

**Tanecikli Gıda Maddelerinin Akışkan
Yatakta Kurutulması**

Ümran Erçetin

DOKTORA TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim 2007

Drying Of Granular Food Materials

In Fluidized Bed

Ümran ERÇETİN

Ph. D. Thesis

In Mechanical Engineering

October 2007

**TANECİKLİ GIDA MADDELERİNİN AKIŞKAN
YATAKTA KURUTULMASI**

Ümran ERÇETİN

**Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.**

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İ. Yalçın URALCAN

Ekim – 2007

Ümran ERÇETİN'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Tanecikli Gıda Maddelerinin Akışkan Yatakta Kurutulması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Yrd. Doç. Dr. İ. Yalçın URALCAN (Danışman)

Üye: Doç. Dr. Haydar ARAS

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ANKARA

Üye: Yrd. Doç. Dr. Y. Erhan BÖKE

Üye: Yrd. Doç. Dr. Necati MAHİR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nungün
vesayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada, ülkemiz endüstriyel gıda ürünleri arasında önemli yeri olan bulgurun üretim sürecinde, buğdayın kurutulması işleminin, geleneksel yöntemler yerine akışkan yataklı kurutucuda gerçekleştirilmesi konu edilmiştir. Bu amaçla kurulan bir akışkan yataklı kurutucuda, buğdayın kuruma karakteristiğine çeşitli parametrelerin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, mevcut matematik modeller ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmada iç çapı 30 cm, yüksekliği 2.5 m olan bir akışkan yatak kullanılmıştır. Yatağa beslenen havanın debisi, fan motoruna kumanda eden bir AC frekans konvertörü ile; sıcaklığı ise, dağıtıcı plakanın hemen altına yerleştirilen 10 adet 2.5 kW gücündeki (toplam 25 kW) elektrikli ısıtıcılar ile kontrol edilmiştir. Elektrikli ısıtıcılardan birisinin gücü, bir varyak aracılığı ile 0 ila 2.5 kW arasında ayarlanabilmektedir. Akışkan yatağın karakteristiklerini belirlemek üzere, yatağın farklı yüksekliklerine sıcaklık, basınç ve nem ölçerler yerleştirilmiş ve bunlar bir veri toplama sistemine bağlanmıştır. Ayrıca, yatağın çeşitli yüksekliklerinden alınan buğday numunelerinde de nem oranı tayini yapılmıştır. Kurutma esnasında, buğdayın kuruma hızına ve yatağın enerji sarfiyatına etki eden, kurutucu ortamın sıcaklığı, bağıl nemi ve hızı, akışkan yatağa giren ürünün miktarı ve nem oranı gibi parametreler kontrol edilmiştir. Bu parametrelerin, buğdayın kuruma karakteristiğine ve enerji sarfiyatına etkileri araştırılmıştır. Bu enerji tüketimi, bulgur üretiminde kullanılan geleneksel buğday kurutma sistemlerinin enerji tüketimi ile kıyaslanmıştır.

Kaynaklarda mevcut olan matematik modeller incelenmiş ve elde edilen deneysel veriler, bu modellerden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Böylece, akışkan yatakta kurutma için türetilmiş olan matematik modeller irdelenmiş; bu çalışmada kurulmuş olan fiziksel sistem ile uyumsuzlukları ve bunların sonuçlarda doğurduğu farklılıklar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Bulgur, Buğday, Kurutma, Akışkan yatak, Nem alma ve kuruma.

ABSTRACT

Drying of wheat during the production process of bulgur, an important industrial food product of Turkey, in a fluidized bed drier rather than conventional methods, has been the concern of this study. Effects of various parameters on the drying characteristics of wheat has been investigated experimentally on a fluidized bed drier test system. Experimental results are compared with present mathematical models, as well.

A fluidized bed with 30 cm internal diameter and 2.5 m height has been utilized in the experiments. The flow rate of air feed to the bed has been controlled by means of an AC frequency converter; while its temperature was adjusted via 10 electric heaters, each 2.5 kW (total 25 kW), installed beneath the distributor plate. The heating power of one of the heaters could be adjusted between 0 and 2.5 kW by means of a variac. Temperature, pressure and rh sensors are installed at various points of the fluidized bed and are connected to a data acquisition system in order to determine its characteristics. Humidity ratio of wheat samples taken at various levels of the bed are determined, as well. Parameters effecting the drying characteristic of wheat and energy consumption rate such as the temperature, rh and velocity of drying air, the amount and humidity ratio of the product at inlet and outlet are controlled during experiments. Influence of these parameters on the drying characteristics of wheat and also on the energy consumption are investigated. This energy consumption has been compared with the energy consumption of conventional driers used in the bulgur industry.

Mathematical models described in the literature are examined as well, and findings from the experimental study are compared with the results of these models. Mathematical models built for drying of particulate materials in a fluidized bed are therefore analysed and their discrepancies from the physical system built during this study and the differences thus caused in the results are interpreted.

Key Words : Bulgur, Wheat, Drying, Fluidized bed, Sorption.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında her konuda yardımcı olan ve beni benden çok destekleyen tez danışmanım Yrd. Doç Dr. İ. Yalçın URALCAN'a, Osmangazi Üniversitesindeki hocalarıma ve özellikle desteklerinden dolayı Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Soner ALANYALI'ya, deney tesisatımın kurulmasında ve deneylerimin yapılmasında her türlü desteği sağlayan İ.T.Ü. Makine Fakültesi çalışanlarına ve Baharoğlu Tarım Ürünleri San. Tic. A.Ş.'ye ve sıkıntılı zamanlarımda dahi bana katlanmak zorunda kalan ve bu günlere gelmemdeki en büyük paya sahip olan anneme, babama ve ağabeyime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
SUMMARY.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxv
1. GİRİŞ	1
2. TANECİKLİ MADDELERİN KURUTULMASI	4
2.1. Kurutmanın Esasları	4
2.1.1. Isı ve kütle geçiş mekanizmaları	4
2.1.2. Yiyeceklerin kuruma kinetikleri	8
2.1.3. Dıştan kontrollü kurutma	11
2.1.4. Yayılım modeli	12
2.1.5. Karakteristik kuruma eğrisi	15
2.1.6. Hareketli buharlaşma cephesi (Receding front) modeli	16
2.1.7. Kütle ve enerji dengesi	18
2.2. Kurutma Yöntemleri	20
2.2.1. Kurutucular.....	20
2.2.2. Kurutucuların sınıflandırılması	22
2.3. Kurutucu Tipleri	25
2.3.1. Dönel kurutucular	25
2.3.2. Pnömatik/Flaş kurutucular	26
2.3.3. Sprey kurutucular	26
2.3.4. Akışkan Yataklı kurutucular	27
2.3.5. Dielektrik ve mikrodalga kurutucular	27

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.3.6. Kızılötesi (Radyant) kurutucular	28
2.3.7. Dondurarak kurutma	29
2.3.8. Tünel kurutucular	29
3. AKIŞKAN YATAKTA KURUTMA	30
3.1. Akışkanlaşma	30
3.2. Parçacık karakteristikleri	33
3.3. Akışkan Yatak Davranışı	34
3.3.1. Akışkanlaşmanın başladığı gaz hızı	34
3.3.2. Akışkanlaşma için iki faz teorisi	36
3.3.3. Akışkan yatakta karışma	37
3.3.4. Gaz hızının seçimi	38
3.3.5. Isıtıcı yüzeylerden akışkanlaşan parçalara ısı geçişi	40
3.3.6. Yatay akışlı (Plug flow) akışkan yataklı kurutucuya karşı dikey akışlı (Back-mixed) akışkan yataklı kurutucu	43
3.4. Akışkanlaşmış Parçaların Kuruma Davranışı	46
3.5. Akışkan Yataklı Kurutma Sistemleri.....	48
3.5.1. Titreşimsiz sistemler	48
3.5.1.1. Süreksiz kurutma	48
3.5.1.2. Tamamen karışımlı akışkan yataklı kurutucu	49
3.5.1.3. Yatay akışlı akışkan yataklı kurutucu	51
3.5.1.4. İki aşamalı akışkan yataklı kurutucu	52
3.5.2. Titreşimli akışkan yataklı kurutma sistemleri	54
3.5.2.1. Genel açıklama ve üstünlükleri	54
3.5.2.2. Titreşimli akışkan yataklı kurutucunun karakteristikleri	56
3.5.3. Diğer akışkan yataklı kurutucular	59
3.5.3.1. Püskürtmeli yataklı kurutucu	59

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.5.3.2. Mekanik karıştırıcı akışkan yataklı kurutucu	63
3.5.3.3. Merkezkaç akışkan yataklı kurutucu	63
4. BUĞDAY VE BULGUR	
4.1. Ham Buğdayın Özellikleri	65
4.1.1. Yoğunluk	65
4.1.2. Nem oranı	67
4.1.3. Tane sayısı ve boyutları	67
4.1.4. Küresellik	68
4.1.5. Boşluk oranı	68
4.1.6. Yayılım katsayısı	69
4.1.7. Isıl iletkenlik	71
4.1.8. Isı geçiş katsayısı	71
4.2. Nemli Buğdayın Özellikleri	72
4.2.1. Nemlenme süresi ve eğrileri	72
4.2.2. Kuruma eğrileri	74
4.3. Bulgurun Üretim Süreci	86
4.3.1. Bulgur üretiminde kurutma yöntemleri	89
5. DENEY SİSTEMİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA	90
5.1. Buğdayın Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	90
5.1.1. Yoğunluk	90
5.1.2. Nem oranının belirlenmesi ve nemlendirme	90
5.1.3. Tane sayısının ve boyutlarının belirlenmesi	91
5.1.4. Küresellik	91
5.1.5. Boşluk oranı	93
5.2. Pişirilmiş Buğdayın Akışkan Yatakta Kurutulması	93

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2.1. Deney Tesisatı	93
5.2.2. Deneylerin yapılışı ve deney değişkenleri	95
6. DENEY SONUÇLARI: BUĞDAYIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	98
6.1. Yoğunluk	98
6.2. Nemlenme Süresi ve Eğrisi	100
6.3. Tane Sayısı ve Boyutları	100
6.4. Küresellik	105
6.5. Boşluk Oranı	106
7. DENEY SONUÇLARI: AKIŞKAN YATAKTA KURUTMA	107
7.1. H=10 cm Sabit Yatak Yüksekliği	107
7.1.1. Sabit yatakta düşük hızla kurutma	107
7.1.2. Sabit yatakta yüksek hızla kurutma	110
7.1.3. Minimum akışkanlaşma hızında kurutma	112
7.1.4. Tam akışkanlaşmış yatakta orta hızla kurutma	115
7.1.5. Tam akışkanlaşmış yatakta yüksek hızla kurutma	117
7.2. H=20 cm Sabit Yatak Yüksekliği	120
7.2.1. Sabit yatakta yüksek hızla kurutma	120
7.2.2. Tam akışkanlaşmış yatakta orta hızla kurutma	122
7.2.3. Tam akışkanlaşmış yatakta yüksek hızla kurutma	125
7.3. H=30 cm Sabit Yatak Yüksekliği	127
7.3.1. Sabit yatakta yüksek hızla kurutma	127
7.3.2. Minimum akışkanlaşma hızında kurutma	130
7.3.3. Tam akışkanlaşmış yatakta orta hızla kurutma	132
7.4. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	135

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
8. SON DEĞERLENDİRME.....	144
KAYNAKLAR.....	145
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kuruma esnasındaki ısı ve kütle geçişi	6
2.2. Kuruma eğrileri	10
2.3. Hareketli buharlaşma cephesi (receding front) modelinin şeması	17
2.4. Kurutma sürecinin şeması	18
2.5. Kurutucu tasarımı ve uygunlaştırılması için gerekli adımlar	22
3.1. Akışkanlaşma bölgeleri	32
3.2. Gaz akışkanlaştırılmış yataklarda sıvıyı andıran davranışlar	33
3.3. Yayılım katsayısındaki değişim	39
3.4. Duvardan yatağa olan ısı geçiş katsayısının akışkanlaşma oranıyla değişimi	41
3.5. Akışkan yatakta yatay boru demeti için ısı geçiş katsayısı	43
3.6. Uzunluğunun genişliğine oranı çok küçük olan dikey akışlı bir akışkan yatak içinde kalma zamanı dağılımı	45
3.7. Tanecikli ürünler için kuruma ve sıcaklık eğrileri	48
3.8. Isıtıcı levhali, tamamen karışımli akışkan yataklı kurutucu	49
3.9. Yatay akışlı akışkan yatak	53
3.10. İki aşamalı akışkan yatak	53
3.11. Titreşimli akışkan yatak	54
3.12. Titreşimli bir akışkan yatak için katıların en düşük karışma hızı. Titreşimsel ivmelerin etkisi	58
3.13. Püskürtmeli yatak	60
3.14. Buğdayın sürekli kurutulması esnasında havanın ve katıların sıcaklıklarının dağılımı	62
3.15. Merkezkaç akışkan yataklı kurutucu	64
4.1. Ereğli, Saruhan yöresi buğdaylarının ve bulgurun yoğunluğu	66
4.2. 60 °C'deki hava debisine bağlı olarak, hava ile buğday taneciği arasındaki ısı geçiş katsayısı	72

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3. Buğday tanelerine 1 bar ve 2 bar basınç altında buhar tutularak pişirilmesi sırasında yağ bazdaki nem oranının değişimi	73
4.4. Buğdayın nem alma grafikleri	74
4.5. Buğdayın nem alma grafikleri	74
4.6. Buğdayın akışkan yatakta aralıklı kurutmasında nem oranının zamanla değişimi	75
4.7. Buğdayın kalın tabaka halinde kurutulması sırasında, tabakaları içindeki sıcaklıklar	76
4.8. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında zamana bağlı olarak standartlaştırılmış nem değerinin değişimi	77
4.9. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında zamana bağlı olarak çıkış bağıl nem değerinin değişimi	78
4.10. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında zamana bağlı olarak kuruma hızının değişimi	78
4.11. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında nem oranına bağlı olarak kuruma hızının değişimi	79
4.12. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında 2 cm yatak yüksekliğindeki ve yatak girişindeki sıcaklıkların zamanla değişimi	79
4.13. Bazı sıcaklık, nem ve hız değerlerinde akışkan yatakta kurutulan buğdayların nem oranının zamanla değişimi	80
4.14. 10 cm yatak yüksekliği için buğdayların farklı hızlardaki kuruma eğrileri	82
4.15. Farklı yatak yüksekliklerindeki buğdayların kuruma eğrileri	82
4.16. Farklı başlangıç nem içeriklerindeki ve sıcaklıklarındaki buğdayların kuruma sırasında nem içeriklerinin zamanla değişimi	83
4.17. Farklı başlangıç nem içeriklerindeki ve sıcaklıklarındaki buğdayların kuruma sırasında nem içeriklerinin zamanla değişimi (sıcaklıklara göre) .	84

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.18. Yarı kaynatılmış bulgurların tabaka halinde kurutulması sırasında zamana bağlı olarak nem oranlarının değişimi	85
4.19. Bulgurun üretim aşamaları	86
4.20. Kule kurutucu	89
5.1. Buğdayın tane boyutunun belirlenmesinde ölçülen uzunluklar	91
5.2. Buğday taneciğinin alan ve hacim hesabında kullanılan geometrik şekil “Prolate Spheroid”	92
5.3. Akışkan yatakta kurutma sisteminin şematik görünüşü	94
6.1. Buğdayın nemlendirme esnasında yoğunluğunun değişimi	99
6.2. Hediğin kurutulması esnasında yoğunluğunun değişimi	99
6.3. Buğdayın kaynatılması sırasında nem içeriğinin zamanla değişimi	100
6.4. Ham buğdayın nemlendirilmesi sırasında tane boyutunun değişimi	101
6.5. 40’ar gramlık ham ve nemlendirilmiş buğdayların tane sayısı	102
6.6. Ham buğdayın nemlendirilmesi sırasındaki boyut değişimi	102
6.7. Pişirilmiş buğdayın kurumması esnasında boyut değişimi	103
6.8. Pişirilmiş buğdayın kurutulması sırasındaki boyut değişimi	104
6.9. Ham buğdayın nemlendirilmesi sırasında küreselliğinin değişimi	105
6.10. Pişirilmiş buğdayın kurutulması sırasında küreselliğinin değişimi	106
7.1. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta düşük hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi	107
7.2. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta düşük hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	108
7.3. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta düşük hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	108
7.4. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta düşük hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	109

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.5. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi	110
7.6. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	111
7.7. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	111
7.8. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	112
7.9. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi	113
7.10. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	113
7.11. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	114
7.12. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	114
7.13. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi ..	115
7.14. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	116
7.15. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	116
7.16. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	117
7.17. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi ..	118

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.18. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	118
7.19. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	119
7.20. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	119
7.21. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi	120
7.22. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	121
7.23. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	121
7.24. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	122
7.25. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi ..	123
7.26. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	123
7.27. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	124
7.28. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	124
7.29. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi ..	125
7.30. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	126

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.31. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	126
7.32. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	127
7.33. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi	128
7.34. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	128
7.35. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	129
7.36. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	129
7.37. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi	130
7.38. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	131
7.39. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	131
7.40. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	132
7.41. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi ..	133
7.42. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü	133
7.43. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken bazı sıcaklıklarının zamana göre değişimi	134

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.44. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi	134
7.45. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda kurutulması esnasında kuruma eğrileri	135
7.46. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda kurutulması esnasında kuruma eğrileri	136
7.47. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda kurutulması esnasında kuruma eğrileri	137
7.48. Farklı yatak yüksekliklerindeki hediklerin, $V \cong 1.35$ m/s hızda kurutulması esnasında kuruma eğrileri	138
7.49. Farklı yatak yüksekliklerindeki hediklerin, $V \cong 2.4$ m/s hızda kurutulması esnasında kuruma eğrileri	138
7.50. Farklı yatak yüksekliklerindeki hediklerin, $V \cong 3.2$ m/s hızda kurutulması esnasında kuruma eğrileri	139
7.51. Buğdayın kaynatılarak ve Stapley et. al. tarafından buhar verilerek namlendirilmesi sırasında nem oranının değişimi	139
7.52. Buğdayın 60 ve 80 °C'lerde Fyhr ve Kemp tarafından kurutulması ile kuru bazda \approx % 32 nem içeren hediklerin, farklı yatak yüksekliklerinde, $V \cong 3.1$ m/s'de ve 70 °C'de kurutulmasının karşılaştırılması	140
7.53. Buğdayın 65 °C'de, 1.95 m/s'de Hajidavalloo ve Hamdullahpur tarafından kurutulması ile kuru bazda \approx % 32 nem içeren hediklerin, farklı hızlarda, 70 °C'de kurutulmasının karşılaştırılması	141
7.54. Buğdayın 65 °C'de, 1.95 m/s'de Syahrul, et al., tarafından kurutulması ile kuru bazda \approx % 32 nem içeren hediklerin, $V \cong 3.1$ m/s'de, 70 °C'de kurutulmasının karşılaştırılması	141

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.55. H=10 cm yatak yüksekliğindeki buğdayların 65.5 °C’de, 2.4 m/s’de Fortes ve Ferreira tarafından kurutulması ile ≈ % 25 nem içeren hediklerin, aynı yatak yüksekliğinde, 2.3 m/s’de, 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması	142
7.56. H=20 cm yatak yüksekliğindeki buğdayların 65 °C’de, 1.2 m/s’de Fortes ve Ferreira tarafından kurutulması ile ≈ % 25 nem içeren hediklerin, aynı yatak yüksekliğinde, 1.4 m/s’de, 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması	142
7.57. Buğdayların 70 °C’de Abu-Hamdeh, et al., tarafından kurutulması ile ≈ % 26 nem içeren hediklerin, 10 cm yatak yüksekliğinde, 2.3 m/s’de, 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması	143

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Isı geçiş katsayısı için bağıntılar	7
2.2. Seçilen kurutucular için uygulamalar	21
3.1. 1000 ile 2000 kg/m ³ arasındaki çeşitli parçacık yoğunluğuna sahip akışkan ürünler için uygulanan gaz hızları	40
3.2. Geldart'ın parçacık gruplarının ayırt edici özellikleri	56
3.3. Isıtıcı levhalı ve ısıtıcı levhasız dikey akışlı akışkan yataklı kurutucu için bazı veriler	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
a	Titreşimlerin yarı genliği
Ar	Arşimet sayısı
A_s	Katının alanı
b	Katının toplam kalınlığı
b_d	Katının kuru kısmının kalınlığı
Bi	Biot sayısı
C_g	Kurutucu havanın özgül ısısı
C_h	Nemli havanın özgül ısısı
C_p	Katının özgül ısısı
C_{po}	Kurutucu girişindeki katının özgül ısısı
C_v	Su buharının özgül ısısı
C_w	Sıvının özgül ısısı
d	Parçacık çapı
D_d	Katının kuru kısmındaki yayılım katsayısı
D_{eff}	Gerçek yayılım katsayısı
D_{lat}	Parçacığın yanal yayılım katsayısı
f	Standartlaştırılmış kuruma hızı
F	Katının kütleli debisi
g	Yerçekimi ivmesi
G	Havanın kütleli debisi
h_g	Gaz tarafı taşınım katsayısı
H	Yatak yüksekliği
H_0	Akışkanlaşmanın başladığı andaki yatak yüksekliği

Simgeler**Açıklamalar**

k_d	Katının kuru kısmının ısı iletkenliği
k_g	Kütle geçiş katsayısı
K_{eff}	Kuruma hızı sabiti
L_p	Kat değişkenlerinin yarı kalınlığı
m_s	Katının kütle si
M_{km}	Kuru maddenin kütle si
M_{nem}	Nem miktarının kütle si
M_t	Katının toplam kütle si (kuru + nemli)
n_w	Buharlaşma hızı
n_{wc}	Sabit kuruma hızı
N_w	Kuruma hızı
Nu	Nusselt sayısı
p_{vg}	Gaz içindeki su buharının kısmi basıncı
p_{vs}	Katının içindeki su buharının kısmi basıncı
p_{vsf}	Katının yüzeyindeki su buharının kısmi basıncı
p_{vwp}	Su buharının kısmi basıncı
Pr	Prandtl sayısı
q_c	Taşınımla olan ısı akısı
Q	Katıya aktarılan ısı miktarı
R	Gaz sabiti
Re	Reynolds sayısı
Re_0	Akışkanlaşmanın başladığı andaki Reynolds sayısı
S	Parçacığın özgül yüzeyi
T	Sıcaklık
T_g	Kurutucu ortamın (gazın) sıcaklığı

Simgeler**Açıklamalar**

T_{Gi}	Kurutucu girişindeki hava sıcaklığı
T_{Go}	Kurutucu çıkışındaki hava sıcaklığı
T_{pi}	Kurutucu girişindeki nemli katı maddenin sıcaklığı
T_{po}	Kurutucu çıkışındaki kurumuş katı maddenin sıcaklığı
T_r	Referans sıcaklığı
T_s	Katının sıcaklığı
T_{sf}	Katının yüzey sıcaklığı
T_y	Yüzey sıcaklığı
T_{yt}	Yaş termometre sıcaklığı
T_{wb}	Yaş termometre sıcaklığı
U	Parçacık yüzeyindeki gaz hızı
U_0	Akışkanlaşmanın başladığı gaz hızı
U_t	Terminal hızı
V	Hacim
w	Titreşim frekansı
W	Katılardan havaya geçen toplam su miktarı
Wk	Kuru bazda nem oranı
Wk_i	i noktasındaki kuru bazda nem oranı
Wk_0	Kurutucu girişindeki kuru bazda nem oranı
Wy	Yaş bazda nem oranı
X_{cr}	Kritik nem içeriği
X_e	Denge durumundaki nem içeriği
X_i	Ürünün kurutulmadan önceki nem içeriği
X_o	Ürünün kurutma sonrası nem içeriği
Y	Nem içeriği

Simgeler**Açıklamalar**

ΔE_d	Yayılm sürecini başlatma enerjisi
ΔH_v	Kurutma sıcaklığında suyun buharlaşma ısısı
ΔP	Parçacık tabakası boyunca basınç düşümü
ε_0	Akışkanlaşmanın başladığı andaki yatak boşluğu
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi
ϕ	Küresellik
θ	Sadece su içeriğinin bir fonksiyonu olan kurutma değişkeni
ρ_f	Gazın yoğunluğu
ρ_s	Katının yoğunluğu

1. GİRİŞ

Kurutma, tarım, gıda, kimya, ilaç, kâğıt ve seramik endüstrilerinden tekstil endüstrisine kadar bütün sanayilerde kullanılan en eski ve en yaygın işlemlerden biridir.

Kurutma işleminin uygulandığı endüstrilerde toplam enerji tüketiminin büyük bir bölümü kurutucular tarafından harcanır. Bu büyük enerji tüketiminden dolayı endüstriler ve üniversiteler yıllarca çeşitli ürünlerin en verimli bir şekilde kurutulması için kurutucular tasarlamaya çalışmışlardır ve hâlâ da çalışmaktadırlar. Kurutulacak her ürün için tek tip bir kurutucu kullanılamamasından dolayı her ürün için en uygun kurutucu tasarlama çalışmaları önem kazanmıştır.

Bu amaçla tasarlanan kurutuculardan biri de akışkan yataklı kurutuculardır. Akışkan yataklı sistemde, kurutulacak ürünler akışkan bir ortam (hava) içinde askı halinde tutulurken kuruma gerçekleşir. Bu sistem özellikle tanecikli maddelerin kurutulması için uygundur. Çünkü taneciklerin kolayca akışkanlaştırılabilmesi ve akışkan ortam içinde her taneciğin yaklaşık olarak aynı anda tek bir sıcaklık derecesindeki ve nemindeki kurutucu ortam ile teması sayesinde tüm tanecikler homojen bir şekilde kurutulur. Bu sayede kurutulacak ürünlerin daha hızlı bir şekilde kurutulmasının sağlanması için diğer kurutuculardan daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Akışkan yataklı kurutucuların içindeki yüksek ısı ve kütle geçiş katsayısı, yatak içindeki kurutma şartlarının (sıcaklık, nem ve akışkanlaşma hızı) kolayca ayarlanabilmesi ve sistemdeki hareketli parçaların çok az olması bu kurutucuların ana üstünlükleridir.

Tanecikli tarımsal ürünler içinde besin maddesi olarak kullanılan en önemli ürün buğdaydır ve günümüzde dünya nüfusunun çoğu günlük enerji gereksiniminin büyük bir kısmını hububatlardan, özellikle de buğday ve pirinçten karşılamaktadır.

Buğday yeryüzündeki en temel besin kaynağıdır, çünkü insanoğlunun temel gıda maddesi olan ekmeğin hammaddesidir. Buğday dışındaki hiçbir tanecikli gıda maddesinin, hamurunun yeterince kabarmamasından dolayı ekme ve diğer hamur

işlerinin esas hammaddesi buğdaydır. Ayrıca buğdayın her türlü iklim ve toprak koşullarında yetişebilecek çok sayıda çeşitlere sahip olması, yetiştirilmesinin kolay ve verimli olması, depolanmaya uygun ve besin değerinin yüksek olması, tane ağırlığının % 75'i kadar un vermesi ve yan ürünlerinin de hayvan yemi olarak kullanılması nedeniyle, gerek dünyada, gerekse ülkemizde en fazla üretilen hububat türü buğdaydır. Dolayısıyla buğday dünya çapında stratejik bir öneme sahiptir (Ünal, S).

Bulgur ise, hammaddesi sert buğday olan ve buğdayın orta kısımda bulunan protein ve azot miktarının nişastaya göre daha fazla oranda bulunması nedeniyle diğer gıda maddelerine göre daha besleyici olan bir üründür. Buğdayın dış kabuğunda bulunan önemli minerallerin, bilhassa potasyum ve fosforun, bulgurun üretiminin kaynatılma safhası basınç altında yapıldığı için buğday özüne doğru gitmesi ve soyulma esnasında bulgurun bünyesinde kalmasından dolayı bulgur, makarna ve diğer hububat cinslerine göre daha önemli bir üründür (www.bumas.com.tr).

Kaliteli bir buğday üretimi, buğdayın yetiştirilmesi esnasındaki yıllık yağışlara ve bunların yetiştirme süresi içerisindeki dağılımına bağlıdır. Özellikle Mart ve Nisan aylarındaki yağışlar, o yılki buğday verimini müspet veya menfi yönde etkilemektedir. Verim üzerinde etkili olan diğer faktörler ise çeşit, gübreleme, bakım, kültürel işlemler vs. dir (Ünal, S).

Buğday, ticareti ve depolanabilmesi açısından da çok önemli bir üründür. Buğday tanesinde bulunan su miktarı; buğdayın yetiştirildiği yerdeki iklim koşullarına, depolanma sırasında uygulanan yöntem ile nem miktarına bağlıdır. Hasat mevsiminde yağış veya olgunluk süresinin kısalığı tanecik içindeki nem miktarını artırırken, depolama yerinin nispi neminin ve sıcaklığının yükseldiği durumlarda da tanedeki su miktarı artar. Türkiye buğdaylarında su miktarı % 8-14 arasında değişirken ortalaması % 9-11'dir. Özellikle Avrupa buğdaylarında su miktarı % 14'den fazla olduğundan (Hollanda, Almanya, İngiltere) bu buğdaylar depolamadan önce kurutulurlar. Çünkü buğdaylarda su oranı için üst sınır % 14.6'dır. Buğdaylarda su miktarı çok düşük olması da istenmez. Çok kuru buğdaylar gevrek olur, taşımada kolaylıkla kırılır ve kırık tanelerde yabancı maddeden sayıldığı için buğdayların çok kuru olmamaları gerekir.

Ayrıca aşırı kuru buğdayların tavlama sırasında su emme niteliği zorlaşır ve öğütülme süreleri de artar. Buna karşı belirli bir nem miktarından fazla nem içeren buğdaylarda da hasat edilmeden önce tarlada, veya hasat sonrasında depolama esnasında çeşitli mikroorganizmaların üremesinden dolayı ürünler kullanılamaz hale gelmektedir. Dolayısıyla bu buğdayların kurutma işlemine tabi tutulması gerekir. Bu mikroorganizmaların oluşmaması için tahıl içindeki nem miktarı mutlaka % 12-14'ün altında olması ve depolama ortamlarının sıcaklığının da + 4 °C civarında kalması gerekir. Çünkü tahıllarda mikroorganizmaların oluşumu, içerdikleri neme bağlı olduğu kadar depolanma esnasındaki sıcaklıklarına da bağlıdır ve mikroorganizma üretimi + 4.5 °C'de durmaktadır (Ünal, S).

9. kalkınma planında da hububatlar ve diğer gıda maddelerindeki küflerin ihracatı olumsuz bir yönde etkilediği ve bunun önlenmesi için iyi üretim uygulamaları yanında hasat, kurutma ve depolama teknikleri ile GMP (iyi üretim uygulamaları), GHP (iyi hijyen uygulamaları) gibi gıda güvenliği tekniklerinin de riski azaltmak amacıyla ülkemizde uygulamaya geçirilmesinin gerekliliği belirtilmiştir.

Hububatların kurutulması sayesinde üreticiler ürünlerinin bozulma riskini ortadan kaldırmanın yanında ekinlerini daha önce hasat etme imkânına sahip olacaklardır. Böylece ürün toprağa düşmeden hasat edildiğinden dolayı daha çok miktarda ve daha kaliteli ürün elde edilebilecek, böylece kayıpları azalacak, erken hasattan dolayı da ürünlerini daha yüksek fiyattan satabilecek, daha kısa hasat dönemi sayesinde tarlalarına başka ürünler de ekebileceklerdir. Hasat sonrası ürünlerini kurutmak için de haftalarca beklemek zorunda kalmayacak ve bu süre içinde ürünlerini kurutmak için havanın olabilecek zararlı etkileriyle karşı karşıya kalmayacaklardır.

Sunulan bu çalışmada dünyada stratejik bir öneme sahip olan buğdayın ve son yıllarda önemi gittikçe artan, ülkemize has bir ürün olan bulgurun kurutulmasının temel fiziksel esasları ve kurutma yöntemleri araştırılmıştır. Bu yöntemlerden, daha önceden de bahsettiğimiz gibi akışkan yataklı kurutma tekniği üzerinde durulmuş ve tahıl kurutma amaçlı bir akışkan yataklı kurutucu tasarlanıp kurulmuştur. Bu akışkan yatak sisteminde buğdayın ve bulgurun kuruma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir.

2. TANECİKLİ MADDELERİN KURUTULMASI

2.1. Kurutmanın Esasları

Kurutma hesapları, hava ve malzeme özelliklerinin bilgisine dayanır. Hava-su buharı ilişkisi ve nemli havanın psikrometrik özellikleri, kitaplarda psikrometrik tablolar ve grafikler, hesaplanan denklemler veya bilgisayar programları şeklinde yaygın olarak bulunur. Ürünün termofiziksel özellikleri ile nem alma ve verme karakteristikleri ise laboratuvar deneylerinde veya tahmin edilen modeller vasıtasıyla elde edilmelidir. Kurutma işlemi son ürünün kalitesini etkiler. Kurutma esnasında gıda maddesi içindeki değişiklikler ve tepkimeler üzerindeki en bilinen bozulmalar Bruin ve Luyben tarafından 1980 yılında incelenmiştir. Kurutmanın amaçlarından biri mikrobiyolojik kalitedir. Besin kalitesindeki kayıplar, çoğunlukla sıcaklık ve kurutmanın, vitaminler ve proteinler üzerindeki etkilerinden kaynaklanmaktadır. Sertlik, renk ve tat, kurutulmuş ürünlerin kalitesinin tahmin edilmesinde kullanılan önemli özelliklerden bazılarıdır ve bunlarda meydana gelecek değişimler, ürünün organik kalitesini etkiler. Sertlikteki değişiklikler, yeniden kurutma ve erime/çözülme özellikleri ile ilgilidir. Enzimlerin yokluğundan veya varlığından kaynaklanan kahverengileşmeden dolayı renk atmasının oluşması, kurutulan yiyeceklerin depolanması ve işlenmesi esnasında meydana gelen temel problemlerden biridir. Koku ve tat kaybının oluşumu da önemlidir ve kalitenin düşmesine neden olur. Sıcaklık ve nem içeriğinin karmaşık fonksiyonları olan bu olayların kinetiklerinin, kurutma sürecini iyi bir şekilde simüle ve optimize etmek için bilinmesi gerekir. Buna karşı simülasyon için hem temel verilerin eksikliği hem de uygulamaların azlığı söz konusudur. Bu yüzden kurutma şartlarından ürün kalitesine kadar olan durumu ilişkilendirmek hâlâ oldukça zor bir iştir.

2.1.1. Isı ve kütle geçiş mekanizmaları

Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, kurutma esnasında iki geçiş işlemi aynı anda olur. Bunlardan ilki dış çevreden kurutulacak maddenin yüzeyine ısı geçişi ile birlikte malzeme içine ısı iletimi, ikincisi ise maddenin içinden yüzeyine doğru olan ve daha sonra yüzeye gelen nemin madde dışındaki çevreye yayılması ile devam eden kütle

geçişidir. Kurutulan maddeye ve kuruma şartlarına bağlı olan buharlaşma, ya yüzeyde ya da ürünün içinde olabilir.

Kurutulan malzemeye enerji aşağıdaki şekillerde aktarılır.

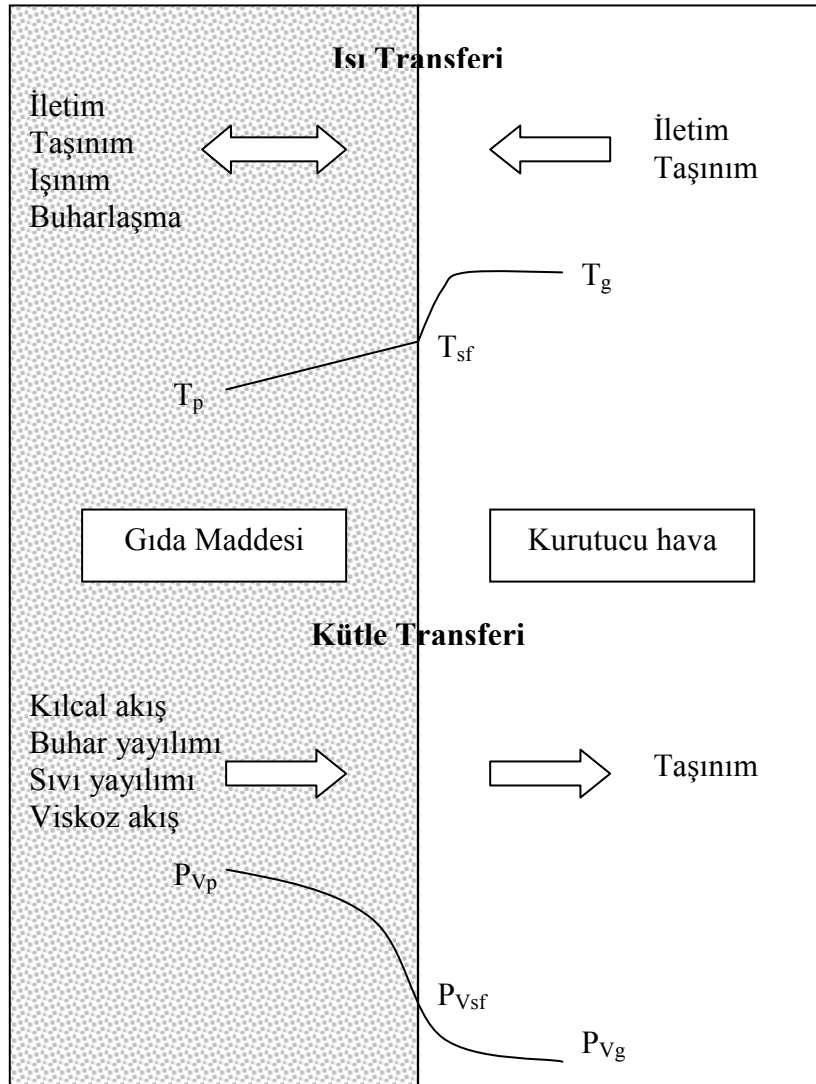
- Taşınım ile; buharlaşma için gerekli enerji, malzemenin üzerinden veya her tarafından sıcak havanın geçirilmesiyle sağlanır. Tepsili, bantlı taşıyıcı, flaş, akışkan yataklı ve sprey kurutucular gibi birçok kurutucuda ısı çoğunlukla taşınım ile aktarılır.
- İletim ile; tepsili, silindirik ve dönel kurutucularda olduğu gibi malzeme sıcak bir yüzeye temas ettiğinde ısı, iletimle aktarılır.
- Işınım ile; buharlaşma için gerekli enerji, malzemeye yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar uygulanmasıyla sağlanır ve bu durumda, madde içindeki nemin bünyesinde ısı üretilir. Mikrodalga kurutma ve dielektrik kurutma ışınım ile enerji geçişine örnek olarak verilebilir.

Ürün içine ısı aktarımı, malzeme içindeki sıcaklık dağılımından dolayı iletim ile ve daha az miktarda da nem hareketinden dolayı taşınım ile olur. Kurutucuyu modellerken hacimsel ve yüzeysel enerji kaynaklarından kaynaklanan faz değişiminin (serbest suyun buharlaşması, bağlı suyun bırakılması veya dondurarak kurutmadaki buharlaşma veya özellikle dielektrik ve mikrodalga kurutmada görülen enerji soğurulması) göz önüne alınması gerekir.

Gıda maddelerindeki nem hareketi farklı nakil mekanizmaları tarafından olabilir.

Bunlar;

- Kılcal emme basınçlarının farklılığından kaynaklanan kılcal akışlar ile,
- Yoğunluk farklılığından kaynaklanan sıvı yayılımı ile,
- Kısmi buhar basıncı farklılıklarından kaynaklanan buhar yayılımı ile,
- Dış basınç veya yüksek sıcaklığın neden olduğu toplam basınç farklılığından kaynaklanan viskoz akış ile.



Şekil 2.1. Kuruma esnasındaki ısı ve kütle geçişi.

Isıl yayılım, yüzeydeki yayılım ve büzülme basıncı veya yerçekimi kuvvetlerinden dolayı olan akış gibi diğer mekanizmaların kütle geçişine katkısı daha azdır ve yiyeceklerin kurutulmasında bunlar hesaba katılmaz.

Ürünün yüzeyinden çevreye olan kütle geçişi, hava ile ürün arasındaki sınır tabakadaki kısmi buhar basınçlarının farklılıklarından kaynaklanır ve en fazla taşınım

olur. Yüzeydeki buhar basıncı, atmosfer basıncına eşit olduğunda vakumlu kurutma ve dondurarak kurutmada olduğu gibi doğrudan buharlaşma olur.

Taşınım ile kurutma altında ısı akısı (q_c) ve buharlaşma hızı (n_w) için sınır şartların aşağıdaki gibi olması gerekir.

Isı akısı;

$$q_c = h_g (T_{sf} - T_g) \quad 2.1$$

Kütle geçişi;

$$n_w = k_g (p_{vsf} - p_{vg}) \quad 2.2$$

burada; h_g ; ısı geçiş katsayısı, k_g ; kütle geçiş katsayısı, T ; sıcaklık ve p_v ; ise su buharının kısmi basıncıdır. Ürünün yüzeyindeki buhar basıncının değeri, sabit sıcaklıkta nem alma ve verme eğrilerinden [$p_v=f(X,T)$] alınabilir.

Taşınım ile ısı ve kütle geçiş katsayıları, kurutma işlemini analiz ve simüle etmek için gerekli en kritik özelliklerden bazılarıdır. Farklı şekillerdeki ürünler ve şartlar için ısı geçiş katsayıları kitaplardan bulunabilir veya kurutma deneylerinden hesaplanabilir. Kuruma şartları altında taşınım ile olan ısı geçiş katsayısını bulmak için bazı ifadeler tablo 2.1'de verilmiştir. Kütle geçiş katsayısına, direk bağıntıyla veya kütle ve enerji geçişi benzerliklerini kullanarak daha iyi bilinen ısı geçiş katsayılarından ulaşılabilir.

Tablo 2.1. Isı geçiş katsayısı için bağıntılar (Craptise, G. H., Rotstein, E).

Bağıntı	Gereklilik / Şart
Tek parçalar	
$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$	Düz tabaka $Re < 2 \times 10^5$
$Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$	Silindir $Re < 4 \times 10^3$
$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$	Küre $Re < 5 \times 10^3$
$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{1/3}$	Kurutma $Re > 1.5 \times 10^5$
$Nu = 0.249 Re^{0.64}$	Gıda maddelerinin kurutulması
Doldurulmuş yataklar	
$Nu = 1.95 Re^{0.49} Pr^{1/3}$	$Re < 350$
$Nu = 1.064 Re^{0.59} Pr^{1/3}$	$Re > 350$
$Nu = (0.5 Re_\epsilon^{1/2} + 0.2 Re_\epsilon^{2/3}) Pr^{1/3}$	$10 < Re < 10^3$
$Nu = 2.52 Re_\epsilon^{0.499} Pr^{1/3}$	$Re_\epsilon < 3 \times 10^3$
Hareketli yataklar	
$Nu = 0.33 Re^{0.6}$	Dönel kurutucular
$Nu = 0.024 Re^{0.84}$	Akışkan yataklar
$Nu = 2 + 0.5 - 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$	Sprey kurutucular

2.1.2. Yiyeceklerin kuruma kinetikleri

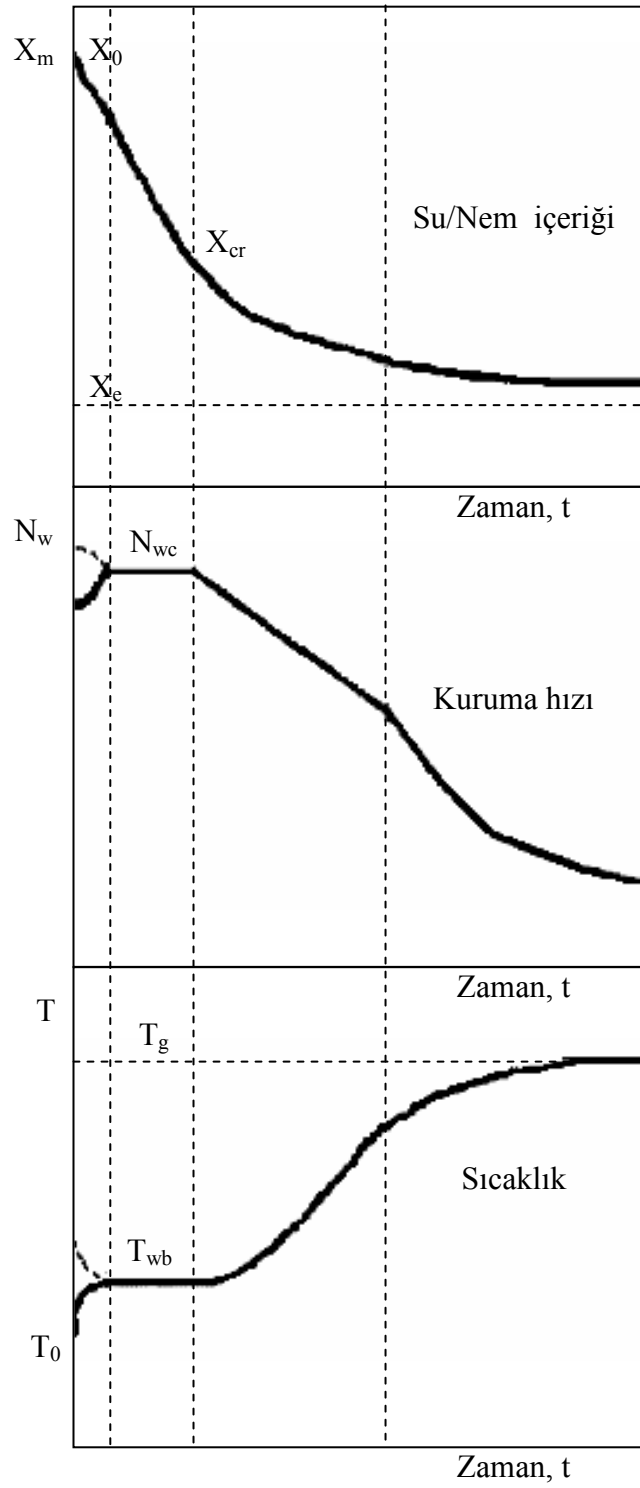
Endüstriyel şartlar altında yiyeceklerin kuruma değerleri oldukça az bulunur ve dolayısıyla bu değerler, deneylerle veya tahmin edilen modellerle elde edilmelidir. Tipik bir kuruma davranışı aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi niteldir. Deneysel değerler genellikle kuruma eğrilerinden (ortalama nem içeriğinin bir noktası X_m , zaman t) veya kuruma hızı eğrilerinden ibarettir. Kuruma hızı n_w aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$n_w = -\frac{m_s}{A_s} \frac{dX_m}{dt} = -\frac{\rho_s}{a_v} \frac{dX_m}{dt} \quad 2.3$$

Burada A_s ; dış alanı a_v ; birim hacmin alanı gösterirken m_s ve ρ_s kuru katının kütlesi ile yoğunluğudur.

Kuruma eğrisi farklı bölümlere ayrılabilir. Genellikle yüzeyde buharlaşmanın başlayabileceği ve sıcaklığın bir başlangıç değerinden yaş termometre değerine kadar değişebileceği başlangıç bölümü vardır. Sonraki bölüm için geleneksel kurutma kitapları, yüzeyin serbest nem içerdiği ve malzemenin yaş termometre sıcaklığında kaldığı bu bölümde hızın sabit olduğundan bahseder. Bu durumda kurutma işlemi dıştan kontrol edilir ve buharlaşma hızının kontrolü, katı ile ortam arasındaki yüzey sınır tabakası boyunca su buharının yayılımı ile olur. Havadan geçen bütün ısı, yüzeydeki sıvının buharlaşması için kullanılır. Kurutulan gıda maddelerinin hepsi sabit hız bölgesi göstermez. Bu durum büzülmeye, T_{wb} sıcaklığına ulaşmak için gerekli zamanla ve suyun her zaman bağlı olmasıyla veya yüzeyin tamamen ıslak olmamasıyla açıklanabilir. Bu etkilerden dolayı bazı maddelerde sahte sabit hız bölgesi gözlemlenebilir ki bu durumda kuruma hızı saf suyunkinden daha yavaş olur.

Kuruma hızının düşmeye başladığı nokta, genellikle kritik nem içeriği X_{cr} olarak adlandırılır. Bu bölüm esnasında yüzeydeki nem içeriği azalır ve yüzey sıcaklığı yaş termometre sıcaklığının üzerine çıkar, düzgün olmayan iç nem ve sıcaklık dağılımı meydana gelir. Buharlaşma bölgesi, yüzeyden, malzemenin içine doğru ilerleyebilir. Kuruma şartlarına ve malzeme özelliklerine bağlı olan hem iç hem de dış dirençler bu esnada önemli olabilir.



Şekil 2.2. Kuruma eğrileri.

Nem içeriği azaldığından dolayı, kütle geçişi için iç dirençler artar ve ürün sıcaklığı kuru termometre sıcaklığına gelirken bu dirençler de baskın bir seviyeye gelebilir. Bu durumda ikinci bir düşme hızı bölümü gözlemlenebilir. Bu durum ürün içindeki su buharı yayılımı vasıtasıyla hareket eden nemin hızına bağlıdır. Bu dönemin sonunda nem içeriği asimptotik olarak havanın sıcaklığındaki ve bağıl nemindeki denge değeri olan X_e 'ye ulaşır.

Önceden de ifade edildiği gibi, bireysel yiyecek parçalarının kuruması, higroskopik büzülme sistemi yanında eş zamanlı olarak kütle ve enerji naklini de içine alan karmaşık bir işlemdir. Kurutma teorilerinin geliştirilmesinde ve sürecin anlaşılmasında önemli işler yapılmasına rağmen, yiyeceklerin kurutulması esnasında her aşamayı yöneten mekanizmaların bilgisi hâlâ sınırlıdır. Bu problemin karmaşıklığından dolayı, mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek deneysel kuruma eğrilerini tahmin etmek için güvenilir teorik modeller azdır.

2.1.3. Dıştan kontrollü kurutma

Eğer hem ısı hem de kütle geçişi dirençleri hava tarafında oluşuyorsa kurutma dıştan kontrollüdür. Uygulamada Biot sayısının 0.1'den az olduğu durumlar dıştan kontrollü farz edilir. Bu şartlar altında ürün içindeki sıcaklık ve nem dağılımı düzgündür. Bu anda, katının yüzeyindeki serbest su buharlaşmak üzeredir ve bu aşağıda verilen ısı ve kütle geçiş denklemleri tarafından önceden tahmin edilebilir.

$$m_s \frac{dX_m}{dt} = -k_g A_s (p_{vs} - p_{vg}) \quad 2.4$$

$$m_s C_p \frac{dT}{dt} = h_g A_s (T_g - T_s) - k_g (p_{vs} - p_{vg}) A_s \Delta H_v \quad 2.5$$

2.5 denkleminde C_p kurutma esnasında ürünün özgül ısısı ve ΔH_v ise kurutma sıcaklığında suyun buharlaşma ısısıdır.

Yaş termometre şartlarına ulaşıldığı zaman 2.4 ve 2.5 denklemleri birleştirilebilir, bunun sonucunda yaş termometre sıcaklığı için aşağıdaki denklemler bulunur.

$$\frac{dX_m}{dt} = -\frac{k_g A_s (p_{vwp} - p_{vg})}{m_s} = -\frac{h_g A_s (T_g - T_{wb})}{m_s \Delta H_v} \quad 2.6$$

Dıştan kontrollü kurutmanın özellikle ilk aşamalarında ürünlerin nem içeriği yüksektir. Bu durumda kurutma sürecini hızlandırmak için daha yüksek hava sıcaklıkları kullanılabilir, çünkü ürün, çevredeki yaş termometre sıcaklığı ile temas etmektedir. Hava hızının veya türbülansının artırılmasıyla taşınım ile olan ısı ve kütle geçişinde bir artış olur ve bu da buharlaşma hızını artırır ve kuruma süresini azaltır.

Fakat bu durumda parça yüzeyindeki katılaşma veya kırılmadan sakınılması gerekir, bunun için pastalarda veya bazı meyve ve sebzelerde buharlaşmayı yavaşlatmak ve dış şartları kontrol etmek önemlidir. Bunu için kurutma havasının hızını azaltmak veya havanın bağıl nemini artırmak yeterlidir.

Pratik uygulamaların çoğunda ısının ürüne aktarımı, kütle geçişindeki farklılıklar tarafından etkilenmez. Bu yüzden sıcaklık dağılımının düzgün olduğu farz edilir ve sadece n_w için uygun bir ifade kullanılması şartıyla düşen hız bölümüne 2.4 denklemi uygulanabilir.

2.1.4. Yayılım modeli

Mühendisler ve bilim adamları bazı yiyecekler için yıllarca deneysel kuruma eğrilerine uyabilen yayılım denklemlerini kullanmışlardır. Crapiste ve arkadaşları (1998) hücreli malzemeler için hareket eden kuvvet olarak, su hareketine dayanan tam bir kuruma teorisi geliştirmiştir ve yukarıdaki su hareketi mekanizmalarının üzerinde bir yayılım denklemi içine birlikte koyulabileceği sonucuna varmışlardır.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla_z (D_{eff} \nabla_z X) \quad 2.7$$

burada D_{eff} ; gerçek nakil katsayısını gösterirken, z ise boyutsuz bir koordinattır ve katının büzülmesini belirler. Bu sonuç, su hareketinin gerçek mekanizmasına bakmaksızın yiyecekler içindeki suyun hareketi için uygulanan Fick kanununun düşünülen probleme basitleştirilmiş yaklaşımlarını açıklar.

Sıcaklık ve nem içeriği ile gerçek veya bilinen yayılım katsayısının bağımlılığı, yaygın olarak Arrhenius tarafından verilen bir tip denklemlerle gösterilir.

$$D_{eff} = D_o(X) \exp\left[\frac{\Delta E_d(X)}{RT}\right] \quad 2.8$$

burada ΔE_d ; yayılım süreci için harekete geçirme enerjisidir. Bazı yiyeceklerin farklı nem içeriklerindeki gerçek yayılım katsayıları olan D_{eff} değerleri Bruin ve Luyben tarafından 1980’de ve Okos tarafından da 1992 de incelenmiştir.

Farklı sınır şartları, bir boyutlu nakil, düzenli geometri ve sabit yayılım için 2.7 denkleminin analitik çözümü Crank tarafından verilmiştir (1967). Kalın bir dilim için çözüm aşağıda gösterildiği gibidir.

