdirde bu mahsur giderilmektedir. Dalından toplanmış fındığın kurutma sıcaklığı 40°C'ın üzerine çıkınca fındığın biyolojik yapısında değişimler meydana gelmektedir.

Karataş ve Battalbey [42] yaptıkları çalışmada, fındığın kurutulması esnasında bünyesindeki nemin difüzyonunun hesaplanmasını ele almışlardır. Önce teoriyi inceleyip, sonrasında deneysel set kurarak kurutma esnasında bazı parametrelerin nasıl değiştiğini incelemişlerdir.

Tulunay [78] çalışmasında, akışkan yatakta yanma süresinin tam matematiksel modelinin bulunmasının mümkün olmadığını savunarak, sürecin modelleme, denetim ve donatımını kısaca gözden geçirmiştir. Mevcut, yürütülen bir projeyi tanıtan bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Can [15], belirli bir kurutma koşullarında biyolojik ürünler içinden nem geçişinin kinetiği konusunda bir çalışma yapmıştır. Patates, elma, ekmek mayası, yumurta akı gibi biyolojik ürünlerden nem geçişinin nasıl olduğunu hem deneysel hem de teorik olarak incelemiştir.

Dinçer [23], küresel şekilli ürünlerin merkez ile yüzey arasında orta nokta ve yüzey kısımları için deneysel ve teorik boyutsuz sıcaklık dağılımlarını ele almıştır. Elde ettiği deneysel ve teorik sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum olduğunu belirlemiştir.

Dinçer ve Erdallı [24] kurutma ile ilgili temel kavramları incelemişler, gıda maddesinin kurutulması sırasındaki ısı ve kütle transferinin analizi için detaylı formülasyon vermişlerdir. Çeşitli kurutma tiplerini de tanıtmışlardır.

Stakic ve Milojevic [66] akışkan yatakta kurutmada ısı ve kütle transferinin bir nümerik simülasyonunu yapmışlar ve diferansiyel denklemleri ayırt etmek için kontrol hacim metodunu kullanmışlardır. İki faz teorisini akışkan yatak hidrodinamiği için kullanmışlar ve partikülde kütle transferi için kurutma kinetiğinde bilinen denklemleri kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar ile model arasında uyum olduğunu belirlemişlerdir.

Thomas ve Varma [74], kesikli ve sürekli akışkan yatakta değişik sıcaklık, hava debisi ve farklı partikül çapı ve kütlelerini ele alarak taneli gıda maddelerini kurutmuşlardır. Deneysel verilerle kıyaslamak üzere kurutma modelinde büzülen partikül modelini kullanmışlardır. Partiküllerin ideal karıştığını kabul etmişler ve kesikli akışkan yatağa göre sürekli akışkan yatağın performansının nasıl olduğunu tespit etmişlerdir.

Francis ve Wepfer [31] çalışmalarında halı kurutmasında kuruma karakteristiklerinin deneysel ve nümerik olarak analizini yapmışlardır. Kütle transfer modelleri geliştirerek nümerik ve deneysel analizini, sabit oran ve azalan oran kurutma periyodlarında yapmışlardır.

Wang [91] çalışmasında, bir sabit yatak kurutucuda kurutma prosesini matematiksel olarak modellemeye çalışmıştır. Isı ve kütle transferi denklemlerini kullanarak modellemeye geçmiştir. Gelişen denklemleri nümerik olarak çözmeye çalışmıştır.

Akşahin ve arkadaşları [2] çalışmalarında, akışkan yataklı katalitik reaktörlerin dinamik davranışlarının moment tekniği yardımıyla incelenmesi ile yüzeyde tutunma ve sıcaklığın kabarcık ve emülsiyon fazları arasındaki gaz transfer hızlarına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, 0.074m çaplı bir akışkan yatakta metan, etan ve propan gazlarının kalış zaman eğrilerini CBZ-2 tipi FCC katalizörü kullanarak değişik sıcaklık ve hava hızlarında elde etmişlerdir. Sonuçta; durgun emülsiyon faz

varsayımıyla basitleştirilen modellerin, akışkan yataklı katalitik reaktörlerin dinamik davranışlarını diğer karmaşık modeller kadar iyi ifade edebildiğini bulmuşlardır.

Ayhan ve arkadaşları [6], fındığın Güneş enerjisinden yararlanılarak kurutma teknolojisinin geliştirilmesi konusunda bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, ince ve kalın serginin kurutmaya etkisini araştırmışlardır. Güneş enerjisi destekli ve enerji depolu ısı pompası sisteminin yaz mevsimlerinde fındık kurutma için uygun olduğunu; ince serginin kalın sergiye oranla daha iyi kurutma sağladığını ve düşük kurutma hızlarının olumsuz etkilerini belirlemişlerdir. Matematiksel model geliştirerek fındık difüzyon katsayısını tespit etmişlerdir.

Bilge [12] çalışmasında, vitrifiye malzeme üreten bir seramik fabrikasında, dökümde kullanılan alçının ve alçı içinden çıkan yarı mamülün sağlıklı kurutulması için geliştirilen model ile kurutma prosesi sonucunda elde edilen deneysel sonuçların mukayesesini yapmıştır.

Eroğlu ve Turgut [28], gaz ve sıvının birlikte aşağı doğru aktığı dolgulu bir reaktörde, gaz (hava) ve sıvının (su) akış hızlarını değiştirerek farklı akış rejimlerini gözlemişler. Yaptıkları deneylerde, basınç değişikliklerini basınç transdüzeri veya ısıl iletkenlik dedektörü ile kaydederek, bu bölge için sızıntılı akış ile vurulu akış arasında yeni bir geçiş sınırı bulmuşlardır.

Srinivasa ve arkadaşları [64] baloncuk, gaz ve katı faz arasındaki ısı ve kütle transferini ele alarak, akışkan yatakta kurutma için bir model sunmuşlardır. Difüzyon denklemlerini analitik yöntemle çözerek partikülün içindeki nem dağılımını belirlemeye çalışmışlar, bu arada gaz ile dengede olan katı partiküllerin üniform sıcaklığa sahip olduklarını kabul etmişlerdir. Değişik deney şartlarında çalışmışlar ve deneysel değerlerle model arasında iyi bir yaklaşma ortaya çıkarmışlardır. Sabit oran periyodunda ısı transferinin kontrol mekanizması olduğunu, partikülden nem transferini azalan oran periyodunun kontrol ettiğini söylemişlerdir.

Suyadal ve arkadaşları [68] akışkan yatak reaktör deney setinde, fosfojipsin bütümlü şist ile birlikte termal bozunmasını ele almışlardır.

Srinivasa ve arkadaşları [65] akışkan yatakta sabit oran ve azalan oran kurutmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Kesikli ve değişik tipteki sürekli akışkan yatakları karşılaştırmışlardır. Spiral akışkan yatağın tek aşamalı sürekli yataktan ve çok aşamalı yatağın kesikli yataktan avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Ünal ve Daloğlu [85], küresel şekilli kompozit sistemlerde ısı transferinde, geçici rejimde bir boyutlu ısı iletim probleminin analitik ve nümerik çözümlerini elde etmişler ve bu sonuçlarla, fındık üzerinde yapılan çalışmaların uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Zahed ve arkadaşları [96] akışkan yatakta kurutma için bir model sunmuşlar ve bu modeli kurarken, partiküllerin içinde nem transportunun olduğunu, gaz ile partikül arası kütle transferinin yoğun fazda gerçekleştiğini, gaz baloncukları ile yoğun faz arasında ara faz geçiş dengesinin iyi olduğunu kabul etmişlerdir. Farklı kurutma şartlarında, partikül nem konsantrasyonu ve yatak sıcaklığını tespit etmişlerdir. Fakat deneysel çalışma yapmamışlar aynı zamanda sonuçları, literatürde mevcut deney sonuçları ile kıyaslamamışlardır.

Alvarez ve Shene [4] sabit oran periyodunda, kurutma datalarını kullanarak ısı transfer katsayısını tespit etmek üzere bir yöntem sunmuşlardır. Buldukları ısı transfer katsayısı, literatürdekilerden oldukça küçüktür.

Ciesielczyk [18], Kunii-Levenspiel baloncuk modelini kullanarak, akışkan yatakta kurutmada sabit oran periyodundaki ısı ve kütle transferi ara yüzey katsayısını hesaplamışlardır.

Demirtaş [20] çalışmasında, dalından toplanmış, nem oranı yüksek fındığın kurutulması için kurutma şartlarının belirlenmesini ele almıştır. Fındığın kurumasına etki eden faktörlerin belirlenmesi ile optimum kuruma şartının elde edilmesini amaçlamıştır. Çalışma kapsamında, kurutma havasının sıcaklığı, nemi, hızı ve sergi kalınlığının, denge neminin ve fındığın geometrik şeklinin fındığın kurutulmasındaki etkinliğini incelemiştir. Bu amaçla bir deney düzeneği kurmuştur. Kurutma havasının

şartlandırılmasında en önemli kriterler olan havanın yaş ve kuru termometre sıcaklığı, özgül nemi ve hava hızının ölçümlerini dikkate alarak deney düzeneğini dizayn etmiştir. Çalışmalarını, kurutma havasının dört farklı bağıl neminde, beş farklı sıcaklığında ve üç farklı hızlarında yapmıştır. Sonuçta, tumbul findığın içindeki sıcaklık dağılımı, ısı iletim katsayısı, ısı taşınım katsayısı ve sıcaklığa bağlı olarak difüzyon katsayısını belirlemiştir.

Dimattia ve arkadaşları [21] kırmızı biber taneciklerini kesikli akışkan yatakta kurutarak, yatak yüksekliğinin, gaz hızının, giriş nem konsantrasyonunun ve hava sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Nem hareketinin difüzyon kontrollü olduğunu ve yapışma etkisinin az olduğunu tespit etmişlerdir. Karışma oranının yüksek olmasından dolayı, yataktaki sıcaklık dağılımının üniform olduğunu tespit etmişlerdir. Diğer kurutma sistemlerine göre bu sistemde kurutma süresinin düştüğünü ortaya koymuşlardır.

Kalafatoğlu ve arkadaşları [39], akışkan yatakta kesikli hava ile kuruttukları boraks pentahidratın kuruma özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır.

Bucak ve arkadaşları [13], sirkülasyonlu akışkan yataklı kazanda ısı transferini incelemek üzere, 155mm çapında 6.5m yüksekliğinde bir pilot sirkülasyonlu akışkan yatak sistemi tüm yardımcı ekipmanlarıyla birlikte tasarımını yaparak kurmuşlar ve 0.9-2.38mm boyutundaki Seyitömer linyiti kullanarak çalıştırmışlardır. Isı transferini incelemişler ve deneysel bulguların teori ile uyumunu da belirlemeye çalışmışlardır.

Can ve arkadaşları [16], Güneş enerjisi ile ısıtılan havayı kullanarak kabak çekirdeklerini kurutmuşlar ve kabak çekirdeğinin nem transportunun kinetiğini incelemişlerdir. Sonuçta efektif nem transport katsayılarını belirlemişlerdir.

Dimattia ve arkadaşları [22] akışkan yatakta Group D partiküllerinin yapışma karakteristiklerini incelemişlerdir. Farklı yatak yüksekliklerinde basınç dalgalanmalarını ölçmüşler. Bu dalgalanmaların analizi sonucu, yapışma hızı ve frekansını tespit edecek korelasyonlar elde etmişlerdir. Daha önceki yapılmış korelasyonların büyük partiküller için yeterli olmadığını ve partikül şeklinin önemli

rol oynadığını belirlemişlerdir. Büyük partiküllerde yapışmayı önlemek için yüksek debide havaya ihtiyaç olduğunu tespit etmişlerdir.

Ersoy ve arkadaşları [29], ikincil hava giriqli ve sirkülasyonlu bir akışkan yatakta, partiküllerin askıda tutulmasını ve partikül hızının ölçülmesini incelemişlerdir.

Grabowski ve arkadaşları [32] mayanın laboratuvar boyutlarındaki akışkan yatakta ve püskürtmeli yatakta kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Püskürtmeli yatağın akışkan yatağa göre %25 daha fazla havaya ihtiyacı olduğunu belirlemişlerdir. Aynı zamanda akışkanlaşma, püskürtme davranışları, kurutma kinetiğı ve hesaplamalar açısından püskürtmeli yatağın veya akışkan yatak ile püskürtmeli yatak kombinasyonunun yalnız akışkan yaktan daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Jumah ve arkadaşları [38], dönen jet püskürtmeli yatakta, partikülün ortalama nem konsantrasyonu üzerine farklı aralıklı prosesin etkileri üzerine çalışmışlardır. Isıya duyarlı partiküllerin aralıklı kurutulmasından, kalite ve önemli miktarlarda enerji avantajının elde edilebileceğini belirlemişlerdir.

Kiranoudis ve arkadaşları [45], verilen ürün kapasitesine göre akışkan yatak ve döner kurutucuların her birinin toplam maliyetini optimize edecek bir yöntem geliştirmişlerdir. Her iki kurutucu için konvektif kurutma prosesini belirleyen basit bir matematiksel model kullanmışlardır. Dizayn yapısı incelendiğinde, döner kurutucu, akışkan yatak kurutucuya göre oldukça pahalı olmaktadır. Gıda ürünlerini ve inorganik maddeleri deneylerinde kullanmışlardır.

Soponronnarit ve arkadaşları [63] küçük bir akışkan yatakta mısırın kuruma karakteristiklerini araştırmışlardır. Yatağın termal verimini artırmak üzere çıkan havanın bir kısmını yeniden yatağa göndermişlerdir. Deneysel sonuçlar ile korelasyon yapmak için birçok ampirik ince tabaka kurutma denklemlerini denemişler ve Wang ve Singh [90] denkleminin iyi sonuç verdiği kanaatine varmışlardır.

Tanyıldızı ve İnallı [70] yaptıkları deneysel çalışmada Güneş enerjisi ile ısıtılan havayı kullanarak ot kurutulmasını ele almışlardır. Güneş enerjisi dolaylı kullanıldığından ottaki kayıpların minimuma indiğini ifade etmişlerdir.

Theologos ve arkadaşları [73], iki faz teorisine dayalı ve katı ve gaz fazını kütle, momentum ve enerji korunumunu tanımlayan tüm kısmi diferansiyel denklemleri içeren bir model geliştirmişlerdir. Bununla beraber, katının içindeki kütle ve ısı transferi için gereken kısmi diferansiyel denklemleri kullanmamışlardır. Bunun yerine Maroulis ve arkadaşlarının [51] kurutma kinetiği modelini kullanmışlardır. Kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için ve gaz ve katı faz arasındaki sıcaklık dağılımını, yatak boşluk oranını, basınç düşüşünü ve hava ile partikülün nemini hesaplamak üzere Phoenix yazılımını kullanmışlardır.

Topal ve Durmaz [77], endüstriyel ölçekli, 3.5 MW kapasiteli atmosferik basınçlı akışkan yataklı bir buhar kazanında emisyon kontrolü ve enerji optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Yakıt olarak Çankırı bölgesi Orta linyiti ve absorbat malzeme olarak mermer tozu ve Bolu Göynük bölgesi kireçtaşı kullanmışlardır. Daha sonra yeni bir absorbant malzeme kullanımına karar vermişlerdir.

Van Ballegooijen ve arkadaşları [86], difüzyon limitasyonu davranışında olan materyalin akışkan yatakta kurutulmasını belirlemek üzere nümerik bir model geliştirmişlerdir. Model ile silical jel partikül deney sonuçlarını kıyasladıklarında büyük farklılık gözlemişler ve bu farklılığın silica jel difüzyon katsayısının yanlışlığından kaynaklandığını belirlemişlerdir. Önerdikleri difüzyon katsayısı ile deney sonuçlarına yakın neticeler almışlardır.

Erbil [27] çalışmasında, 0.30-0.45mm büyüklükteki tanecikler için taşkın yataklı sistemin fiske yüksekliğinin hesaplanması üzerine bir bağıntı geliştirmiştir.

Hajidavalloo [34] yaptığı doktora çalışmasında, tanecikli materyalin akışkan yatakta kurutma prosesindeki karakteristikleri incelemiştir. Deneysel ve teorik çalışma yapmıştır. Deneysel çalışma, laboratuvar boyutlarında bir akışkan yatak sisteminde gerçekleştirilmiş ve dağıtıcı eleğin havayı sirküle etmesiyle ortaya çıkan değişiklikler

ve partikülün girişteki nem konsantrasyonunun akışkan yatağın hidrodinamiğine etkisinin nasıl olacağını incelemiştir. Teorik kısmında, akışkan yatakta ısı ve kütle transferini simüle edecek bir matematiksel model geliştirilmiş ve düzeltme parametresi olmayan lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Çözüm sonucu, geliştirilen model ile deneysel veriler arasında oldukça iyi bir uyum gözlenmiştir. Bu modelin püskürtmeli ve hareketsiz yatakta bile kullanılabileceği tespit edilmiştir. Akışkan yatakta kurutma prosesinde her bir karakteristiğin, hava hızı, partikül çapı vs. nasıl bir etkinlik gösterdiğini tespit etmiş, ayrıca, akışkan yatağın termal etkinliğinin nasıl artırılabilceği üzerinde çalışmalar yapmıştır.

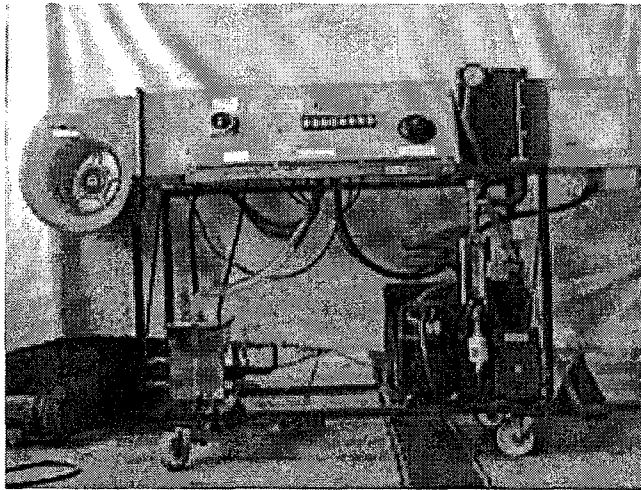
Hajidavalloo ve Hamdullahpur [35] akışkan yataklı kurutma sisteminin hidrodinamik ve termal analizini yapmışlardır. Akışkan yataklı kurutma sisteminin deneysel setini kurmuşlar ve geliştirdikleri üç fazlı matematiksel model ile deneysel sonuçları karşılaştırarak iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalarında üç fazlı modelin iki fazlı modellere nazaran daha gerçekçi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

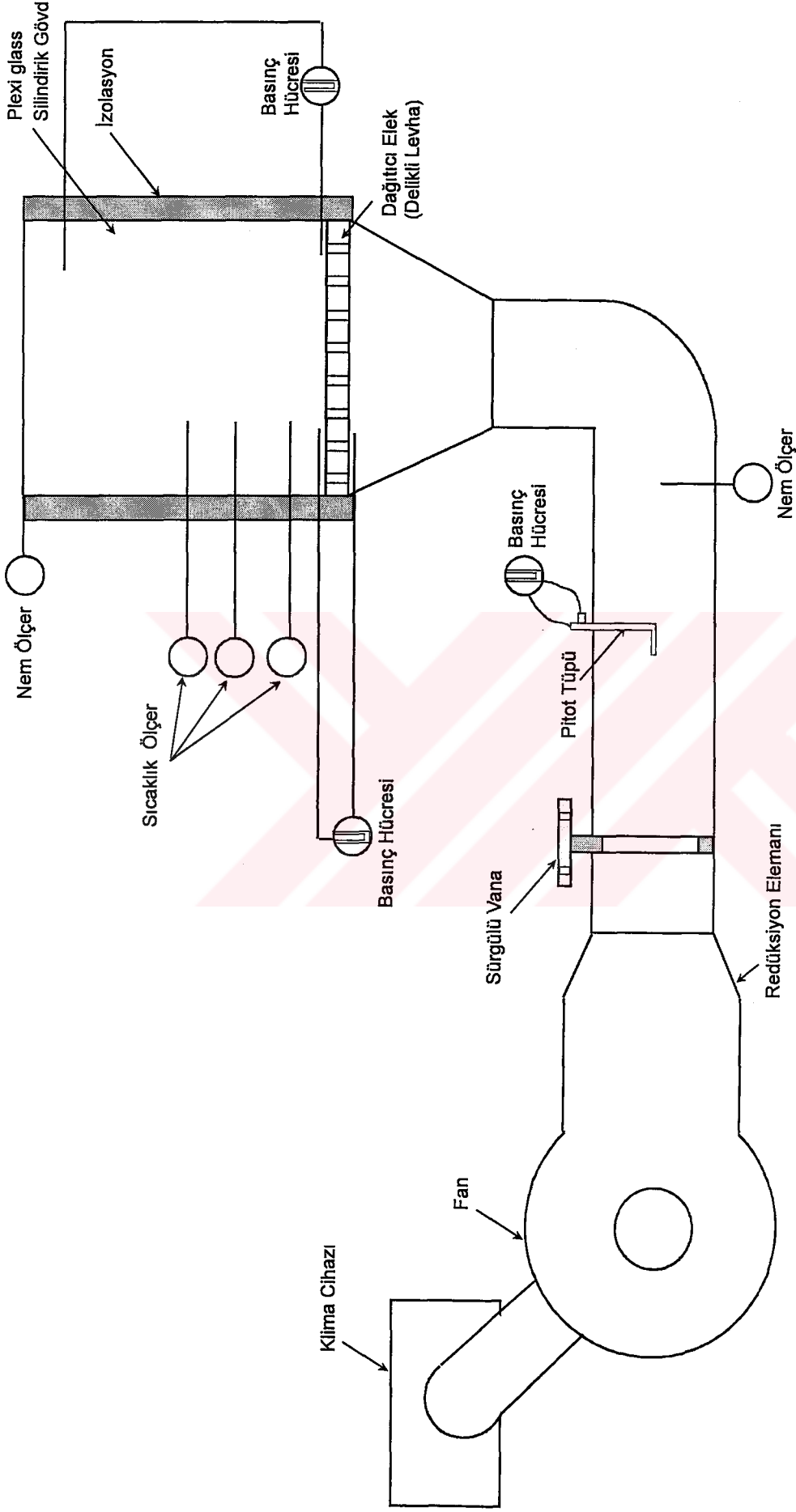
4.1. Deney Setinin Kurulması

Akışkan yatakta fındık kurutulmasının araştırılması için laboratuvar ölçülerinde bir deney seti kurulmuştur. Bu setin şematik resmi şekil 4.1’de görülmektedir. Set; bir adet klima cihazı, fan, frekans invertörü, sürgülü vana, hava borusu, dağıtıcı elek, plexi glass maddeden gövde, 3 adet sıcaklık ölçer, 2 adet hem sıcaklık hem de nem ölçer, bir adet pitot tüpü, 3 adet basınç farkı ölçer ve diğer bağlama ve izolasyon malzemelerinden oluşmaktadır. Bu parçaların her biri şekilleriyle beraber aşağıda açıklanacaktır.

Klima Cihazı: Akışkan yataktaki havanın ısıtılması için P.A.Hilton Ltd. tarafından üretilerek İngiliz kredisıyla Türkiye’ye getirilen hava şartlandırma ünitesi (Air Conditioning Laboratory Unit) yani; klima cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 2 adet 500 Watt ve 2 adet 1000W olmak üzere toplam 3kW ısıtma gücüne sahiptir. Fakat deney esnasında kullanılan havanın debisi yüksek olduğu için ısıtma gücünün yeterli olmadığı durumlarda cihazın emiş ağzına ek bir ısıtıcı konmuştur. Cihazın resmi şekil 4.2’de görülmektedir.

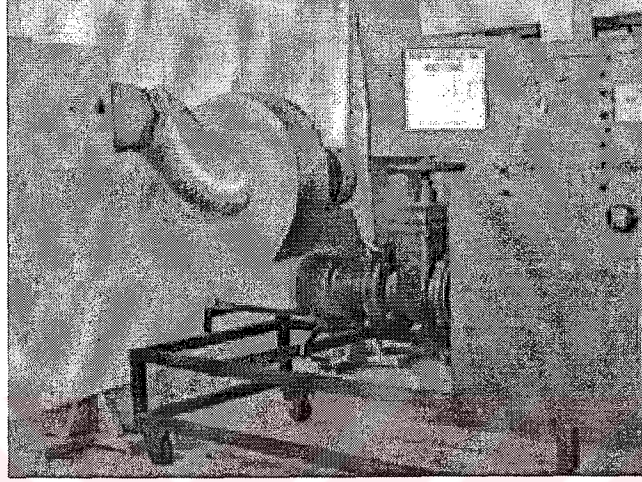


Şekil 4.2. Klima cihazının resmi



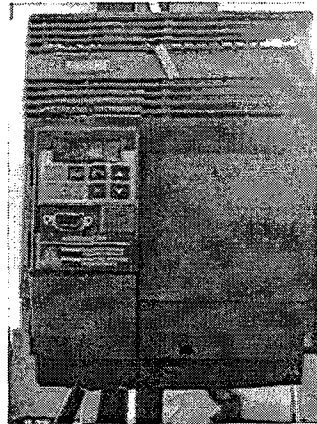
Şekil 4.1. Akışkan yataкта kurutma deney setinin şematik resmi

Fan: Klima cihazında ısıtılan havanın akışkan yatağa basılması için bir santrifüj fan kullanılmıştır. Fanın giriş ağzı çapı 150mm ve çıkış ağzı ise 110x130mm kare kesittir. Fanı çeviren elektrik motorunun gücü 1.5 kWatt'tır. Motorun devrini ayarlamak üzere inverter kullanılmıştır. Şekil 4.3'de fanın ve sürgülü vananın resmi görülmektedir.



Şekil 4.3. Fan ve sürgülü vana

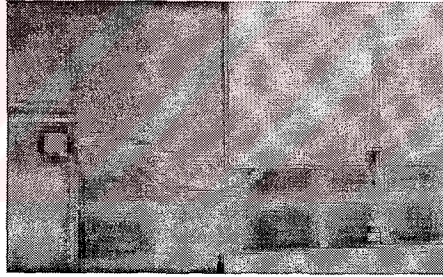
Frekans İnvörtörü: Fan motorunun devrini ayarlamak üzere Siemens Micromaster serisinden 7.5kW gücünde frekans invertörü kullanılmıştır. Bu sürücü 380V AC gerilim ile beslenir. Çalışma esnasında motorun çalışma akımı, gerilimi, frekansı, deviri, momentini gibi çeşitli değerlerin anında okunması imkanını sağlayan dijital ekrana sahip olan inverter aynı zamanda analog değer olarak da bu bilgileri vermektedir (4-20mA). Şekil 4.4' de invertör görülmektedir.



Şekil 4.4. Frekans invertörü

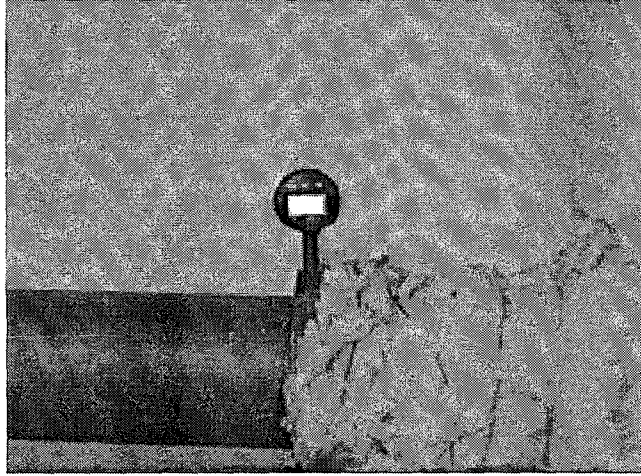
Fanın hemen çıkışında hava 100mm çapında boruda akmaktadır. Bu boru ise diğer ucunda dirsek ve genişleme aparatına bağlıdır. Kesit genişledikten sonra hava önce üzerinde 15mm'lik delikleri bulunan dağıtıcı elekten geçerek 19.6mm iç çapa sahip Plexi Glass malzemeden üretilen akışkan yatak gövdeye girer. Buradan da hava yatağı terk eder. Fanın çıkışındaki boru 1.5m uzunluğundadır. Bu borunun üzerine yatağa giren havanın debisini ve hızını belirlemek üzere Pitot tüpü ve giriş sıcaklığı ve nemini belirlemek üzere de sıcaklık ve nem ölçer yerleştirilmiştir.

Pitot tüpü: Basma borusu üzerinde ortama girecek olan havanın debisini ve hızını belirlemek için pitot tüpü kullanılmıştır. Pitot tüpü 300mm uzunluğunda, 4 mm çapındadır ve paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Bu aparat Testo adlı Alman firmasının Türkiye temsilcisinden alınmıştır. Bu tüpün çıkışı da basınç farkı ölçen basınç hücresine bağlanmıştır. Böylece sistemden geçen havanın hızı ve dolayısıyla debisi hesaplanabilmektedir. Şekil 4.5'de pitot tüpü ve basınç hücresi görülebilir. Basınç hücresi ilerde tanıtılacaktır.



