

**T.C.  
HİTİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TUĞLA KURUTMA KİNETİĞİNİN DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ**

**Osman Bedrettin KARATAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ**

**AĞUSTOS 2018**

**ÇORUM**



**T.C.  
HİTİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TUĞLA KURUTMA KİNETİĞİNİN DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ**

**Osman Bedrettin KARATAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ**

**AĞUSTOS 2018**

**ÇORUM**

Osman Bedrettin KARATAŞ tarafından hazırlanan ‘‘Tuğla Kurutma Kinetiğinin Deneysel Olarak İncelenmesi’’ adlı tez çalışması 26/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniğersitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ (Başkan) .....

Doç. Dr. Sinan ÇALIŐKAN .....

Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY .....

Hitit Üniğersitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ..... tarih ve ..... sayılı kararı ile Osman Bedrettin Karataş’ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Doç. Dr. Cengiz BAYKASOğLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BEYANI**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Osman Bedrettin KARATAŞ



# TUĞLA KURUTMA KİNETİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Osman Bedrettin KARATAŞ

HİTİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Ağustos 2018

## ÖZET

Mühendislik uygulamalarında akışkanların, ısının ve kütlenin transferi önemli bir yere sahiptir. Kütle transferi için itici kuvvet konsantrasyon farkı olup özellikle suni kurutma tekniğine dayalı uygulamalarda nem kontrolü etkin proses ve kurutucu tasarımı bakımından önemlidir.

Günümüzde özellikle gıdaların kurutulması prosesi oldukça güncel çalışma konusu olup artan bir ilgi ile sürdürülmektedir. Kurutma prosesi ürünlerin kullanım kalitelerinin ve raf ömürlerinin artırılması bakımından önemlidir. Buna karşın kurutma prosesleri enerji sarfiyatı bakımından oldukça maliyetli olabilmektedir. Bunun dışında endüstriyel ürünlerin kurutulmasında kurutma prosesi ve kurutucu seçimi özel bir bilgi ve yetenek gerektirmektedir.

Toprak sanayi insanlık tarihi kadar eskidir. İlk çağlardan günümüze kadar toprak ve toprak ürünleri insanlığın temel kaynağını oluşturmaktadır. Günümüzde toprak ürünlerinden tuğla ve kiremit hala geniş ve etkin bir kullanım alanına sahiptir.

Çorum sanayinin önemli bir bölümünü Tuğla-Kiremit üreticileri oluşturmaktadır. Toprak yapısı ve toprak kaynakları bakımından Çorum ülkemizde Tuğla-Kiremit üretim potansiyeli olarak ilk sıralarda yer almaktadır. Tuğla üreticilerinin büyük bir bölümü doğal kurutma yöntemlerini tercih etmektedir. Bu durum ürün sarfiyatını ve

kalitesini önemli oranda etkilemektedir. Bu bakımdan tuğla üretiminde kurutma süreci üretim maliyeti, üretim süresi ve ürün kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bu çalışmada, Çorum bölgesindeki tuğlanın kuruma davranışını incelemek için kabin tip kurutucu tasarlanarak imal edilmiş ve kurutucu hava hızı, hava sıcaklığı, kabin basıncı ve tuğla yönü gibi farklı bağımsız parametrelerin kuruma kinetiği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kurutucu hava sıcaklığının 62, 76 ve 90°C değerlerinde, kabin içerisinde Reynolds sayısının yaklaşık 21000-34000 aralığında ve tuğla açısının 0, 45 ve 90 derece değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Hem basma hem de çekme şartlarında aynı deneyler tekrarlanmıştır. Böylece vakum basıncının da kuruma kinetiği üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Kütledeki değişim 15 dakika aralıklarla ölçülerek kaydedilmiştir. Hem basma hem de çekme durumu için nem içeriğini sağlayan bir matematiksel formül geliştirilmiştir.

Deneyler sonucunda, hava sıcaklığının ve hızının yükselmesi ile birlikte kuruma hızının arttığı ve kuruma süresinin azaldığı görülmüştür. Çekme durumunda kurutma süresini basma durumuna göre daha kısa ve tuğlanın akışa paralel (0) yerleştirilmesi durumunda kütle transferi daha hızlı gerçekleştiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** kabin tipi kurutma, tuğla kurutma, kütle transferi

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BRICK DRYING KINETICS

Osman Bedrettin KARATAŞ

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2018

## ABSTRACT

For engineering applications, the transfer of fluids, heat, and mass has an important place. The driving force for mass transfer is the concentration difference. Especially in applications based on artificial drying technique, moisture control is important in terms of effective process and dryer design.

Today, especially the process of drying foods is a very contemporary issue and continues with an increased interest. The drying process is important for increasing the quality and shelf life of the products. However, drying processes can be costly in terms of energy consumption. Apart from that, drying process and dryer selection for industrial products requires special knowledge and ability.

Soil industry is as old as human history. From the early ages to the day-to-day, soil and soil products constitute the main source of mankind. Nowadays, bricks and tiles from soil products still have a wide and effective usage area.

An important part of the Çorum industry is the brick-tile producers. In terms of soil structure and soil resources, Çorum is in the first place in our country in terms of the potential of brick-tile production. Most of the brick manufacturers in Çorum prefer natural drying methods. This situation negatively affects product consumption and quality. In this respect, the drying process in brick production has an important effect on the production cost, production time and product quality.



In this study, a cabin type dryer was designed to investigate the behavior of brick drying in Çorum region and the effect of different independent parameters such as dryer air speed, air temperature, cabin pressure and brick direction on drying kinetics was investigated. Experiments were carried out at the values of 62, 76 and 90°C of the drying air temperature, about 21000-34000 of the Reynolds number in the test section, and 0, 45 and 90 degrees of the brick angle. The same tests were repeated under both blowing and sucking conditions. Thus, the influence of the vacuum pressure on the dryness has been determined. Measurements of mass change were recorded at 15-minute intervals. A mathematical relationship has been developed that provides the moisture content for both the blowing and sucking conditions.

As a result of the experiments, it was observed that the rate of drying increased and the period of drying decreased with the increase of air temperature and speed. It was determined that the drying time is shorter than the blowing time in case of sucking and mass transfer is faster when the brick is placed parallel (0 deg.) to the flow.

**Keywords:** cabin type dryer, brick drying, mass transfer

## TEŞEKKÜR

Ülkemizin saygın üniversitelerinden Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı yüksek lisans programına başladığım günden beri bana mühendisliği öğreten ve sevdiren, mühendis gibi düşünme yeteneğini kazanmama yardımcı olan ve bu yüksek lisans tezi ile okulumdan mezun olurken danışmanlığını yapan, derslerimde ve tezimde desteğini esirgemeyen, her daim yardımcı olan başta değerli hocam Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ olmak üzere; bütün değerli hocalarıma ve asistanlarına; aynı havayı teneffüs ettiğim öğrenci arkadaşlarıma, okulumuzun idari personeline saygılarımı sunar, çalışmalarında başarılar dilerim.

Yüksek lisans tez çalışmamda değerli vakitlerini benim için ayıran, bana yardımcı olan Öğr. Gör. Mehmet ŞENER'e, Arş. Gör. Sertaç Samed SEYİTOĞLU'na ve Mak. Müh. Selçuk KIZILCAOĞLU'na da yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezimde deneylerimi yapmam için gerekli olan tuğlaların teminini sağladığım Ayvaz Tuğla ve Selin Tuğla'ya da teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük emeği olan, maddi ve manevi her türlü desteği ile arkamda olan başta annem ve babam olmak üzere tüm aile fertlerime teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Saygılarımla

Osman Bedrettin KARATAŞ

**Bu tez çalışmasına, MUH19005.14.002 numaralı 19005-Üniversite Sektör İşbirliği Projesi kapsamında vermiş oldukları destekten dolayı, Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.**

**İÇİNDEKİLER****Sayfa**

ÖZET .....	vi
ABSTRACT.....	viii
TEŞEKKÜR.....	x
İÇİNDEKİLER .....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
RESİMLER DİZİNİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ .....	1
2. KURUTMA İŞLEMİ .....	3
3. KURUTUCULARIN SINIFLANDIRILMASI .....	5
3.1. Konveksiyon Tipi Kurutucular .....	9
3.1.1. Kurutma odaları .....	9
3.1.2. Kabin (Dolap) tipi kurutucular.....	9
3.1.3. Bantlı (Konveyör) kurutucular.....	10
3.1.4. Tünel kurutucular .....	10
3.1.5. Döner kurutucular .....	11
3.1.6. Düşey silindirik kurutucular.....	12
3.1.7. Sprey (Püskürtmeli) kurutucular .....	13
3.1.8. Hava süpürmeli döner kurutucular.....	13
3.1.9. Pnömatik kurutucular .....	14
3.2. Kondüksiyon Tipi Kurutucular .....	14
3.2.1. Silindir kurutucular .....	14
3.2.2. Film kurutucular.....	15

**Sayfa**

3.2.3. Vakum kurutucular .....	16
3.2.4. Dondurarak kurutma .....	16
3.3. İnfrared (Kızılötesi) Radyant Isılı Kurutucular.....	17
3.4. Dielektrik Isıtıcılı Kurutucular .....	17
3.5. Güneş Enerjili Kurutucular ve Sınıflandırılmaları .....	17
4. KURUTMA ÜZERİNE YAPILAN LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	20
5. DENEY MATERYALİ VE YÖNTEM .....	29
5.1. Materyal .....	29
5.2. Deney Parametreleri.....	29
5.3. Deney Düzenegi .....	32
5.3.1. Rezistanlı ısıtıcı.....	33
5.3.2. Pitot tüpü .....	33
5.3.3. Şartlandırma ünitesi .....	34
5.3.4. Sıcaklık veri toplayıcı .....	35
5.3.5. Veri toplayıcı.....	36
5.3.6. Radyal tip endüstriyel fan .....	37
5.4. Deneylerin Yapılışı .....	38
6. MATEMATİKSEL MODELLEME .....	40
6.1. Verilerin Analizi .....	40
6.2. Matematiksel Modellemeler.....	41
6.2.1. Nem oranı.....	42
6.2.2. Nem içeriği ve kuruma hızı.....	42
7. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZLERİ.....	44
7.1. Enerji Analizi .....	44
7.1.1. Fan çıkışındaki şartların çıkarılması .....	45

**Sayfa**

7.1.2. Isıtıcı giriş ve çıkış şartlarının çıkarılması .....	45
7.1.3. Kurutma odasının giriş ve çıkış şartların çıkarılması.....	46
7.1.4. Kurutma odası akış şartlarının çıkarılması.....	47
7.2. Ekserji Analizi.....	48
8. DENEYSSEL HATA VE BELİRSİZLİK ANALİZİ .....	51
9. BULGULAR VE İRDELEME .....	53
9.1. Kütle Kaybı-Kuruma Süresi Arasındaki İlişki .....	53
9.2. Nem İçeriği-Kuruma Süresi Arasındaki İlişki .....	59
9.3. MR (Nem Oranı)-Kuruma Süresi Arasındaki İlişki.....	65
9.4. Kuruma Hızı-Kuruma Süresi Arasındaki İlişki.....	71
9.5. Ekserji Analizi Verileri .....	77
9.6. Verilerin İstatistiksel Analizi .....	85
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	95
KAYNAKLAR .....	98
EKLER.....	102
EK-1.....	103
EK-2.....	106
ÖZGEÇMİŞ .....	108

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Kurutma sistem ve tesislerinin sınıflandırılması.....	6
Çizelge 3.2. Çeşitli kurutucuların buharlaşma hızları .....	7
Çizelge 3.3. Çeşitli kurutucularda kurutulan maddelerden bazıları.....	8
Çizelge 6.1. Deney verileri.....	41
Çizelge 8.1. Deney cihazları hata oranları .....	52
Çizelge 8.2. Ölçülen verilerin belirsizlik değerleri .....	52
Çizelge 9.1. Basma deneyleri, 0 derece açılı deney sonuçları .....	77
Çizelge 9.2. Basma deneyleri, 45 derece açılı deney sonuçları .....	78
Çizelge 9.3. Basma deneyleri, 90 derece açılı deney sonuçları .....	78
Çizelge 9.4. Emme deneyleri, 0 derece açılı deney sonuçları.....	79
Çizelge 9.5. Emme deneyleri, 45 derece açılı deney sonuçları.....	79
Çizelge 9.6. Emme deneyleri, 90 derece açılı deney sonuçları.....	80
Çizelge 9.7. Kurutma kinetiğini belirlemede kullanılan modeller .....	86
Çizelge 9.8. 0 derece açıda $Re=30592$ ve $T=90^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	88
Çizelge 9.9. 0 derece açıda $Re=32109$ ve $T=76^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	88
Çizelge 9.10. 0 derece açıda $Re=33907$ ve $T=62^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	88
Çizelge 9.11. 0 derece açıda $Re=26388$ ve $T=90^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	89
Çizelge 9.12. 0 derece açıda $Re=27611$ ve $T=76^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	89
Çizelge 9.13. 0 derece açıda $Re=29198$ ve $T=62^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	89
Çizelge 9.14. 0 derece açıda $Re=21251$ ve $T=90^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	90
Çizelge 9.15. 0 derece açıda $Re=22239$ ve $T=76^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	90
Çizelge 9.16. 0 derece açıda $Re=23547$ ve $T=62^{\circ}C$ için olan kurutma modelleri.....	90
Çizelge 9.17. Tasarlanan kurutma modeli katsayıları .....	91

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Kuruma eğrisi .....	4
Şekil 3.1. Kabinli kurutucu örneği .....	9
Şekil 3.2. Konveyör kurutucu örneği .....	10
Şekil 3.3. Tünel kurutucu örneği.....	11
Şekil 3.4. Döner kurutucu örneği .....	12
Şekil 3.5. Düşey silindirik kurutucu örneği .....	12
Şekil 3.6. Sprey (Püskürtmeli) kurutucu örneği.....	13
Şekil 3.7. Pnömatik kurutucu örneği.....	14
Şekil 3.8. Silindir kurutucu örneği .....	15
Şekil 3.9. Vakum tipi kurutucu örneği .....	16
Şekil 3.10. Dondurarak kurutma örneği .....	17
Şekil 3.11. Güneş enerji sistemlerinin sınıflandırılması .....	19
Şekil 5.2. Deney düzeneği çizimi.....	38
Şekil 6.1. Pitot tüpünün çalışma prensibi.....	40
Şekil 7.1. Kurutma işlemi için enerji modellemesi .....	44
Şekil 9.1. Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 50 Pa) .....	53
Şekil 9.2. Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 37 Pa) .....	54
Şekil 9.3. Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 24 Pa) .....	54
Şekil 9.4. Farklı açılarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 90°C Re=30592) .....	55
Şekil 9.5. Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 50 Pa).....	56
Şekil 9.6. Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 37 Pa).....	56