İçteki kütle naklinin kontrolü

$$\frac{X_m - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-\frac{(2i+1)^2}{4L_p^2} \pi^2 D_{eff} (t - t_0)\right] \quad 2.9$$

İç ve dış dirençler

$$\frac{X_m - X_e}{X_0 - X_e} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2Bi^2}{\lambda_i^2 + Bi^2 + Bi} \exp\left[-\frac{\lambda_i^2 D_{eff}}{L_p^2} (t - t_0)\right] \quad 2.10$$

burada L_p ; kalın dilim değişkenlerinin yarı kalınlığını, λ_i ; $\tan \lambda_i = Bi/\lambda_i$ 'nin çözümünü ve Bi ise kütle geçişi için aşağıda da tanımlandığı gibi Biot sayısını gösterir.

$$Bi = \frac{k_g L_p}{\rho_s D_{eff} \left(\frac{\partial X}{\partial P}\right)_t} \quad 2.11$$

Dikkat edilmesi gerekir ki, büzülmeden ve D_{eff} 'in sıcaklık ile malzemenin su içeriğine bağımlılığından dolayı, kuruma hızını tayin etmek için bu çözümlerin kullanımı özel şartlarla sınırlıdır. Bununla beraber bu çözümler kurutma kinetiklerinin yaklaşık olarak belirlenmesinde sık sık kullanılır. Daha doğru hesaplamalara ulaşmak istenirse, yukarıdaki kısmi diferansiyel denklemi çözmek için nümerik metotlar kullanılmalıdır. Dıştaki kütle geçişi kontrolünde parçanın istenen bir nem içeriğine ulaşması için gerekli kurutma zamanı yaklaşık olarak parçanın karakteristik uzunluğu ile orantılıdır. İçteki yayılım önemli olduğunda kuruma zamanları malzeme kalınlığının karesi ile değişir.

Taneli malzemelerin kuruması hakkında kitaplarda, dolu bir yataktaki veya akışkan yataktaki bir parçanın boyutsuz ortalama nem içeriğinin deneysel verilerini zaman ile göstermek için D_{eff} 'in yerine kuruma hızı sabiti olan K_{eff} kullanılır.

$$\frac{X_m - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K_{eff} t) \quad 2.12$$

Bu ürünlerle kullanılan diğer ampirik denklemler ile beraber bu basitleştirilmiş yaklaşım genellikle “ince tabaka” denklemleri olarak adlandırılır. Farklı tanecikler için K_{eff} ’in değerleri Brooker’ın (1974) yayınları içinde bulunabilir.

2.1.5. Karakteristik kuruma eğrisi

Van Meel (1958) her malzeme için standartlaştırılmış bir kuruma eğrisi elde etmenin mümkün olduğu konusunda karakteristik kuruma eğrisi olarak bilinen bir yaklaşım kabulü geliştirmiştir. Keey (1972-1978), Keey ve Suzuki (1974) detayda bu formülasyonun uygulamalarını ve esaslarını tartışmışlardır. Model kurutulan her ürün için karakteristik olan standartlaştırılmış bir buharlaşma hızı f ’e dayanır. Böylece,

$$n_w = f \left(\frac{X_m - X_e}{X_{cr} - X_e} \right) n_{wc} \quad 2.13$$

burada n_w sabit hız döneminde elde edilecek olan maksimum buharlaşma hızını gösterir. Karakteristik fonksiyon olan f dış kurutma şartlarından bağımsızdır ve boyutsuz nem içeriğine bağlıdır.

Bu yaklaşımın yiyecek maddelerine uygulanma zorluğu birçok durumda sabit hız periyodunun olmayışı ve tanımlanamayan kritik nem içeriği X_{cr} ’den dolayıdır. 1980’de Fornell n_{wc} değerini tanımlamak için doğal buharlaşmada teorik hesaplamalar önermiştir. Son zamanlarda Ratti ve Craptise (1992) yiyecek sistemlerinin büzülmesi ve n_w için aşağıdaki ifadeyi bulmak için formülasyonu genişletmişlerdir.

$$n_w = \frac{k_g [p_v - p_{vg}]}{\left[1 + \left(\frac{\theta}{X_0} \right) Bi \right]} \quad 2.14$$

Teorik formüller ve deneysel veriler, genel kurutma parametresi olan θ 'nin, kurutma şartlarından, parçanın şeklinden ve kurutulan gıda maddesinden bağımsız olduğunu ve sadece su içeriğinin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir.

2.1.6. Hareketli buharlaşma cephesi (Receding front) modeli

Deneysel gözlemler bazı ürünlerin kurutulması esnasında, buharlaşmanın malzeme içinde belli bir derinlikte olduğunu ve bunun şekil 2.3'de gösterildiği gibi sistemi 2 kısma böldüğünü göstermiştir. Kuru dış bölgede, nem sadece buhar fazındadır ve ıslak merkezde ise sıvı fazda veya karışık fazdadır. Kurutma esnasında buharlaşma yüzeyi geri çekilir ve bunun sonucunda kuru bölgenin ıslak bölgeye olan oranı artar.

Stefan problemi olarak da adlandırılan bu problemin modellenmesi her iki bölgede ısı ve kütle geçişi denklemlerinin eş zamanlı çözümünü gerektirir. Bununla birlikte kuru bölgenin direncinden dolayı ıslak bölgedeki sıcaklık ve nem dağılımı ihmal edilebilir. Buna ek olarak kuru bölgede depolanan enerji ve nem miktarının önemsiz olduğu farz edilebilir. Bu şartlar altında aşağıdaki basitleştirilmiş ısı ve kütle geçişi denklemleri çıkar.

$$m_s \frac{dX_m}{dt} = -K_g A_s (p_{vw} = p_{vg}) \quad 2.15$$

$$m_s C_p \frac{dT}{dt} = U_g A_s (T_g - T_w) = K_g (p_{vw} = p_{vg}) A_s \Delta H_v \quad 2.16$$

Toplam kütle ve ısı geçiş katsayıları, tanımlandığı gibi

$$K_g = \frac{k_g}{1 + \frac{k_g b_d}{\rho_p \left(\frac{\partial X}{\partial p_w} \right) D_d}} \quad 2.17$$

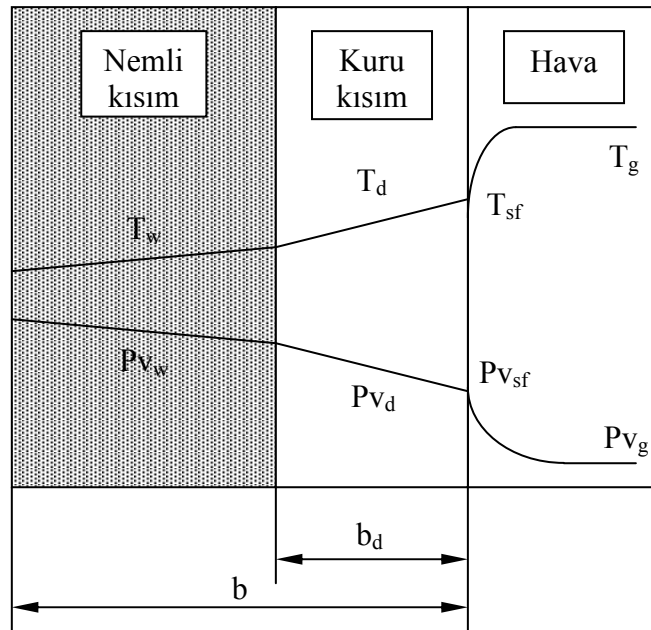
$$U = \frac{h_g}{\left[1 + h_g \left(\frac{b_d}{k_d} \right) \right]} \quad 2.18$$

burada D_d ; kuru bölgenin gerçek yayılım katsayısı ve k_d ise kuru bölgenin ısı iletkenliğidir.

Kuru bölgenin gerçek kalınlığı aşağıdaki gibi nem içeriği ile ilişkilendirilebilir.

$$\frac{b_d}{b} = 1 - \frac{(X_m - X_e)}{(X_0 - X_e)} \quad 2.19$$

Hareketli buharlaşma cephesi modelleri, gıda maddelerinin sprey kurutma ve dondurarak kurutma uygulamalarında başarılı olabilir.

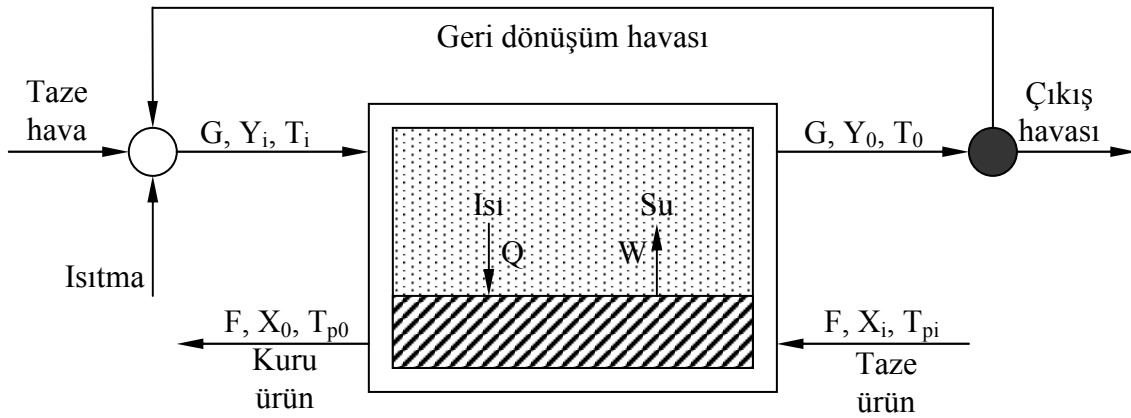


Şekil 2.3. Hareketli buharlaşma cephesi (receding front) modelinin şeması.

2.1.7. Kütle ve enerji dengesi

Toplam ısı ve kütle dengesinin kurutma sistemine uygulanması, kurutucu performansı ve kurutucu tasarımının bazı parametreleri hakkında genellikle önemli bilgiler verir. Sürecin basitleştirilmiş bir sunumu şekil 2.4’de kabaca gösterilmiştir. Resim sürekli ters akışlı bir sistemi göstermesine rağmen, aşağıdaki çözüm bir kurutucunun bireysel aşamalarına ve paralel akışlı sistemlere de uygulanır.

Kolaylık açısından, pratik kullanımda akış debileri ve bileşimleri kuru temelde gösterilecektir. Böylece kurutucu havanın değişkenleri, kütleli debi G (kg hava/s) ve nem içeriği Y (kg buhar/kg kuru hava) iken katı ile ilgili değişkenler, kütleli debi F (kg kuru katı/s) ve su içeriği (kg su/kg kuru katı) olur. Hava sızmalarının ve katılardaki kayıpların ihmal ile hem katının debisi, F , hem de havanın debisi, G , kurutma süreci boyunca sabit kalır.



Şekil 2.4. Kurutma sürecinin şeması (Mujumdar, A. S.).

Kurutulan gıda maddelerinden havaya geçen toplam su miktarını W ile gösterirsek, toplam nem dengesi aşağıdaki gibi olur.

$$\text{Katı} \quad W = F(X_i - X_o) \quad 2.20$$

$$\text{Sıvı} \quad W = G(Y_o - Y_i) \quad 2.21$$

Buradaki alt indisler i ve o sırasıyla giriş ve çıkışı gösterir.

2.20 ve 2.21 numaralı denklemlerde sıcaklıklara göre entalpilerin konulmasından ve denklemlerin yeniden düzenlenmesinden sonra enerji dengesi aşağıdaki hali alır.

$$\text{Kati} \quad Q = FC_{po}(T_{po} - T_{pi}) + W[\Delta H_v - C_w(T_{pi} - T_r)] \quad 2.22$$

$$\text{Sıvı} \quad Q = GC_{hi}(T_{Gi} - T_{Go}) - WC_v(T_{Go} - T_r) \quad 2.23$$

Burada Q ; havadan katıya geçen net ısı miktarını, C_p ; katının özgül ısısını ve C_h ise aşağıda da tanımlanan nemli havanın nem ısısını gösterir.

$$C_h = C_g + C_v Y \quad 2.24$$

Yukarıdaki denklemlerde C_w , C_g ve C_v sırasıyla sıvı fazdaki suyun, kuru havanın ve su buharının özgül ısılarını gösterirken, ΔH_v bir referans sıcaklık olan T_r için suyun buharlaşma ısısını gösterir. Tüm pratik uygulamalar için 25°C 'de, ΔH_v için 2.443 kJ/kg , C_w için 4.197 kJ/kgK , C_g için 1.007 kJ/kgK ve C_v için ise 1.876 kJ/kgK tipik değerleri kullanılabilir. 2.22 ve 2.23'deki denklemlerde ΔH_v vasıtasıyla toplam ısının atılmasına yaklaşılmış ve nem içeriğinin C_p ile doğrusal bir bağımlılığı düşünülmüştür ki bu mühendislik hesaplamaları için makul bir kabuldür.

Endüstriyel uygulamalar 2.22 ile 2.23 denklemleriyle verilen teorik enerji dengesinden her zaman farklı olacaktır. Isı kayıpları için tanımlanan ilave bir terim olan Q_1 'in, 2.23 denkleminin sol tarafına eklenmesi gerekir. Isıl iletkenlik ve emisivite gibi

malzemenin özelliklerine, kurutucu boyutlarına ve çalışma şartlarına bağlı olan ısı kayıpları bazen önemli değerlerde olabilir. Isıl kayıpların kabaca tahmin edilen değerleri Keey (1978) tarafından verilmiştir. Uygulamada, ısı kayıpları kurutucu etrafında bir enerji dengesi vasıtası ile bulunabilir. Üstelik fanlar tarafından yapılan mekanik iş ve taşıma sistemi tarafından harcanan enerji de hesaba katılabilir. Kurutucuların her tarafında hava dolaştırılsa bile fan için harcanan enerji genelde azdır fakat akışkan yataklı vb. kurutucular için fan işi önemli olabilir. Katıları taşımak için gerekli güç, sürekli çalışan bantlı kurutucularda genelde az olmasına rağmen dönen kurutucularda önemli değerlerdedir.

2.2. Kurutma Yöntemleri

Gıda endüstrisinde, kurutma veya suyu uzaklaştırma çeşitli yiyecekleri ve tarımsal ürünleri korumak için dünya çapında yüzyıllardır kullanılmaktadır. Günümüzde de kurutma süreci, yiyeceklerin korunması için temel bir gereklilik ve birçok gıda endüstrisi için de önemli bir işlemdir.

Yiyeceklerin kurutulmasının temel amacı, ürünün raf ömrünü uzatmak için ürün içindeki su miktarını, ürünün mikrobiyal bozulmasını azaltacak bir seviyeye getirmektir. Ürün içindeki nem dengesinin kararlı hale gelmesi, ürünün ağırlığında ve hacminde önemli bir azalmaya neden olur ve bunun yanında yiyecek maddelerinin ambalajlama, depolama ve dağıtım maliyetlerinin azalmasına da katkıda bulunur. Kurutma esnasında kurutulmaya tabi tutulan gıda maddeleri sertlik, renk, tat ve besin değeri gibi bazı doğal özelliklerinin etkilenebileceği fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimler geçirirler. Bu yüzden kurutmanın ikinci amacı da besin değeri ve organik bakımdan iyi bir kaliteye sahip kuru yiyecekler üretmektir.

2.2.1. Kurutucular

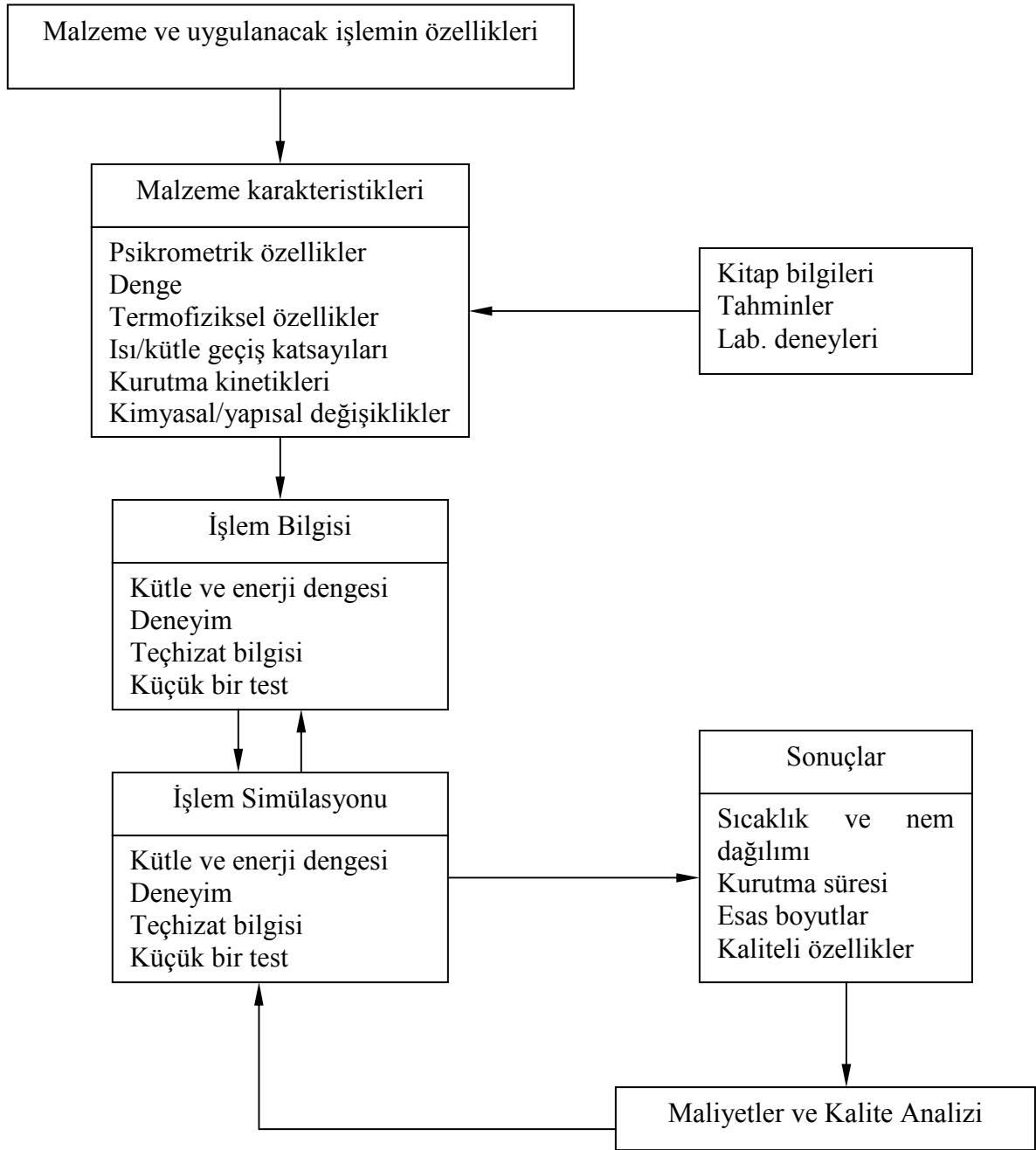
Kurutucular, ısının verilme şekline, kurutulacak malzemelerin fiziksel özelliklerine, başlangıçtaki nem içeriklerine ve bu nemin tipine (bağlı nem ve bağlı olmayan nem), işlenecek madde miktarına, ürünün kurutucuya nakil şekline,

beslemenin özellik ve durumuna, işlem şartlarına ve ürünün kurutucudaki kalma zamanına göre sınıflandırılabilir. Malzeme karakteristiklerindeki geniş çeşitlilik ve kurutulacak yiyecek maddelerinin farklılıklarından dolayı endüstride birçok tipte kurutucu kullanılır. Gıda maddelerinin kurutulmasında kullanılan bazı kurutucular ve örnek uygulamaları tablo 2.2’de özetlenmiştir.

Tablo 2.2: Seçilen kurutucular için uygulamalar.

Kurutucu Tipi	Kurutma Uygulanan Ürün
Tepsili veya kabinli	Meyveler, sebzeler, etler, şekerlemeler
Tünel	Meyveler, sebzeler
Bantlı taşıyıcı	Tanecikli maddeler, sebzeler, meyveler, tahıllar, fındık vb.
Dönel	Tohumlar, tanecikli maddeler, nişasta, toz şeker
Pnömatik veya flaş	Nişasta, etli meyveler, ekinler, topaklı maddeler, tozlar
Akışkan yataklı	Sebzeler, topaklı maddeler, tanecikli maddeler, baklagiller
Sprey	Süt, krema, kahve, çay, meyve suları, esanslar, şuruplar
Silindirik	Süt, çorba, ince tabakalı malzemeler, meyve suları, ezmeler
Üfleli	Meyveler ve sebzeler
Dondurarak	Meyve suları, et, kahve, sebzeler, esanslar
Mikrodalga	Meyveler, çay, şeker, kömür, ağaç, seramik, tekstil
İndüksiyon	Meyveler, çay, şeker, kömür, ağaç, seramik, tekstil

Kurutucu seçiminde dikkate alınması gerekli temel etken, istenen niteliklere sahip ürünün elde edilmesinde en az enerji tüketimi ile mümkün olan en yüksek kuruma hızına ulaşmaktır. Kurutma işleminin verimi ve kurumuş olarak çıkan parçanın kalitesi, giren ham maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, kurutucu tasarımına ve kurutucunun çalışma şartlarına bağlıdır. Bir gıda maddesi kurutucusu tasarlamak ve uygun hale getirmek için gerekli olan adımları gösteren akış grafiği şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Kurutucu tasarımı ve uygunlaştırılması için gerekli adımlar (Craptise, G. H., Rotstein, E.).

2.2.2. Kurutucuların sınıflandırılması

Kurutucuların sınıflandırılması 3 grupta yapılmaktadır.

- a) Malzemeye ısının verilme şekline göre,
- b) Kurutma esnasındaki basınç ve sıcaklığa göre ve
- c) Kurutulacak malzemenin kurutucuda tutulma durumuna göre.

Malzemeye ısının verilme şekline göre: Bu kurutucular taşınımı, iletimli ve ışınımlı kurutucular olmak üzere de 3'e ayrılır.

Taşınımı kurutucular, tanecikli maddelerin, tabaka halindeki veya hamurumsu halindeki katıların kurutulması için uygundur. Isıtılan hava veya gaz, kurutulacak ürünün üzerinden geçirilir. Taşınım ile ürüne aktarılan ısı, ürün yüzeyindeki nemin buharlaşmasını sağlar ve buharlaşan nem de yine kurutucu ortam ile ürün etrafından uzaklaştırılır. Taşınımı kurutma sistemlerinde kurutucu ortam olarak hava, azot, yanma gazları ve aşırı kızdırılmış buhar kullanılabilir. Bu tür kurutucular direkt veya doğrudan kurutucular olarak da adlandırılır. Bunlara örnek olarak akışkan yataklı kurutucular, flaş, döner veya sprey kurutucular, kâğıt hamuru kurutucuları ve kurutulacak malzemelerin arabalara yüklenip tünel içinde hareketi ile girişten çıkışa kadar kurutuldukları taşıyıcı tünel kurutucular gösterilebilir.

İletimli kurutucular, dolaylı kurutucular olarak da adlandırılırlar ve ince maddeler veya çok ıslak katıların kurutulması için uygun kurutuculardır. Ürün içindeki nemin buharlaşması için gerekli ısı sabit veya hareketli ısıtıcı yüzeyler vasıtasıyla sağlanır. Buharlaştırılan nem vakum ile veya gaz akışı ile üründen uzaklaştırılır. Isıya karşı duyarlı maddeler için vakumlama işlemi tavsiye edilir. Taşınımı kurutucularda kurutma havası ile ısı kaybı büyük olduğu için bunların ısı verimleri düşük, iletimli kurutucularda ise ısı verim daha yüksektir. Hamurumsu maddeleri kurutmak için kullanılan küçük tepsili kurutucular, içlerinde buhar boruları bulunan döner kurutucular ve silindirik kurutucular iletimli kurutuculara örnek olarak verilebilir.

Bazı uygulamalar için hem taşınımı hem de iletimli ısıtıcıların üstünlüklerini birleştiren daha verimli kurutucular tasarlanmıştır. Isıya karşı duyarlı maddelerin kurutulması için ısıtıcı borular veya elektrikli ısıtıcılar monte edilmiş akışkan yataklı

kurutucular buna örnek olarak gösterilebilir. Bazen de bir kurutucu iletimli, taşınımı veya bunların birleşimi olarak çalışabilir. Bu tür kurutuculara örnek de titreşimli akışkan yataklı kurutucular gösterilebilir. Örneğin bu tür bir kurutucu çayın kurutulması esnasında tamamen taşınımı bir kurutucu olarak çalışırken, ilaç tabletlerinin vakum altında kurutulması esnasında tamamen iletimli bir kurutucu olarak çalışabilmekte veya atomize olarak püskürtülen kömürün kurutulmasında ise hem iletimli hem de taşınımı kurutucu olarak çalışabilmektedir.

Işınımı kurutucular, dalga boyları 0.2 m ile 0.2 µm arasında dalga boylarına sahip elektromanyetik sinyallerle kurutma yapan kurutuculardır. Yüksek dalga boylarına sahip elektromanyetik dalgalar, malzemenin yüzeyinden içine hemen hemen hiç giremezler. Malzemeler sadece bazı dalga boyuna sahip sinyalleri içlerine çekerler. Birçok nemli malzemeler 50-60 Hz frekanslarında iyi bir iletken olmamasına rağmen, frekans değiştirilip yüksek frekanslar malzemeye uygulandığında bunların dirençleri aniden düşer. Yüksek frekanslı alan içinde giren malzeme içindeki su molekülleri, bu elektromanyetik alan içinde hızla hareket etmeye başlar. Kinetik enerjiye dönüşen elektromanyetik enerji daha sonra da ısı enerjisine dönüşür. Böylece ürün az miktarda enerji ile kurur. Bu sayede yüksek frekanslar malzemeleri ısıtmak için kullanılabilir. Işınımı kurutma genellikle tabaka veya ince levha halindeki malzemelerin kurutulmasında kullanılır.

Kurutma esnasındaki basınç ve sıcaklığa göre: Birçok kurutucu atmosfer basıncı civarındaki basınçlarda çalışır. Küçük bir pozitif basınç dışarıdan içeriye olan sızıntıyı önler. Eğer dışarıya sızıntı olması istenmiyorsa bu sefer negatif basınç kullanılır. Negatif basınç yani vakum işlemi pahalıdır ve sadece ürünün düşük sıcaklıklarda kurutulması veya oksijensiz yerlerde kurutulması gerektiğinde kullanılması tavsiye edilir. Dondurarak kurutma, suyun üçlü noktasının altındaki bir sıcaklıkta vakum altında kurutmanın özel bir durumudur ki burada buz, sıvı faza geçmeden buharlaşır. Dondurarak kurutmada süblimleşme için gerekli ısı normalden birkaç kat daha az olmasına rağmen vakumlama işlemi pahalıdır. Örneğin kahveyi dondurarak kurutma işlemi sprey kurutmaya göre 2-3 kat daha pahalıdır. Ancak ürün kalitesi ve tadı dondurarak kurutmada daha iyidir.

Kurutulacak malzemenin kurutucuda tutulma durumuna göre: Kurutucu seçiminde kurutulan maddenin kurutucuda tutulma durumu en önemli etkenlerden biridir. Çünkü kurutucudan çıkan son ürünün özellikleri ve kalitesi, kurutucular tarafından belirlenir. Bazı durumlarda kaliteli bir son ürün için iki veya daha fazla kurutucunun birleşimi ile yapılan kurutma daha uygun bir seçim olabilir.

2.3. Kurutucu Tipleri

2.3.1. Dönel kurutucular

Dönel kurutucular, endüstride kullanılan, sürekli olarak çalışan en eski ve şüphesiz en yaygın büyük hacimli kurutuculardır. Dolayısıyla diğer kurutuculardan daha fazla teknolojik uyarlamaya maruz kalmışlardır.

Kurutulacak malzemeler, ısıtılan ve dönen bir silindir olan kurutucu içinden geçer. 0.3 ile 5 m arasında çapa, 5-90 m arasında uzunluğa sahip olabilen bu silindirik kurutucu genellikle çelikten yapılır, hafifçe eğimlidir ve dakikada 1 ile 5 devir arasında bir dönme hızına sahiptir. Bazı durumlarda toz kaçışını önlemek için vakum altında çalıştırılırlar. Kurutucuya katılar en üst noktadan girer ve aşağıya doğru yani çıkışa doğru hareket ederler. Bu kurutucu, kurutucu gaz ile katılar arasındaki temasın durumuna göre doğrudan veya dolaylı, paralel akışlı veya ters akışlı olarak sınıflandırılabilir.

Silindir, taşıyıcı burçlar olarak adlandırılan büyük çelik burçlara veya sabit yataklı merdane topluluğu üstüne mesnetlenen lastiklere monte edilir. Dönme ya doğrudan veya bir zincir mekanizmasının silindir üzerindeki dişli kutusuna hareket ilemesiyle sağlanır.

Kurutucu döndüğü için katılar yığın halinde toplanır, silindir içinde belli bir mesafeye kaldırılır ve en üstteki parçalar aşağıya doğru kayarlar. Kurumanın çoğu bu

anda olur, çünkü katılar kurutucu gaz ile yakın temastadırlar. Katıların toplu hareketi silindir boyunca taşınmalarını da sağlar.

2.3.2. Pnömatik / Flaş kurutucular

Pnömatik veya flaş kurutucular, yüzeyinden yayılımın kolay olduğu veya serbest neminin hızla hareket etmesinden dolayı hızla kuruyan veya kurutulması uygun olan ürünler için kullanılır ve birkaç saniye içinde kuruma gerçekleşir. Islak malzeme, ısıtılan hava veya başka bir gaz akımıyla karıştırılır ve bu gaz akımı katıyı kurutma bölgesi boyunca taşır ki, bu esnada yüksek ısı ve kütle geçiş katsayısı sayesinde ürün hızlı bir şekilde kurutulur. Yani tanecikli malzeme dağıtılır, hava akımına karışır ve havada taşınır. Eğer hava sıcak ise malzeme kurutulur. Kurutulan malzeme siklonda ayrılır ve daha sonra başka siklonlara, filtrelere veya toz tutuculara giden malzeme tamamen ayrıştırılır.

Bu sistem ısıya duyarlı olan ve çabuk kurutulması gereken malzemeler için uygundur. Yapışkan veya yağlı maddeler bu sisteme uygun değildir.

2.3.3. Sprey kurutucular

Sprey kurutucular en fazla enerji tüketen kurutuculardan biridir ve süt ürünlerinin veya diğer gıdaların toz halinde üretilmesi gerektiğinde kullanılırlar. Temel olarak sprej kurutma, sıvı haldeki beslemenin kurutma odasına atomize bir şekilde püskürtülmesiyle, oluşan küçük damlacıkların sıcak hava akımına maruz kalması sonucu bunların toz parçalarına dönüşmesi olarak açıklanır.

Toz haline gelen atomize parçalar kurutma bölgesinden tahliye edildikten sonra bir toz/hava ayırıcısına girerek ayrıştırılırlar ve daha sonra paketlemek için toplanırlar. Sprey kurutucuların çoğu % 99.5 verime sahip birinci toz toplama ünitesine sahiptir ve gerekli görülen durumlarda ikinci toz toplama ünitesiyle de donatılırlar.

Sprey kurutucularda, solüsyonlar, süspansiyonlar, pompalanabilen hamurumsu maddeler ve çamurlar kurutulabilir. Sprey kurutucuların en büyük üstünlüğü, hızlı olması ve parçaların hiçbir yere temas etmemesidir. Sprey kurutucularda çok yüksek kurutucu ortam sıcaklıkları kullanılabilir. Yüksek buharlaşma hızı ve ısıl verime ulaşılabilir. Hızlı bir şekilde çalıştırılabilir ve kapatılabilirler. Kapalı çevrimde uçucu ve yanıcı maddelerin kurutulmasına imkân verirler.

2.3.4. Akışkan yataklı kurutucular

Akışkan yataklı kurutucular, ağır sanayiden gıda, kimya ve eczacılık sanayisine kadar tüm sektörlerde yaygın olarak kullanılan kurutuculardır. Akışkan yataklı kurutucular, yatak içindeki kurutulacak parçalara, yerçekimine ters yönde akan gaz akışından ibarettir ve bu esnada parçacıklar sürekli gaz akışından dolayı yatak içinde askı halinde dururlar. Bu kurutucularda parçacıkların askıda kurutulmasından dolayı oldukça etkili bir kurutma sağlanır. Kurutulan ürün yine aynı bölümden, yataktan boşaltılır.

Hava dağıtıcı levha üzerindeki parçalar, hava akımına maruz bırakıldığında ve hava hızı da belli bir değere ulaştığında yatak içinde hareket etmeye başlarlar ve yatak yükselir. Yüksek ısı geçişi sayesinde hızlı bir buharlaşma olur. Bu sistemde sürekli veya süreksiz kurutma imkânı vardır.

2.3.5. Dielektrik ve mikrodalga kurutucular

Mikrodalga ve dielektrik kurutma kavramı, kurutulacak ürüne elektromanyetik sinyaller gönderilmesi sonucu, ürün içindeki iyonların veya çift kutuplu maddelerin moleküllerinin hareket etmesi ve bunun sonucunda madde içinde ısı üretilmesi ilkesine dayanır.

İyonlar, elektrik yüklü atomlar oldukları için herhangi bir elektriksel alana girdiklerinde, bu alanın etkisiyle kendi kutuplarının tersi yönünde hareket ettirilirlir. Bu hareket sırasında yüksüz atomlarla çarpışan iyonlar kinetik enerjilerini kaybederler.

Elektriksel alanın yönü değiştiğinde ise bu sefer aynı işlem ters yönde gerçekteşir ve bu işlem, elektriksel alanın frekansına bağlı olarak saniyede milyonlarca kez tekrarlanabilir. Böylece elektrik alan enerjisi kinetik enerjiye, kinetik enerji de çarpışma anında ısı enerjisine dönüşür.

Su gibi çift kutuplu maddeler hızlı bir şekilde değişen elektrik alandan etkilenirler. Normalde düzensiz bir yerleşimi olan bu kutuplar, elektriksel bir alana girince, maddenin kutupları belirli bir düzene koyulur. Elektrik alanı azalınca veya kalkınca bu kutuplar yine düzensiz bir yerleşime yönelirler. Bu dönüşüm, elektriksel alanın frekansına bağlı olarak saniyede milyonlarca kez tekrarlanabilir ve bunun sonucuna madde içinde, elektriksel alan enerjisi önce potansiyel enerjiye, potansiyel enerji kinetik enerjiye ve en sonunda kinetik enerji de ısı enerjisine dönüşür.

Elektromanyetik dalgalar, frekansları veya dalga boyları ile tanımlanırlar. 1 ile 100 MHz frekanslarda yapılan elektromanyetik uygulamalar dielektrik ısıtma olarak tanımlanırlarken, 300 MHz'den 300 GHz'e kadar yapılan uygulamalar, mikrodalga ısıtma olarak adlandırılır. Dielektrik ısıtmada dalga boyları yaklaşık 3 metreden 700 metreye kadar değişirken, mikrodalgada 1mm ile 1 metre arasındadır. Dolayısıyla bu tür kurutma sistemlerinde, frekans veya dalga boyu kurutma çeşidini belirler.

2.3.6. Kızılötesi (Radyant) kurutucular

Isıl ışınım, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar veya elektrikle ısıtılmış yüzeyler tarafından sağlanır. Bu mekanizma ile ince levha yapısındaki malzemelerin kurutulması uygundur. Isı geçişi, ısıl ışınım yayan malzemenin yapısı ve karakteristiği ile kurutulan maddenin özelliklerine bağlıdır ve ısıl verim düşük olabilir.

Kızılötesi ısıtma kâğıt, tekstil gibi ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Kurutulacak malzemenin yanabilir olması durumunda ürün ısı kaynağına yakın tutulmamalıdır.

2.3.7. Dondurarak kurutma

Dondurarak kurutma farmakolojik ürünler, serumlar, bakteri kültürleri, meyve suları, sebze, kahve ve çay özlerinin elde edilmesinde, et ve süt üretiminde uygulanabilir. Malzeme önce dondurulur, daha sonra kimyasal nem alıcı veya düşük sıcaklık yoğunlaştırıcısı ile bağlantılı, yüksek vakum uygulanan bir hacme alınır. Dondurulan malzemeye iletim veya kızılötesi ışınım ile ısı geçişi sağlanır. Bu esnada donmuş madde içindeki buz süblimleşir veya nem alıcı madde tarafından emilir. Dondurarak kurutma genellikle -10 °C ile -40 °C arasında uygulanır. Dondurarak kurutma pahalı ve yavaş yürüyen bir işlemdir, ısıya duyarlı malzemeler için uygundur.

2.3.8. Tünel kurutucular

Sürekli veya yarı sürekli olarak çalıştırılan tünel kurutucularda kullanılan sıcak hava, yanma gazlarının fan yardımıyla tünel içinde dolaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Kurutulacak malzemeler raflar üzerindedir ve raflar da, ya bantların yada taşıyıcı arabaların üzerindedir. Hava akımı, malzeme ile paralel, zıt akışlı veya her ikisinin birlikte uygulamasıyla sistemden geçirilir. Kurutucuda, havanın tekrar ısıtılması veya tekrar dolanımı ile kurutucudan çıkmadan önce daha fazla nem alması sağlanabilir.

Tünel kurutucularda değişik hava hızı ve yönü, sıcaklık, nem uygulamaları mümkündür. Giriş ve çıkışta sıcak hava kayıplarını önlemek için gereken önlemler alınmalıdır.

3. AKIŞKAN YATAKTA KURUTMA

Akışkan yataklı kurutmanın tanecikli maddelerin kurutulmasındaki üstünlüklerinin keşfedilmesiyle bu kurutucuların önemini artmış ve bugün, gıda endüstrilerinden ilaç sanayilerine kadar her yerde akışkan yataklı kurutucu kullanılmaya başlanmıştır.

Bu yaygın kullanıma rağmen akışkan yatakta kurutma hakkındaki esaslı araştırmalarda aynı ilerleme yapılamamıştır ve endüstriyel bir akışkan yataklı kurutucu tasarlamak hâlâ çok zor bir iştir ve hala ampirik bilgilere dayanmaktadır. Akışkan yatak teknolojisini diğer kurutma yöntemleri ile karşılaştırdığımızda bu teknoloji ile sunulan başlıca üstünlükleri şunlardır.

- Kurutulacak parçaların düzenli akışı sayesinde, ürünün kolayca beslenmesi ve çıkarılması sağlanabilir ve büyük ölçekli kurutma işlemleri gerçekleştirilebilir.
- Mekanik olarak hareket eden parçaların sayısı çok az olduğu için bakım masrafları düşüktür.
- Gaz ve parçacıklar arasında ısı ve kütle geçişinin hızlı olması sayesinde ısıya duyarlı parçacıkların aşırı ısıtılması önlenir.
- Akışkan yatak içine ısıtıcı paneller yerleştirilerek, yatak içindeki malzemeler ile daldırılmış nesnelere arasındaki ısı geçişi oranı artırılabilir.
- Kurutulacak katıların hızlı karışımı, akışkan yatak boyunca hemen hemen sabit sıcaklık şartlarının oluşmasını sağlar ve böylece kurutma sürecinin sıcaklık ve nem kontrolü kolaylıkla sağlanabilir.

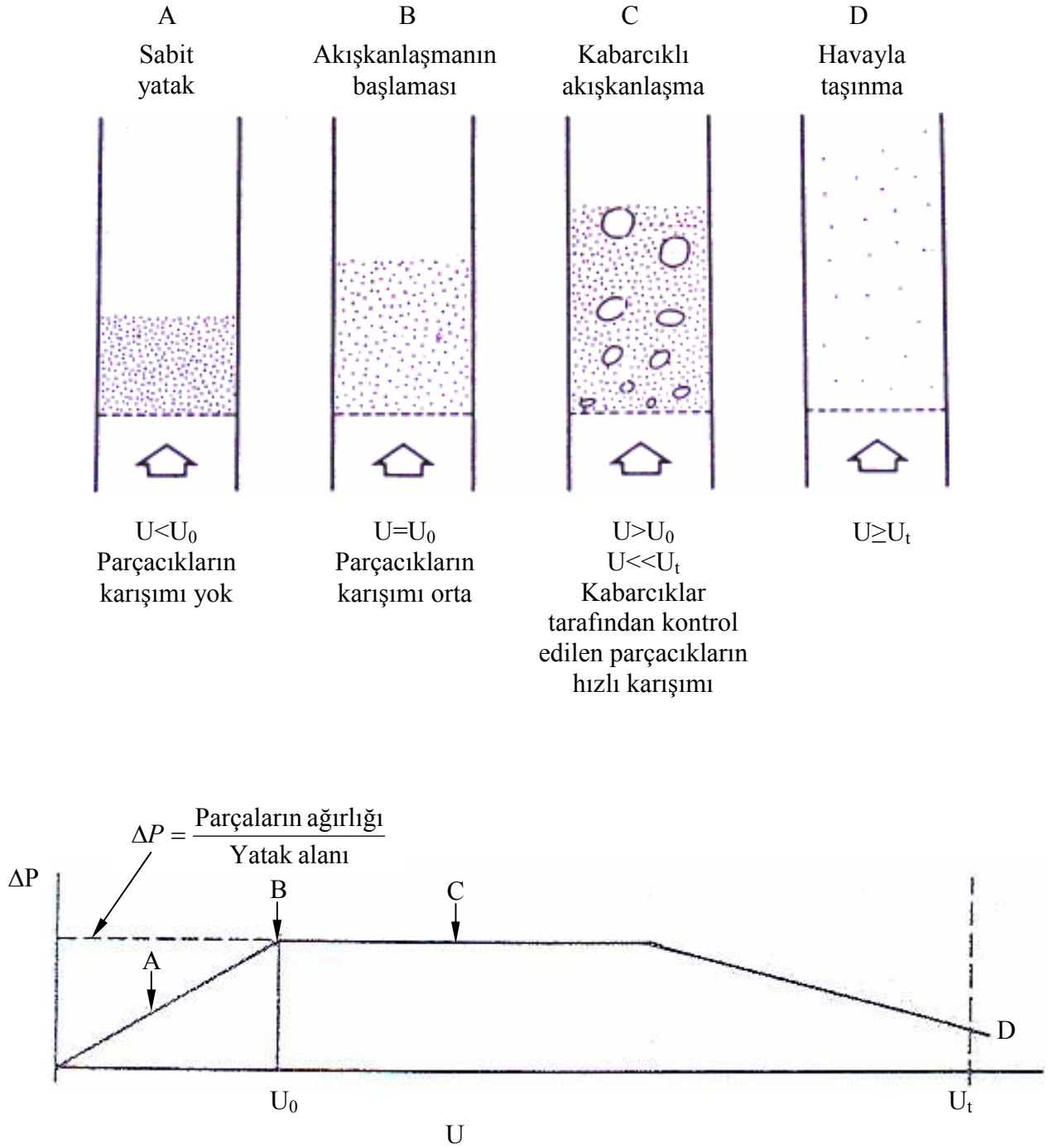
3.1. Akışkanlaşma

Kurutucu ortam (gaz), şekil 3.1'deki gibi dağıtıcı plaka vasıtasıyla parçacıkların bulunduğu tabakadan geçirildiğinde, gaz, düşük akış hızlarında sadece

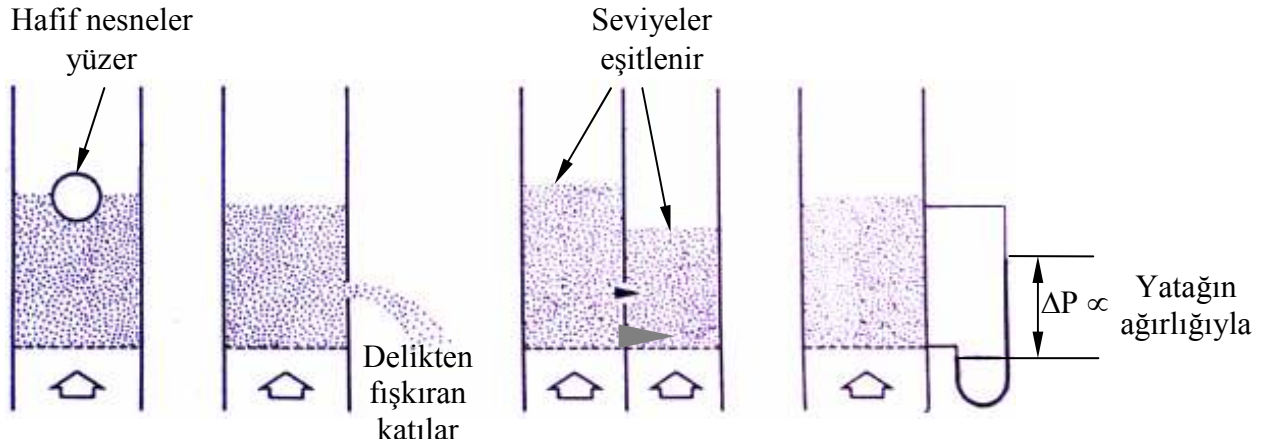
sabit yataktaki parçacıklar arasından sızar. Gaz akış hızı artırıldığında, hızına bağlı olarak parçacıkların bulunduğu tabaka boyunca basınç düşümü artar ve basınç düşümü, alanlara bölünen yatak içindeki parçacıkların ağırlığına eşit olana kadar bu artış devam eder. Bu anda bütün parçacıklar yukarı doğru akan gaz içinde askıda kalırlar ve parçacıklar ile gaz arasındaki sürtünme kuvvetleri, parçacıkların ağırlığını dengeler. Bu durumda parçacıkların tabakasının yeni akışkanlaşmaya başladığı söylenir ve homojen parçacık tabakası, bir sıvı gibi davranmasına rağmen sadece orta parçada karışım olur. Gaz hızı, akışkanlaşmaya başlama hızı olan U_0 hızının üzerindeki bir değere artırıldığında, parçacık tabakası boyunca daha fazla gaz, kabarcık olarak geçer. Bu gaz kabarcıkları dağıtıcının hemen üzerinde küçüktürler, ama yukarı doğru çıktıkları için hızlı bir şekilde birleşirler ve parçacık tabakasına doğru yükselirler, bu da akışkanlaşmış parçacıkların güçlü bir şekilde karışmasına neden olur. Daha büyük gaz hızlarında, sürüklenme kuvvetleri öyle bir değere kadar artar ki, bu noktada parçacıklar, gaz akışına kapılmaya başlar ve akışkan yataktan taşınırlar. Daha küçük parçacıklar doğal olarak gaz akışına daha kolay kapılırlar. Bu akışa kapılan malzeme miktarı akışkanlaşmış tabakanın yüzeyindeki gaz kabarcıklarına bağlıdır.

Tanecikli maddelerin akışkan yatakta kurutulmasında, parçacıklar az önce açıklandığı gibi yukarı doğru hareket eden gaz içinde askıda bulunurken kururlar ve akışkanlaşmış tabaka şekil 3.2’de gösterildiği gibi bir sıvının kaynamasıyla karşılaştırılabilir. Çünkü akışkanlaşmış tabakalar, dolu bir yüzen nesne gibi farz edilir ve ağır nesnelerin batmasına ve hafif nesnelerin yüzmesine imkân veren sıfıra yakın bir viskoziteye sahiptir.

Akışkan yataklı kurutucular ve onların tasarımları hakkında Vanecek ve arkadaşlarının, Romankov’un ve diğer bazı araştırmacıların yer aldığı birkaç eleştiri yapılmış ve akışkan yatakta kurutma hakkında son gelişmeleri eleştiren makaleler yayınlanmıştır. Titreşimli akışkan yatakların davranışını açıklayan kitabi bilgilerin de kapsamlı eleştirileri Rusça iki kitapta mevcuttur.



Şekil 3.1. Akışkanlaşma bölgeleri: U : Gaz hızı, U_0 : Akışkanlaşmanın başladığı gaz hızı, U_t : Parçacıklar için terminal hızı, ΔP : Tüm Parçacık tabakası boyunca basınç düşümü (Mujumdar, A. S.).



Şekil 3.2. Gaz akışkanlaştırılmış yataklarda sıvıyı andıran davranışlar (Mujumdar, A.).

3.2. Parçacık Karakteristikleri

Akışkan yataklı bir kurutucunun tasarımında tanecikli maddelerin akabilirliği en önemli etkidir. Tanecikli maddelerin havalandırılması ve/veya akışkanlaşması için kritik kesme gerilmesinin sıfıra yaklaşması gerekir. Bununla birlikte yüzey etkilerinden dolayı parçacıklar arasındaki yapışma, kritik kesme gerilmesinin sıfıra yaklaşmasını imkânsızlaştırabilir ve bu durumda o parçalar için çok az akışkanlaşabilir veya akışkanlaşamaz denir. Malzemenin durma/akışkanlaşma açısının ölçümü, malzemenin akabilirliği hakkında bir görüş verebilir. Fakat bu, özellikle yapışkan maddeler için güvenilir bir yargı değildir.

Akışkan yatakta kurutulmaya uygun maddeler genellikle birçok ölçüt ile tanımlanabilirler.

- Parçaların yataktan taşınmasından ve birbirleriyle çarpışmasından sakınmak için parçacıkların ortalama 20 μm ile 100 mm arasında olması gerekir. Çok küçük parçacıklar, çok büyük yüzey alanlarıyla ilgili olarak yapışma kuvvetlerinden dolayı yığın oluşturmaya eğilimlidirler.

- b) Parçacıkların boyutsal dağılımı birbirine yakın olması gerekir. Böylece, yatağa aşırı miktarda farklı boyutta parçacık girmeyeceğinden dolayı yatakta iyi bir akışkanlaşma için uygun bir akışkanlaşma hızı seçilebilir.
- c) Özellikle ortalama parçacık boyu büyük olduğu zaman parçacıkların şekillerinin oldukça düzenli olmaları gerekir, aksi takdirde düzgün bir akışkanlaşma olmaz.
- d) Islak beslemede/yüklemede topaklanma oluşursa besleme hemen kesilmelidir, aksi takdirde bu topaklanmalar dağıtıcı plakanın üzeri çöktüğünde/yapıştığında yatakta akışkanlaşma olmaz.
- e) Gaz kabarcıklarının artmasıyla akışkanlaşan parçalar güçlü bir şekilde karışacağı için parçacıklar, akışkanlaşan parçacıklar arasındaki aşınmaya karşı koyacak kadar güçlü olmalıdır.
- f) Gerekli ürün nemi için malzemenin kurutulmasında, kurutmanın yapıldığı sıcaklıkta çıkan son ürün yapışkan olmamalıdır yoksa parçacıklar birleşerek topaklaşır ve akışkanlaşma olmaz.

1 ile 5. maddeler arasında belirtilen sorunların üzerinden gelmek için titreşimli akışkan yataklı kurutucu kullanılabilir fakat 6. maddedeki sorun kolay kolay çözülemez.

Akışkan yatakta kurutulan çoğu malzeme Geldart'ın grupları olan A ve B ye uygundur. Bir grup için elde edilen veriler ile yapılan modeller başka bir gruptaki akışkanlaşmış parçacıkların davranışını tamamen doğru bir şekilde açıklamaz.

3.3. Akışkan Yatak Davranışı

3.3.1. Akışkanlaşmanın başladığı gaz hızı

Akışkanlaşmanın yeni başladığı gaz hızı, sistemin tanımlanması için önemli bir değişkendir ve bu hızı tahmin eden genel bir formül bulmak için birçok girişim yapılmıştır.

Minimum akışkanlaşma hızında yatak boşluğu ε_0 için bir değer kabul edilerek, sabit bir yatakta basınç düşümü ve çevresel hız arasındaki ilişki için bilinen bir formül kullanılabilir ki, bu hesaplanan basınç düşümü, parçacıkların akışkanlaşma anındaki (yüzen) ağırlıklarına eşitlenebilir. Yatak boşluğu, parçacıkların şeklinin ve boyutunun dağılımına bağlı olacaktır. Küresel parçacıklar için yatak boşluğu 0.4 kabul edilebilir fakat akışkanlaşmış parçalar için şekil faktörü ile minimum akışkanlaşma hızındaki yatak boşluğu ε_0 arasındaki ilişkiyi geçerli kılacak genel bir ifade henüz yoktur.

Akışkanlaşmanın yeni başladığı anda akışkan yatak boyunca basınç düşümü

$$\Delta P_0 = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_0)H_0g \quad 3.1$$

ile bulunur. Sabit bir tabakadaki küçük parçacıklar için, basınç düşümü-hız ilişkisi, akışkanlaşmanın yeni başladığı noktada aşağıda verilen Carmen-Kozeny denklemi ile tanımlanır.

$$U_0 = \frac{\varepsilon_0^3}{5(1 - \varepsilon_0)^2} \frac{\Delta P_0}{S\mu H_0} \quad 3.2$$

Burada 3.1 ve 3.2 numaralı denklemleri kullanarak ve $S=6/d$ kabulü ile ve $\varepsilon_0=0.4$ alarak, U_0 hızı için ilk yaklaşım elde edilebilir.

$$U_0 = \frac{d^2(\rho_s - \rho_f)g}{1695\mu} \quad 3.3$$

Bu formülün kullanımı sadece mükemmel bir şekilde küre olarak kabul edilen parçacıklar ile sınırlıdır ve ε_0 değeri doğal olarak, çoğunlukla 0.4'den farklı olacaktır. Birçok sistem için ε_0 değeri 0.4 ile 0.55 ($0.4 < \varepsilon_0 < 0.55$) arasındadır fakat çok ince parçacıklı akışkanlaşmış tabakalarda, ε_0 'ın daha yüksek değerleri bulunabilir.

Grace ve Richardson, $\varepsilon_0=0.4$ kabulü ile U_0 hızının hesaplanması için aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$Re_0 = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad 3.4$$

$$Re_0 = \frac{dU_0 \rho_f}{\mu} \quad 3.5$$

$$Ar = \frac{\rho_f (\rho_s - \rho_f) g d^3}{\mu^2} \quad 3.6$$

Burada Grace C_1 ve C_2 için sırasıyla 27.2 ve 0.0408 değerlerinin kullanılması gerektiğini tavsiye etmiştir.