Şekil 4.5. Pitot tüpü ve basınç hücresi

Sıcaklık ve nem ölçer: Havanın akışkan yatağa girmeden önceki sıcaklığı ve nemini belirlemek üzere hemen girişe ve çıkıştaki değerlerini belirlemek için de yatağın çıkışına sıcaklık ve nem ölçerler bağlanmıştır. Bunlar direk olarak dahil olduğu ortamın sıcaklık ve nemini dijital ekranında gösterirler. Testo 605-H1 tipi sıcaklık ve nem ölçerler, 12mm çapında ve 125mm uzunluğundadırlar. Sıcaklık aralığı 0-50°C ve bağıl nem aralığı %5-%95 arasındadır. Hassasiyetleri ise; %0.1 nem ve %0.1°C'dır. Şekil 4.6'da yatak girişine bağlı olan sıcaklık ve nem ölçer gösterilmiştir.



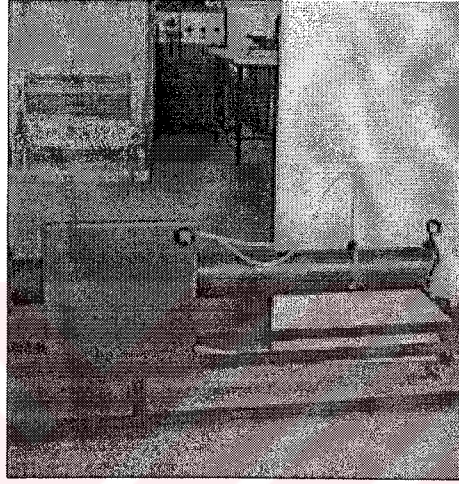
Şekil 4.6. Yatağın girişindeki sıcaklık ve nem ölçer

Yatak girişindeki sıcaklık ve nem ölçerden itibaren yatağın gövdesi tamamen izolasyon malzemesiyle kaplanmıştır. Yatağın belirli bir yerinden gözlemleme amacıyla izolasyon malzemesi açılarak küçük bir pencere oluşturulmuştur. Şekil 4.7 ve şekil 4.8 'de sırasıyla fan çıkışı ile akışkan yatak gövdesi arası ve akışkan yatak gövdesi gösterilmiştir. Yatağın gövdesi dağıtıcı elekten sonra 80cm uzunluğunda plexi glass malzemeden yapılmıştır. Dağıtıcı elek çelik saçtan meydana gelmektedir ve içinde 15mm'lik delikler mevcuttur. Delikler dairesel formda açılmıştır. Yatağın gövdesinde; dağıtıcı eleğin alt ve üstündeki ve dağıtıcı eleğin hemen üstü ile akışkanlaşmadan sonraki yükseklik arası basınç farklarını, diğer bir deyişle; yatak ve dağıtıcı elek basınç farklarını elde etmek üzere bu noktalara basınç hücreleri bağlanmıştır. Ayrıca akışkan yatağın 4, 8 ve 12 cm yüksekliklerinde sıcaklık dağılımını belirlemek üzere sıcaklık ölçerler ortama dahil edilmiştir.

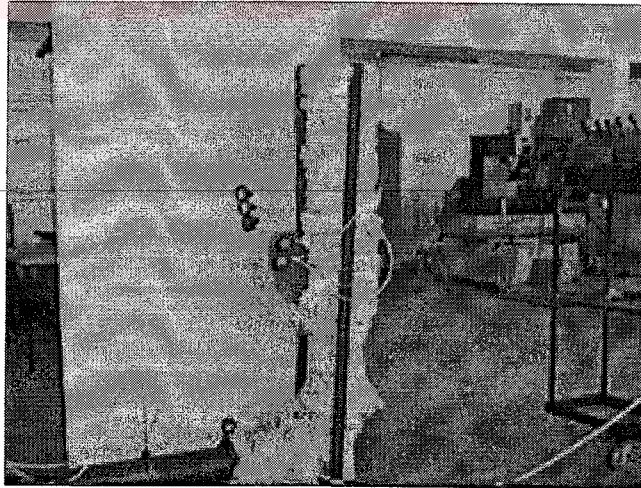
Basınç hücreleri: Pitot tüpündeki toplam ve statik basınç farkını ve ayrıca akışkan yataktaki yatak ve dağıtıcı elek basınç düşümünü belirlemek için Testo 505-P1 tipi basınç hücreleri kullanılmıştır. Bu basınç hücreleri iki girişi arasındaki basınç farkını mmSS veya mmHg olarak direk dijital ekranda görme imkanı sağlar. Hücrelerin ölçüm aralığı 0-1300mmSS veya 0-100mmHg arasında hassasiyeti ise, 1mmSS veya 0.1mmHg'dir. Şekil 4.9'da basınç hücreleri altta ve sıcaklık ölçerler üstte olmak üzere görülebilir.

Sıcaklık ölçerler: Akışkan yatağın 4, 8, 12. cm'lerindeki sıcaklıkları okumak için Testo 905-T1 tipi sıcaklık ölçerler kullanılmıştır. Bunlar 3mm çapında ve 200mm uzunluğundadır. K tipi termočifte sahiptir ve sıcaklığı direk dijital ekranda göstermektedir: Ölçüm aralığı $-50+350^{\circ}\text{C}$ arasında ve hassasiyeti ise 0.1°C 'dır. Sıcaklık ölçerler şekil 4.9'da üstte görölmektedir.

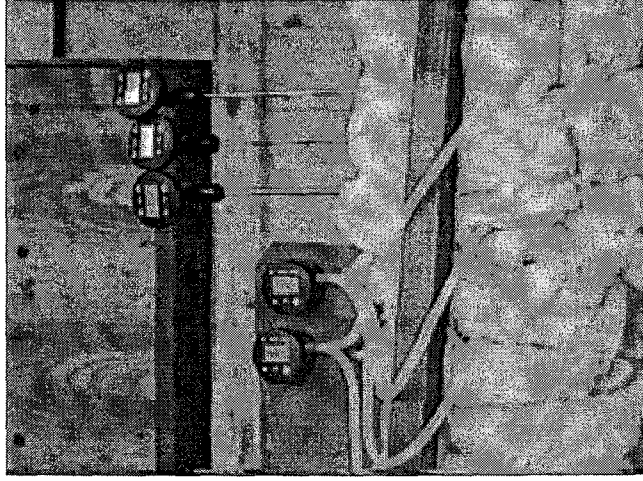
Tüm Testo'dan alınan ölçüm cihazları ISO kalibrasyon sertifikasına sahiptir.



Şekil 4.7. Fan ve vana çıkışından sonra basma hattı



Şekil 4.8. Akışkan yatağın gövdesi



Şekil 4.9. Yatak gövdesindeki sıcaklık (üstte) ve basınç ölçerler (altta)

4.2. Deneylerin Yapılması

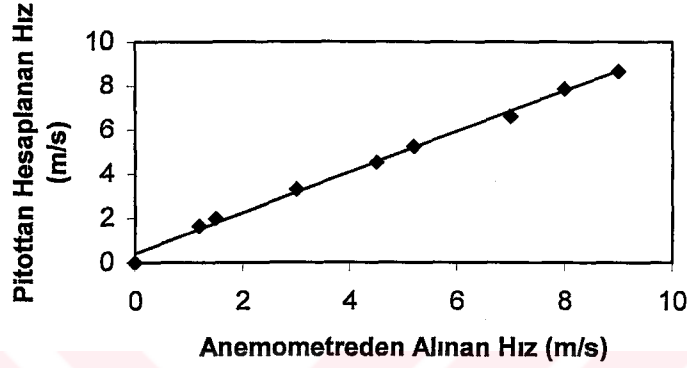
Akışkan yatakta fındık kurutma deneyleri yapılmadan önce; bazı ön deneyler yapılmıştır. Bunlar; fındığın yoğunluğunu tespit deneyleri, fındık için minimum akışkanlaşma hızının belirlenmesi, pitot tüpünün kalibrasyonu gibi çalışmalardır.

4.2.1. Fındığın yoğunluğunun tespiti

Fındığın yoğunluğunu belirleyebilmek için iki farklı yöntem uygulanmıştır. Küresele yakın yapıda olan tombul fındıklar alınarak iki farklı elekten geçirilmiş ve ortalama 16mm çapında elenen fındıklar bu iki işleme tabi tutulmuştur. İlk olarak tane sayısı belli olan fındıklar hassas terazide (%1 gr hassasiyette) tartılmış ve küresel kabul edilerek hacmi hesaplanmıştır. Hacim ve kütle oranından fındıkların yoğunluğu bulunmuştur. İkinci deneyde yine belirli sayıda olan fındıklar tartıldıktan sonra bu defa ölçekli ve içi su dolu bir kaba daldırılmıştır ve kabtaki su seviyesinin yükseldiği miktar fındığın hacmi olarak alınmış ve kütle ile oranlayarak yoğunluk belirlenmiştir. Her iki yoğunluk sırasıyla 781.65 kg/m^3 ve 808.54 kg/m^3 bulunmuştur. Buna göre ikisinin ortalaması olan 795 kg/m^3 değeri fındığın yoğunluğu olarak alınmıştır.

4.2.2. Pitot tüpünün kalibrasyonu

Pitot tüpünün kalibrasyonu için fan motorunun devri invertör aracılığıyla değiştirilerek her defasında akışkan yataktaki hava hızı hem harici anemometre ile ölçülmüş hem de pitot tüpü basınç farkına dayanarak hesaplanmıştır. Sonuçlar şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Pitot tüpünün kalibrasyonu

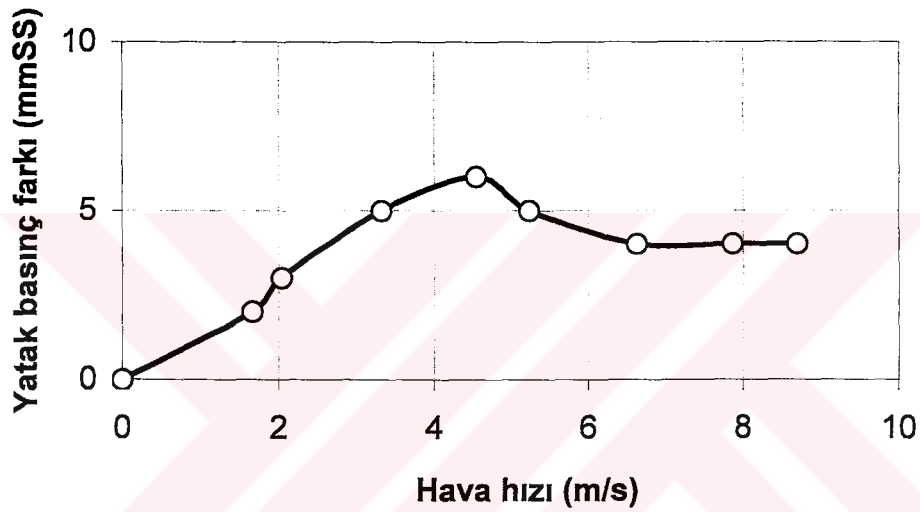
4.2.3. Minimum akışkanlaşma hızının tespiti

Fındığın akışkan yatakta minimum akışkanlaşma hızının tespiti için yine elenmiş 16mm ortalama çapında 750gr fındık akışkan yatağa konmuştur. Daha sonra fan motorunun devri invertör ile değiştirilerek akışkan yatağın basınç farkı basınç hücrelerinden her bir devir için okunmuş ve bu devirlerdeki akışkan yatak hava hızı ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11'de görüleceği üzere basınç farkı hava hızı ile beraber başlangıçta artmasına rağmen bir noktadan sonra düşme eğilimine geçer. İşte bu noktada artık akışkan yatak basınç farkı ile fındıkların kütlesi eşit demektir. Bu noktadaki hıza minimum akışkanlaşma hızı denmektedir. Fındık için bu çalışmada minimum akışkanlaşma hızı 4.6m/s civarında bulunmuştur.

4.2.4. Deneylerin yapılışı

Yukarıda ifade edilen ön işlemler yapıldıktan sonra asıl deneylere geçilmiştir. Elenerek 16mm ortalama çapına getirilen fındıklar her bir deneyde 750gr'lık parçalar halinde kullanılmıştır. Deney seti önce 2 veya 3 saatlik bir süre içinde yatak boş iken

sistemin rejime girmesi için çalıştırılmıştır. İstenen şartlar sağlandıktan sonra tüm sistem aniden kapatılmış ve mümkün olduğu kadar kısa süre içinde findıklar sisteme dahil edildikten sonra tüm sistem tekrar faaliyete geçirilmiştir. Deneylerde bir sene önce Güneş'te kurutulmuş fakat yaklaşık 6-8 ay kadar bekletilmiş findıklar ile henüz yeni toplanmış taze findıklar kullanılmıştır. Findıkların nemini tespit için elektronik nem tayin cihazı (Sartorius MA30) kullanılmıştır (şekil 4.12). Bu cihaz içine konulan numuneyi 105°C sıcaklıkta infrared kurutmaya tabi tutarak nemini tespit etmektedir. Hassasiyeti 1mg olan cihaza her defasında 30gr'lık numune konabilmektedir.

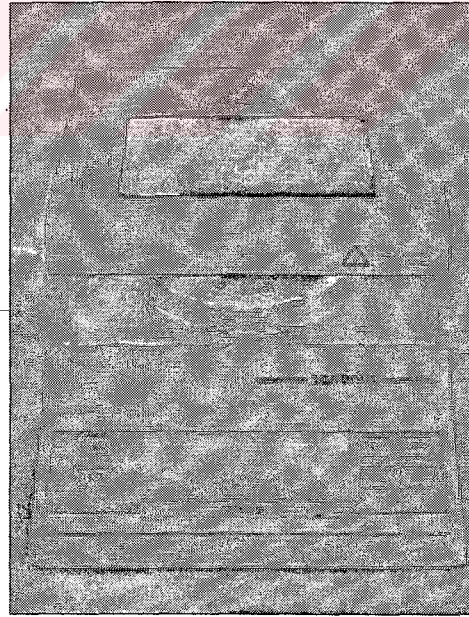


Şekil 4.11. Minimum akışkanlaşma hızının belirlenmesi

Farklı dönemlere ve farklı nemlere sahip findıklar havanın çeşitli sıcaklık ve hız değerlerinde deneye tabit tutulmuş ve akışkan yataktaki sıcaklık dağılımı, havanın çıkış sıcaklığı ve nemindeki değişim, findığın değişik şartlara göre kuruma özelliklerinin nasıl değiştiği deneyler sonucunda elde edilmiştir. Bu deney sonuçları ile model sonuçları karşılaştırılacaktır. Yapılan deneylerin planı tablo 4.1'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1. Deney planı.

Deney No	Fındık Türü	Fındık Giriş Sıcaklığı (°C)	Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	Hava Giriş Hızı (m/s)	Fındık Miktarı (gr)
1	Eski	31	47	5	750
2	Eski	31	40.5	5	750
3	Eski	31	40.5	8	750
4	Eski	31	47	8	750
5	Eski	28	47	8	750
6	Eski	28	47	5	750
7	Eski	28	40.5	8	750
8	Eski	28	40.5	5	750
9	Taze	28	47	5	750
10	Taze	28	47	8	750
11	Taze	28	40.5	5	750
12	Taze	28	40.5	8	750
13	Taze (Akyazı)	30	55.5	5	750
14	Taze (Karasu)	30	55.5	5	750
15	Eski	28	53	5	750



Şekil 4.12. Sartorius MA30 marka nem tayin cihazı.

BÖLÜM 5. MATEMATİKSEL MODEL

5.1. Matematiksel Modelin Eldesi

Akışkan yatağın hidrodinamiğinin modellenmesi için öncelikle, yatağın ana özelliklerinin bilinmesi gerekir. Örneğin; fazların debisi, hacim dağılımı, materyallerin birbiriyle olan teması, ve bunlarla alakalı olan parametreler gibi. Akımın tipi akışkanlaşmada çok önemli yer tutar. Katı hareketleri ve baloncuk hareketlerinden ötürü akışkan yataktaki gaz, yatağın içinden karmaşık ve rastgele bir yol izleyerek geçer. Bu da akımın tanımlanmasında önemli bir engel olarak ortaya çıkar. Bu konuda ilk olarak plug akışı (boru akışlı) ve karışma akımı gibi modeller denenmiş, daha sonra iki fazlı modellere geçilmiştir. Literatürde bu türden yaklaşık 30 adet model bulunmaktadır. Bu modellerdeki ana hedef, akışkan yataktaki homojen olmayan özellikleri de hesaba katabilmektir.

1960 yıllarında gaz ile katı arasındaki akımı çözebilmek için iki yeni gelişme olmuştur. Birincisi; gaz akımı incelendiğinde yükselen baloncukların önemli olduğu, ikincisi; bu baloncukların katının dalgalanmasıyla alakalı olduğudur. Hatta katı sirkülasyonunu sağlayan ana mekanizmanın bu katı dalgalanmasından doğrudan etkilendiği bulunmuştur.

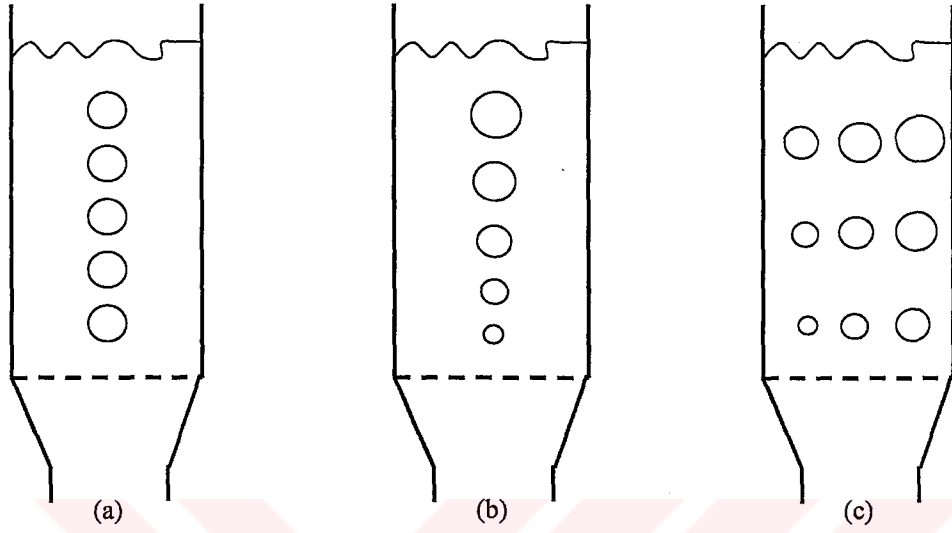
Bu gelişmeler sonucunda akışkan yatak için artık yeni bir model şekli, hidrodinamik modeller ele alınmaya başlanmıştır. Buna göre yatağın davranışı yükselen baloncukların karakteristiklerine dayanarak belirlenir. Bu modellerin bir kısmı çok küçük partiküllerin akışkan yataktaki davranışını incelemiştir. Bu partiküller akışkanlaştırıldığında, baloncukların etrafında küçük gaz bulutucuklarının oluştuğu görülmektedir. Grup A denilen çok küçük partiküllerin akışkan yatak davranışını bu modeller ile belirlemek mümkündür. Bununla birlikte büyük partiküllerin de akışkan yatakta kullanılması ile araştırmacılar, baloncuk ve yoğun fazların davranışını belirleyebilmek için yeni hidrodinamik modeller araştırmaya başlamışlardır.

Akışkan yatakta gaz akışı kararlı değildir. Bu kararsızlıktan ötürü yatakta farklı fazların varlığı söz konusudur. İki fazlı model ile Grup D adı verilen büyük partiküllerin akışkan yatak davranışı incelenirse, çözüm sonuçlarında bazı sapmaların ortaya çıktığı görülmektedir. Büyük partiküller akışkanlaştırıldığında, yatak fazla genişleme yapmaz, baloncukların formu minimum akışkanlaşmadaki gibi olur. Akışkan yatağın dağıtıcı eleğine yakın bölgelerde boşluklar meydana gelir. Bu boşluklar yükseldikçe küresele yakın baloncuklara dönüşür. Bu baloncuklar hızla yükselir ve her zaman aynı yolu izlemezler. Yüzeye geldiklerinde ise açılır ve kaybolurlar. Yoğun fazda gaz fazı hızlıdır ve katının karışma oranı küçük partiküllere göre daha azdır. Fakat bu, partikül özelliklerinin kararlı dağıldığını kabul etme imkanı sağlar.

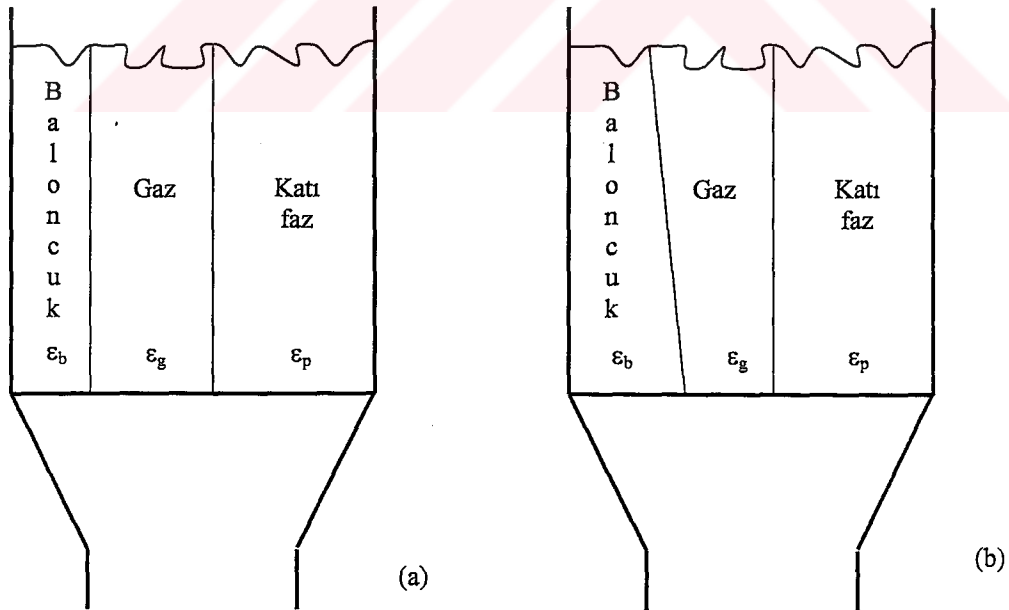
Baloncuklar yatakta yükseldikçe, çapları ve hızları da artmaktadır. Baloncuğun çapının büyümesi daha çok, küçük çaplının daha büyük ile birleşmesine bağlıdır. Baloncukların özelliklerinin yaktan geçerken nasıl değiştiği önceki çalışmalarda tam anlamıyla belirlenmemiştir. Sabit ortalama baloncuk çapı kabul edildiğinde, baloncuğun yataktaki davranışı tam olarak belirlenememiştir. Şekil 5.1a,b ve c'de baloncuğun çapıyla alakalı bazı kabuller gösterilmektedir. Bunlardan şekil 5.1a'da; sabit bir baloncuk çapı, şekil 5.1b'de; aynı doğrultuda yükselen ve çapları artan baloncuklar, şekil 5.1c'de ise; çapı yükseldikçe artan fakat yatay düzlemde de değişen baloncuklar gösterilmektedir. Grup D partikülleri için baloncuğun davranışının modellenmesi için b şeklindeki yapı kabul edilmiştir. Bu modelin hayata geçirilmesi için baloncuk çapları yatak boyunca değiştiği için yatağın da aksel yönde bölmelere ayrılması gerekmektedir.

Şekil 5.2a,b'de akışkan yatağın faz dağılımı gösterilmektedir. Değişik fazların yatak boyunca boşluklarının sabit olduğu kabulü şekil 5.2a'da gösterilmektedir. Bu kabul baloncuk çaplarının sabit olduğu kabulüne bağlıdır. Fakat bununla birlikte Grup D partiküllerde sabit baloncuk çapı kabulü doğru sonuçlar vermeyecektir. Belirli zaman periyodlarında baloncuk fazın debisinin sabit kabul edilmesi ve baloncukların yükseldikçe hızlarının artmasından ötürü, süreklilik denklemi gereği yatak yüksekliği boyunca baloncuk fazının kapsamı azalacaktır. Bu da şekil 5.2b'de gösterilmektedir. Katı faz kapsamı, yatak yüksekliği boyunca sabit kabul edilebilir. Serbest bölge için

bu kabul doğru olmamasına rağmen, kurutma prosesinde bu hatalar ihmal edilebilir düzeydedir. Şekil 5.2.b’de görüldüğü gibi; baloncuk kapsamının azalması ve sabit katı fazdan ötürü, gaz fazı kapsamı yatak boyunca artacaktır.



Şekil 5.1. Yataktaki baloncuk davranışı için değişik modeller: (a) ortalama baloncuk çapı, (b) eksenel yönde değişen baloncuk çapı, (c) eksenel ve yatay yönde değişen baloncuk çapı.



Şekil 5.2. Yatak içindeki faz dağılımı; (a) sabit faz kapsamaları, (b) değişken faz kapsamaları.

Yukarıda yapılan kabullere dayanarak, akımın modellenmesi için öncelikle gerekli olan ifadeler çıkarılacaktır. Hilligardt ve Werther [97] tarafından ortaya atılan, baloncuk debisi (Q_b) ifadesi şu şekildedir;

$$Q_b = \psi(u - u_{mf})A_t \quad (5.1)$$

Burada; u yataktaki gaz hızı, u_{mf} minimum akışkanlaşma hızı, A_t yatağın kesit alanını göstermektedir. ψ katsayısı için, Y : yatak yüksekliği, d_t : yatak çapı olmak üzere;

$$\begin{aligned} \psi &= 0.26 & Y/d_t &\leq 0.5 \\ \psi &= \exp[0.464 \log(Y/d_t) - 1.02] & 0.5 &\leq Y/d_t \leq 10 \end{aligned}$$

Yatak yüksekliğine bağlı olarak baloncuk boyutlarının da değişimini içeren baloncuk çapı ifadesi Darton ve arkadaşları [98] tarafından şöyle gösterilmiştir;

$$d_{b_j} = 0.54(u - u_{mf})^{0.4} (Y_j + 4\sqrt{A_0})^{0.8} g^{-0.2} \quad (5.2)$$

5.2. eşitliğinde A_0 dağıtıcı eleğin dolu alanını, g yerçekimi ivmesini ifade eder. Burada j indisi baloncuğun eksenel hareketindeki herhangi bir konumu gösterir. Baloncuğun yükselme hızı (u_{b_j});

$$u_{b_j} = (u - u_{mf}) + 0.71(gd_{b_j})^{0.5} \quad (5.3)$$

ve baloncuk boşluğu (ε_{b_j})

$$\varepsilon_{b_j} = \frac{Q_b}{A_t u_{b_j}} \quad (5.4)$$

Partiküllerin hacim dağılımı yatak boyunca sabit kabul edilir. Aslında yatağın yüzeyine doğru bu dağılım değişmesine rağmen, yatağın performansı üzerinde çok küçük bir etkisi vardır. Partikül boşluğu;

$$\varepsilon_p = 1 - \varepsilon_{b_j} - \varepsilon_{g_j} \quad (5.5)$$

Gaz hacim boşluğu (ε_{g_j});

$$\varepsilon_{g_j} = (1 - \varepsilon_{b_j} - \varepsilon_p) \quad (5.6)$$

gaz hızı (u_{g_j});

$$u_{g_j} = \frac{(u - \varepsilon_{b_j} u_{b_j})}{\varepsilon_{i_j}} \quad (5.7)$$

Yatağın genişlemesi ortalama baloncuk yükselmesine eşit kabul edilirse, akışkanlaşmadan sonraki yatak yüksekliği (Y_f) şöyle hesaplanabilir;

$$Y_f = \frac{W}{\rho_p \varepsilon_p A_t} = \frac{Y_{mf}}{1 - \varepsilon_{b_{or}}} \quad (5.8)$$

Burada, W yataktaki partikül kütle miktarını, $\varepsilon_{b_{or}}$ ortalama baloncuk boşluğunu göstermektedir. Kunii ve Levenspiel [99] tarafından önerilen minimum akışkanlaşma hızı u_{mf} ifadesi şöyledir;

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_s} Re_{mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_s^2} Re_{mf} = Ar \quad (5.9)$$

Burada kullanılan Reynolds sayısı Re ;

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (5.10)$$

ve Archimedes sayısı Ar (μ_g : gazın dinamik viskozitesi) ;

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (5.11)$$

Minimum akışkanlaşma denklemi kuru partikül için geçerlidir. Fakat yaş partikül için doğru sonuç vermeyebilir. Bu yüzden deneysel sonuçlara dayalı korelasyonlar kullanılmalıdır. (Kunii ve Levenspiel [99])

Çeşitli akışkan yatak modelleri literatürde geliştirilmiştir. Kurutmanın uygulandığı akışkan yataklar için ilk defa Hajidavalloo ve Hamdullahpur [35] tarafından kurulan üç fazlı (gaz fazı, baloncuk fazı ve katı faz) modelde başarılı sonuçlar alınmış, model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Burada fındık kurutulması için Hajidavalloo ve Hamdullahpur [35] tarafından önerilmiş model seçilmiştir. Her üç faz için kütle ve enerji alışverişi (dengesi) incelenerek, buradan akışkan yataktaki tüm değişimleri veren denklemler elde edilir ve sonuç olarak fındığın kurutulması hesaplanacaktır. Akışkan yatak duvar sıcaklığı sabit alınmıştır.