<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 9.7. Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 24 Pa).....	57
Şekil 9.8. Farklı açılarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 90 <sup>0</sup> C Re=30592).....	57
Şekil 9.9. Emme ve basma deneylerinin kütle kaybına göre karşılaştırılması (0 derece, 62 <sup>0</sup> C Re=23547).....	58
Şekil 9.10. Emme ve basma deneylerinin kütle kaybına göre karşılaştırılması (90 derece, 90 <sup>0</sup> C Re=30592).....	59
Şekil 9.11. Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 50 Pa) .....	60
Şekil 9.12. Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 37 Pa) .....	60
Şekil 9.13. Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 24 Pa) .....	61
Şekil 9.14. Farklı açılarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 90 <sup>0</sup> C Re=30592).....	61
Şekil 9.15. Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 50 Pa).....	62
Şekil 9.16. Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 37 Pa).....	63
Şekil 9.17. Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 24 Pa).....	63
Şekil 9.18. Farklı açılarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 90 <sup>0</sup> C Re=30592).....	64
Şekil 9.19. Emme ve basma deneylerinin nem içeriğine göre karşılaştırılması (0 derece, 62 <sup>0</sup> C Re=23547).....	65
Şekil 9.20. Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 50 Pa) .....	66
Şekil 9.21. Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 37 Pa) .....	66
Şekil 9.22. Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 24 Pa) .....	67

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 9.23. Farklı açılarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 90 <sup>0</sup> C Re=30592).....	67
Şekil 9.24. Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 50 Pa).....	68
Şekil 9.25. Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 37 Pa).....	69
Şekil 9.26. Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 24 Pa).....	69
Şekil 9.27. Farklı açılarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 90 <sup>0</sup> C Re=30592).....	70
Şekil 9.28. Emme ve basma deneylerinin nem oranına göre karşılaştırılması (0 derece, 62 <sup>0</sup> C Re=23547).....	71
Şekil 9.29. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 50 Pa) .....	71
Şekil 9.30. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 37 Pa) .....	72
Şekil 9.31. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 0 derece 24 Pa) .....	72
Şekil 9.32. Farklı açılarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri, 90 <sup>0</sup> C Re=30592).....	73
Şekil 9.33. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 50 Pa).....	74
Şekil 9.34. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 37 Pa).....	74
Şekil 9.35. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 0 derece 24 Pa).....	75
Şekil 9.36. Farklı açılarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri, 90 <sup>0</sup> C Re=30592).....	76
Şekil 9.37. Emme ve basma deneylerinin kuruma hızına göre karşılaştırılması (0 derece, 62 <sup>0</sup> C Re=23547).....	76
Şekil 9.38. Basma deneyleri ekserji verimi.....	81
Şekil 9.39. Emme deneyleri ekserji verimi .....	81

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 9.40. 90 <sup>0</sup> C sıcaklık için ekserji verimleri.....	82
Şekil 9.41. 90 <sup>0</sup> C Re=30592 değerleri için ekserji yok oluşu .....	83
Şekil 9.42. Basma deneyleri enerji kullanım değerleri .....	84
Şekil 9.43. Emme deneyleri enerji kullanım değerleri.....	85
Şekil 9.44. Basma deneyindeki nem oranının teorik nem oranı ile karşılaştırılması .....	92
Şekil 9.45. Emme deneyindeki nem oranının teorik nem oranı ile karşılaştırılması .....	92
Şekil 9.46. Basma deneylerinde oluşan kalıntı değerlerin teorik ile karşılaştırılması .....	93
Şekil 9.47. Emme deneylerinde oluşan kalıntı değerlerin teorik ile karşılaştırılması .....	94

**RESİMLER DİZİNİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.1. Tuğla açılarına göre, (a) 0 derece, (b) 45 derece, (c) 90 derece .....	31
Resim 5.2. Deney düzeneği.....	32
Resim 5.3. Rezistanslı ısıtıcı ve kontrol ünitesi .....	33
Resim 5.4. Pitot tüpü.....	34
Resim 5.5. Şartlandırma ünitesi .....	35
Resim 5.6. Veri toplayıcı .....	35
Resim 5.7. Almemo veri toplayıcı ve Kimo basınç okuyucu .....	36
Resim 5.8. Salyangoz tip fan ve frekans konvertörü .....	37

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler		Birimler
$A_k$	Kanal alanı	$m^2$
$A_{pit}$	Pitot tüpü alanı	$m^2$
$c_{pkh}$	Kuru havanın özgül ısısı	J/kg.K
$D_h$	Hidrolik çap	m
$\dot{E}$	Birim zamandaki ısı enerjisi	kJ/s
$\dot{E}_{ks}$	Ekserji	kJ/s
$\dot{E}_{ks_{kg}}$	Kurutma odası girişindeki ekserji	kJ/s
$\dot{E}_{ks_{kç}}$	Kurutma odası çıkışındaki ekserji	kJ/s
$\dot{E}_{ks_y}$	Ekserji yok oluşu	kJ/s
$EUR_{ko}$	Enerji kullanımı oranı	
$f_g$	Fan girişi	
$f_{ç}$	Fan çıkışı	
$h_{fg}$	Fanın girişindeki havanın entalpisi	kJ/kg
$h_{fç}$	Fanın çıkışındaki kuru hava entalpisi	kJ/kg
$h_{kg}$	Kurutma odası girişindeki kuru hava entalpisi	kJ/kg
$h_{kç}$	Kurutma odası çıkışındaki havanın entalpisi	kJ/kg
$I_g$	Isıtıcı girişi	
$I_{ç}$	Isıtıcı çıkışı	

<b>Simgeler</b>		<b>Birimler</b>
kg	Kurutma odası girişı	
kç	Kurutma odası çıkışı	
KH	Kuruma hızı	g/dak
$\dot{m}_{kh}$	Kuru havanın kütleel debisi	kg/s
MR	Nem oranı	
$M_t$	Ürünün t zamanındaki nem miktarı	g
$M_{t+\Delta t}$	Ürünün t+ $\Delta t$ zamanındaki nem miktarı	g
$M_e$	Ürünün denge nem miktarı	g
$M_0$	Ürünün başlangıç nem miktarı	g
$Nu_d$	Nusselt sayısı	
P	Basınç	Pa
$P_s$	Statik basınç	Pa
Pr	Prandtl sayısı	
$Re_d$	Reynolds sayısı	
$R^2$	Korelasyon katsayısı	
RMSE	Ortalama karesel hata	
$T_{Ig}$	Isıtıcı giriş sıcaklığı	K
$T_{fç}$	Fan çıkış sıcaklığı	K
$T_{kg}$	Kurutma odası giriş sıcaklığı	K
$T_{kç}$	Kurutma odası çıkış sıcaklığı	K

<b>Simgeler</b>		<b>Birimler</b>
$T_{\infty}$	Ortam sıcaklığı	K
$V_{f\check{c}}$	Fanın çıkışındaki kuru hava hızı	m/s
$V_{pit}$	Pitot tüpü içinden geçen hava hızı	m/s
$V_k$	Kanaldan geçen hava hızı	m/s
$X_{kb}$	Ürünün kuru baza göre nem içeriği	
$X_{yb}$	Ürünün yaş baza göre nem içeriği	
$W_y$	Ürünün t zamanındaki yaş ağırlığı	g
$W_k$	Ürünün kuru ağırlığı	g
$\Delta P$	Basınç farkı	Pa
$\eta_{Eks}$	Ekserji verimi	
$\phi$	Bağıl nem	
$\mu$	Dinamik viskozite	kg/m.s
$\nu$	Kinematik viskozite	m <sup>2</sup> /s
$\chi^2$	chi kare	

### **Kısaltmalar**

ark.	Arkadaşları
UETM	Ulusal Enerji Tasarrufu Merkezi
NAOH	Sodyum hidroksit
UV	Ultra viole ışınları
PID	Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türev)

## 1. GİRİŞ

Kurutma terimi, katı bir üründen nemin termal olarak uzaklaştırılması işlemini tarif etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir üretim işlemindeki en karışık operasyonlardan biridir. Eş zamanlı olarak ısı, kütle ve momentum taşınımı olgusunun teorik analizindeki zorluklar, göz ardı edilen sürecin temel sebebini oluşturur. Kurutma işlemlerindeki enerjinin etkili kullanımı, maliyetteki azalma, endüstri için son derece karlıdır. Bu yüzden son zamanlarda hem endüstriyel hem de akademik içeriklerde kurutma başlığı altında dikkat çekici çalışmalar olmuştur. Kurutma doğal olarak gıda, tarım ve kimya endüstrileri, tekstil, yapı malzemeleri ve diğer uygulamalar gibi çok geniş uygulama alanına sahip bir daldır. Bu, taşıma olayının ve malzeme bilimi bilgisinin yeterli düzeyde anlaşılmasını gerektirir. Çünkü öncelik, yalnızca enerji tasarrufu sağlamak değil, aynı zamanda kurutma sırasında daha iyi ürün kalitesi elde etmektir. (Kurtbaş, 2016).

Kurutmadaki gelişmeler aşağıdaki sıralandığı şekilde birçok şekildedir:

- İstenen kuru ürünün kalite kontrolü ve karakterizasyonu için yeni bir deneysel yaklaşım sunmak
- Mevcut ekipmanların teknolojik yönlerini güçlendirmek ve daha etkili bir tasarıma ağırlık vermek
- Farklı bilim dallarındaki araştırmacılar arasında etkili bir iş birliği sağlamak
- Moleküler gözeneklerden parçacıklara geçişi mümkün kılan bilgisayar araçları ve yazılımlarıyla desteklenen modern yöntemleri kullanmak

Ürünler, serbest akışlı veya tozsuz, belirtilen parçacık boyutu dağılımı, çözünürlük veya aktif bileşen koruması gibi kurutma işlemlerinden sonra bazı özel gereksinimleri karşılamalıdır. Bu yüzden, doğru kurutma işlemi ve kurutucu tasarımının seçimi nihai ürünün kalite, boyut, şekil ve nem içeriği ve maliyeti üzerinde inkâr edilemez bir öneme sahiptir.

Bu önemin yükselmesinden dolayı kurutma 1980'lerden bu yana araştırmanın önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Çalışmaların çoğu genellikle iki konuya odaklanır. Bunlar taşıma olgusunun analizlerini ele alan 'kurutma teorisi' ve kurutma teorisi



üzerine odaklı kurutucuları optimize etmeye, üretmeye ve tasarlamaya yarayan 'kurutma ekipmanları'dır. Profesör Arun S. Mujumdar popüler olarak 'Kurutma Guru' olarak bilinen araştırmacılardan biridir ve o 575 yayın, 9 internet kitabı, 3 basılmış kitap, 60'tan fazla yayınlanmış kitap ve 120'den fazla kitap bölümü yazarıdır. Profesörün en son kitabı 'Modern Kurutma Teknolojisi' adı altında en kapsamlı kaynaktır ve o kitapta araştırmacılara önemli katkılar sağlanır (Kurtbaş, 2016).

Kurutma işlemi alanında önemli miktarda yayın bulunmaktadır. Özellikle, birçok ülkedeki bilimsel araştırma kurumları, kurutma sistemleri üzerinde çalışan araştırmacılar ve şirketler için belirli dönemlerde yayınlanan raporlarla bir yol haritası oluşturmaya çalışmaktadır.

Gıda, kimya, tekstil, ziraat üzerindeki kurutma çalışmalarının aksine gözenekli ortamın kurutulması, özellikle tuğla kurutması ile ilgili daha az bilgi vardır. Bu nedenle bu yüksek lisans tez çalışmasında, tuğla kurutması üzerine literatüre özgün bir katkıda bulunmayı ve ilgili alanda oluşan boşluğu doldurmayı amaçlayan deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma ile tuğla üreticilerinin, ürettikleri yaş tuğlaları daha az enerji ile daha kısa zamanda kurutmalarına yardımcı olmak istenmektedir.

Bu sayede enerji ve zamandan tasarruf ile birlikte üretimde artışın olması beklenmektedir.

Deneylerde fan, ısıtıcı, tuğlanın içine koyulduğu kurutma kabini ve aralarındaki bağlantı elemanları kullanılmıştır. Deney parametrelerindeki değişkenler, kurutma havası sıcaklığı (62, 76, 90°C), farklı Reynolds değerlerinde kurutma havası hızı ve tuğlanın hava akışına göre koyulma açısı (0°, 45° ve 90°) olmuştur. Farklı sıcaklık, hız ve açılarda çeşitli deneyler yapılması amaçlanmış ve değişkenlerin etkileri araştırılmıştır.

Deneylerde kurutma havası sıcaklığı ve hızının artışının, kuruma süresini düşürdüğü belirlenmektedir. Aynı zamanda tuğla açısının küçük olmasının da olumlu etkileri görülmektedir. Deneyler sonucu elde edilen veriler ile regresyon analizi yapılmış, literatürdeki modellerle karşılaştırılmış ve bu çalışma için bağımsız değişkenlere göre yeni bir model oluşturulmuştur.

## 2. KURUTMA İŞLEMİ

Endüstriyel uygulamaların en yaygın, en önemli ve en yoğun adımı kurutma işlemleridir. Örneğin bu işlem şu alanlarda kullanılır: tarım ve kimyasal sanayi, gıda sunumu, inşaat malzemelerinin kurtulması gibi. Temel olarak kurutma olgusu, üründen nem içeriğini azaltmak için suyun kaldırılmasında ısı, kütle ve momentum transfer işlemlerinin uygulanması olarak tanımlanabilir.

Kurutma işlemi iki temel olayla belirtilebilir: ürünün içinden yüzeyine doğru nemin taşınması ve ısınmış yüzeyden çevre havaya nemin buharlaşmasıdır. Nemin bu taşınma olayları sıcaklık, tip, zorlanmış yüzeyin yapısı, ortam nemi, basınç ve akış hızı gibi birkaç dış faktör ile yakından ilişkilidir. Kurutma, üzerindeki araştırmaların karmaşıklığı dolayısıyla, hala dünya çevresindeki çoğu araştırmacılar için büyük bir ilgi odağıdır. Bu araştırma projelerinin çoğunda temel amaç, dış etkenlerin kuruma süreci üzerindeki etkilerini belirlemektir; kurutma sürecinin detaylı olarak anlaşılması, bilimsel ilkeler ile işlem tasarımı için gerekli olduğundan, ürünün kalitesinin korunması ve enerji optimizasyonu gereklidir.