Eğer parçacıklar, Geldart'ın yapışkan parçacıklar grubu olan C grubuna ait değilse, 3.4 numaralı denklemin geniş bir alan aralığında (\pm % 25) oldukça makul sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Geniş parça boyutu dağılımına sahip katılar, birbirine yakın boyut dağılımı olan veya benzer boyuttaki parçacıkların akışkanlaşması için gerekli olan gaz hızından daha düşük bir akışkan hızı ile akışkanlaşmaya meyillidirler, çünkü yatak boşluğu, sürekli/her zaman az olmaya eğilimlidir. Benzer olarak düzensiz şekilli malzemelerin yatak boşlukları, benzer boyutlu ve küresel şekilli parçacıkların yatak boşluğundan daha yüksektir. Bu yüzden U_0 hızı küçük bir akışkan yatakta yapılacak basit bir test yardımıyla, gaz hızındaki artışa karşı ölçülecek ΔP basınç farkıyla araştırılabilir.

3.3.2. Akışkanlaşma için iki faz teorisi

Daha önceden de ifade edildiği gibi gaz hızı, U_0 hızının üzerinde bir değere artırıldığında, akışkan yataktan ilave akışkanlaşma gazı, gaz kabarcıkları şeklinde

gececektir. Parçacık tabakasını akışkanlaştıran gaz içindeki özelliklerin çoğunu açıklayan en basit teorik düşünce, iki faz teorisi olarak anılır.

Bu teoriye göre akışkan yatak iki fazdan oluşacaktır.

- a) ε_0 boşluğu ve U_0 gaz hızı ile homojen bir kütle olan parçacık fazı.
- b) Tamamen gaz ve biraz da serbest parçacıklar içeren kabarcık fazı. Bu gaz kabarcıkları hızlı bir şekilde parçacıkların aralarından geçerler ve bu yüzden bu kabarcıklar akışkan yatağın davranışı hakkında temel bir etkiye sahiptirler ve parçacık fazının karışımı ile sorumludurlar.

Gaz kabarcıkları, gaz dağıtıcısında, dağıtıcının deliklerine gelen gazın deliklerden fışkırmaları ile oluşacaklar ve daha sonra basıncın azalmasından dolayı birbirleriyle birleşmeleri sayesinde hızla büyüyeceklerdir, çünkü kabarcıklar akışkanlaşmış tabaka boyunca yukarı doğru çıkarlar.

3.3.3. Akışkan yatakta karışma

Akışkanlaşmış parçaların en güçlü karışımı, dağıtıcının hemen üzerinde meydana gelir ve parçacıkların geniş yüzey alanı sayesinde parçacıklar ile gaz arasında oldukça etkili ısı ve kütle alışverişi olur. Bu yüzden akışkan yataklı bir kurutma işleminde gaz ile parçacık arasındaki ısı ve kütle geçişleri büyüktür.

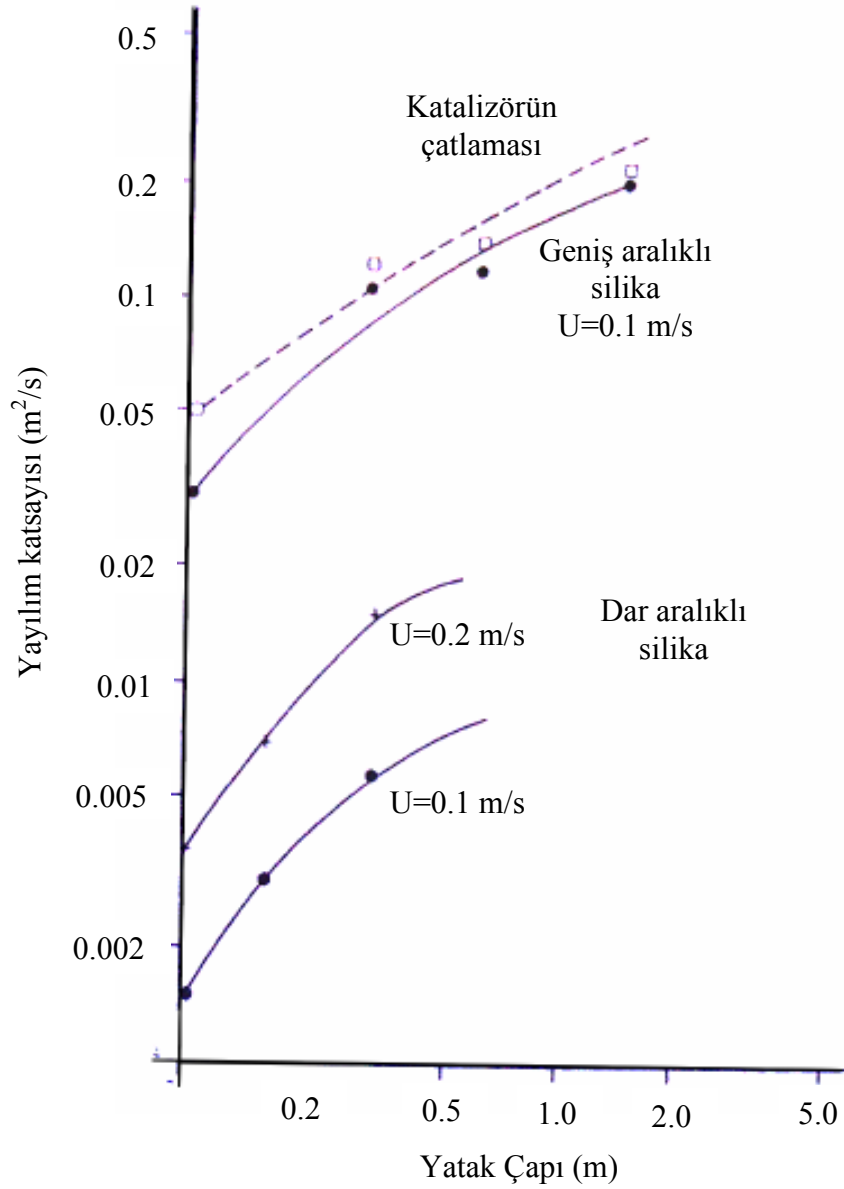
Akışkan yatakta gaz dağıtıcı plakanın hemen üzerindeki gaz ile toplam parçacık tabakasının, ısı ve kütle geçişinin hızı üzerinde önemli etkisi vardır. Tipik olarak yükselen her kabarcık, parçacıkların bir kütlelerini yani parçacığın suyunu/nemini içine alarak taşır ve bunların bazıları çeşitli noktalarda geri bırakılır. Kabarcık parçası tarafından arkasında bırakılan bölge içine parçacıkların ilave bir akışları vardır. Kabarcıklar, yatak yüzeyinin daha üstüne ulaştığında, kabarcıkların taşıdığı nem buraya bırakılır veya yukarıdaki ortama atılır ki bu özellikle akışkan yataktaki daha küçük maddelerin ayrıştırılmasına yani yataktan taşınmasına neden olur.

Karışma, öncelikle kabarcıkların yükselmesinden kaynaklandığı için, karışma miktarı kabarcıkların toplam akış hacmine bağlıdır ve hızlı yükselen kabarcıkların oluşturulmasıyla da karışma miktarı artırılır. Bu yüzden dikey yönde karışma hızı yatay yöndeki karışma hızından birkaç kat daha büyüktür. Bunlardan başka daha küçük boyutlu malzemeler, büyük boyutlulara göre daha kolay akışkanlaştığı için, ortalama parçacık boyutu azaltıldığında, karışma hızı artacaktır. De Groot şekil 3.3'de de görüldüğü gibi çeşitli boyutlardaki maddelerle, dikey yayılım katsayısını ölçmüştür ve bu şekil, yukarıdaki görüşleri temel olarak doğrular. Şekil 3.3 incelenirse, geniş boyut dağılımına sahip silika, dar boyut dağılımına sahip silikadan daha iyi akışkanlaştığı için karışması ve dolayısıyla dikey yayılım katsayısı yaklaşık 10 kat artmıştır. Şekilden ayrıca, akışkan yatak çapı 0.3 metreden az olan yataklarda, yatak çapının, karışma üzerinde ne kadar güçlü bir etkiye sahip olduğu görülebilir. Bu gözlem yardımcı verilerin endüstriyel boyutta bir akışkan yatağın hesaplanmasında kullanılacağı zaman dikkatli kullanılması gerektiğine işaret eder.

3.3.4. Gaz hızının seçimi

Akışkan yatak için parçacıkların akışkanlaşmaya yeni başladığı gaz hızından, en az iki-üç kat daha büyük bir gaz hızı seçmek her zaman mantıklıdır. Endüstriyel akışkan yataklı kurutucularda yeterli miktarda malzemenin karışımını ve parçacıkların tabakası boyunca düzenli bir sıcaklık dağılımını sağlamak için, yatağın güçlü bir şekilde akışkanlaşmış olması gerekir. Ayrıca normal parçacıklardan biraz daha büyük parçaların, yatak boyunca taşınabilmesi ve parçacık tabakasının hiçbir yerinde akışkanlaşmama (çökelme) sorununun olmaması gerekir. Mümkün olduğu kadar küçük bir kurutucu tasarlamak için gaz çıkış (egzost) sisteminin izin verdiği ölçüde, küçük parçacıkların karıştırılabileceği kadar büyük bir gaz hızı seçilmesi gerekir.

Gaz kabarcıkları yüzeyde parçalandığı için parçacıklar yatağın üstündeki boşluğa fırlatıldığında, bazı malzemeler akışkanlaşmış tabakadan kaybedilir. Özellikle gaz hızı, parçacıkların terminal hızı olarak adlandırılan hızına yakın ise, daha küçük maddeler doğal olarak akan gazı çıkışa kadar izlemeye meyillidir. Terminal hızı laminer akışta Stokes kanunu ile açıklanabilir.



Şekil 3.3. Yayılm katsayısındaki değişim.

3.7 numaralı denklem gaz hızının seçilmesinde üst sınırı veren bir formüldür. Akışkanlaşmış tabaka üzerindeki yüksekliğin, egzosttan kaybedilen parçacık miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğine dikkat edilmelidir. Çünkü akışkanlaşmış tabakanın hemen üzerindeki parçacık yoğunluğu, patlayan kabarcıklardan dolayı

oldukça fazladır. Bu yüksekliğin nakil kurtarma yüksekliği denilen yükseklikten biraz daha fazla olması gerekir.

$$U_t = \frac{(\rho_s - \rho_f)gd^2}{18\mu} \quad 3.7$$

Tablo 3.1. 1000 ile 2000 kg/m³ arasındaki çeşitli parçacık yoğunluğuna sahip akışkan ürünler için uygulanan gaz hızları (Mujumdar, A. S.).

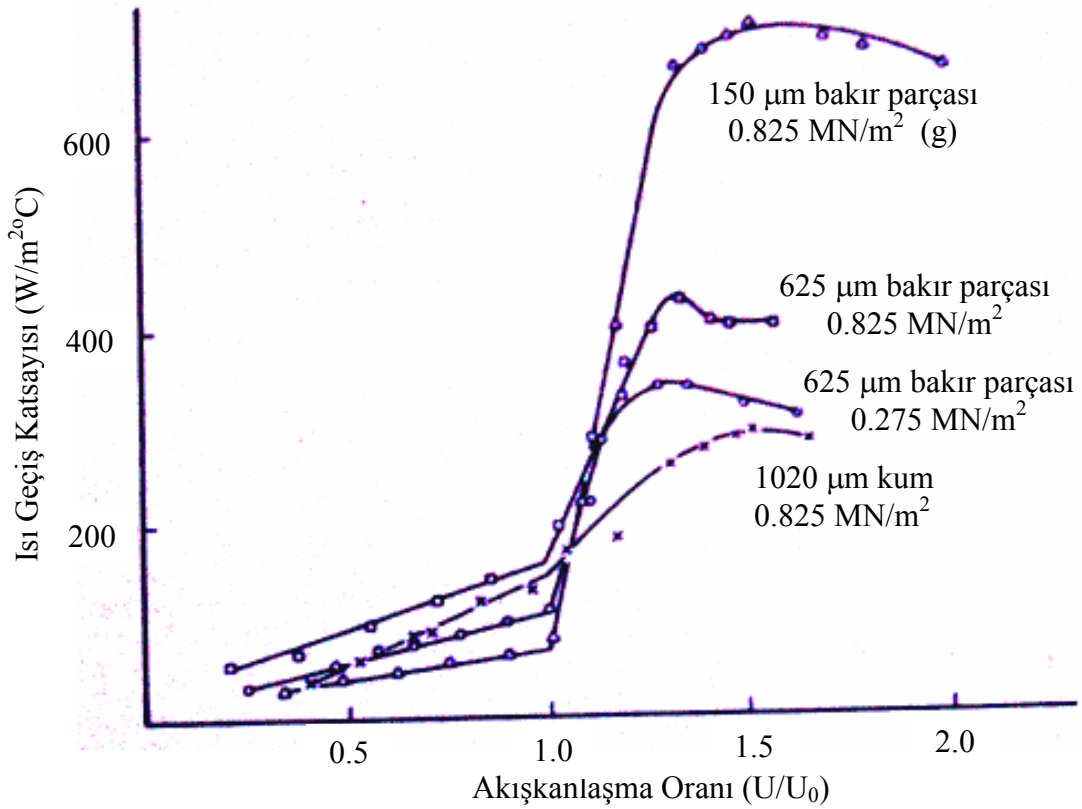
Ortalama parçacık boyutu (μm)	Hız (m/s)
100-300	0.2-0.4
300-800	0.4-0.8
800-2000	0.8-1.2
2000-5000	1.2-3.0

3.3.5. Isıtıcı yüzeylerden akışkanlaşan parçalara ısı geçişi

Gaz akışkan yatak, akışkanlaşmış tabaka ile ısıtıcı veya soğutucu yüzeyler arasındaki iyi ısı geçiş özellikleri ile tanımlanır. Bu ısı geçişi, bir akışkan yatak içinde önemli bir tasarım değişkeni olabilir. Bundan dolayı Botteril ve Zabrodsky, Gelperin ve Einstein, Schlünder ve Martin tarafından, ısı geçişinin tahmin edilmesini sağlayan genel denklemler elde edilmeye çalışılmıştır.

Isı geçişi, en çok parçacıkların ısı kapasitesine ve şekil 3.4'de de görüldüğü gibi yükselen gaz kabarcıklarından dolayı ısı geçiş yüzeylerinde parçacıkların dolaşım derecesine bağlıdır. Yatak duvarından yatağa olan ısı geçiş katsayısı, yatağın, sabit yataktan, parçacıkların hızla karıştığı kabarcıklı bir yatağa döndüğü anda ciddi bir

şekilde artar. Ayrıca şekil 3.4'den de görüldüğü gibi 150 μm 'lik bakır parçasının, ısıyı, 625 μm 'lik bakır parçasından daha iyi geçirdiği görülebilir. Bu, öncelikle daha küçük parçaların akışkanlaşma esnasında daha iyi karışmasından dolayıdır.



Şekil 3.4. Duvardan yatağa olan ısı geçiş katsayısının akışkanlaşma oranıyla değişimi.

Schlünder, bu ısı geçişi için penetrasyon modeli olarak adlandırılan bir model açıklamıştır ki, bu modelde 1 mm'den daha küçük parçalara sahip akışkanlaşmış tabakalardaki ısı geçişinin, öncelikle parçacık taşınımından etkilendiği kabul edilir. Bu da, ortalama yatak sıcaklığına sahip parçaların, düşük sıcaklıktaki başka bir parça ile yer değiştirmeden önce, kısa bir süre için sıcak yüzeyle ile doğrudan temasa gelmesinden dolayıdır. Bu yolla ısıtılan parçalar, üzerlerindeki fazla ısıları, akışkanlaşmış tabaka içindeki parçalara dağıtacaklardır. Schlünder, modelinin duvardan akışkan yatak

tabakalara olan ısı geçiş katsayısı için birçok deneysel veriyi oldukça iyi bir Şekilde tahmin ettiğini kanıtlamıştır.

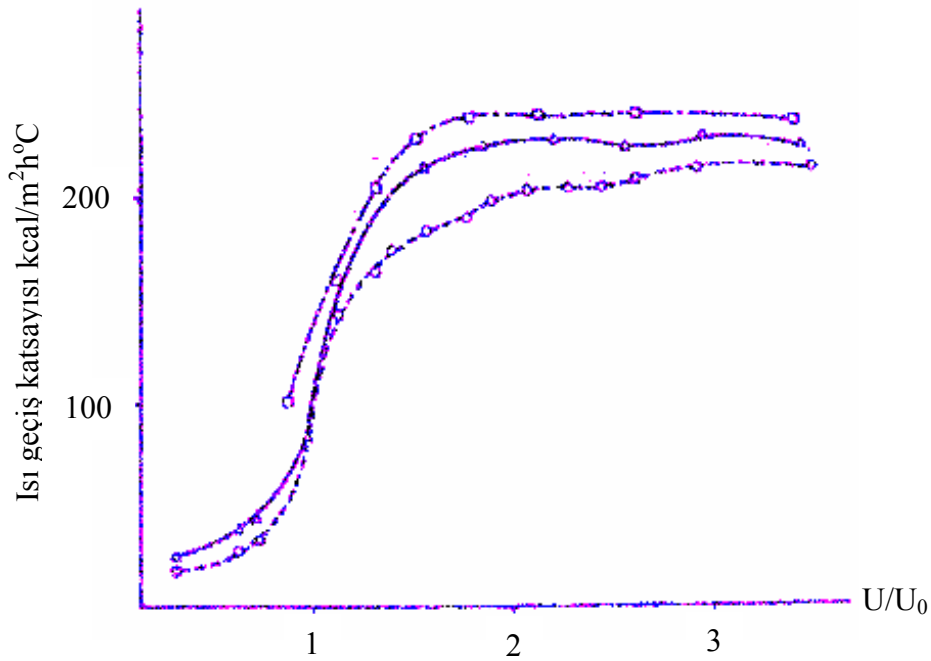
- Etkili bir ısı geçiş olması için güçlü kabarcıklar vasıtasıyla parçaların yüksek hızlı bir Şekilde yer değiştirmeleri gereklidir.
- Soğuk parçaların sıcak duvarda sabit yer değişimi maksimum ΔT^o sıcaklığındadır.
- U hızı artırılırsa ısı geçiş katsayısı da yüksek bir değere doğru gider. Çünkü U hızı artırılırsa duvardaki kabarcıkların miktarı da artacaktır.
- Parçacıkların hacimsel ısı kapasitesinin gazinkinden daha büyük olmasından dolayı parçacıklardan yatak içine ısı geçişi olur.

Akışkan yataklı kurutucularda, kurutma sürecine ısı beslemek için bol miktarda yatay tüp demetleri kullanılır. Yükselen kabarcıklar vasıtasıyla birçok ısı geçiş yüzeyi, hareket eden katıların dolaşımıyla yüz yüze kalabilir. Bununla birlikte yatay borular düşük ısı geçişi özelliklerine sahip olan iki alana sahiptir.

Yatay yüzeylerin üzerinde akışkanlaşmayan parçalar, verimli ısı geçişini engellerler ve daha kötüsü bu durumdaki parçalar ısıl zarara uğrayabilirler.

Kabarcıklar borunun alt taraftaki yüzeylerini örter ve bu alanda ısı geçişini önemli lde düşürürler.

Şekil 3.5, akışkan yatalarda yatay boru demetleri için gaz hızı ve borular arasındaki mesafeye karşı ısı geçiş katsayılarının bağımlılığı hakkında çeşitli değerleri göstermektedir. Isı geçiş katsayısının Şekil 3.4'de de açıklandığı gibi gaz hızına bağlı olduğu Şekilde görülmektedir ve boruların birbirlerine çok yakın yerleştirilmesiyle katıların dolaşımı engellenir ve ısı geçiş katsayısı azalır.



Şekil 3.5. Akışkan yatakta yatay boru demeti için ısı geçiş katsayısı: Borular arasındaki mesafe ve gaz hızının bağımlılığı için (26), $d_r = 25$ mm, $d_p = 0.7$ mm, borular arasındaki mesafe \square : $2d_r$, borular arasındaki mesafe Δ : $4d_r$; borular arasındaki mesafe \circ : $6d_r$ (Mujumdar, A. S.).

Yatay ve dikey borulardan olan ısı geçişini tahmin etmek için birçok denklemler önerilmiştir. Buna karşı endüstriyel boyutta bir akışkan yataklı kurutucunun tasarımında güvenilir değerler elde etmek için gerçek ısı geçiş katsayısı mümkün olduğunca gerçek şartlar altında ölçülmelidir.

3.3.6. Yatay akışlı (Plug flow) akışkan yataklı kurutucuya karşı dikey akışlı (Back-mixed) akışkan yataklı kurutucu

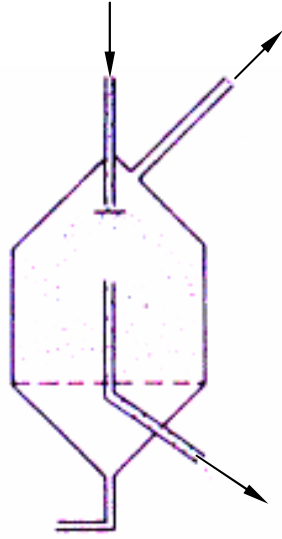
Sürekli akışkan yatak sistemleri, genellikle sistem içinde parçaların kalma zamanlarının dağılımlarıyla tanımlanır. Akışkan yatağın uzunluğunun genişliğine olan oranı oldukça küçük olan dikey akışlı (back-mixed) akışkan yataklarda uzun kalma zamanı dağılımı gözlenir ve bu şekil 3.6'da gösterilmiştir. Aşırı doldurulma veya taşma durumunda böylesi bir dikey akışlı akışkan yatak, verimi artırmak için bir karıştırma

tankı ile karıştırılabilir. Böylece akışkan yatak içindeki güçlü karışım, düzenli bir sıcaklık dağılımı oluşturur, buna karşı parçacıkların kalma zamanı dağılımı oldukça geniştir ve dolayısıyla parçacıkların nem içerikleri arasında önemli farklılıklar olabilir. Yaklaşık olarak ürünlerin % 40'ı akışkan yatak içinde, ortalama kalma zamanının yarısından daha az zaman kalırlar ve az kururlar, bazı ürünler de çok kaldıkları için aşırı kururlar. Bu yüzden dikey akışlı bir akışkan yataktan boşaltılan ürün, öncelikle parçalardan yüzey nemi kurutulduğunda, düzenli bir nem içeriğine sahip olacaktır.

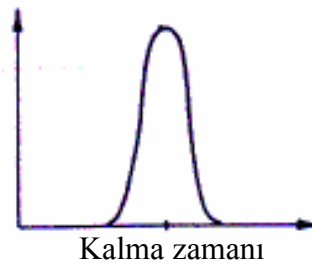
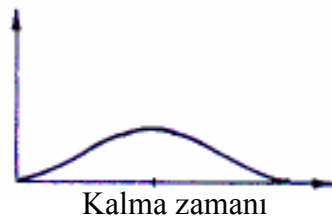
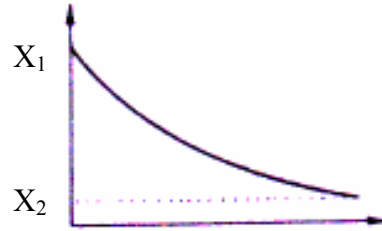
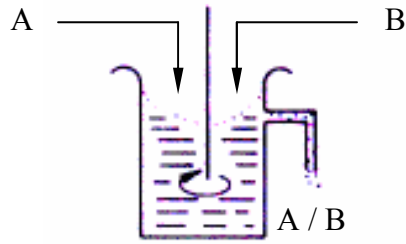
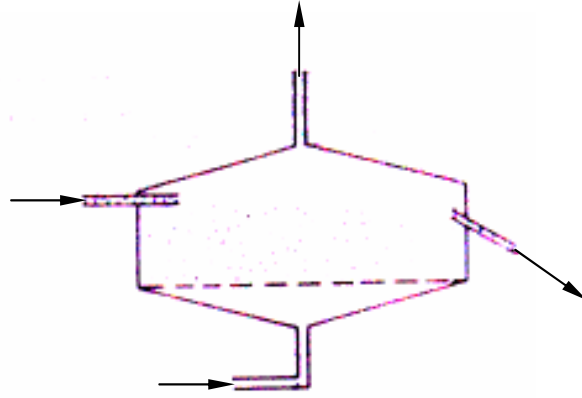
Akışkanlaşan parçalar ile kurutma havası arasındaki çok iyi ısı ve kütle geçişinden dolayı gerçek dengeye, çıkış havası ve akışkan yatak içindeki ürün arasında ulaşılabilecektir. Dikey akışlı akışkan yataklı kurutma kavramı, parçaların akışkan yatakta kalma zamanının kurutma etkinliği üzerinde düşük bir etkiye sahip olduğunda veya hiç bir etkisi olmadığı zaman, yani yüzey neminin kurutulması için çok uygundur. Çünkü akışkan yatak sistemi içinde yatay akışlı akışkan yataktaki gibi geniş kalma zamanı dağılımını telafi etmek için akışkan yatakta uzun kalma zamanı ve oldukça yüksek sıcaklık seviyesi gerekli olabilir. Dikey akışlı akışkan yatak genellikle bağlı nemin kurutulması için uygun değildir. Eğer dikey akışlı akışkan yatakta bağlı nemin çıkarılmasına çalışılırsa bu işlem sadece aşırı ısı tüketimiyle değil aynı zamanda ürünün ısı olarak zarar görmesiyle sonuçlanacaktır.

Buna karşı dikey akışlı akışkan yatakta kurutma, yatay akışlı akışkan yatakta kurutma ile karşılaştırıldığında önemli bir üstünlüğe sahiptir. Dikey akışlı akışkan yatakta, kolay akışkanlaşmayan malzemeler sisteme beslenebilir, yüklenebilir. Akışkan yatak içindeki güçlü karışımdan dolayı bu mümkündür, çünkü yatak içindeki madde büyük bir su kütlesi gibi davranır ki burada yatağa beslenen madde hemen dağıtılır, yayılır ve yüzey nemi çok hızlı bir şekilde kurutulur ve bu da (yeni beslenen) ürünü akışkanlaştırır. Bu tanım dikey akışlı akışkan yataklı kurutucuları, maddelerin ön kurutma aşaması için çok uygun kılar. Yatay akışlı akışkan yataklarda, sınırlı veya kısa kalma zamanı dağılımı gözlenir ki burada akışkan yatağın uzunluğunun genişliğine oranı çok büyüktür. Buna uygun bir uzun ve dar akışkan yatak şekil 3.6'da gösterilmektedir. Yatay akışlı akışkan yataklar, birçok karıştırma tankı dizisine benzetilir ki burada her bir karıştırma tankı bir dikey akışlı akışkan yatağı gösterecektir.

Dikey akışlı akışkan yatak



Yatay akışlı akışkan yatak



Şekil 3.6. Uzunluğunun genişliğine oranı çok küçük olan dikey akışlı bir akışkan yatak içinde kalma zamanı dağılımı (Mujumdar, A. S.).

Reay derin olmayan bir akışkan yatakta (10 cm'den küçük) yanal parçacık yayılım katsayısını ölçmüştür ve aşağıdaki denklemi önermiştir.

$$D_{lat} = 0.17 \left(\frac{U - U_0}{\sqrt[3]{U_0}} \right) \quad \text{cm}^2/\text{s} \quad 3.8$$

Bu denklemin sonuçlarıyla deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum gözlenmiştir. Buna karşı akışkan yatağın derinliği 10 cm'den daha fazla bir değere artırıldığında, akışkan yatağın daha üst tabakalarındaki büyük kabarcıkların etkisinden dolayı parçacık yayılımının bir değişken vasıtasıyla arttığı Reay tarafından gözlenmiştir.

Yanal parça yayılım katsayısı biliniyorsa, yatay akışlı akışkan yataktaki parçalar için kalma zamanı dağılımı hesaplanabilir. Levenspiel'in, parçaların akan akışkan içindeki kalma zamanı dağılımını tahmin etmek için verdiği prosedür aşağıdadır.

Yatay akışlı akışkan yatak kurutma, özellikle ısıya duyarlı malzemelerden bağlı nemin çıkarılmasında çok üstünlük sağlar, çünkü kalma zamanı kısa aralıklarla kontrol edilir ve sistemin uzunluğu boyunca çok düşük derecede dikey karışım (back-mixing) olduğundan dolayı, belirgin bir nem içeriği dağılımı gözlenebilir.

Bir yatay akışlı akışkan yatağın düzenli çalışmasını sağlamak için giren ürün kolayca akışkanlaşabilir olmalıdır. Eğer beslenen malzeme çok ıslak ise malzemenin beslendiği giriş noktasında akışkanlaşma olmayacaktır.

3.4. Akışkanlaşmış Parçaların Kuruma Davranışı

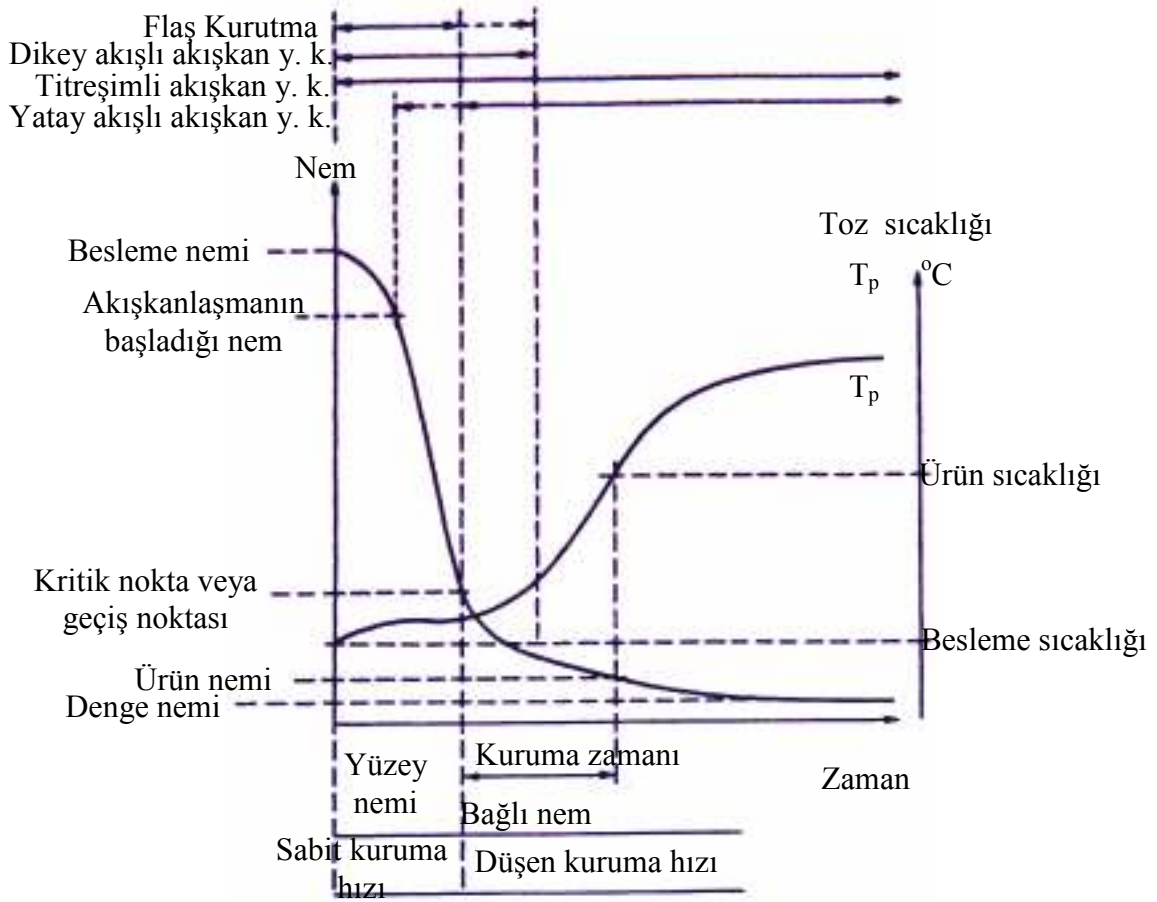
Her ürün kendi kuruma eğrisi karakteristiklerine sahiptir. Kuruma eğrileri küçük ölçekli akışkan yataklı kurutma ünitelerindeki testlerde, üründe kalan sıvı miktarının zamana göre işaretlenmesiyle belirlenebilir. Tipik bir kuruma eğrisi ve çeşitli tipte akışkan yataklı kurutucuların kullanılabilir bölgeleri şekil 3.7'de görülmektedir. Bununla birlikte süreksiz bir akışkan yatak testi esnasında ürün sıcaklık eğrisi de aynı şekilde gösterilmektedir.

Yüzey nemi, kurutucu gaz ile hızlı bir şekilde buharlaştırılır ve daha sonra kuruma eğrisinin geçiş noktası veya kritik noktası olarak adlandırılan noktasına ulaşılır. Bununla birlikte düşük nem içeriklerinde kuruma, parçaların içindeki nemin yayılım hızı ile kontrol edilir ve kuruma hızı çok azalır. Son üründe çok düşük nem içerikleri istendiğinde birkaç saat kurutma yapmak gerekebilir. Nemin hızlı buharlaşmasından dolayı sıcaklığın düşük olduğu kurutma safhasının ilk aşamasından sonra ürünün sıcaklığı, kurutma gazının giriş sıcaklığına yakın bir değere kadar artar.

Süreksiz bir akışkan yatakta birkaç eleştirmen tarafından da belirtildiği gibi gaz akışı çabucak doymaya ulaşacağından ısı ve kütle alışverişi sınırlı olacaktır. Süreksiz akışkan yataklar, uzun bir süre boyunca tamamen karışımli sürekli akışkan yataklardan daha nemli kalırlar ki, bu yüzden sürekli akışkan yataklarda ısı ve kütle alışverişi daha iyidir.

Bununla birlikte Reay ve Allen tarafından işaret edildiği gibi süreksiz kurutma testlerinde düşük kütle yayılım direncine sahip malzemelerde, verilen bir nem içeriğine ulaşmak için gerekli zamanın birim alan başına yatak ağırlığıyla doğru, gaz hızı ile ters orantılı olması kabul edilebilir. En yüksek kurutma sıcaklığı, ürünün ısıya karşı hassaslığı ve termoplastisitesi vasıtasıyla belirlenir. Eğer bu en yüksek sıcaklık değeri aşılsa, hava, dağıtıcı plaka üzerindeki ürünlerde şekil değişimine neden olur ve akışkanlaşma durabilir. Sıcaklık sınırı küçük ölçekli akışkan yataklı kurutucu testleriyle belirlenebilir.

Böyle bir test aynı zamanda akışkanlaşma hızı hakkındaki pratik sınırları da gösterecektir. Belli bir değer altında, düzensiz akışkanlaşma olacak ve malzeme içindeki daha büyük parçalar akışkanlaşmayacaktır. Belli bir hava hızının üzerinde ise daha küçük parçacıkların aşırı karıştırılması onları akışkan yataktan dışarı taşıyacaktır. Bu yüzden verilen bir sıcaklık ve gaz hızı için kurutma havasının toplam miktarı ve kurutucunun boyutu, kurutma için gerekli ısının ve havanın bir fonksiyonu olacaktır.



Şekil 3.7. Tanecikli ürünler için kuruma ve sıcaklık eğrileri (Mujumdar, A. S.).

3.5. Akışkan Yataklı Kurutma Sistemleri

3.5.1. Titreşimsiz sistemler

3.5.1.1. Süreksiz kurutma

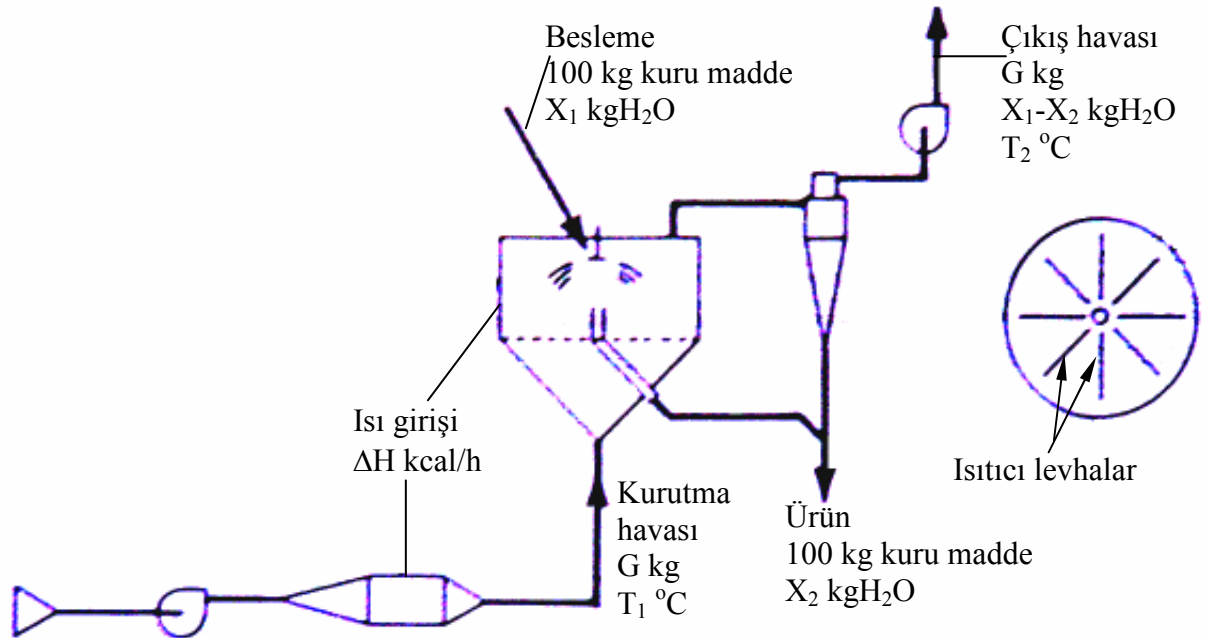
Süreksiz akışkan yataklı kurutucular, çoğunlukla düşük kapasiteli ve eczacılık sanayisindeki gibi kalite güvence prosedüründen dolayı süreksiz kurutmanın tercih edilebileceği yerlerde kullanılır.

Sürekli akışkan yataklı kurutucular daha önceden de belirtildiği gibi küçük sistemlerde yapılan testlerle kolaylıkla ölçeklendirilebilirler. Plenum da denilen akışkan yatak bölümünün alt kısmı, akışkan tabakanın üstündeki serbest bölge olarak adlandırılan kısımdan, malzemenin kolayca alınması ve sistemin kolayca temizlenmesi için hareket ettirilebilir bir şekilde yapılabilir.

Modern sistemler çok esnek ve karışık kontrol sistemlerini bünyelerinde bulunduran tamamen otomatik sürekli sistemler mevcuttur. Sürekli akışkan yataklı kurutucular, karıştırıcı, taneleştirici ve kaplayıcı olarak da kullanılırlar.

3.5.1.2. Tamamen karışimli akışkan yataklı kurutucu

Islak beslemenin, kısmen veya tamamen kurutulmuş ürünler ile serbestçe karışmasına izin verilen bir tamamen karışimli akışkan yataklı kurutucu akış diyagramı şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Isıtıcı levhali, tamamen karışimli akışkan yataklı kurutucu (Mujumdar, A. S.).

Akışkanlaşmış tabakanın yüksekliği, kurutulmuş malzemelerin serbestçe aktığı/dolaştığı yerin, üzerindeki bir bent tarafından kontrol edilir. Akışkanlaştırıcı hava ısıtılır ve akışkan yatağın plenum bölgesine gönderilir. Bir hava dağıtıcısı, akışkan tabaka boyunca düz bir hava hızı oluşturmanın yanında bütün maddelerin düzenli bir şekilde akışkanlaşmasını da sağlar. Çıkış havası bir siklon tarafından temizlenir ve buraya giren çok küçük parçalar, kurutulacak ürün akımına geri gönderilir. Akışkan tabakanın üzerindeki serbest bölge, parçacıkların aşırı kaçışını önlemek için yeterince yüksek olmalıdır. Akışkan tabakada parçaların hızlı karışımı ve hava dağıtıcı plakanın hemen üzerinde parçalar ile akışkan tabaka arasındaki özel temastan dolayı sıcak kurutma havası hemen parçacıkların sıcaklığına yaklaşır ve dolayısıyla malzemelerin aşırı ısınması durumu oluşmaz.

Akışkan yatakta ölü boşluklardan (dağıtıcıdan çıkan havanın akışkanlaştırmadığı bölgeler) kaçınmak için yeteri kadar deliklere sahip kusursuz bir gaz dağıtıcı tasarlamak önemlidir. Normalde, düzenli bir gaz dağıtımı sağlamak için gaz dağıtıcısı üzerindeki basınç düşümü, akışkanlaşmış parçalar üzerindeki basınç düşümünün en az % 30'u olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Dikey akışlı, ürün yayıcı bir akışkan yatakta, ıslak ürünleri kurutmak için ıslak beslenen parçaların hemen akışkanlaşabilir olması gerekmez. Beslemedeki küçük topraklar dönel ürün yayıcı vasıtasıyla akışkanlaşan tabakanın üstüne çıkarılabilir. Beslemedeki ıslak topraklar, akışkan tabakadaki sıcak ve kuru parçalar ile karıştığında hızla kurur ve birçok ürün için belli bir nem içeriğinin altındaki topraklar, akışkanlaşmış parçacıklar içinde parçalanır.

Çoğu yüklemelerde tercih edilen besleme noktası uzatılan yatağın üzerindedir ve dairesel yataklarda ise merkezdedir. Böylece ıslak katılar duvarlardan dışarı fırlatılmaz. Ürün yayıcı olmaksızın küçük besleme hızları ile beslenen parçaların akışkanlaşma noktasının aşağısındaki bir nem içeriğine kurutularak kuru ürün ortaya çıkarmak mümkündür. Bununla birlikte yüzey alanı her yerde aynı olmayan yataklarda (konik yataklar), ürünü, akışkan yatağın mümkün olan en geniş yüzey alanı üzerinde düzgün bir şekilde yaymak, verim açısından daha mantıklıdır. Fakat bazı durumlarda bu

teknik ile beslemedeki toprakları parçalamak imkânsızdır ve kurumuş ürün içinde topaklanmalardan kaçınmak için beslemenin ön kurutulması gerekli olabilir.

Kurutulan malzeme ısıya duyarlı bir malzeme değilse, kurutucu gaz için çok yüksek giriş sıcaklıkları uygulanabilir ve hava dağıtıcısının da bulunduğu akışkan yatak, ısıya dayanıklı tuğlalar ile yapılarak kurutma süreci daha ekonomik hale getirilebilir.

300 µm'den küçük parçalar kurutulacağı zaman akışkanlaştırıcı gaz hızı düşük olmalıdır. Bu durumlarda akışkan yatak boyutu oldukça azaltılabilir ve akışkan tabakanın içine bir ısı kaynağı yerleştirilmesiyle kurutma sürecinin ekonomikliği önemli bir şekilde artırılabilir ve böylece kurutma için gerekli hava miktarı da azalır.

Akışkanlaşan parça tabakası ile ısıtıcı levhalar arasındaki ısı geçiş katsayısı küçük ölçekli bir kurutucu ile test edilerek bulunmalıdır. Aynı zamanda ısıtıcı levhaların izin verilen en yüksek sıcaklığı da belirlenmelidir. Akışkan yatak içindeki ısıtıcı paneller vasıtasıyla gerekli ısının % 80'den fazlası sağlanabilir. Verilen bir uygulama için akışkan yataklı bir kurutucunun boyutu aşağıdaki bir veya daha fazla değişkene bağlıdır.

- Akışkanlaşan gaz hızı
- Giriş gaz sıcaklığı
- Gerekli ürün sıcaklığı
- Çıkış havasındaki doyma miktarı
- Ürünün (akışkan yatak içindeki) kalma zamanı
- Kullanılan ısıtıcı paneller

3.5.1.3. Yatay akışlı akışkan yataklı kurutucu

Tamamen karışımli akışkan yataklı kurutucular, ürünün nem içeriğinin kritik nem içeriğinden çok daha düşük bir değerde olması istendiğinde, ki bu durumda gerekli kurutma zamanı çok uzun olacağından, uygun değildir. Tamamen karışımli bir akışkan

yatağın ürünü, çıkış havası ile yakın bir dengededir. Dolayısıyla bu havanın düşük nem seviyesinde tutulmak zorunda kalınması çok fazla kurutma havası gereksinimi ortaya çıkarır ki bu da kurutma maliyetlerini artırır.

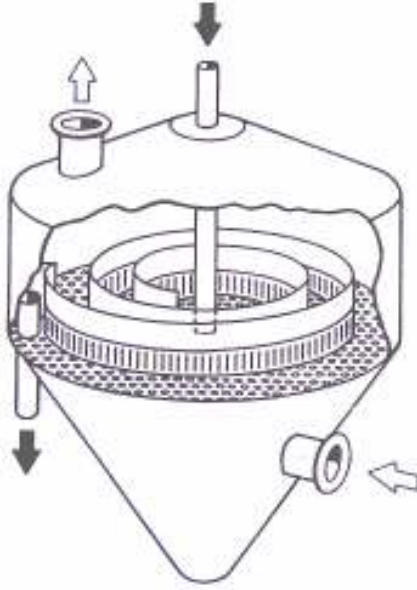
Ayrıca tamamen karışımli bir akışkan yataklı kurutucuda kurutulan parçalar, çok farklı kalma zamanlarına sahiptirler ve kurutulan malzemenin büyük bir kısmı ya aşırı kurutulur veya tam kurutulmaz. Bu yüzden yatak içindeki sıcak bölgelerin yakınında ısıya duyarlı bir malzemenin kuruması ürünün zarar görme riskini yükseltecektir.

Tamamen karışımli akışkan yataklı kurutucularda yukarıdaki sınırlamaların üstesinden gelmek için parçacıkların kalma zamanının kontrol edilebildiği yatay akışlı bir akışkan yatak uygulanır. Bu tip bir akışkan yatak şekil 3.9’da gösterilmektedir.

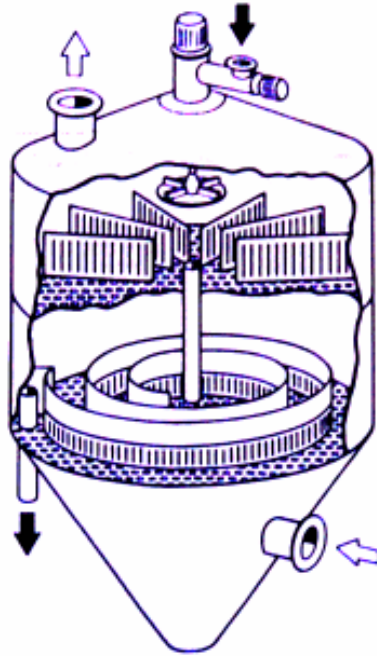
Hemen akışkanlaşması gereken besleme (ürün), akışkan yatağın merkezinden içeri alınır ve akışkanlaşan parçalar akışkan yatak çevresinde uzun ve ince bir yol (spiral şekilli bir yapı boyunca) izlemeye zorlanır ki, bunun sonunda kuru ürün bir bent üzerine boşaltılır. Bu kurutucularda parçaların kalma zamanı iyi bir şekilde kontrol edilebilir ve çıkarılan ürün, sıcak kurutucu gaz ile yaklaşık olarak aynı sıcaklıktadır. Bu sistemde malzemeyi aşırı ısıtmaksızın çok düşük nem içeriğine ulaşılabilir.

3.5.1.4. İki aşamalı akışkan yataklı kurutucu

Şekil 3.10’da görüldüğü gibi ön kurutucu olarak flaş kurutucu yerine tamamen karışımli akışkan yatak kullanılmasıyla, iki aşamalı akışkan yataklı kurutucu da denen daha karışık bir kurutma tesisi tasarlanabilir. Yatay akışlı akışkan yatağın üstüne tamamen karışımli akışkan yatağın düzenlenmesiyle ürün kurutma havası ters olarak akacak böylece alan gereksinimleri, tesis (kurma) maliyetleri ve ısı tüketimi azalacaktır.



Şekil 3.9. Yatay akışlı akışkan yatak (Mujumdar, A. S.).



Şekil 3.10. İki aşamalı akışkan yatak (Mujumdar, A. S.).

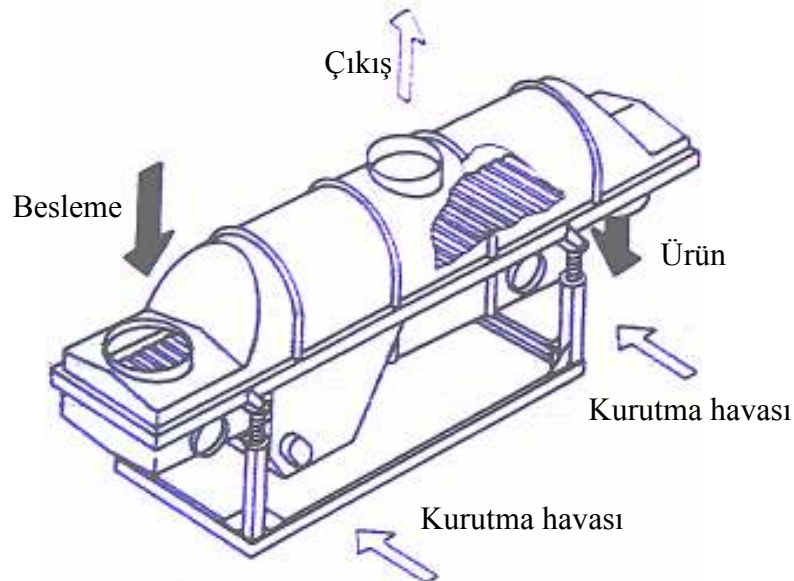
3.5.2. Titreşimli akışkan yataklı kurutma sistemleri

3.5.2.1. Genel açıklama ve üstünlükleri

Bazı tanecikli ürünleri aşağıdaki bir veya daha fazla fiziksel özelliklerinden dolayı durgun akışkan yataklarda kurutmak zordur.

- Geniş parça boyutu dağılımı
- Islak veya kuru parçaların düşük dayanımları
- Parçaların yapışkanlığı veya termoplastisitesi
- Islak ürünlerin hamurumsu özellikleri

Bazı ürünlerin geniş parçacık boyutu dağılımı, durgun akışkan yataklı kurutucularda akışkanlaşma hızının seçimini güçleştirir. Daha büyük parçaların akışkanlaşması için kurutucuya daha yüksek bir akışkanlaşma hızı vermek, büyük miktarlardaki küçük parçacıkların, yeterince kurumadan yataktan dışarı taşınmasına neden olur. Diğer bir deyişle düşük akış hızı akışkanlaşmayı sağlayamaz ve böylece kurutucu boyunca daha büyük parçaların nakli engellenir ve akışkanlaşma olmaz.



Şekil 3.11. Titreşimli akışkan yatak (Mujumdar, A. S.).

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi normalde uzun dikdörtgen kayak biçiminde bir yapısı olan, birkaç milimetre genliğe sahip olan ve 5-25 Hz frekanslarıyla titreşen kısa ve titreşimli bir akışkan yatak ile yukarıda bahsedilen özelliklere sahip maddeleri kurutmak mümkündür. Titreşim vektörü dikeye 0-45°’lik bir açıda uygulanır ve akışkanlaşmanın ve titreşimin birleşik etkisiyle, malzeme kurutucu boyunca kolayca taşınır ve kurur.

Titreşimli akışkan yatak boyunca katıların hareketlerinin düzgün olması için gerekli hava hızı, ürünün minimum akışkanlaşma hızının %20’sinden az daha aşağıda olabilir. Böylece akışkanlaşma ve kurutma için hava hızı ürünün kalma zamanını ve taşınmasını etkilemeksizin geniş bir aralıkta oldukça serbest bir şekilde seçilebilir ki bu esas olarak titreşimin genliğinin ve yönünün ayarlanmasıyla kontrol edilebilir. Oldukça düşük bir kurutma havası hızı seçildiğinde küçük parçalar kolayca akışkanlaşırken daha büyük parçalar kısmen akışkanlaşır bununla birlikte daha küçük parçaların kaçışı azalır ve küçük parçaların kalma zamanları daha iyi kontrol edilir.

Durgun akışkan yataklı bir kurutucuda, parçaların şiddetli karışımı gaz kabarcıklarından dolayı akışkan tabakada olur. Bu yüzden kırılğan parçalar kolayca aşınabilir. Titreşimli akışkan yatakta malzemenin kurutucu boyunca çok yumuşak/nazik bir şekilde taşınmasını sağlar. Düşük gaz hızı seçilebildiği için akışkan yatakta gaz kabarcıklaşmasından kaçınılır ve bu büyük ölçüde parçacık aşınmasını azaltır. Sonuç olarak, titreşimli akışkan yataklar, düşük mekanik dayanımlara sahip ıslak yada kuru durumdaki malzemelerin kurutulmasında kullanılabilir.

Titreşimli akışkan yataklı kurutucular, bugün çoğunlukla gıda ve günlük ürün (süt, kakao ve kahve gibi) sanayilerinde kullanılır. Bu tip ürünler özellikle kırılğandır. Titreşimli akışkan yataklı kurutucular, inorganik tuzlar, tanecikli gübreler, maden ürünleri veya geniş parçacık boyutu dağılımı olduğu zamanlarda da kullanılır.

Son zamanlarda çok aşamalı bir titreşimli akışkan yatağın, dönel hareketlere dayanan, genellikle dönel elekler gibi çalıştırılan yeni bir çeşidi geliştirilmiştir. Oluşan titreşimler normal titreşimli akışkan yataklı kurutucularınkinden çok daha güçlüdür ve

bundan dolayı balık etleri gibi çok zor akışkanlaşan ürünler bile başarılı bir şekilde kurutulabilir. Bu kurutucu, kurutma bölmelerinin bir başkasının üstüne yapılmasına kolaylıkla imkân tanır. Bu yüzden daha yüksek ısı verimli ve çok aşamalı küçük bir kurutucu tasarlanabilir.

Tablo 3.2. Geldart'ın parçacık gruplarının ayırt edici özellikleri.

Özellik	Grup C	Grup A	Grup B	Grup D
Ayırt edici kelime/kelimeler	Yapışkan	Havalandırılabilir	Kolayca kabarcıklaşma	Püskürtülebilir
Örnek	Un	Katalizörler	Kum	Buğday
Parçacık Boyutu	$\leq 20 \mu\text{m}$	$20 < d_p < 90 \mu\text{m}$	$90 < d_p < 650 \mu\text{m}$	$> 650 \mu\text{m}$
Yataktan taşınma	Çok	Az	İhmal edilebilir	İhmal edilebilir
Püskürtme	Yok	Yok	Sadece kısa yataklar	Kolayca
Katıların karışımı	Çok düşük	Yüksek	Orta	Düşük

3.5.2.2. Titreşimli akışkan yataklı kurutucunun karakteristikleri

Görsel gözlemlere dayanarak titreşimli bir sistemde, titreşimsel ivmelerin büyüklüğüne bağlı olarak üç çalışma şekli tanımlanabilir.