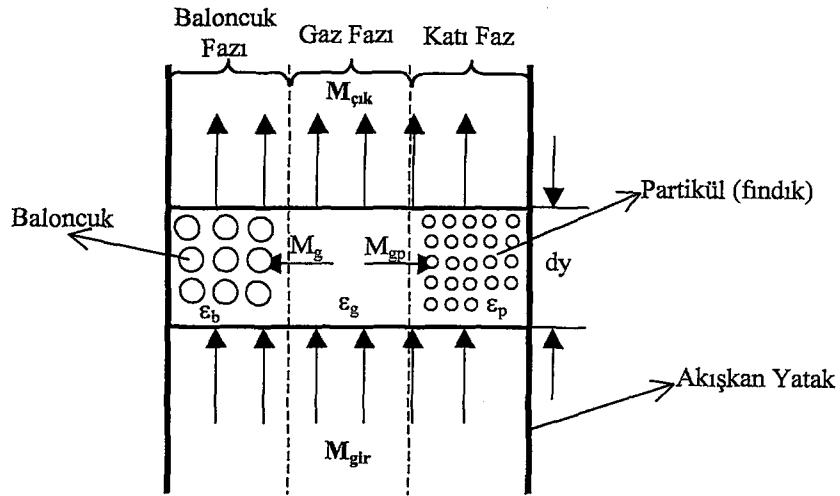
5.1.1. Gaz fazı

Gaz fazı için; akımın boru (plug) akışına uyduğu, yatağın sabit sıcaklıkta (izotermal) olmadığı ve yatak boyunca (düşey ekseninde) gaz fazının sıcaklığının değiştiği kabul edilmiştir. Modellemek için yatak bir boyutlu kontrol hacimlere bölünmüştür (şekil 5.3). Herbir kontrol hacim için, gaz fazının ısı ve kütle diferansiyel denklemleri geliştirilmiştir.

Kütle dengesi; Kütle dengesi süreklilik denkleminde hareketle ele alınır;

$$\sum \dot{M} = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (5.12)$$

$$\dot{M}_{gir} + \dot{M}_{çu} + \left(\dot{M}_{gp} + \dot{M}_{gb} \right) = \frac{\partial M_g}{\partial t} \quad (5.13)$$



Şekil 5.3. Gaz fazı kütle geçişi analizi için bir boyutlu kontrol hacmin belirlenmesi.

Burada, nem girişi;

$$M_{gir} = \rho_h X_g \varepsilon_g A_t u_g \quad (5.14)$$

nem çıkışı;

$$M_{çık} = \rho_h X_g \varepsilon_g A_t u_g + \frac{\partial(\rho_h X_g \varepsilon_g A_t u_g)}{\partial y} dy \quad (5.15)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, X_g gazın mutlak nemi, ρ_h havanın yoğunluğu, u_g gazın hızını göstermektedir.

Gaz ile partikül arasındaki nem geçişi;

$$M_{gp} = \rho_h k_{gp} (X_p - X_g) A_p \quad (5.16)$$

Gaz ile baloncuk arasındaki nem geçişi;

$$M_{gb} = \rho_h k_{gb} (X_b - X_g) A_b \quad (5.17)$$

Kontrol hacmi;

$$dV = A_t dy \quad (5.18)$$

Yukarıdaki denklemlerde k_{gp} gaz ile partikül arası kütle geçiş katsayısı, A_p fındık yüzey alanı, k_{gb} gaz ile baloncuk arası kütle geçiş katsayısı, A_b baloncuk yüzey alanını ifade eder. 5.14-17 denklemleri 5.13 denkleminde yerine yazılır ve $A_t dy$ ile bölünürse;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_g \varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_g \varepsilon_g u_g) = \rho_h k_{gp} (X_p - X_g) \frac{A_p}{A_t dy} + \rho_h k_{gb} (X_b - X_g) \frac{A_b}{A_t dy} \quad (5.19)$$

Yatağın birim hacmi başına düşen partikül ve baloncuk alanlarının oranları;

$$\frac{A_p}{A_t dy} = \frac{6\varepsilon_p}{d_p} \quad (5.20)$$

$$\frac{A_b}{A_t dy} = \frac{6\varepsilon_b}{d_b} \quad (5.21)$$

Ayrıca, kütle geçiş katsayısı k_{gb} , baloncuğun geometrik oranı (A_b/V_b) ile çarpılarak baloncuk toplam kütle geçiş katsayısı K_{gb} olarak tanımlanır;

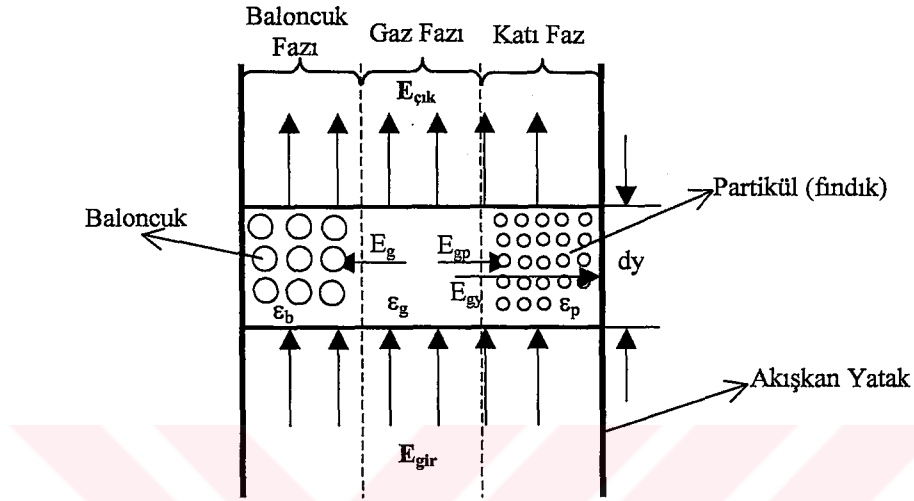
$$K_{gb} = \frac{A_b}{V_b} k_{gb} = \frac{6k_{gb}}{d_b} \quad (5.22)$$

5.20-22 denklemleri 5.19'da yerine yazılırsa; kütle dengesi için sonuç denklemi elde edilmiş olur;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_g \varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_g \varepsilon_g u_g) = \rho_h k_{gp} (X_p - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} + \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_b - X_g) \quad (5.23)$$

Enerji dengesi;

Enerji dengesi, termodinamiğin 1. yasası ile ifade edilen enerji korunumu yasası ile incelenir. Termodinamiğin 1. yasasının kontrol hacmine uygulanmasıyla aşağıdaki enerji dengesi elde edilir;



Şekil 5.4. Gaz fazı ısı geçişi analizi için kontrol hacim seçimi.

$$\dot{E}_{gir} + \dot{E}_{çık} + \left(\dot{E}_{gp} + \dot{E}_{gb} + \dot{E}_{gy} \right) = \frac{\partial E_g}{\partial t} \quad (5.24)$$

Kontrol hacmine hava ile enerji (entalpi) girişi;

$$\dot{E}_{gir} = \rho_h C \epsilon_g A_t u_g T_g \quad (5.25)$$

Burada C sabit basınçta özgül ısı, T_g gazın sıcaklığını göstermektedir.

Kontrol hacminden hava ile enerji (entalpi) çıkışı;

$$\dot{E}_{çık} = \rho_h C \epsilon_g A_t u_g T_g + \frac{\partial (\rho_h C \epsilon_g A_t u_g T_g)}{\partial y} dy \quad (5.26)$$

Gaz ile partikül arası enerji geçişi;

$$E_{gp} = \underbrace{h_{gp}(T_p - T_g)A_p}_{\text{Taşınım ile ısı geçişi}} + \underbrace{\dot{M}_{gp} C_v (T_p - T_g)}_{\text{Nem geçişiyle taşınan enerji (entalpi)}} \quad (5.27)$$

Gaz ile baloncuk arasındaki enerji geçişi;

$$E_{gb} = \underbrace{h_{gb}(T_b - T_g)A_b}_{\text{Taşınım ile ısı geçişi}} + \underbrace{\dot{M}_{gb} C_v (T_b - T_g)}_{\text{Nem geçişiyle taşınan enerji (entalpi)}} \quad (5.28)$$

Yukarıdaki 5.27 ve 28 eşitliklerinde, eşitliğin sağındaki ilk terim sıcaklık farkından doğan ısı geçişini, ikinci terim ise, nem geçişiyle taşınan enerji (entalpi) geçişini ifade etmektedir. Gaz ile duvar yüzeyi arasındaki enerji geçişi;

$$E_{gd} = h_{gd}(T_d - T_g)A_d \quad (5.29)$$

Burada h_{gd} gaz ile duvar arasındaki ısı geçiş katsayısını göstermektedir ve Howard [101] tarafından aşağıdaki şekilde önerilmiştir.

$$h_{gd} = \frac{0.86Ar^{0.15}\lambda_h}{d_p} \quad (5.30)$$

Burada λ_h havanın ısı iletkenliğini göstermektedir. 5.25-29 denklemleri 5.24 ifadesinin içine yazıldığı ve $A_t dy$ ile bölüldüğü takdirde;

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_h C_g \varepsilon_g T_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h C_g \varepsilon_g u_g T_g) &= h_{pg}(T_p - T_g) \frac{A_p}{A_t dy} + \rho_h k_{pg}(X_p - X_g) \frac{A_p}{A_t dy} C_{bu}(T_p - T_g) \\ &+ h_{gb}(T_b - T_g) \frac{A_b}{A_t dy} + \rho_h k_{gb}(X_b - X_g) \frac{A_b}{A_t dy} C_{bu}(T_b - T_g) + h_{gd}(T_d - T_g) \frac{A_d}{A_t dy} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Yatağın birim kontrol hacmi başına düşen partikül ve baloncuk alanları ifadeleri de denklem 5.31'de yazılarak gaz fazı için enerji dengesi ifadesi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_h C_g \varepsilon_g T_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h C_g \varepsilon_g u_g T_g) = h_{gp}(T_p - T_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} + \rho_h k_{gp}(X_p - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} C_{bu}(T_p - T_g) \\ + H_{gb} \varepsilon_b (T_b - T_g) + \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_b - X_g) C_{bu}(T_b - T_g) + h_{gd}(T_d - T_g) \frac{(1 - \varepsilon_p)}{d_t} \end{aligned} \quad (5.32)$$

Katı faz ile gaz fazı arasındaki ısı ve kütle geçişi katsayılarının hesaplanması için Ranz [100] tarafından aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir.

$$Nu = \frac{h d_p}{\lambda} = (2 + 1.8 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (5.33)$$

$$Sh = \frac{k d_p}{D} = (2 + 1.8 Re^{1/2} Sc^{1/3}) \quad (5.34)$$

Burada, $Nu = \frac{h d_p}{\lambda}$ Nusselt sayısını,

$Sh = \frac{k d_p}{D}$ Sherwood sayısını,

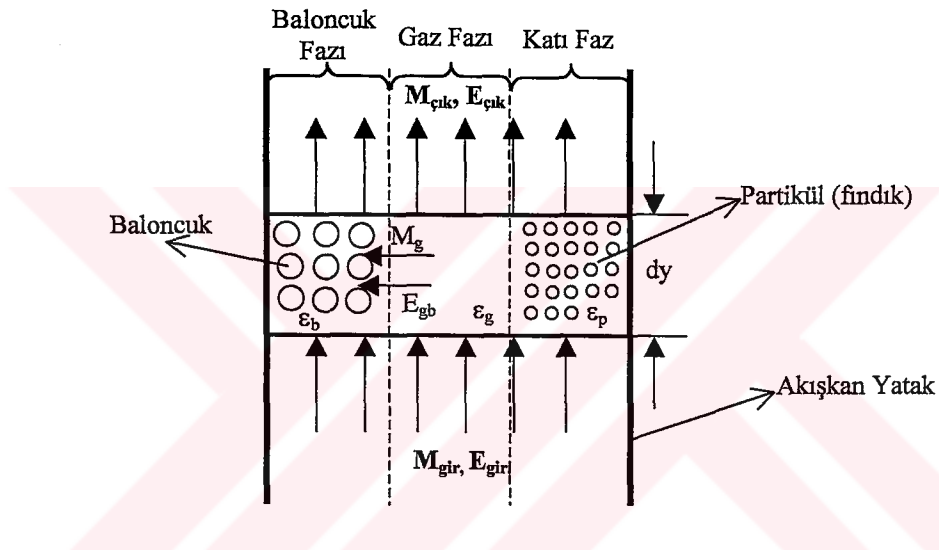
$Re = \frac{d_p u \rho_g}{\mu_g}$ Reynolds sayısını,

$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$ Schmidt sayısını ifade etmektedir. Ayrıca, D difüzyon

katsayısını ve d_p partikül çapını göstermektedir.

5.1.2. Baloncuk fazı

Yatak içerisinde akışkanlaşma esnasında oluşan baloncuklar yatağın homojenliğini bozan en önemli unsurlardan biridir. Kurutmanın azalan kurutma hızlı periyodunda baloncukun önemi büyüktür. Kurutma oranı partikülün içine nem difüzyonu ile kontrol edilir [35]. Kurutma prosesinin modellenmesinde, baloncukların varlığının ve diğer fazlarla olan ilişkisinin tespiti önemlidir. Baloncukun çapı d_b , hızı u_b , mutlak nemi X_b , sıcaklığı T_b ve ısı geçiş katsayısı h baloncukun akışkan yataktaki konumuna bağlıdır. Baloncuk fazı için plug akışı kabul edildiğinde kütle dengesi denklemi gaz fazına benzer şekilde elde edilir.



Şekil 5.5. Baloncuk fazı ısı ve kütle geçişi analizi için bir boyutlu kontrol hacmin belirlenmesi.

Kütle dengesi;

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_b \varepsilon_b)}_{\text{Zamanla kütle değişimi}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_b \varepsilon_b u_b)}_{\text{Yükseklikle kütle değişimi}} = \underbrace{\rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b)}_{\text{Nem geçişi}} \quad (5.35)$$

Enerji dengesi;

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h C_b \varepsilon_b T_b)}_{\text{Zamanla entalpi değişimi}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}(\rho_h C_b \varepsilon_b u_b T_b)}_{\text{Yükseklikle entalpi değişimi}} = \underbrace{H_{gb} \varepsilon_b (T_g - T_b)}_{\text{Isı geçişi}} + \underbrace{\rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b) C_{bu} (T_g - T_b)}_{\text{Nem entalpi geçişi}} \quad (5.36)$$

Baloncuk ile gaz arası toplam kütle geçiş katsayısı [35];

$$K_{gb} = 4.5 \left(\frac{u_{mf}}{d_b} \right) + 5.85 \left(\frac{D_{bu}^{1/2} g^{1/4}}{d_b^{5/4}} \right) \quad (5.37)$$

Yine baloncuk ile gaz arası toplam ısı geçiş katsayısı [35];

$$H_{gb} = 4.5 \left(\frac{u_{mf} \rho_h C}{d_b} \right) + 5.85 \frac{(\lambda_h \rho_h C)^{1/2} g^{1/4}}{d_b^{5/4}} \quad (5.38)$$

5.1.3 Katı faz (findık)

Fındığın (katıların) kurutulmasında iki farklı periyod vardır; Sabit kurutma hızlı periyod ile azalan kurutma hızlı periyod. Bu periyodlar, katının nem konsantrasyonu ve diğer şartlar ile kurutma gazına bağlıdır. Periyodlar ayrı ayrı ele alınacaktır.

5.1.3.1. Azalan kurutma hızlı periyod

Kurutmanın gelişen sürecinde fındığın dış yüzeyindeki nemin alınmasından sonra, nem fındığın içinden alınır. Bu durumda, kurutma hızını fındığın nem difüzyon özellikleri belirler yani, kontrol eder. Fındık neminin azalmasıyla, azalan kurutma hızı devreye girer. Katı partiküller üniform, izotropik ve yaklaşık küresel kabul edilir. Katı partikülde ısı ve kütle geçişini gerçekleştiren kuvvetlerin; buhar basınçları ve katı yüzeyi ile gaz arasındaki sıcaklık ve basınç farkı olduğu gözönüne alınmaktadır. Büyük partiküllerde partikülün içindeki nem ve sıcaklık gradyanlarının belirlenmesi gerekir. Bu nedenle, difüzyon denklemleri sınır şartlarında kullanılmıştır. Şu kabullerin de yapılması gerekir; partikülün içindeki nem yüzeye sıvı fazda gelir, sonra buharlaşma sadece yüzeyde gerçekleşir.

Difüzyon denklemi;

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M_p) \quad (5.39)$$

Bir boyutlu küresel koordinatlarda ve nem gradyanının radyal yönde olduğu kabul edildiğinde 5.39 denklemi şu hale gelecektir (M_p : Partikülün nem miktarı);

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial M_p}{\partial r} \right) \quad (5.40)$$

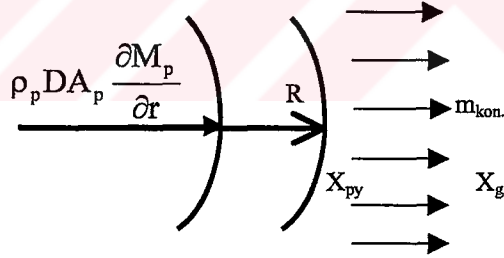
Başlangıç ve sınır şartları;

$$t = 0 \quad 0 \leq r \leq R \quad M_p = M_{p0}(r) \quad (5.41)$$

$$t > 0 \quad r = 0 \quad \frac{\partial M_p}{\partial r} = 0 \quad (5.42)$$

Partikülün yüzeyindeki sınır şartı için aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$\rho_p \Delta V \frac{\partial M_p}{\partial t} = m_{kon.} - \rho_p D A_p \frac{\partial M_p}{\partial r} \quad (5.43)$$



Şekil 5.6. Fındık dış yüzeyinden taşınım ile olan kütle geçişi.

Partikülün yüzeyi için taşınım ile kütle geçişi $m_{kon.}$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$m_{kon.} = \rho_h k_p A_p (X_{py} - X_g) \quad (5.44)$$

Burada, X_{py} partikül yüzeyindeki mutlak nemi gösterir.

Enerji denklemi ve başlangıç ve sınır şartları şöyle ifade edilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho_p C_p T_p)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) \quad (5.45)$$

$$t = 0 \quad 0 \leq r \leq R \quad T_p = T_{po}(r) \quad (5.46)$$

$$t > 0 \quad r = 0 \quad \frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \quad (5.47)$$

Partikülün yüzeyindeki sınır şartı;

$$\frac{\partial(\rho_p C_p T_p)}{\partial t} = \dot{q}_{buh.} + \dot{q}_{pg} + \dot{q}_{pd} - \lambda_p A_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \quad (5.48)$$

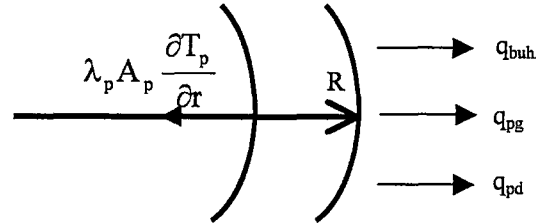
Burada,

$$\dot{q}_{buh.} = \dot{m}_{kon.} b \quad \text{Buharlaştırma ısısı,} \quad (5.49)$$

$$\dot{q}_{pg} = h_{pg} A_p (T_g - T_{py}) \quad \text{Partikül ile gaz arası ısı geçişi,} \quad (5.50)$$

$$\dot{q}_{pd} = h_{pd} A_{pd} (T_d - T_{py}) \quad \text{Partikül ile duvar arası ısı geçişini} \quad (5.51)$$

ifade etmektedir. T_{py} : partikülün yüzey sıcaklığı, T_d : yatak duvarı sıcaklığını gösterir.



Şekil 5.7. Fındığın dış yüzeyinden ısı geçişi.

Partikül ile duvar arası ısı geçişi katsayısı [101];

$$h_{pd} = \frac{0.843 Ar^{0.39} \lambda_h}{d_p^{0.5}} \quad (5.52)$$

Bu model kurutma esnasında fındık içerisinde oluşan sıcaklık gradyanını hesaplar. Difüzyon katsayısı çözümde önemli bir parametredir ve nemin ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu sayede elde edilen denklemler aynı anda çözülebilir.

5.1.3.2. Sabit kurutma hızlı periyod

Sabit kurutma hızlı periyotta, kurutma prosesini partikül ile gaz fazı arasındaki taşınım ile olan ısı ve kütle geçişi kontrol eder. Bu periyotta fındık dış yüzeyi halen nemlidir.

Kütle dengesi için;

$$\underbrace{\frac{\delta}{\delta t} (M_p \rho_p V_p)}_{\text{Zamanla kütle değişimi}} = \underbrace{\rho_h k_{gp} A_p (X_{py} - X_g)}_{\text{Taşınım ile kütle geçişi}} \quad (5.53)$$

yazılır.

$$\text{Başlangıç şartı;} \quad t = 0 \quad M_p = M_{po} \quad (5.54)$$

Enerji dengesi;

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho_p C_p V_p T_p) = q_{pg} - q_{buh} + q_{pd} \quad (5.55)$$

denklemden hareketle aşağıdaki hale gelir;

$$\underbrace{\frac{\delta}{\delta t}(\rho_p C_p V_p T_p)}_{\text{Zamanla entalpi değişimi}} = \underbrace{h_{gp} A_p (T_g - T_p)}_{\text{Isı geçişi}} - \underbrace{\rho_h k_{gp} A_p (X_{py} - X_g) b}_{\substack{\text{Buharlaşıma} \\ \text{İSİSİ}}} + \underbrace{h_{pd} A_{pd} (T_d - T_p)}_{\text{Isı geçişi}} \quad (5.56)$$

$$\text{Başlangıç şartı;} \quad t = 0 \quad T_p = T_{po} \quad (5.57)$$

5.2. Lineer Olmayan Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Nümerik Analizi

Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümlenmesinde kontrol hacim yaklaşımı kullanılmıştır. Hesaplanacak bölge kontrol hacimlere bölünmüştür ve bu kontrol hacimler bölünürken her bir kontrol hacmin bölüm noktalarıyla çevrili olmasına dikkat edilmelidir. Diferansiyel denklemler her bir kontrol hacim üzerinde integre edilmiştir. Ayırt edilen denklemler her bir kontrol hacim için korunum denklemlerini vermektedir.

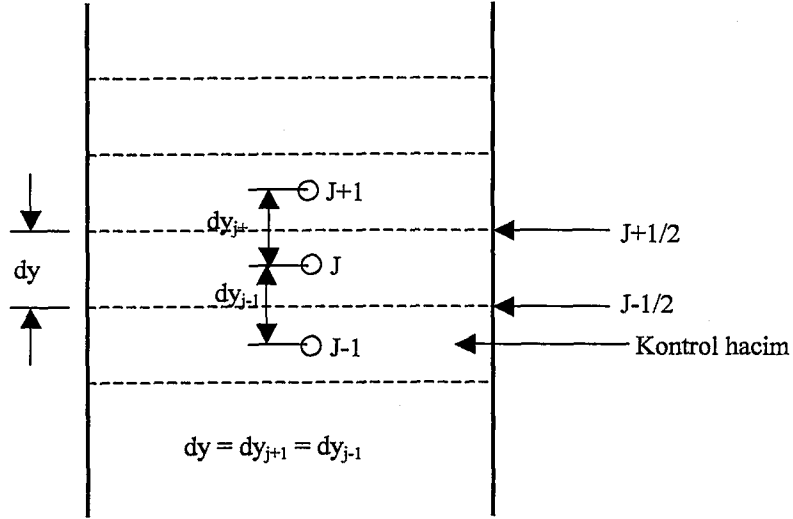
5.2.1. Gaz fazı

Kütle geçişi denklemi ele alınırsa, bunlar hiperbolik tip kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu tip denklemlerin çözümünde değişik metodlar mevcuttur; fakat önemli olan çözümün kararlılığıdır. İmplicit metod explicit'e göre daha karardır. Bu nedenle implicit metod, denklemlerin eldesinde kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_g \varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_g \varepsilon_g u_g) = \rho_h k_{gp} (X_p - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} + \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_b - X_g) \quad (5.58)$$

Ayırt edilmiş denklemi elde etmek üzere, şekil 5.8'de gösterildiği gibi kontrol hacim seçimi yapılmıştır. Kontrol hacim üzerinden denklem integre edilirse;

$$\begin{aligned} \int_{j-1/2}^{j+1/2} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho_h X_g \varepsilon_g)}{\partial t} dt dy + \int_t^{t+\Delta t} \int_{j-1/2}^{j+1/2} \frac{\partial(\rho_h X_g \varepsilon_g u_g)}{\partial y} dy dt = \int_{j-1/2}^{j+1/2} \int_t^{t+\Delta t} \rho_h k_{gp} (X_p - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} dt dy \\ + \int_{j-1/2}^{j+1/2} \int_t^{t+\Delta t} \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_b - X_g) dt dy \end{aligned} \quad (5.59)$$



Şekil 5.8. Yatak içinde düğüm noktaları ve kontrol hacmin seçimi.

Kararsız terim için, (5.58 denkleminde sol baştaki ilk terim) değişkenlerin düğüm noktasındaki değerinin tüm kontrol hacimde geçerli olduğu kabul edilirse;

$$\int_{j-1/2}^{j+1/2} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho_h X_g \varepsilon_g)}{\partial t} dt dy = [(\rho_h X_g \varepsilon_g)^{n+1,j} - (\rho_h X_g \varepsilon_g)^{n,j}] \Delta y \quad (5.60)$$

Konveksiyon terimi için integral sonucu;

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{j-1/2}^{j+1/2} \frac{\partial(\rho_h X_g \varepsilon_g u_g)}{\partial y} dy dt = \int_t^{t+\Delta t} [(\rho_h X_g \varepsilon_g u_g)^{j+1/2} - (\rho_h X_g \varepsilon_g u_g)^{j-1/2}] dt \quad (5.61)$$

Bu durumda, $j+1/2$ ve $j-1/2$ 'de değişken için bir değer seçilmelidir. Basit bir yöntem merkezi farklar yaklaşımını kullanmaktır. Bunun anlamı, $j+1/2$ için j ve $j+1$ 'deki özelliklerin ortalaması, $j-1/2$ için de j ve $j-1$ 'deki özelliklerin ortalaması kullanılır. Fakat, Patankar [56] bu tür diferansiyel denklemlerin çözümünde merkezi farkların iyi bir sonuç vermediğini söylemiştir. Bundan dolayı, konveksiyon teriminin ayırt edilmesi için yukarıya doğru ilerleyen bir sistem seçilmiştir. Gaz fazının plug akışına sahip olduğu ve gaz hızının her zaman yukarıya doğru olduğu kabul edilmiştir. Bundan ötürü $j+1/2$ j ile ve $j-1/2$ $j-1$ ile yer değiştirebilir.