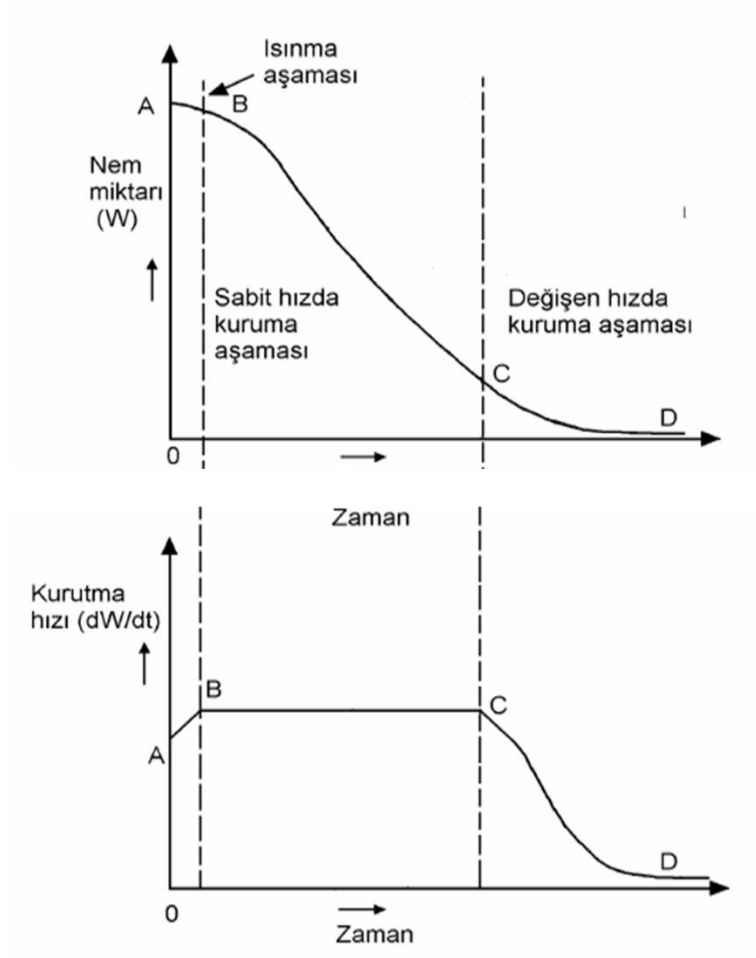
Teknolojik gelişmeler ve çalışmaların sayısındaki artışa rağmen kurutma, araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde çalışılacak özel bir alandır. Devam eden çalışmaların kurutma tasarımı ile kontrolünün basitleştirilmesi için, lineer olmayan fiziksel olgulardan oluşan zemin üzerine daha anlaşılabilir kurutma işlemleri yapmaya ihtiyacı vardır. Temel termodinamik ve taşınım olgusu bilgisinin, faz dengesi ve kuruma kinetiğinin tanımlanmasına entegrasyonu araştırmanın mevcut zorlukları arasındadır (Kurtbaş, 2016).

Kurutma genelde nem içeren maddenin üç aşamadan geçmesiyle gerçekleşmektedir (Gök, 2011):

- Isınma aşaması
- Sabit hızda kuruma aşaması
- Değişen hızda kuruma aşaması

Şekil 2.1’de kuruma sürecinde, malzemenin kuruma hızı ve neminin zamanla değişimi eğriler ile gösterilmektedir. (a) da görüldüğü gibi, nem başlangıçta hızlı bir şekilde

uzaklaştırılmakta, ancak zamanla kuruma yavaşlamaktadır. (b) de ise bu kuruma aşamalarındaki kuruma hızlarının değişimi görülmektedir (Gök, 2011).



Şekil 2.1. Kuruma eğrisi (Gök, 2011)

### 3. KURUTUCULARIN SINIFLANDIRILMASI

Kurutma metotları her bir ürünün özel gereksinimlerine göre sınıflandırılmış ve belirlenmiştir. Bu işlem birçok farklı formda meydana gelir ve bu gereksinimlere bağlı çeşitli ekipmanları kullanır (Kurtbaş, 2016).

Endüstride değişik özelliklere sahip çok sayıda madde için kurutma yapıldığından, çok sayıda kurutucu geliştirilip piyasaya sürülmüştür. Bu kurutucular kurutulmak istenilen maddenin yapısı, boyutu ve şekli, miktarı, besleme ve ısıtma şekli, çalışma şekli (kesikli veya sürekli), kuruma süresi gibi etkenler göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bundan dolayı bir sınıflandırma yapmak zordur. Fakat bazı etkenlere göre çeşitli gruplara ayrılmıştır. Kröll (1978) tarafından en ayrıntılı sınıflandırmalardan biri yapılmıştır. Bu sınıflandırmada, katı madde ve operasyon türü temel alınmıştır. Keey (1972) tarafından yapılan sınıflandırmada ise kurutucular 39 ana ve 70 alt grupta toplanmıştır. Porter ve ark. (1985) tarafından kurutulacak katı maddenin fiziksel özellikleri, ısıtılma şekli ile taşıma ve depolama özelliklerine göre kurutucular sınıflandırılmıştır. Keey (1972) ise kurutulacak maddenin ısıtılma şeklini, çalışma sıcaklığını ve maddenin kurutucu içinde gördüğü işlemlere göre sınıflandırma yapmıştır (Gök, 2011).

Temelde kurutma sistemleri konveksiyon ve kondüksiyon tipi olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Konveksiyon kurutucular; doğrudan temaslı (direkt) kurutucular olarak da tanımlanabilir. Bu kurutucularda kurutulacak madde ile kurutma gazı/havası doğrudan temas ettirilmektedir. Bu nedenle, kuruma daha hızlı bir şekilde gerçekleşir. Kullanılan kurutma gazının, kurutulacak maddeyi kirletmesi söz konusu olmadığı uygulamalarda bu tip kurutucular kullanılmaktadır.

Kondüksiyon kurutucular; dolaylı temaslı (indirekt) kurutucular olarak da tanımlanabilir. Bu kurutucularda kurutulacak madde ile kurutma gazı/havası bir ısı değiştirici yüzey yardımı ile temas ettirilmektedir. Bu tip kurutucular, kullanılan kurutma gazının, kurutulacak maddeyi kirletmesi söz konusu olduğu uygulamalarda bu tip kurutucular kullanılmaktadır.

Bu iki tip kurutucu dışında herhangi bir gaz kullanmayan kurutucularda bulunmaktadır. Bu kurutucuların çalışması infrared ışınları vasıtasıyla kurutma prensibine dayanır. En çok bilinenleri, mikrodalga ve infrared tipi kurutuculardır. Genelde bu kurutucular tekstil, film ve bazı boya maddelerinin kurutulması amacıyla kullanılmaktadırlar (Gök, 2011).

Kurutucu sistemleri ve sınıflandırılması Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Kurutma sistem ve tesislerinin sınıflandırılması (Ceylan, 2002)

<b>KURUTMA SİSTEMLERİ</b>	
<b>Konveksiyon Tipi Kurutucular</b>	<b>Kondüksiyon veya Kontakt Tipi Kurutucular</b>
Kurutma Odaları	Silindir Kurutucular
Kabin (Dolap) Tipi Kurutucular	Film Kurutucular
Bantlı (Konveyör) Kurutucular	Vakum Kurutucular
Tünel Kurutucular	Dondurarak Kurutuma
Döner Kurutucular	
Düşey Silindirik Kurutucular	
Sprey (Püskürtmeli) Kurutucular	
Hava Süpürmeli Döner Kurutucular	
Pnömatik Kurutucular	

Çizelge 3.2’de çeşitli kurutucu tiplerinin kurutma etkinlikleri ve buharlaşma hızları verilmiştir. Çizelge 3.3’te ise çeşitli kurutucu tiplerinden kurutulacak maddelere bazı örnekler verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Çeşitli kurutucuların buharlaşma hızları (Gök, 2011)

Kurutucu Tipi	Buharlaşma Hızı		Buharlaşma Hızı (%)
	kg su/hm <sup>2</sup>	kg su/hm <sup>3</sup>	
Doğrudan-Sürekli			
Akışkan yatak		800-2500	20-80
Bant			40-60
Döner	30-80		40-70
Hava sürüklemeli		4-100	50-75
Sprey	2-50		20-50
Tünel			35-40
Dolaylı-Kesikli			
Raflı			95
Doğrudan-Sürekli			
Tank (Drum)			85
Döner			75-90
Dolaylı-Kesikli			
Karıştırmalı tava			90
Vakumlu döner			<70
Vakumlu raf			-
İnfrared			30-60
Dielektrik			60

**Çizelge 3.3.** Çeşitli kurutucularda kurutulan maddelerden bazıları (Gök, 2011)

<b>Kurutucu Tipi</b>	<b>Kurutulan Maddeler</b>
Sprey (Püskürtmeli) Kurutucular	Seramikler, killer, kahve, deterjan, mürekkep, reçineler, süt, yumurta, nişasta, maya, üre, tuzlar
Kabin (Dolap) Tip Kurutucular	Meyveler, sebzeler, katı malzemeler
Tank (Silindirik) Kurutucular	Patates, kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, tereyağı, kaymağı alınmış süt, maya, yapıştırıcılar
Vakum Tank (Drum) Kurutucular	Şuruplar, kaymağı alınmış süt, kahve, yapıştırıcı
Vakumlu Döner Kurutucular	Plastikler, her türlü kimyasallar, nişasta, organik kıvamlaştırıcılar
Bantlı (Konveyör) Kurutucular	Maya, kömür briketleri, yapay lastik, sabun, yapıştırıcılar, killer, beyaz kurşun, krom sarısı
Döner Çok Raflı Kurutucular	Pülverize kömür, penisilin, atık çamur, çinko tozları, kalsiyum karbonat, kırılğan kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, kafein
Akışkan Yataklı Kurutucular	Laktoz esaslı tanecik malzemeler, kömür, kum, kireçtaşı, demir cevheri, asfalt, aşındırıcı maddeler ve tuzlar
Hava-Süpürmeli (Pnömatik) Kurutucular	Nişasta, kanalizasyon çamuru, kil, krom sarısı
Dondurucu Kurutucular	Et, deniz ürünleri, sebzeler, meyveler, kahve, veteriner ilaçları ve kan plazması
Dielektrik Kurutucular	Pişmiş maddeler, kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, mobilya kerestesi, kaplamalar, bazı tekstil ürünleri.
İnfrared Kurutucular	Tekstil, kâğıt ve film, boya ve mine yüzey parlaticıları

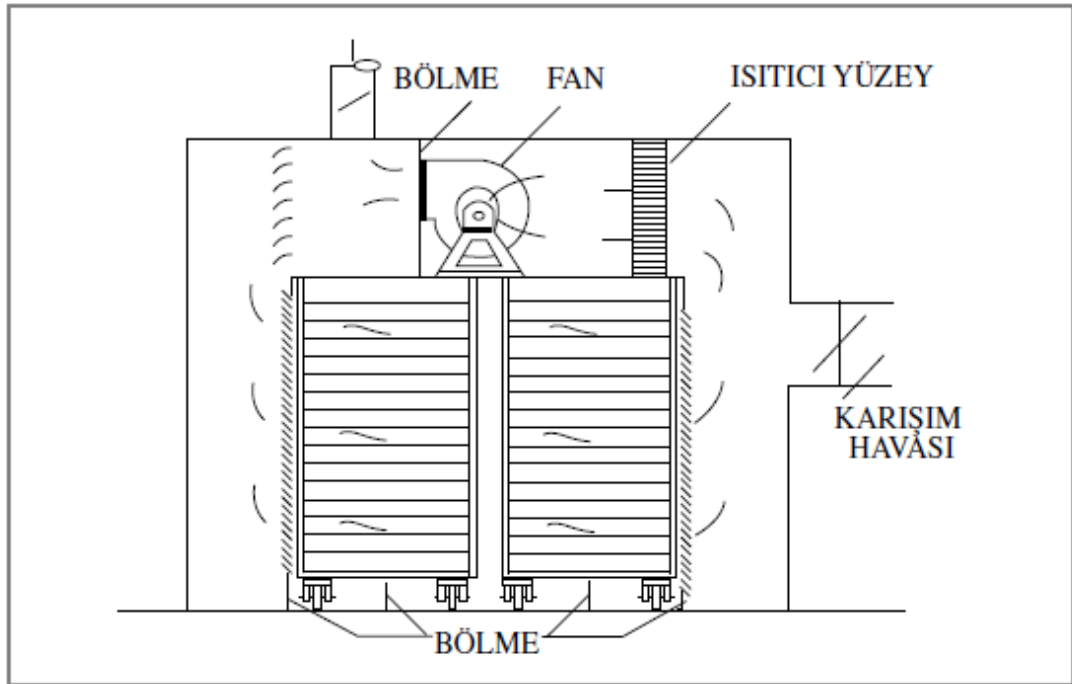
### 3.1. Konveksiyon Tipi Kurutucular

#### 3.1.1. Kurutma odaları

Kurutulacak malzemenin sıcak hava dolaştırılan bir oda veya kapalı hacim içerisine düzgün bir şekilde yerleştirilip, her bir parçanın kurutucu akışkan ile maksimum alanda temas etmesini sağlayan sistemlerdir. Bu yöntem tuğla, ahşap levhalar gibi geniş hacimlere sahip malzemelerin kurutulması için özellikle uygundur (Demir, 2012).

#### 3.1.2. Kabin (Dolap) tipi kurutucular

Şekil 3.1'deki gibi olan kurutucularda, malzeme yassı bir şekilde kurutmanın yapılacağı tepsilere yayılır ve izolasyonlu kurutma kabininde raflara yerleştirilir. Sıcak havanın malzemelerin üzerinden geçerek ürünün kurutulması sağlanır. Bu tipteki kurutucular, boya, pigment, kimyasal madde, gıda maddesi, seramik eşya, tekstil ürünü gibi çok geniş bir alana yayılmış malzemelerin kurutulması için kullanılabilirler (Demir, 2012).