- a) Titreşimli durum: $\frac{w^2 a}{g} < 1$ durumudur ve yatak, normal bir akışkan yatak gibi davranır ve titreşimler akışkanlaşmış tabakanın kararlılığına ve homojenliğine yardım eder.

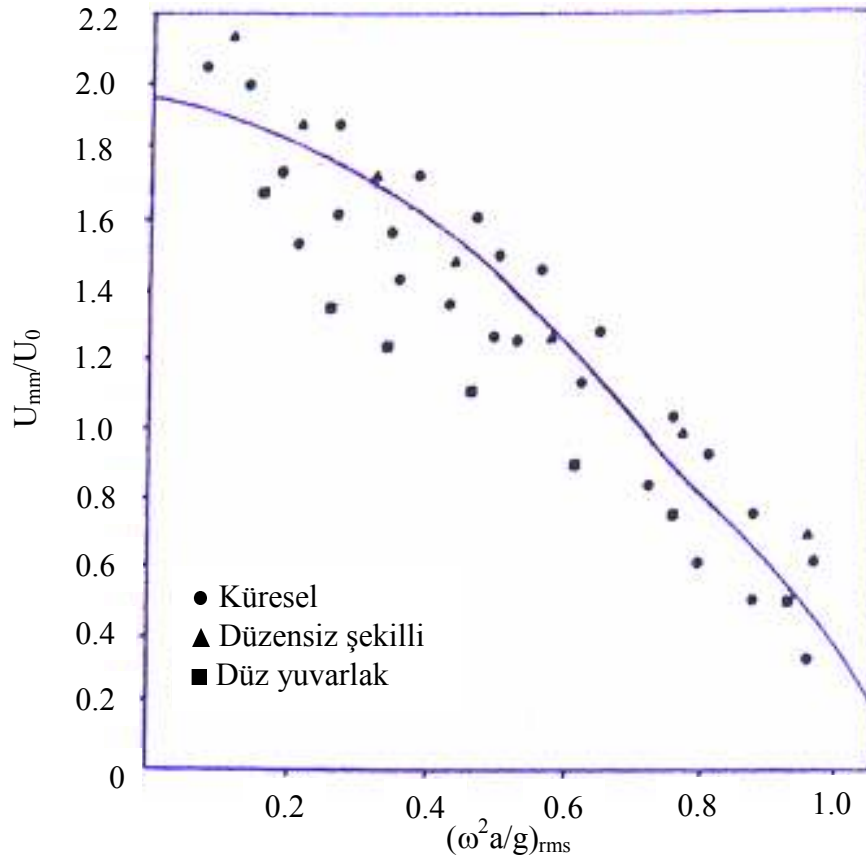
- b) Titreşimli akışkan tabaka: $\frac{w^2 a}{g} \cong 1$ durumudur ve hem gaz akışı hem de titreşimler akışkanlaşmaya katkıda bulunur ve yatak, gaz akışı ve titreşimlerin bağıl büyüklüklerinden etkilenir.
- c) Titreşimli akışkan yatak: $\frac{w^2 a}{g} > 1$ durumudur ve yatak sadece titreşim kuvvetleri ile hareket ettirilir ve hava sadece ısı ve kütle geçişi için bir ortam olarak kullanılır.

Titreşimin etkisinin, yatak yüksekliğinin artırılmasıyla azaldığına dikkat edilmesi gerekir ve 0.5 metrenin üzerindeki yatak yükseklikleri nadiren kullanılır. Gupta ve Mujumdar titreşim hızı ($\frac{w^2 a}{g} > 4$) 4'ü aştığında akışkan yatağın homojenliğinin kötüleştiğini belirtmişlerdir.

Yatağa titreşim uygulandığında, parçacıkların sabit bir durumdan, askıda kalma durumuna geçişi oldukça düzgündür ve titreşimli akışkan yatakta katıların karışımı, görsel olarak yeterince güçlüdür.

Şekil 3.12'de titreşimli bir akışkan yatak için titreşim hızının değişiminin, katıların karışım hızına etkisi gösterilmiştir. Şekil 3.12'deki eğri, sadece görsel değerlerden elde edilen verilere dayanmaktadır ve Mujumdar bu eğrinin genel bir geçerliliğinin olmadığına işaret etmiştir. Bununla birlikte şekil 3.12 titreşim uygulandığında gaz hızının nasıl düşebileceği hakkında bir fikir verir.

Titreşim veya gaz akışı vasıtasıyla katıların karışımı artırıldıkça, ısı geçiş katsayısı da artar ve titreşimsel hızlar çok yüksek olduğunda yatak yükselir. Gaz akış hızının en küçük akışkanlaşma hızının üzerine çıkarıldığında, titreşimin etkisinin fazla önemli olmadığı, yapılan deneylerde görülmüştür.



Şekil 3.12. Titreşimli bir akışkan yatak için katıların en düşük karışma hızı. Titreşimsel ivmelerin etkisi (Mujumdar, A. S.).

Gupta ve arkadaşları titreşimli bir akışkan yatakta silikajellerin kuruması esnasında titreşimin ve dağıtıcı eleklerin etkisini çalışmışlardır. Bu çalışma sonucunda ısı ve kütle geçişinin çoğunun dağıtıcının hemen üzerindeki ilk birkaç milimetre içinde olduğunu ve bunun durgun akışkan yataklı kurutucuların davranışı ile uygun olduğunu bulmuşlardır. Buldukları sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Titreşimin, parçaların kritik nem içeriğini önemli miktarda değiştirmedeğini ve azalan hız döneminde kuruma mekanizmasını da önemli miktarda etkilemediğini,

- Sabit kurutma şartları altında ve titreşimsel ivme $\frac{w^2 a}{g} = 1$ iken, titreşimin, kuruma hızını minimum bir değere azalttığını, ayrıca titreşim hızının artırılmasının yine kuruma hızını artırdığını bulmuşlardır.

Strumillo ve Pakowski bazı kurutma uygulamalarında akışkanlaşmış tabakalara titreşim uygulandığında kurutma hızında büyük bir artış olduğunu bildirmişlerdir.

3.5.3. Diğer akışkan yataklı kurutucular

3.5.3.1. Püskürtmeli yataklı kurutucu

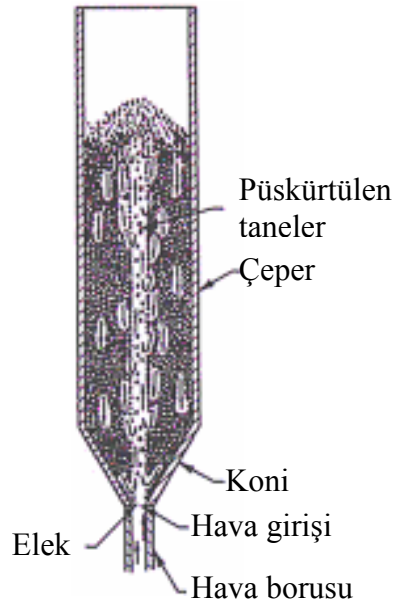
Püskürtmeli akışkan yataklı kurutucularda, akışkan yataklı kurutuculardaki gibi düz bir şekilde yukarı doğru hareket eden gaz, bir gaz dağıtıcı yardımıyla dağıtılması yerine, şekil 3.13'de gösterildiği gibi yatağın konik bölümünden püskürtülür. Kurutma gazının girişiyle, parçalar, püskürtülen hava içinde karışır/yayılır ve flaş kurutma işlemine benzer şekilde ısı ve kütle hızı bir geçişi meydana gelir. Bu yöntemde katıların sistemli bir döngüsel hareketi oluşturulur. Kurutulacak parçalar, püskürtülen gaz ile birlikte yukarı doğru hareket eder ve yukarı çıkan parçaların bulunduğu yerler diğer parçalarla doldurulur. Yukarı çıkan parçaların tekrar aşağıya doğru hareketiyle bu döngü devam eder.

Püskürtmeli akışkan yataklar, Kanada Ulusal Araştırma Kurulu tarafından 1954'de buğday kurutulması için geliştirilmiştir. 5 mm'den daha büyük parçalar kurutulacağı zaman, püskürtmeli yatağın normal bir akışkan yatağa göre bazı özel üstünlükleri vardır. Püskürtmeli yatakta katıların çok iyi karışımı ve parçaların gaz ile iyi teması söz konusudur.

Püskürtmeli yataklı kurutucu buğday ve bezelye gibi özellikle ısıya karşı duyarlı malzemelerin kurutulması için uygundur. Püskürtmeli yataktaki tanecikli

maddelerin mükemmel ve kontrol edilebilir karışımı, bu sistemde akışkan yataklı kurutuculardan daha yüksek sıcaklıklarda kurutma yapılabilmesine imkân tanımaktadır.

Püskürtmeli yataktaki toplam basınç düşümü, benzer bir akışkan yataktaki basınç düşümünden $1/3$ oranında daha azdır, çünkü parçaların ağırlığının bir bölümü yatağın duvarı tarafından desteklenir. Bununla birlikte püskürtmenin başlayabilmesi için gerekli basınç düşümü oldukça yüksektir ki bu tür bir kurutucunun özellikle fanı tasarlanırken çok iyi hesap yapılmalıdır.



Şekil 3.13. Püskürtmeli yatak (Mujumdar, A. S.).

Akışkan yataklardaki en düşük akışkanlaşma hızına benzer olarak, püskürtmeli akışkan yataklarda da bir en küçük gaz hızından bahsedilir, buna karşı bu gaz hızının değeri hem katının hem de akışkanın özelliklerine ve ayrıca yatak şekline bağlıdır.

Ayrıca püskürtmeli yataklı kurutucularda, en yüksek püskürtme yüksekliği değerine dikkat edilmelidir, eğer bu değer aşılsa püskürtmeli yatak akışkan yatağa

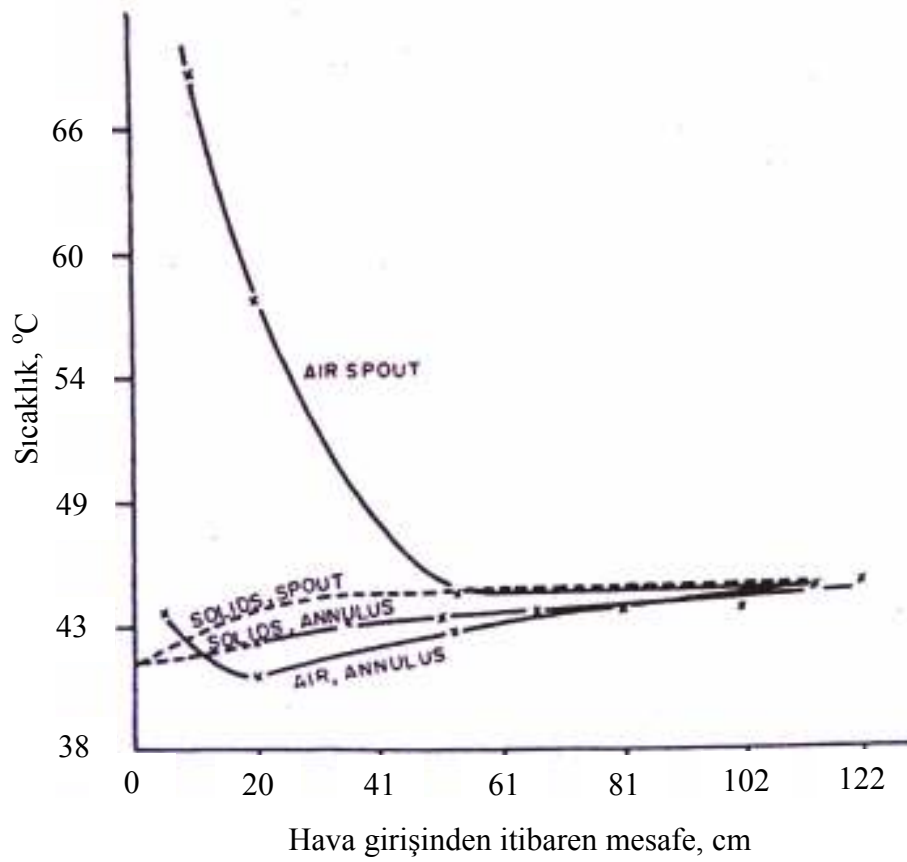
dönüşür. Bu yüksekliğin değeri de hem katının hem de akışkanın özelliklerine ayrıca yatak şekline bağlıdır.

Püskürtmeli bir akışkan yataklı kurutucuda, buğdayın sürekli sistemde kurutulması esnasında, havanın ve katıların sıcaklıkları Mathur ve Gishler tarafından kaydedilmiştir ki elde edilen grafikler ile püskürtmeli kurutma şartlarında kurutma sürecinin mekanizması şekil 3.14’de gösterilmektedir. Ayrıca püskürtmenin alt bölümlerinde etkili ısı ve kütle geçişinin ardından, parça sıcaklığındaki artışın, katıların yüksek orandaki dolaşımından dolayı çok az, sadece birkaç derece olduğu şekil 3.14’den görülebilir. Dolayısıyla kurutucu hava tarafından kontrol edilen nem yayılımının çoğu tabanda olur ki, burada kurutma için parçalara ısı verilirken gazın sıcaklığı düşer bu esnada da yukarı doğru hareket eden parçaların yerleri diğer parçalar tarafından doldurulur ve böylece katılar aşağı doğru hareket eder.

Püskürtmeli yataklar ısıya karşı hassas maddelerin kurutulmasında kullanılabilir, fakat püskürtmeli yataklarda parçaların aşırı ısıtılmasından kaçınılmalıdır. Çünkü bunlarda, akışkan yataklı kurutuculardan daha yüksek gaz giriş sıcaklıkları kullanılabilir. Fakat kullanılacak parça boyutları sınırlıdır. 2 ton/h’e kadar olan düşük kapasiteli kurutucuların uygulamaları da sınırlıdır ve büyük ölçekli kurutma işlemleri için de çoklu püskürtmeli yataklar kullanılmamaktadır.

Püskürtmeli yatakta ısıya duyarlı çeşitli tanecikli maddelerin kurutulması Romankov ve Rashkovskaya tarafından çalışılmıştır ve bunlar eski Sovyetler Birliğinde gerçekleştirdikleri kapsamlı çalışmayı bir kitapta toplamışlardır.

Püskürtmeli akışkan yataklı kurutucular aynı zamanda sıvı durumdaki malzemelerin kurutulmasında sıvı malzemenin püskürtmeli yatağa sprey şeklinde gönderilmesiyle kullanılır.



Şekil 3.14. Buğdayın sürekli kurutulması esnasında havanın ve katıların sıcaklıklarının dağılımı: yatak çapı: 30.48 cm, yatak yüksekliği: 1.22 m, hava giriş sıcaklığı: 116 °C (Mujumdar, A. S.).

Püskürtmeli yatak, akışkan yatak gibi taneleştirici ve kaplayıcı olarak da kullanılabilir. Yatak içindeki taneciklerin döngüsel hareketi bu durumda bir üstünlük sağlayabilir. Besleme, küçük tanecikler içeren püskürtmeli yatağın daha alt bölümündeki sıcak gazın içine atomize bir şekilde püskürtülür ve besleme, küçük taneciklerin yüzeyinde hızla kurutulur. Bu yüzden tanecikler kaplanarak büyürler, çünkü tanecikler yatak içinde döngü halindedirler ve son ürün iyi bir şekilde yuvarlaklaştırılır, yoğundur ve düzenli bir yapıdadır. Bu yöntem ile taneleştirilmiş gübre, boya maddeleri vb. üretilir.

3.5.3.2. Mekanik karıştırıcı akışkan yataklı kurutucu

Enerji maliyetlerinin artması, yüksek oranda nem içeren katıları, sprey kurutmaya uygun hale getirme gereksinimini artırmıştır. Eğer genelde küçük parçalardan oluşan bu tür bir hamur veya topak, dikey akışlı bir akışkan yataklı kurutucuya gönderilirse kolayca yayılmaz. Bu tür tozları akışkan yataklı kurutucunun besleme bölgesine mekanik bir karıştırıcı ilave ederek akışkanlaştırmak mümkündür.

Kurutucunun altındaki karıştırıcı yaklaşık olarak 100 devir/dakika hızla döner ve karışım hamurumsu beslemeyi parçalar, topakları kuru maddelerin içine karıştırır ve küçük parçaların da akışkanlaşmasına yardım eder. Kurutma gazı, akışkanlaşan parçaların daha alt tabakasındaki hava deliklerinden geçerek gönderilir. Parçaların ortalama kalma zamanı 20 dakika kadardır ve yatak içindeki ürünün düzenli kuruması, gaz hızı tarafından kontrol edilir. Endüstride boya maddeleri, flaş kurutucu ile akışkan yataklı kurutucuların birleşimi olan bu tip kurutucularda kurutulur.

Tablo 3.3. Isıtıcı levhali ve ısıtıcı levhasız dikey akışlı akışkan yataklı kurutucu için bazı veriler.

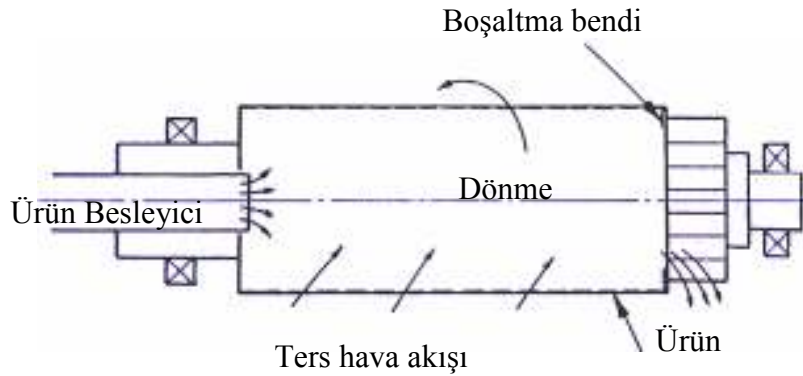
Isıtma Levhaları	$T_{giriş}$	$T_{çıkış}$	G (kg gaz/kg kuru madde)	Q (kcal/kg kuru madde)
-	100	70	24.80	594
+	100	70	19.40	467
-	130	70	12.50	382
+	130	70	6.60	287

3.5.3.3. Merkezkaç akışkan yataklı kurutucu

Merkezkaç akışkan yataklı kurutucular, yapışkan, yüksek nem içeren tanecikli gıdaların sabit hızda ön kurutulması ve neminin çıkarılması için son zamanlarda geliştirilen bir kurutucudur. Kullanılabilir gaz hızı 15 m/s'ye kadar çıkabilir ki bu değer

normal akışkan yataklı kurutuculara uygulanan en yüksek hızının çok üstünde bir değerdir. Merkezkaç akışkan yataklı kurutucular küp şeklinde, dilimli ve parçalı sebzelerin kurutulmasında kullanılır ki, aksi takdirde bunlar akışkanlaştırılmaz ve geleneksel bantlı taşıyıcı üzerinde kurutulur.

Merkezkaç akışkan yataklı kurutucu, yatay eksen etrafında dönen delikli bir silindirden (merkezkaç kuvveti yerçekiminin 15 katıdır) oluşur ve şekil 3.15’de de gösterilen bu kurutucunun dönen delikli silindiri, yüksek hızdaki sıcak hava akımının içindedir. Kurutucu içinde bulunan katılar, kurutucu hacminin % 10-20’sini kaplarlar ve her bir dönüş esnasında akışkanlaşırlar ve sabit yatakta, çevrimin/dönüşün hareketsiz bölümlerinde şekillenirler. Merkezkaç akışkan yataklı kurutucudaki bir parçanın bütün yüzeyleri sıcak havaya maruz kaldığından dolayı, örneğin, sebzeler için kuruma hızında, normal kuruma hızına göre 5 kattan fazla artış gözlenir. Bu yüksek ısı geçiş hızı sebzelerin neminin hemen çıkmasına yardım eder. Son zamanlarda merkezkaç akışkan yataklı kurutucuda kurutulan pirinçlerin kalitesinin yüksek, çabuk pişebilen pirinçler oldukları deneylerle ispatlanmıştır.



Şekil 3.15. Merkezkaç akışkan yataklı kurutucu (Mujumdar, A. S.).

4. BUĞDAY VE BULGUR

4.1. Ham Buğdayın Özellikleri

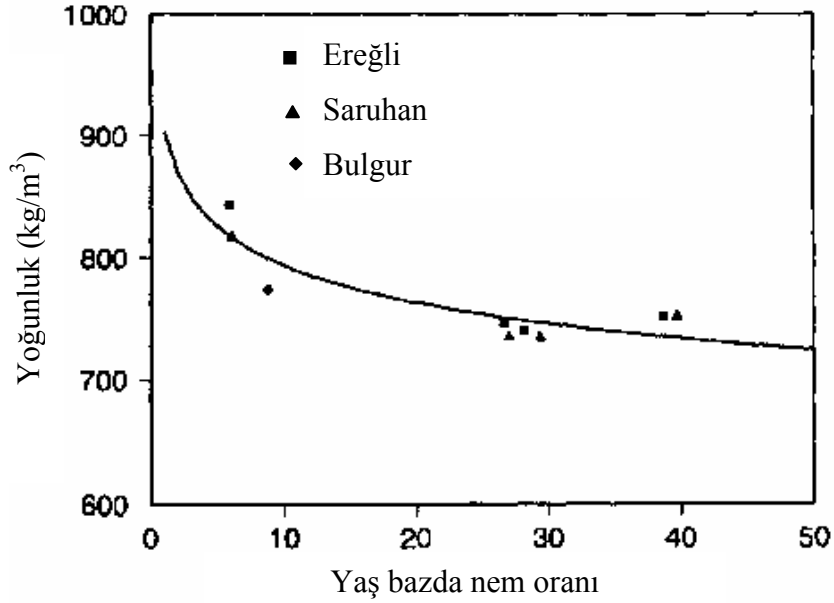
4.1.1. Yoğunluk

S. Ünal, buğdayın bileşiminde bulunan maddelerin yoğunluklarının farklı ve sudan ağır olduğunu, nişastanın 1530, şekerin 1600, selülozun 1530, glutenin 1125, mineral maddelerin 2300, yağın 910-960, havanın 1.293 ve buğday tanesinin yoğunluğunun ise 1320-1414 kg/m³ arasında değiştiğini, koyu renkli ve sert buğdayların yoğunluğunun ise yumuşak buğdaylardan daha fazla olduğunu yazmıştır (Ünal).

S. Devahastin, yaptığı tez çalışmasında yumuşak buğdayları nemlendirmiş ve kurutmuş, nemlendirdiği buğdayların boşluksuz yoğunluklarını 1233.6, boşluksuz yoğunluklarını 719.1, nemlendirip daha sonra kuruttuğu buğdayların boşluksuz yoğunluklarını 1182.0 ve boşluksuz yoğunluklarını 779.3 kg/m³ ölçmüştür (Devahastin, 1997).

S. Tavman ve arkadaşları, farklı nem içeriklerindeki durum buğdayı ve bulgurun ısı yayılımını incelemeleri sırasında kullandıkları buğdayların ve bulgurun yoğunluklarını ölçmüşlerdir. Ereğli yöresi buğdayları için, yaş bazda % 9.3 nem içeriğinde 827 kg/m³, % 37.89 nem içeriğinde 695 kg/m³, Saruhan yöresi buğdayları için % 10.23 nem içeriğinde 798 kg/m³, % 38.65 nem içeriğinde 698 kg/m³ ve % 9.17 nem içerisine sahip bulgurların ise 765 kg/m³ boşluklu yoğunluklara sahip olduklarını bulmuşlardır. Yaptıkları diğer bir çalışmada ise şekil 4.1'de gösterilen grafiği elde etmişlerdir (Tavman vd., 1997).

E. Hajidavalloo, akışkan yataklı bir kurutma sistemde yaptığı tez çalışmasında kullandığı buğdaylardan, % 14 nem içeren ham buğdayların yoğunluklarının 1215 kg/m³, % 43 nem içeren nemli buğdayların ise 1250 kg/m³ yoğunluğa sahip olduklarını belirtmiştir (Hajidavalloo, 1998).



Şekil 4.1. Ereğli, Saruhan yöresi buğdaylarının ve bulgurun yoğunluğu (Tavman vd., 1997).

A. Tabatabaeefar, % 7.4 oranında nem içeren buğdaylar üzerinde yaptığı ölçümlerde boşluklu yoğunluklarının 538.8 ile 740 kg/m³ arasında boşluksuz yoğunluklarının ise 847.2 ile 1240 kg/m³ arasında değiştiğini bulmuştur (Tabatabaeefar,2003).

M. Özbey ve arkadaşı, buğday tanelerinin akışkan yatakta kesikli kurutulması esnasında, aksenel pervaneli tip bir girdap üretici ile yatak içinde oluşturulan girdapların, kurutma havası miktarının ve sıcaklığının kurutma etkinliği üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında kullandıkları buğdayların yaklaşık 1255 kg/m³ yoğunluğa sahip olduklarını yazmışlardır (Özbey ve Söylemez, 2005).

A. W. Aregba ve arkadaşları, buğdayın sabit yatakta kalın bir tabaka halinde kurutulması üzerine oluşturdukları modelde, buğdayın yoğunluğunu 1400 kg/m³ almışlardır (Aregba, et al., 2006).

4.1.2. Nem oranı

S. Tavman ve arkadaşı, farklı nem içeriklerinde ve çevre sıcaklığındaki durum buğdayı ve bulgurun ısı iletkenliklerini araştırdıkları çalışmalarında kullandıkları Ereğli bölgesi buğdaylarının ıslak bazda % 9.17, Saruhan bölgesi buğdaylarının ise % 10.23 nem içerdiklerini belirtmişlerdir (Tavman ve Tavman, 1998).

B. Özkaya, “ekmeğin fitik asit miktarına çeşit ve ekstraksiyonun etkisi” adlı projesinin raporunda, incelediği buğdayların nem oranlarının, kuru bazda % 8.0 ile 9.3 arasında değiştiğini bildirmiştir (Özkaya, 2004)

4.1.3. Tane sayısı ve boyutları

S. Ünal, Türkiye’de üretilen buğdayların 1000 tane ağırlığının, yumuşak buğdaylarda 24 ile 51 gram arasında, sert buğdaylarda ise 26 ile 58 gram arasında değiştiğinden bahsetmiştir (Ünal).

S. Devahastin, yaptığı tez çalışmasında yumuşak buğdaylar üzerinde yaptığı çalışmalarında, nemlendirdiği buğdayların uzunluk, genişlik ve kalınlıklarının sırasıyla 5.863, 3.056, 2.639 mm, nemlendirip kuruttuğu buğdayların ise 5.295, 3.158, 2.732 mm boyutlarında olduğunu belirtmiştir (Devahastin, 1997).

E. Hajidavalloo, akışkan yataklı bir kurutma sisteminde yaptığı tez çalışmasında kullandığı buğdaylardan, % 14 nem içeren ham buğdayların ortalama çaplarının 3.66, % 43 nem içeren nemli buğdayların ortalama çaplarının ise 3.89 mm olduğunu belirtmiştir (Hajidavalloo, 1998).

A. Tabatabaeefar, % 7.4 oranında nem içeren buğdayın fiziksel özelliklerini araştırdığı çalışmasında ortalama tane boyunu 7.08, genişliğini 3.27, kalınlığını 2.98 cm olarak ölçmüş, 1000 tane ağırlığını ise 29.6 gram olarak bulmuştur (Tabatabaeefar,2003).

B. Özkaya, hazırladığı bir araştırma projesi raporunda incelediği buğdayların 1000 tane ağırlıklarının 31 ile 42.2 gram arasında değiştiklerini açıklamıştır (Özkaya, 2004)

M. Özbey ve arkadaşı, buğday tanelerinin akışkan yatakta kesikli kurutulması esnasında kullandıkları buğdayların uzunluğunu, genişliğini ve kalınlığını sırasıyla 6.7, 3.2 ve 2.7 mm olarak ölçmüşlerdir (Özbey ve Söylemez, 2005).

4.1.4. Küresellik

S. Devahastin, yaptığı tez çalışmasındaki kurutma deneyleri için nemlendirdiği buğdayların küreselliklerini 0.616, kuruttuğu buğdayların küreselliklerini ise 0.675 olarak hesaplamıştır (Devahastin, 1997).

A. Tabatabaeefar, % 7.4 oranında nem içeren buğdaylar üzerinde yaptığı ölçümlerde küreselliklerinin 0.6 olarak belirtmiştir (Tabatabaeefar,2003).

M. Bayram, küre, küp, dikdörtgen prizma ve silindir gibi bazı şekiller ile buğday, fasulye, kırmızı mercimek, nohut ve kırılmamış bulgur gibi bazı tanecikli gıda maddelerinin küreselliklerini hesaplamak için yeni bir denklem ve boyutsal bir yöntem geliştirmiştir. Küre, küp ve uzunluğu çapına eşit olan silindir için küreselliklerin sırasıyla, 1, 0.874 ve 0.806 olduğunu, tanımladığı mutlak küreselliğin ise sabit ve boyuttan bağımsız olduğunu, küre, küp ve uzunluğu çapına eşit olan silindir için mutlak küreselliklerin 0, 0.00271 ve 0.00155, buğday, fasulye, kırmızı mercimek, nohut ve kırılmamış bulgurun küreselliklerinin ise sırasıyla 0.01038, 0.00743, 0.00641, 0.00240 ve 0.01489 olduğunu hesaplamıştır (Bayram, 2004).

4.1.5. Boşluk oranı

S. Devahastin, tez çalışmasında, yaptığı kurutma deneyleri için nemlendirdiği buğdayların boşluk oranını 0.417, kuruttuğu buğdayların boşluk oranını ise 0.341 olarak hesaplamıştır (Devahastin, 1997).

E. Hajidavalloo, akışkan yataklı kurutma sisteminde yaptığı tez çalışmasında kullandığı buğdayların boşluk oranının 0.4 olduğunu belirtmiştir (Hajidavalloo, 1998).

A. W. Aregba ve arkadaşları, buğdayın sabit yatakta kalın bir tabaka halinde kurutulması sürecinde boşluk oranını 0.416 olarak almışlardır (Aregba, et al., 2006).

4.1.6. Yayılım katsayısı

S. Tavman ve arkadaşları, farklı nem içeriklerindeki durum buğdayı ve bulgurun ısı yayılımını incelemişler ve sonuçlarını mevcut yayınlarda tahmin edilen modeller ile kıyaslamışlardır. Sonuçta Ereğli bölgesi durum buğdayları için ısı yayılım değerlerinin 8.92×10^{-8} ila 11.43×10^{-8} m²/s, Saruhan yöresinin durum buğdayları için 8.76×10^{-8} ila 10.78×10^{-8} m²/s aralığında değiştiğini ve bulgurun ısı yayılım katsayısının ise 8.28×10^{-8} m²/s olarak bulmuşlardır (Tavman vd., 1997).

C. Ni ve arkadaşı, çok küçük gözenekli küresel bir taneciğe olan kütle yayılım için analitik bir çözüm elde etmişlerdir. Katı içindeki kütle yayılımın çok küçük gözenekli yayılım olduğunu kabul etmişler ve ısı etki ile gaz tarafı kütle yayılım direncini hesaba katmışlardır. Oluşturdukları denklemleri Laplace dönüşüm metodunu kullanarak çözmüşlerdir (Ni and San, 2000).

A. L. Gaston ve arkadaşları, sabit sıcaklıkta ince bir tabaka halinde kurutulan buğdayların yayılım katsayısını tahmin için tanecikleri, elips şekilli ve eksene simetrik olarak kabul ederek bir model oluşturmuşlar ve iki boyutlu bir sonlu eleman modeli ile çözüm yapmışlardır. Tahminlerini, 35, 50, 60 ve 70 °C kurutma sıcaklıkları ile kuru bazdaki 0.2694, 0.2396, 0.2133 ve 0.1891 başlangıç nem değerlerindeki buğdaylar için Arrhenius tipi fonksiyonlarla ilişkili hale getirmişlerdir. Sonuçlarını daha önce küre olarak kabul edilen tanecik şekli için elde edilen verilerle kıyaslamışlardır. Bu kıyaslama sonucunda elips şekilli tanecikler için bulunan yayılım katsayısının küre şekilli tanecikler için bulunandan % 9-13 arasında daha düşük olduğunu bulmuşlar ve bunun doğruluğunun ispatlanması için daha fazla deneysel ve teorik çalışmalar yapılması gerektiğini bildirmişlerdir (Gaston, et al., 2002).

A. L. Gaston ve arkadaşları, buğday gibi maddelerin sabit sıcaklıkta, ince bir tabaka halinde kurutulması esnasında, tanecik şeklinin, tanecik içindeki suyun ortalama yayılım katsayısına etkisini incelemiştir. Bunun için 2 boyutlu kütleli yayılım denklemini, küresel ve elips şekilleri için çözmüşlerdir. Gerçek yayılım katsayısını 64, 70 ve 75 °C hava sıcaklıkları ve kuru bazda 0.22, 0.25 ve 0.28 tanecik nemi değerleri için tahmin etmişler ve elips şekilli maddeler için yayılım katsayısının 2.953×10^{-11} ile 6.687×10^{-11} m²/s, küresel şekilli maddeler için ise 3.336×10^{-11} ila 7.772×10^{-11} m²/s arasında değiştiğini bulmuşlardır. Elips şekilli taneciklerin ortalama yayılım katsayısının, küre şeklindeki taneciklerin ortalama yayılım katsayısına oranını 0.85 olarak hesaplamışlar ve bu değer daha önceki çalışmalarda buğday için hesaplanan 0.86 değerine çok yakın olarak bulmuşlardır (Gaston, et al., 2003).

A. L. Gaston ve arkadaşları, buğdayın içindeki suyun yayılımını, ince bir tabaka halinde kuruma verilerini kullanarak, üç model ile tahmin etmişlerdir. İlk olarak elips ve küre şekilli taneciklerin şekil etkisinin, tahmin edilen yayılım üzerindeki etkisini araştırmak için belirli bir yüzey nemi içeriğine sahip sabit sıcaklık modelini kullanmışlardır. Daha sonra küresel bir taneciğin kuruması esnasında özellikle başlangıç aşamasındaki kuruma eğrisini oluşturmuşlardır (Gaston, et al., 2004).

S.A. Giner ve arkadaşı, buğday ile yaptıkları kurutma deneylerinden elde ettikleri kuruma eğrilerini sıcaklıklara göre gruplamışlar ve nem oranının bir süre sonra sürekli ve hızlı bir şekilde düştüğünü, yayılım katsayısının da nem içeriğinin artmasıyla arttığını gösterdiğini belirlemişlerdir. Yaptıkları hesaplamalarda tüm çekirdek için yayılım katsayısı değerlerinin 1.4×10^{-11} ila 7.1×10^{-11} m²/s arasında değiştiğini, aktivasyon enerjisinin 27 kJ/mol olduğunu bulmuşlardır (Giner and Mascheroni, 2002).

G. Efremov ve arkadaşı, bazı gıda maddelerinin kurutma kinetiklerini tahmin etmek için yayılım katsayısını ve onun zamanla değişimini hesaplamaya yarayan bir metot geliştirmeye çalışmışlardır. Kullandıkları yöntemle elde ettikleri sonuçlarının, akışkan yatakta kurutulan buğdayın deneysel kurutma kinetikleri ve sabit yatakta ince bir tabaka halinde kurutulan tütün ile kesikli (grup grup) kurutma yapan akışkan yatakta

kurutulan kereviz dilimlerinin kitaplarda verilen deneysel kurutma kinetikleri değerleriyle uyumluluğunu kanıtlanmışlardır (Efremov and Kudra, 2004).

D. Mohapatra ve arkadaşı, yarı kaynatılmış buğdayların ince bir tabaka halinde kurutma davranışlarını incelerken gerçek yayılım katsayısının, verilen sıcaklık aralığında 1.218×10^{-10} ila 2.861×10^{-10} m²/s arasında değiştiğini ve yayılımın, kurutma sıcaklığına bağımlılığını kanıtlamışlardır. Kurutma esnasında nem yayılımını başlatmak için gerekli enerjiyi 37.013 kJ/(g.mol.K) olarak bulmuşlardır (Mohapatra and Rao, 2005).

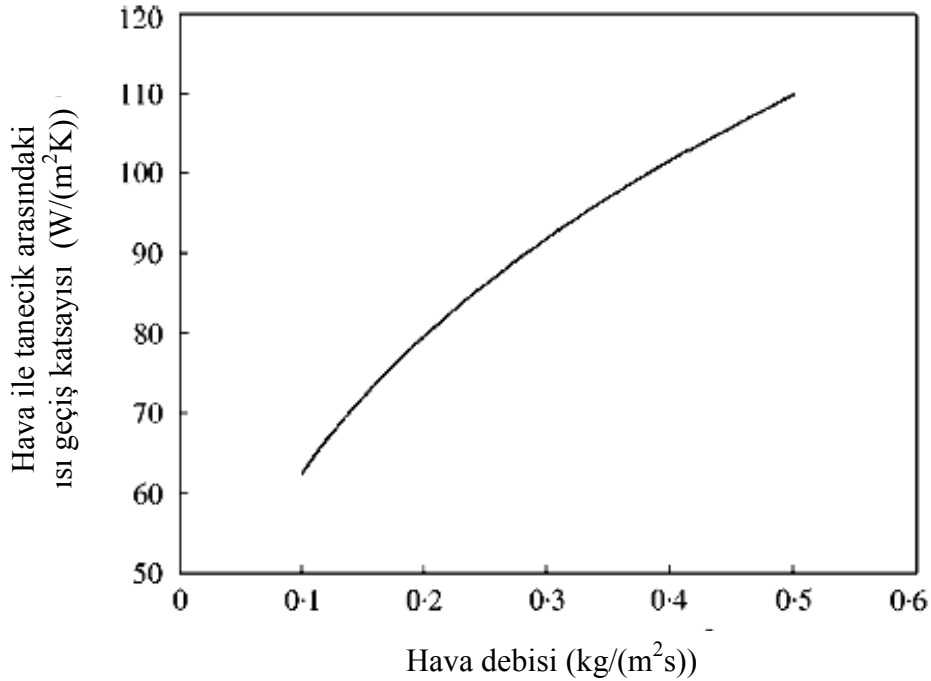
4.1.7. Isıl iletkenlik

S. Tavman ve arkadaşı, farklı nem içeriklerinde ve çevre sıcaklığındaki durum buğdayı ve bulgurun ısı iletkenliğini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda Ereğli yöresi buğdaylarının % 9.30 nem içeriğinde 0.159 W/mK, % 37.89 nem içeriğinde 0.182 W/mK, Saruhan yöresi buğdaylarının % 10.23 nem içeriğinde 0.142, % 38.65 nem içeriğinde 0.201 W/mK ve % 9.17 nem içeren bulgurun ise 0.164 W/mK ısı iletim katsayısına sahip olduğunu bulmuşlar, ısı iletkenliğinin maddenin nem içeriğiyle ilişkili olarak doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir (Tavman ve Tavman, 1998).

4.1.8. Isı geçiş katsayısı

S.A. Giner ve arkadaşı, tahıl taneciklerinin kurutulması esnasında tanecik ile hava arasındaki ısı ve kütle geçiş oranlarının matematiksel modellerle daha çabuk ve daha doğru bir şekilde belirlendiğini, yayılım denkleminin yarı sonsuz ortam düşünülerek analitik çözümünün, yayılım katsayılarının belirlenmesinde kullanılabileceği belirtmişler ve analitik çözümlerinin doğruluğunu kanıtlamak için buğdayın ve benzer boyutlu taneciklerin kurutulmasını incelemişlerdir. Sonuçta ısı geçişi için Biot sayısını 0.5, kütle geçişi için ise iç şartlara bağlı olarak 50-3000 arasında hesaplamışlardır. Bu değerlerin doğruluğunu kanıtlamak için de ısı iletimi ve kütle yayılım denklemini nümerik olarak çözmüşler ve analitik çözümün buğday için yayılım

katsayılarını çok doğru bir şekilde tahmin ettiğini görmüşlerdir (Giner and Mascheroni, 2001).



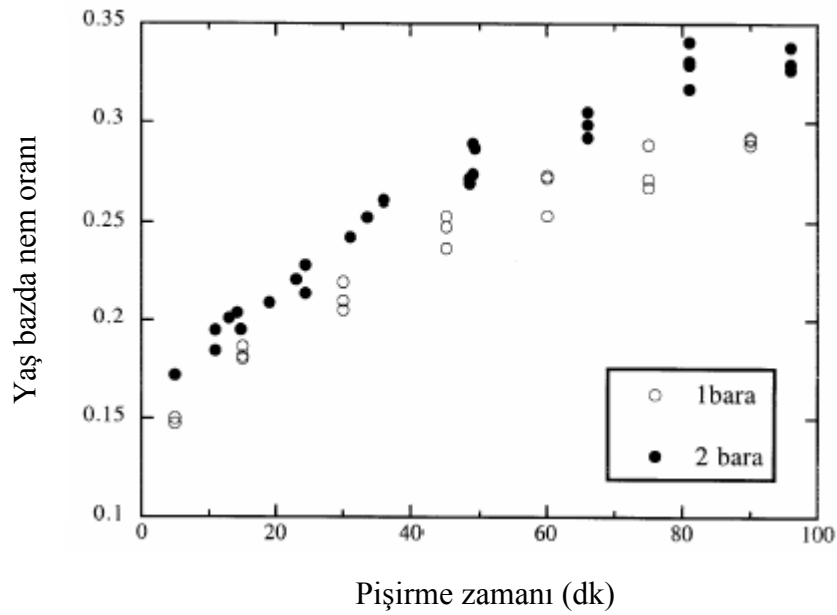
Şekil 4.2. 60 °C'deki hava debisine bağlı olarak, hava ile buğday taneciği arasındaki ısı geçiş katsayısı (Giner and Mascheroni, 2001).

4.2. Nemli Buğdayın Özellikleri

4.2.1. Nemlenme süresi ve eğrileri

A. G. F. Stapley ve arkadaşları, tahılların işlenmesinde, nişastayı jelatinize etmek ve nişastanın sindirilebilir olması için taneciklerin kaynatılması veya buhara tutulması gerektiğini belirtmişler dolayısıyla buğday taneciklerine buhar verilmesini modelleyerek, nişastanın ısıya ve neme verdiği tepkiyi incelemişlerdir. Nükleer manyetik rezonans cihazı (NMR) ile yaptıkları görüntüleme, buhar uygulanan buğday tanelerindeki nem dağılımının homojen olduğunu görmüşlerdir. Buharın, tanecik tarafından çekildiğinde sıvı olarak depolandığını ve çekilme esnasında gizli ısının serbest bırakılmasından dolayı tanecik sıcaklığının arttığını, yaptıkları ölçümlerle

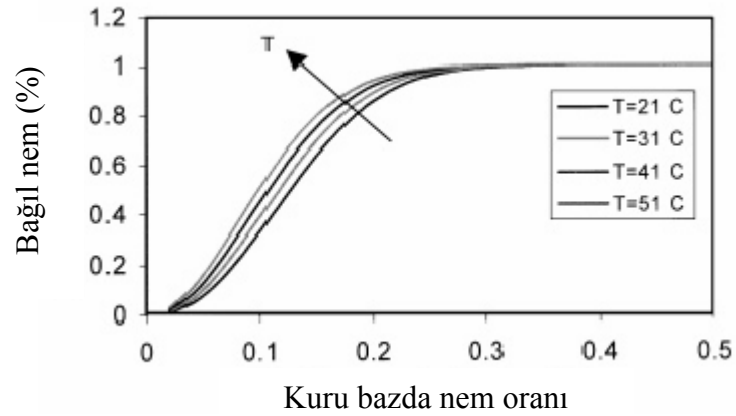
doğrulamışlardır. Isı ve kütle geçişi için deneysel gözlemlere dayalı, tanecik ile çevredeki buhar arasındaki sıcaklık farkını, taneciğin nem içeriğinin doğrusal bir fonksiyonu olarak veren bir model oluşturmuşlardır. Model sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlar, su hareketi için katsayıları, ısı ve kütle geçiş katsayılarını çıkarmışlar ve bunları mevcut değerler ile kıyaslamışlardır (Stapley, et al., 1999).



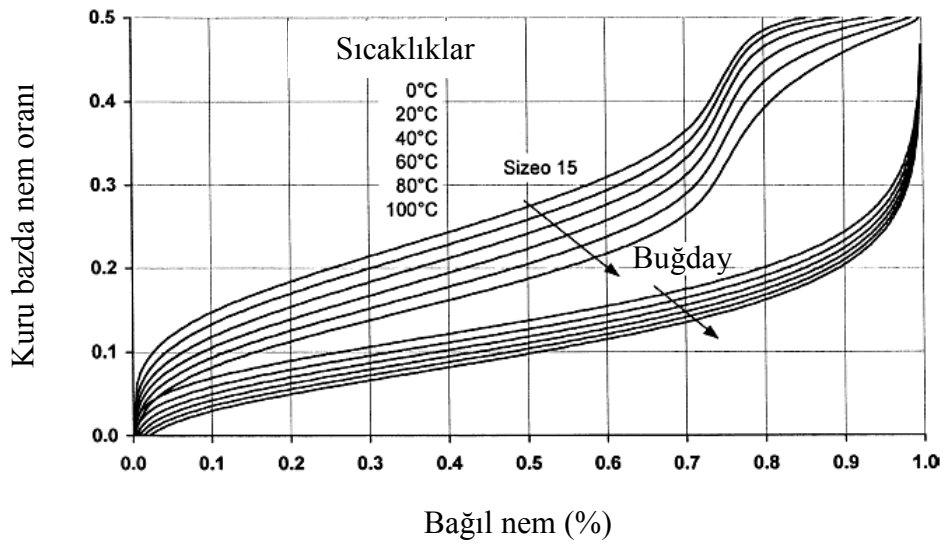
Şekil 4.3. Buğday tanelerine 1 bar ve 2 bar basınç altında buhar tutularak pişirilmesi sırasında yaş bazdaki nem oranının değişimi (Stapley, et al., 1999).

M. Fortes'in, Th. Ziegler ve arkadaşının buğday üzerine yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri nem alma eğrileri ise şekil 4.4 ve 4.5'de gösterilmektedir.

D. Mohapatra ve arkadaşı, pişirilmiş buğdayların ince bir tabaka halinde kurutulması sırasında kullandıkları, yaş bazda % 9-10 nem oranına sahip buğdayları nemlendirmek için 70 °C'deki sıcak su içinde 2 saat boyunca bekletmişler ve buğdayların nem oranlarının % 44-45'e geldiklerini belirtmişlerdir (Mohapatra and Rao, 2005).



Şekil 4.4. Buğdayın nem alma grafikleri (Fortes, 1981).

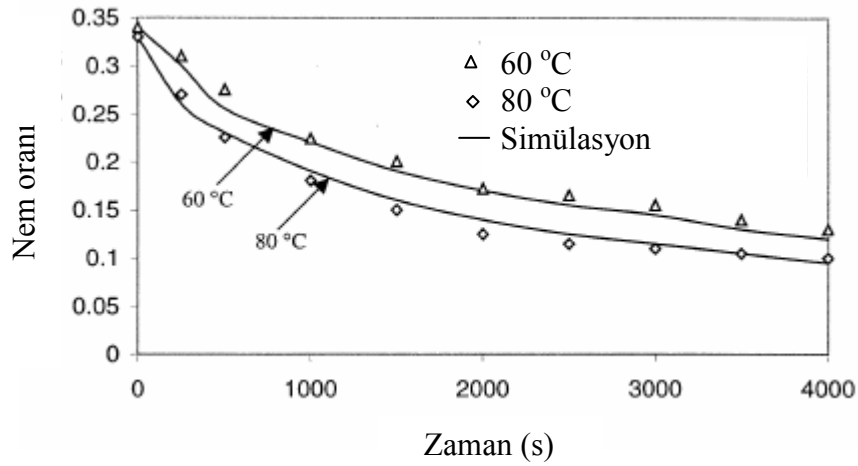


Şekil 4.5. Buğdayın nem alma grafikleri (Ziegler and Richter, 2000).

4.2.2. Kuruma eğrileri

C. Fyhr ve arkadaşı, akışkan yataklı kurutucular için çok tanecikli bir model sunmuşlardır. Akışkan yatağı birçok tabakaya bölmüşler, her tabakayı ise bütün tanecikleri temsil eden tek bir tanecik ile ilişkilendirmişlerdir. Yatak içindeki sıcaklık ve

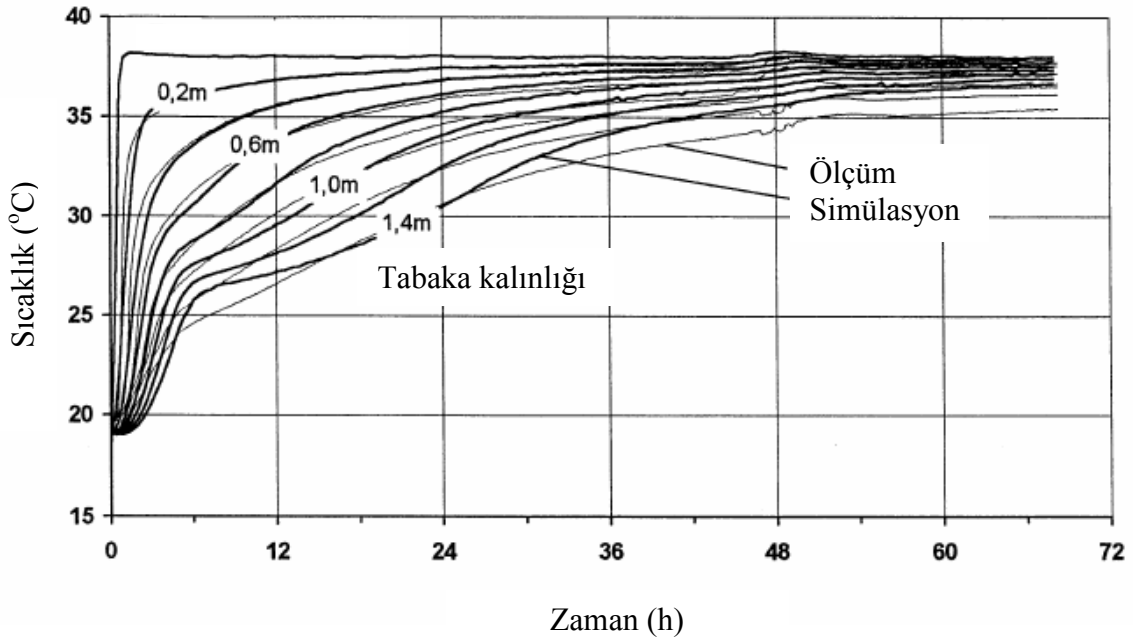
nem dağılımının hesaplanmasına yardımcı olmak amacıyla gaz fazı için yatay akış kabulü yapmışlardır. Sürekli kurutma yapan akışkan yataklarda belirli zaman aralıklarında taneciklerden birinin bulunduğu tabakanın, yeni taneciklerle yer değiştirdiğinden dolayı taneciklerin yatak içinde kalma zamanı dağılımının, çıkıştaki nem içeriği üzerindeki etkisini açıklamışlardır. Düşen hız döneminde tek bir taneciğin kurutma kinetikleri için bir yayılım modeli kullanmışlar ve modeli buğday için çözümlenmişlerdir. Elde ettikleri tahmini sonuçları deneysel verilerle kıyaslamışlar ve sonuçların deneysel değerlerle uyumlu olduğunu görmüşlerdir (Fyhr and Kemp, 1999).



Şekil 4.6. Buğdayın akışkan yatakta aralıklı kurutmasında nem oranının zamanla değişimi (Fyhr and Kemp, 1999).

Th. Ziegler ve arkadaşı, sabit giriş şartlarındaki nemli buğdayı, kalın tabaka halinde kurutma durumunda, “entalpi-nem içeriği” diyagramı ile nemli havanın “entalpi-nem içeriği” diyagramlarını birleştirmişlerdir. Taneciğin nem içeriği ile ilgili olarak, kurutma bölgesindeki kütle yayılımının hareket kuvvetlerini doğrudan ve kesin bir şekilde birleşik diyagramdan hesaplamışlar ve daha sonra taneciğin kuruma hızını sırasıyla sıcaklık ve zamanla ilişkilendirmişlerdir. İnce bir tabakada halinde kurutma denklemini de matematiksel bir modelle bütünleştirmişlerdir. Kalın tabaka halinde kurutma modelini ise değişik giriş havası şartlarında buğday için uygulamışlar ve elde

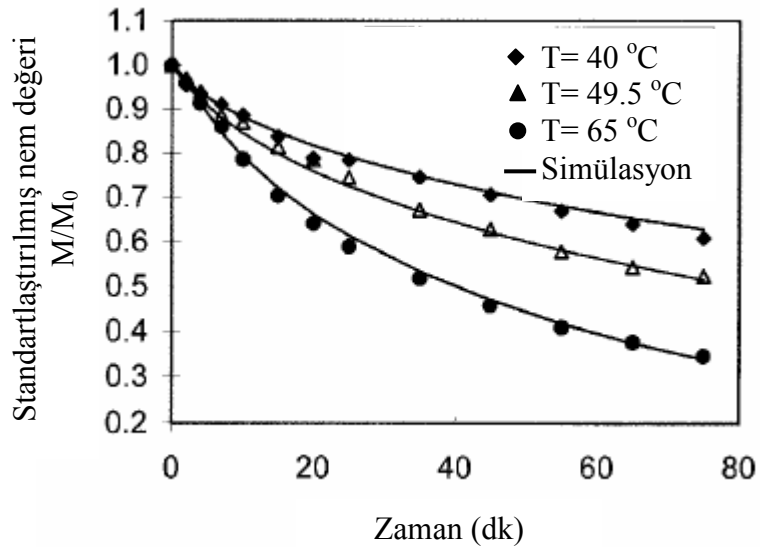
edilen verilerin deneysel ve simülasyon sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğunu bulmuşlardır (Ziegler and Richter, 2000).