Kurutma parametreleri zamanla değişmektedir. Burada kararlılığı sağlamak üzere implicit yaklaşım seçilmiştir, sonuçta;

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[(\rho_h X_g \varepsilon_g u_g)^{j+1/2} - (\rho_h X_g \varepsilon_g u_g)^{j-1/2} \right] dt = \left[(\rho_h X_g \varepsilon_g u_g)^{n+1,j} - (\rho_h X_g \varepsilon_g u_g)^{n+1,j-1} \right] \Delta t \quad (5.62)$$

5.58 denkleminin sağ tarafındaki terimler için; değişkenlerin bölüm noktası değerinin tüm kontrol hacimde geçerli olduğu kabul edilir ve implicit yaklaşım kullanılırsa, kütle geçişi denkleminin son hali;

$$\begin{aligned} & \left[(\rho_h \varepsilon_g X_g)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_g X_g)^{n,j} \right] \Delta y + \left[(\rho_h \varepsilon_g u_g X_g)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_g u_g X_g)^{n+1,j-1} \right] \Delta t = \\ & \left[\rho_h k_{gp} (X_p - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} + \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_b - X_g) \right]^{n+1,j} \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (5.63)$$

Enerji denklemi de kütle denklemi ile aynı tipte olduğundan, aynı kabuller yapıldığında, enerji denkleminin son hali şu şekilde olacaktır;

$$\begin{aligned} & \left[(\rho_h C_g \varepsilon_g T_g)^{n+1,j} - (\rho_h C_g \varepsilon_g T_g)^{n,j} \right] \Delta y + \left[(\rho_h C_g \varepsilon_g u_g T_g)^{n+1,j} - (\rho_h C_g \varepsilon_g u_g T_g)^{n+1,j-1} \right] \Delta t = \\ & \left[h_{gp} (T_p - T_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} + \rho_h k_{gp} (X_p - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} C_{bu} (T_p - T_g) + H_{gb} \varepsilon_b (T_b - T_g) + \right. \\ & \left. \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_b - X_g) C_{bu} (T_b - T_g) + h_{gd} (T_d - T_g) \frac{(1-\varepsilon_p)}{d_t} \right]^{n+1,j} \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (5.64)$$

5.2.2. Baloncuk fazı

Baloncuk fazının enerji ve kütle denklemleri gaz fazında olduğu gibi hiperbolik tip kısmi diferansiyel denklemlerdir. Baloncuk fazının değerlendirilmesinde yine gaz fazındaki benzer kabuller yapılabilir. Ayırt edilmiş denklemler kütle dengesi ve enerji dengesi için sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\begin{aligned} & \left[(\rho_h \varepsilon_b X_b)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_b X_b)^{n,j} \right] \Delta y + \left[(\rho_h \varepsilon_b u_b X_b)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_b u_b X_b)^{n,j} \right] \Delta t = \\ & \left[\rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b) \right]^{n+1,j} \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (5.65)$$

$$\begin{aligned} & \left[(\rho_h C_g \varepsilon_b T_b)^{n+1,j} - (\rho_h C_g \varepsilon_b T_b)^{n,j} \right] \Delta y + \left[(\rho_h \varepsilon_b u_b T_b)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_b u_b T_b)^{n,j} \right] \Delta t = \\ & \left[H_{gb} \varepsilon_b (T_g - T_b) + \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b) C_{bu} (T_g - T_b) \right]^{n+1,j} \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (5.66)$$

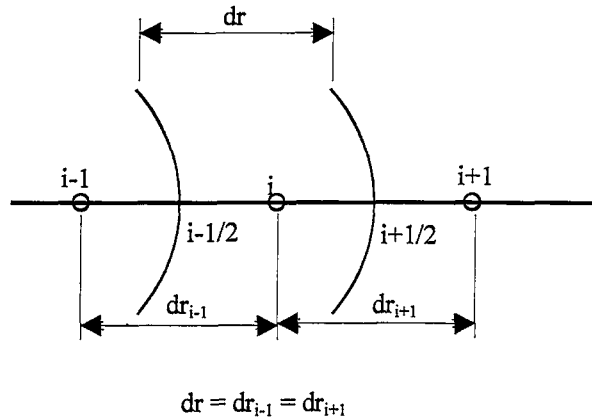
5.2.3. Katı faz (fındık)

Katı fazdan elde edilen denklemler parabolik tip kısmi diferansiyel denklemlerdir. Katı faz denklemlerini ayırt etmek için hiperbolik sistemde olduğu gibi burada da implicit metod kullanılmıştır.

Katı faz ile gaz fazı denklemleri arasındaki diğer bir fark ise kullanılan koordinat sistemidir. Partikülün küresel yapısından ötürü, katı faz denklemlerinde küresel koordinatların kullanılması gerekir. Küresel koordinatlarda denklemleri ayırt etmek için, bir boyutlu kütle difüzyon denklemi ele alınmıştır:

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial M_p}{\partial r} \right) \quad (5.67)$$

Aşağıdaki şekil 5.9'da kontrol hacmin nasıl ele alındığı gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Küresel koordinatlarda kontrol hacim ve düğüm noktası.

Ayır edilmiş denklemi elde etmek üzere, 5.67 denklemi $4\pi r^2$ ile çarpılarak, kontrol hacim üzerinden ve zaman aralığı olan t 'den $t+\Delta t$ 'ye integre edilirse;

$$\int_{i-1/2}^{i+1/2} \int_t^{t+\Delta t} 4\pi r^2 \frac{\partial M_p}{\partial t} dt dr = \int_t^{t+\Delta t} \int_{i-1/2}^{i+1/2} 4\pi \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial M_p}{\partial r} \right) dr dt \quad (5.68)$$

M_p büyüklüğünün düğüm noktasındaki değerinin kontrol hacim boyunca geçerli olduğu kabul edildiğinde;

$$\int_{i-1/2}^{i+1/2} \int_t^{t+\Delta t} 4\pi r^2 \frac{\partial M_p}{\partial t} dt dr = (M_{p_i}^{n+1} - M_{p_i}^n) \Delta V \quad (5.69)$$

Burada ΔV kontrol hacmin hacmini gösterir. 5.68 denklemindeki difüzyon terimi kontrol hacim üzerinden integre edildiğinde;

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{i-1/2}^{i+1/2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial M_p}{\partial r} \right) dr dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{r_{i+1/2}^2 D_{i+1/2} (M_{p_{i+1}} - M_{p_i})}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 D_{i-1/2} (M_{p_i} - M_{p_{i-1}})}{\delta r_{i-1}} \right] 4\pi dt \quad (5.70)$$

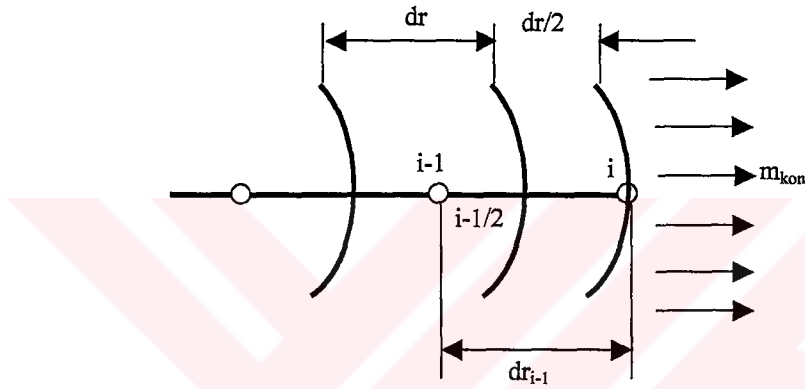
M_p değerinin t 'den Δt 'ye nasıl değiştiğinin kabul edilmesi gerekmektedir. Burada 0 ile 1 arasında değişen f , ağırlık faktörü kullanıldığında denklemin genel formu şu hale gelir;

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{i-1/2}^{i+1/2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial M_p}{\partial r} \right) dr dt = f \left[\frac{r_{i+1/2}^2 D_{i+1/2} (M_{p_{i+1}}^{n+1} - M_{p_i}^{n+1})}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 D_{i-1/2} (M_{p_i}^{n+1} - M_{p_{i-1}}^{n+1})}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t + \\ (1-f) \left[\frac{r_{i+1/2}^2 D_{i+1/2} (M_{p_{i+1}}^n - M_{p_i}^n)}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 D_{i-1/2} (M_{p_i}^n - M_{p_{i-1}}^n)}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t \quad (5.71)$$

Sonuç olarak kütle difüzyon denklemi olan 5.67 denkleminin ayır edilmiş son hali;

$$\begin{aligned}
(M_{p_i}^{n+1} - M_{p_i}^n) \frac{\Delta V}{4\pi\Delta t} = & f \left[\frac{r_{i+1/2}^2 D_{i+1/2} (M_{p_{i+1}}^{n+1} - M_{p_i}^{n+1})}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 D_{i-1/2} (M_{p_i}^{n+1} - M_{p_{i-1}}^{n+1})}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t + \\
& (1-f) \left[\frac{r_{i+1/2}^2 D_{i+1/2} (M_{p_{i+1}}^n - M_{p_i}^n)}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 D_{i-1/2} (M_{p_i}^n - M_{p_{i-1}}^n)}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t
\end{aligned} \quad (5.72)$$

Crank-Nicholson metodu için $f = 0.5$ kullanılmıştır. Sınır şartları için, gaz ile katı yüzeyi arasındaki kütle geçişinin etkisi göz önüne alınmalıdır. Bunun için, kütle difüzyon denkleminin yüzey üzerinden integre edilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.10. Yüzeydeki kütle geçişi için, sınır şartında yarım kontrol hacim.

Şekil 5.10'da sınır şartı tanımlanmıştır. Burada, m_{kon} , katı ile gaz fazları arasında net kütle geçişidir ve herbir fazın buhar basıncına bağlı yöndedir. Şekildeki yön keyfi seçilmiştir.

$$\int_{i-1/2}^i \int_t^{t+\Delta t} 4\pi r^2 \frac{\partial M_p}{\partial t} dt dr = \int_t^{t+\Delta t} \int_{i-1/2}^i 4\pi \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial M_p}{\partial r} \right) dr dt \quad (5.73)$$

Burada sınır parçasının kalınlığı iç kısımların yarısı olarak alınmıştır. İntegral sonucu;

$$(M_{p_i}^{n+1} - M_{p_i}^n) \rho_p \Delta V_i = \int_t^{t+\Delta t} \left[\dot{m}_{kon} - \left(\rho_p A_{i-1/2} D_{i-1/2} \left(\frac{\partial M_p}{\partial r} \right)_{i-1/2} \right) \right] dt \quad (5.74)$$

Ağırlık faktörü, f kullanıldığında, sınır tabaka için ayırt edilmiş denklemin son hali;

$$\begin{aligned} (M_{p_i}^{n+1} - M_{p_i}^n) \frac{\Delta V_i}{4\pi\Delta t} = & -f \left[A_{i-1/2} D_{i-1/2} \frac{(M_{p_i}^{n+1} - M_{p_{i-1}}^{n+1})}{\delta r_{i-1}} \right] - (1-f) \left[A_{i-1/2} D_{i-1/2} \frac{(M_{p_i}^n - M_{p_{i-1}}^n)}{\delta r_{i-1}} \right] \\ & + f \left[\frac{\rho_h}{\rho_p} k_{gp} A_g (X_g^{n+1} - X_{py}^{n+1}) \right] + (1-f) \left[\frac{\rho_h}{\rho_p} k_{gp} A_g (X_g^n - X_{py}^n) \right] \end{aligned} \quad (5.75)$$

Katı fazın enerji denklemi;

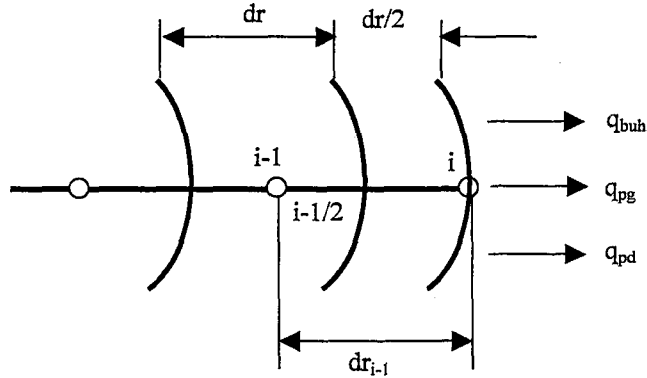
$$\frac{\partial(\rho_p C_p T_p)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) \quad (5.76)$$

Enerji denkleminin ele alınışı da kütle denklemine benzer olacaktır. Enerji denkleminin son hali şu şekilde belirlenmiştir:

$$\begin{aligned} \frac{[(\rho_p C_p T_p)_i^{n+1} - (\rho_p C_p T_p)_i^n] \Delta V}{4\pi\Delta t} = & f \left[\frac{r_{i+1/2}^2 \lambda_{p_{i+1/2}} (T_{p_{i+1}}^{n+1} - T_{p_i}^{n+1})}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 \lambda_{p_{i-1/2}} (T_{p_i}^{n+1} - T_{p_{i-1}}^{n+1})}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t \\ & + (1-f) \left[\frac{r_{i+1/2}^2 \lambda_{p_{i+1/2}} (T_{p_{i+1}}^n - T_{p_i}^n)}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 \lambda_{p_{i-1/2}} (T_{p_i}^n - T_{p_{i-1}}^n)}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (5.77)$$

Sınır şartı için, yine enerji denkleminin yüzey parçası üzerinden integre edilmesi gerekmektedir. Ancak, integre ederken buharlaşmadan ötürü olan gizli ısı ve gaz fazı ile duvar arasında oluşan ısı geçişlerinin de dikkate alınması gerekir. Şekil 5.11'de partikülün yüzeyinde etkili olan parametreler gösterilmiştir:

Burada $q_{buh.}$, q_{pg} , q_{pd} sırasıyla, partikülün neminin buharlaşmasından doğan ısı transferini, partikül ile gaz fazı arasında ve partikül ile duvar arasında olan ısı transferini göstermektedir.



Şekil 5.11. Yüzeydeki ısı transferi için sınır şartlarında yarım kontrol hacim.

Sınır parçası için ayırt edilmiş denklemin son hali;

$$\begin{aligned}
 \frac{[(\rho_p C_p T_p)_i^{n+1} - (\rho_p C_p T_p)_i^n] \Delta V_i}{4\pi \Delta t} = & -f \left[A_{i-1/2} \lambda_{p_{i-1/2}} \frac{(T_{p_i}^{n+1} - T_{p_{i-1}}^{n+1})}{\delta r_i} \right] - \\
 (1-f) & \left[A_{i-1/2} \lambda_{p_{i-1/2}} \frac{(T_{p_i}^n - T_{p_{i-1}}^n)}{\delta r_i} \right] + f [h_{gp} A_g (T_g^{n+1} - T_{p_i}^{n+1})] + (1-f) [h_{gp} A_g (T_g^n - T_{p_i}^n)] \\
 + f & [\rho_h k_{gp} A_g (X_g^{n+1} - X_{p_i}^{n+1}) b^{n+1}] + (1-f) [\rho_h k_{gp} A_g (X_g^n - X_{p_i}^n) b^n] + \\
 f & [h_{pd} A_{pd} (T_d^{n+1} - T_{p_i}^{n+1})] + (1-f) [h_{pd} A_{pd} (T_d^n - T_{p_i}^n)] \quad (5.78)
 \end{aligned}$$

5.3. Çözüm Yöntemi

Akışkan yatakta kurutma prosesi incelendiğinde, oluşan denklemler iki çeşittir: Gaz fazı için denklemler birinci mertebeden hiperbolik kısmi diferansiyel denklemler, katı faz için ise ikinci mertebeden parabolik kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu farklılıktan ötürü çözüm yönteminin seçimi çok önemlidir. Elde edilen denklemler lineer değildir, bu yüzden yaklaşık çözüme ulaşmak için iyi bir metod belirlemek gerekir.

Akışkan yatak, gazın özelliklerinde aksenal yönde değişikliklerin hesaba katılması için yatağın geometrisi de göz önüne alınarak, sayılı kontrol hacimlere bölünür. Katı

faz da (findık), partikülün içindeki değişikliklerden ötürü sonlu kontrol hacimlere bölünür.

Çözüm için MATLAB 5.2b dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu programda kullanılan denklemler ve programın akış diyagramı Ek A ve B'de mevcuttur. Programda önce verilen şartlara göre konuma bağlı olan değerler hesaplanır. Daha sonra ilk zaman adımından başlayarak her bir denklemin matris sistemi oluşturularak çözülmeye başlanır. Başlangıç değerleri tahmini olarak verilir ve ilk denklemin sonuçları iterasyonla iyileştirildikten sonra diğer denkleme geçilir. Tüm denklemler sırasıyla aynı yöntemle çözüldükten sonra ilk zaman adımı bitmiştir ve ikinci zaman adımına geçilir. Bu zaman adımındaki iterasyonlara girecek ilk değerler bir önceki zaman adımının sonuçlarıdır. Bu işlem son zaman adımına kadar devam eder ve program, sonuçları ekrana grafik olarak, dosyaya ise değer olarak yazar. Deney sonuçları incelendiğinde findıkta önce bir süre sabit hızlı kurutma ve sonra azalan hızlı kurutmanın olduğu görülmektedir. Bu nedenle önce sabit hızlı kurutmanın sonuçları elde edildikten sonra bu değerler azalan hızlı kurutma periyodunun çözümüne başlangıç değeri olarak girilmiştir.

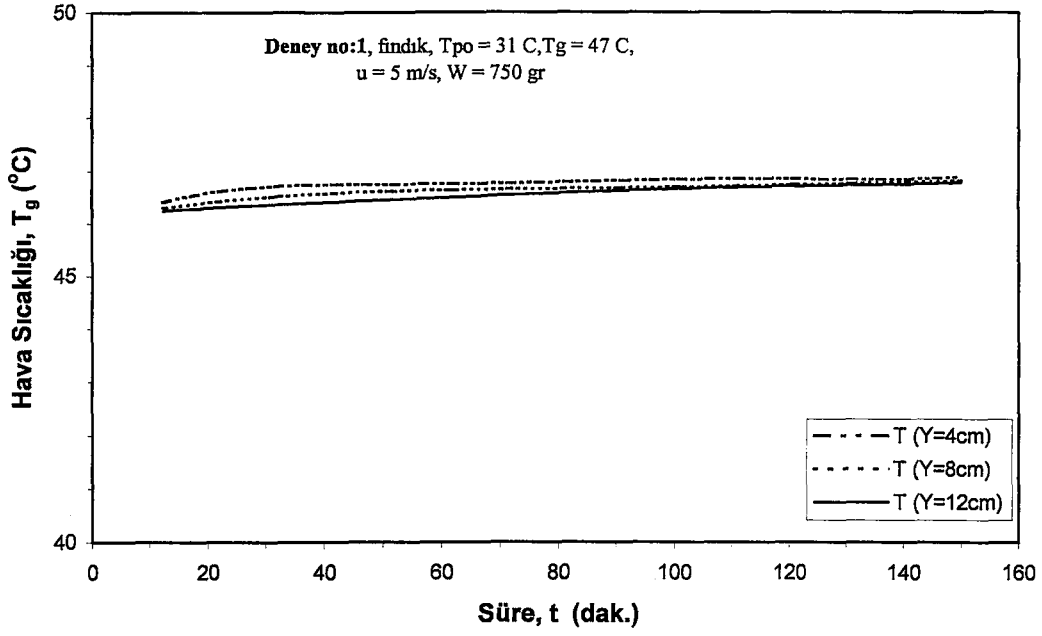
BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE MODEL SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

6.1. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

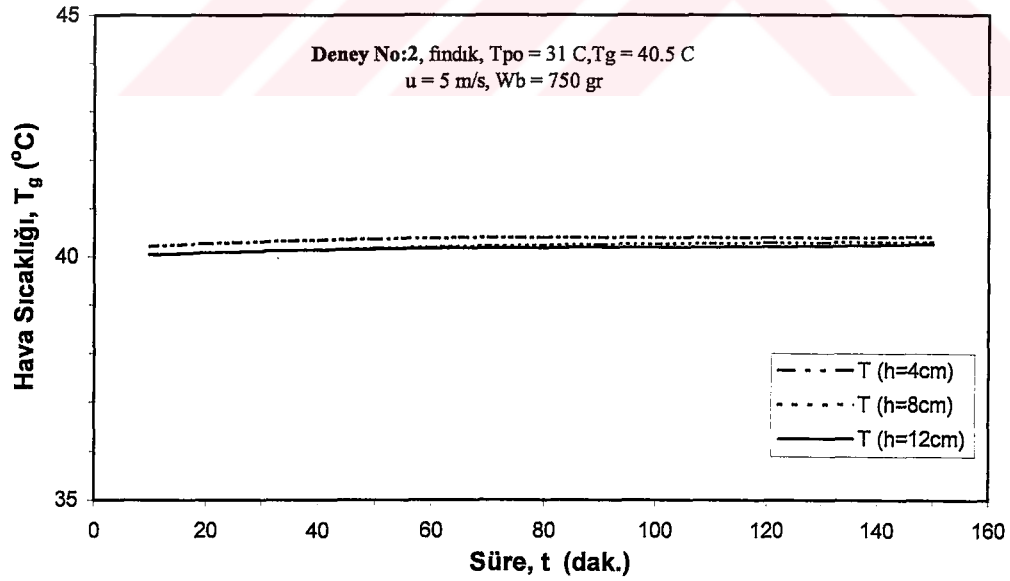
Akışkan yatakta findık kurutma deney tesisatında yeni toplanmış ve önceki döneme ait olmak üzere iki tür findık deneylere tabi tutulmuştur. Yeni toplanmış grup taze findık olarak isimlendirilmiştir. Deneyler esnasında kurutma havasının akışkan yatağa giriş ve çıkış değerleri, akışkan yatak içerisinde belirli noktalardaki sıcaklık değerleri ve findıkların kuruma oranları zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Burada findığın kuruma oranı ile findığın belli bir süre kuruduktan sonraki sahip olduğu nem ile ilk durumdaki nemi arasındaki oran anlaşılmalıdır. Elde edilen değerler grafiklerle sırasıyla önceki dönem findıklar (eski findıklar) ile taze findıklar için aşağıda gösterilmektedir:

6.1.1. Akışkan yatak havasına ait deney sonuçları

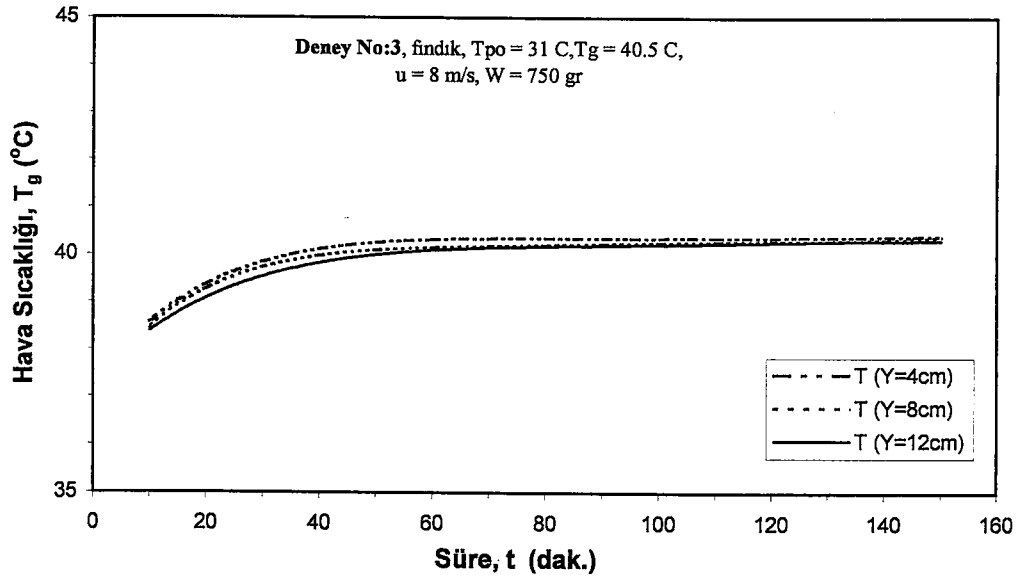
Eski findıklar ile yapılan deneylerde akışkan yatak havasının, yatak içerisindeki sıcaklık değişimi, yatak çıkışındaki nem ve sıcaklık değerlerinin değişimi ile alakalı grafikler aşağıda verilmiştir. Bu deneyler iki farklı hız ve iki farklı hava giriş sıcaklığı için yapılmıştır. Böylece ele alınan özellikler için akışkan yatak hızının ve hava giriş sıcaklığının etkisi belirlenmiştir.



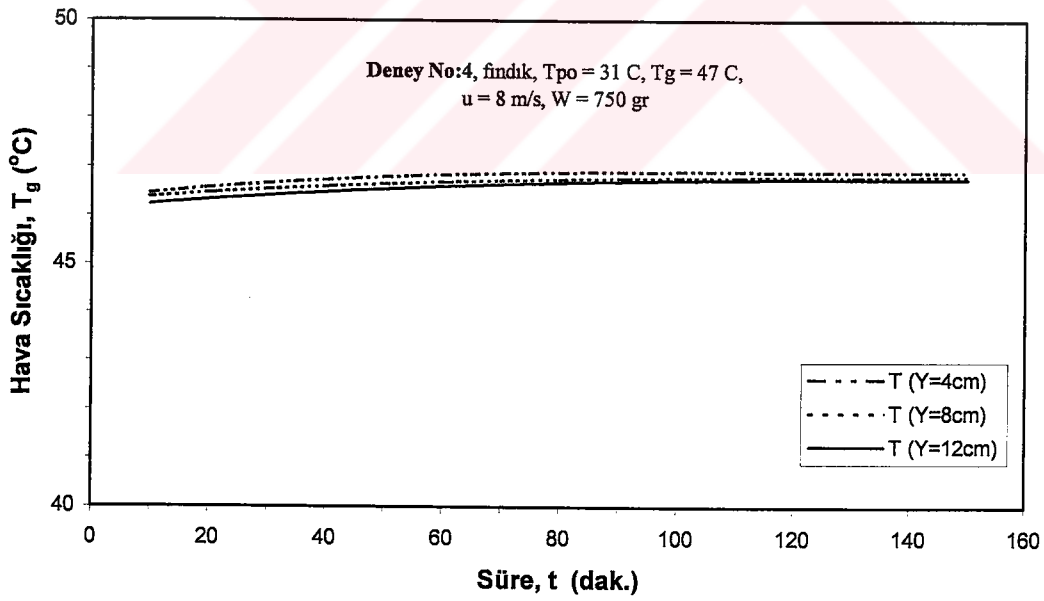
Şekil 6.1. Akışkan yatak havasının yatağın yüksekliğine bağlı sıcaklık değişimi.



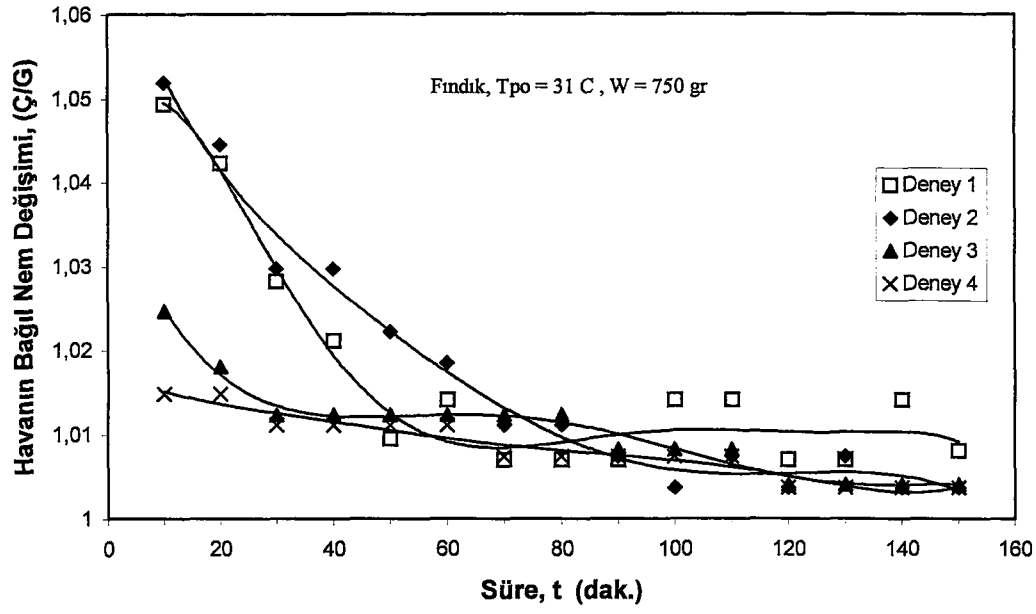
Şekil 6.2. Akışkan yatak havasının yatağın yüksekliğine bağlı sıcaklık değişimi.



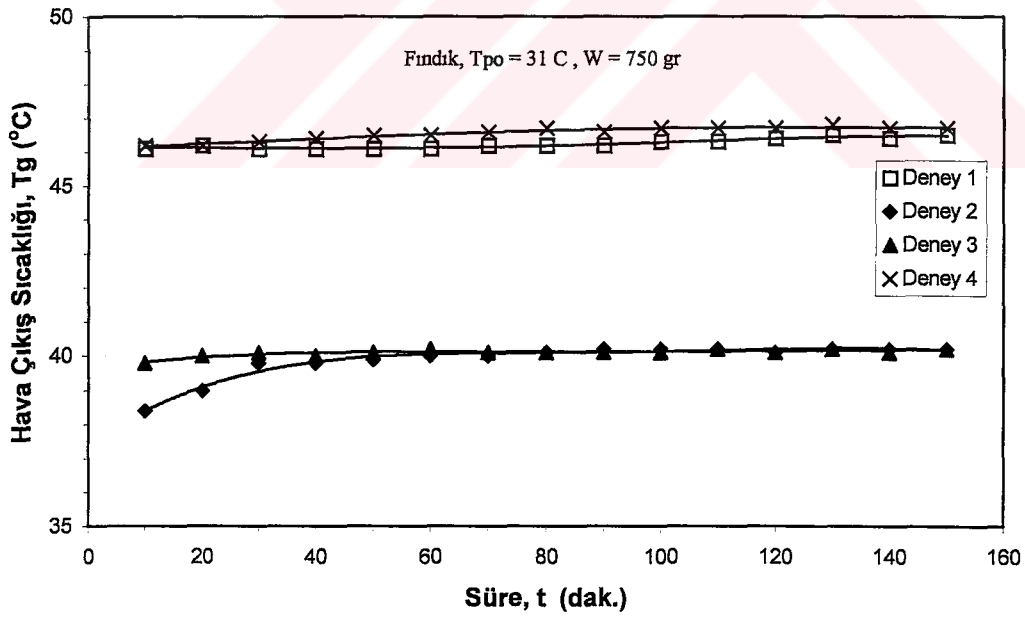
Şekil 6.3. Akışkan yatak havasının yatağın yüksekliğine bağlı sıcaklık değişimi.