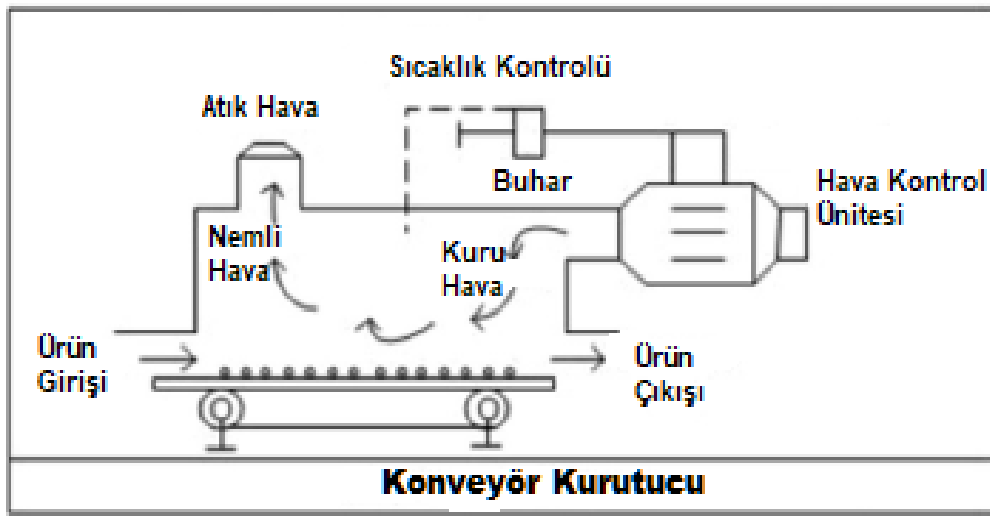


Şekil 3.1. Kabinli kurutucu örneği (Günerban, 2005)



### 3.1.3. Bantlı (Konveyör) kurutucular

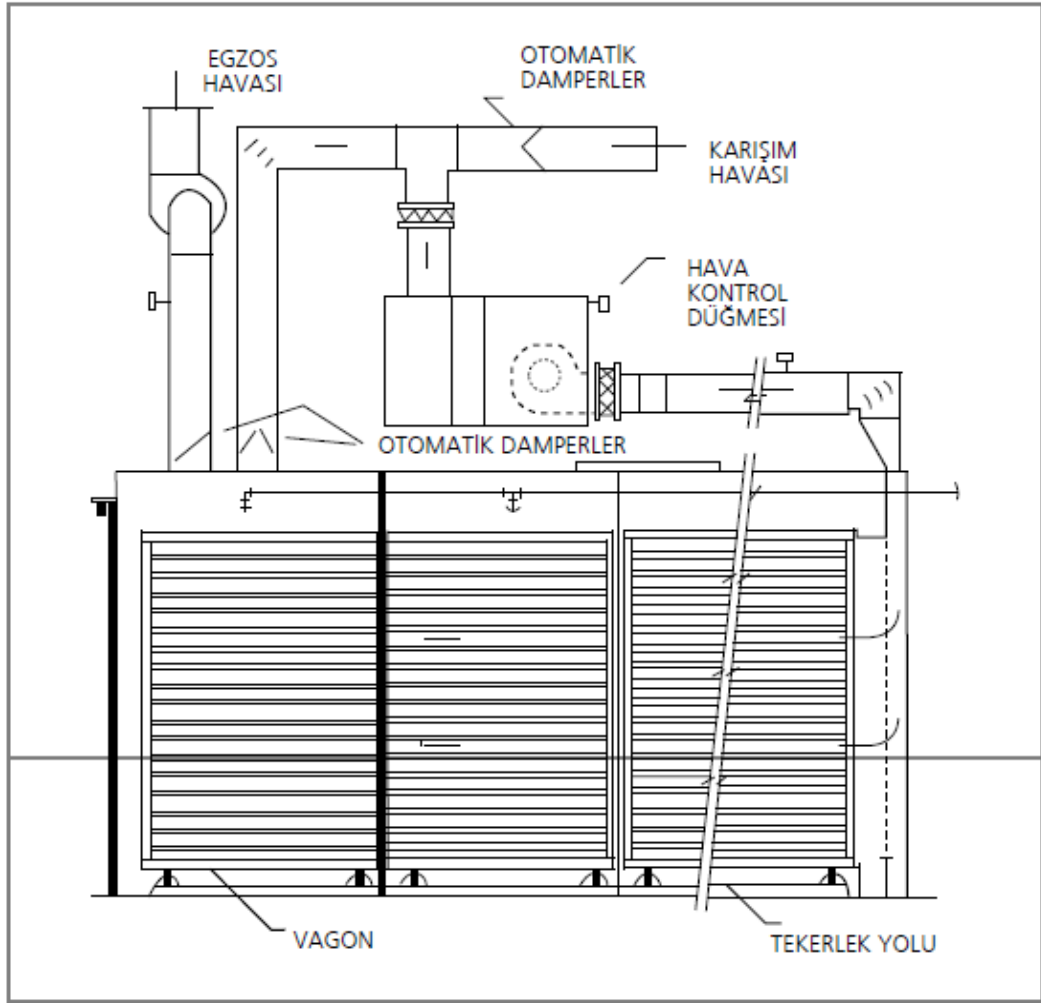
Şekil 3.2’de gösterilen konveyör tipi kurutucular teorik olarak, basit bir çalışma prensibine sahiptir. Ürün kurutucuya konveyör yoluyla iletilir. Sonra ürün boyunca sıcak hava uygulanır. Bu kurutucular genellikle sıcak havalı bir kutu içinde konveyör olarak tanımlanmasına rağmen, gerçekte konveyör kurutucu en çok kullanılan mevcut çok yönlü kurutuculardan biridir. Genellikle konveyör kurutucu 1 ile 50 mm çap aralığındaki parçacıklı malzemenin kurutulması için en iyi seçimdir (Kurtbaş, 2016).



Şekil 3.2. Konveyör kurutucu örneği (Kurtbaş, 2016)

### 3.1.4. Tünel kurutucular

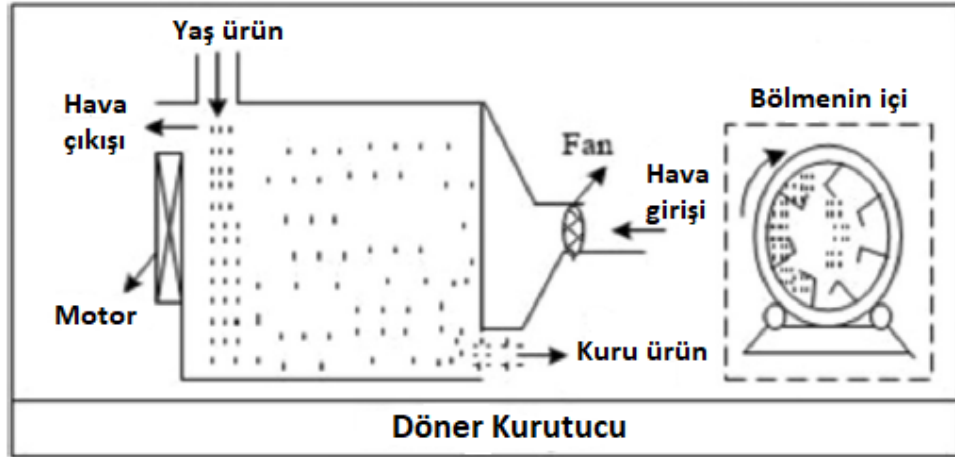
Şekil 3.3’de belirtilen bu tip kurutucular özellikle çok büyük miktardaki veya çok iri taneli malzemeler için uygundur. Malzeme raf veya bantlar üzerinde tünelde hareket eder. Tüneldeki hava akımı hem paralel hem de zıt akışlı olabileceği gibi, sadece paralel ya da sadece zıt akışlı olabilir (Demir, 2012).



Şekil 3.3. Tünel kurutucu örneği (Günerban, 2005)

### 3.1.5. Döner kurutucular

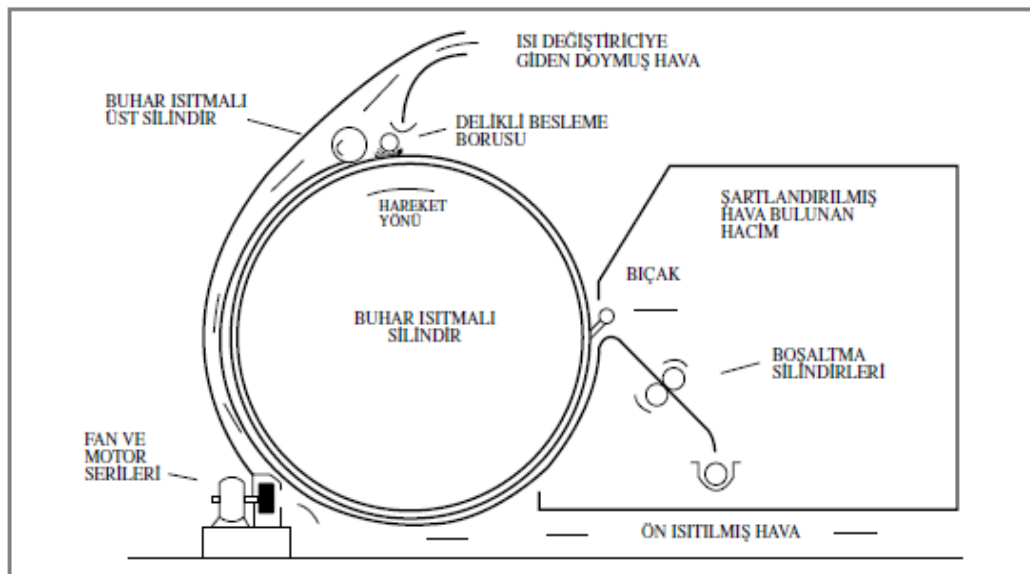
Şekil 3.4’de gösterilen döner kurutucular endüstriyel kurutucuların atölyesi olarak bilinir ve üründeki sıvı nem içeriğini en aza düşürmeye çalışır. Esnekliği genellikle birleştiren bu kurutucular, malzemeyi tam aralık ve boyutlarında kurutmak için etkili bir teknolojidir. Bu kurutucular doğrudan ısıtma prensibiyle çalışır çünkü ısı konveksiyon yoluyla malzemeye iletilir. Döner kurutucuların eşsiz özelliklerinden bazıları da malzemenin etkili kurutulması, yüksek termal etkinlik ve mümkün olan en yüksek kurutma sıcaklıklarına en zorlu uygulamalara izin veren tasarıma sahip olmasıdır. Olumsuz bir yönü ise bu kurutucular, kurutulan malzemeye göre yüksek sermaye ve bakım maliyetleri gerektirir. Kırılgan malzemeler ve düşük üretim oranları bu tip kurutucu için uygun değildir (Kurtbaş, 2016).



Şekil 3.4. Döner kurutucu örneği (Kurtbaş, 2016)

### 3.1.6. Düşey silindirik kurutucular

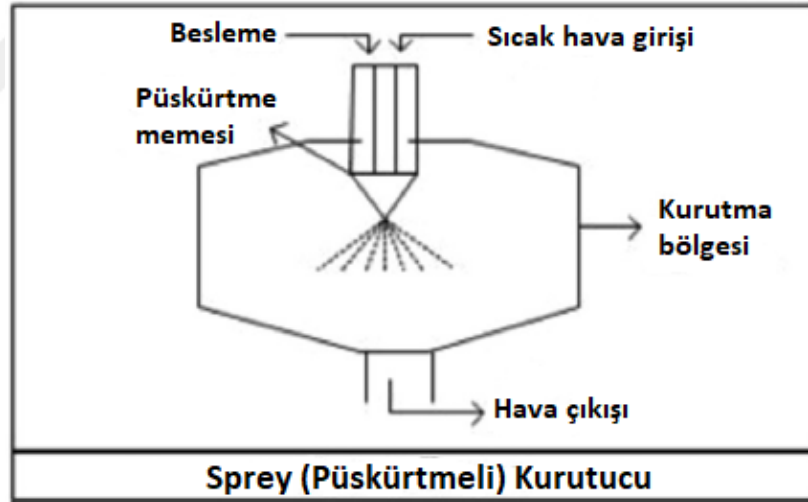
Şekil 3.5’de gösterilen düşey bir silindir içine yerleştirilmiş birçok sayıda ortak eksene sahip tepside oluşan bu tip bir kurutucuda, kurutulacak ürün en üst tepsiye beslenir, ötelenmek ve aynı zamanda bir döner tırmık ya da kazıyıcı vasıtasıyla ters düz edilmek suretiyle karıştırılır. Ürün bir kez karıştırdığında ortak eksene sahip tepside bulunan yarıktan bir aşağıda bulunan tepsiye dökülür. Kurutucu akışkan genellikle bir rafın veya tepsinin dış kısmını, bir sonrakinin iç kısmını yalayacak şekilde malzeme üzerinde dolaştırılır (Demir, 2012).



Şekil 3.5. Düşey silindirik kurutucu örneği (Günerban, 2005)

### 3.1.7. Sprey (Püskürtmeli) kurutucular

Şekil 3.6’da gösterilen spreyle kurutma işlemi, temel prensiplerin daha iyi anlaşılması için ve uygulamaların geliştirilmesi için artan çabalarla beraber endüstride çok geniş bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bir spre kurutucu, adından da anlaşılacağı gibi kurutma için bir spre kullanır. Ortalama bir parçacık boyutuna sahip serbestçe akabilen kuru toz elde edebilmek için spre (püskürtmeli) kurutucular, ısıtılmış bir gaz ile bir kurutma odasında atomize edilmiş sıvı akımını birleştirir. Sıvı beslemenin atomize edilmesi ile üretilmiş ünite başına yüzey alanı, spre kurutucunun eşsiz kalitesidir. Püskürtmeli kurutma işlemi kurutulacak ürünün birleşimine göre şekil alır. Bazı ürünler diğerleri ile kıyaslandığında böyle kolay bir kurutma işlemine sahip olmayabilir. Püskürtmeli kurutucu teknolojisi bazı durumlarda en uygun seçimdir. Bunun içinde parçacık boyutu dağılımı, artık nem içeriği, yığın yoğunluğu ve parçacık morfolojisi gibi kalite standartlarına uymak zorundadır. (Kurtbaş, 2016).