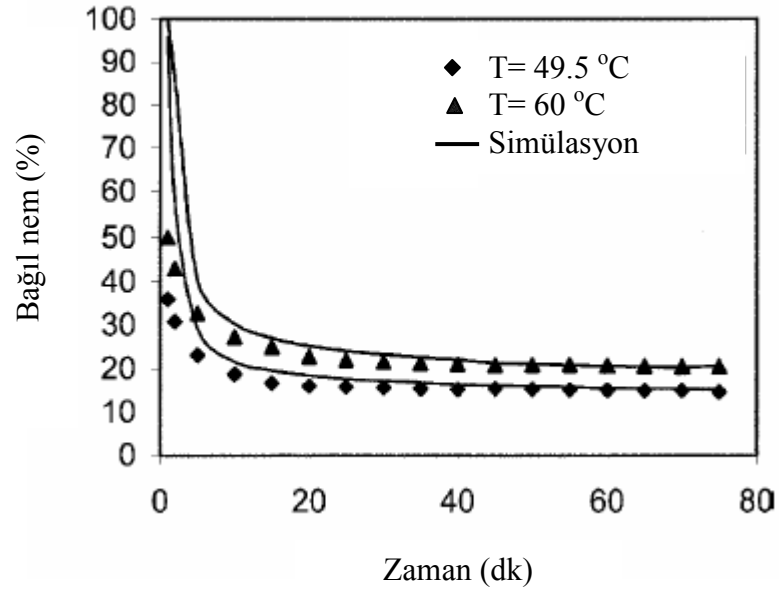
Şekil 4.7. Buğdayın kalın tabaka halinde kurutulması sırasında, tabakaları içindeki sıcaklıklar (Ziegler and Richter, 2000).

E. Hajidavalloo ve arkadaşları, buğdayın kurutma verilerini elde etmek ve önceki çalışmalarında oluşturdukları matematiksel modelin geçerliliğini ve doğruluğunu değerlendirmek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneylerinde kurumaya maruz bıraktıkları buğday taneciklerinin, yüzeylerindeki düşük ısı ve kütle direncinden dolayı tanecik yüzeyindeki nemin hızla yayıldığını, kurumanın ilerleyen zamanlarında ise tanecik içindeki yayılım direncinin artmasından dolayı tanecikten uzaklaştırılan nem hızının azaldığını doğrulamışlardır. Deneylerini, 40, 49.5 ve 60°C giriş sıcaklıklarında gerçekleştirmişler ve farklı zamanlarda farklı yatak yüksekliklerindeki sıcaklıkları, çıkış havasının nemini, yataktaki basınç düşümünü, akışkanlaşma hızını ve taneciklerin nem içeriklerini ölçmüşlerdir. Oluşturdukları model ile birçok kez yaptıkları buğday kurutma deneylerinin sonuçlarının uyum içinde olduğunu ve bu modelin akışkan yataкта

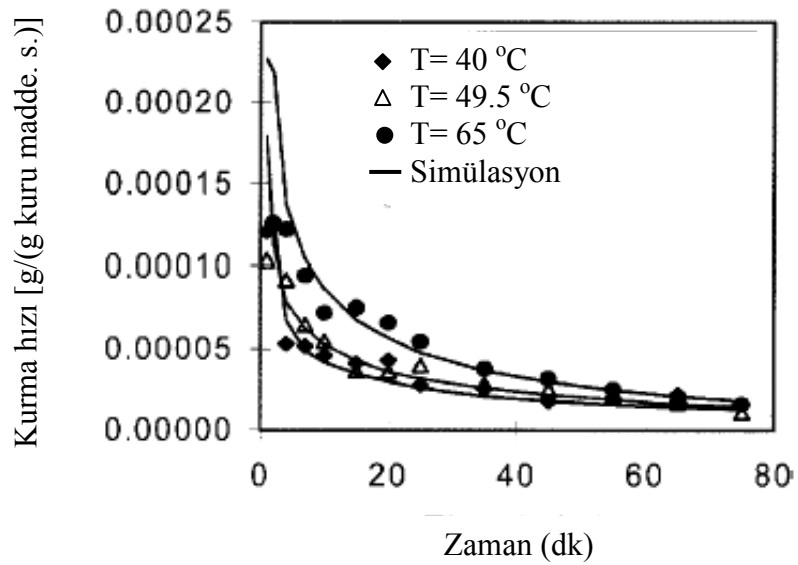
kurutulan başka maddeler için de kurutma havasının sıcaklığı ve bağıl nemi gibi kurutma şartlarında sınırlama olmaksızın kullanılabileceğini, ayrıca küçük değişikliklerle diğer kurutuculara da uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Deneylerinde tanecikli maddelerin kurumasının, tanecik içindeki kütle yayılım parametrelerine bağlı olduğunu, giriş havası sıcaklığının ve kurutulacak malzemenin nem içeriğinin, kuruma hızında önemli bir etkiye sahip olduğunu, buna rağmen, akışkan hızı ve yatak yüksekliğinin kuruma hızı üzerine önemli bir etkisi olmadığını bulmuşlardır (Hajidavalloo and Hamdullahpur, 2000).



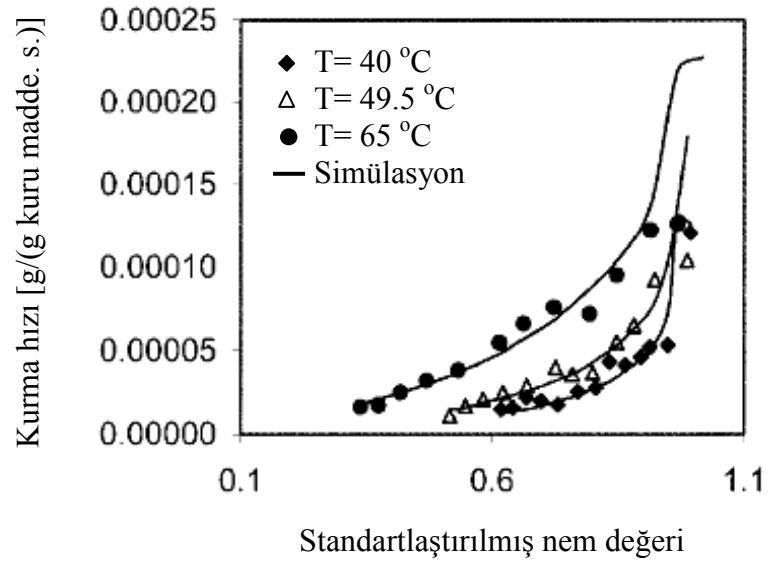
Şekil 4.8. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında zamana bağlı olarak standartlaştırılmış nem değerinin değişimi (Hajidavalloo and Hamdullahpur, 2000).



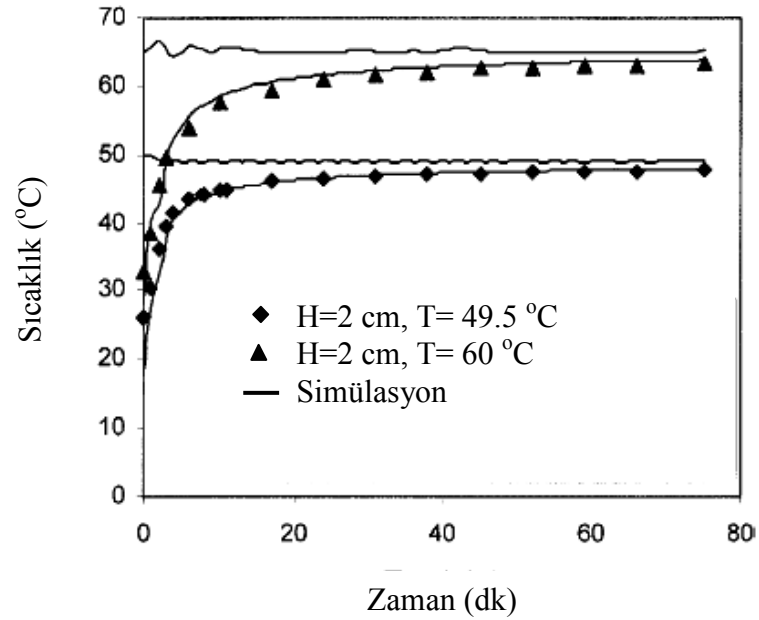
Şekil 4.9. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında zamana bağlı olarak çıkış bağıl nem değerinin değişimi (Hajidavalloo and Hamdullahpur, 2000).



Şekil 4.10. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında zamana bağlı olarak kuruma hızının değişimi (Hajidavalloo and Hamdullahpur, 2000).



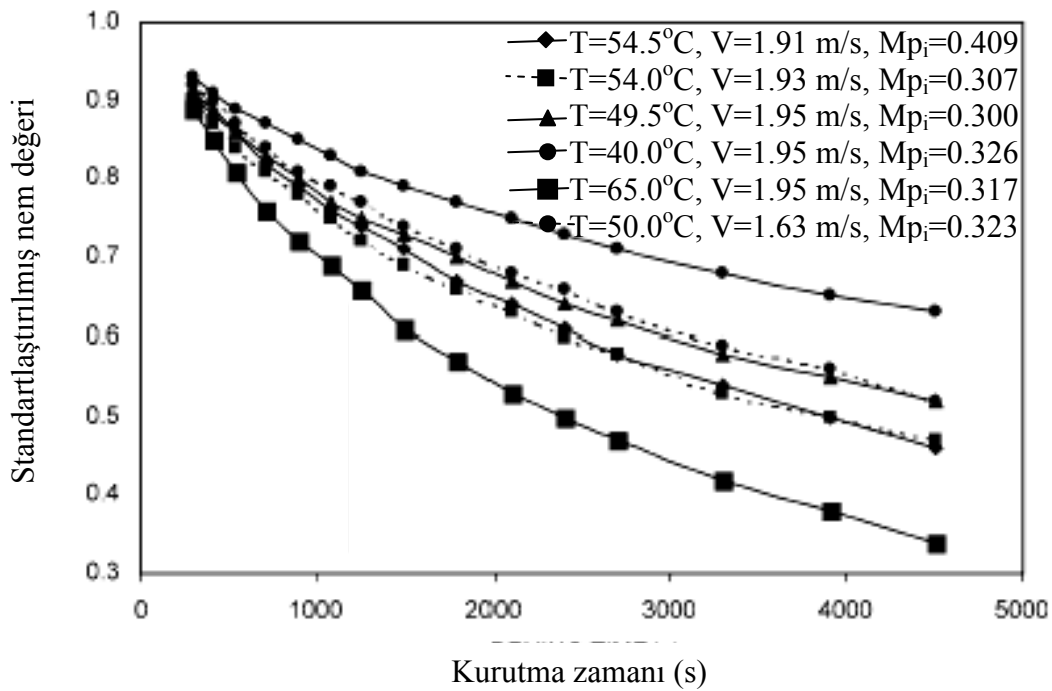
Şekil 4.11. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında nem oranına bağlı olarak kuruma hızının değişimi (Hajidavalloo and Hamdullahpur, 2000).



Şekil 4.12. Buğdayın farklı sıcaklıklarda akışkan yatakta kurutulması esnasında 2 cm yatak yüksekliğindeki ve yatak girişindeki sıcaklıkların zamanla değişimi (Hajidavalloo and Hamdullahpur, 2000).

S.A. Giner ve arkadaşı yaklaşık olarak $0.3 \text{ kg/m}^2\text{s}$ hava debisinde, $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar dört sıcaklık değeri ve kuru bazda 0.189 'dan 0.269 'a kadar dört başlangıç nem içeriği için, toplam 16 durumda sert buğdayın ince bir tabaka halinde kurumasını deneysel olarak incelemiştir. Elde ettikleri verilerle, zamana karşı nem oranının grafiklerini çizmişler ve bunları başlangıç nem oranına göre gruplamışlardır. Sonuçta sıcaklığın kuruma üzerinde hızlandırıcı bir etkisi olduğunu görmüşlerdir (Giner and Mascheroni, 2002).

S. Syahrul ve arkadaşları, nemli parçacıkların akışkan yatakta kurutulması esnasında çalışma şartlarını ve ürün kalitesini iyileştirmek ve verimliliği artırmak için enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Bu amaçla modeller geliştirmişler, deneysel çalışmalarında da elde ettikleri değerleri, kitaplardaki mevcut buğday kurutma verileri ile doğrulamışlardır. Giriş havasının sıcaklığının, akışkanlaşma hızının, buğdayın başlangıç nem içeriğinin ve yatak yüksekliğinin hem enerji hem de ekserji verimlilikleri üzerindeki etkisini çalışmışlardır (Syahrul, et al., 2002).

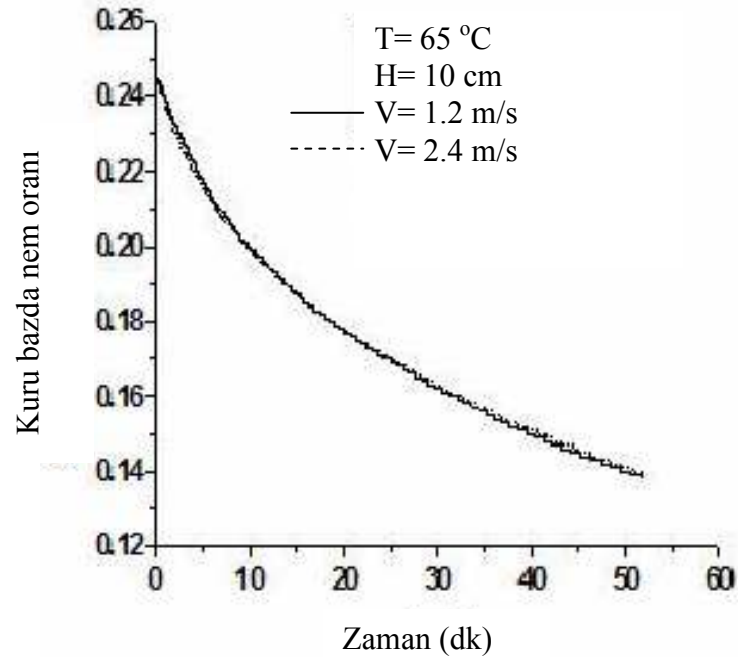


Şekil 4.13. Bazı sıcaklık, nem ve hız değerlerinde akışkan yatakta kurutulan buğdayların nem oranının zamanla değişimi (Syahrul, et al., 2002).

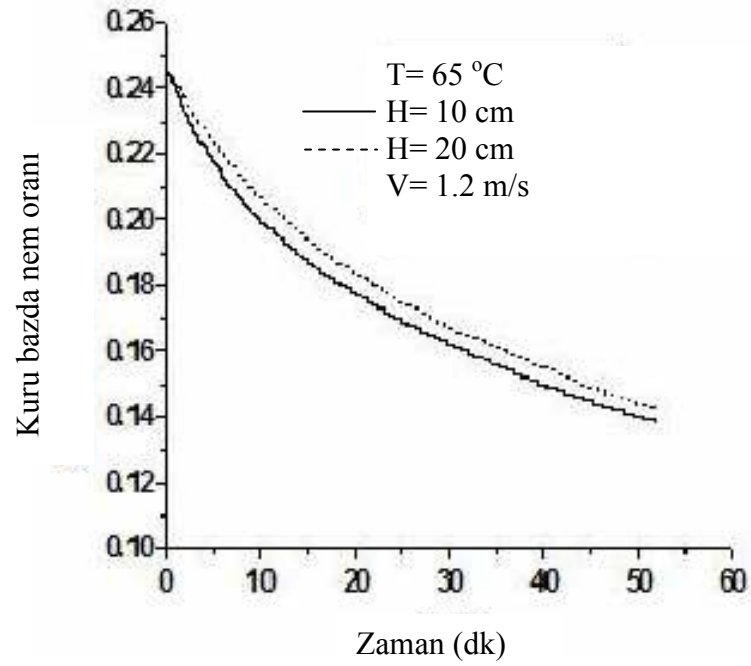
S. Syahrul ve arkadaşları, grup D (akışkanlaştırılabilir, büyük ve yoğun) parçacıkları için enerji modellerini kullanarak, akışkan yatak kurutma şartlarını iyileştirmek amacıyla bir akışkan yatağın enerji analizini yapmışlardır. Akışkan yatak kurutma sürecini iyileştirmek için kurutmadaki üç önemli etken olan giriş havası sıcaklığı, akışkanlaşma hızı ve parçacığın ilk nem içeriğinin toplam enerji verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Modellerinin doğruluğunu araştırmak için kitaplardaki buğday için verilen deneysel kurutma verilerini kullanmışlardır. Sonuçta enerji verimliliğinin, artan kurutma süresi ile azaldığını ve kurutmanın son aşamalarında en düşük değerlere ulaştığını, yüksek ilk nem içeriğine sahip malzemelerde arttığını, giriş havası sıcaklığının, enerji verimliliği üzerinde büyük bir etkisi olduğunu ve malzeme içindeki yayılım katsayısının ise hem sıcaklığa hem de kurutulacak maddenin ilk nem içeriğine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir (Syahrul, et al., 2002).

M. Fortes, kurutma sisteminin enerji verimliliğini araştırmak için, biyolojik maddelerin ince ve kalın bir tabaka halinde kurutulması esnasındaki enerji ve mevcut ekserji verimliliği modellerinin değerlendirilmesini ve modellenmesini araştırmıştır. Öncelikle genel, bir boyutlu ve yığın kurutma sistemleri için kütle ve enerji dengelerini kurmuş, daha sonra yığın problemleri ve çok boyutlu problemlere uygulanabilen genel ekserji ve verim denklemlerini geliştirmeye çalışmıştır. Yığın modelinin akışkan yatakta buğdayı kurutmak için uygulanabileceğini belirtmiştir. İyileştirme çalışması yapmamış, fakat hem enerji verimliliği hem de tanecik kalitesi üzerine çalışmıştır. Sonuçta taneciği tehlikeye koymadıkça çıkış havasının yeniden dolaştırılmasının gerektiğini belirtmiştir (Fortes, 2004).

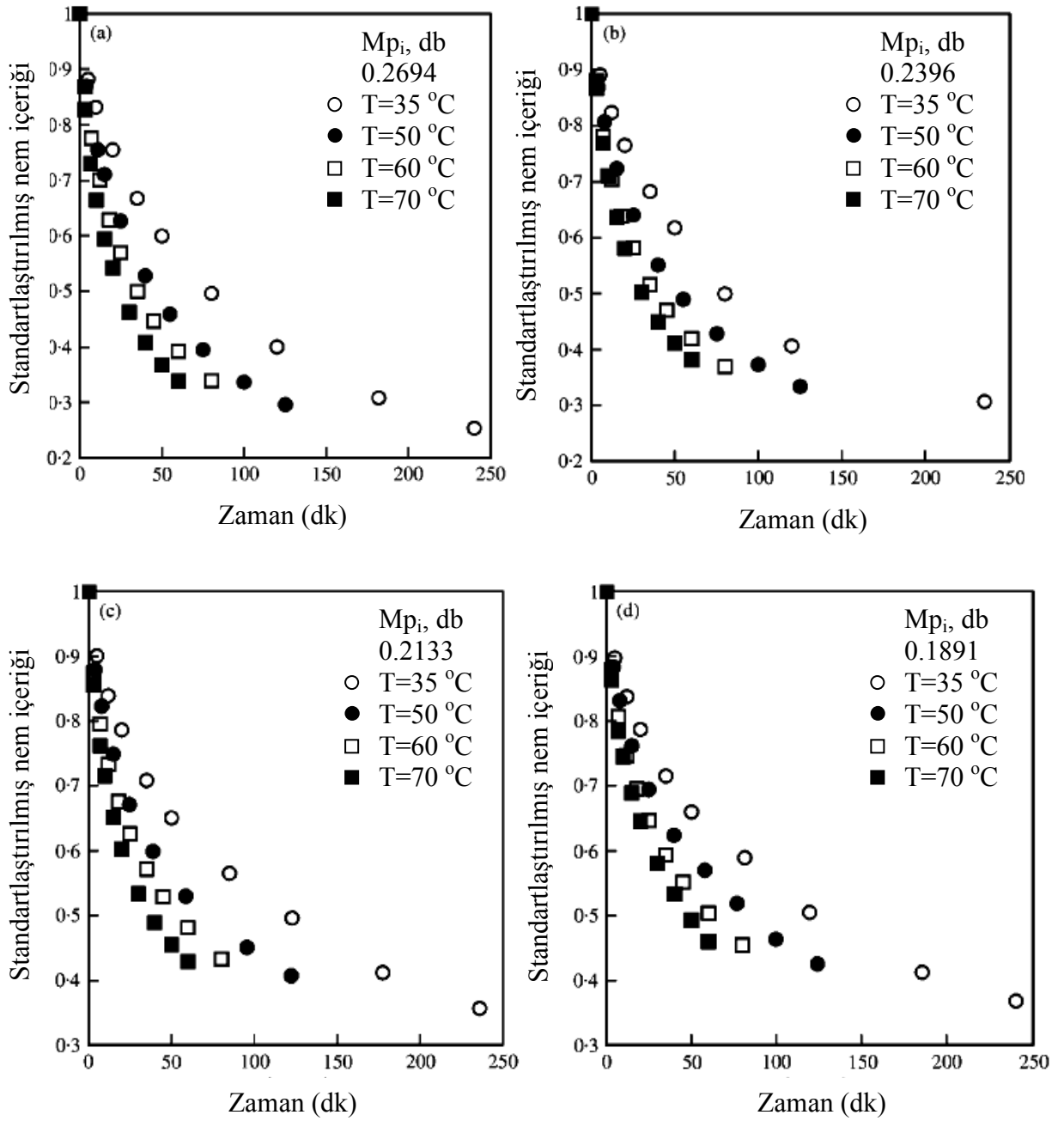
M. Fortes ve arkadaşı, kurutma süreçlerindeki enerji ve ekserji analizlerinde buğdayın akışkan yatakta kurutulması süreci için bir yöntem sunmuşlardır. Yatak yüksekliğinin, kurutma havasının sıcaklığının ve neminin enerji üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve yatak yüksekliğinin, verimi oldukça etkilediğini görmüşlerdir. Kullandıkları yöntemin diğer kurutuculara da uygulanabileceğini ve elde ettikleri sonuçların aralıklı (süresiz) kurutma yapan kurutucuların deneysel verileriyle uyum içinde olduklarını da belirtmişlerdir (Fortes and Ferreira, 2004).



Şekil. 4.14. 10 cm yatak yüksekliği için buğdayların farklı hızlardaki kuruma eğrileri (Fortes and Ferreira, 2004).



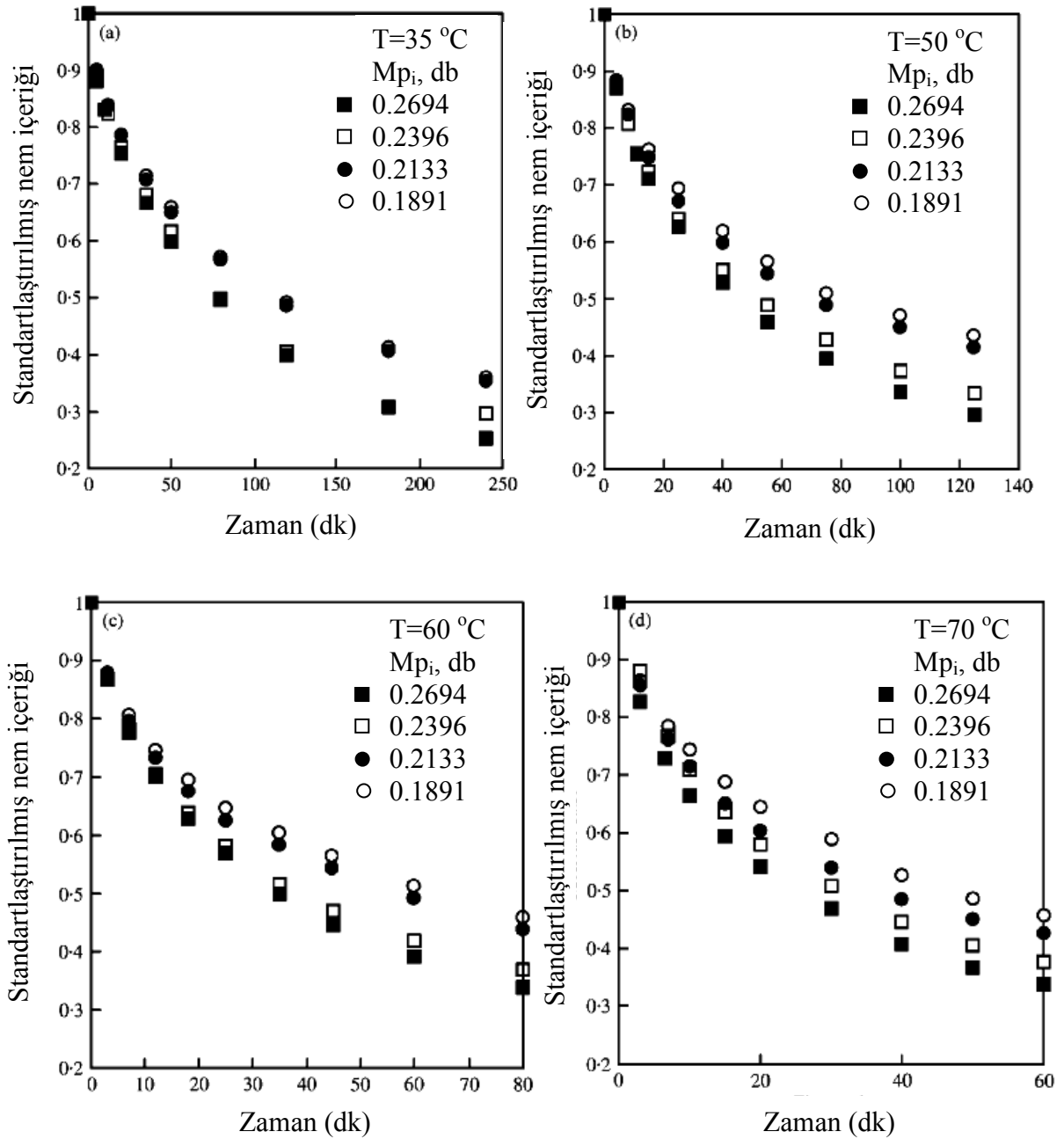
Şekil 4.15. Farklı yatak yüksekliklerindeki buğdayların kuruma eğrileri (Fortes and Ferreira, 2004).



Şekil 4.16. Farklı başlangıç nem içeriklerindeki ve sıcaklıklarındaki buğdayların kuruma sırasında nem içeriklerinin zamanla değişimi (Abu-Hamdeh, et al., 2004).

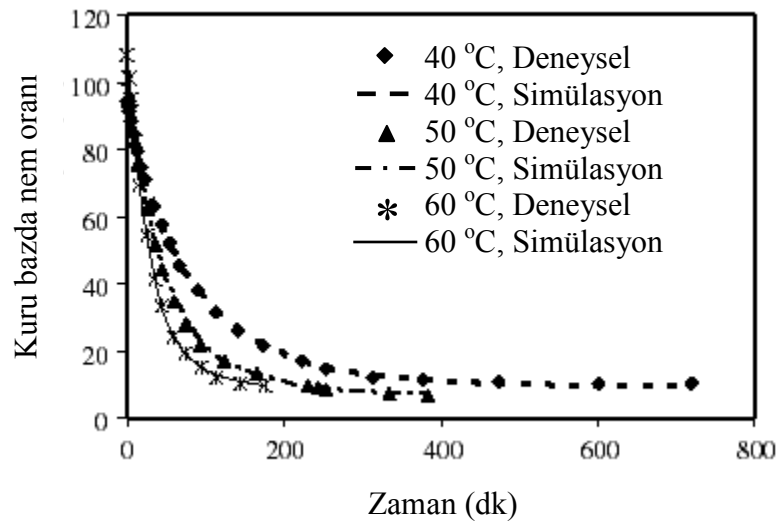
N. H. Abu-Hamdeh ve arkadaşı, sabit yataklı bir kurutucu tasarlayıp imal etmişler ve çeşitli kurutma havası şartlarında, farklı nem içeriğine sahip buğdayların kurutmasını gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri esnasında düzenli olarak kurutma havası

şartlarını ve buğdayın nem içeriğini ölçmüşler ve bu değerleri, kurutucuyu simüle etmek amacıyla enerji ve kütle dengesine dayanarak geliştirdikleri model için yazdıkları bilgisayar programından elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırmışlardır (Abu-Hamdeh, et al., 2004).



Şekil 4.17. Farklı başlangıç nem içeriklerinde ve sıcaklıklarındaki buğdayların kuruma sırasında nem içeriklerinin zamanla değişimi (sıcaklıklara göre) (Abu-Hamdeh, et al., 2004).

D. Mohapatra ve arkadaşı yarı teorik ve ampirik modeller kullanarak 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklarında yarı kaynatılmış buğdayların ince bir tabaka halinde kurutma davranışlarını çalışmışlar ve en fazla kurumanın düşen hız döneminde olduğunu bildirmişlerdir (Mohapatra and Rao, 2005).

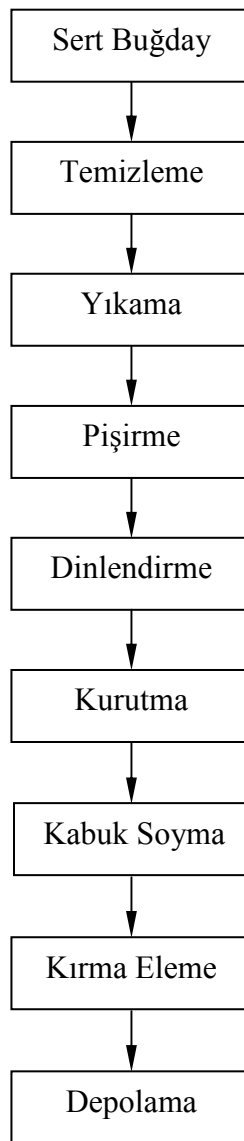


Şekil 4.18. Yarı kaynatılmış bulgurların tabaka halinde kurutulması sırasında zamana bağlı olarak nem oranlarının değişimi (Mohapatra and Rao, 2005).

Y. Nishiyama ve arkadaşları, süreksiz (aralıklı) kurutma yapan bir kurutucuda buğday ve pirinç taneciklerinin kurutulmasını incelemişler ve bir küresel tanecik için oluşturdukları kurutma modelini çözümlenmişlerdir. Bu modelde, hem kurutma dönemi için, hem de ısıtma dönemi için kurutma hesaplarını yapmışlardır. Buğday ve pirinçleri 40 °C ve 0.6 bağıl nem değerinde kurutmuşlar ve sırasıyla 30, 40 ve 50 °C'lerde ısıtmışlardır. Deneysel sonuçların, model ile uyum içinde olduklarını görmüşler, ısıtma sıcaklığının malzeme içindeki nem dengesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir (Nishiyama, et al., 2006).

4.3. Bulgurun Üretim Süreci

Deneylerin yapılmasına geçmeden önce bulgur fabrikalarındaki üretim sürecinden bahsedelim. Mevcut bir bulgur fabrikasında bulgurun üretim aşamalarının blok diyagramı şekil 4.19’da gösterilmektedir. Bu üretim aşamaları tüm tesisler için aynı olmakla birlikte süreçlerdeki sıcaklık, zaman vs. verileri küçük farklılıklar gösterebilmektedir.



Şekil 4.19. Bulgurun üretim aşamaları.

İşletmeye yaş bazda % 8-10 nem oranında alınan sert makarnalık buğdaylar öncelikle içindeki taş, toprak, ot gibi yabancı maddelerden ayıklanır. Kaliteli bir bulgur üretimi için buğdayın sert makarnalık buğday olması önemlidir, çünkü sert makarnalık buğdaylar ile üretilen bulgurlar daha parlak bir yapıya sahiptirler ve parlaklık da bulgur kalitesini belirleyen en önemli özelliktir. Sert makarnalık buğdayın olmadığı durumda ise sert ekmeçlik beyaz buğday da bulgur yapımında kullanılabilir fakat yumuşak buğday kesinlikle kullanılmaz. Bunun nedeni yumuşak buğdayların pişirme sırasında lapalaşması, renginin mat olması ve tadının da sert buğday çeşitlerine göre hoş olmamasından dolayıdır. Yabancı maddelerden temizlenen buğdaylar üzerlerindeki toz vb. gibi maddelerden de arındırılması için yıkama bölümüne alınarak yıkanır.

Pişirme bölümünde, yıkanmış buğdaylar 100 °C'de kaynar durumda bekleyen kazan suyunun içine boşaltılırlar. Bu esnada kazana ısı verilmeye devam edilir ve kazandaki su sıcaklığı 0.3-0.4 bar gösterge basıncında 108 °C'ye gelene geçen 15-20 dakikalık süre sonunda kazan içindeki buğdaylar da pişmiş olur. Pişirme, bulgur kalitesini belirleyen diğer önemli bir parametredir. Pişirme sonunda buğdayın tamamen jelatinleşmesi, içinde pişmemiş nişasta olmaması ve tanelerin parçalanmaması gerekir. Ayrıca pişirme esnasında kullanılan su miktarının da iyi ayarlanması gerekir. Pişirme sonunda kazandaki suyun tamamen buğdaylar tarafından emilmesi veya kazanda çok az miktarda su kalması, böylelikle kazana fazla su alınarak pişirme sonunda suya geçen besinlerin kazan suyuyla atılması önlenmelidir. Bunun için genelde 5 ton buğdaya 7 ton su olacak şekilde kazan sistemine besleme yapılır. Pişirme işlemi sonunda pişmiş buğdaylar yaş bazda % 48-50 oranında nem içerirler.

15-20 dakikalık basınç altındaki pişirmenin ardından kazandan alınan pişmiş buğdaylar (hedikler) 15-20 dakika dinlendirilerek içlerindeki pişmeyen buğdayların kendi buharları ile pişmesi sağlanır.

Dinlendirmenin sonrasında ise hedikler kurutma kulelerine gönderilir. Yaş bazda % 48-50 nem oranında, yaklaşık 6-8 m² taban alanına sahip 35-40 m yüksekliğindeki kurutma kulelerine giren hedikler aşağıya doğru hareket ederlerken buradaki farklı sıcaklıklardaki pasalardan geçerek kururlar. Kulelerde 5 farklı sıcaklık

bölümü bulunur. Bunlar hediğın ilk girdiğı bölümde 130-135 °C, sonraki bölümde 100 °C, daha sonra 80-85 °C, 70-75 °C ve kurutma işleminin bitirildiğı son bölümde ise 45-50 °C'dir. Ürünün kuleden aşağıya doğru iniş hızı istenen kuruma miktarına göre alt kısımda bulunan bir hareket sistemi vasıtasıyla ayarlanır. Kule içindeki farklı sıcaklıklar, içlerinden buhar geçen serpantinlerden geçirilen havanın bu sayede ısıtılıp kuleye verilmesiyle sağlanır. Kurutma sürecinde bulgurların aniden kurutulurak içlerinin boşalmasını ve dolayısıyla fire oluşumunu önlemek için kurutma işlemi farklı sıcaklık aşamalarında gerçekleştirilir. Ani kurutmalar taneciklerin içlerini boşaltır ve ziyarı artırır. Kurutuculardan çıkan son ürünün nem oranı yaş bazda % 11-12'dir ve pişirilip kurutulan buğdaylar bu noktada artık bulgur adını alır. Kurutma, yine kaliteli bulgur üretimini etkileyen önemli işlemlerden biridir. Kurutma sonunda kaliteli bir bulgurun kırıldığında ortadan ikiye bölünmesi gerekir.

Kurutmadan sonra bulgurlar kabuk soyma ünitesine gelirler. Burada az bir buharla yüzeyleri nemlendirilen buğdayların kabukları soyulur ve daha sonra yüzey nemini kurutmak için hafifçe tavlınırlar. Kabuk ne kadar fazla soyulursa bulgur da o kadar parlak ve kaliteli olur. Dolayısıyla kabuğın kaliteden ödün vermeyecek şekilde en uygun bir seviyede soyulması ve fire miktarının artmaması sağlanmalıdır.

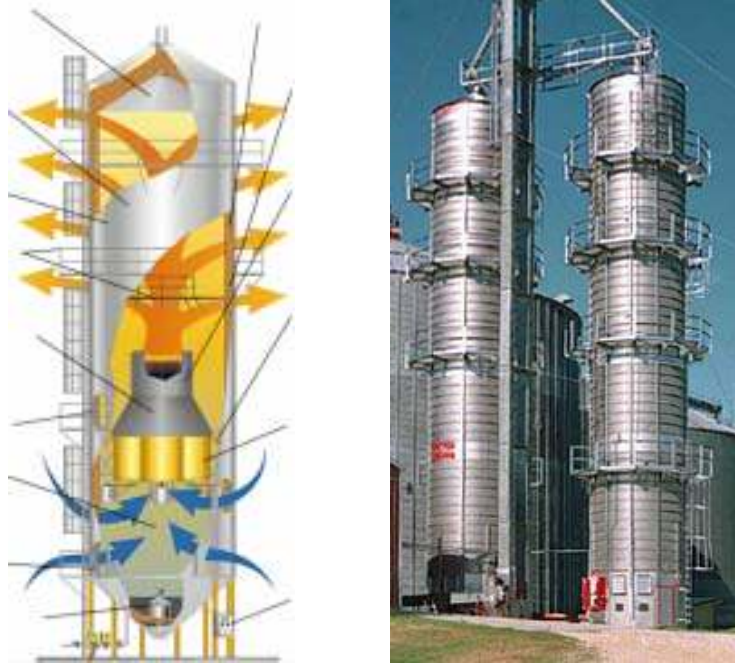
Kabuğu soyulan bulgurlar buradan taşlı veya vals kırıcılara gönderilir. Kırma işlemi de kaliteyi etkileyen diğeri bir bölümdür. Bulgurun kalitesini belirleyen en önemli parametrenin parlaklık olduğunu daha önce belirtmiştik. Vals kırıcılarda kırılan bulgurlar taşlı kırıcılarda kırılan bulgurlara göre daha renksiz, taşlı kırıcılarda kırılan bulgurlar daha parlak olduğundan dolayı genellikle taşlı kırıcılarda kırma işlemi gerçekleştirilir. Kırıldıktan sonra farklı boyutlara ayrılmak üzere eleklerden geçirilen buğday bir sonraki üniteye gönderilir.

Son bölümde kırılıp farklı boyutlara ayrılan bulgurlar ambalajlanarak depolanır. Bulgurların depolandığı yer nemsiz ve serin olmalıdır. Bulgurun raf ömrünü etkileyen en önemli faktör kurutma sonundaki nem değeridir. Kurutma aşamasında yeteri kadar kurutulmayan bulgurlar doğal olarak çok çabuk bozulmaya

başlayacaklardır. Fakat yeteri kadar kurutulmuş bulgurlar güneş görmeyen, ortam sıcaklığındaki bir mekânda uzun süre bozulmadan kalabilmektedirler.

4.3.1. Bulgur üretiminde kurutma yöntemleri

Bulgur kurutma sistemlerinde halen kule kurutucular kullanılmaktadır. Bu kurutucularda şekil 4.20’de de görüldüğü gibi iç içe geçmiş iki kuleden ibarettir. En üst noktadan kurutucuya giren nemli ürünler kule içindeki yukarıdan aşağıya doğru eğimli yerleştirilmiş pasalar sayesinde zikzak hareketi yaparak aşağıya doğru inerken kurumasını gerçekleştirir. Bu hareket esnasında ürüne zarar vermeyecek şekilde kurumayı hızlandırmak için farklı kotlarda ürünlere farklı sıcaklıklarda hava verilir. Farklı sıcaklıklar farklı sıcaklıklardaki serpantinlerden hava geçirilmesiyle elde edilir. Kulenin en üstündeki ürün içindeki nemin yüksek olmasından dolayı yüksek sıcaklıktaki havaya ile temas ettirilirken kuruma sonunda sıcaklık çok düşüktür. Daha sonra kuruyan ürün alt kısımdan alınır. Kuruyan ürünün hareketi kurutucu altındaki bir mekanizma ile kuruma miktarına göre azaltılıp hızlandırılabilir.



Şekil 4.20. Kule kurutucu.

5. DENEY SİSTEMİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Buğdayın Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

5.1.1. Yoğunluk

Deneylede Gaziantep bölgesinden getirtilen sert durum buğdayı kullanılmıştır. Buğdayın yoğunluk tayininde, dereceli kaba koyulan belirli bir hacimdeki ham buğday önce tartılıp daha sonra başka bir dereceli kapta bulunan yine belirli miktardaki yağın içine koyulmuş ve hacimdeki artış ile buğdayın kapladığı hacim ölçülmüştür. Aynı işlem farklı oranlarda nemlendirilen buğdaylar içinde yapılmış dolayısıyla farklı nem içeriklerine sahip buğdaylarında boşluklu ve boşluksuz yoğunlukları tespit edilmiştir.

5.1.2. Nem oranının belirlenmesi ve nemlendirme

Ham buğdayın nem oranının belirlenmesinde, alınan numune önce tartılıp daha sonra bir kap ile 70 °C'deki fırına koyulmuş ve farklı zamanlarda koyulan numune tartılarak buğdayların ne kadar nem kaybettiği ölçülmüştür. Nem kaybı ölçümlerindeki fark sıfıra gelene kadar da buğday kurutulmaya devam edilmiştir. Son durumda buğdayın içindeki nem oranı yaş ve kuru bazda olmak üzere aşağıdaki 5.1 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$Wk = \frac{M_{nem}}{M_{km}} \quad 5.1$$

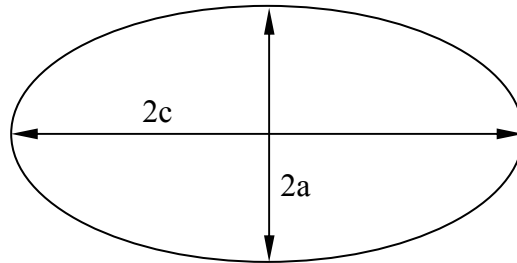
$$Wy = \frac{M_{nem}}{M_t}$$

Buğdayların nemlendirilmesinde ise, telli kaplara konan belirli ağırlıktaki buğdaylar bu kaplarla birlikte kaynayan suyun içine atılmıştır. Farklı sürelerde kaynayan su içinden çıkarılan buğdaylar çıkarıldıktan hemen sonra yüzey neminin giderilmesi için yine telli başka bir zemine serilerek 15 dakika dinlendirilmişlerdir.

Daha sonra tartılarak ne kadar nem aldıkları hesaplanmış ve böylece kaynayan su içinde buğdayın nem alma grafiği de elde edilmiştir.

5.1.3. Tane sayısının ve boyutlarının belirlenmesi

Tane boyutunun belirlenmesi için ham buğdaylardan ve farklı oranlarda nemlendirilen buğdaylardan belli miktarlarda alınan numuneler, öncelikle tane sayısının belirlenmesi için sayılmış ve daha sonra her numune grubu 10 eşit parçaya bölünerek, her parçadaki o gruba ait ortalama boyuttaki buğday tanelerden 1'er adet seçilmiş ve boyutları ölçülmüştür. Ham buğdaydan nemlendirilmiş buğdaya doğru yapılan bu işlem, daha sonra nemlendirilmiş buğdaydan kurutulmuş buğdaya doğru da tekrarlanmıştır. Ölçülen boyutlar şekil 5.1'de de gösterildiği gibi eksenin yatay ve dikey yöndeki iki kutbu arasındaki mesafedir. Hesaplamalarda kullanılacak olan formüllerde, ölçüm değerlerinin yarısı olan "a" ve "c" değişkenleri olduğundan dolayı ölçülen değerler "2a" ve "2c" şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Buğdayın tane boyutunun belirlenmesinde ölçülen uzunluklar.

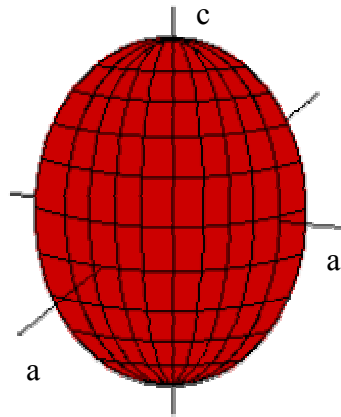
5.1.4. Küresellik

Yataktaki taneciklerin özelliklerinin akışkanlaşma üzerinde önemli bir etkisi vardır. Parçacıkların özelliklerini belirleyen değişkenleri; şekilleri, boyutları ve yoğunlukları olmasına karşın boyutlarından bağımsız tek boyutsuz değişkenleri ise

küresellikleridir. ϕ ile gösterilen küresellik, tanecik ile aynı hacme sahip kürenin yüzey alanının, taneciğin yüzey alanına oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\phi = \frac{\text{Tanecikle aynı hacimdeki kürenin yüzey alanı}}{\text{Taneciğin yüzey alanı}} \quad 5.2$$

Küreselliği hesaplayabilmek için buğday taneciğinin alanını ve hacmini hesaplamak gerekmektedir. Bu zamana kadar buğday taneciğinin alanını ve hacmini formülize eden bir çalışmanın olmaması, bizi mevcut geometrik şekiller üzerinden yaklaşık olarak bir alan ve hacim hesaplamamıza yöneltmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmada, buğday taneciğine en çok benzeyen geometrik şeklin, şekil 5.2’de de gösterilen “Prolate Spheroid” olarak adlandırılan şekil olduğuna karar verilmiş ve buğday taneciğinin alanı ve hacmi bu şekle göre hesaplanmıştır.



Şekil 5.2. Buğday taneciğinin alan ve hacim hesabında kullanılan geometrik şekil “Prolate Spheroid”.

Verilen şekil için alan ve hacim formülleri sırasıyla,

$$S = 2\pi a^2 + \frac{2\pi ac^2}{\sqrt{c^2 - a^2}} \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{c^2 - a^2}}{c} \right) \quad 5.3$$

$$V = \frac{4}{3} \pi a^2 c \quad 5.4$$

Formüllerde “c” uzunluğunun kutupsal yarıçapı, “a” uzunluğunun ise yatay eksenindeki yarıçapı göstermektedir.

5.1.5. Boşluk Oranı

Boşluk oranı, akışkanlaşma hızını belirleyen bir başka özelliktir ve tanecikler arasındaki hacmin, taneciklerin kapladığı toplam hacme oranı olarak tanımlanır. Boşluk oranının belirlenmesi, dereceli kaba koyulan belirli hacimdeki yağın içine yine belirli hacimdeki ham buğdayların, nemlendirilmeden ve farklı oranlarda nemlendirildikten sonra yağın içine koyulmasının ardından toplam yağ hacminin ve buğday hacminin ölçülmesi ve daha sonra yukarıdaki tanıma uygun hesabın yapılmasıyla bulunmuştur.

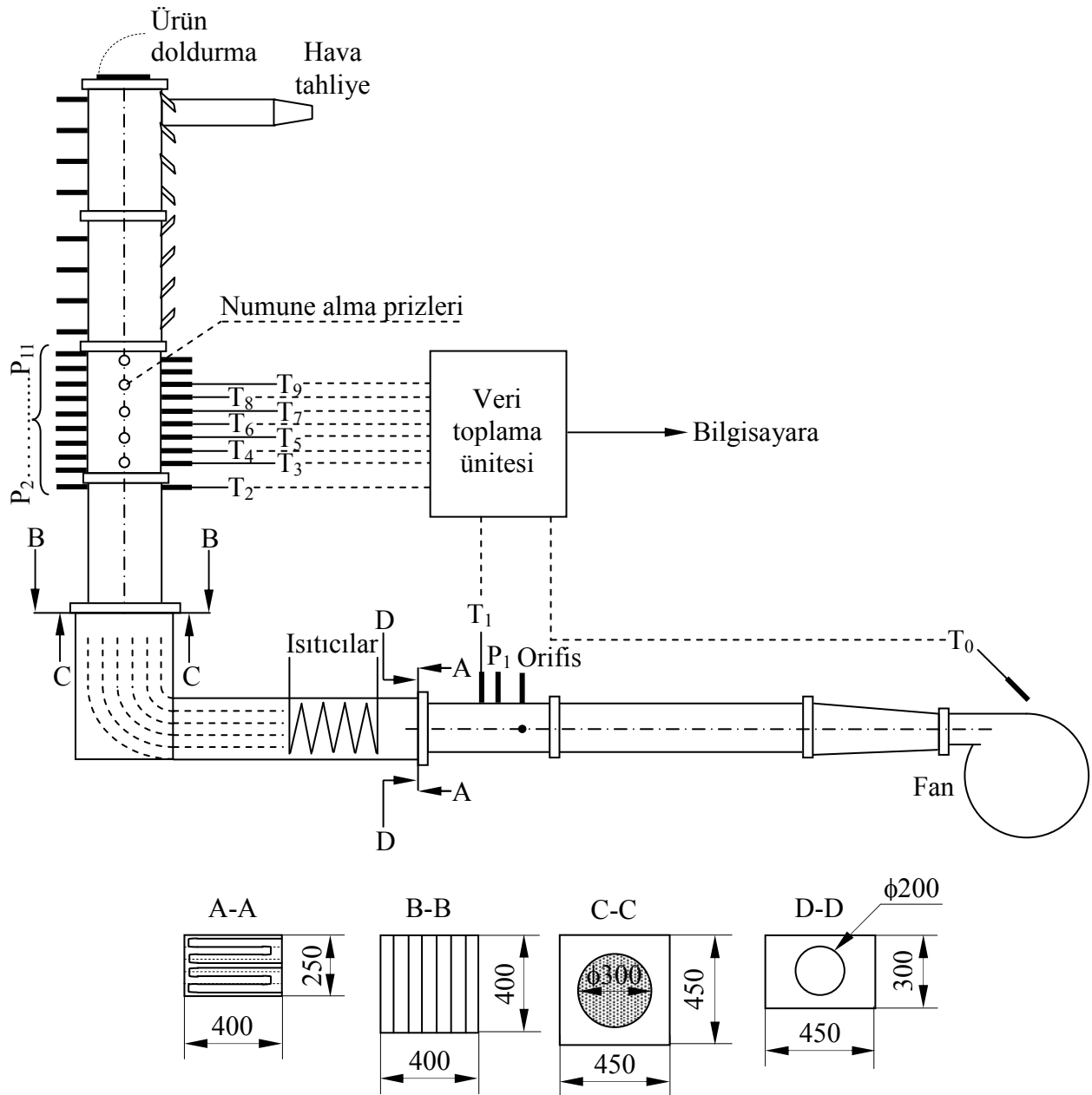
5.2. Pişirilmiş Buğdayın Akışkan Yatakta Kurutulması

5.2.1. Deney Tesisatı

Akışkan yatakta kurutma deneylerini yapabilmemiz için tasarlayıp imal ettiğimiz deney sisteminin şematik görünüşü şekil 5.3’de görülmektedir.

Frekans kontrollü 4 kW gücündeki fan tarafından, sıcaklığı ölçüldükten sonra sisteme beslenen hava, yatay ve dikey orifis yardımıyla hızının, daha sonra da basıncı ve sıcaklığının da ölçülmesinin ardından ısıtıcılara gelir. Isıtıcılar Cr-Ni’den yapılmış her biri 1250 W güce sahip toplam 20 adet kuru hava ısıtıcısından oluşmaktadır. Isıtıcılardan çıkan havanın 90°’lik dirsekten geçerken, düzenli bir şekilde akışını sağlamak için bu bölge içine saptırıcılar monte edilmiştir. Saptırıcılardan çıkan havanın da iyi bir şekilde karışmasını sağlamak için bu hava 1 mm delik çapı olan paslanmaz çelikten imal edilen delikli plakadan geçirilmiştir. Bu esnada sıcaklığı ve basıncı bir kez daha ölçülen hava tekrar delikli levhadan geçerek, 300 mm çapında 1400 mm yüksekliğindeki, ki bunun 500 mm’lik bölümü pleksiglastan geri kalanı paslanmaz

çelikten imal edilmiştir, akışkan yatağa gelir. Akışkan yatağın ilk 500 mm'lik bölümü üzerinde her 50 mm'de basınç ve sıcaklık ölçümünün yanında, deneyler sırasında farklı zamanlarda yataktan numune alabilmek için 50, 150, 250, 350, ve 450 mm'lik yüksekliklerde de toplam 5 tane de numune alma prizleri bulunmaktadır. Daha sonra akışkan yataktan geçen hava üst kısımdaki hava tahliye deliğinden ortama bırakılır.



Şekil 5.3. Akışkan yataкта kurutma sisteminin şematik görünüşü.

Deney sistemimizde hava hızları, Testo marka, 0,4 ile 60 m/s ölçüm aralığına sahip pervane tipi hız ölçme cihazının Testo 454 kontrol ünitesine bağlanmasıyla, basınç farkları da U manometreler yardımıyla ölçülürken, sıcaklıklar Cr-Al (Kromel-Alümel) den yapılmış K tipi termo elemanlardan elde edilen verilerin önce Keithley marka, 197 model veri toplama ünitesine oradan da bilgisayara aktarılmasıyla ölçülmüştür. Yatak içindeki sıcaklık ölçümlerinde termo elemanların yatak içindeki hava sıcaklığı ile ürün+hava sıcaklığını ayrı ayrı ölçmesi için yatak başlangıcından itibaren ilk 5 termo eleman çift uçlu ve bir uçları sadece hava sıcaklığını algılaması için taneciklerin giremeyeceği boyutta küçük delikli muhafazaların içine yerleştirilmesiyle yapılmışlardır.

5.2.3. Deneylerin yapılışı ve deney değişkenleri

Deneyler sırasında üretilecek bulgurun kalitesinin mevcut bulgur üretim sistemlerinde üretilen bulgurlara yakın olması, deney sisteminin performansını ölçmek açısından daha doğru olacağından dolayı deneylerimizde Gaziantep yöresinin sert makarnalık buğdayı kullanılmıştır. Bulgurun üretim sürecinde kalitesini etkileyen en önemli etmenler, kullanılan buğdayın cinsi, pişirilme miktarı ve kurutma sıcaklığıdır. Bu nedenle deneylerimizde bulgur fabrikalarındaki değerlere uygun şekilde hedikler üretilmiş ve kurduğumuz sistemle de kurutularak bulgur imal edilmiştir.

Deneylerde nemlendirilecek ham buğdaylar tartıldıktan sonra kaynamakta olan suya atılmış ve buğdayın nem alma verilerinden elde ettiğimiz, yaş bazda % 48-50 neme gelene kadar geçen süre olan 49-50 dakika süre ile kaynatılmışlardır. Bu süre sonunda pişen buğdaylar daha sonra yüzey neminin alınması, içlerinde olabilecek pişmeyen tanelerin pişmesi ve nem içeriklerinin sabit bir değere ulaşması için 60 dakika dinlendirilmişlerdir. Normal süreçte pişmiş buğdaylar 15-20 dakika dinlendirilmekteydi. Bizim 60 dakika dinlendirmemizin nedeni pişirilen buğdayların suyunun alınmasının ardından dinlendirilmeleri sırasında sıcaklığında etkisiyle ciddi miktarda olan buharlaşmadan dolayı ağırlıklarının sürekli değişmesinden kaynaklanmaktadır. Dinlendirme sırasında deney tesisatının çalışma rejimine ulaşması için fan sürücüsü açılıp uygun bir hız değerine ayarlanmış ve yeteri kadar da ısıtıcı enerjilendirilmiştir.