Şekil 6.4. Akışkan yatak havasının yatağın yüksekliğine bağlı sıcaklık değişimi.



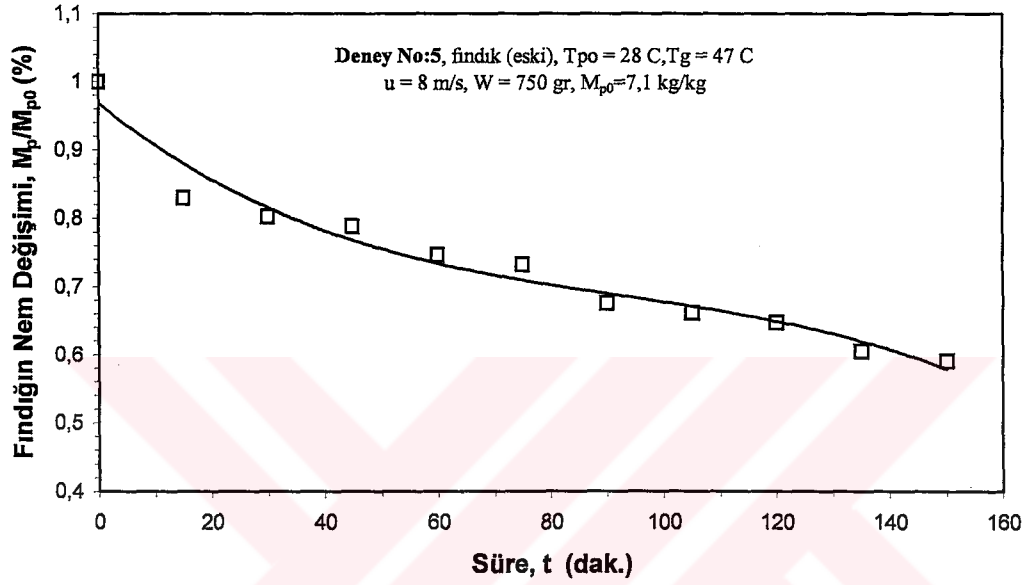
Şekil 6.5. Akışkan yatak havası bağıl neminin zamana bağlı değişimi.



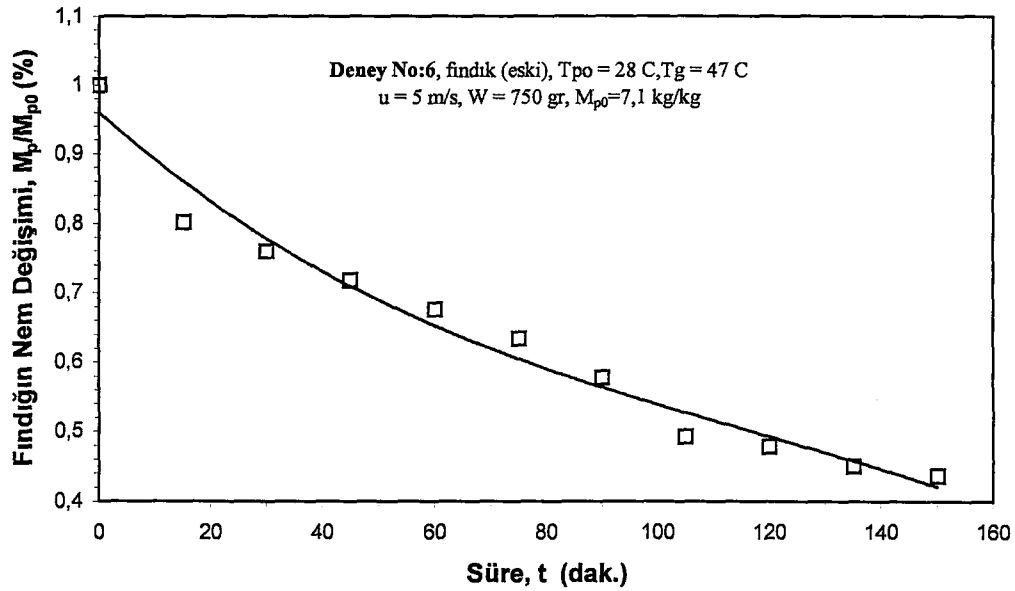
Şekil 6.6. Akışkan yatak havası çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

6.1.2. Akışkan yatakta findığa ait deney sonuçları

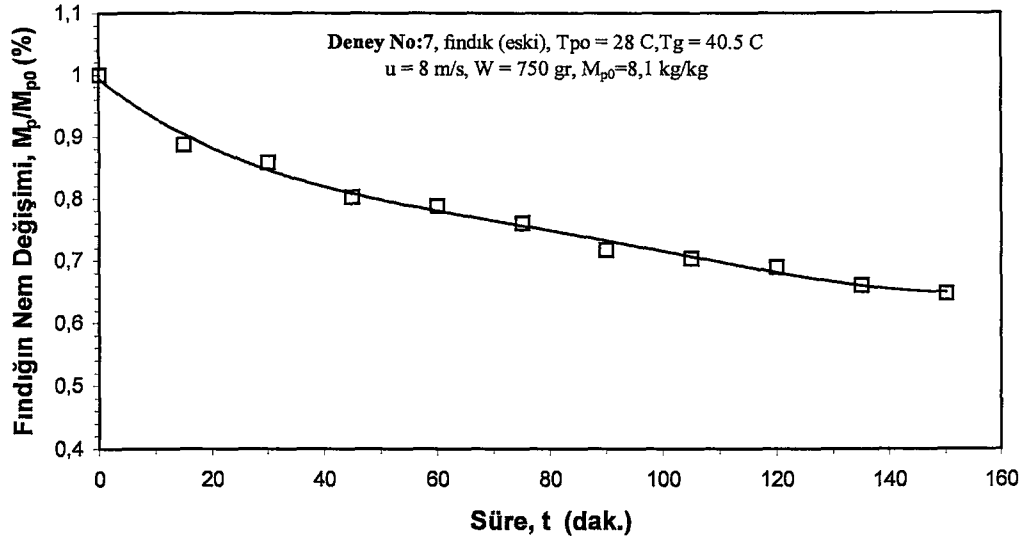
Önceki dönem (eski) findık ile yeni toplanmış taze findığa ait deney sonuçları iki farklı hava hızı ve iki farklı hava giriş sıcaklığı için elde edilmiştir.



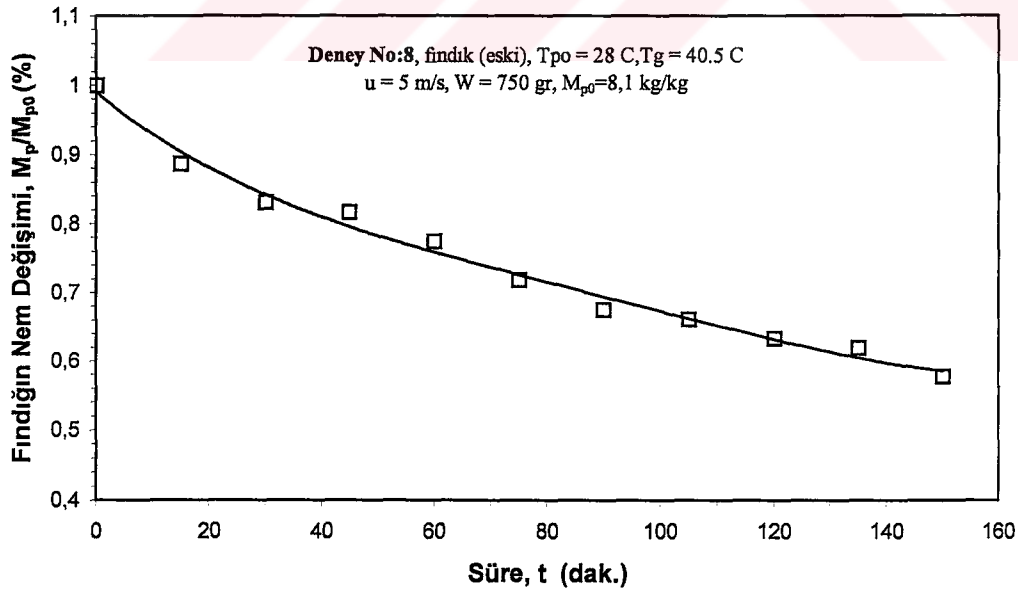
Şekil 6.7. Findığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



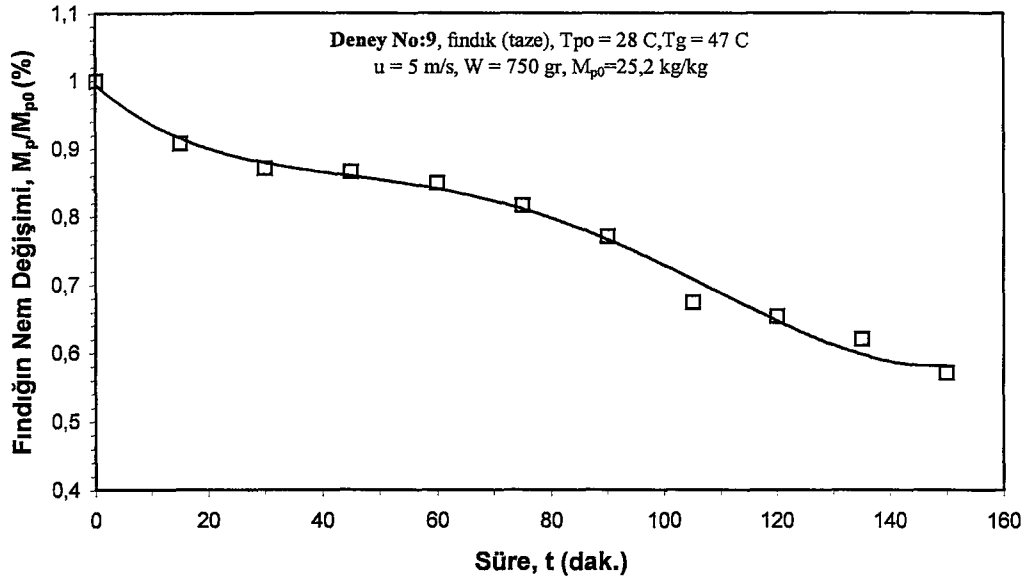
Şekil 6.8. Findığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



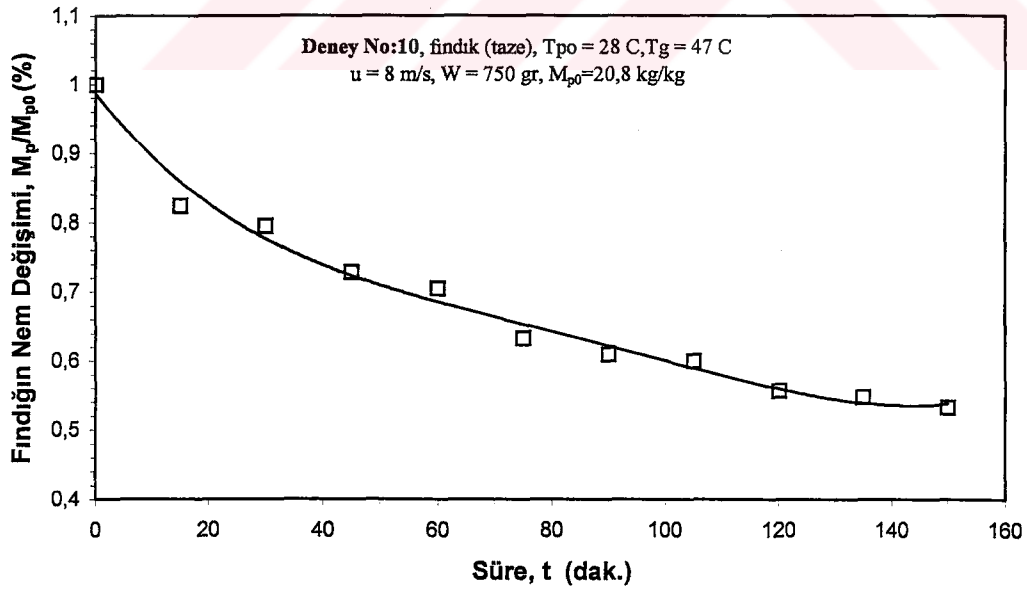
Şekil 6.9. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



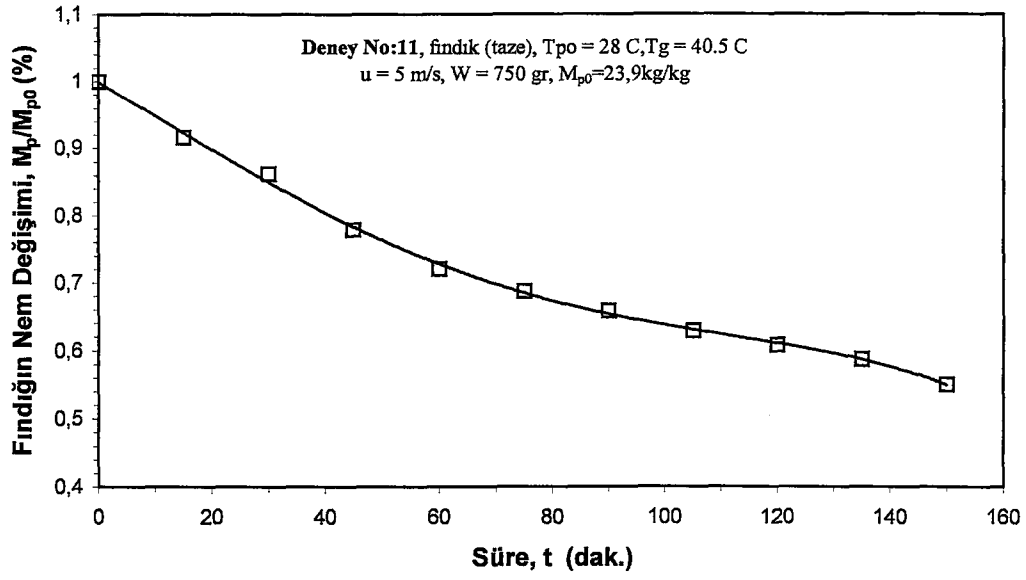
Şekil 6.10. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



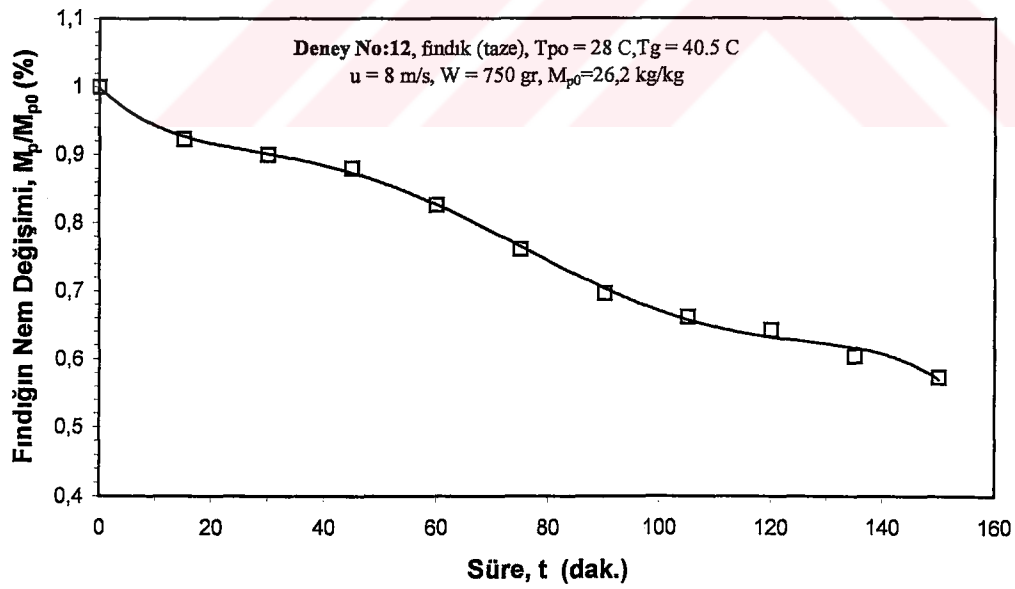
Şekil 6.11. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



Şekil 6.12. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



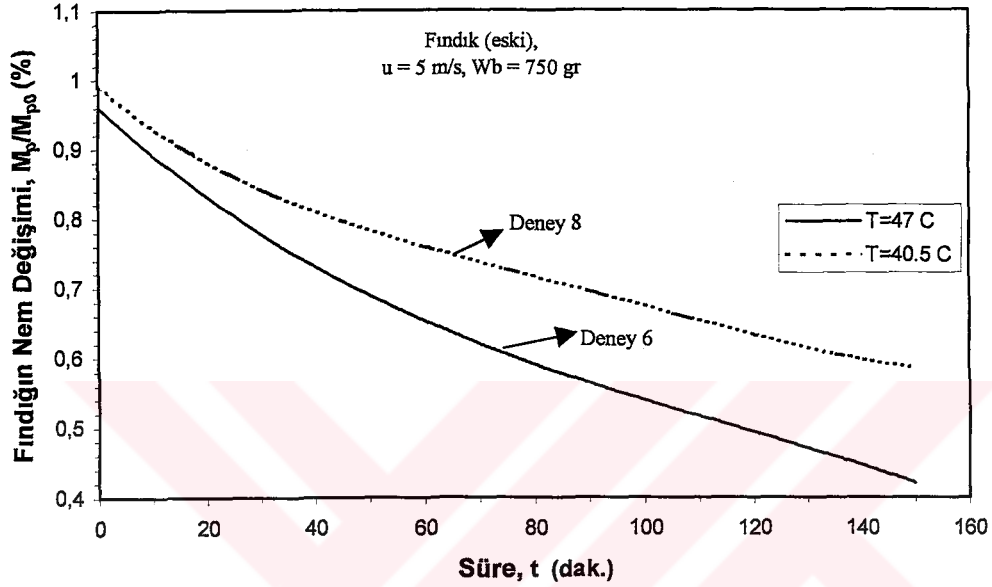
Şekil 6.13. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



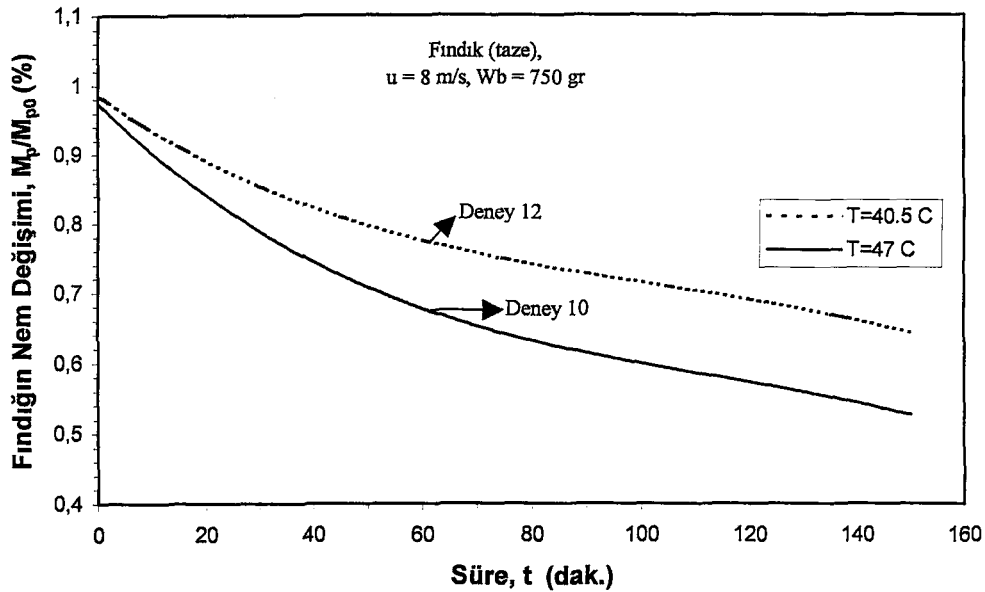
Şekil 6.14. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.

6.1.3. Akışkan yatak havası giriş sıcaklığının etkisi

Eski ve taze findıklarla yapılan deneylerde yatak havasının sıcaklığı değiştirilerek, findığın kurumasına olan etkisi tespit edilmiştir. Elde edilen değerler aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir.

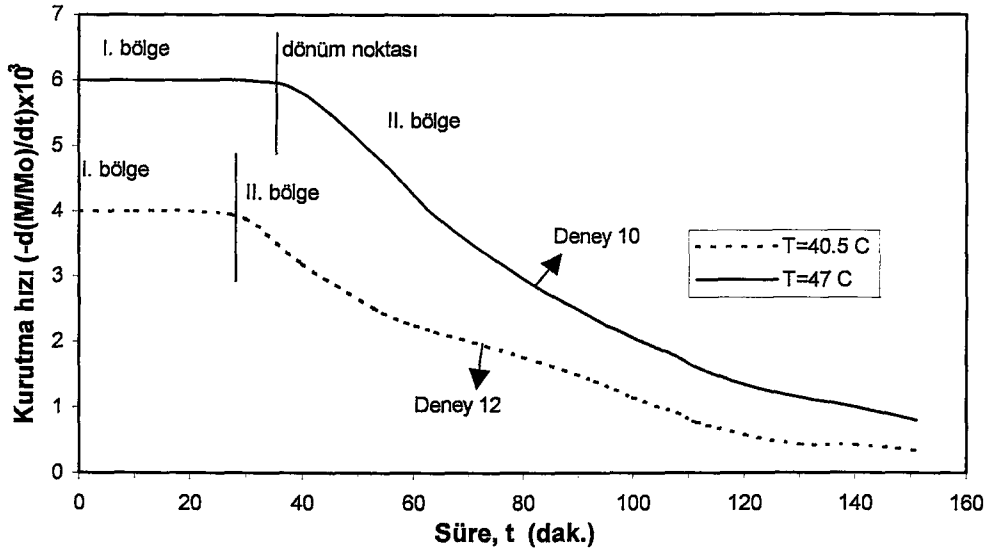


Şekil 6.15. Akışkan yatak havasının giriş sıcaklığının eski findığın kurumasına olan etkisi.

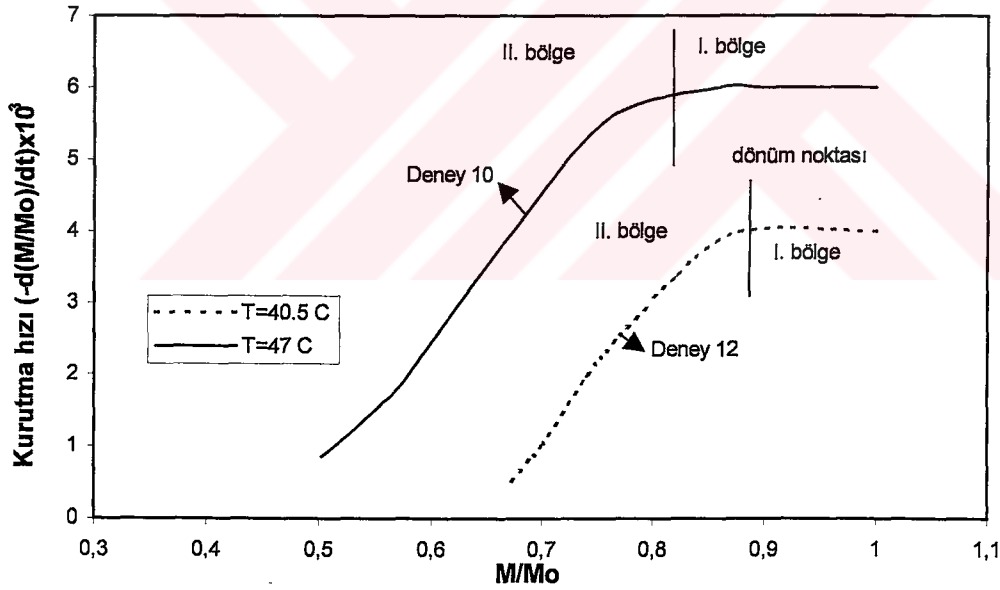


Şekil 6.16. Akışkan yatak havasının giriş sıcaklığının taze findığın kurumasına olan etkisi.

Kurutma hızının zamanla değişimi, deneylerden elde edilen değerler kullanılarak hesaplanmıştır ve aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 6.17. Akışkan yatakta kurutma hızının zamana bağlı değişimi.



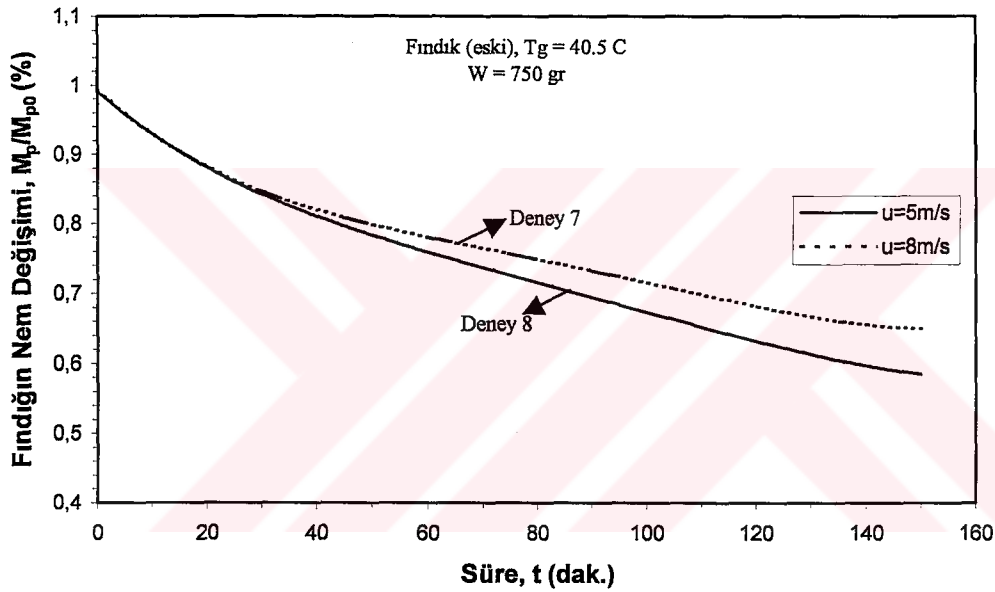
Şekil 6.18. Akışkan yatakta kurutma hızının kurutma oranına bağlı değişimi.

Şekil 6.15 ve 16 incelendiğinde, akışkan yatak havasının giriş sıcaklığı artırıldığında, hem eski hem de taze fındıkların daha iyi kuruma gösterdikleri anlaşılmaktadır. Ayrıca şekil 6.17 ve 18 ele alındığında; yatak havasının sıcaklığı arttıkça kurutma hızının yükseldiği görülmektedir. Bu grafiklerde, başlangıçta sabit hızlı periyotta kurutmanın olduğu, dönüm noktasından itibaren azalan hızlı kurutmaya sistemin

geçtiği elde edilmiştir. Yatak havasının sıcaklığı arttıkça sabit hızlı periyodun biraz daha uzadığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, literatürde, akışkan yatakta kurutmaya tabi tutulan başka tarım ürünleri için de benzer şekilde bulunmuştur.

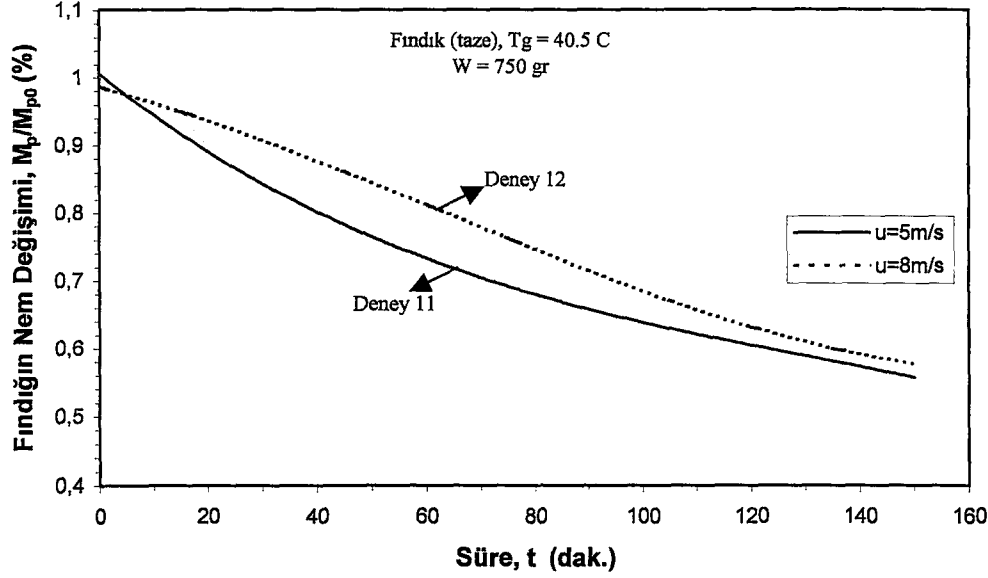
6.1.4. Akışkan yatak hava hızının fındığın kurumasına olan etkisi

Bu defa akışkan yataktaki hava hızının fındığın kurumasına olan etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için her iki grup fındık farklı hava hızlarında kurutmaya tabi tutulmuştur. Sonuçlar şekil 6.19-22’de görülmektedir.