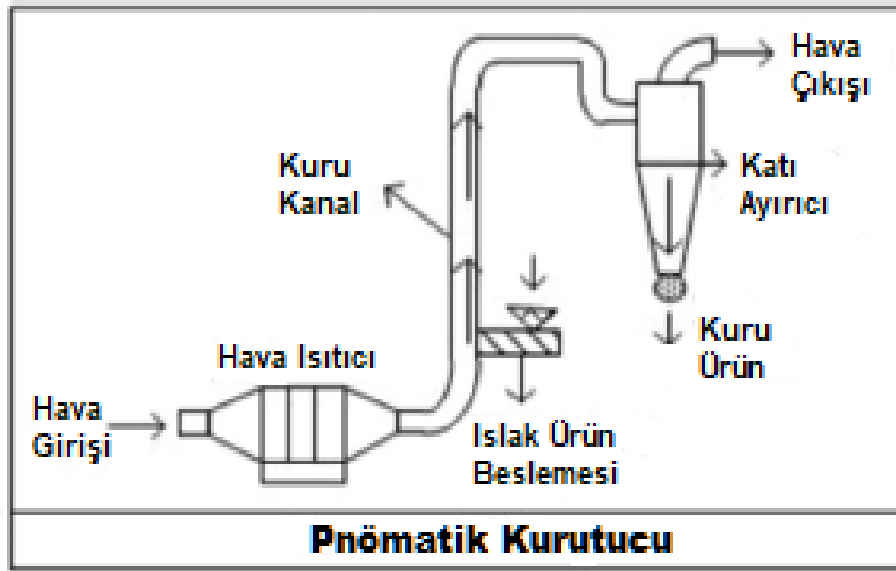
Şekil 3.6. Sprey (Püskürtmeli) kurutucu örneği (Kurtbaş, 2016)

### 3.1.8. Hava süpürmeli döner kurutucular

Bazı malzemelerin hem pülverize hale gelmesi hem de kurutulması gerekir. Bu iki işlemi aynı anda gerçekleştirmek için hava süpürmeli döner kurutucular kullanılmaktadır. Örnek olarak tarımsal kireç veya tebeşir taşından tebeşir tozu elde edilmesi gösterilebilir (Demir, 2012).

### 3.1.9. Pnömatik kurutucular

Şekil 3.7’de belirtilen bu tip kurutucular, kimyasal malzemeler, kil veya özel formda olan kentsel atıklardan elde edilen çamurlar gibi kuru temele göre % 3’ten % 900’e kadar olan geniş bir alanda nem içeren malzemelerin kurutulması için kullanılırlar (Demir, 2012). Pnömatik kurutucular, kısa kalış süreleri savunulabilir olduğunda toz granülleri, kristaller ve ıslak ürünler gibi farklı ürünlerin kurutulması için en makul fiyatlı kurutuculardır. Pnömatik kurutucularda ürün, çok kısa bir süre için (genellikle üç saniyeden daha az) sadece gaz buharı ile etkileşim içindedir. Bu yüzden o kurutulacak malzemenin yüzeyinden nemi almak için mükemmel bir şekilde uygulanır. Düşük termal etkinlik, pnömatik kurutuculardaki temel sınırlanma sebebidir (Kurtbaş, 2016).



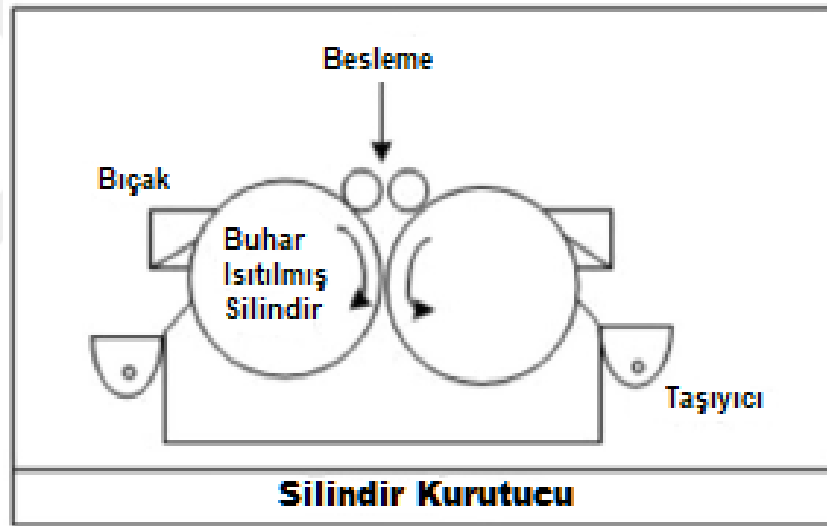
Şekil 3.7. Pnömatik kurutucu örneği (Kurtbaş, 2016)

## 3.2. Kondüksiyon Tipi Kurutucular

### 3.2.1. Silindir kurutucular

Şekil 3.8’de gösterilen tabur şeklindeki silindirik kurutucular, bebek mamalarından kimyasallara kadar çok çeşitli ürünlerin kurutulması için kullanılmaktadır. Silindirik kurutucuların, diğer kurutucular kullanıldığında ortaya çıkan zayıf ve yetersiz sonuçlara daha uygun durumlar getirebilecek özelliklerinden dolayı kurutucular

arasında önemli bir yeri vardır. Diğer kurutucu tipleri gibi olmayan silindirik kurutucular yüksek yapışkanlı ürünler veya ortamları kurutabilir. Silindirik kurutucular devamlı bir şekilde dönebilir ve içeriden ısıtılabilir. Kurutulmak istenen ürün silindir dışına ince bir film olarak uygulanır uygulanmaz kurutma işlemi başlar. Termal sonuçlar, sıcak hava çıkışında herhangi bir kayıp meydana gelmediğinden dolayı diğer yöntemlerden daha iyidir. Buna ek olarak silindirik kurutucularda istikrarlı kaliteli ürünler kısa bir zaman içinde elde edilebilir. Uygulamada bir değişim yapmak ve temizlemek kolaydır. Buna rağmen, işlenmiş silindirlerin yüksek sermaye maliyeti ve yoğun ürünler için ısı hasarı olasılığı sprey kurutuculara olan meyli artırmaktadır. Silindirik kurutucular dört grup altında sınıflandırılır: işlemdeki basınca göre atmosferik tip ve vakum tipi, çift silindirli ve tek silindirli (Kurtbaş, 2016).



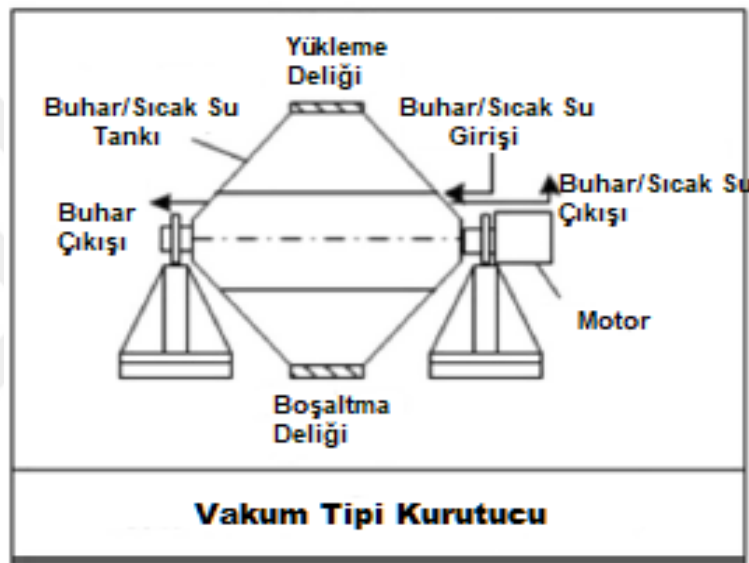
Şekil 3.8. Silindir kurutucu örneği (Kurtbaş, 2016)

### 3.2.2. Film kurutucular

Bu tür kurutucular, macunumsu malzemelerin, lapa benzeri yumuşak malzemelerin ve sıvıların kurutulmasında kullanılmaktadır. Genel olarak iki tip film kurutucu kullanılmaktadır. Bunlar tek veya çift silindirli kurutuculardır. Tek silindirli tipte, ısıtılmış silindir doğrudan ürün çamuruna veya çözeltisine daldırılarak, silindir yüzeyinde ürüne ait film tabakası oluşturulur. Çift silindirli tipte ise birbirine paralel olarak yerleştirilmiş iki adet ısıtılmış silindir vardır. Böylece, ürün silindirlerin arasına ve üstüne beslenebilmektedir (Demir, 2012).

### 3.2.3. Vakum kurutucular

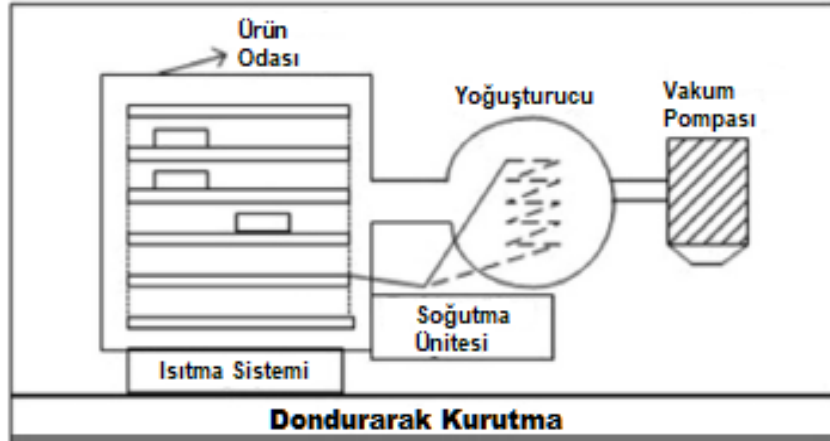
Şekil 3.9’da belirtilen vakum kurutucular, ısıya duyarlı malzemeleri suyun kaynama noktasının çok altında kurutmak için fırsat sağlarlar. Böylece çok uzun kurutma süreleri ile ilgili problemi ortadan kaldırır. Kurutucu operasyonları bir vakum içinde normal bir şekilde uygulanır ve bu işlem temizdir, basittir ve ıslak kalıp ve tozu kurutmak için çok etkili bir yöntemdir. Vakumlu kurutuculardan biri ‘çift koni kurutucu’ olarak adlandırılır (Kurtbaş, 2016).



Şekil 3.9. Vakum tipi kurutucu örneği (Kurtbaş, 2016)

### 3.2.4. Dondurarak kurutma

Şekil 3.10’da gösterilen dondurarak kurutma genellikle eczacılık ürünleri olan ilaç endüstrisinde, ısıya duyarlı malzemelerin kurutulmasında yoğun bir şekilde kullanılır. Dondurarak kurutmanın arkasındaki ana fikir malzemeden suyu tamamen kaldırmak ve bunu yaparken de malzemenin temel yapı ve bileşimini gıdaların ve ürünlerin dayanabileceği şekilde bırakmaktır. Dahası, bu yöntemle oda sıcaklığında ürünleri tekrar yerleştirmek daha kolaydır. Dondurarak kurutucu donma sıcaklığı ve donma aşamasındaki zaman, soğutma oranı, hedef ürün sıcaklığı, oda basıncı ve birincil kurutma aşamasındaki kurutma kapasitesi, ikincil kurutma aşamasındaki oda basıncı ve ısıtma oranını içeren birkaç tasarım parametrelerine sahiptir (Kurtbaş, 2016).



Şekil 3.10. Dondurarak kurutma örneği (Kurtbaş, 2016)

### 3.3. İnfrared (Kızılötesi) Radyant Isılı Kurutucular

İnfrared kurutma son yıllarda popüler bir teknik olmuştur. Kurutma için ürüne uygulanan ısının metodu infrared radyasyondur. İnfrared kurutma konvansiyonel kurutma üzerinde zaman ve enerji kazancı, yüksek ürün kalitesi, temiz çalışma çevresi, işlem parametrelerinin görüntülenmesi ve kontrol edilmesi gibi önemli avantajlar sağlar. İnfrared radyant kurutucular çok yüksek ısı akışına sahip küçük ünitelerdir ve bu da mevcut makinelerde onarımı kolaylaştırır (Kurtbaş, 2016).

### 3.4. Dielektrik Isıtıcı Kurutucular

Bu tip kurutucular, frekansı yüksek olan elektriksel bir alana yerleştirilen katı malzeme içinde ısı üretimi çalışma mantığıyla çalışır (Gök, 2011).

### 3.5. Güneş Enerjili Kurutucular ve Sınıflandırılmaları

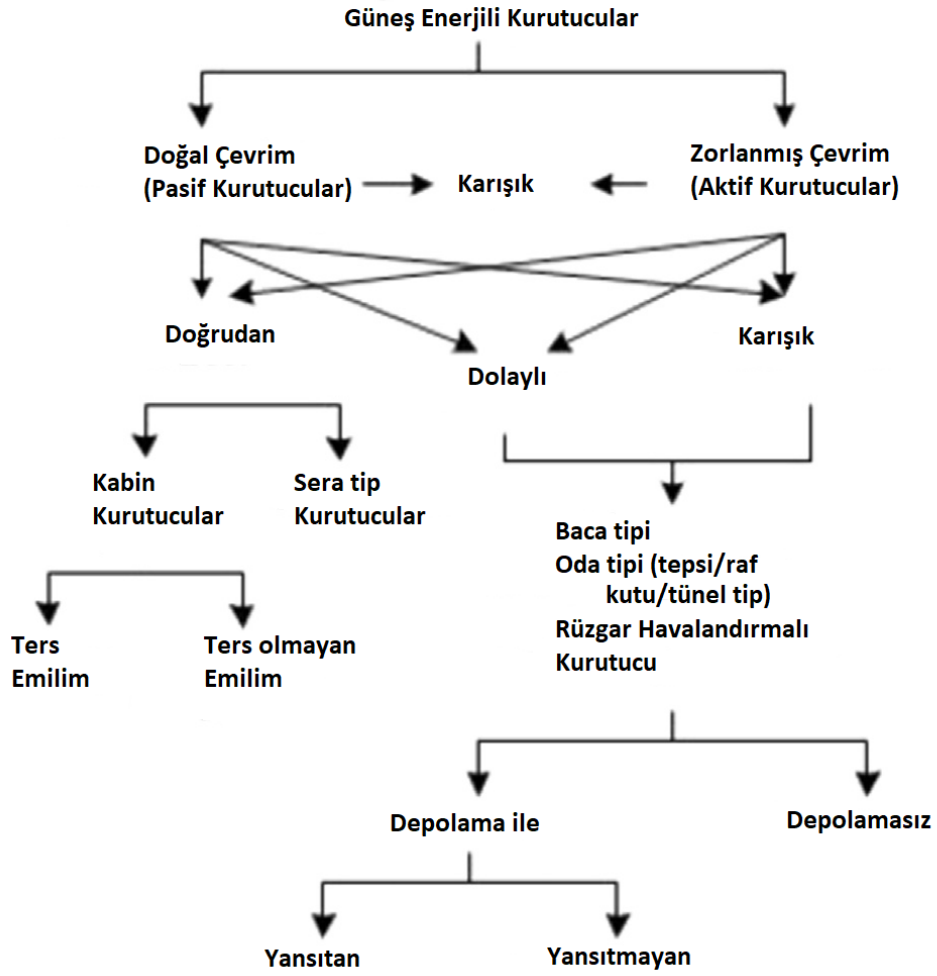
Güneş enerjili kurutucular doğal açık kurutucuların aksine kurutma işlemleri boyunca daha yüksek sıcaklık, daha düşük bağıl nem, daha düşük ürün nem içeriği ve daha düşük hasar ile çalışırlar. Buna ek olarak, bu tip kurutucular daha fazla alan kaplarlar ve daha az zaman alırlar ve yapay mekanik kurutma metotlarıyla kıyaslandığında daha ucuzdurlar. Düşük sermaye ücreti ve operasyon maliyeti, güneş enerjili kurutucuların birincil avantajlarından. Bunun yanı sıra çok az uzmanlık gerektirirler. Güneş enerjili kurutma yöntemlerinin temel olumsuzlukları şu şekilde sıralanabilir:



- Fare, böcek veya kuşlar tarafından hasar görülmesi ve kirlilik riski
- Yavaş veya aralıklı olarak kurutulması ve yağmurdan veya çiyden korunaksız olması, bu sayede kalıp büyümesine ve bağıl nem oranının nispeten yüksek olmasına neden olur
- Aşırı veya az kurutma sebebiyle ürünlerin düşük ve değişken kalitede olması
- Yiyeceklerin sığ tabakaları için gerekli olan geniş araziler
- Ürünlerin döndürülmesi ve yağmur altında taşınması sebebiyle yüksek oranda fiziksel çaba talebi
- Bazı meyve ve sebzelerin kalitesini, rengini ve vitamin içeriğini düşürecek şekilde doğrudan güneş ışığına maruz kalmak

Dahası, güneşli kurutma kontrol edilemeyen faktörlere bağlıdır ki böylece ürün kalitesi standart bir şekilde olmaz. Şekil 3.11' te tarım ürünleri için güneş enerjili kurutucuların sistematik sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tarımsal, gıda, bitkisel ve tıbbi ürünler gibi çeşitli ürünlerin kurutulması için kullanılan güneş enerjili kurutucularının yapısal ve çalışma detaylarının kapsamlı bir şekilde incelenmesi birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır (Kurtbaş, 2016).



**Şekil 3.11.** Güneş enerji sistemlerinin sınıflandırılması (Kurtbaş, 2016)

#### 4. KURUTMA ÜZERİNE YAPILAN LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Akdaş (2014), yüksek lisans tez çalışmasında mandalina meyvesi için etüv ve vakum kurutma yöntemleri uygulanarak kurutulması üzerinde deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada kurutma sıcaklıkları 55, 65, 75°C olarak seçilmiştir. Yedi farklı ince tabaka kurutma modeli tanımlanırken bunlar arasından Page modelinin  $R^2$  değeri 0,992-0,999 olarak hesaplanmış en iyi model olarak belirlemiştir. Vakum kurutucunun daha hızlı bir yöntem olduğunda karar kılrsa bile fenolik ve flavonoid içeriklerinde daha fazla bozulmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Yine bu çalışmada etüv kurutucuda ise C vitamini bozulmasının vakum kurutucudan daha fazla olduğunu belirlemiştir. Etüv kurutucunun daha fazla enerji gerektirdiğini yapılan deneylerle tespit etmiştir.

Akpınar ve ark. (2002), kurutma üzerine yaptıkları çalışmada, konvektif siklon kurutucuda patates dilimlerinin deneysel olarak tek tabaka kurutma davranışını araştırmışlardır. Deneylerde değişken parametreler olarak, patates kalınlığı (8 ve 12,5 mm), kurutma havası sıcaklığı (60, 70 ve 80°C) ve hızı (1 ve 1,5 m/s) seçilmiştir. Numunenin kalınlaşması ile kuruma zamanında yaklaşık 180-220 dk arasında artışa götürdüğünü belirlemişlerdir. Sıcaklık artışı ve hızdaki yükselmenin de kurutma süresine olumlu yansıdığını belirlemişlerdir. Alt-üst koyulan tepsilerdeki ayvaların kurumasında da çok az farklar ortaya çıkmıştır.

Akpınar ve Biçer (2003), çalışmalarında tarımsal ürünlerin kurutulmasında siklon tipi kurutucunun kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Deneylerinde 12,5x12,5x2,5 cm<sup>3</sup> ve 0,8x0,8x1,8 cm<sup>3</sup> ebatlarında dikdörtgen prizma şeklinde patates dilimleri kullanmışlardır. Kuruma işleminde, kurutma havası sıcaklıkları 60 °C ve 70°C olmuş, kurutma havası hızı 1 m/s şeklinde dönel akış uygulanmıştır. Hava sıcaklığı artışı ve ürün boyutunun azalması pozitif yönde kurutmayı etkilediği görülmüştür. Dönel akışta kurutmaların, eksenel akışa göre kuruma süresinde daha az olduğunu görmüşlerdir.

Akpınar ve ark. (2003), çalışmaları kırmızıbiberin ince tabaka kurutulması üzerine olmuştur. Konvektif bir kurutucuda kırmızıbiber dilimlerinin ince tabaka kurutma davranışını araştırmışlardır ve literatürdeki ince tabaka kurutmanın uygulandığı matematiksel modelleri uygulamışlardır. Bu deneyler kurutma havası sıcaklığı 55, 60,

70°C ve hızı 1,5 m/s olarak yapılmıştır. On bir farklı kurutma modeli ile yapılan deneylerin korelasyon katsayılarını, sıcaklıkla değişen regresyon analizlerini karşılaştırmışlardır. Kırmızıbiberin ince tabaka kurutma karakteristikleri arasında en iyi modelin en yüksek  $R^2$  değeri ve en düşük RMSE ve  $\chi^2$  değerleri olan difüzyon yaklaşımı modeli olduğunu belirlemişlerdir.

Akpınar (2004), çalışmasında konvektif tip bir kurutucuda kırmızıbiber dilimlerinin kurutulmasındaki enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Kurutma deneylerini, kurutma hava hızı 1,5 m/s olduğu ve kurutma havası sıcaklıklarının 55, 60 ve 70°C olduğu durumlarda yapmış ve çıkan verilerle analizlerini şekillendirmiştir. Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu üzerinden enerji ve ekserji analizlerini belirlemiş ve ekserji kayıplarını bulmuştur. Kırmızıbiber dilimleri yaklaşık 135 gramdan 15 grama düşmesinde, 9600-18000 s içerisinde, 189,95-3732,96 J/s arasında enerji kullanımı olduğunu belirlemiştir. Kurutma odası girişindeki ekserji 2,36-4,55 kJ/kg, çıkışındaki ekserji 1,68-4,45 kJ/kg arasında çıkmıştır. Ayrıca ekserji yok oluşu 0,06-1,49 kJ/kg arasında ve ekserji verimi de %67,28-97,9 arasında bulunmuştur. Kurutma havası sıcaklığının artışı ile enerji ve ekserji verilerinin de arttığını gözlemlemiştir.

Akpınar (2005), çalışmasını patates, elma ve kabak dilimlerinin konvektif bir kurutucuda ince tabaka kurutulmasının matematiksel modellenmesi üzerine yapmıştır. Uygun matematiksel modellemeyi seçmek ve belirlemek için yarı teorik veya deneysel olan 13 farklı model karşılaştırması yapmıştır. Bu modeller kurutma havası sıcaklığı, hızı gibi deneysel veriler kullanılarak uygulanmıştır. Kendi yaptığı deneylerin sonuçlarına göre çıkan analizler ile bu modelleri kıyaslamıştır. Bu modeller arasından en uygun olanının,  $R^2$  ve  $\chi^2$  değerlerinin uygunluğuna göre her bir ürün için test etmiş ve en uygun modelin çıktığı Midilli-Küçük modeli olduğuna kanaat getirmiştir. Kurutmada kurutma hava sıcaklığı 60-80°C ve hava hızı 1-1,5 m/s değerlerinde kullanmıştır.

Alibaş (2012), çalışmasını ilk nem seviyesi %85,9 olan, 100 g ağırlığında, 4 mm kalınlığında enginar dilimlerini nem seviyesini %9,52 seviyesine düşürmek üzerine kurutma deneyleri yapmıştır. Kurutma işlemini, kurutucu bir fırın içerisinde 1 m/s

hava hızı ve 50, 75 ve 100°C hava sıcaklıklarında yapmıştır. Sıcaklık artışının kurutma süresini düşürdüğünü belirlemiştir. Bu deneyler sonucunda kuruma eğrileri tanımlayarak yeni bir kurutma modeli geliştirmiştir.

Aktaş (2007), doktora tezi çalışmasında, ısı pompası destekli PID kontrollü bir kurutucu tasarlamış ve fındık kurutma deneyleri ile analizlerini yapmıştır. Kurutma havası sıcaklığı 40, 45, 50°C olarak seçilmiş ve ısı pompalı kurutucuda 30, 27, 24 saat sürelerde kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kurutucu sisteminin, deney sonuçlarına göre fındık kurutmaya uygunluğunu deneysel olarak kanıtlamıştır. Kurutma havası sıcaklığının kurutma havası hızından daha önemli etki gösterdiğini belirlemiştir. Kurutma havası sıcaklığının artması, kuruma süresinde azalma ile sonuçlanmıştır.

Gönül (2014), yüksek lisans tezinde çini kurutma üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yaklaşık % 30 nem içeriğine sahip çini materyalini, % 2 nem içeriğine düşürmek için konvektif bir kurutma fırınındaki kurumasını incelemiştir. Sıcaklık, bağıl nem, hava hızı gibi parametrelerin kuruma süresine etkisini incelemiştir. Üç farklı boyut hacminde hazırlanan kalıplar üzerinde bazı yüzeylerin yalıtılması ile üçer çeşit deneysel çalışmalar yapmıştır. Ürünün ağırlık kayıplarını 15'er dakika aralıklarla kurutma odasından alınan ürünün tartılması ile ölçerek yapmıştır. Deneyde hava sıcaklığının artması, havanın bağıl neminin azalması ve hava hızının artırılması ile kurutma sürelerinde belirli oranlarda düşüşlerin yaşandığı sonucuna varmıştır. Kurutmanın modellenmesi yapıp diğer kurutma modelleri ile karşılaştırılmasında en uygun modelin Page ve Midilli vd. tarafından çıkarılan model olduğu belirlenmiştir.

Hashim ve ark. (2014), çalışmaları konvektif sıcak havalı kurutucuda kabakların kurutma işlemlerinin kinetik modellenmesi üzerine olmuştur. 2 ve 4 mm kalınlıklarındaki 30 kabak örneğinin, 50, 60, 70°C kuru hava sıcaklıklarında 11 saat kurutulmasını gerçekleştirmişlerdir. Kurutma verileri MR (nem oranı) değerleri elde edilmiş ve kurutma modellenmesi yapılmıştır. Bu sonuçlara göre en iyi kurutma modelini de seçmişlerdir. Sıcaklıktaki artışın kuruma süresini düşürdüğünü, kalınlığın küçük olması da kurutma süresinde düşüşe ve nem oranının artmasına neden olduğunu belirlemişlerdir.

Hayaloglu ve ark. (2005), çalışmalarında süzme yoğurtun konvektif tip bir tepsi kurutucuda, 3 mm sabit kalınlık için, hava sıcaklığının 40, 45 ve 50°C ve hava hızının 1, 1,5 ve 2 m/s olduğu durumlardaki kurutma davranışlarını incelemişlerdir. Hava hızının ve sıcaklığının artmasının kuruma süresinde düşüşe neden olduğunu görmüşlerdir. Farklı kurutma modelleri ile yapılan deneyleri kıyaslayarak, en uygun olan modeli seçmişlerdir.

Heybeli (2017), doktora tezinde Stanley erik çeşidi üzerinde farklı kurutma metotları kullanılarak kurutma karakteristikleri belirlenmesinde çalışmıştır. Kurutulacak ürünlerin bir kısmına ön işlem uygulanmıştır. Deneylerde ısıtılmış hava, mikrodalga ile ısıtılmış hava, kızılötesi ışınlar ile ısıtılmış hava kullanılmıştır. Sabit 2 m/s kurutma hava hızında çalışmış ve farklı kızılötesi ışın gücü ve farklı kuru hava sıcaklıklarında çalışmıştır. Kurutma işlemini, ürünün yaş baza göre nem içeriği % 20'ye düşene kadar devam ettirmiştir. Sonuçlarda ön işlem görmüş, kızılötesi ışın destekli sıcak hava kurutmalı deneylerin kuruma süresi, ön işlem görmeyenlere oranlara daha kısa olduğunu ve aynı şekilde sadece ısıtılmış hava ile kurutulmasına oranla da daha kısa olduğunu gözlemlemiştir.

Kaya ve ark. (2016), aynı boyuttaki kabak ve patlıcan dilimlerinin kurtulması üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kurutma havasında 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s hızları ve 40°C, 50°C, 60°C sıcaklıkları kullanılarak konvektif bir kurutucuda deneyler yapmışlardır. Nem oranları bulunmuş ve kurutma modellemesi yapılarak, diğer modellerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında diğer modeller arasında Henderson-Pabis ve iki terimli eksponansiyel modeller ile uygunluğunu görmüşlerdir. Hız ve sıcaklığın artmasıyla kütle taşınım olayının arttığını ve kuruma süresinin azaldığını gözlemlemiştir.

Kılıç (2014), yüksek lisans tezinde ülkemizde yetiştirilen bazı sebze ve meyvelerin farklı kurutma havası sıcaklıklarındaki kurutma karakteristikleri üzerine çalışmıştır. 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarında deneyler gerçekleştirilmiş ve çıkan veriler ile nem oranları elde edilmiştir. Kurutma hava sıcaklığının artması ile kuruma süresindeki azalmayı gözlemlemiştir. Kurutma davranışları ince kurutma modelleri ile ifade edilmiş ve modellenmesinde üç yarı teorik model kullanılmıştır. Deneysel elde edilen kuruma eğrilerinin Newton, İki Terimli, Henderson ve Pabis kurutma modelleri ile

yakın olduğunu tespit etmiştir. Her üç kurutma modelinin yapılan regresyon analizleri sonucunda regresyon katsayısı ( $R^2$ ) değerleri 0,98'den büyük çıkmış ve modellerin uygunluğunu belirlemiştir.