Deneylerde sıcaklığı hassas bir şekilde ayarlayabilmek için her biri 1250 W'lık 2 ısıtıcı değişken AC gerilimli varyağa bağlanmıştır. Dinlendirme süresi sonunda pişmiş buğdayların aldıkları nem miktarını belirlemek için buğdaylar, tekrar tartılmışlardır. Akışkan yatak sistemi içindeki hava hızı ve sıcaklığının uygun değerlere geldiği görüldüğünde fan durdurulup ısıtıcılar kapatılmış ve dinlendirilmiş pişmiş buğdaylar, deney tesisatının üzerinde bulunan ürün doldurma kapağından aşağıya uzatılan pvc boru ile yatağa boşaltıldıktan sonra fan ve ısıtıcılar tekrar çalıştırılmışlardır.

Bu andan itibaren zaman ile yataktaki buğdayın kuruma özelliklerini elde edebilmek için mümkün olan en kısa aralıklarda ve yatağın karakterini de bozmayacak şekilde az miktarda buğdayın numune alma prizlerinden alınması gerekir. Bunun için yaptırılan numaralandırılmış delikli numune alma torbaları önce teraziye konup terazinin değeri sıfırlanmış ve daha sonra da numune alma prizine takılan torbaya numune alma prizindeki tapanın çıkartılarak yeteri kadar buğdayın dolması sağlanmıştır. Alınan numune hemen teraziye konularak tartılmış ve kurutmanın başlangıcından numunenin alındığı ânâ kadar geçen zaman, numunenin ağırlığı ve torba numarası deney föyüne yazılmasının ardından alınan numuneler kuruma miktarlarını belirleyebilmek için fırına koyulmuşlardır. Deneyler esnasında yatağa koyulan, yataktan alınan ve fırından çıkarılan numuneler, maksimum 1.2 kg kapasiteli ve 1 kg'da 0.0000001 g hassasiyete sahip terazi ile tartılmışlardır.

Bu işlem, deney sonuna kadar azalan aralıklarla devam ederken, diğer taraftan fan çıkışından yatağın 450 mm üstüne kadar olan 11 ayrı noktadan alınan basınç değerleri okunmuş ve fan çıkışındaki kanalda bulunan yatay ve dikey orifisten hız ölçüm pervanesiyle 6'şar ölçüm alınarak, kanaldaki hız değerleri de ayrı bir deney föyüne yazılmıştır. Deneyler, bulgurun nem içeriği yaş bazda % 12-13 değerine düşene kadar ki bu süre yaklaşık 100 dakika kadardır, devam etmiştir.

Deneyler tek bir sıcaklıkta, 5 ayrı hava hızında ve 3 farklı yatak yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir. Kurutmanın tek bir sıcaklıkta, 70 °C'de yapılmasının nedeni, bulgurun nem oranı düşükken 70 derecenin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalması durumunda renginin koyulaşarak bulgurun kalitesinin düşmesidir. Bundan dolayı bulgur

fabrikalarında buğdayın nem içeriği yüksek iken kurumasını hızlandırmak için yüksek sıcaklık ve azalan nem oranıyla da azalan kurutma sıcaklığı sistemi uygulanmaktadır.

Deneilerde, hediklerin farklı yatak yüksekliklerinde kurutulması, 3-6 ve 9 kg'lık ham buğdayların nemlendirilip, sırasıyla H=10 cm, H= 20 cm ve H=30 cm yatak yükseklikleri elde edilmesiyle, yatak yüksekliğinin kuruma zamanına etkisini araştırmak için yapılmıştır.

Farklı hava hızları, yataktaki buğdayların akışkanlaşmasını etkileyeceği için buğdayların sabit, akışkan ve tam akışkan yataktaki kuruma değerlerini veya sabit yatakta başlayıp akışkan yatağa veya akışkan yatakta başlayıp tam akışkan yatağa geçiş durumundaki kuruma değerleri de elde edebilmek için deneylerin 5 farklı hızda yapılması kararlaştırılmıştır. Bunun için kurutma deneylerine başlamadan önce farklı yatak yükseklikleri için hız ölçüm deneyleri yapılarak bu hız değerleri belirlenmiştir.

6. DENEY SONUÇLARI: BUĞDAYIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

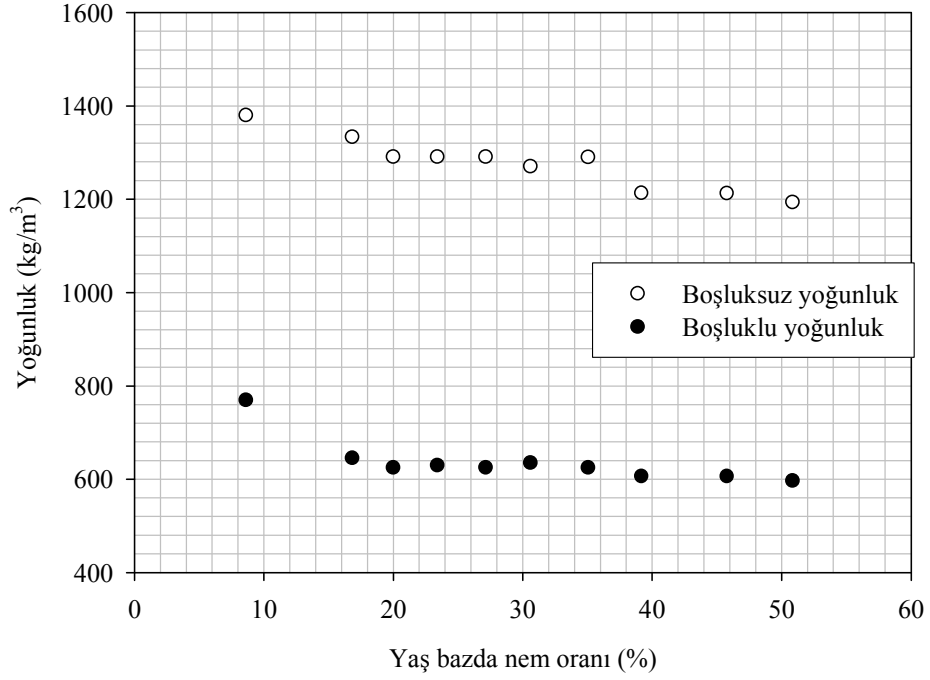
6.1. Yoğunluk

Ülkemizde yetiştirilen buğdayların yoğunlukları için yapılan araştırmalarda buğdaylarımızın boşluksuz yoğunluklarının 1320-1440 kg/m³ arasında, boşluklu yoğunluklarının da, iki bölge için % 9.8 nem oranında 798-827 kg/m³, % 38 nem oranında ise 695-698 kg/m³ aralığında olduğu, buğdayın kurutulması üzerine yapılan diğer çalışmalarda ise boşluklu ve boşluksuz yoğunluk aralıklarının sırasıyla, 538.8-740 kg/m³ ve 847-1400 kg/m³ arasında ölçüldüğü daha önceden belirtilmişti.

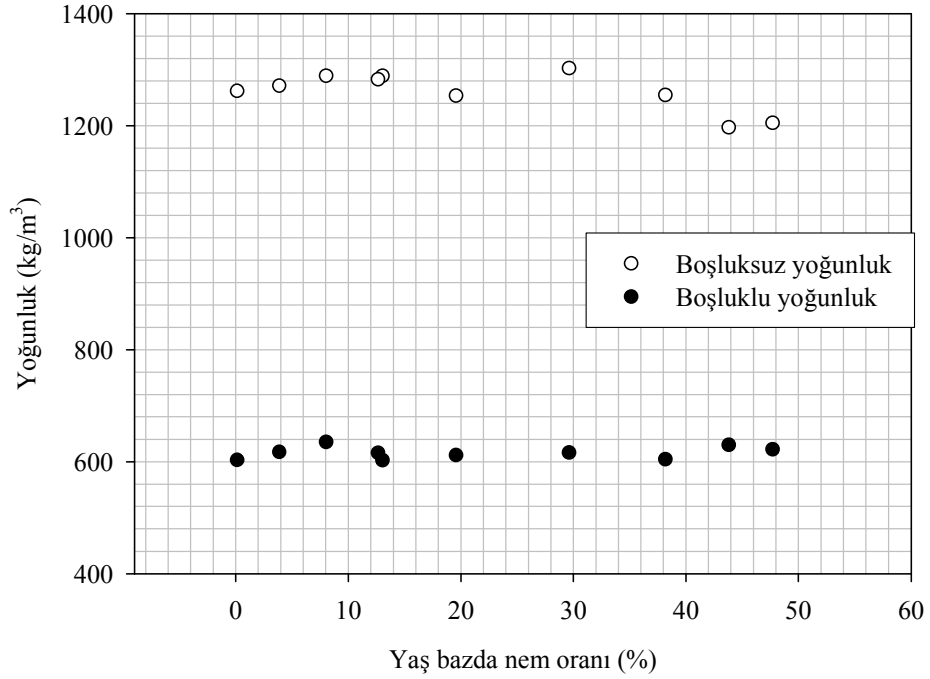
Şekil 6.1'den görüldüğü gibi deneylerimizde kullandığımız yaş bazda % 8.5 nem içeren Gaziantep yöresinin sert makarnalık cinsi ham buğdayların boşluklu ve boşluksuz yoğunlukları, sırasıyla yaklaşık olarak 770 kg/m³ ile 1380 kg/m³ arasında değişirken, yaş bazda %50 nem içeren pişmiş buğdayların (hedik) boşluklu ve boşluksuz yoğunlukları sırasıyla yaklaşık olarak 600 kg/m³ ile 1200 kg/m³ arasında değişmektedir. Dolayısıyla nem alma sırasında buğdayın yoğunluğu oldukça azalmaktadır.

Kaynaklarda yaş bazda % 9.3 nem içeren bulgurun boşluklu yoğunluğu için 765 kg/m³ olarak belirtilen değer, yaptığımız kurutma deneyleri sonunda yaş bazda % 9 nem içeren bulgur için 650 kg/m³ olarak bulunmuştur.

Şekil 6.1 ve 6.2 incelenirse pişirilerek hedik haline getirilen buğdayların tekrar kurutulması esnasındaki yoğunluğunun değişiminin, ham buğdayın nemlendirilmesi sırasındaki değişimine bakıldığında çok dar bir aralıkta değiştiği görülmektedir.



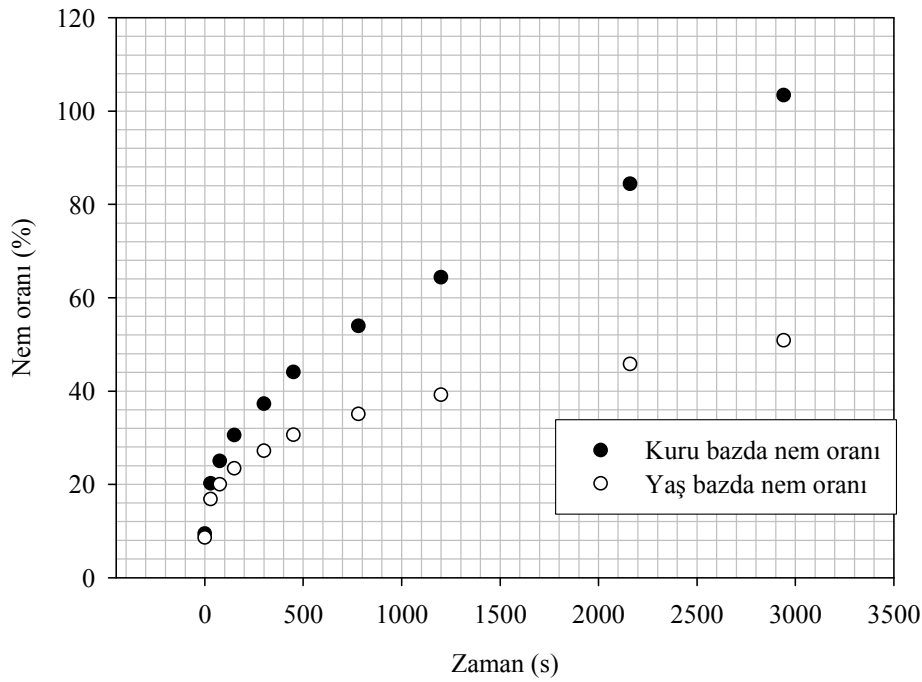
Şekil 6.1. Buğdayın nemlendirme esnasında yoğunluğunun değişimi.



Şekil 6.2. Hediğin kurutulması esnasında yoğunluğunun değişimi.

6.2. Nemlenme Süresi ve Eğrisi

Şekil 6.3’de ham buğdayın kaynatılması sırasında nem oranının değişimi yaş ve kuru bazda verilmiştir. Başlangıçta kuru bazda % 9.5 ve yaş bazda % 8.5 nem içeren ham buğdayların nem içerikleri, 3000 saniye sonra kuru bazda yaklaşık % 100’e ve yaş bazda da % 50’ye çıktığı görülmektedir. Buğdayların kaynatılarak nem alma eğrisinin oluşturulduğu bir çalışma olmamakla birlikte, taneciklere basınçlı buhar tutularak yapılan bir çalışmada, buğdayların yaş bazda nem içeriklerinin 1 bar ve 2 bar için ilk 5 dakika sonunda % 15 ve % 17’ ye, 50. dakikada % 25 ve % 28’e, 90. dakikada ise % 28 ve % 33’e çıktığı grafikte gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Buğdayın kaynatılması sırasında nem içeriğinin zamanla değişimi.

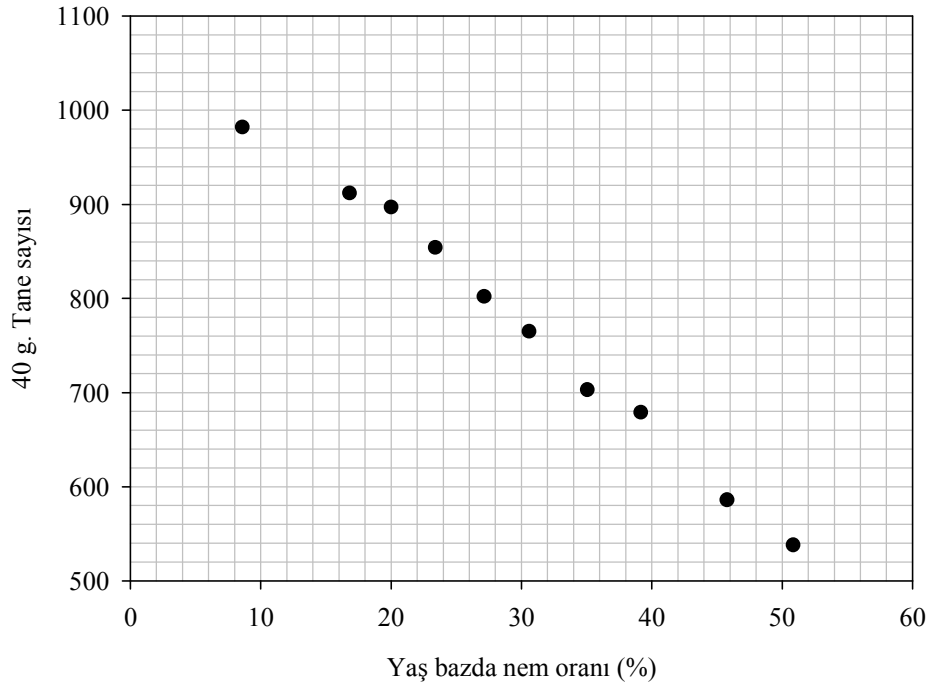
6.3. Tane Sayısı ve Boyutları

Şekil 6.4, ham buğdayın nemlendirilmesi esnasındaki boyut değişimini göstermektedir. Resimde soldan sağa doğru sırasıyla, ham buğday, 30, 75, 150, 300,

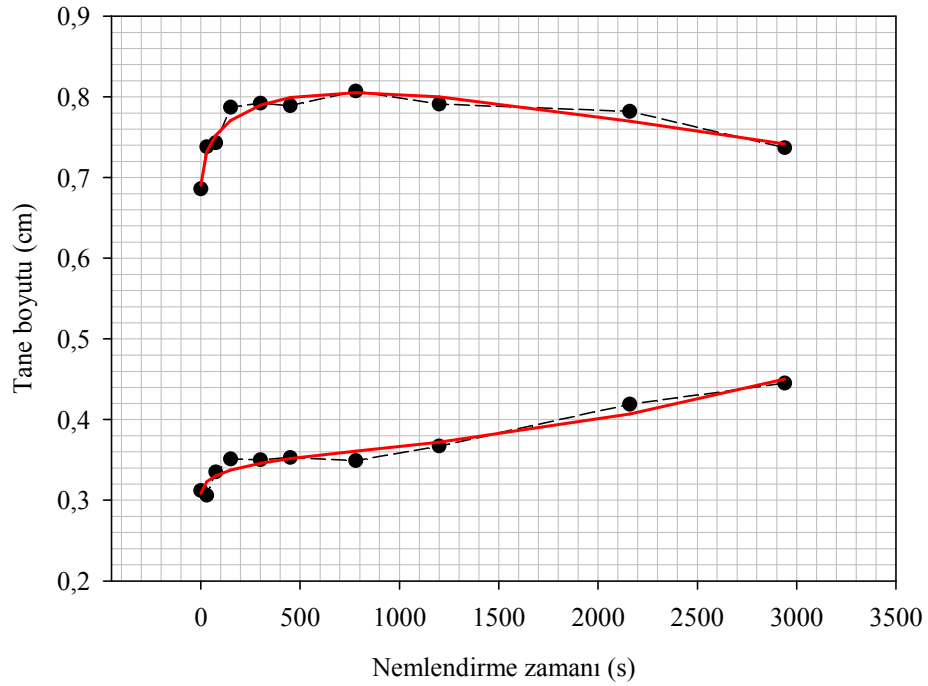
450, 1200, 2160 ve 2940 saniye nemlendirilmiş buğdaylar görülmektedir. Nem oranına bağlı olarak taneciklerin 40 gramının tane sayısını gösteren grafik, şekil 6.5’de, nemlendirme sırasında yapılan boyut analizinden elde edilen uzunluk ve genişlikleri veren grafik, şekil 6.6’da, nemlendirilmiş buğdayın kurutulması esnasındaki resimleri, şekil 6.7’de ve kuruma sırasındaki taneciğin uzunluk ve genişliğinin değişimi ise şekil 6.8’de gösterilmiştir. Şekil 6.7’de kurutma süreleri soldan sağa doğru sırasıyla 900, 2100, 3600, 5400, 7200, 9000, 10800, 12600, 14400, 16200, 18000 ve 19800 saniyedir. Şekil 6.6 ve 6.8’deki boyut analizi grafiklerindeki noktalardan birer doğru geçirilmiş ve hesaplamalarda, bu eğrilerdeki değerler esas alınmıştır. Boyut grafiklerinde alttaki eğriler, “2a”, yani yatay eksenel çap değerlerini, üstteki eğriler ise “2c”, yani kutupsal çap değerlerini göstermektedir.



Şekil 6.4. Ham buğdayın nemlendirilmesi sırasında tane boyutunun değişimi.



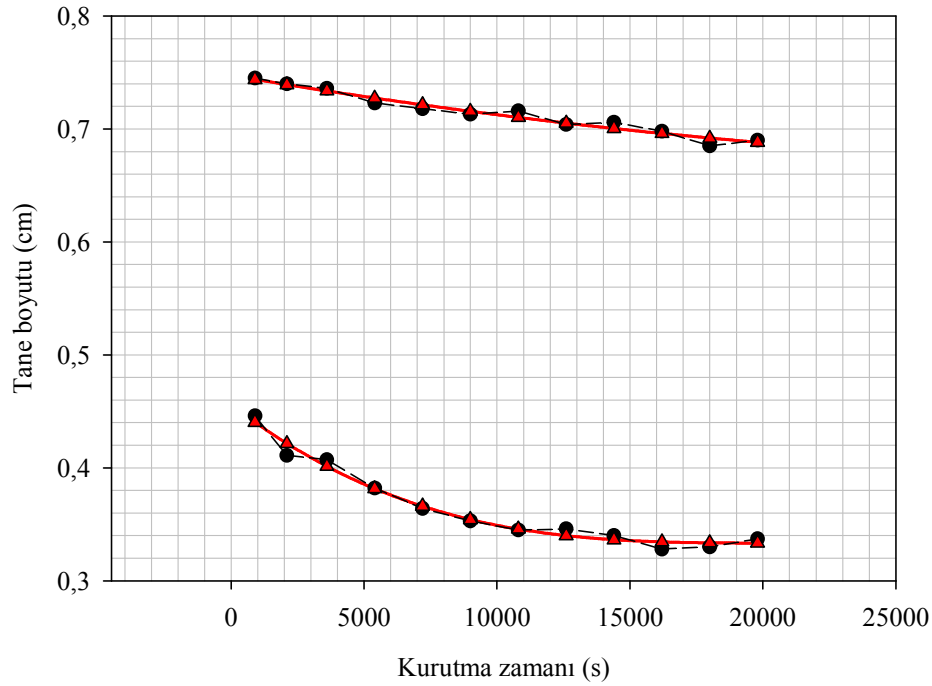
Şekil 6.5. 40'ar gramlık ham ve nemlendirilmiş buğdayların tane sayısı.



Şekil 6.6. Ham buğdayın nemlendirilmesi sırasındaki boyut değişimi.



Şekil 6.7. Pişirilmiş buğdayın kuruması esnasında boyut değişimi.



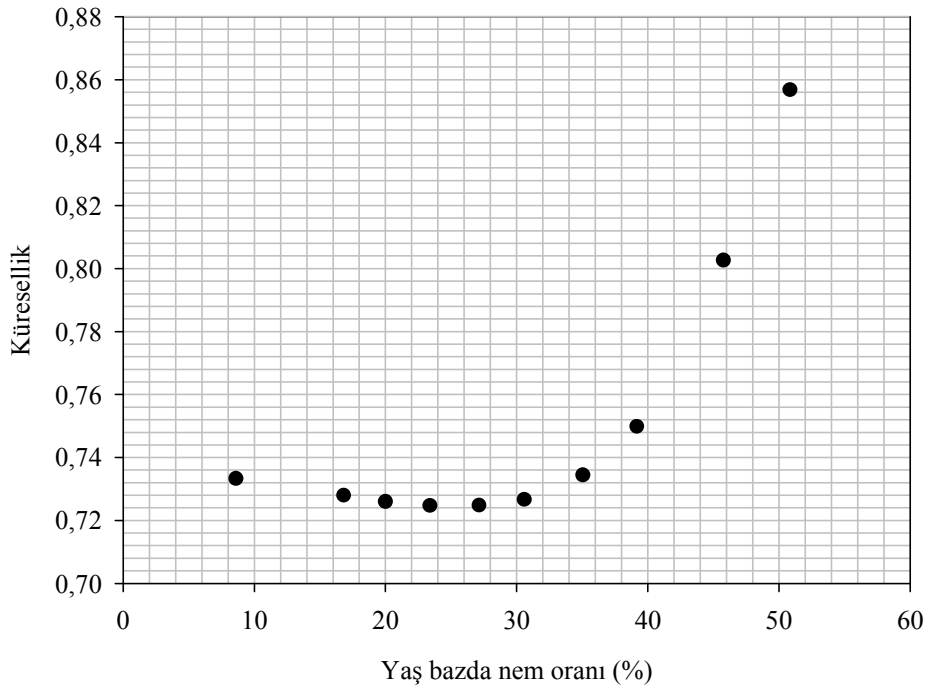
Şekil 6.8. Pişirilmiş buğdayın kurutulması sırasındaki boyut değişimi.

Tane sayısı üzerine yapılan çalışmalarda, standart ölçü olan 1000 tane ağırlığı ölçümünde yumuşak buğdaylar için 26-51 gram, sert buğdaylar ise 26-58 gram değerleri ölçülmüştür. Yaptığımız deneylerde 1000 tane sayısının yerine 40 gram ağırlıktaki tane sayısı ölçümü yapılmıştır. Ölçümlerimiz sonucunda yaş bazda % 8.5 nem içeren 40 gram ham buğdayların 980 tane, % 50 nem içeren pişmiş buğdayların ise yaklaşık 530 tane olduğu belirlenmiştir.

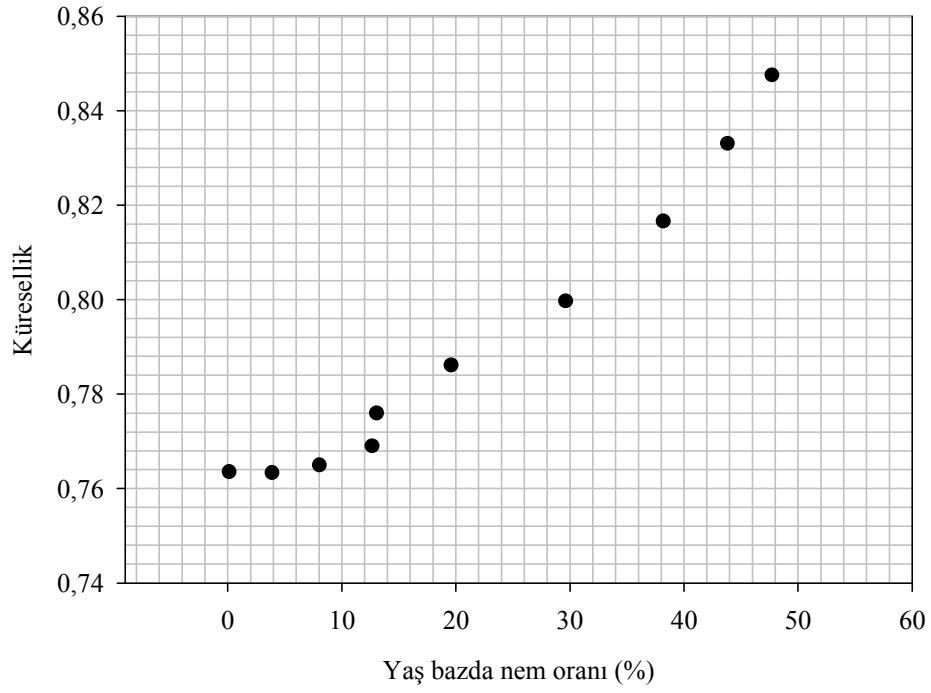
Önceki çalışmalarda tane boyutları hakkında, uzunlukların 6.7 ile 7.08 mm arasında, genişliklerin 3.2 ile 3.27 ve kalınlıkların 2.7 ile 2.98 arasında ölçülen değerleri bizim çalışmamızda da elde edilmiştir. Ham buğdayın boyut analizinden ayrı olarak farklı nem oranlarındaki buğdayların da uzunluk ve genişlik ölçümleri, hem buğdayın nemlendirilip hedik haline getirilmesi esnasında, hem de hediğin kurutularak bulgur haline getirilmesi sırasında yapılmış ve elde edilen sonuçlar şekil 6.6. ve 6.8'de gösterilmiştir.

6.4. Küresellik

Ham buğdayların ve farklı sürelerde nemlendirilen buğdayların küresellikleri şekil 6.9’da, nemlendirilmiş buğdayların kuruma sırasındaki küreselliklerinin değişimi ise şekil 6.10’da görülmektedir. Şekillerde, ham buğdayların küresellikleri, % 27 nem içeriğine kadar çok az azalmakta ve daha sonra birden artmakta iken, nemli buğdayların kuruması sırasındaki küresellikleri, hemen hemen doğrusal olarak azalmaktadır. Kaynaklarda % 7.4 nem içeren buğdayın küresellik değeri için 0.6 değeri verilmiş olup, yapılan kurutma modellerinde ise tanecikler, genelde küresel veya silindirik kabul edilmiştir. Dolayısıyla, küre, uzunluğu çapına eşit olan silindir ve küp için küresellikler sırasıyla 1, 0.874 ve 0.806 olarak alınmıştır. Bizim değerlerimizin verilerden biraz farklı çıkmasının nedeni, taneciğin boyut ölçümü sırasında kalınlığının, genişliğine eşit alınması, ortalama çapın, boyut ölçümündeki değerlerin aritmetik ortalamasının alınmasından ve alanın hesaplanmasında da benzetim şekli kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.9. Ham buğdayın nemlendirilmesi sırasında küreselliğinin değişimi.



Şekil 6.10. Pişirilmiş buğdayın kurutulması sırasında küreselliğinin değişimi.

6.5. Boşluk oranı

Taneciğin nemlendirilmesi esnasında boşluk oranınının 0.44-0.516, kuruturken ise 0.47-0.545 aralığında değiştiği hesaplanmış ve bulunan değerlerin kaynaklarda belirtilen değerlerle hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

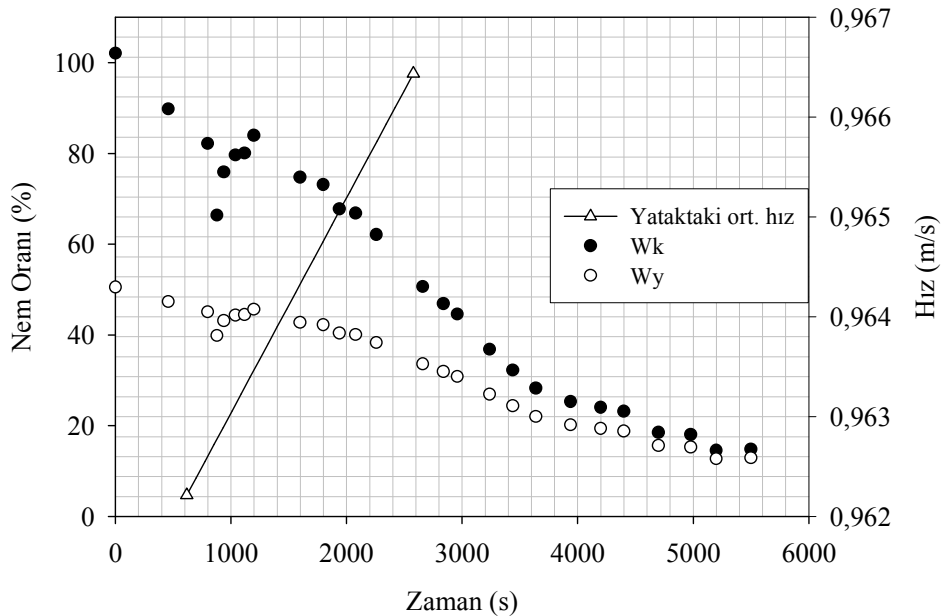
7. DENEY SONUÇLARI: AKIŞKAN YATAKTA KURUTMA

Deney sonuçları yatak yüksekliklerine göre gruplandırılmıştır. Her deneyin verileriyle oluşturulan grafikler, verilerin birbirine karışmaması için ayrı ayrı eksen takımında gösterilmiştir.

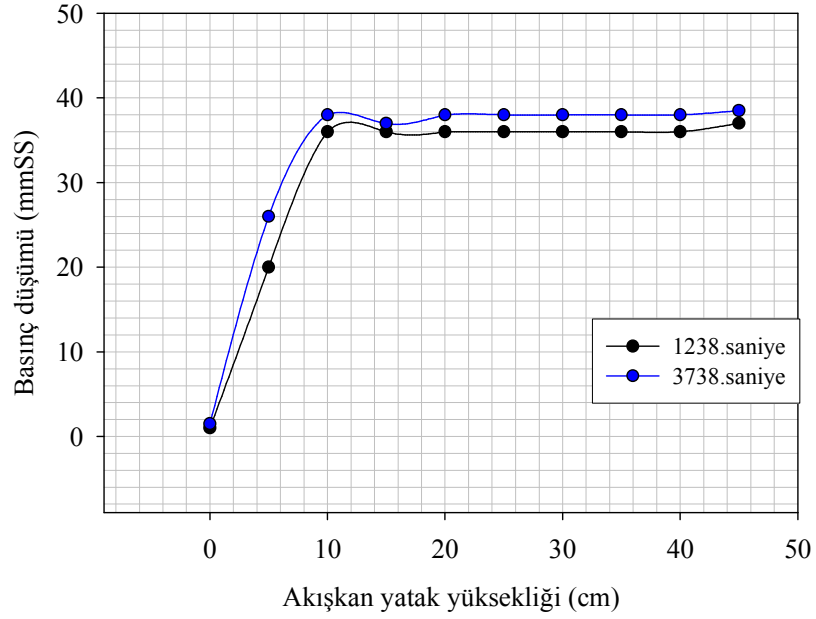
7.1. H=10 cm Sabit Yatak Yüksekliği

7.1.1. Sabit yatakta düşük hızla kurutma

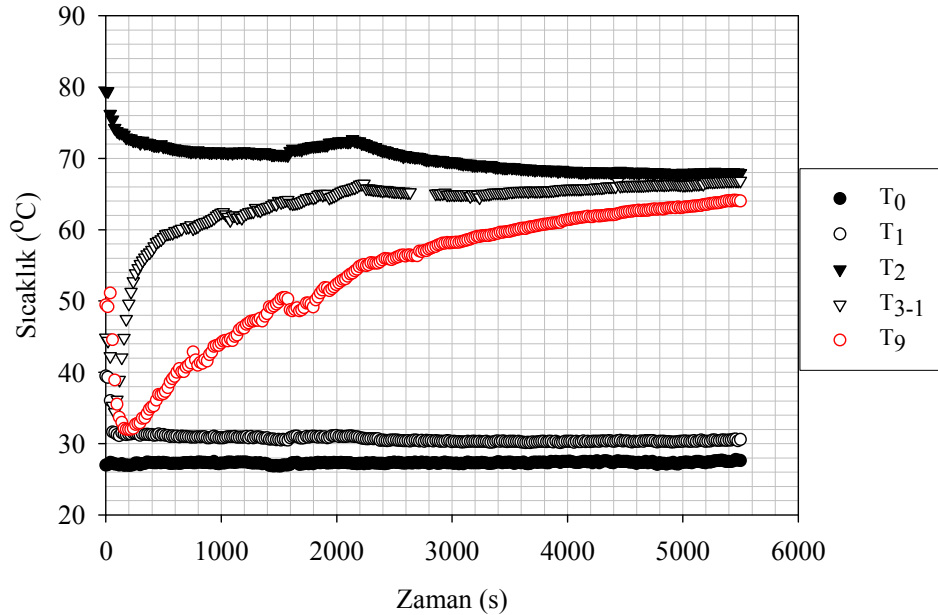
Şekil 7.1, nemlendirilmiş 3 kg ham buğdayın ($H=10$ cm, ≈ 5.5 kg hedik), yaklaşık 70 °C’de, sabit yataktaki kuruma eğrisini ve hızlarını göstermektedir. Kuruma eğrisinin yeterince düzgün olmadığı, dolayısıyla yatak içindeki malzemenin de düzenli bir nem dağılımına sahip olmadığı grafikten kolayca görülebilir. Ayrıca yataktaki hızın, kurumanın sonlarına doğru çok az da olsa arttığı, bu artışın az da olsa hız ölçümünün alındığı değerler arasındaki sıcaklık farkından kaynaklandığı açıktır.



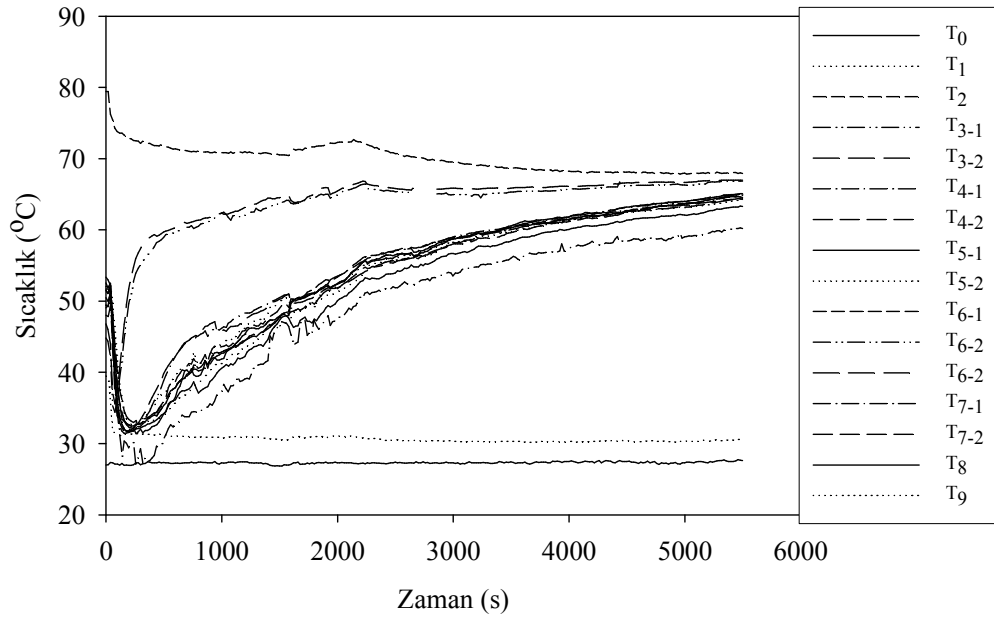
Şekil 7.1. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta düşük hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 7.2. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta düşük hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



Şekil 7.3. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta düşük hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



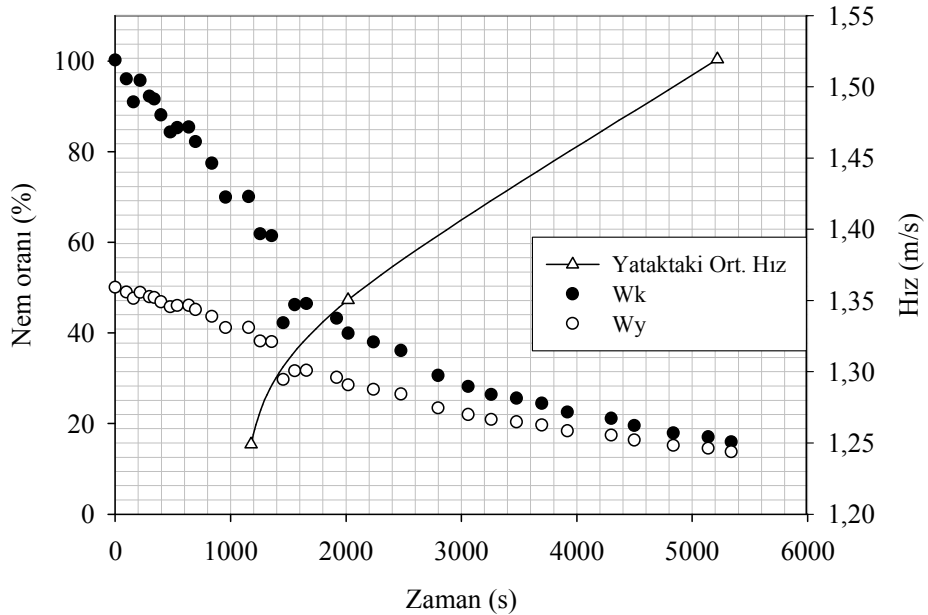
Şekil 7.4. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta düşük hızda kurutulması sırasında yatak sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi. (Fan giriş T_0 , fan çıkış T_1 , akışkan yatak delikli levhası altı T_2 , akışkan yatak 5 cm'deki hava+tane sıcaklığı T_{3-1} , 5 cm'deki hava sıcaklığı T_{3-2} , 10 cm'deki hava+tane sıcaklığı T_{4-1} , 10 cm'deki hava sıcaklığı T_{4-2} , 15 cm'deki hava+tane sıcaklığı T_{5-1} , 15 cm'deki hava sıcaklığı T_{5-2} , 20 cm'deki hava+tane sıcaklığı T_{6-1} , 20 cm'deki hava sıcaklığı T_{6-2} , 25 cm'deki hava+tane sıcaklığı T_{7-1} , 25 cm'deki hava sıcaklığı T_{7-2} , 30 cm'deki hava+tane sıcaklığı T_8 ve 35 cm'deki hava sıcaklığı T_9).

Sabit yatak deneyinde basınçlar incelenirse, basınç düşümleri yatak yüksekliği (kurutulan maddenin yükseltisi) boyunca yükselmekte ve daha sonra sabit kalmaktadır. Ayrıca, yataktaki nem kaybından kaynaklanan, anlık olarak görülemeyen, yatak yüksekliğindeki azalmaya karşı, kurutmanın son safhalarına doğru yatak ağırlığının azalmasıyla, yatağın yükseldiği, basınç eğrisinden kolaylıkla çıkarılabilir.

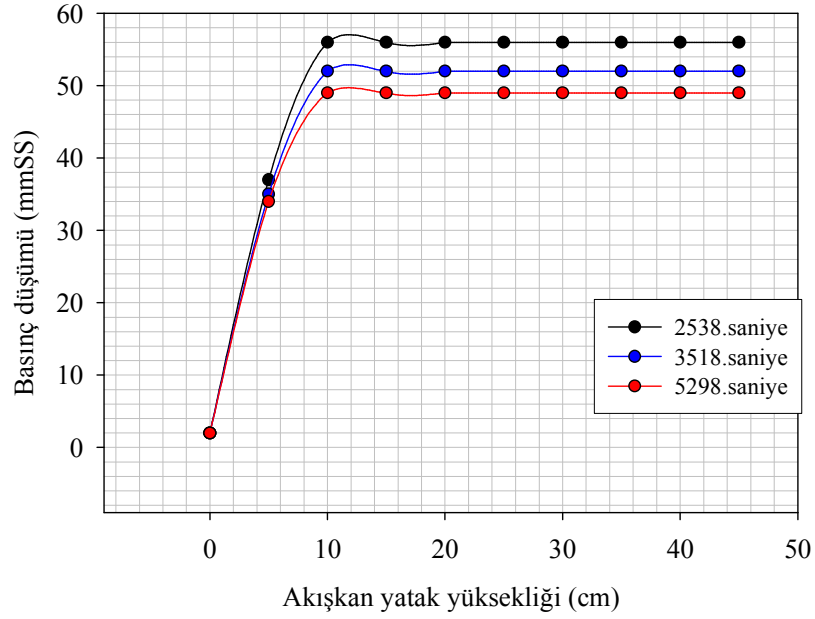
Yatak boyunca sıcaklıklar incelenirse, yatağın giriş sıcaklığının yaklaşık sabit olmasına rağmen en alt ve üst kısmındaki sıcaklıkların birbirinden farklı olması hava hızının düşük olmasından dolayı, ısısını daha düşük sıcaklıktaki nemli buğdaya vermesinde dolaydır.

7.1.2. Sabit yatakta yüksek hızla kurutma

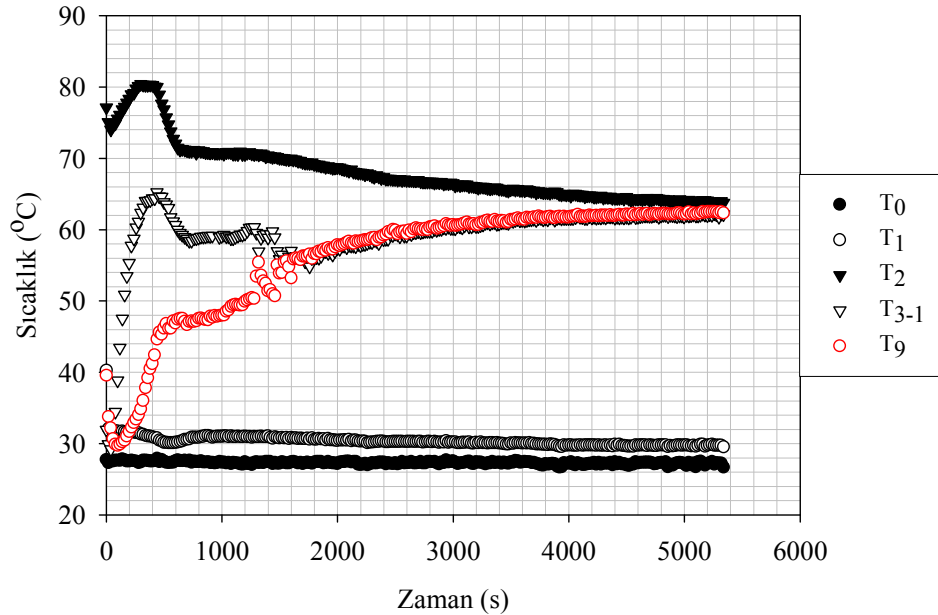
Şekil 7.5, nemlendirilmiş 3 kg ham buğdayın yaklaşık 70 °C’de, sabit yataktan akışkan yatağa geçiş durumundaki kuruma eğrisini ve hızlarını göstermektedir. Sıcaklık ve kuruma eğrilerinden, yatağın, yaklaşık 1500. saniyeye kadar sabit yatak olduğu ve daha sonra sıcaklık ve buğdayın nem değerlerinin bir düzensizlik gösterdiği, akışkanlaşmanın başladığı noktaya gelindiği kolayca görülebilir. Grafikten minimum akışkanlaşma hızının literatürde verilen, buğdayın yaş bazda % 43 nem oranı için 1.3 m/s olan minimum akışkanlaşma hızına yakın olduğu açıktır. Akışkanlaşma başlamadan evvel farklı olan yatak sıcaklıkları akışkanlaşmanın başlamasıyla da homojen bir hale gelmiştir. Bu da, yatakta çok iyi bir karışım olduğunu göstermektedir. Geçiş döneminde yataktaki hız hızla artarken, daha sonra nem içeriğinin azalmasıyla, artışını azalan bir şekilde devam ettirmektedir. Basınç eğrileri incelenirse, sabit yatak durumunda basınç ölçümü alınamamasından dolayı sabit yataktan akışkan yatağa geçişte görülen yatak yüksekliğindeki artış görülememekte, fakat yatak boyunca basınç düşümü ve kuruma ile yatak yüksekliğindeki azalma açıkça görülmektedir.



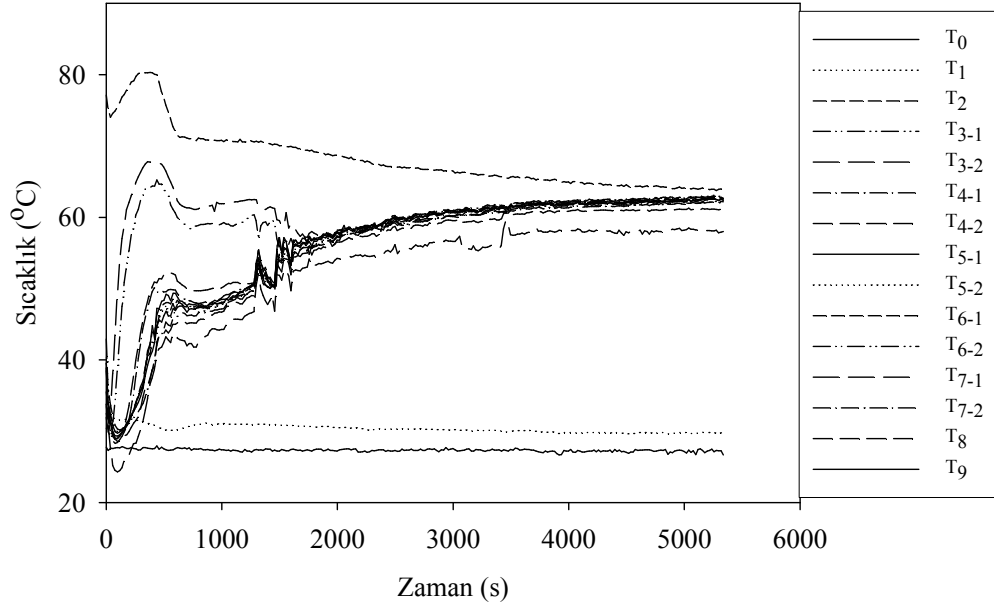
Şekil 7.5. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulması sırasındaki nem oranı ve hız değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 7.6. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



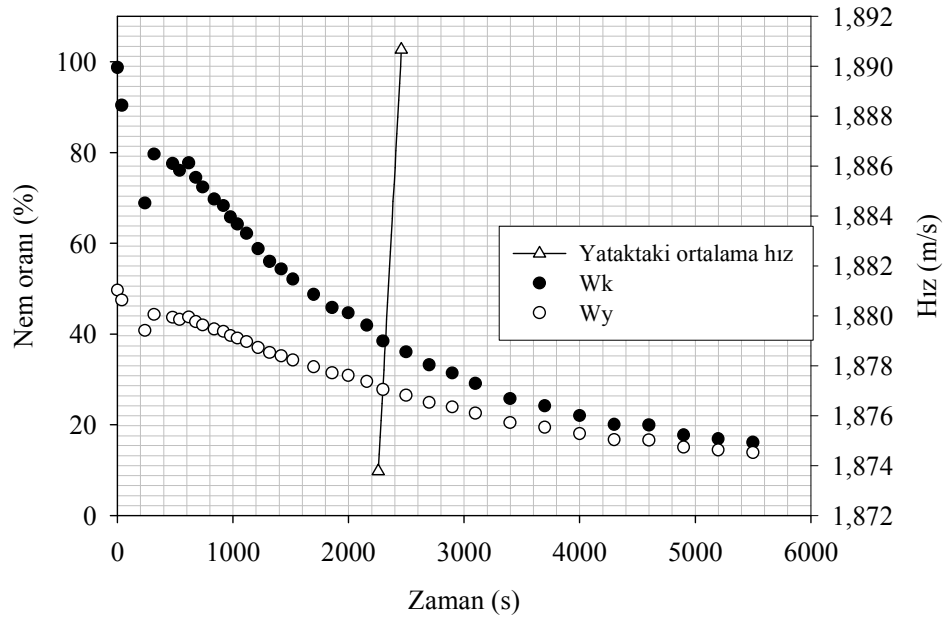
Şekil 7.7. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



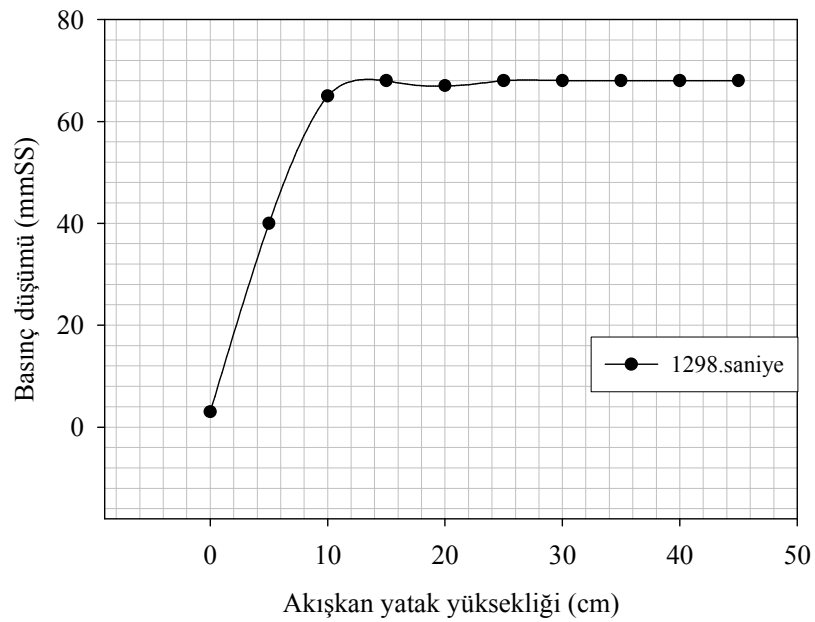
Şekil 7.8. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi.

7.1.3. Minimum akışkanlaşma hızında kurutuma

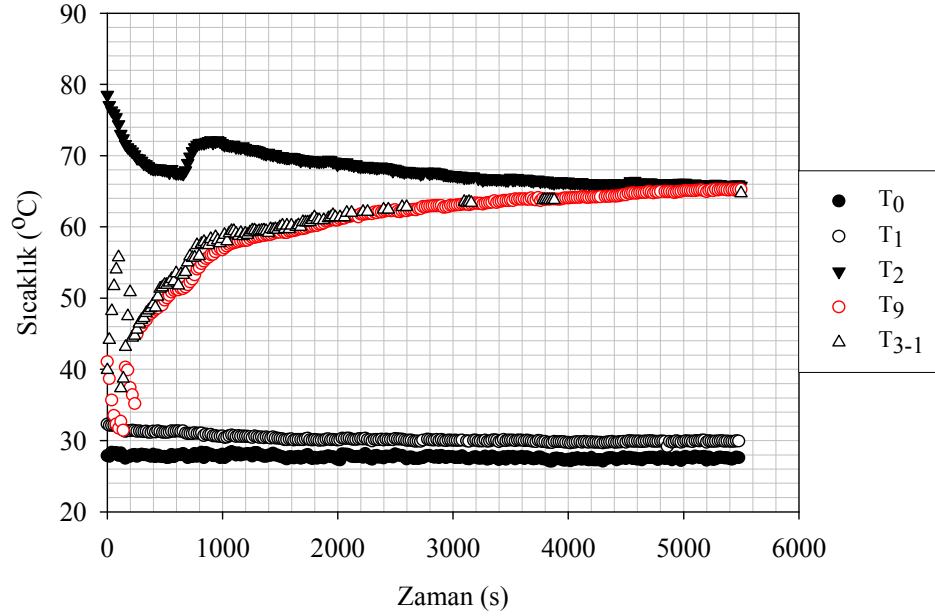
Şekil 7.9, nemlendirilmiş 10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin 70 °C’de, minimum akışkanlaşma hızındaki kuruma eğrisini ve hızlarını göstermektedir. Yatağın akışkan olup olmadığı, sıcaklık grafiği sayesinde kolayca görülebilir. Akışkan yatağın 5. ve 35. cm’indeki ölçümlerinde sıcaklık değerlerinin çakışık olması bunun göstergesidir. Kuruma eğrisi de, yatak içindeki ürünlerin düzenli bir kuruma değerine sahip olduğunu göstermektedir. Hız ölçümlerinin birbirine yakın zamanda yapılmasından dolayı hız değerlerinin kuruma süresince değişimi çok fazla bilinmemekle birlikte artış eğilimi içinde olduğu, basınç düşümlerinin ise, yatak yüksekliğine kadar arttığı, sonra sabit kaldığı hız ve basınç grafiklerinden görülebilir.