Şekil 6.19. Akışkan yatak hava hızının eski fındığın kurumasına olan etkisi.

Literatüre bakıldığında, bu konuda yapılan çalışmalarda; yazarların bir kısmı hava hızının partikülün kurumasına fazla bir etkisi olmadığını, diğer bir kısmı ise akışkan yatağın bölgelerine göre hızın etkisinin değiştiğini savunmuşlardır. Bu çalışmada, hızın artmasının kurumayı yavaşlattığı görülmektedir. Aslında bunun nedeni incelenen 8m/s hızının bu akışkan yatak için (slugging) gruplaşma hızının üzerinde olmasıdır. Yani akışkan yatakta hız belirli bir değerin üzerine çıktığında artık partiküllerde bir gruplaşma meydana gelir. Bundan dolayı da ısı geçişi ve kütle geçişinde azalma, verimsizlik ortaya çıkar.



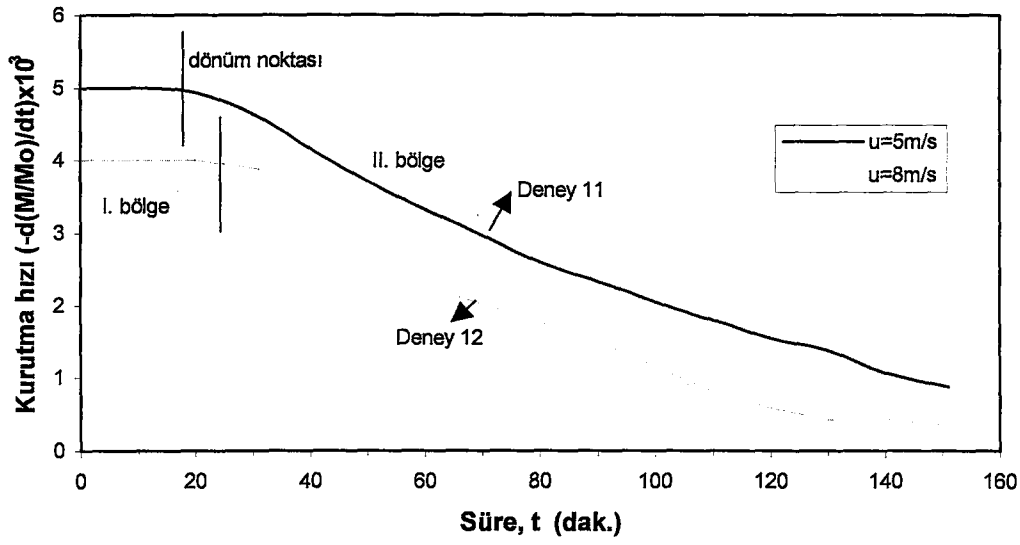
Şekil 6.20. Akışkan yatak hava hızının taze fındığın kurumasına olan etkisi.

Literatürde minimum slugging (gruplaşma) hızı için şu ifade mevcuttur (DiMATTIA ve arkadaşları [22]);

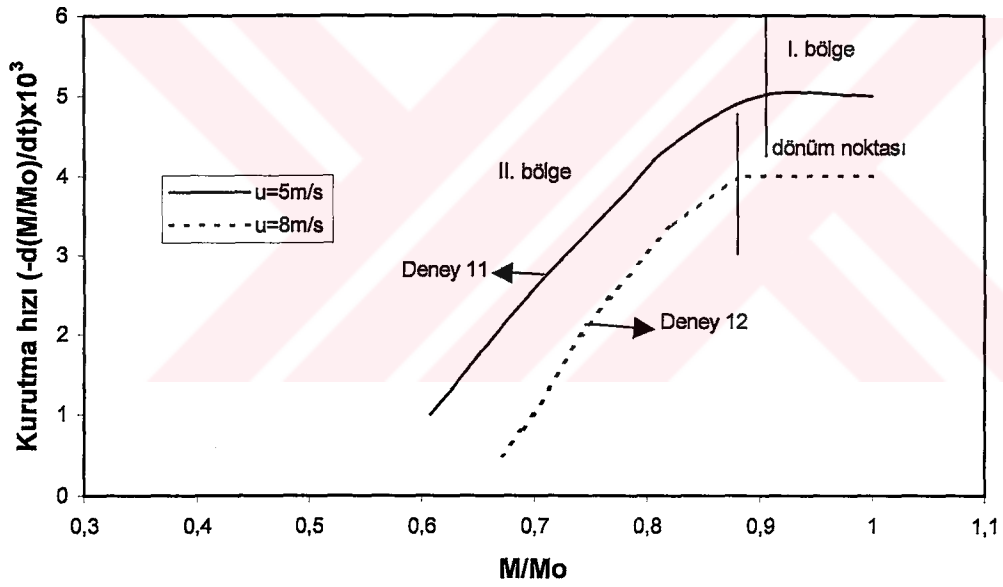
$$U_{ms} = U_{mf} (1.0551 - 2.283 \log \Psi_s)$$

Burada; U_{ms} , minimum gruplaşma hızını, Ψ_s , partikülün küreselliğini göstermektedir. Bu ifadeye göre fındık için minimum gruplaşma hızı 6,3 m/s çıkmaktadır.

Dolayısıyla şekil 6.19 ve 20 ele alındığında; aslında hava hızının çok fazla etkin olmadığı fakat, genelde 5m/s hızının 8m/s'ye göre daha iyi noktalar verdiği görülmektedir. Bunun sebebi 8m/s hızının minimum gruplaşma hızından yüksek olması yani akışkan yatakta gruplaşmaların başlamış olması ve bu yüzden ısı transfer katsayısının yatak ortalaması için düşük olmasıdır. Buna bağlı olarak şekil 6.21 ve 22 incelendiğinde; hava hızı arttıkça gruplaşmadan ötürü kurutma hızının düştüğü ve sabit oran periyodunun uzadığı görülmektedir.



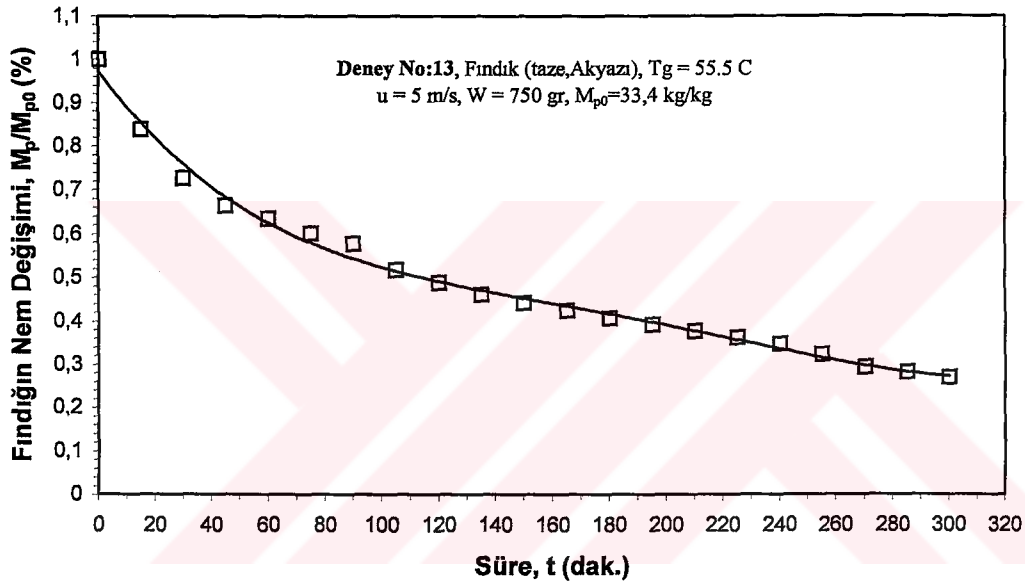
Şekil 6.21. Akışkan yatakta kurutma hızının zamana bağlı değişimi.



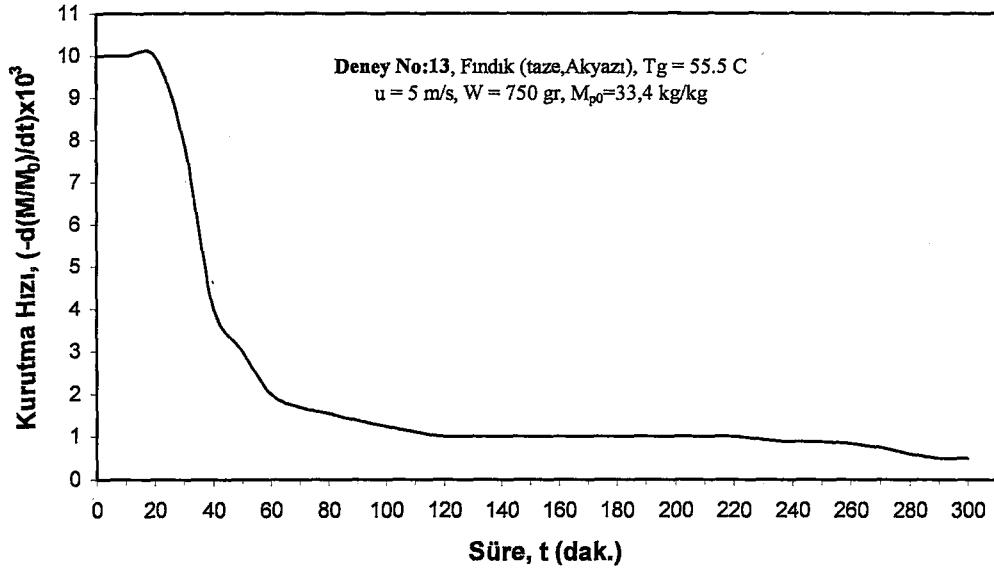
Şekil 6.22. Akışkan yatakta kurutma hızının kurutma oranına bağlı değişimi.

6.1.5. Fındık türünün kurutmaya olan etkisi

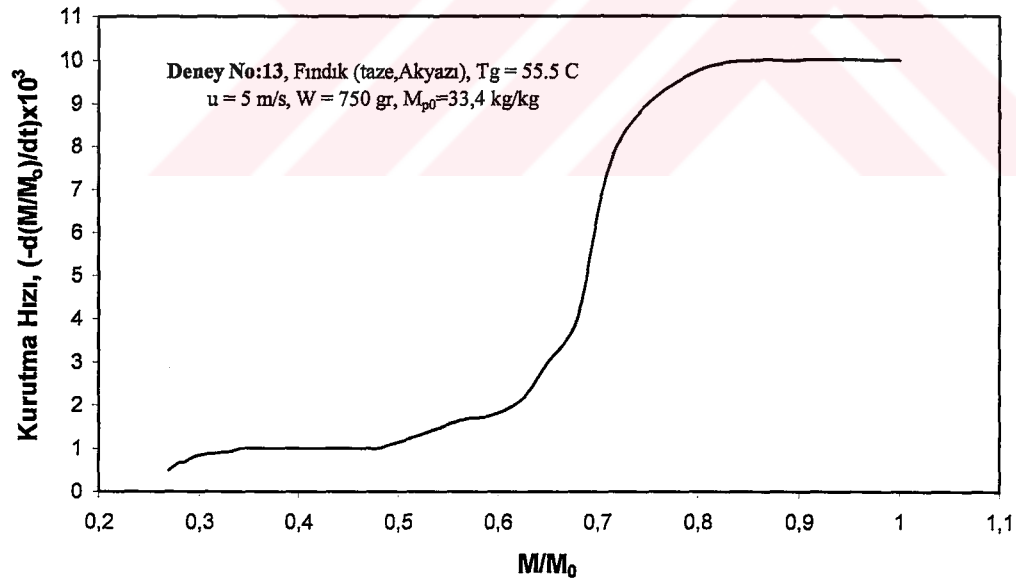
Akışkan yataкта fındık kurutma prosesine farklı bölgelerden toplanan fındıkların yani fındık türünün bir etkisi olup olmadığını belirlemek üzere, Sakarya iline bağlı Karasu ve Akyazı ilçelerinden yeni toplanmış (taze) fındıklar deneye tabi tutulmuştur. Bu deneylerde sıcaklık $55,5^{\circ}\text{C}$ 'a kadar çıkarılmış ve kurutmanın seyrini ortaya koymak için deney süresi uzatılarak, 5 saat yapılmıştır. Deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde özetlenmiştir.



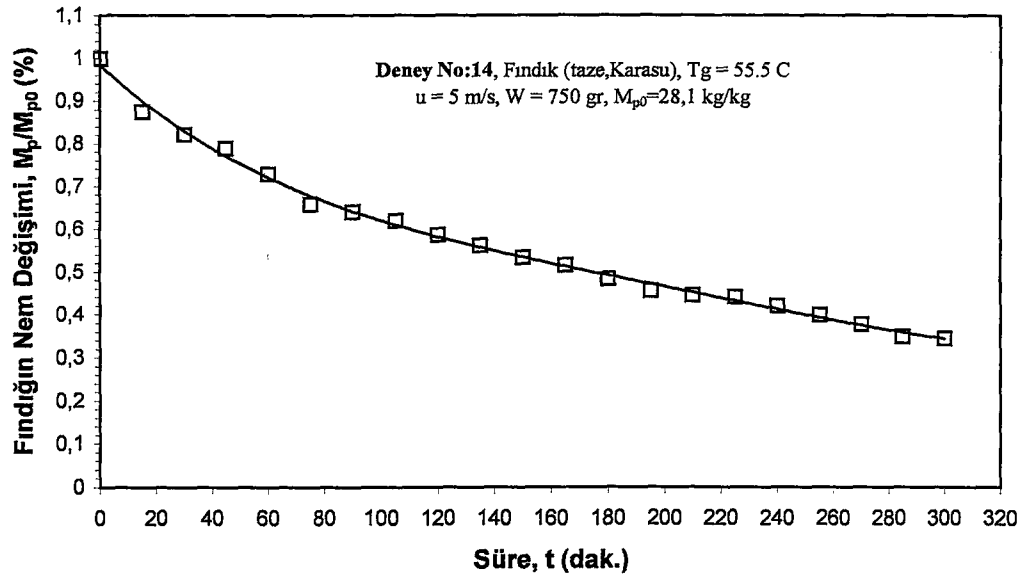
Şekil 6.23. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



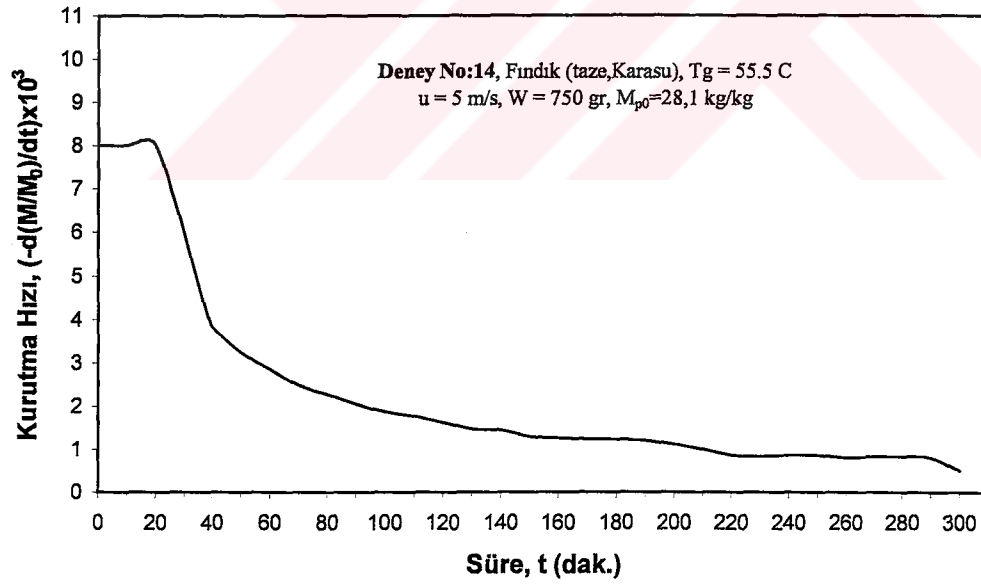
Şekil 6.24. Akışkan yatakta kurutma hızının zamana bağlı değişimi.



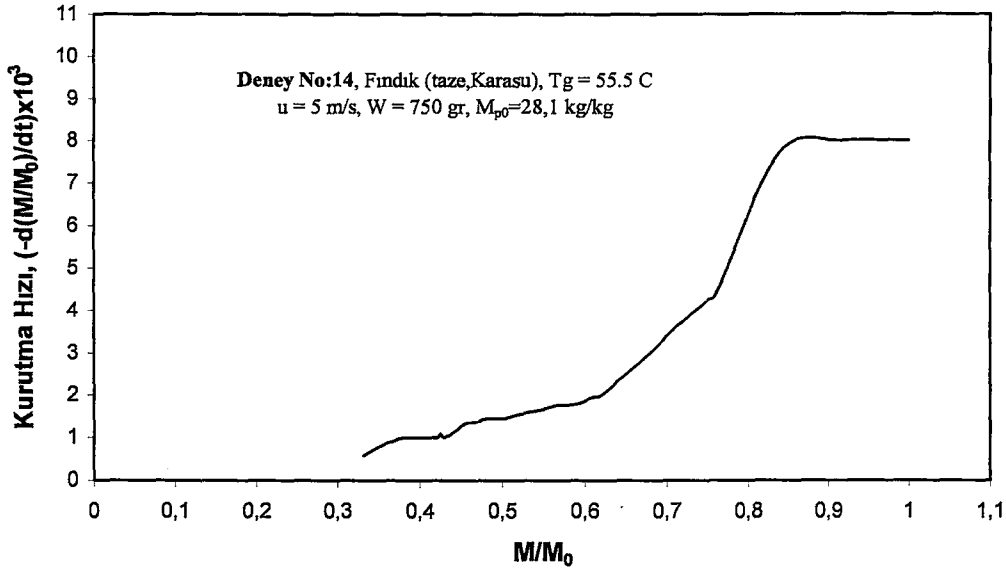
Şekil 6.25. Akışkan yatakta kurutma hızının kurutma oranına bağlı değişimi.



Şekil 6.26. Fındığın nem oranının zamana bağlı değişimi.



Şekil 6.27. Akışkan yatakta kurutma hızının zamana bağlı değişimi.

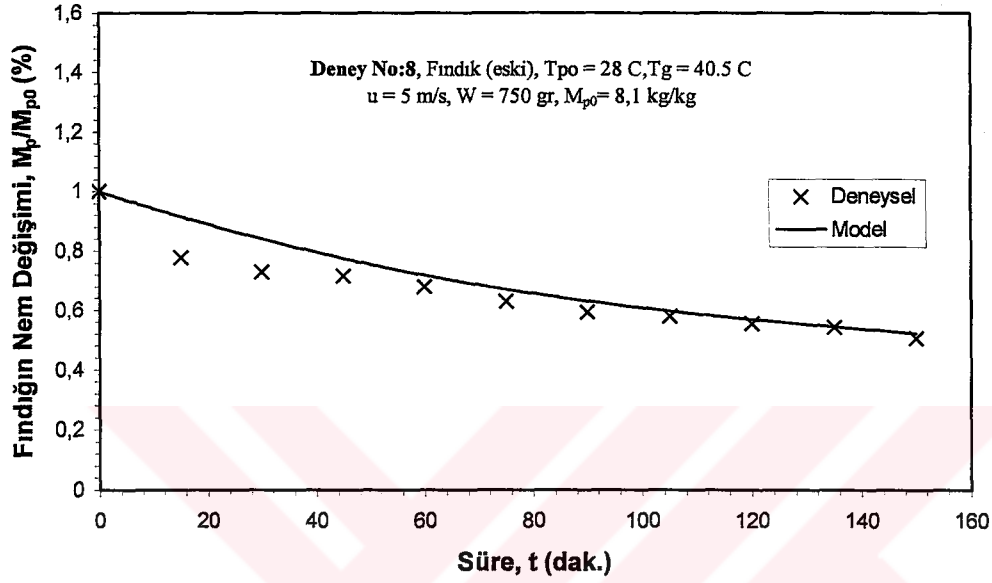


Şekil 6.28. Akışkan yatakta kurutma hızının kurutma oranına bağlı değişimi.

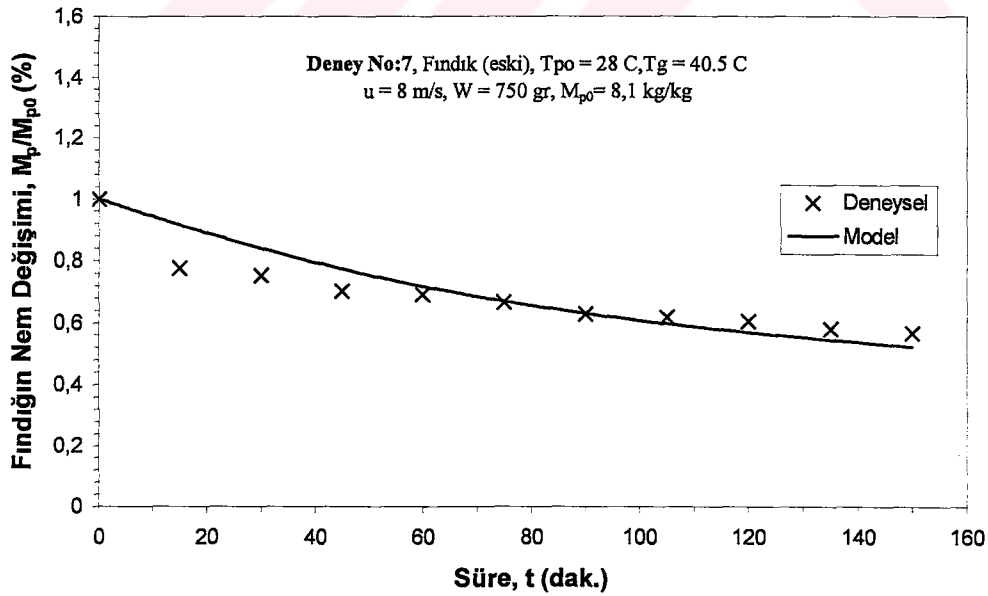
Akyazı ve Karasu bölgelerinin fındıklarına ait sonuçlar incelendiğinde; şekil 6.23 ile 6.26 karşılaştırıldığında Akyazı bölgesi fındığının daha nemli olduğu ilk olarak göze çarpmaktadır. 5 saatlik deney süresi sonucunda Akyazı fındığının başta daha çok nemli olmasına rağmen Karasu fındığına göre daha fazla kurumuş olduğu tespit edilmiştir. Bunda fındığın farklı fiziksel özellikler (kabuk yapısı vs.) taşımasının etkisi düşünülebilir. Şekil 6.24-27 ve 6.25-28 ele alınırsa; Akyazı bölgesi fındığının kurutma hızının diğer bölgeye göre daha yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu da Akyazı bölgesi fındığının daha çabuk kuruduğunun bir sonucudur. Her iki fındık türünde de kurutma oranı düştükçe kurutma hızının da azaldığı sonucu elde edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak; akışkan yatakta kurutma prosesinde, akışkan yatağın giriş havası hızı ve sıcaklığı haricinde farklı bölgelerden toplanan fındık türlerinin de proses sonuçlarını etkileyebileceği göz önünde tutulmalıdır.

6.2. Deney Sonuçları İle Matematiksel Modelin Karşılaştırılması

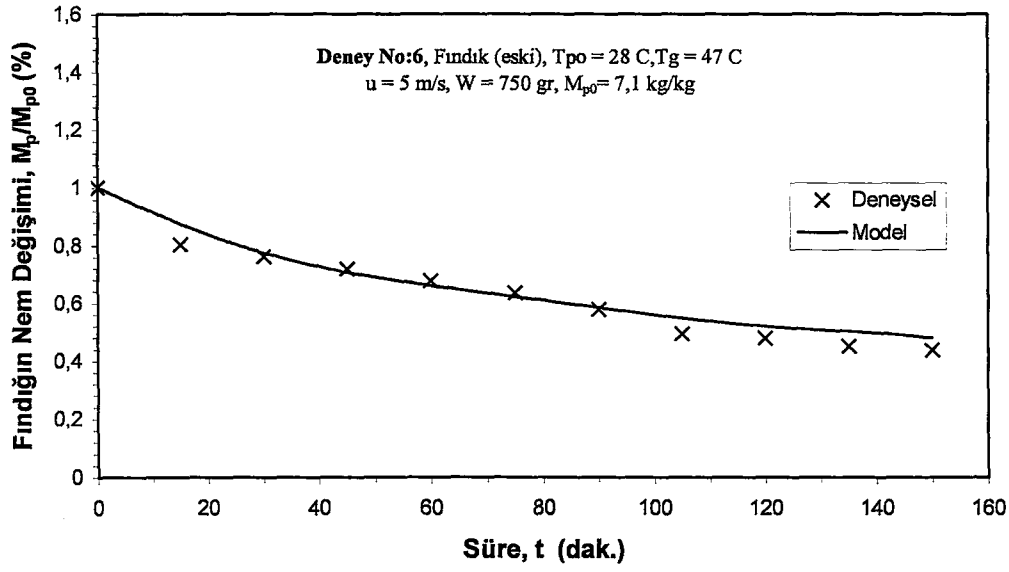
Çözömlenen model ile deneysel değeerler arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler aşağıda gösterilmektedir.



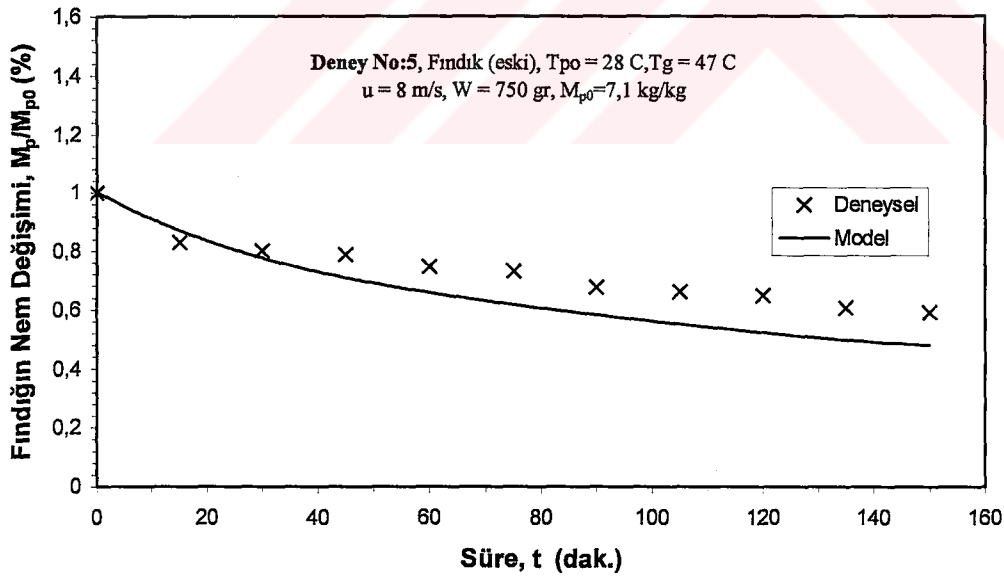
Şekil 6.29. Eski fındığa ait model sonuçlarının deneysel değeerlerle karşılaştırılması.



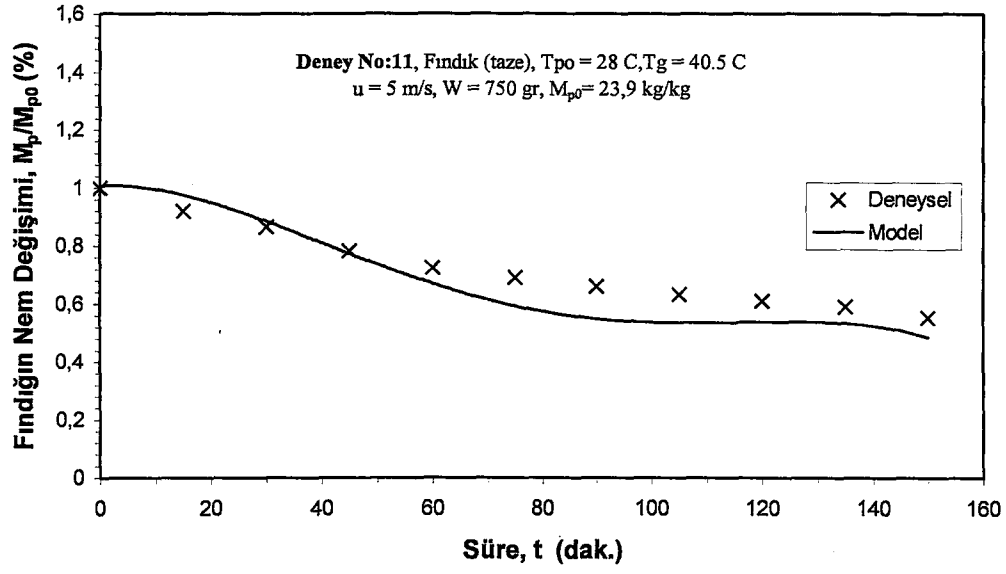
Şekil 6.30. Eski fındığa ait model sonuçlarının deneysel değeerlerle karşılaştırılması.