Kırmızıyaka (2016), yüksek lisans tezinde ıspanak ve ısırgan otunun kurutulmasında halojen ısıtıcılı ve konvektif sistemlerin kurutma performanslarının kıyaslanması üzerine çalışmıştır. Kurutmada, haşlama ön işlemleri yapıldıktan sonra kurutma işlemi için her iki metotta da 60°C, 70°C, 80°C sıcaklıklarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan regresyon testlerinde yapılan ayrı ayrı süre, sıcaklık, ön işlem uygulamalarının ağırlık kaybına etkisini önemli oranda görmüştür. Kurutma sistemleri arasındaki kıyaslamaları nem içeriği, ağırlık kaybı, su aktivitesi, kuruma hızı, renk değerleri gibi çeşitli sonuçlarla yapmıştır. Yapılan deneyler ardından halojen ısıtıcılı kurutucu sisteminin konvektif kurutucu sistemine göre kuruma süresinde daha düşük olduğu sonucuna varmıştır.

Köse (2010), çalışmasında hem konvektif hem de UV ışınları ile kombine edilmiş konvektif bir kurutucudaki ökse otunun, kurutma davranışlarını incelemiştir. Kurutma deneylerini, kurutma havası sıcaklığı 60, 70 ve 80°C ve hızı 0,5, 1 ve 1,5 m/s olan değişken parametrelerde yapmıştır. Kurutma sıcaklığının, her iki kurutma metodunda da en önemli etki olduğunu gözlemlemiştir. Sıcaklık artışı kurutma süresini düşürmüştür. Kurutma hızlarında, 1 ve 1,5 m/s hızlarının benzer sonuçlar verdiğini ve 0,5 m/s hızının sonuçlarına göre daha iyi veriler elde ettiğini belirlemiştir.

Lüle (2014), doktora tezinde çarşır mantarının kurutulması üzerine çalışmıştır. Kurutma metotları olarak güneşte sergide kurutma, güneşte açıkta kurutma, güneşte gölgede kurutma, sıcak havalı kabin tipi kurutucuda kurutma ve mikrodalga kurutma yöntemleriyle çalışmıştır. Mantarlar kurutmaya girmeden önce kök kısımlarından ayrılarak temizleme ön işleminden geçirilmiştir. Sıcak havalı kabin tipi kurutucuda ortalama dış sıcaklık 28,2°C, iç ortam sıcaklığı 52,1°C ve parçadan havanın çıkış hızı 2,12 m/s olarak ölçülmüştür. Her bir kurutma yönteminin ayrı ayrı olumlu ve olumsuz yönlerini kıyaslamıştır. Deneylerde uygulanan sıcak havalı kabin tipi kurutucunun rehidrasyon oranları diğer kurutucu yöntemlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Yine sıcak havalı kabin tipi kurutma yöntemi ile kuruma süresinin daha kısa olduğunu ve

güneş enerjisinden yararlanma oranının yaklaşık %12,55 düzeyinde olduğunu gözlemlemiştir.

Mançuhan (2011), çalışmasında tünel kurutucuda yaş tuğla kurutulmasındaki ölçülen değerlerin kullanılmasıyla enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Yaş tuğlalar kurutma deneylerinde nem alma ve buharlama bölgeleri olmak üzere iki bölümden geçirilmiştir. Farklı sıcaklık ve bağıl nemlerdeki hava, kurutma için tuğla üzerine gönderilmiştir. Sonuçların akabinde yapılan analizlerle yaş tuğladaki bağılı suyun buharlaşmasının en büyük ekserji yok oluşuna sebep olduğunu gözlemlemiştir. Tünel kurutucunun ekserji verimi %43,7 ve ekserji kaybı %52,7 olarak belirlenmiştir.

Mançuhan ve ark. (2015), çalışmalarında üç farklı oranda kil içeriğine sahip yaş tuğlaların tünel kurutucuda, farklı kurutma havası sıcaklıkları ve hızlarında kurutulması üzerine deneysel çalışmada bulunmuşlardır. Deneyler sonucunda kurutma havası sıcaklığının artmasıyla kuruma sürelerinde azalma gözlemlemiştir. Numune kil yüzdesindeki artışın ise kurutma süresini de uzattığı görülmüştür. Numune nem içeriği, sıcaklık, kuruma küçülmesi gibi verilerin zamana bağlı değişimleri grafik haline getirilmiştir. Kurutma havası sıcaklığı artması, numune kuruma küçülmesinde pozitif etki sağlamıştır.

Midilli ve ark. (1999), yaptıkları çalışmada mantarların ve Anzer balı polenlerinin kuruma sürelerini araştırmışlardır. Mantarların deneyleri hem laboratuvar hem de atmosferik ortamda yapılmış, polenler ise hem atmosferik hem de elektrikli ısıtıcı ile ısıtılan dolapta kurutulmuştur. Polen kurutma deneyinde dolap sıcaklığı 45°C'de tutulmuştur. Her bir deney için ve her bir ürüne göre kuruma eğrilerini ve kütle değişim oranlarını çıkarmışlardır. Mantarların kurutma kabinlerinde 50°C sıcak hava kullanılarak 5-6 saatte kurduğunu, polenlerin 40-45°C sıcaklıklarda renk, koku, yapı kaybetmeden 2,5-3 saatte kurduğunu gözlemlemiştir. Dış havaya maruz kalan mantarların kurutma işlemleri, hava şartlarının sabit olmamasından dolayı zor olmuştur. Polenlerin kurutulmasında sıcaklığın 45°C'den daha yüksek olmasının polenlerin vitaminini ve özelliklerini azalttığı görülmüştür.

Mishra ve Shiby (2007), çalışmaları, Hindistan'da tüketilen en meşhur mayalanmış süt ürünlerinden birisi olan 'dahi' isimli ürünün kurutulması üzerine olmuştur. Başlangıç



nemi 5,7 kg su/kg kuru madde olan dahinin, konvektif hava kurutucuda, laboratuvar ortamında, neminin 0,04 kg su/kg kuru madde olana kadar kurutulması şeklinde deneysel çalışmasını yapmışlardır. Deneylede değişken olarak dahi kalınlıkları (3, 4, 5 mm), kuru hava sıcaklıkları (45, 50, 55°C) ve hızları (1,5, 2, 2,5 m/s) kullanılmıştır. Hava sıcaklığının artması ve numune kalınlığının azalması ile kuruma süresinde düşüş görmüşlerdir.

Mwithiga ve Olwal (2004), çalışmalarını, konvektif sıcak hava kurutucuda lahana kurutma davranışlarını inceleme üzerine yapmışlardır. Deneyle, sabit 1 m/s kurutma havası hızı altında, 30, 40, 50 ve 60°C kuru hava sıcaklıklarında ve 10, 20, 40 ve 50 mm kalınlıklarda olan dilimli lahana yaprakları ile yapmışlardır. Sonucunda kalınlığın azalması ve kurutma hava sıcaklığının artmasıyla kuruma oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Kurutma modellemesini yapıp, literatürdeki diğer kurutma modellemeleri ile karşılaştırmalarını yapmışlardır.

Özgen (2014), konvektif tip bir kurutucu tasarlayıp imal ederek elma kurutma üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Deneylede 20x20x4 mm boyutlarında elma numuneleri kullanmıştır. Kurumayı etkileyen parametreler olarak 45°C sıcaklığında, 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s hızlarında çalışmıştır. Kurumaya başlayan ürünün zamana bağlı olarak değişen nem içeriği, nem oranı, sıcaklık ve kütle kaybı grafiklerini oluşturmuştur. Hava hızı arttıkça kuruma süresinde de belli oranda düşüş yaşanmıştır. Kuruma havası hızı 1,5 m/s için kuruma süresi 150 dakika, 1 m/s için 225 dakika, 0,5 m/s için 285 dakika olduğunu gözlemlemiştir.

Öztop ve Akpınar (2007), patates ve elma dilimleri için kurutma işlemlerindeki nem alma işleminin, nümerik ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılmasını yapmışlardır. Siklon tip kurutucu kullanarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Deneyle kurutma havası sıcaklığı 60, 70 ve 80°C ve hızı 1, 1,5 m/s olduğu şartlarda yapılmıştır. Sıcaklık artışının kuruma süresinde düşüşe gittiğini görmüşlerdir. Sonuçlar kıyaslandığında, deneysel ve nümerik verilerin birbirine benzer çıktığını belirlemişlerdir.

Saçılık ve Eliçin (2005), çalışmalarında organik elma dilimlerinin, konvektif sıcak hava kurutucuda, ince tabaka kurutma davranışlarını incelemişlerdir. Deneyle, 5 ve 9 mm kalınlıktaki numuneler üzerine, 40, 50 ve 60°C kurutma havası sıcaklıkları ile

yapılmış ve sıcaklık ve kalınlık farkının kurutmayı nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Bu şartlar altındaki kurutma süreleri 240 ile 460 dakika arasında değişmiştir. Kurutma hava sıcaklığının artmasının ve dilim kalınlıklarının azalmasının kuruma süresini azalttığını ve kuruma oranını artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlar ile en uygun kurutma modelini de belirlemişlerdir.

Saçılık ve ark. (2005), konvektif sıcak havalı kurutucuda Üryani eriğinin laboratuvar ortamında kurutma davranışlarını incelemişlerdir. Deneylede 0,8 m/s kurutma havası hız ve 50, 70°C sıcaklık parametreleri altındaki değişimleri araştırmışlar ve sonuçlara en uygun matematiksel modeli belirlemişlerdir. Çalışma sonuçları, kurutma eğrilerinin, kuru hava sıcaklıkları ve ön işlem ile büyük oranda etkilendiğini göstermiştir. Kurutma havası sıcaklığının artması kuruma süresinde azalma olduğu sonucuna varmışlardır.

Singh (2010), çalışması zorlanmış taşınım ile güneş enerjili kurutucuda ince tabaka ipek koza kurutulması üzerine olmuştur. Isıtılan kuru hava 50 ve 75°C sıcaklıklarında olmaktadır. İnce tabaka kurutma modellemeleri ile karşılaştırılmasını yapmıştır ve en uygun modelin Wang ve Singh kurutma modeli olduğunu belirlemiştir. Kurutma işlemi 16-19 saat arasında sürmüştür. Elektrik enerjisinin tasarrufu yaklaşık 0,75 kWh/kg kozaların kurutulması olarak bulunmuştur.

Tzempelikos ve ark. (2015), çalışmalarında ayva dilimlerinin konvektif tip bir kurutucuda deneysel çalışmasını incelemişlerdir. Deneylede 40, 50 ve 60°C kuru hava sıcaklıklarında, 2 m/s sabit hava hızı ve sabit %10 bağıl nem oranında yapılmıştır. Sıcaklık artışının kurutma olayına büyük etkisi olduğunu görmüşlerdir. Özellikle 40°C den 60°C ye olan değişimin toplam kuruma zamanının yaklaşık %54 düşmesine neden olmuştur. Tüm kurutma işlemlerinin azalan kuruma oranı periyoduna göre tanımlamasını yapmışlardır.

Vega-Galvez ve ark. (2011), yaptıkları çalışmalarda, elma dilimlerinin konvektif sıcak hava kurutucuda kurutulması sırasında, kuru hava sıcaklığının ve hızının, kurutma kinetiği ve kalite davranışları üzerine etkisini araştırmışlardır. Deneylede 40, 60 ve 80°C sıcaklıklarında ve 0,5, 1 ve 1,5 m/s hava hızlarında gerçekleşmiştir. Bu deneylede sonucunda sıcaklık ve hız değişimlerinin ayrıca doku, renk, fenolik madde,

antioksidan kapasitesi üzerine de etkilerini incelemişlerdir. Kurutma hava sıcaklığı ve hızı artışlarının kuruma oranında ve süresinde olumlu yönde değişim yaptığını gözlemlemişlerdir.

Zecchi ve ark. (2010), maydanoz ve mantarların vakum kurutucu ve konvektif tip kurutucu birleşimi ile kurutulması deneyinde, işlem zamanının en aza indirilmesi ve kurutma modellenmesi yapılması üzerine çalışmışlardır. Ürüne bağlı olarak bu teknolojik kombinasyonun, toplam kuruma süresini düşürdüğünü ve kalite üzerindeki olumsuz etkilerden kaçındığını gözlemlemişlerdir. Deneysel kurutma eğrileri, 35, 45 ve 55°C sıcaklıklarda kabin tip vakum kurutucuda ve konvektif kurutucuda belirlendi. Sıcaklığın en yüksek seviyesinde, ürün kurutma süresinin en az olduğunu belirlemişlerdir. Teorideki kurutma modelleri ile kıyaslaması yapıp en uygun model belirlenmiştir.

Zhu ve Shen (2014), şeftali dilimlerinin laboratuvar ortamında konvektif sıcak havalı tünel kurutucu ile yapılan deneylerin kurutma davranışını incelemişlerdir. Bu deneylerdeki değişkenler kurutma havası sıcaklığı (60-80°C arası), hızı (0,423-1,12 m/s arası) ve numune kalınlığı (2, 3, 4 mm) üzerinde olmuştur. Beş farklı sıcaklık, beş farklı hız ve üç farklı kalınlık değerleriyle yapılan deneylerde, sıcaklığın artması, hızın artması, kalınlığın azalması ile kuruma süresinin azaldığını, kuruma oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen verilerle matematiksel modellemesi yapılarak, diğer modeller arasından en iyi uyumluluk veren modeli belirlemişlerdir.

## 5. DENEY MATERYALİ VE YÖNTEM

### 5.1. Materyal

Kurutma işlemi konsantrasyon farkından kaynaklan kütleye transfer sürecidir. Kütle transferi, kurutulacak maddenin içindeki suyun buharlaşması için malzemeye iletilmesi gereken ısı ve buharlaşan suyun hava akımı yardımı ile ortamdaki uzaklaştırılması olarak açıklanmaktadır. Kurutma işlemi bu iki olayın birlikte gerçekleşmesi ile oluşur. Kurutma hızını kontrol etmek için bu iki sürecin doğru yürütülmesi gerekmektedir. Konsantrasyon farkına bağlı olarak oluşan kuruma sürecinin şekli, kurutulacak ürünün özelliklerine, kurumanın hangi şartlarda gerçekleştiğine ve kurutulacak ürünün kuruma evrelerinden hangi aşamalara maruz kaldığına bağlıdır.