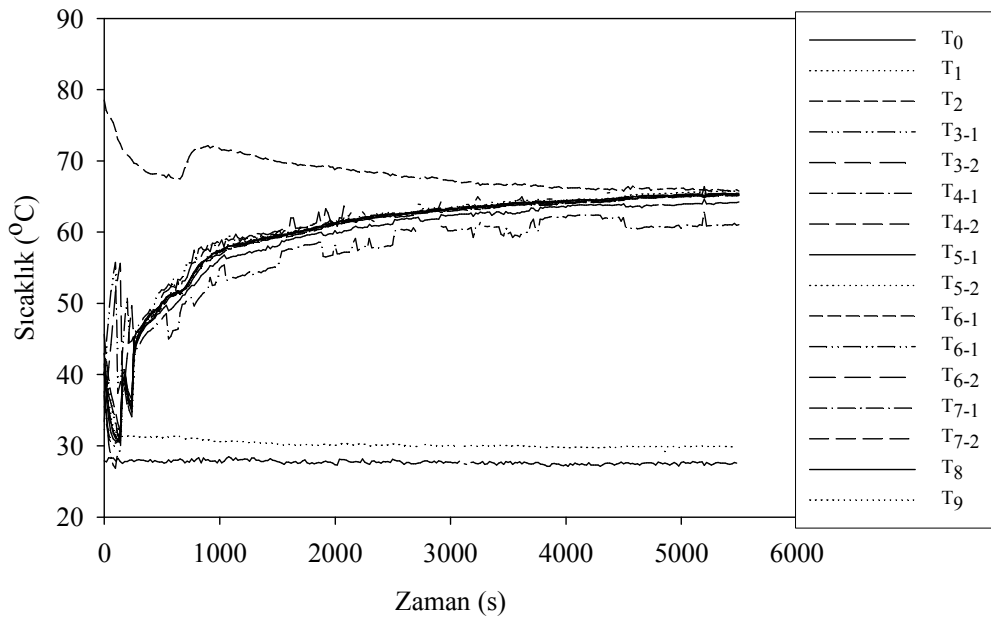
Şekil 7.9. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulması sırasındaki nem oranı ve hız değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 7.10. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



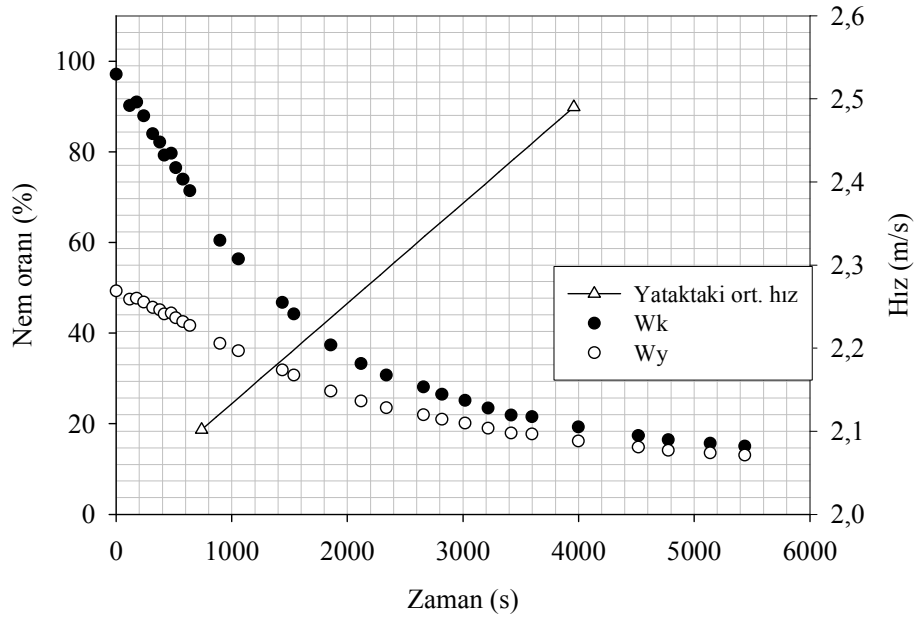
Şekil 7.11. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



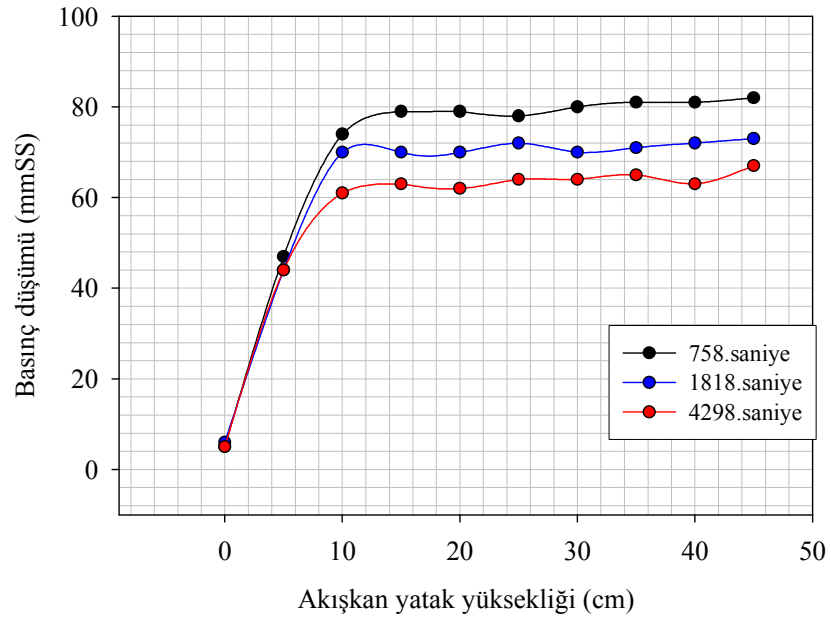
Şekil 7.12. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi.

7.1.4. Tam akışkanlaşmış yatakta orta hızla kurutma

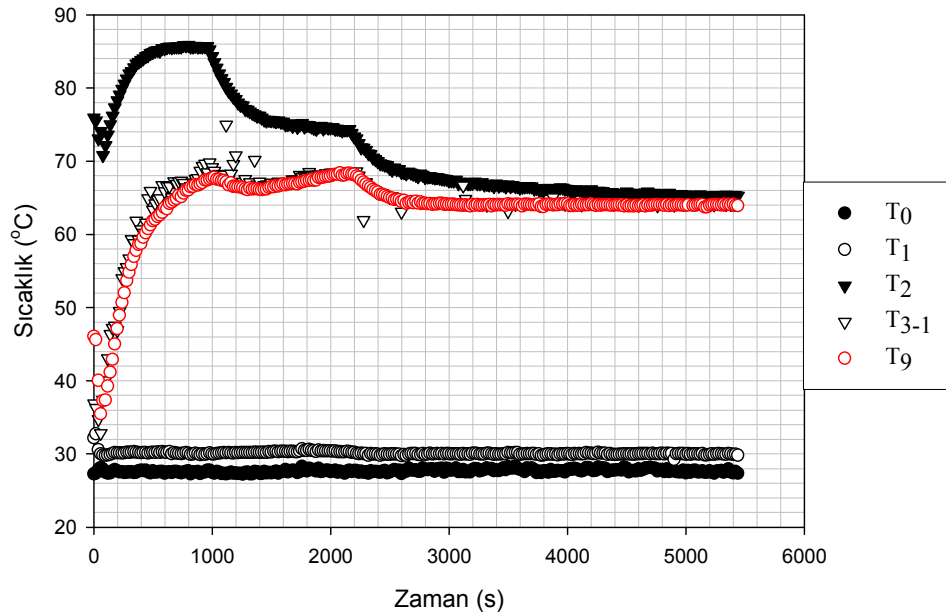
Şekil 7.13, nemlendirilen 5.5 kg hediğin, akışkan yataktan, tam akışkan yatağa geçişi esnasındaki kuruma ve hız değerlerini göstermektedir. Burada da yatağın akışkan olmasından dolayı yatak içindeki sıcaklıklar birbirine son derece yakın ve kuruma eğrisi düzensizdir. Yataktaki hız, kurutma hızına bağlı olarak yatak ağırlığının azalmasından dolayı, kuruma ilerledikçe artmıştır. Akışkan yataktan tam akışkan yatağa geçişin olduğu, yani yatağın alt kısmında belli bir miktar ürünün askıda kalmadan sürekli yer değiştirdiği, fakat orta ve üst kısımdaki ürünlerin kabarcıklardan ve yüzeydeki fişkirmalarından dolayı, yatağın üst kısımlarındaki basınç düşümlerinde bir düzensizlik oluşturduğu, basınç düşümü grafiğinden görülmektedir. Yine yatağın, başlangıçta sabit yatak olmadığından dolayı yatak yüksekliği kurumaya bağlı olarak zamanla azalmıştır.



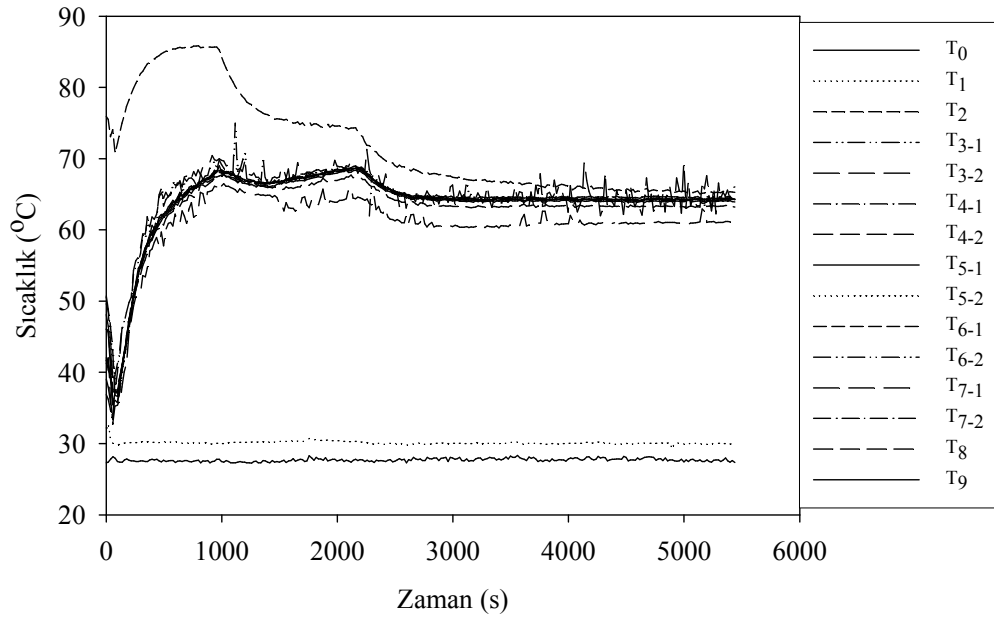
Şekil 7.13. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızla kurutulması sırasındaki nem oranı ve hız değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 7.14. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



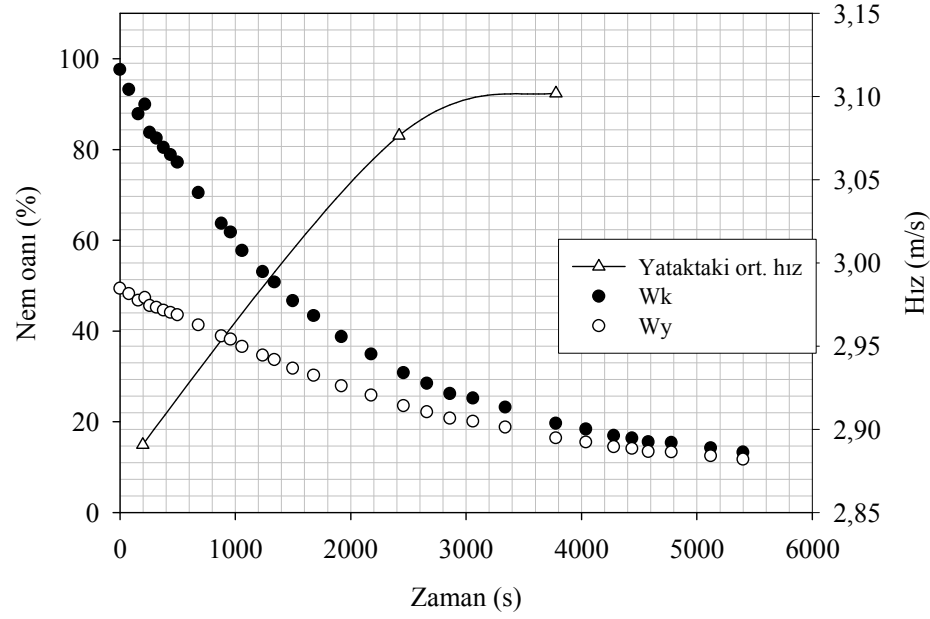
Şekil 7.15. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



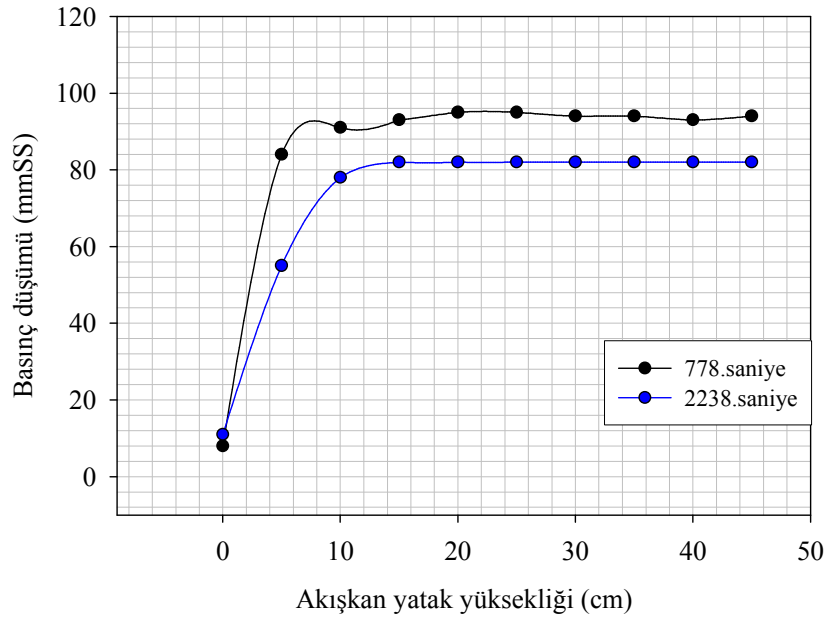
Şekil 7.16. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi.

7.1.5. Tam akışkanlaşmış yatakta yüksek hızla kurutma

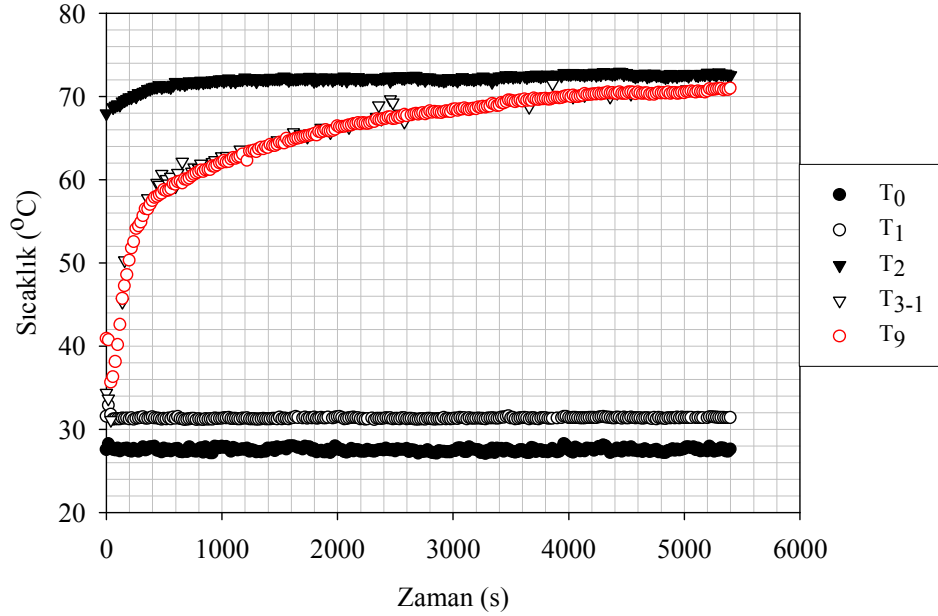
Şekil 7.17'de nemlendirilen 3 kg ham buğdayın tam akışkan yatakta yüksek hızla kuruma ve hız değerleri verilmiştir. Kuruma sırasında artan yataktaki hız, kurumanın sonuna doğru sabit bir değere gelmiştir. Akışkan yataktan tam akışkan yatağa geçiş döneminde, bir önceki hız değerinde görülen yatak içindeki basınç dalgalanmaları da, yerini, düzenli bir basınç düşüşüne bırakmıştır. 3 kg ham buğdayın nemlendirilmesiyle yapılan bu akışkan yatak deneylerinde kuruma grafikleri incelenirse, ürünlerin nem içeriklerinin, yaklaşık 5500 saniye civarında, tam akışkan yatakta yaş bazda % 11 ve sabit yatakta ise % 13 civarına geldiği görülmektedir. Bu durumda yataktaki hızın, kuruma üzerinde biraz etkili olduğunu, fakat tam akışkan yatakta geçen hava debisinin yüksek olmasından dolayı daha fazla miktardaki havanın ısıtılmak zorunda kalınmasından dolayı, tam akışkan yatağın sabit yaktan çok ekonomik olmadığı kolayca bulunabilir.



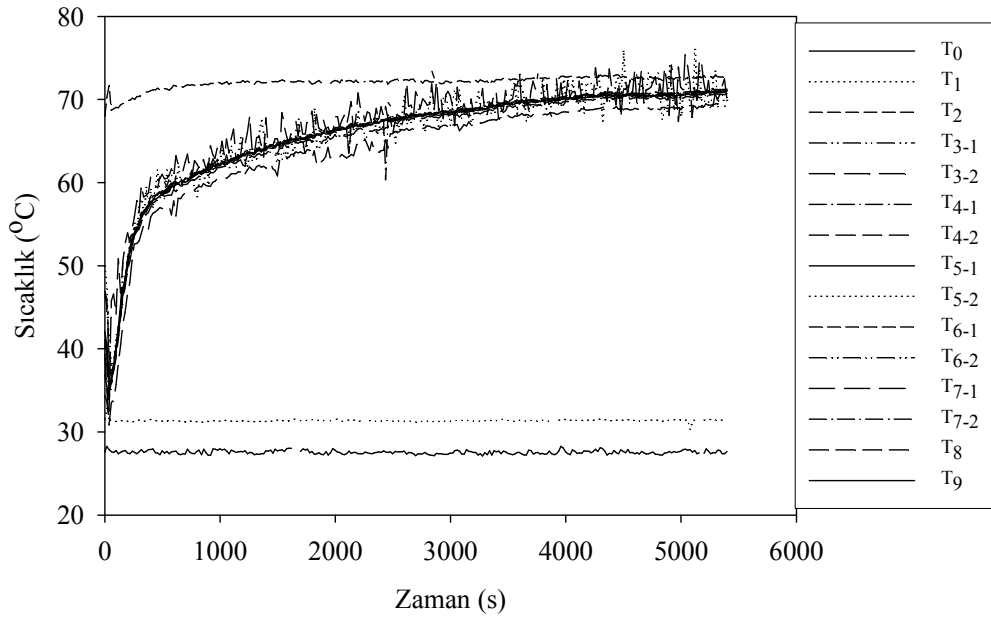
Şekil 7.17. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulması sırasındaki nem oranı ve hız değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 7.18. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



Şekil 7.19. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.

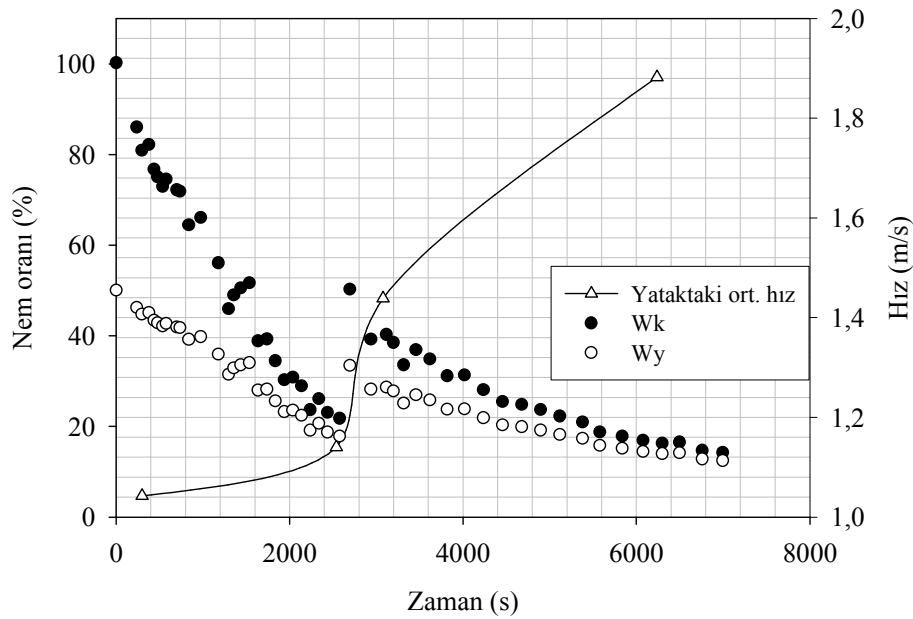


Şekil 7.20. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi.

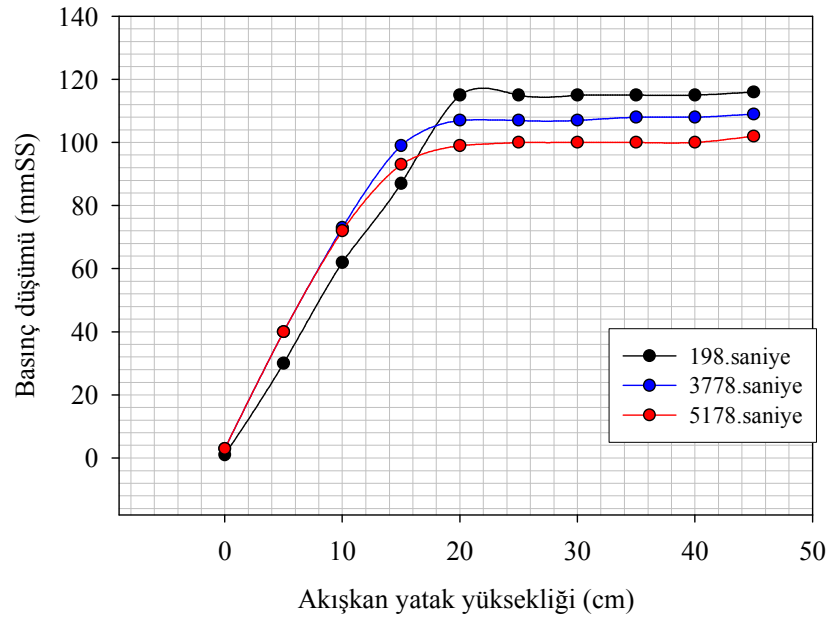
7.2. H=20 cm Sabit Yatak Yüksekliği

7.2.1. Sabit yatakta yüksek hızla kurutma

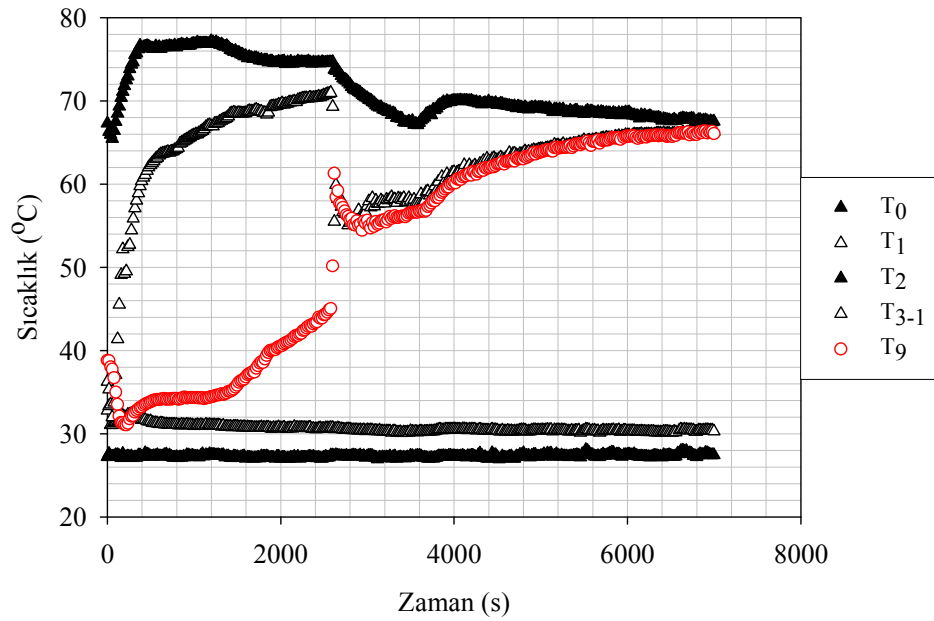
Şekil 7.21, nemlendirilmiş 6 kg ham buğdayın (H=20 cm, \approx 11 kg hedik), yaklaşık 70 °C’de, sabit yataktan akışkan yatağa geçiş durumundaki kuruma eğrisini ve hızlarını göstermektedir. Sıcaklık ve kuruma eğrilerinden yatağın yaklaşık 2600. saniyeye kadar sabit olduğu, buğdayın hızlı ama düzensiz bir kuruma göstermesinden ve akışkan yatağın üst kısmının sıcaklığının da alt kısmındakinden çok düşük olmasından görülmektedir. Bu anda akışkan yatağın alt kısmındaki sıcaklığın aniden azalmaya üst kısmındaki sıcaklığının da artmaya başladığı ve yatak içinde kurumayan üst kısım ile alt kısımdaki ürünlerin de karışmaya başlamasıyla nem içeriklerinin de hızla artmaya başladığı minimum akışkanlaşma noktasına ulaşılır. Grafikten yaş bazda ortalama % 35 nem içeriğindeki ürünlerin yaklaşık 1.3 m/s’de akışkanlaşmaya başladığı ve bu hızın, bir önceki yatak yüksekliğinde görülen en küçük akışkanlaşma hızıyla neredeyse aynı olduğu görülebilir. Akışkanlaşma olmadan hemen önce oluşan, yataktaki yükselme, uygun zamanda basınç ölçümü alınamadığından dolayı görülemediği.



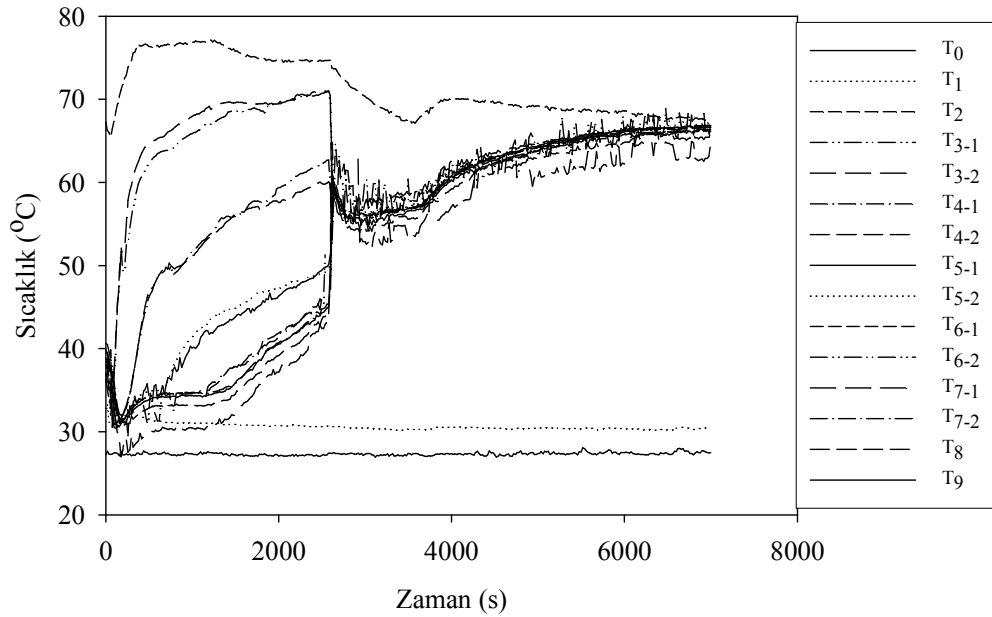
Şekil 7.21. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızla kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 7.22. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



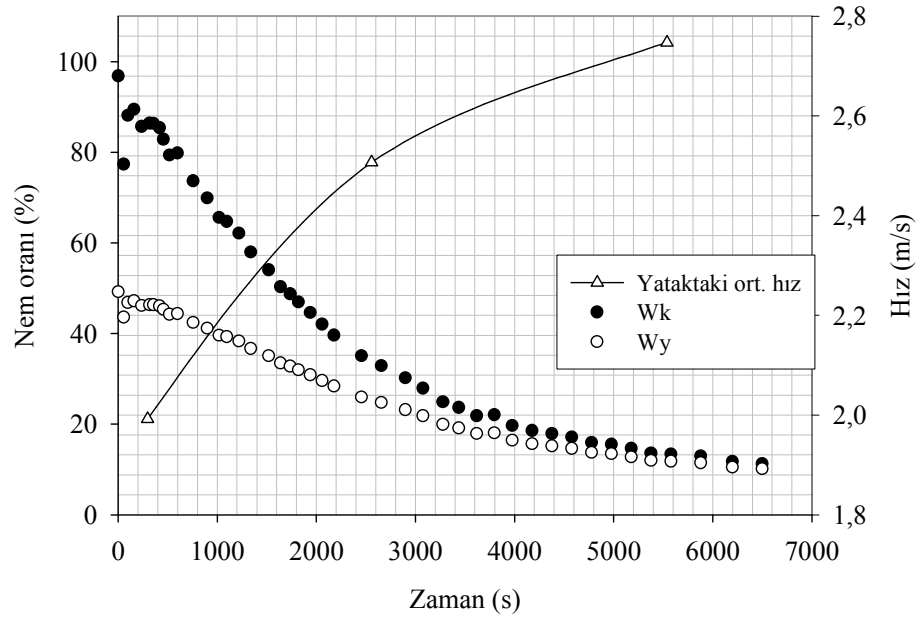
Şekil 7.23. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



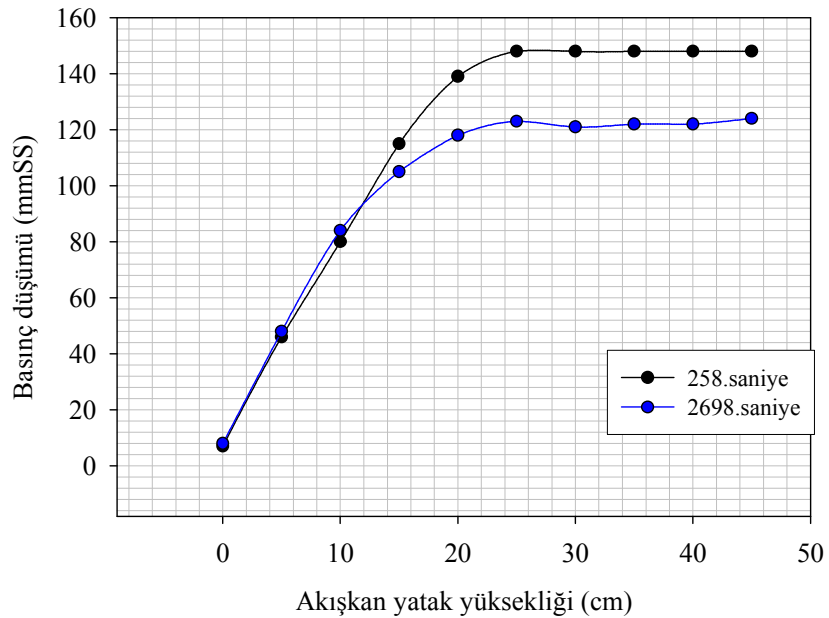
Şekil 7.24. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi.

7.2.2. Tam akışkanlaşmış yatakta orta hızla kurutma

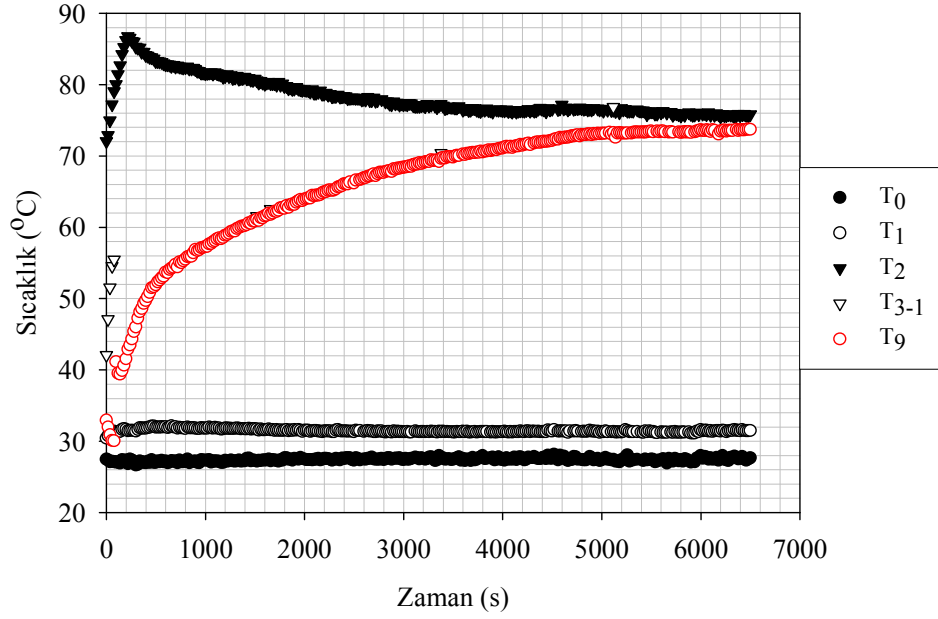
Şekil 7.25, nemlendirilmiş 6 kg ham buğdayın tam akışkan yatakta, orta hızla kuruma eğrisini ve hızlarını göstermektedir. Yatağın alt ve üst noktaları arasında hemen hemen hiç sıcaklık farkı yoktur. Basınç düşümü yatak yüksekliğine bağlı olarak yataktaki ilk 4 ölçüm noktasında yüksek, daha sonra sabittir. Kurumanın ilerlemesiyle yatak yüksekliğinin azalmasıyla dolaylı basınç düşümü azalırken, yatak yüksekliğinin üzerindeki basınç düşümünde aynı oranda azalmıştır ve sabittir. Yatak içindeki hız yine kurumaya bağlı olarak düzenli bir şekilde artmaktadır.



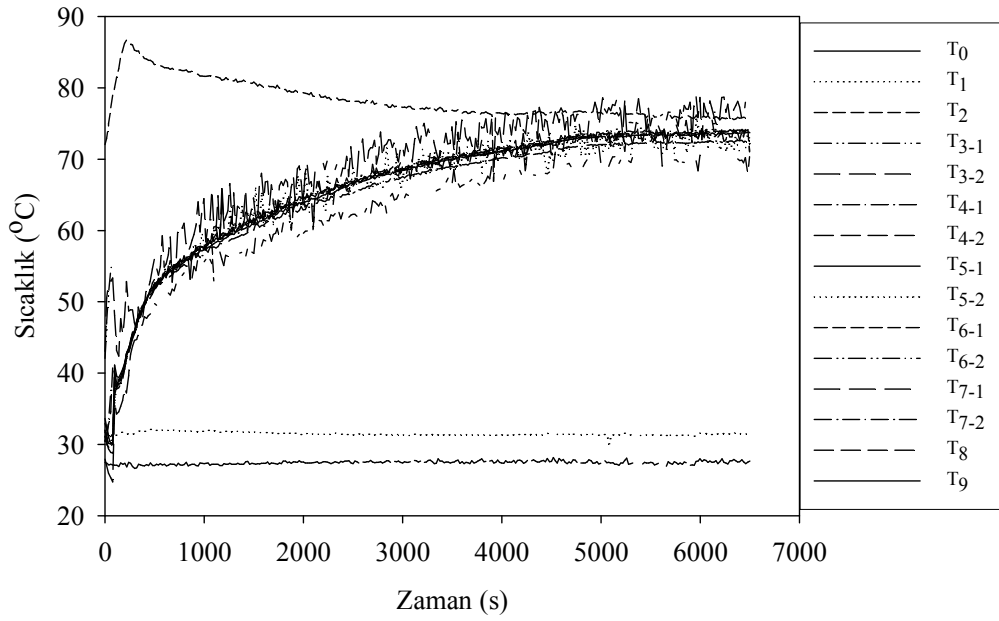
Şekil 7.25. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 7.26. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



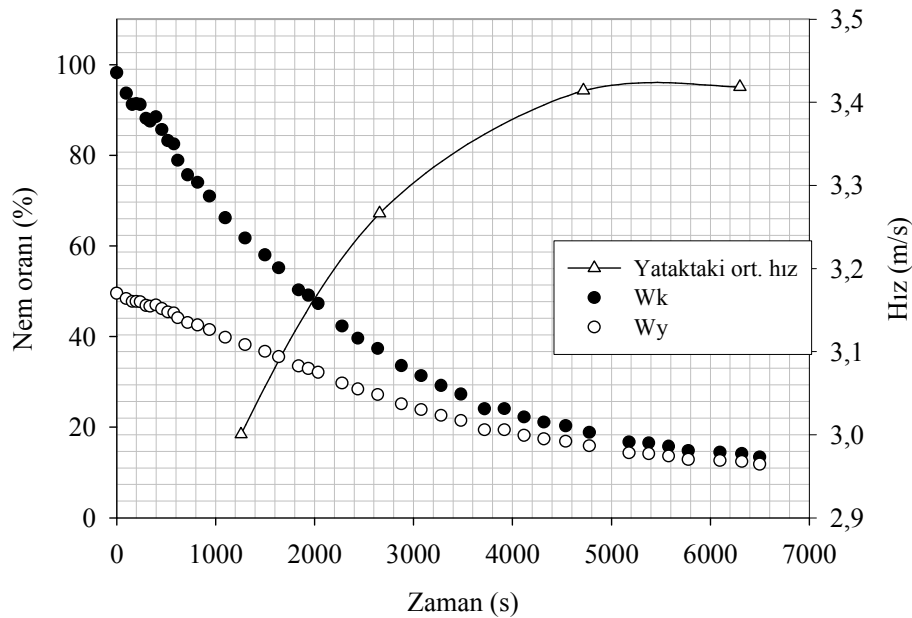
Şekil 7.27. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



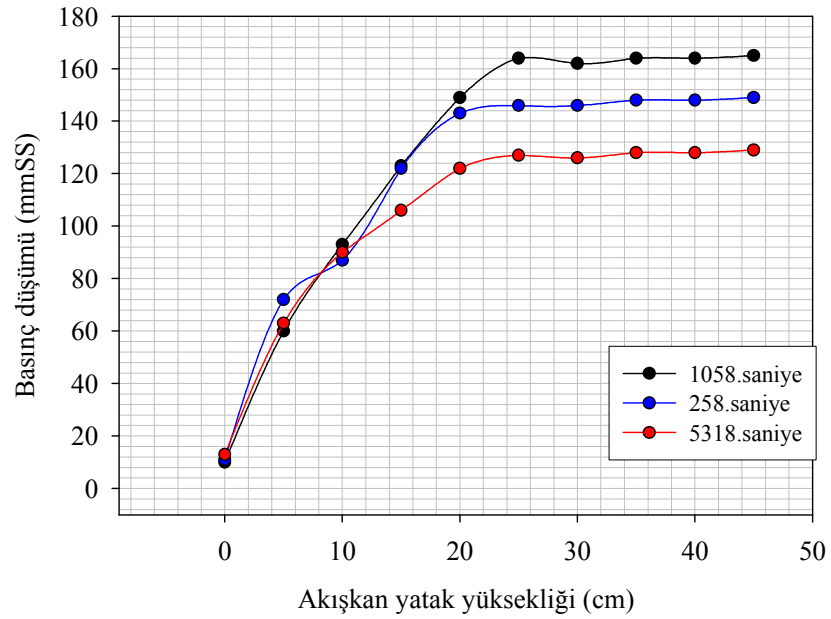
Şekil 7.28. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta orta hızda kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi.

7.2.3. Tam akışkanlaşmış yatakta yüksek hızla kurutma

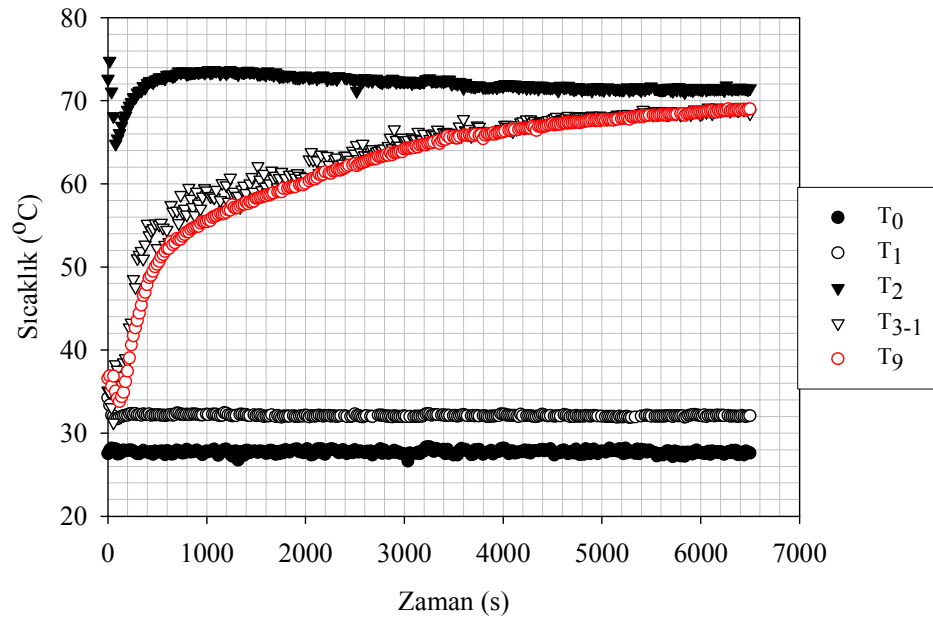
Şekil 7.29, 20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, akışkan yataktan tam akışkan yatağa geçişi esnasındaki kuruma ve hız değerlerini göstermektedir. Burada da yatağın akışkan olmasından dolayı yatak içindeki sıcaklıklar birbirine son derece yakın ve kuruma eğrisi düzenlidir. Akışkan yataktan tam akışkan yatağa geçişin olduğu kısımda yine yatağın kaynama hareketi olan üst bölümünde basınç değerlerinde düzensizlik olduğu basınç düşümü grafiğinden görülmektedir. Yatak içindeki hız, kurumanın başlangıcından sonuna doğru artmakta ve daha sonra sabit bir değere gelmektedir. 6 kg ham buğdayın nemlendirilmesinde tüm kuruma eğrileri incelenirse ürünlerin nem içeriğinin bozulmama sınırı olan % 11-12 değerine gelmesi 6500 ile 7000 saniye arasındadır. Bir önceki yatak yüksekliğine göre kurutma zamanı yaklaşık % 20 artmıştır.



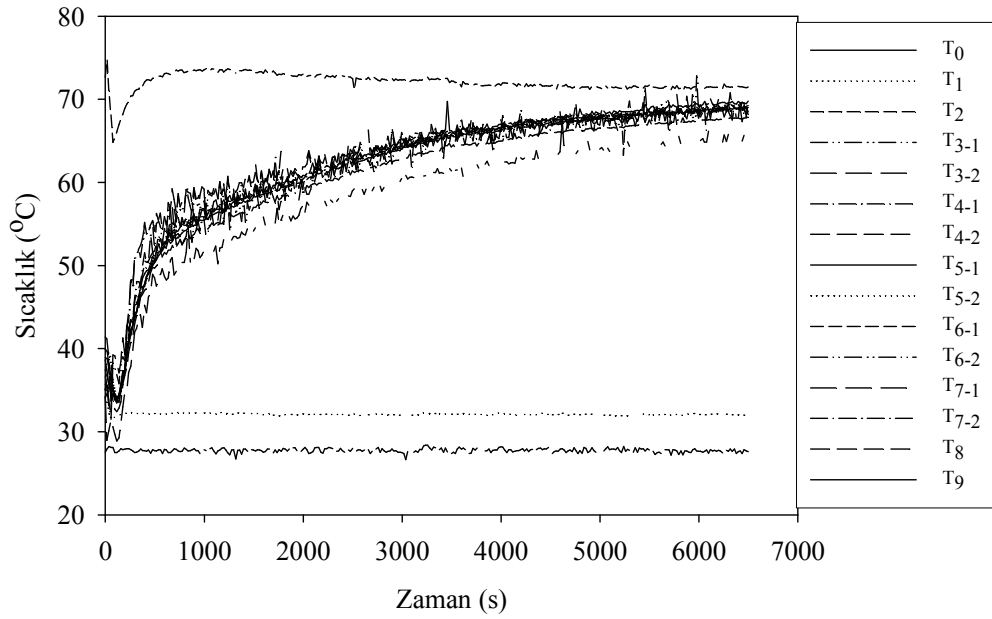
Şekil 7.29. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızla kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 7.30. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



Şekil 7.31. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.

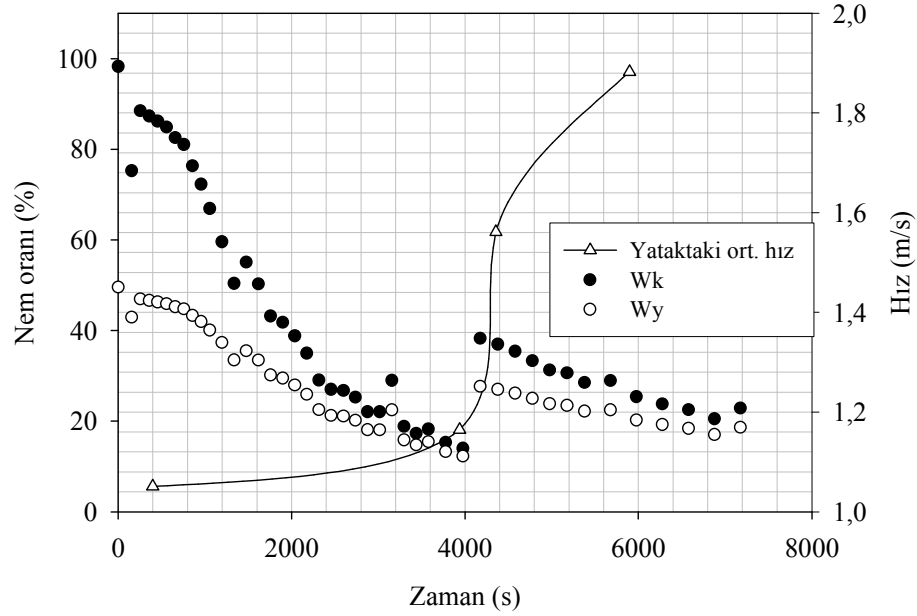


Şekil 7.32. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkan yatakta yüksek hızda kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi.

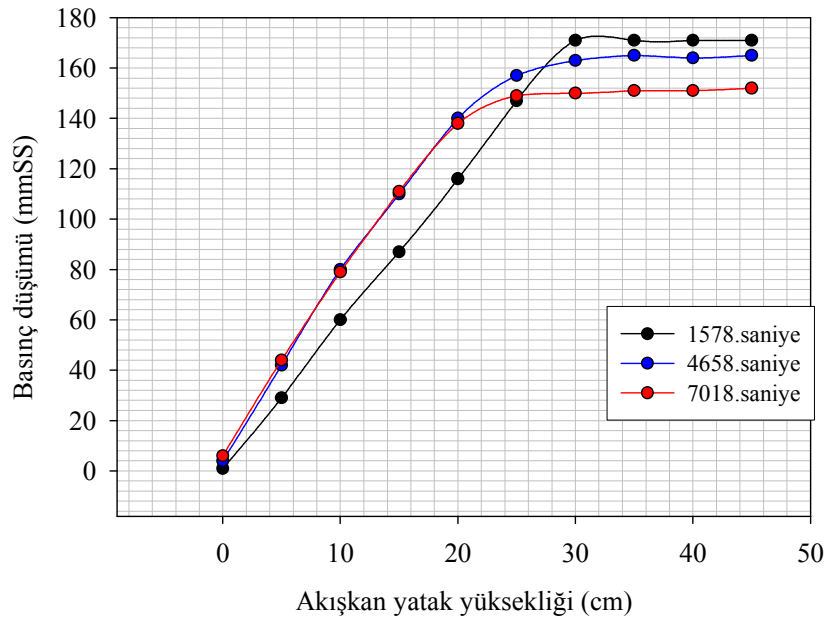
7.3. H=30 cm Sabit Yatak Yüksekliği

7.3.1. Sabit yatakta yüksek hızla kurutma

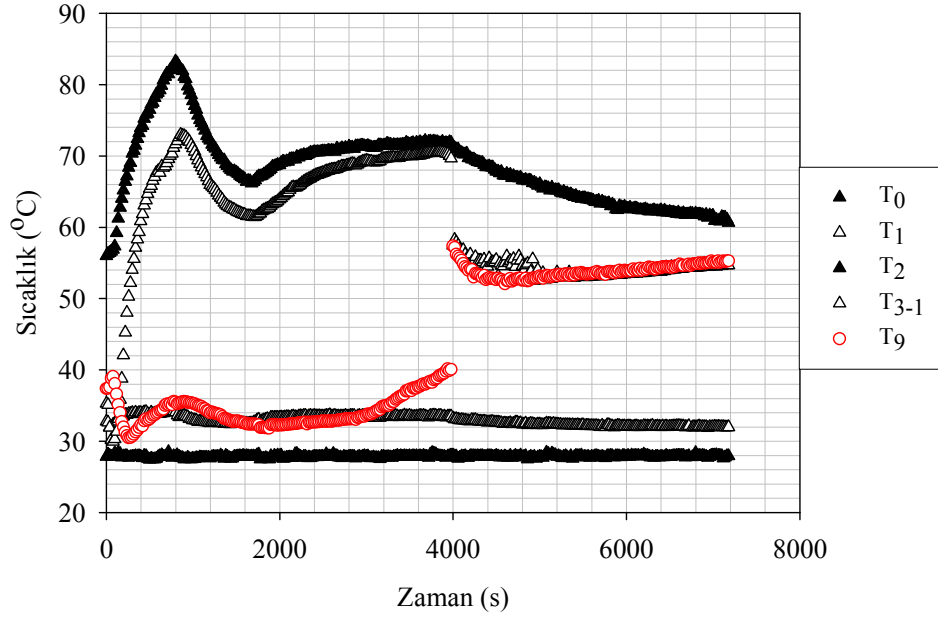
Şekil 7.33, nemlendirilmiş 9 kg ham buğdayın (H=30 cm, \approx 16.5 kg hedik), 70 °C'de, sabit yaktan akışkan yatağa geçiş durumundaki kuruma eğrisini ve hızlarını göstermektedir. Grafiklerden yatağın, yaklaşık 4000. saniyeye kadar sabit olduğunu, bu andan itibaren de akışkanlaştığı görülmektedir. Sabit yatak durumunda ürün+hava sıcaklıklarının yatağın en altı ile en üstü arasında çok değişken olduğu açıktır. Sabit yatak sırasında ürünlerdeki nem içeriğinin hızla düştüğü görülse de bu düşüş sadece en alt tabakadaki ürünler için geçerlidir. Akışkanlaşma ile beraber ürünlerin nem içeriğinin artması bunun göstergesidir. Akışkanlaşma anında yine yatağın altındaki sıcaklık aniden azalmakta ve yatak üstündeki sıcaklık ise aniden artarak yatak tek bir sıcaklığa gelmektedir. Grafikten yaş bazda ortalama % 30 nem içeriğindeki ürünlerin 1.25 m/s civarında akışkanlaşmaya başladıkları şekilden görülebilir.