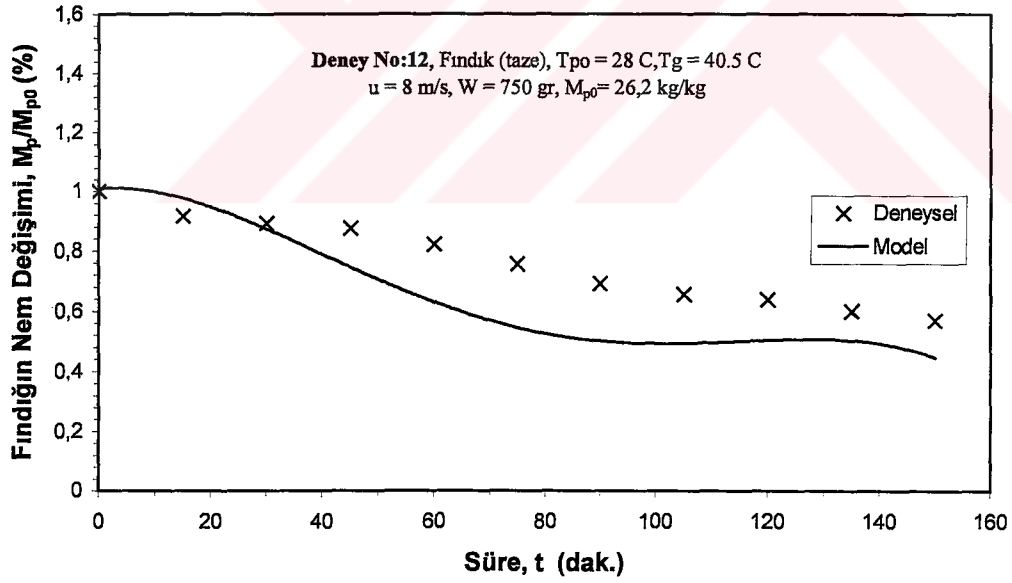
Şekil 6.31. Eski fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.



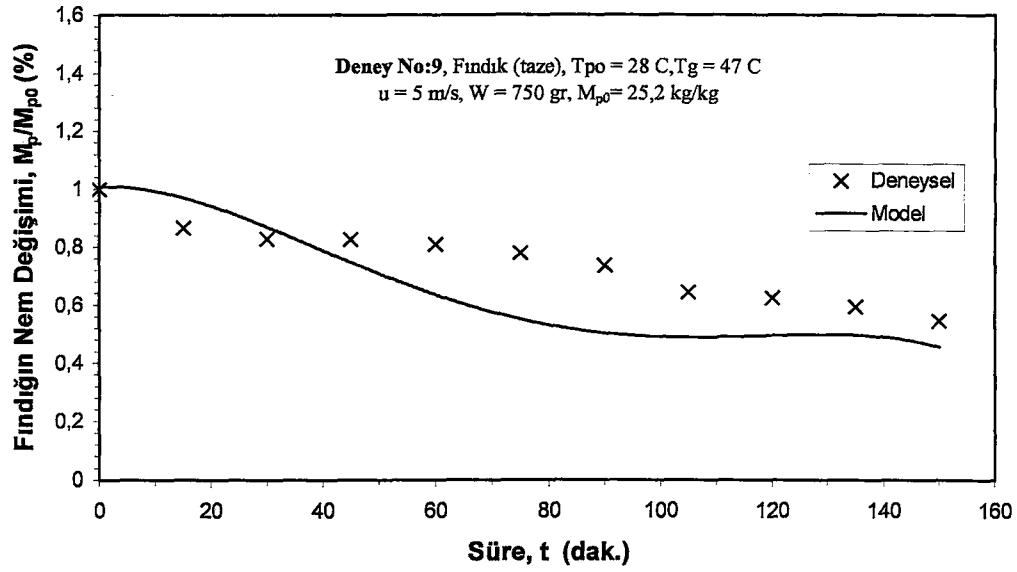
Şekil 6.32. Eski fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.



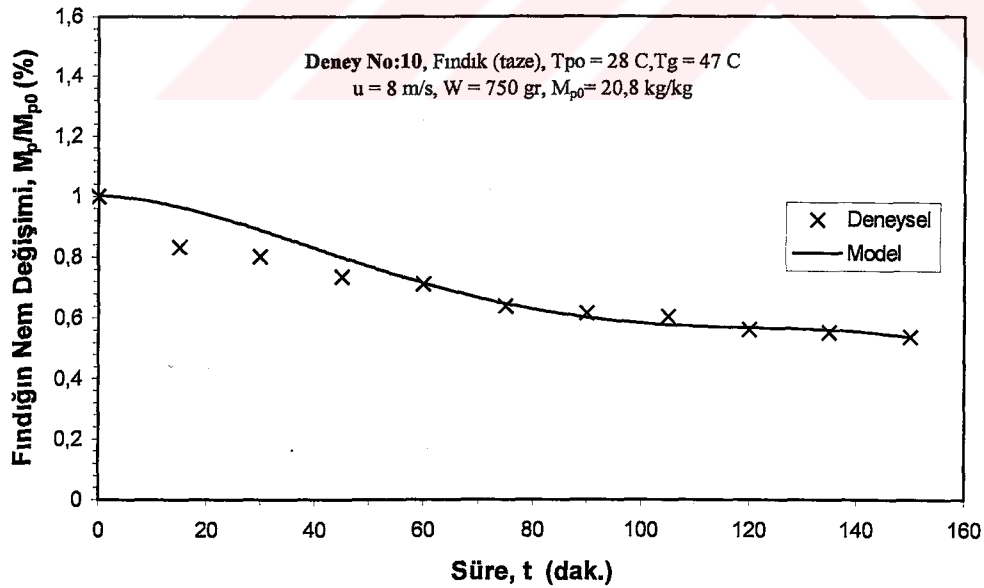
Şekil 6.33. Taze fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.



Şekil 6.34. Taze fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.



Şekil 6.35. Taze fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.



Şekil 6.36. Taze fındığa ait model sonuçlarının deneysel değerlerle karşılaştırılması.

Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü üzere, model sonuçları deneysel değerlere yakın olmaktadır. Fakat akışkan yatağın gruplaşma hızının üzerindeki hızlarda kuruma

hızının azalması modelde tam olarak ortaya çıkmamaktadır. Dolayısıyla model sonuçlarında 5m/s hıza göre 8m/s hızda kurumanın daha iyi olduğu görülmektedir. Tüm grafiklere ait genel sonuçlar diğer bölümde açıklanacaktır.



BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Akışkan yatak boyunca, kurutmanın ilk safhalarında yükseklik arttıkça hava sıcaklığında bir düşmenin meydana geldiği ve belirli bir yükseklikteki sıcaklığın da zamanla arttığı görülmektedir. Ancak, kurumanın ileri safhalarında artık yatağın sıcaklık gradyanının kaybolduğu ve sıcaklıkların çok yakın hale geldiği anlaşılmaktadır. Ayrıca yatak havası sıcaklığının artmasıyla yataktaki sıcaklık gradyanının kaybolmasının yavaşladığı fakat hava hızının artmasıyla sıcaklık gradyanının kaybolmasının hızlandığı görülmektedir.

Yatak havasının nem oranının kurutmanın ilk safhalarında oldukça hızlı düştüğü daha sonra ise kuruma hızının düşmesiyle doğru orantılı olarak yatak havasının neminin düşmesinin yavaşladığı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca hava sıcaklığı ve hızı arttıkça hava çıkış neminin daha hızlı azaldığı belirlenmektedir.

Yatak havasının çıkış sıcaklığının zamanla arttığı ve kurumanın ileri safhalarında dengeye geldiği görülmektedir. Çıkış sıcaklığının dengeye gelmesi yatak havasının sıcaklığı arttıkça yavaşlamakta, hava hızı arttıkça hızlanmaktadır.

Hem eski hem de taze fındık için yatak havasının sıcaklığı arttıkça kurumanın daha fazla olduğu görülebilir. Yatak havasının sıcaklığı ile kuruma hızı doğru orantılı olarak bulunmuştur.

Kuruma hızının 1. bölge olarak ifade edilen sabit hızlı kurutma periyodunda sabit kaldığı ama dönüm noktasından sonra kuruma hızının zamanla düştüğü belirlenmiştir. Bu kuruma hızının azaldığı II. bölge, azalan hızlı kurutma periyodu olarak ifade edilir. Kuruma hızının yatak havasının sıcaklığı ile doğru orantılı olduğu şekilden anlaşılabilir. Burada bir sonuç daha vardır; yatak havasının sıcaklığı arttıkça sabit oran periyodunun zamanının daha uzun olduğu ortaya çıkar.

Normalize nem konsantrasyonu arttıkça kuruma hızının arttığı yani; doğru orantılı oldukları sonucu çıkarılabilir.

Daha önceki çalışmalarda da bulunduğu gibi bu çalışmada hava hızının kurumaya çok fazla bir etkisi olmadığı söylenebilir. Fakat bu çalışmada yatak hava hızının 5m/s'den 8m/s'ye çıkarılması sonucu findığın kurumasının yavaşladığı ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni 8m/s hava hızının findık için minimum gruplaşma hızından fazla olması ve bu yüzden yatağın gruplaşma rejimine girmesidir. Sonuç olarak, gruplaşma rejimine giren sistemde kuruma diğerine göre daha yavaş olacaktır.

Hava hızı arttıkça azda olsa kurutma hızının bundan etkilendiği ve ters orantılı olarak düştüğü görülmektedir. Tabi ki yine bunda gruplaşma rejiminin etkisi vardır. Ayrıca sabit oran periyodunun zamanının yatak hava hızı ile doğru orantılı olduğu sonucu da elde edilmiştir.

Akyazı bölgesi findığının Karasu bölgesi findığına göre daha nemli olduğu ilk olarak göze çarpmaktadır. Akyazı findığının başta daha çok nemli olmasına rağmen Karasu findığına göre daha fazla kurumuş olduğu tespit edilmiştir. Bunda findığın farklı fiziksel özellikler (kabuk yapısı vs.) taşımasının etkisi düşünülebilir.

Akyazı bölgesi findığının kurutma hızının diğer bölgeye göre daha yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu da Akyazı bölgesi findığının daha çabuk kuruduğunun bir sonucudur. Her iki findık türünde de kurutma oranı düştükçe kurutma hızının da azaldığı sonucu elde edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak; akışkan yatakta kurutma prosesinde, akışkan yatağın giriş havası hızı ve sıcaklığı haricinde farklı bölgelerden toplanan findık türlerinin de proses sonuçlarını etkileyebileceği göz önünde tutulmalıdır.

Model sonuçları ile deneysel değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Görüleceği üzere model sonuçları deneysel değerlere yakındır. Fakat deneysel değerlere göre modelde findığın daha iyi kuruduğu sonucu çıkmaktadır. Bunun sebebi modelin;

difüzyon kontrollü kurutma olduğu kabulüne göre kurulması ve gerçekte kapiler kuvvetlerin de etkili olduğu söylenebilir.

Ayrıca model sonuçları düşük hızlarda deneysel olarak yakın iken 8m/s'de biraz uzaklaşmıştır. Bunun sebebi ise; gerçekte gruplaşma rejimine geçen yatakta kurumanın daha yavaş olması fakat modelin bu rejimin etkilerini görmemesidir.

Genel bir sonuç olarak; toplandıktan sonra fabrikada beklemiş ve bu yüzden tekrar nemlendiği için kırılma aşamasında firelere sebep olan fındığın akışkan yatak sistemiyle tekrar kurutulması hatta yeni toplanan ve yeşilinden ayıklanmış olan fındığın da böyle bir sistemle kurutulmasının mümkün olduğu ve böylece zamandan kazanılabileceği, ayrıca güneşte sererek kurutmaya nazaran fındıklar arasında daha homojen bir kurutmanın olacağı söylenebilir.

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

Kurutma havasının hızının kurumayı fazla etkilemediği sonucundan giderek, gerekli hava hızını sağladıktan sonra hava hızının artırılmasının pek fayda getirmeyeceği hatta aksine kurutmayı yavaşlatacağı unutulmamalıdır.

Ayrıca, ileriye dönük çalışmalarda aşağıdaki incelemelerin yapılmasında fayda vardır;

Kurulan deney setinde değişiklikler yaparak örneğin; delikli plakanın delik çapları küçültülerek fındık çapının kurumayı nasıl etkilediği incelenebilir. Ayrıca farklı partiküller de kurutma prosesine tabi tutulabilir. Yatak havasının giriş neminin, yatak malzemesinin miktarının nasıl bir etki gösterdiği de incelenebilir.

İyi bir fizibilite analizi yapılarak fındığı kırma öncesi son kurutma veya yeni toplanmış fındığı kurutma için bu sistemin diğer sisteme göre olan üstünlüklerinin maliyet açısından değerlendirilmesi yapılabilir.

Kurutmanın aksine aynı sistemde bir nemlendirme prosesi gerçekleştirilebilir mi, nasıl sonuçlar verir, sorularına yönelik araştırmalar yapılabilir.

Sistem sanayide uygulanmak istenirse, yatak havasının ısıtılması için elektrik enerjisine kıyasla güneş enerjisi veya katı yakıt yanma enerjisi kullanılırsa maliyet açısından ve prosese uygunluk açısından nasıl sonuçlar elde edileceği araştırılabilir.

Sistemi terk eden havanın geri kazanılması için değişik öneriler getirilerek verimdeki artış hesaplanabilir.

Sistem elemanlarından dağıtıcı eleğin farklı delik profillerinde performans açısından nasıl etkiler göstereceği de ayrı bir çalışma konusu olabilir.

Akışkan yatağın gövdesinde iç tarafa ısıtıcılar yerleştirilerek kurutma prosesinin olup olmayacağı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ABID M., GIBERT R. LAGUERIE C., “An Experimental and Theoretical Anaysis of the Mechanisms of Heat and Mass Transfer During the Drying of Corn Grains in a Fluidized Bed”, International Chemical Engineering, vol 30, no 4, pp. 632-641, October 1990.
- [2] AKŞAHİN İ., EROĞLU İ., YÜCEL H., “Akışkan Yataklı Katalitik Reaktörlerin Dinamik Davranışları Konusunda Çalışma”, I. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi Tebliğ Kitabı, cilt 1, sayfa 227-235, Ankara, Eylül 1994.
- [3] ALEBREGTSE J.B., “Fluidized Bed Drying: A Mathematical Model For Hydrodynamics and Mass Transfer”, In Heat and Mass Transfer in Fixed and Fluidized Bed, W.P.M. Van Swajj, N.H. Afgan Eds., Hemisphere Publishing Corp., pp. 511-521, New York, 1986.
- [4] ALVAREZ P., SHENE C., “Experimental Study of the Heat and Mass Transfer Drying in a Fluidized Bed Dryer”, Drying Technology, vol 14 (3,4), pp. 701-718, 1996.
- [5] AYFER M., UZUN A., BAŞ F., “Türk Fındık Çeşitleri”, Karadeniz Bölgesi Fındık İhracatları Birliği, Giresun, 1986.
- [6] AYHAN T., BIYIKLIOĞLU A., KAYGUSUZ K., KARABAY H., “Doğu Karadeniz Bölgesinde Fındık ve Çay Ürünlerinin Güneş Enerjisinden de Yararlanarak Kurutma Teknolojisinin Geliştirilmesi, Araştırma Projesi, TÜBİTAK MİSAG-11, Trabzon, Ocak 1994.

[7] AYKEN U., "Design and Construction of a Fluidised Bed For Roasting Diced Potatoes", a Master's Thesis, Mechanical Engineering METU, 93 pp., 1985.

[8] BASILICO C., GENEVAUX J.M. and MARTIN M., "High Temperature Drying of Wood Semi Industrial Kiln Experiments", Drying Technology, 8 (4), pp 751-765, 1990.

[9] BAŞ F., "Önemli Fındık Çeşitlerinin Değişik Sıcaklık ve Nem Koşullarında Muhafazaları Üzerine Bazı Ambalaj Malzemelerinin Etkileri", Doktora Tezi, TÜBİTAK Marmara Bilimsel Endüstriyel Arş. Mer., İzmit-Gebze, 1990.

[10] BHAGYA S., SRINIVASAN K.S., "Effect of Different Methods of Drying on the Functional Properties of Enzym Treated Groundnut Flour", Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 22 (6), pp. 329-333, 1989.

[11] BIÇAKCI M., "Doğu Karadeniz Bölgesinde Havalı Güneş Kollektörü İle Prototip Fındık Kurutma Tesisatı Tasarımı", Y. Lisans Tezi, KTÜ Fen Bil. Ens. Mak. Müh. Anabilim Dalı, Trabzon, Ocak 1989.

[12] BİLGE M., "Seramik Kurutma Projesine Teorik ve Deneysel Bir Yaklaşım", Termodinamik Dergisi, sayfa 49-50, Mayıs 1994.

[13] BUCAK O., DOĞAN Ö.M. ve UYSAL B.Z., "Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı Kazanda Isı Transferi", Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü IV. Ulusal Sempozyumu, Akdeniz Üniv. Fen Bil. Ens., sayfa 15-27, 20-22 Mayıs 1997.

[14] BÜYÜKTÜR A.R., GENCELİ O.F., AKIN C., "75 kW gücünde Kömür Yakan Akışkan Yataklı Kazan Tasarımı ve Deneyler", Isı Bilimi ve Tekniği 6. Ulusal Kongresi, sayfa 297-310, Eylül 1987.

[15] CAN A., "Kurutma Koşullarında Biyolojik Ürünler İçinden Nem Transportunun Kinetiği", Mühendis ve Makine Dergisi, 33, 392, sayfa 9-12, 1992.

- [16] CAN A., GÜNAÇAR M., ERGENER D., “Güneş Enerjisi İle Isıtılmış Hava İle Kurutma Şartlarında Kabak Çekirdeklerinden Nem Transportunun Kinetiği”, İTÜ Mak.Fak. 1. Mak.Müh. Kongresi, sayfa 102-112, 1997.
- [17] CHANDRAN A.N., RAO S.S., VARMA Y.B.G., “Fluidized Bed Drying of Solids”, AICHE Journal, vol 36, no 1, pp. 29-38, January 1990.
- [18] CIESIELCZYK W., “Anology of Heat and Mass Transfer During Constant Rate Period in Fluidized Bed Drying”, Drying Technology, vol 14, (2), pp. 217-230, 1996.
- [19] DALOĞLU A., “Çok Katmanlı Kürede Geçici Rejimde Isı Transferinin Nümerik Hesaplanması” Y. Lisans Tezi, KTÜ Fen Bil. Ens. Mak. Müh. Anabilim Dalı, Trabzon, 1982.
- [20] DEMİRTAŞ C., “Fındık Kurutma Şartlarının Belirlenmesi”, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Mak. Müh. Anabilim Dalı, 133 sayfa, Trabzon, Temmuz 1996.
- [21] DIMATTIA D.G., AMYOTTE P.R., HAMDULLAHPUR F., “Fluidized Bed Drying of Large Particles”, Transactions of the ASAE, vol 39 (5), pp. 1745-1750, 1996.
- [22] DIMATTIA D.G., AMYOTTE P.R., HAMDULLAHPUR F., “Slugging Characteristics of Group D Particles in Fluidized Beds”, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol 75, pp. 452-459, April 1997.
- [23] DİNÇER İ., “Soğuk Su Banyosunda Soğutulan Küresel Şekilli Domatesin Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi”, Mühendis ve Makine Dergisi, 33, 387, sayfa 21-26, 1992.
- [24] DİNÇER İ., ERDALLI Y., “Kurutma Prosesinin Analizi”, Termo Klima Dergisi, sayı 10, sayfa 38-51, Ağustos-Eylül 1992.

- [25] DUTTA S.K., NEMA V.K., BHARDWAJ R.K., "Drying Behaviour of Spherical Grains", *Int J. Heat and Mass Transfer*, 31, 4, pp. 855-861, 1988.
- [26] EKİNCİ E., TOLAY M., KADIOĞLU E., "Akışkan Yatakta Uçucu Madde Davranımı", *Uludağ Üniv. Müh. Fak. 1. Yanma Sempozyumu*, Uludağ Basımevi, sayfa 62-73, 1983.
- [27] ERBİL A.Ç., "Prediction of the Fountain Heights in Fine Particle Spouted Bed Systems", *Tr.J. of Engineering and Enviromental Sciences*, 22, pp. 47-55, 1998.
- [28] EROĞLU İ., TURGUT F., "Vurulu Akışlı Dolgulu Yataklı Reaktörlerin Hidrodinamiği", *I. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, sayfa 236-243, ODTÜ Ankara, Eylül 1994.
- [29] ERSOY L.E., KÖKSAL M., HAMDULLAHPUR F., "Solid Holdup and Particle Velocity Mesurements in a Circulating Fluidized Bed with Secondary Air Injection", *MAMKON'97, İTÜ Mak.Fak. 1. Mak.Müh. Kongresi*, sayfa 17-22, 1997.
- [30] ESKİN N., "Akışkan Yataklı Kömür Yakıcısı Modeli ve II. Kanun Analizi", *Doktora Tezi*, 126 sayfa, Nisan 1990.
- [31] FRANCIS N.D. and WEPFER W.J., "Experimental and Numerical Analysis of the Drying Characteristics of Modular Carpet Tiles", *Textile Research Journal*, v63, n1, pp. 1-13, Jan 1993.
- [32] GRABOWSKI S., MUJUMDAR A.S., RAMASWAMY H.S., STRUMILLO C., "Evulation of Fluidized Versus Spouted Bed Drying of Baker's Yeast", *Drying Technology*, vol 15, (2), pp. 625-634, 1997.
- [33] GUPTA L.N., "An Approximate Solution of the Generalized Stefan's Problem in Porous Medium", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 18, pp. 15-24, 1975.

- [34] HAJIDAVALLOO E., "Hydrodynamic and Thermal Analysis of A Fluidized Bed Drying System", Thesis of Doctor of Philosophy Dalhousie Univ. Daltech, 173 pages, Halifax, Nova Scotia, 1998.
- [35] HAJIDAVALLOO E., HAMDULLAHPUR F., "Mathematical Modeling of Simultaneous Heat and Mass Transfer in Fluidized Bed Drying of Large Particles", Proceedings of CSME Form 1998, Volume 1: Symposium on Thermal and Fluids Engineering, Toronto-Canada, 19-22 May 1998.
- [36] HOEBINK J.H.B.J., RIETEMA K., "Drying Granular Solids in Fluidized Bed I", Chem. Eng. Sci., vol 35, pp. 2135-2140, 1980a.
- [37] HOEBINK J.H.B.J., RIETEMA K., "Drying Granular Solids in Fluidized Bed II", Chem. Eng. Sci., vol 35, pp. 2257-2265, 1980b.
- [38] JUMAH R.Y., MUJUMDAR A.S., RAGHAVAN G.S.V., "A Mathematical Model for Constant and Intermittent Batch Drying of Grains in a Novel Rotating Jet Spouted Bed", In Mathematical Modeling and Numerical Technique in Drying Technology, Eds., I. Turner, A.S. Mujumdar, Marcel Dekker Inc. New York, 1997.
- [39] KALAFATOĞLU İ.E., ÖRS N., TOLUN R., "Boraks Pentahidratın Kuruma Özellikleri", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, cilt 18, no 2, sayfa 9-15, 1996.
- [40] KANCA M.A., "Fındık Analizi", Bitirme Çalışması, KTÜ Fen Ed. Fak. Kimya Böl., Trabzon, 1984.
- [41] KARABAY H., "Fındık Kurutma", Y. Lisans Tezi, KTÜ Fen Bil. Ens. Mak. Müh. Anabilim Dalı, Trabzon, 1991.
- [42] KARATAŞ Ş., BATTALBEY F.M., "Determination of Moisture Diffusivity of Pistachio Nut Meat During Drying, Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 24 (6), pp. 484-487, 1991.

[43] KATNAŞ N.M., "Drying of Elbistan Lignites in a Continuous Fluidised Bed Dryer", a Master's Thesis, Chemical Engineering Middle East Technical University, 251 pp., 1984.

[44] KEMAL M., "Düşük Değerli Katı Yakıtların Akışkanlaştırılmış Yatakta Yakılarak Değerlendirilmesi", Uludağ Üniv. Müh. Fak. 1. Yanma Sempozyumu, Uludağ Basımevi, sayfa 75-85, 1983.

[45] KIRANOUDIS C.T., MAROULIS Z.B., MARINUS-KOURIS D., "Modeling and Optimization of Fluidized Bed and Rotary Dryers", Drying Technology, vol 15, (3,4), pp. 735-763, 1997.

[46] LIANG T., MEHRA S.K., KHAN M.A., "A Macadamia Nut Curing System for Improving Kernel Recovery", Journal of Agricultural Eng. Research, 43 (2), pp. 103-111, 1989.

[47] LUIKOV A.V., "Analytical Heat Diffusion Theory", Academic Press Inc., New York, 1968.

[48] LUIKOV A.V., "Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies", Pergamon Press, New York, 1966.

[49] LUIKOV A.V., "Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies (Review)", Int. J. Heat and Mass Transfer, 18, pp. 1-14, 1975.

[50] MADRAL E.C., "Akışkan Yataklarda Yanmanın İlk Anlarında Ayrışma Eğilimi ve Kömür Yapısındaki Değişimler", 92 sayfa, 1989.

[51] MAROULIS Z.B., KREMALIS C., KRITIKOS T., "A Learning Process Simulation For Fluidized Bed Dryers, Application to Bentonite", Drying Technology, vol 13, (8.9), pp. 1763-1788, 1996.

- [52] MIKHAILOV M.D., "Exact Solution of Temperature and Moisture Distributions in a Porous Half-Space With Moving Evaporation Front", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 18, pp. 797-804, 1975.
- [53] MOREIRA R.G., BEKKER-ARKEMA F.W., "Moisture Desorption Model for Nonporeil Almonds", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 42 (2), pp. 123-133, 1989.
- [54] ÖZKAYNAK F.T., "Yüksek Sıcaklıklardaki Akışkanlaşmış Yataklarda Isınım İle Isı Geçişinin Deneysel Olarak İncelenmesi", *Uludağ Üniv. Müh. Fak. 1. Yanma Sempozyumu*, Uludağ Basımevi, sayfa 45-62, 1983.
- [55] PAMUK İ., DOĞU T., "Akışkan Yataklarda İki Faz Modeli ve Model Parametrelerinin İncelenmesi", *TÜBİTAK IV: Bolu Kongresi Müh. Araştırma Grubu Tebliğleri (Kimya Seksiyonu)*, sayfa 345-355, İzmir, Ekim 1977.
- [56] PATANKAR S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Pub. Co., McGraw-Hill, 1980.
- [57] PLANCZ B., "A Mathematical Model for Continuous Fluidized Bed Drying", *Chem. Eng. Sci.*, vol 38 (7), pp. 1045-1059, 1983.
- [58] PUIGGALI J.R., BUTSALE J.C. and NUDERU J.P., "The Development and Use of an Equation to Describe the Kinetics of Air Drying of Hazelnuts", *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 20 (4), pp. 174-179, 1987.
- [59] ROOSTAAZAD R., SELÇUK N., ÖNAL I., "A Literature Review on Mathematical Modelling of Atmospheric Fluidized Bed Combusters Including Freeboard Section", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, cilt 12, sayı 3, sayfa 17-24, 1989.
- [60] SABIR S., "Türkiye'de Fındık Pazarlaması", *Türkiye Fındık Politikasının Esasları Semineri Bildiri Kitabı*, İAV, sayfa 103-116, İstanbul, 1998.

- [61] SCHATLER N., KAST W., "A Complete Model of the Drying Curve for Porous Bodies Experimental and Theoretical Studies", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 30, 10, pp. 2031-2044, 1987.
- [62] SELÇUK N., PEKYILMAZ A., "Akışkan Yataklı Kömür Yakıcı Modelinin Deneysel Bulgularla Karşılaştırılarak Değerlendirilmesi", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, cilt 8, sayı 4, sayfa 31-34, 1986.
- [63] SOPONRONNARIT S., PONGTORNKULPANICH A., PRACHAYAWARA-KORN S., "Drying Characteristics of Corn in Fluidized Bed Dryer", *Drying Technology*, vol 15, (5), pp. 1603-1625, 1997.
- [64] SRINIVASA C.K., RAO S.S., VARMA Y.B.G., "A Kinetic Model for Drying of Solids in Batch Fluidized Beds", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol 33, pp. 363-370, 1994.
- [65] SRINIVASA C.K., THOMAS P.P., VARMA Y.B.G., "Drying of Solids in Fluidized Beds", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol 34, pp. 3068-3077, 1995.
- [66] STAKIC M.B., MILOJEVIC D.Z., "Numerical Simulation of Fluidized Bed Drying Process", In *Drying 91*, A.S.Mujumdar, I Filkova eds., Elsevier, pp. 248-256, 1992.
- [67] STANISCH M.A., SCHAJER G.S., KAYIHAN F., "A Mathematical Model of Drying for Hygroscopic Porous Media", *AIChE Journal*, 32, 8, pp. 1301-1311, 1986.
- [68] SUYADAL Y., ÖZTÜRK A., BERBER R., OĞUZ H., "Fosfojipsin Bütümlü Şist İle Birlikte Akışkan Yatak Reaktörde Termal Bozunması", *I. Ulusal Kimya Müh. Kongresi*, ODTÜ Ankara, sayfa 244-251, Eylül 1994.
- [69] ŞAHİN İ., ERKUT A., ÖZTEK L., OYSUN G., ÜSTÜN Ş., "Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesinde Yetiştirilen Fındık Çeşitlerinin Teknolojik Özellikleri Üzerine Araştırmalar", *Araştırma Projesi*, Ondokuz Mayıs Üniv. Ziraat Fak., Samsun 1989.

- [70] TANYILDIZI V., İNALLI M., “Ot Kurutmada Güneş Enerjisinin Dolaylı Kullanımı”, MAMKON’97, İTÜ Mak.Fak. 1. Mak.Müh. Kongresi, sayfa 113-118, 1997.
- [71] TEOMAN Y., “Akışkan Yataklar ile Transfer Yüzeyleri Arasında Isı Aktarımına Etki Eden Faktörler”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, cilt 9, sayı 15-20, 1986b.
- [72] TEOMAN Y., TOLAY M., ATAĞÜL H., EKİNCİ E., “Akışkan Yataklarda Isı Aktarımı Açısından Serbest Bölgelerin Önemi”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, cilt 9, sayı 1, sayfa 31-37, 1986a.
- [73] THEOLOGOS K.N., MAROULIS Z.B., MARKATOS N.C., “Simulation of Transport Dynamics in Fluidized Bed Dryers”, Drying Technology, vol 15, (5), pp. 1265-1291, 1997.
- [74] THOMAS P.P., VARMA Y.B.G., “Fluidized Bed Drying of Granular Food Materials”, Powder Technology, 69, pp. 213-222, 1992.
- [75] TOLAY M., “Akışkan Yatakta Ayrışma ve Aglomerasyon Rejimlerinin Sıcaklık Ölçümleri ve İncelenmesi”, Y. Lisans Tezi, 98 sayfa, 1994.
- [76] TOLAY M., ATAĞÜL H., EKİNCİ E., “Akışkan Yataklı Boiler Tasarımı”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, cilt 6 sayı 3, sayfa 37-42, 1984.
- [77] TOPAL H., DURMAZ A., “Endüstriyel Atmosferik Kabarcıklı Bir Akışkan Yataklı Kazanın Emisyon Davranışının İyileştirilmesi”, Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü IV. Ulusal Sempozyumu, Akdeniz Üniv. Fen Bil. Ens., sayfa 173-184, 20-22 Mayıs 1997.
- [78] TULUNAY E., “Akışkan Yataklı Yanma Sürecinin Donatım ve Denetim Temelleri” Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü I. Ulusal Sempozyumu, sayfa 127-137, Haziran 1991.

- [79] TULUNAY E., “Akışkan Yataklı Yanmada Donanım ve Denetim Temelleri” Türkiye 4. Enerji Kongresi, Özel Oturum Tebliğleri, sayfa 263-273, İzmir, 1986.
- [80] UÇKAN G., “Akışkan Yataklarda Tanecikle Gaz Arasında Isı ve Kütle Geçişi”, Mühendis ve Makine Dergisi, cilt 28, sayı 332, sayfa 21-24, 1987.
- [81] UÇKAN G., ÜLKÜ S., “Drying of Corn Grain in a Batch Fluidized Bed Drier”, In Drying of Solids: Recent Developments, A.S.Mujumdar Ed., pp. 91-96, Wiley, New York, 1986.
- [82] URKAN M.K., ARIKOL M., VURAL H., “Akışkan Yatakta Uçucu Madde Yanma Davranışının İncelenmesi”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, cilt 9, sayı 1, sayfa 39-46, 1986b.
- [83] URKAN M.K., BİLGE D., HEPERKAN H., “Akışkan Yatak Sistemleri”, Mühendis ve Makine Dergisi, cilt 27, sayı 320, sayfa 3-13, 1986a.
- [84] URKAN M.K., HEPERKAN H.A., KINAYYİĞİT G., “Düşük Kaliteli Türk Linyitlerinin Akışkan Yataklı Sistemlerde Yakılarak Değerlendirilmesi”, Türkiye 4. Enerji Kongresi, Özel Oturum Tebliğleri, sayfa 247-261, İzmir, 1986c.
- [85] ÜNAL A., DALOĞLU A., “Küresel Şekilli Kompozit Cisimlerde Isı Transferi”, 10. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, sayfa 139-148, Ankara, Eylül 1995.
- [86] Van BALLEGOOIJEN W.G.E., van LOON A.M., ZANDEN V.D., “Modeling Diffusion-Limited Drying Behaviour in a Batch Fluidized Bed Dryer”, Drying Technology, vol 15, (3,4), pp. 1837-1855, 1997.
- [87] VANECEK V., MARKVART M., DRBOHLAV R., “Fluidized Bed Drying”, Leonard Hill Books, London, 1966.

- [88] VURAL H., HEPERKAN H.A., "Akışkan Yataklarda Çift Katlı Dağıtıcı Elek Kullanımı" Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, cilt 9, sayı 1, sayfa 9-13, 1986.
- [89] WANG B.X., FANG Z.H., "Heat and Mass Transfer in Wet Porous Media and Method Proposed for Determination of the Moisture Transport Properties", Heat and Technology, 2, 1, pp. 29-43, 1984.
- [90] WANG C.Y., SINGH P., "A Single Layer Drying Equation for Rough Rice", paper no: 78-3001, Am. Soc.Agr.Eng.St.Joseph, ML.,1978.
- [91] WANG J.J., "Mathematical Modeling of the Drying Process in Fixed Bed Dryer", Numerical Heat Transfer, part B, vol. 24, pp. 229-241, 1993.
- [92] WHITAKER S., "Simultaneous Heat , Mass and Momentum Transfer in Porous Media; A Theory of Drying", Advances in Heat Transfer, 13, pp. 199-203, 1977.
- [93] YALÇIN G., "Akışkan Yatakta Yanma Sonucu Uçucu Madde Davranımı", Y. Lisans Tezi, 79 sayfa, 1985.
- [94] YALKIN G., ATAĞÜL H., ŞENATALAR A., EKİNCİ E., "Bazı Türk Kömürlerinin Akışkan Yatakta Uçucu Madde Yanma Süreleri", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, cilt 9, sayı 1, sayfa 47-54, 1986.
- [95] YILMAZ F., "Uludağ Şelit Konsantresinin Akışkan Yatakta Kavrulması ile Kükürt Optimizasyonu", Y Lisans Tezi, İTÜ Fen Bil. Ens., 61 sayfa, 1990.
- [96] ZAHED A.H., ZHU J.X., "Modeling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized Bed Dryers", Drying Technology, vol 13 (1,2), pp. 1-28, 1995.
- [97] HILLIGARDT K., WERTHER J., "Local Bubble Gas Hold-up and Expansion of Gas/Solid Fluidized Beds", German Chem. Eng., vol. 9, pp. 215, 1986.

- [98] DARTON C., LANAUZE R.D., DAVIDSON J.F., and HARRISON D., "Bubble Growth Due to Coalescence in Fluidized Beds", Trans. IChemE., vol. 55, pp. 274-280., 1977.
- [99] KUNII D., LEVENSPIEL O., "Fluidization Engineering", Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.
- [100] RANZ E., "Fixation and Transfer Coefficients for Single Particles and Packed Bed", Chem. Eng. Prog., vol. 48, pp. 247-253, 1952.
- [101] HOWARD J.R., "Fluidized Bed Technology", Adam Hilger, New York, 1989.
- [102] T.C. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı İstatistikleri.



EKLER

Ek A. Çözümlenen Denklemler

1- $X_g = X_g(y,t)$ denklemi;

$$\left[(\rho_h \varepsilon_g X_g)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_g X_g)^{n,j} \right] \Delta y + \left[(\rho_h \varepsilon_g u_g X_g)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_g u_g X_g)^{n+1,j-1} \right] \Delta t =$$

$$\left[\rho_h k_{gp} (X_p - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} + \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_b - X_g) \right]^{n+1,j} \Delta y \Delta t$$

Giriş Şartı:

$$t=0 \quad X_g = X_g(y,0)$$

Sınır Şartı:

$$t>0 \quad X_g(0,t) = \text{sabit}$$

2- $X_b = X_b(y,t)$ denklemi;

$$\left[(\rho_h \varepsilon_b X_b)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_b X_b)^{n,j} \right] \Delta y + \left[(\rho_h \varepsilon_b u_b X_b)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_b u_b X_b)^{n,j} \right] \Delta t =$$

$$\left[\rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b) \right]^{n+1,j} \Delta y \Delta t$$

Giriş Şartı:

$$t=0 \quad X_b = X_b(y,0)$$

Sınır Şartı:

$$t>0 \quad X_b(0,t) = \text{sabit}$$

3- $M_p = M_p(r,t)$ denklemi;

$$\left(M_{p_i}^{n+1} - M_{p_i}^n \right) \frac{\Delta V}{4\pi \Delta t} = f \left[\frac{r_{i+1/2}^2 D_{i+1/2} (M_{p_{i+1}}^{n+1} - M_{p_i}^{n+1})}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 D_{i-1/2} (M_{p_i}^{n+1} - M_{p_{i-1}}^{n+1})}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t +$$

$$(1-f) \left[\frac{r_{i+1/2}^2 D_{i+1/2} (M_{p_{i+1}}^n - M_{p_i}^n)}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 D_{i-1/2} (M_{p_i}^n - M_{p_{i-1}}^n)}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t$$

Giriş Şartı:

$$t=0 \quad M_p = M_p(r,0) = M_{po}(r)$$

Sınır Şartları:

a) $M_p(R,t) = f(X_{py})$ yani;

$$\begin{aligned} (M_{p_i}^{n+1} - M_{p_i}^n) \frac{\Delta V_i}{4\pi\Delta t} = & -f \left[A_{i-1/2} D_{i-1/2} \frac{(M_{p_i}^{n+1} - M_{p_{i-1}}^{n+1})}{\delta r_{i-1}} \right] - (1-f) \left[A_{i-1/2} D_{i-1/2} \frac{(M_{p_i}^n - M_{p_{i-1}}^n)}{\delta r_{i-1}} \right] \\ & + f \left[\frac{\rho_h}{\rho_p} k_{gp} A_g (X_g^{n+1} - X_{py}^{n+1}) \right] + (1-f) \left[\frac{\rho_h}{\rho_p} k_{gp} A_g (X_g^n - X_{py}^n) \right] \end{aligned}$$

$$b) \quad \frac{\partial M_p(0,t)}{\partial t} = 0$$

4- $T_g = T_g(y,t)$ denklemi;

$$\begin{aligned} & [(\rho_h C_g \varepsilon_g T_g)^{n+1,j} - (\rho_h C_g \varepsilon_g T_g)^{n,j}] \Delta y + [(\rho_h C_g \varepsilon_g u_g T_g)^{n+1,j} - (\rho_h C_g \varepsilon_g u_g T_g)^{n+1,j-1}] \Delta t = \\ & \left[h_{gp} (T_p - T_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} + \rho_h k_{gp} (X_p - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} C_{bu} (T_p - T_g) + H_{gb} \varepsilon_b (T_b - T_g) + \right. \\ & \left. \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_b - X_g) C_{bu} (T_b - T_g) + h_{gd} (T_d - T_g) \frac{(1-\varepsilon_p)}{d_t} \right]^{n+1,j} \Delta y \Delta t \end{aligned}$$

Giriş Şartı:

$$t=0 \quad T_g = T_g(y,0)$$

Sınır Şartı:

$$t>0 \quad T_g(0,t) = \text{sabit}$$

5- $T_b = T_b(y,t)$ denklemi;

$$\begin{aligned} & [(\rho_h C_g \varepsilon_b T_b)^{n+1,j} - (\rho_h C_g \varepsilon_b T_b)^{n,j}] \Delta y + [(\rho_h \varepsilon_b u_b T_b)^{n+1,j} - (\rho_h \varepsilon_b u_b T_b)^{n,j}] \Delta t = \\ & [H_{gb} \varepsilon_b (T_g - T_b) + \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b) C_{bu} (T_g - T_b)]^{n+1,j} \Delta y \Delta t \end{aligned}$$

Giriş Şartı:

$$t=0 \quad T_b = T_b(y,0)$$

Sınır Şartı:

$$t > 0 \quad T_b(0,t) = \text{sabit}$$

6- $T_p = T_p(r,t)$ denklemi;

$$\frac{[(\rho_p C_p T_p)_i^{n+1} - (\rho_p C_p T_p)_i^n] \Delta V}{4\pi \Delta t} = f \left[\frac{r_{i+1/2}^2 \lambda_{p,i+1/2} (T_{p,i+1}^{n+1} - T_{p,i}^{n+1})}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 \lambda_{p,i-1/2} (T_{p,i}^{n+1} - T_{p,i-1}^{n+1})}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t$$

$$+ (1-f) \left[\frac{r_{i+1/2}^2 \lambda_{p,i+1/2} (T_{p,i+1}^n - T_{p,i}^n)}{\delta r_{i+1}} - \frac{r_{i-1/2}^2 \lambda_{p,i-1/2} (T_{p,i}^n - T_{p,i-1}^n)}{\delta r_{i-1}} \right] \Delta t$$

Giriş Şartı:

$$t=0 \quad T_p = T_p(r,0) = T_{po}(r)$$

Sınır Şartları:

a) $T_p(R,t) = f(T_g, T_b)$ yani;

$$\frac{[(\rho_p C_p T_p)_i^{n+1} - (\rho_p C_p T_p)_i^n] \Delta V_i}{4\pi \Delta t} = -f \left[A_{i-1/2} \lambda_{p,i-1/2} \frac{(T_{p,i}^{n+1} - T_{p,i-1}^{n+1})}{\delta r_i} \right] -$$

$$(1-f) \left[A_{i-1/2} \lambda_{p,i-1/2} \frac{(T_{p,i}^n - T_{p,i-1}^n)}{\delta r_i} \right] + f [h_{gp} A_g (T_g^{n+1} - T_{p,i}^{n+1})] + (1-f) [h_{gp} A_g (T_g^n - T_{p,i}^n)]$$

$$+ f [\rho_h k_{gp} A_g (X_g^{n+1} - X_{p,i}^{n+1}) b^{n+1}] + (1-f) [\rho_h k_{gp} A_g (X_g^n - X_{p,i}^n) b^n] +$$

$$f [h_{pd} A_{pd} (T_d^{n+1} - T_{p,i}^{n+1})] + (1-f) [h_{pd} A_{pd} (T_d^n - T_{p,i}^n)]$$

$$b) \quad r=0 \quad \frac{\partial T_p(0,t)}{\partial t} = 0$$

Fındığın difüzyon denklemi (Demirtaş [20]);

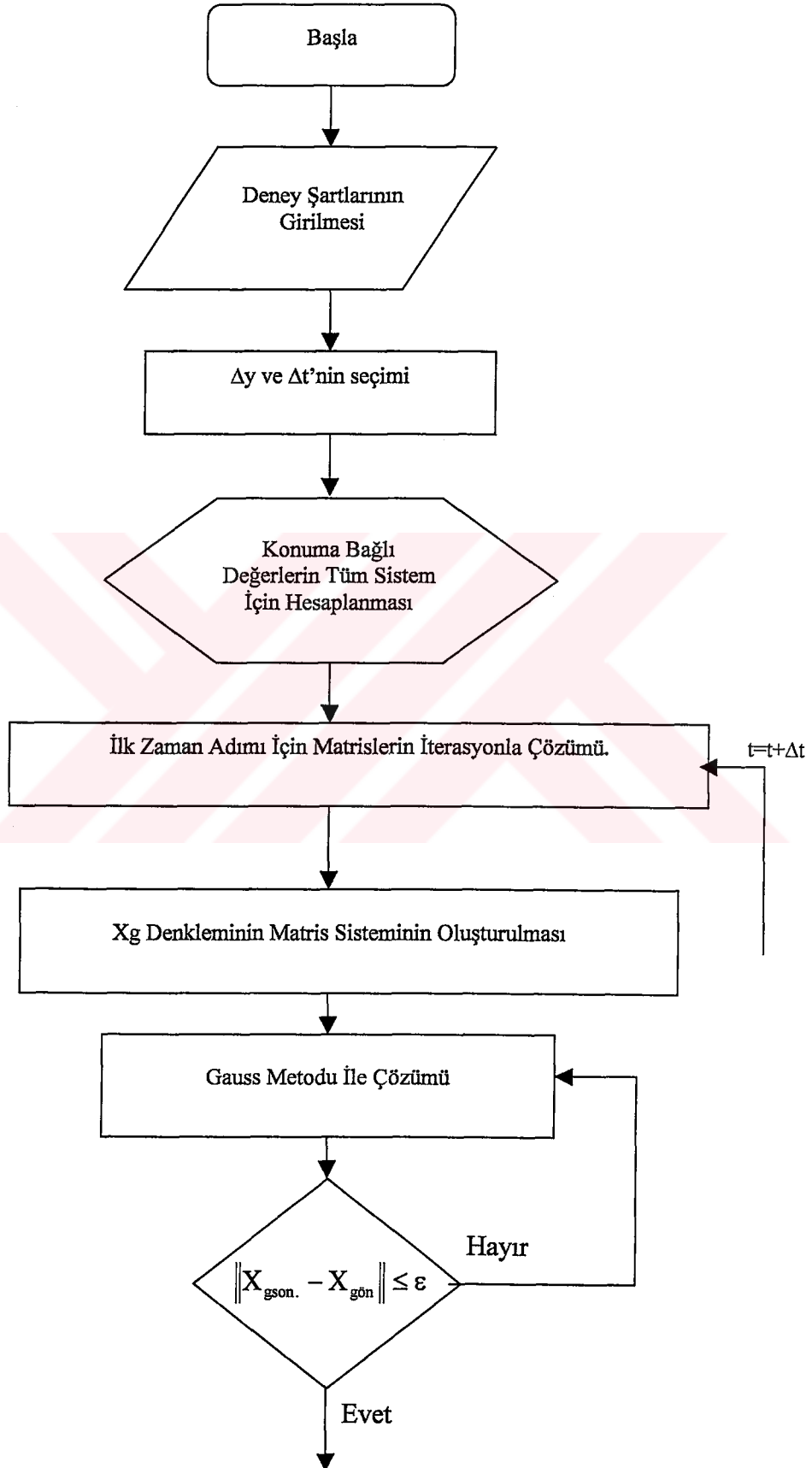
$$a = 6.0492171 \cdot 10^{-11} \exp(0.065527 \cdot T)$$

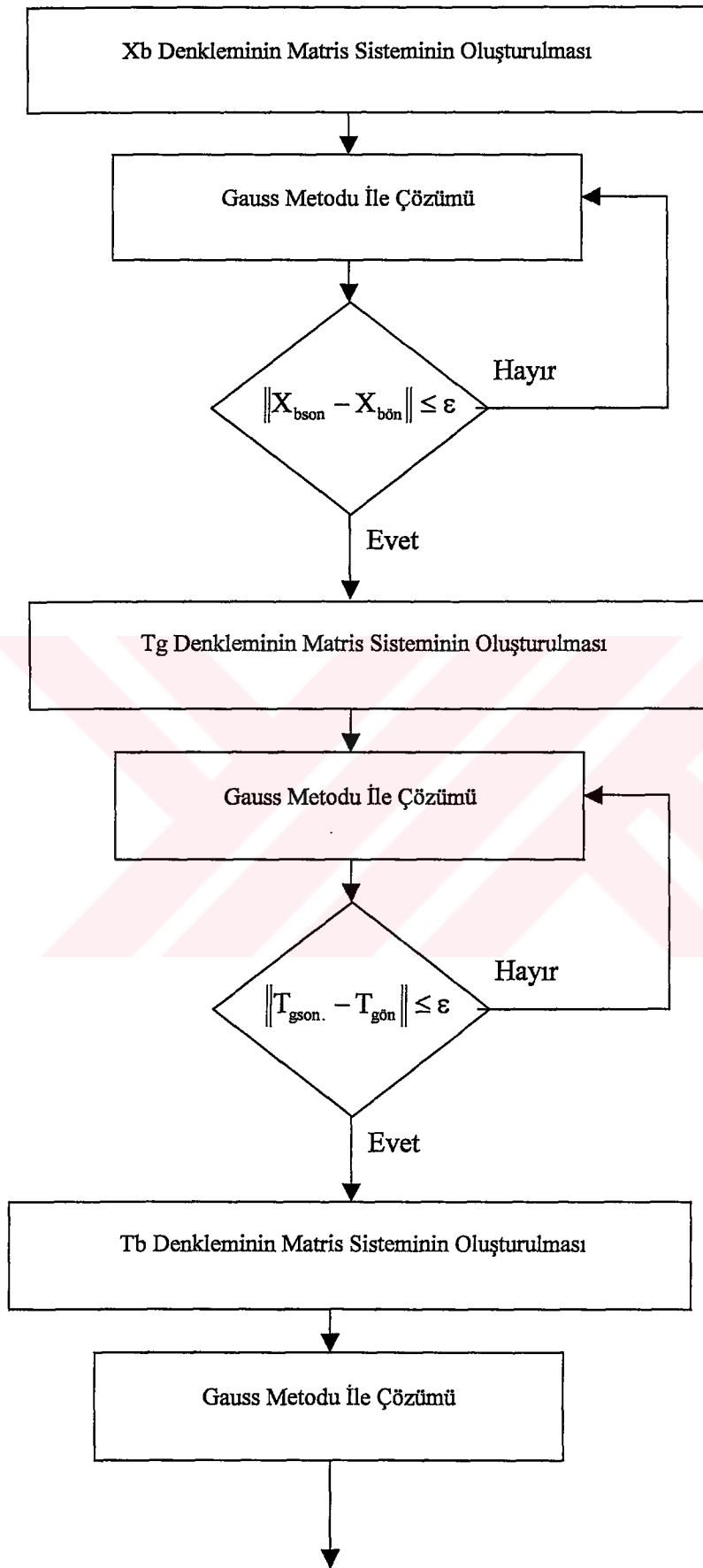
$$b = 51.218099 \cdot \exp(-0.016587 \cdot T)$$

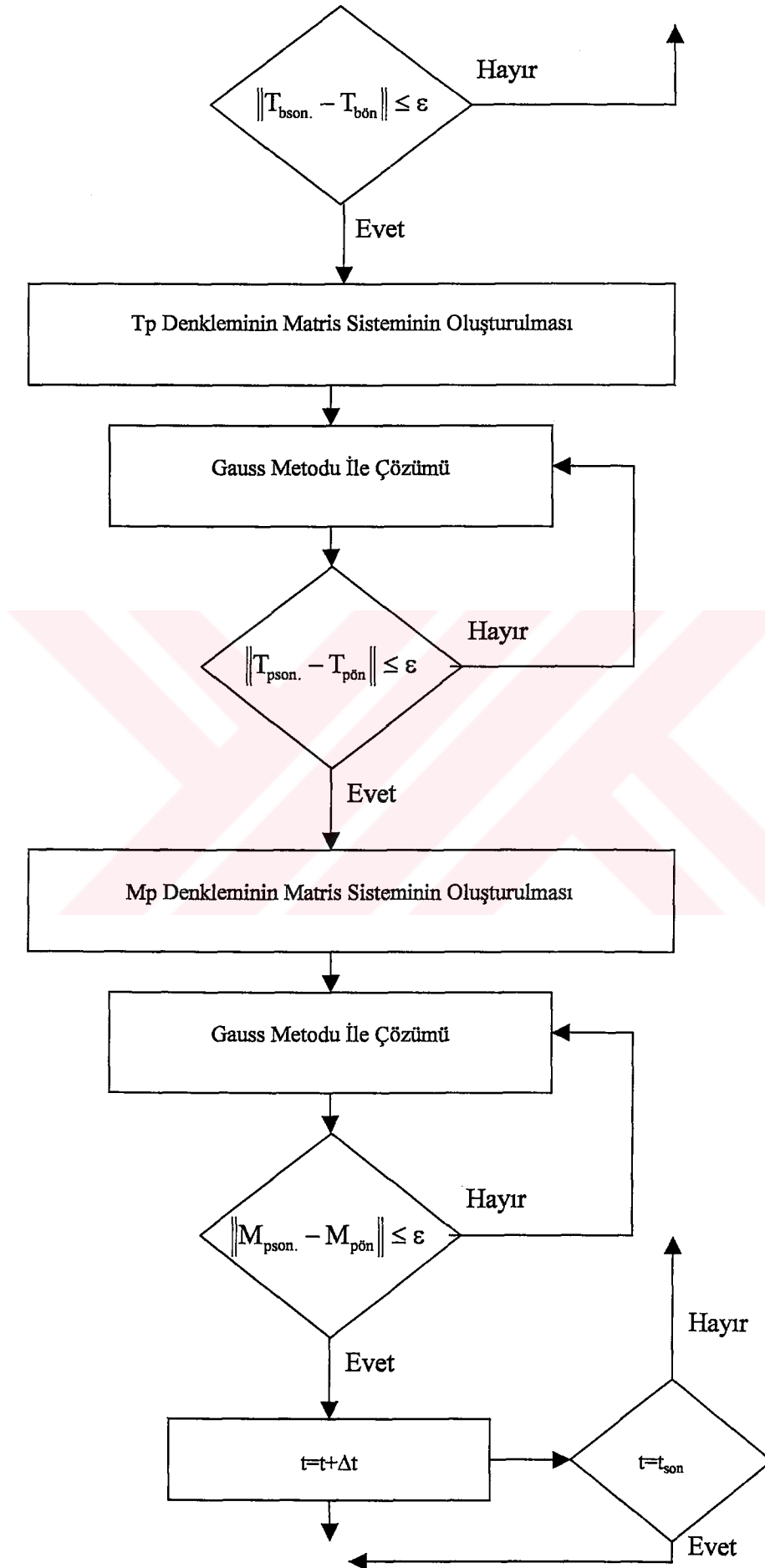
$$D = a \cdot \exp(b \cdot M)$$

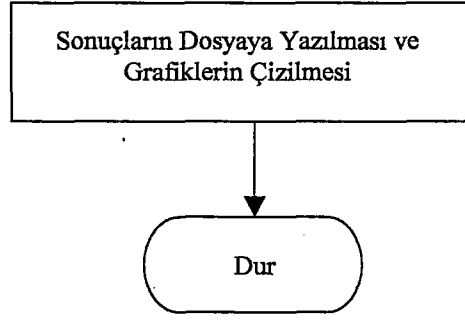
Yukarıdaki difüzyon denklemi nemli partiküller için akışkan yatağa uygun sonuçlar vermektedir. Fakat bu çalışmada eski fındık tabir edilen, düşük nemdeki partiküller için akışkan yatağa uygun sonuç almak üzere denklemin sonucu bir katsayı ile çarpılarak büyütülmelidir. Bu çalışmada kuru ürün için denklemin sonucu 10 ile çarpılmıştır.

Ek B. Akış Diyagramı









ÖZGEÇMİŞ

1972 yılında Zonguldak'ta doğan Adnan TOPUZ, ilk, orta ve lise eğitimini aynı şehirde tamamladıktan sonra, 1989 yılında kazandığı Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde 1 sene eğitimden sonra yatay geçiş yaparak Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine devam etmiştir. Temmuz 1993'te lisans eğitimini tamamladıktan sonra Eylül 1993'te girdiği sınavı kazanarak Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. Şubat 1994'te yine imtihanı kazanarak Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Mayıs 1996'ta Yüksek Lisans eğitimini bitirince Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında Doktora sınavını kazanmış ve Ekim 1996'ta Doktora eğitimine başlamıştır, halen çalışmalarına devam etmektedir. 2547 sayılı YÖK yasasının 35. Maddesi gereğince YÖK tarafından Doktora çalışmalarını bitirmek üzere Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne Mayıs 1999'ta tayin edilmiş ve burada Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.