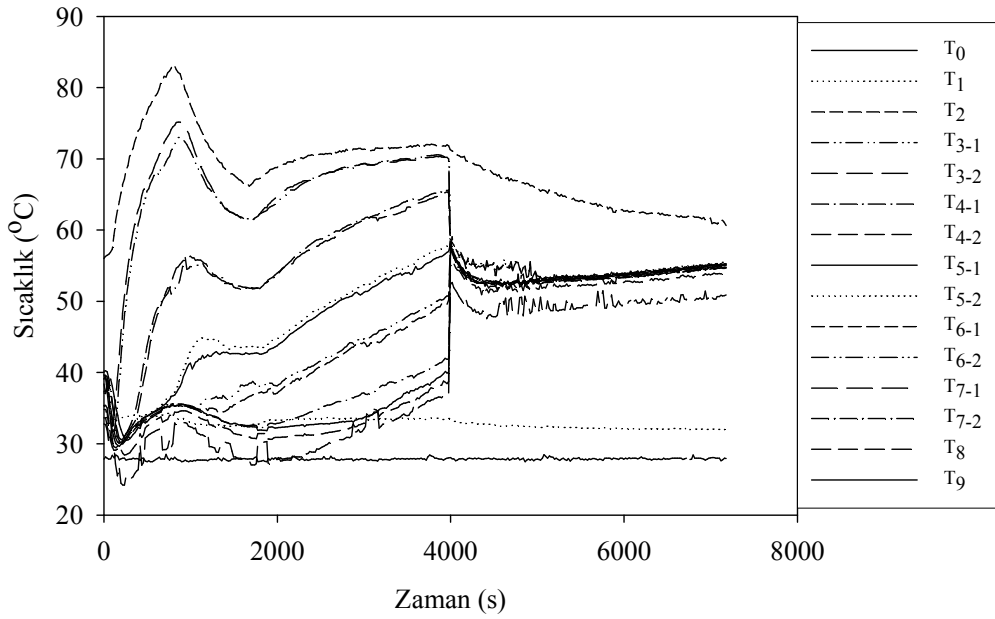
Şekil 7.33. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 7.34. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



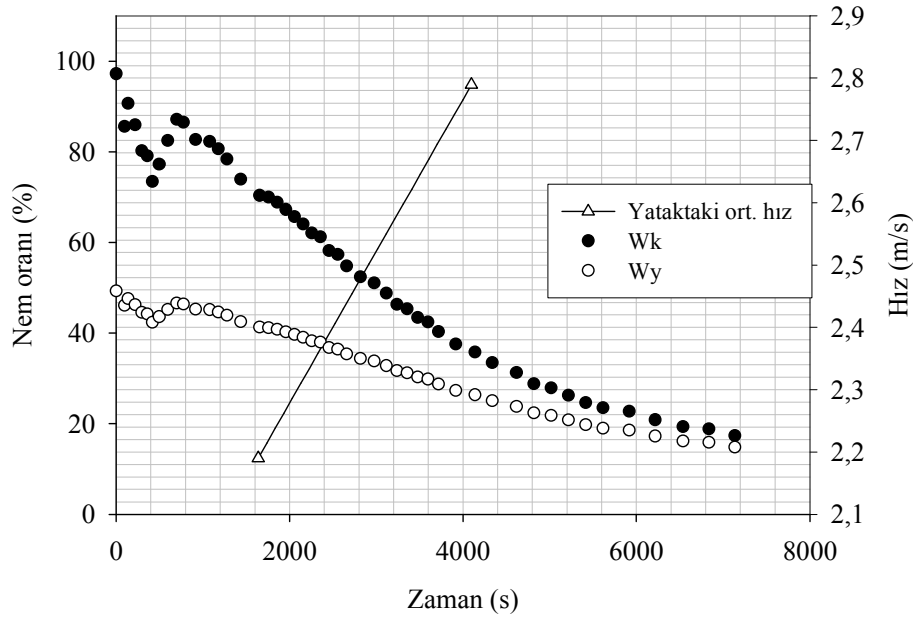
Şekil 7.35. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



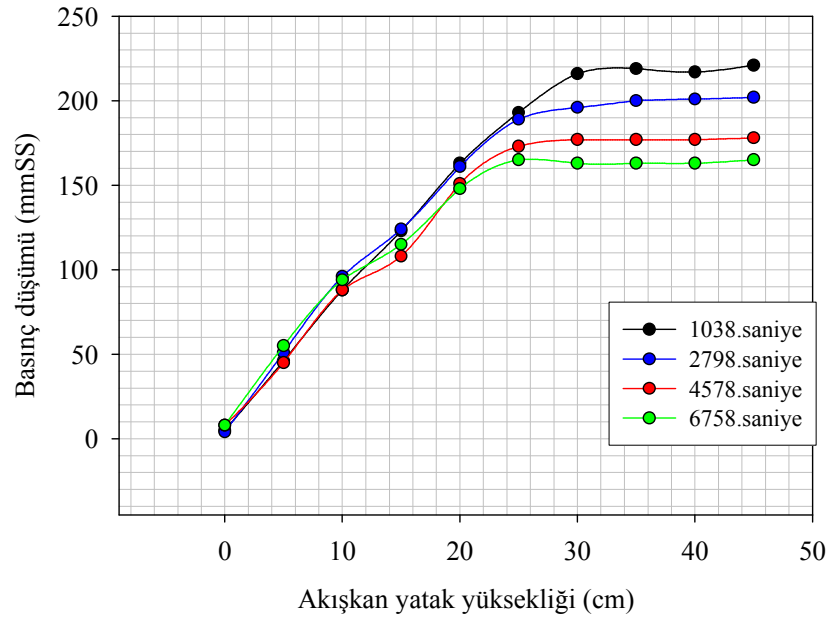
Şekil 7.36. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, sabit yatakta yüksek hızda kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi.

7.3.2. Minimum akışkanlaşma hızında kurutma

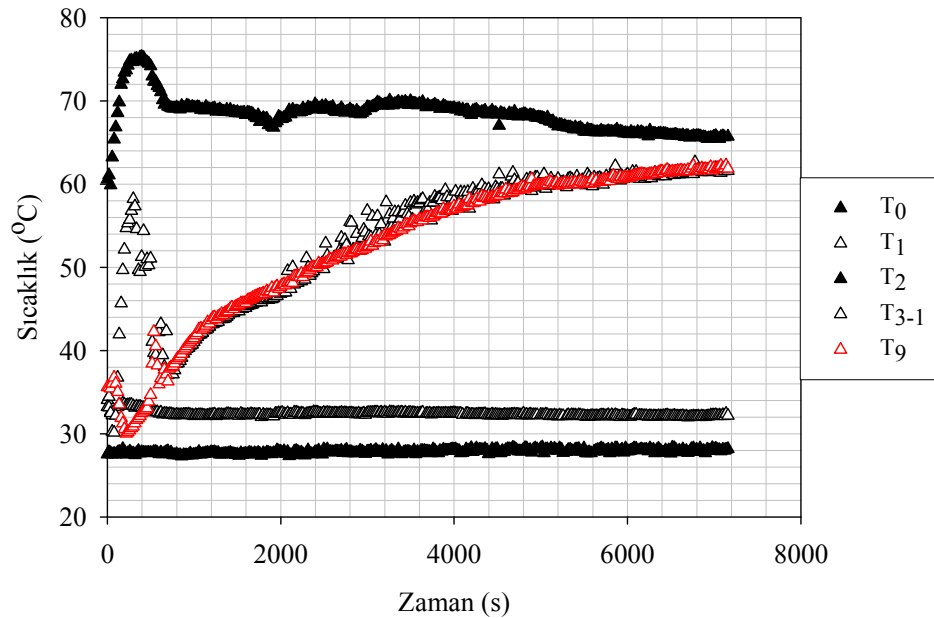
Şekil 7.37, nemlendirilmiş 9 kg ham buğdayın akışkan yataktaki kuruma eğrisini ve hızlarını göstermektedir. Yatak, kurutmanın ilk saniyelerinde sabittir ve daha sonra akışkanlaşmıştır. Kurutma başlangıcında ulaşılan ve 70 °C olan kurutma sıcaklığı, akışkanlaşma sonrası aniden düşmüş ve kurutulacak üründe fazla olması sebebiyle ürün sıcaklığı çok geç bir zamanda akışkan yatak giriş sıcaklığına yaklaşmıştır. Akışkan yatakta kurutma sırasında yataktaki kurumaya bağlı olarak hız, düzenli bir şekilde artmıştır. Kurumanın ilk safhalarında yatak yüksekliğine kadar artan basınç düşümü, kurumayla beraber yatak ağırlığının ve dolayısıyla yatak yüksekliğinin azalmasıyla kurumanın sonlarına doğru daha düşük bir değere gelmiştir.



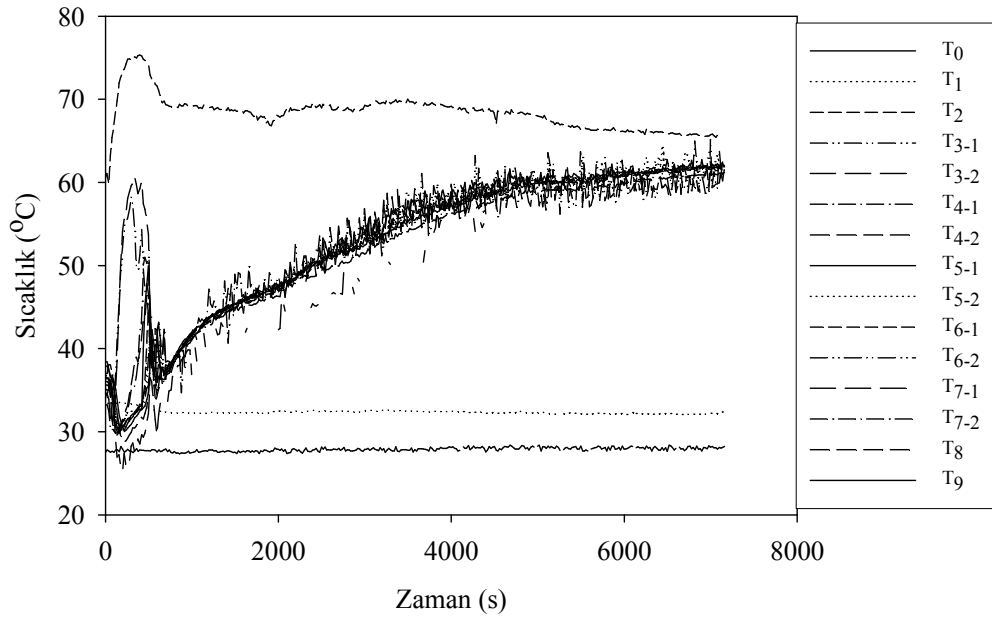
Şekil 7.37. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 7.38. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



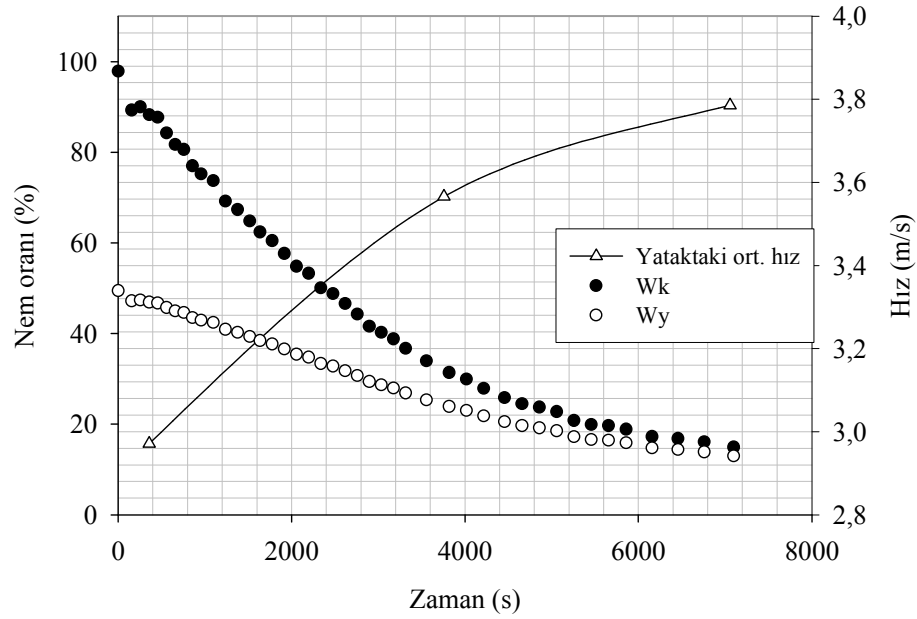
Şekil 7.39. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



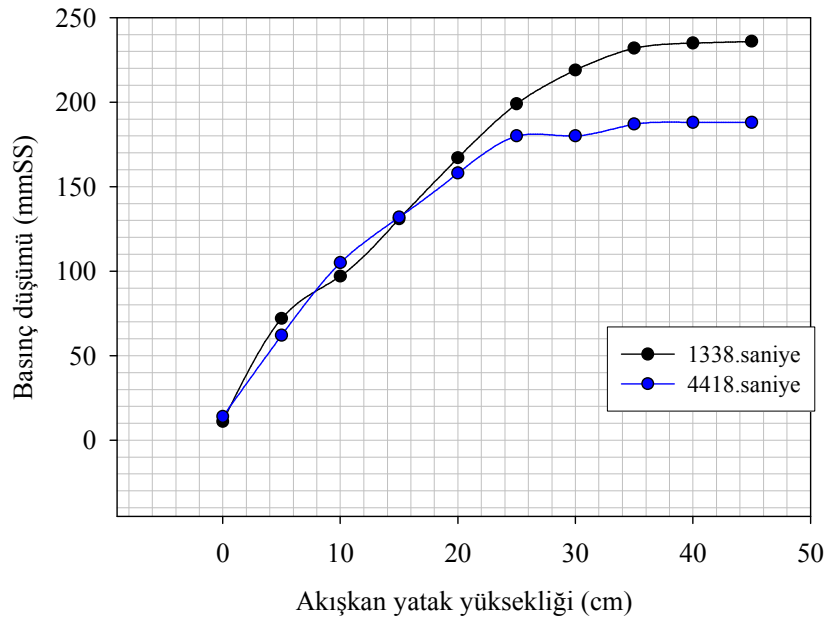
Şekil 7.40. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, minimum akışkanlaşma hızında kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi.

7.3.3. Tam akışkanlaşmış yatakta orta hızla kurutma

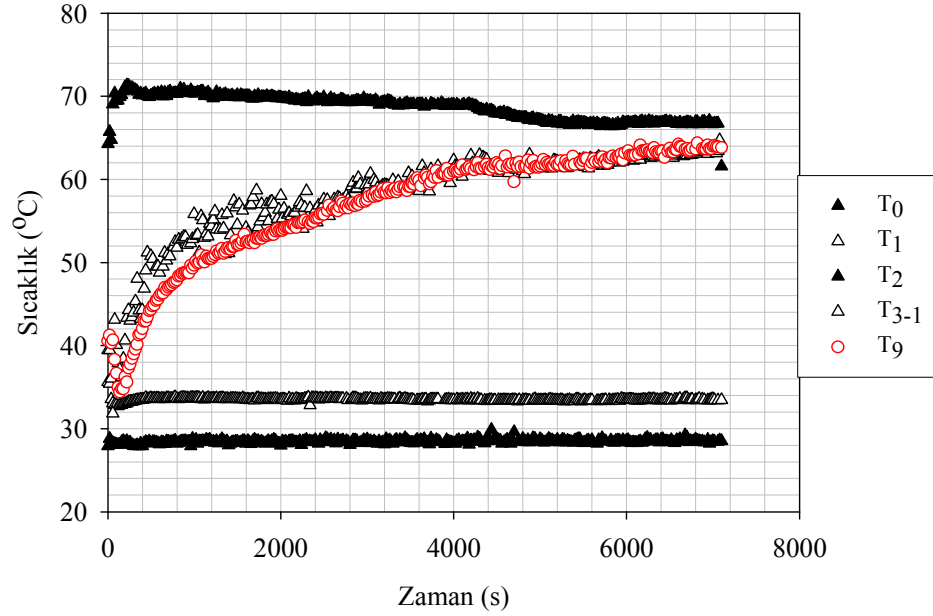
Şekil 7.41, nemlendirilen 9 kg ham buğdayın akışkan yataktan tam akışkan yatağa geçişi esnasındaki kuruma ve hız değerlerini göstermektedir. Yatağın akışkan fakat ürünün çok olmasından dolayı kurutmanın ortalarına kadar yatağın alt kısmı ile üst kısmı arasında sıcaklık farkı görülmektedir. 9 kg için 3 farklı yatakta yaklaşık 7000'er saniye sürdürülen kurutma deneylerinde elde edilen kuruma eğrileri incelenirse, sabit yataktan hareketli yatağa geçiş deneyinin sonunda ürünün nem içeriğinin, ürünün uzun süre sabit yatakta kurumaya maruz kalmasından dolayı, bozulmama seviyesine bile yaklaşmadığı, akışkan yatakta ise sıcaklığın tam akışkan yatağa geçiş deneyindeki sıcaklıktan daha düşük olmasının da olumsuz etkisiyle % 14 nem içeriğine gelebildiği fakat tam akışkan yatağa geçiş deneyinde 7000 saniyede sadece % 13 değerine düşebildiği görülmektedir.



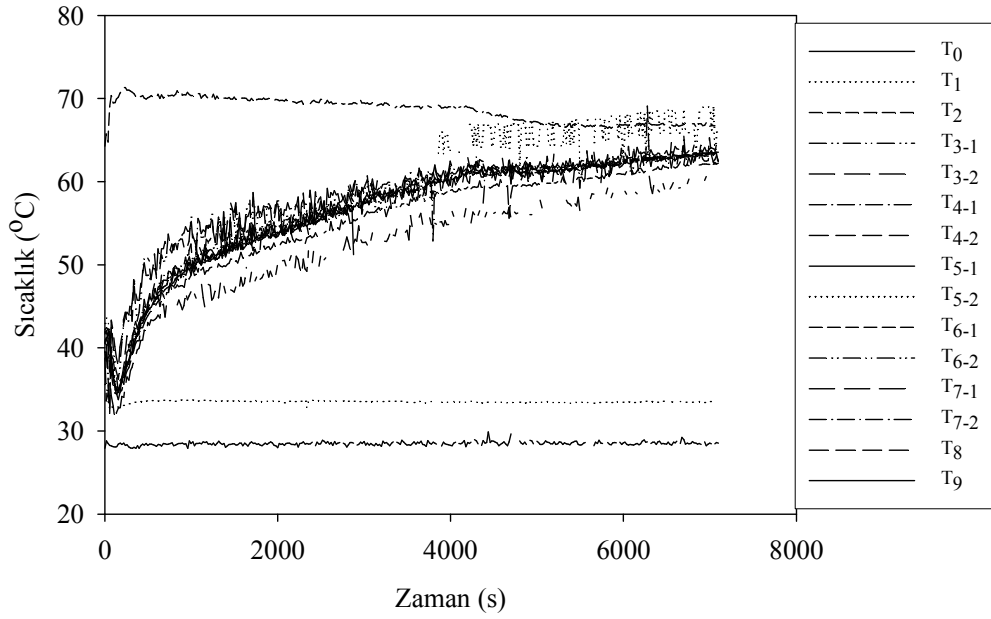
Şekil 7.41. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkanlaşmış yatakta orta hızda kurutulurken nem oranı ve hız değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 7.42. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkanlaşmış yatakta orta hızda kurutulurken akışkan yatak boyunca basınç düşümü.



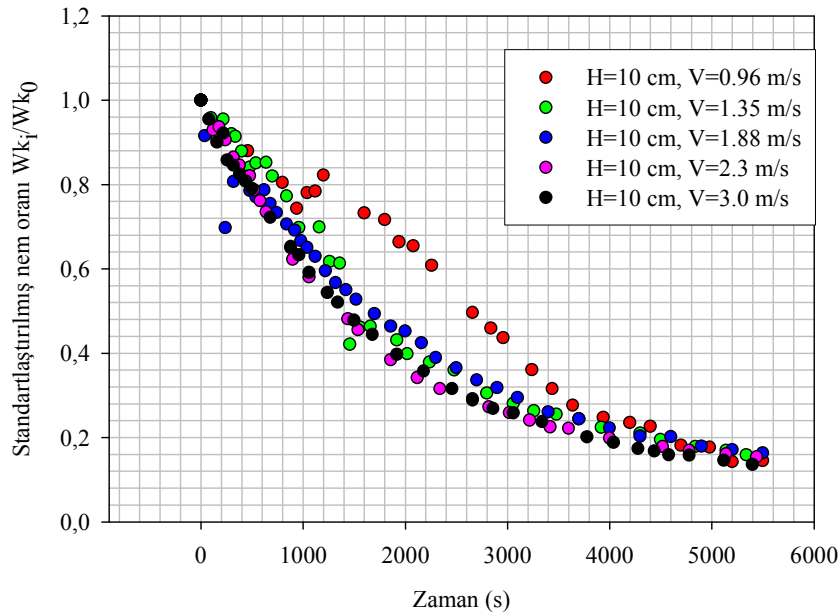
Şekil 7.43. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkanlaşmış yatakta orta hızda kurutulurken, fan girişi, fan çıkışı, ısıtıcı çıkışı ve akışkan yatağın h=5. cm ve h=35. cm'deki sıcaklıklarının zamanla değişimi.



Şekil 7.44. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, tam akışkanlaşmış yatakta orta hızda kurutulması esnasında tüm sıcaklıklarının zamana göre değişimi.

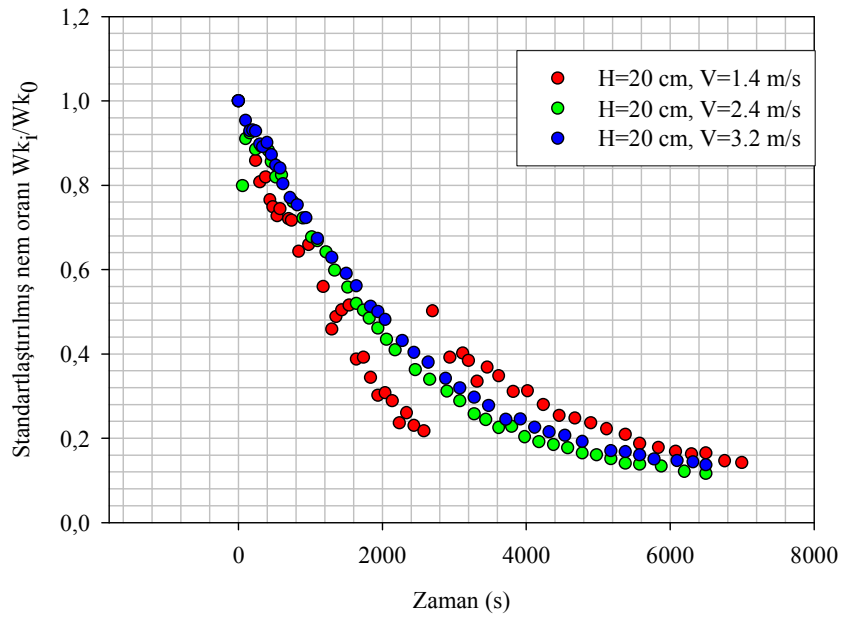
7.4. Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 7.45, 10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda yapılan kurutma deneylerinde elde edilen kuruma eğrilerini göstermektedir. Akışkanlaşma hızından daha düşük hızlarda yapılan deneylerde, kurumanın, akışkanlaşmanın başlamasına kadar düzensiz ve uzun süreli olduğu, akışkanlaşma anından itibaren ise yatak içindeki taneciklerin karışmaya başlamasıyla, yatak içinde düzenli bir nem dağılımının olduğu görülmektedir. Sabit yataktan akışkan yatağa geçiş esnasındaki kuruma değerleri ile minimum akışkanlaşma hızında elde edilen kuruma değerlerinin birbirine çok yakın olması, yatak yüksekliğinin düşük olmasından dolayı, yatakta akışkanlaşma olmasa dahi, tanecikler arasından geçen havanın yeteri kadar nemi tanelerden uzaklaştırabildiği olarak yorumlanabilir. Minimum akışkanlaşma hızından daha yüksek hızlarda, kuruma hızı artmasına rağmen, bu artış, sabit yatak ile minimum akışkanlaşma hızı arasındaki kuruma hızı arasındaki artıştan daha yüksek değildir. Bu da teorik kısımda da belirtilen, akışkanlaşma hızının 1.5 katına kadar ısı ve kütle geçiş katsayılarının hızla arttığı ve daha sonra artışını azalan bir şekilde devam ettirdiği görüşü ile örtüşür.



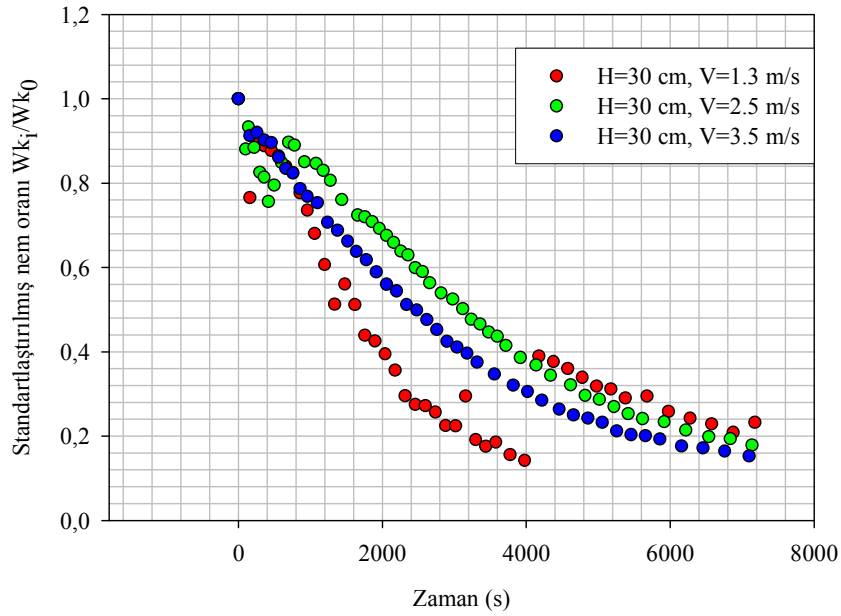
Şekil 7.45. H=10 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda kurutulması esnasında kuruma eğrileri.

Şekil 7.46, 20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda yapılan kurutma deneylerinde elde edilen kuruma eğrilerini göstermektedir. Burada da sabit yatakta kuruma döneminde kuruma düzensiz ve uzun sürelidir. Akışkanlaşmanın başlamasıyla birlikte yataktaki nem dağılımı düzenli bir hale gelmiştir. Sabit yataktan akışkan yatağa geçiş esnasındaki kuruma eğrisi ile minimum akışkanlaşma hızında elde edilen kuruma eğrisi, 10 cm yatak yüksekliği için elde edilen eğriler kadar birbirine yakın değildir. Bu da yatak yüksekliğinin etkisinden dolayıdır. Yatak yüksekliğindeki artış, minimum akışkanlaşma hızından düşük hızlarda yapılan kurutma deneyleri için kuruma hızını düşürmüştür. Minimum akışkanlaşma hızından daha yüksek hızlardaki ise kuruma hızı yatak yüksekliği ile doğru orantılı olarak artmıştır.



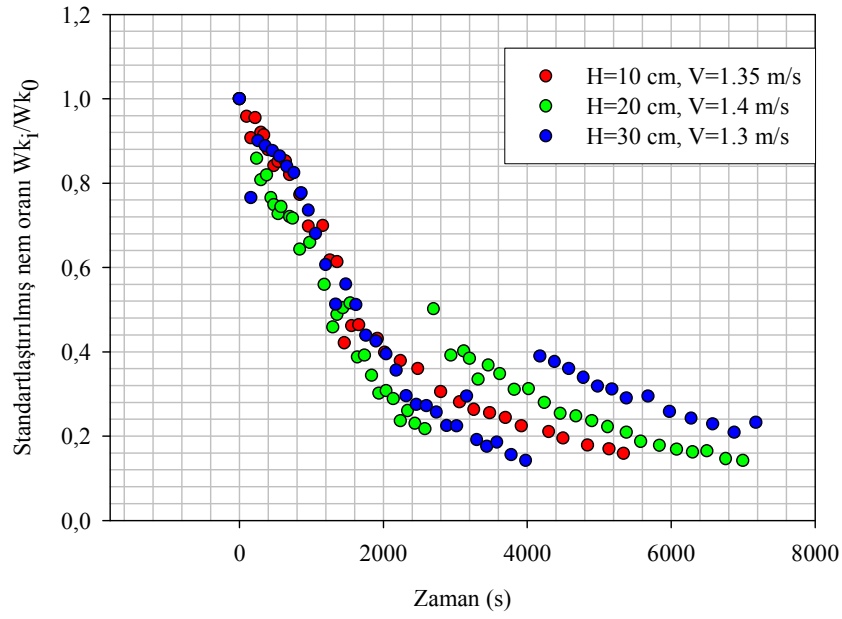
Şekil 7.46. H=20 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda kurutulması esnasında kuruma eğrileri.

Şekil 7.47, 30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda yapılan kurutma deneylerinde elde edilen kuruma eğrilerini göstermektedir. Yatak yüksekliği arttıkça, kuruma hızı da, düşük yatak yüksekliklerine göre daha fazla arttığı bu deneyle de kanıtlanmıştır.

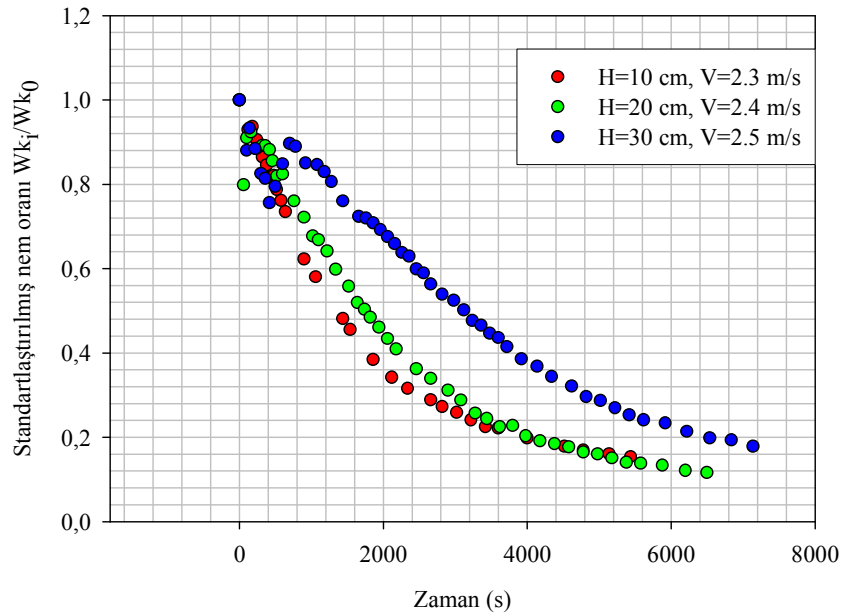


Şekil 7.47. H=30 cm yatak yüksekliğindeki hediklerin, farklı hızlarda kurutulması esnasında kuruma eğrileri.

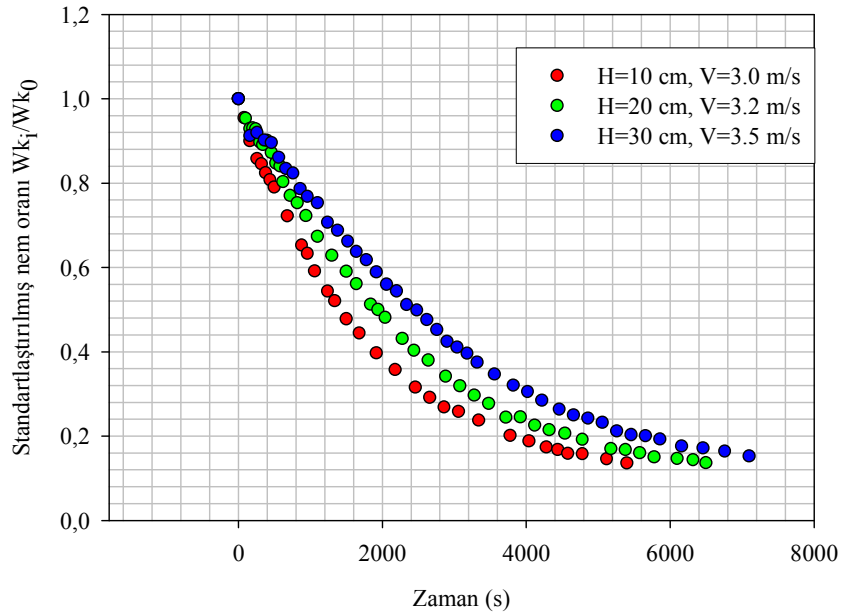
Şekil 7.48, 7.49 ve 7.50 farklı yatak yüksekliklerindeki hediklerin birbirlerine yakın hızlarda kurutulmaları sırasındaki kuruma eğrilerini göstermektedir. Yatak sabitken kuruma hızları eşit gibi görünse de, akışkanlaşmanın başlamasından sonra yatak içindeki gerçek nem oranı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla yatak yüksekliğinin kuruma üzerindeki etkisini kurumanın son kısımlarında elde edilen verileri kullanarak değerlendirebiliriz. Farklı hızlardaki kuruma eğrilerine bakarsak, düşük hızların, düşük yatak yüksekliklerinde daha hızlı kurutma yaptığını, yatak yüksekliği arttıkça kuruma süresinin çok daha fazla arttığını görebiliriz. Bunun da, yatak içindeki karışım hızından kaynaklandığı düşünülebilir. Karışım miktarı arttıkça kurutma hızı artmakta ve kurutma süresi kısalmaktadır. Bunu özellikle şekil 7.48 ve 7.50'de daha açık bir şekilde görebiliriz. Düşük hızlarda farklı yatak yüksekliklerinin kurutulması sırasında, kuruma eğrileri birbirine uzak iken, yüksek kurutma hızında bu eğriler birbirine yaklaşmıştır.



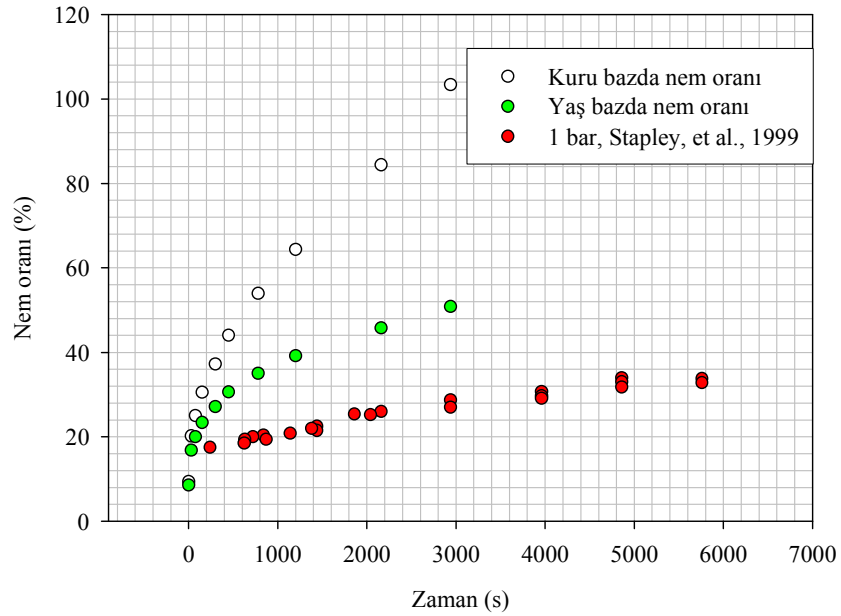
Şekil 7.48. Farklı yatak yüksekliklerindeki hediklerin, $V \approx 1.35$ m/s hızda kurutulması esnasında kuruma eğrileri.



Şekil 7.49. Farklı yatak yüksekliklerindeki hediklerin, $V \approx 2.4$ m/s hızda kurutulması esnasında kuruma eğrileri.

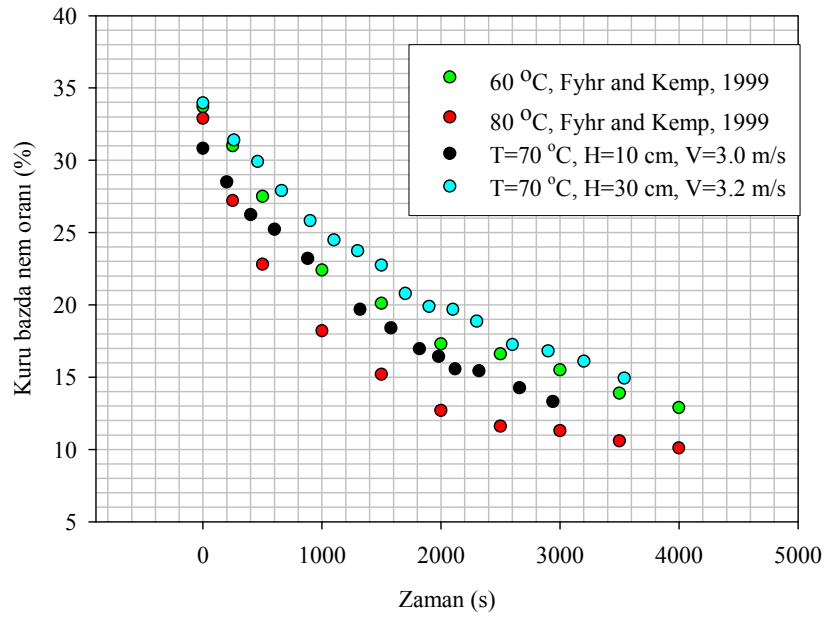


Şekil 7.50. Farklı yatak yüksekliklerindeki hediklerin, $V \approx 3.2$ m/s hızda kurutulması esnasında kuruma eğrileri.



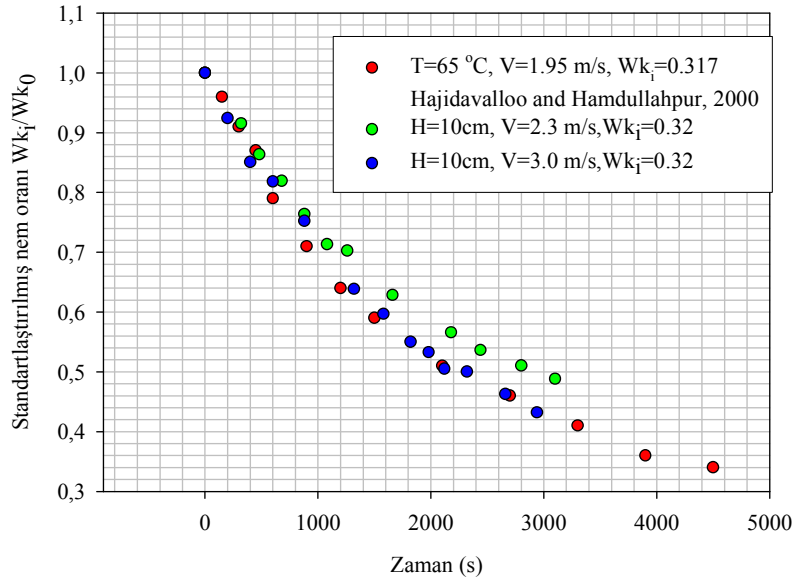
Şekil 7.51. Buğdayın kaynatılarak ve Stapley et. al. tarafından buhar verilerek nemlendirilmesi sırasında nem oranının değişimi.

Şekil 7.51’de, buğdayları kaynatırken oluşturduğumuz kuru ve yaş bazda nem alma eğrisi ile Stapley et. al. tarafından buğdaylara buhar verilerek nemlendirilmesi sırasındaki nem alma eğrisi, yaş bazda gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi buğdayın kaynatılması esnasında nem alması, buhar tutularak nem almasından son derece hızlıdır.

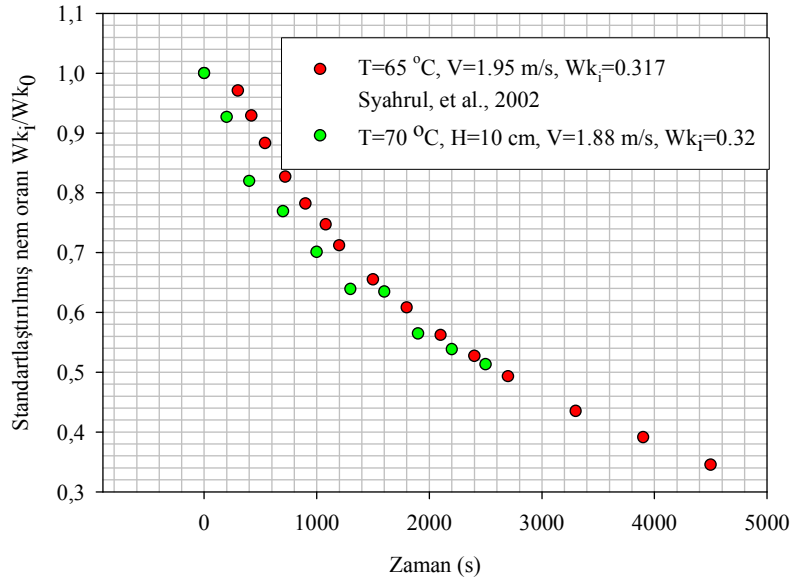


Şekil 7.52. Buğdayın 60 ve 80 °C’lerde Fyhr ve Kemp tarafından kurutulması ile kuru bazda \approx % 32 nem içeren hediklerin, farklı yatak yüksekliklerinde, $V \approx 3.1$ m/s’de ve 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması.

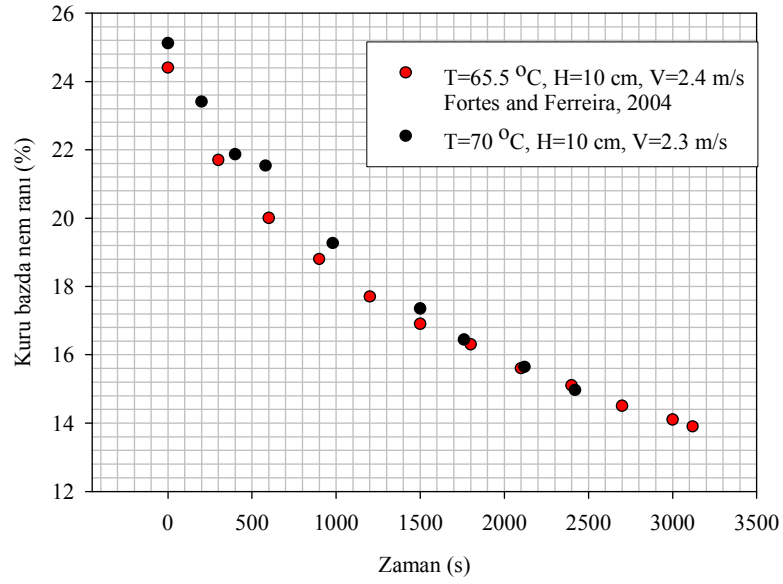
Şekil 7.52’den şekil 7.57’ye kadar olan şekillerde, farklı yatak yüksekliklerinde, kurutma sıcaklık, ilk nem içeriği ve hızlarında kurutulan buğdayların bizim deneylerimizde kuruttuğumuz hediklerin yaklaşık değerleriyle kıyaslamaları verilmiştir. Grafikler incelenirse verilerimizin diğer verilere son derece yakın olduğu, pişmiş buğday ile nemlendirilmiş buğdayın kurumasının hemen hemen birbirine yakın olduğu görülmektedir.



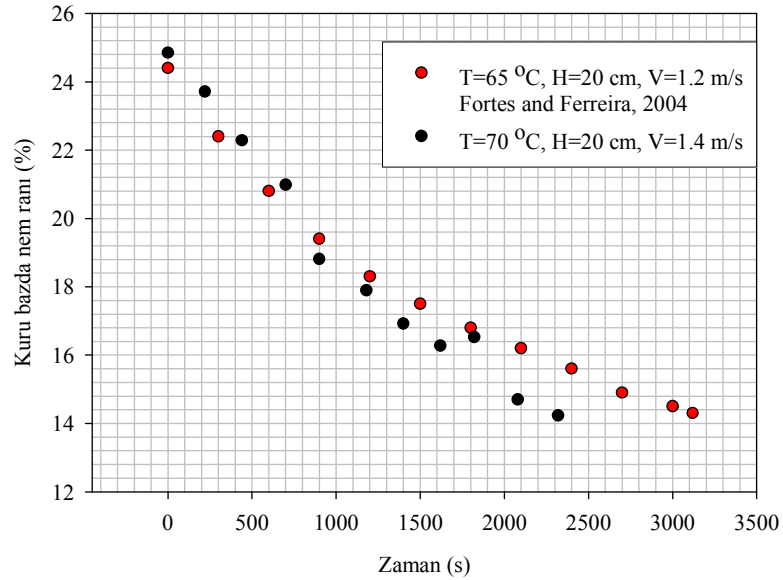
Şekil 7.53. Buğdayın 65 °C’de, 1.95 m/s’de Hajidavalloo ve Hamdullahpur tarafından kurutulması ile kuru bazda \approx % 32 nem içeren hediklerin, farklı hızlarda, 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması.



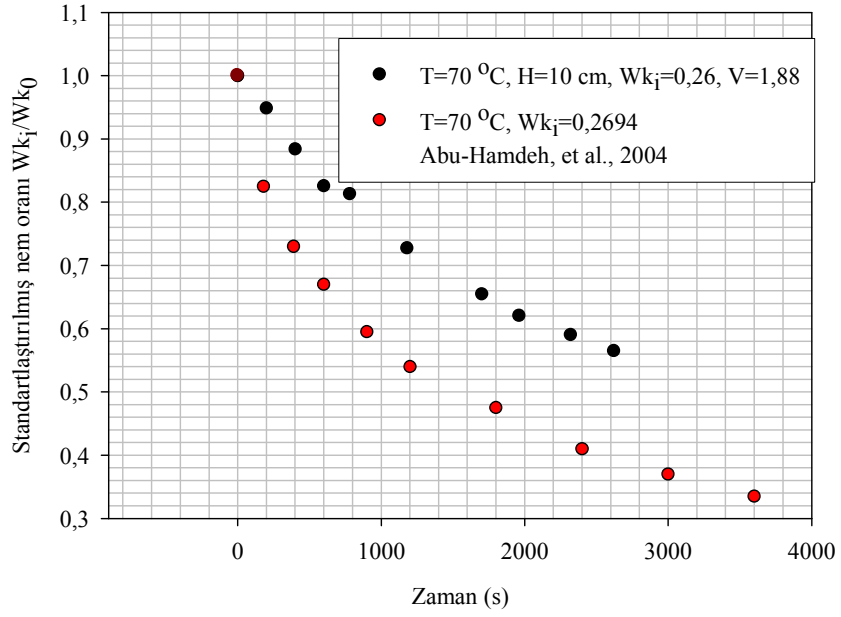
Şekil 7.54. Buğdayın 65 °C’de, 1.95 m/s’de Syahrul, et al., tarafından kurutulması ile kuru bazda \approx % 32 nem içeren hediklerin, $V \approx 3.1$ m/s’de, 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması.



Şekil 7.55. H=10 cm yatak yüksekliğindeki buğdayların 65.5 °C’de, 2.4 m/s’de Fortes ve Ferreira tarafından kurutulması ile \approx % 25 nem içeren hediklerin, aynı yatak yüksekliğinde, 2.3 m/s’de, 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması.



Şekil 7.56. H=20 cm yatak yüksekliğindeki buğdayların 65 °C’de, 1.2 m/s’de Fortes ve Ferreira tarafından kurutulması ile \approx % 25 nem içeren hediklerin, aynı yatak yüksekliğinde, 1.4 m/s’de, 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması.



Şekil 7.57. Buğdayların 70 °C’de Abu-Hamdeh, et al., tarafından kurutulması ile \approx % 26 nem içeren hediklerin, 10 cm yatak yüksekliğinde, 2.3 m/s’de, 70 °C’de kurutulmasının karşılaştırılması.

8. SON DEĞERLENDİRME

Yaptığımız çalışmada, buğdayın bazı fiziksel özellikleri, pişmiş buğdayın (hedik) akışkan yatakta farklı hız ve yatak yüksekliklerinde kurutulması esnasında kuruma davranışları incelenmiştir.

Bundan sonraki aşamalarda bulgur üretimi için pişirilen buğdayların farklı hız, sıcaklık ve yatak yüksekliklerinde kurutulması sırasında enerji analizleri yapılarak, birim kütle ürün başına en az enerji ile yapılabilecek en uygun kurutma şartları belirlenmelidir.

Yine akışkan yatakta farklı kurutma şartlarında üretilen bulgurların, gıda mühendisleri ve üreticilerle yapılacak ortak çalışmalarla kalite ve besin değerleri açısından değerlendirilerek en kaliteli bulgur için en uygun kurutma şartları belirlenmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abu-Hamdeh, N. H. and Othman, A. M., 2004, An experimental study and mathematical simulation of wheat drying, *Drying Technology*, Vol. 22. No. 3, 491-506.
- Aregba, A. W., Sebastian, P. and Nadeau, J. P., 2006, Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model, *Journal Of Food Engineering*, 77, 27-40.
- Aregba, A. W. and Nadeau, J.-P., 2007, Comparison of two non-equilibrium models for static grain deep-bed drying by numerical simulations, *Journal Of Food Engineering*, 78, 1174-1187.
- Bayram. M., 2005, Determination of the sphericity of granular food materials, *Journal Of Food Engineering*, 68, 385-390.
- Efremov. G. and Kudra T., 2004, Calculation of the effective diffusion coefficients by applying a quasi-stationary equation for drying kinetics, *Drying Technology*, Vol. 22. No. 10, 2273-2279.
- Fortes, M., 2004, Second-law modeling of deep bed drying processes with a simulation study of wheat air-recirculated fluidized-bed drying, *Proceedings Of the 14th International Drying Symposium*, Vol. A, 18-32.
- Fortes, M. and Ferreira, W. R., 2004, Second law analysis of drying: modeling and simulation of fluidized bed grain drying, *Proceedings Of the 14th International Drying Symposium*, Vol. A, 301-308.
- Fyhr, C. and Kemp, I. C., 1999, Mathematical modelling of batch and continuous well-mixed fluidised bed dryers, *Chemical Engineering and Processing*, 38, 11-18.
- Gaston, A. L., Abalone, R. M. and Giner, S. A., 2002, Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements, *Journal Of Food Engineering*, 52, 313-322.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Gaston, A., Abalone, R. M., Giner, S. A. and Bruce, D. M., 2003, Geometry effect on water diffusivity estimation in printa-isla verde and broom wheat cultivars, *Latin America Applied Research*, 33, 327-337.
- Gaston, A., Abalone, R. M., Giner, S. A. and Bruce, D. M., 2004, Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat, *Biosystem Engineering*, 88(2), 175-185.
- Giner, S. A. and Mascheroni, R. H., 2001, Diffusive drying kinetics in wheat, part 1: Potential for a simplified analytical solution, *Journal Of Agricultural Engineering Research*, 8 (4), 351-364.
- Giner, S. A. and Mascheroni, R. H., 2001, Diffusive drying kinetics in wheat, part 2: Applying the simplified analytical solution to experimental data, *Biosystem Engineering*, 81 (1), 85-97.
- Hajidavallo, E. and Hamdullahpur, F., 2000, Thermal analysis of a fluidized bed drying process for crops. Part II: Experimental results and model verification, *International Journal Of Energy Research*, 24, 809-820.
- Mohapatra, D. and Rao., 2005, A thin layer drying model of parboiled wheat, *Journal Of Food Engineering*, 66, 513-518.
- Mujumdar, A. S., 1995, *Handbook of industrial drying*, Vol. 1. Chapter 7, Marcel Dekker Inc., 742 p.
- Ni, C-C. and San J-Y., 2000, Mass diffusion in a spherical microporous particle with thermal effect and gas-side mass transfer resistance, *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 43, 2129-2139.
- Nishiyama, Y., Cao, W. and Li, B., 2006, Grain intermittent drying characteristics analyzed by a simplified model, *Journal Of Food Engineering*, 76, 272-279.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Özbey. M. ve Söylemez. M. S., 2005, Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains, *Energy Conversion And Management*, 46, 1495-1512.
- Özkaya, B. 2004, Ekmeğin fitik asit miktarına çeşit ve ekstraksiyonun etkisi, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Raporu.
- Stapley, A. G. F., Landman, K. A., Please, C. P. and Fryer, P. J., 1999, Modelling the steaming of whole wheat grains, *Chemical Engineering Science*, 54, 965-975.
- Syahrul, S., Hamdullahpur, F. and Dincer, I., 2002, Energy analysis in fluidized-bed drying of large wet particles, *International Journal Of Energy Research*, 26, 507-525.
- Syahrul, S., Hamdullahpur, F. and Dincer, I., 2002, Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles, *Exergy, An International Journal*, 2, 87-98.
- Syahrul, S., Dincer, I. and Hamdullahpur, F., 2003, Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles, *International Journal Of Thermal Sciences*, 42, 691-701.
- Tavman, S., Tavman, I. H. ve Evcin. S, 1997, Measurement of thermal diffusivity of granular food materials, *International Communications In Heat And Mass Transfer*, Vol. 24, No. 7, 945-953.
- Tavman, S. ve Tavman, I. H., 1998, Measurement of effective thermal conductivity of wheat as a function of moisture content, *International Communications In Heat And Mass Transfer*, Vol. 25, No. 5, 733-741.
- Valentas, K. J., Rotstein, E. and Singh, R. P., 1997, *Handbook of food engineering practise*, Chapter 4, CRC Press, 736p.
- Wu, B., Yang, W. and Jia, C., 2004, A three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a single rice kernel during the drying process, *Biosystem Engineering*, 87(2), 191-200.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Ziegler, Th. and Richter, I.-G., 2000, Analysing deep-bed drying based on enthalpy–water content diagrams for air and grain, Computers and Electronics in Agriculture, 26, 105-122.

Ümran ERÇETİN



Doğum Tarihi : 25/07/1973
 Doğum Yeri : KÜTAHYA
 Medeni Hali : Bekar
 Askerlik Durumu : Tecilli
 Yabancı Dili : İngilizce

ADRES

İŞ : Osmangazi Üni. Müh. Mim. Fak. Makine Bölümü
 Batımeşelik/ESKİŞEHİR
 EV : Börekçiler Mh. Poyraz Sk. No:7/C K:2
 KÜTAHYA

Telefon

İŞ : 0-222-239 37 50 (3136)
 EV : 0-274-212 02 61
 GSM : 0-533-356 69 43

Öğrenim Durumu

2001-2007 : Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora)
 1998-2000 : Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans)
 1993-1997 : Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü
 1990-1992 : Anadolu Üniversitesi Bilecik M. Y. O. Elektronik Bölümü
 1987-1990 : Kütahya Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümü
 1984-1987 : Abdurrahmanpaşa İlköğretim Okulu
 1979-1984 : 30 Ağustos İlkokulu

İş Durumu

2002-2007 : Osmangazi Üni. Müh. Mim. Fak. Makine Bölümü Arş. Grv.
 1997-2002 : D. P. Ü. Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü Arş. Grv.
 1997-1997 : EÜAŞ Seyitömer Termik Sant. Değirmen Bkm. Srv. Mühendisi
 1997-1997 : EÜAŞ Seyitömer Termik Santralı (II. Grup Stajı)
 1995-1996 : Kütahya Şeker Fabrikası (I. Grup Stajı)
 1988-1990 : EÜAŞ Seyitömer Termik Santralı Ölçü Kontrol Servisi

Çalıştığı Projeler

2005-2007 : Tanecikli malzemelerin akışkan yatakta kurutulması esnasında ısı ve kütle transferinin incelenmesi
 2000-2002 : Bir Porselen Fabrikasında Kullanılan Fırınlardan Isı Optimizasyonu
 1996-1997 : Steril Ortamların İklimlendirilmesi ve Laminer Akış
 1996-1997 : 2 Daireli 5 Katlı 12 Blokluk Bir Sitenin Isıtma Tesisatı

Çalıştığı Araştırma Projeleri

- 2004 -2005 : Doğalgaz yakma sistemlerinde azotoksit emisyonlarının kontrolü
- 2000-2002 : Kütahya Kızılbayır mevkinde rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi, Elektrik Enerjisi Üretimine Uygulanabilirliği
- 1998-2001 : Kütahya'nın hava kirliliğinin azaltılması çalışmaları ve önerileri

Nitelikler

İnsan ilişkilerinde başarılı, hoşgörülü, takım liderliğine sahip, tüm windows ve ofis uygulamaları bilen, yazılım, donanım, AutoCad, Fluent bilgisine sahip.

İlgi alanları

Elektronik, bilgisayar, hidrolik ve pnömatik, otomobil, seyahat, trekking.