Yapılan deneylerde kurutma ürünü olarak Çorum yöresinde üretim ve tüketim bağlamında önemli bir yere sahip olan tuğla kullanılmıştır. Deneylerde 19x19x13,5 cm ebatlarında tuğla kullanılmıştır. Kurutmaya tabi tutulacak tuğlalar, gerçek şartlarda doğrudan üretim tesisinden temin edilmiş, üretim sürecinin hemen sonunda uygun şartlarda deney sistemine taşınmıştır. Deneyler Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

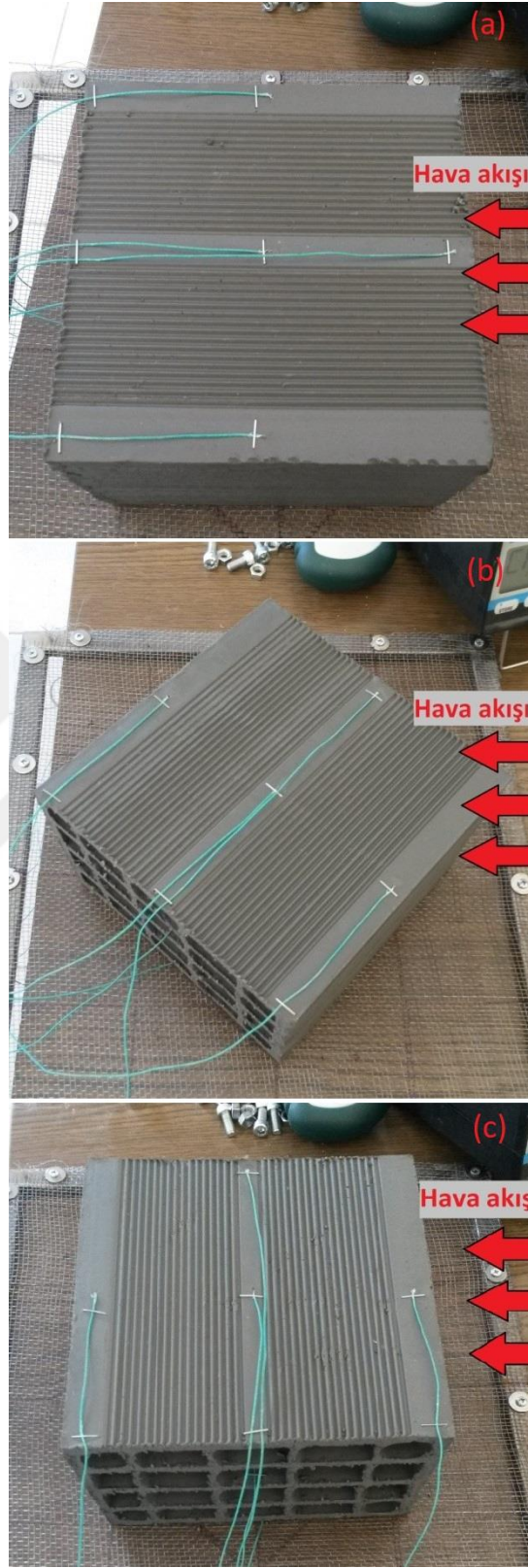
### 5.2. Deney Parametreleri

Deneylerde üç farklı akışkan hızı ve üç farklı akışkan sıcaklığı kullanılmıştır. Bununla birlikte belirlenen tuğlanın, akışkana karşı üç farklı açıdan deneyler gerçekleştirilmiştir. Kurutma sıcaklığı olarak 62, 76 ve 90°C olmak üzere üç farklı sıcaklık tercih edilmiştir. Öncelikle uygulamada tuğla kurutma prosesinde genellikle pişirme fırını atık ısı kullanılmaktadır. Bu da 90°C ile 110°C arasında olmaktadır. Yapılan deneylerde uygulamadaki 90°C sıcaklık referans alınarak sıcaklığın düşmesine bağlı olarak kuruma kinetiğinin daha düşük akışkan sıcaklıklarındaki davranışını incelemek için 62°C ve 76°C sıcaklıklarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Benzer olarak uygulamada Çorum bölgesi üretim tesislerinde tünel tip kurutucu kullanılmaktadır. Tesislerde yapılan ön incelemelerde, tünellerdeki hava hızının

yaklaşık 2,1-2,2 m/s düzeylerinde olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak deneysel çalışmada kurutma sistemi içerisindeki hava hızı 1,75 m/s ile 2,62 m/s arasında değiştirilmiştir. Kurutma sistemi şartlandırma ünitesi içerisinde hız ölçümünün mümkün olmaması ve test sistemi giriş bölgesinde yapılan ölçümlerin, pervane tipi anemometre ölçüm sınırlarının üzerinde olması nedeniyle hız ölçümleri pitot tüpü yardımıyla yapılmıştır. Bu amaçla tez ünitesi çıkışına boru çapının on katı olacak şekilde bir mesafe bırakarak pitot tüpü yerleştirilmiştir. Pitot tüpü üzerinde okunan basınç ile kanal hızı arasında ilişki belirlenerek, pitot tüpünden okunan basıncın 24, 37 ve 50 Pa olacak şekilde debi ayarlaması yapılmıştır. Ayrıca kurutucu hava hızına göre tuğla konumunun, tuğla kurutma kinetiği üzerindeki etkisini belirlemek için Resim 5.1'de görüldüğü gibi tuğlalar akışa karşı 0, 45 ve 90 derece olacak şekilde konumlandırılmıştır.

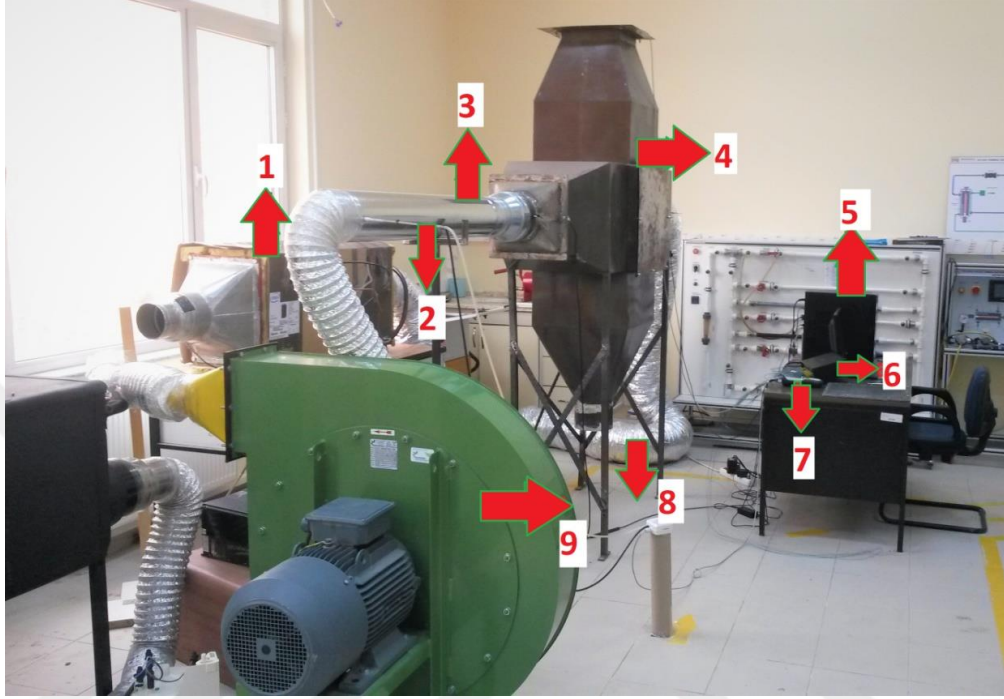
Bilindiği gibi buharlaşma sıcaklığı ile basınç arasında doğru ilişki vardır. Yani basınç azaldıkça daha düşük sıcaklıklarda buharlaşmanın oluşacağı göz önüne alınarak tüm deneyler hem basma şartlarında hem de emme (vakumlama) şartlarında gerçekleştirilmiştir.



**Resim 5.1.** Tuğla açılarında göre, (a) 0 derece, (b) 45 derece, (c) 90 derece

### 5.3. Deney Düzenegi

Deneyde kullanılan araçlar ve ekipmanlar Resim 5.2’de gösterilmiştir.



**Resim 5.2.** Deney düzenegi

- |                              |                           |
|------------------------------|---------------------------|
| 1.Rezistanslı ısıtıcı        | 2.Pitot tüpü              |
| 3.Soba borusu                | 4.Şartlandırma ünitesi    |
| 5.Çalışma bilgisayar         | 6.Sıcaklık veri toplayıcı |
| 7.Veritoplayıcı              | 8.Yün izoleli telli boru  |
| 9.Radyal tip endüstriyel fan |                           |

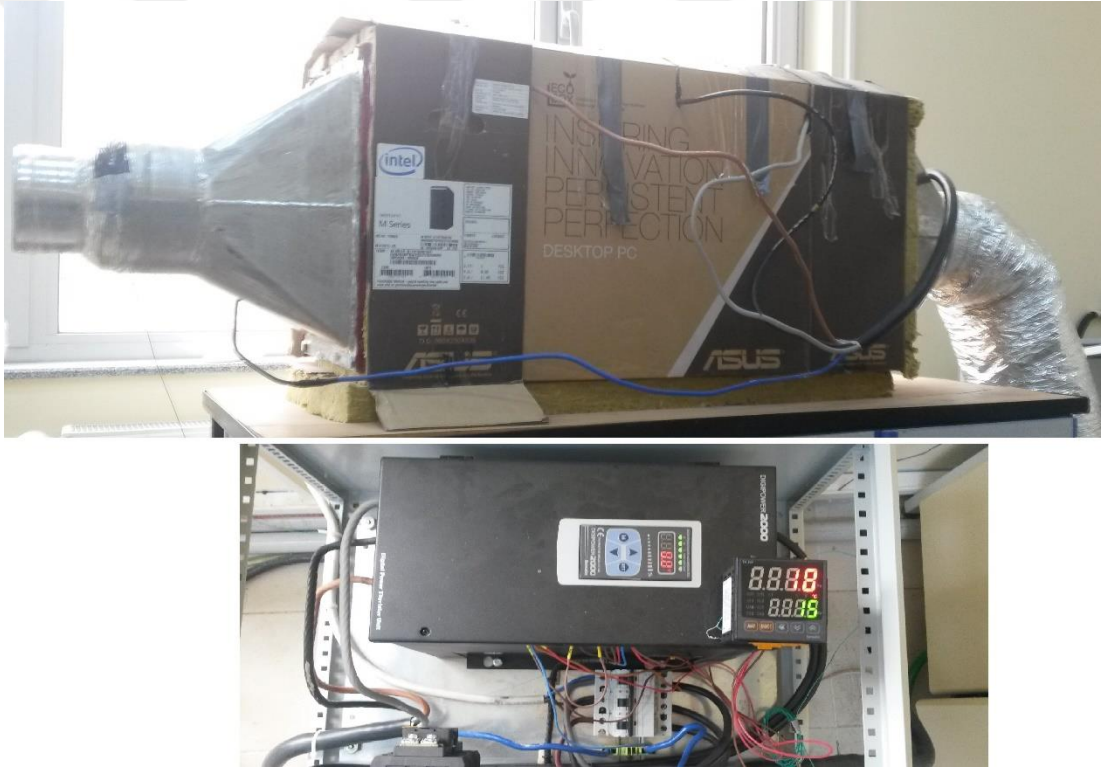
Deney düzeneginde 1 adet kurutma ünitesi tasarlanmıştır. Kurutma ünitesi çıkışında akışın tam gelişimini sağlamak amacıyla 2 m uzunluğunda bir boru kullanılmıştır. Boru esnek alüminyum hortumlar yardımıyla 18,5 kW’lık yüksek basınçlı bir radyal fana bağlanmıştır. Radyal fandan emme deneyleri yapıldığında bu alüminyum esnek hortum fan girişine bağlanmıştır. Basma deneyleri yapıldığında atmosfere bırakılmıştır. Fan motor devri Hitachi-Omron marka SJ700D model frekans konvertörü ile istenen değerlerde ayarlanabilmektedir. Fandan elde edilen hava bir rezistanslı ısıtıcı kanala gönderilmektedir. Burada hava PID kontrollü olarak ikinci bir frekans konvertörü yardımıyla istenen değere ısıtılabilir.

Deneyde kullanılan materyaller ve sistem araçlarının özellikleri aşağıda verilmiştir.



### 5.3.1. Rezistanlı ısıtıcı

Kurutma odasında bulunan yaş tuğlayı kurutmak için gönderilen havanın, ısıtılması için kullanılır. Isıtıcıdan çıkan hava istenilen sıcaklıkta tuğla üzerine gönderilir. Değişen hava sıcaklıkları da kuruma süresini belirli oranlarda etkiler. Isıtıcı olarak Thyristor Regulator Digi Power 2000 cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile hızlı, doğru, net sonuçlar elde edilebilir. Isıtıcının güç kontrol ünitesine bağlanan PID denetleyici sıcaklık kontrol cihazı ile istenilen sıcaklık ayarları yapılmıştır. Girilen sıcaklık değerine çıkabilmek için makine çalışır. O noktaya ulaştığında kendini otomatik olarak kapatır. Resim 5.3’de gösterilmiştir.



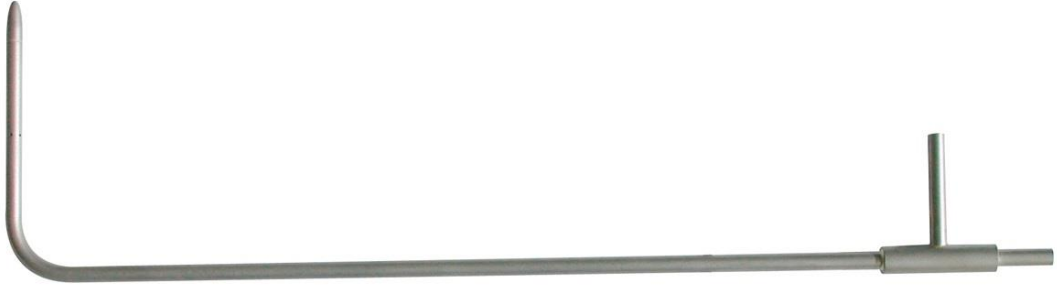
**Resim 5.3.** Rezistanlı ısıtıcı ve kontrol ünitesi

### 5.3.2. Pitot tüpü

Kanal içerisinden belli bir basınçta hava akışı olmaktadır. Bu basınçtaki havanın akış hızını ölçmek için hassas ölçüm cihazı olan pitot tüpü kullanılmıştır. Pitot tüpü, ucundaki delik hava akışına paralel olacak şekilde yerleştirilir. Kanal içerisinde akan havanın oluşturduğu toplam fark basıncını kullanarak, akışkanın kanal içi hızını ölçmeye yarayan bir cihazdır. Yüksek kalitede ve doğrulukta değerler okunur.



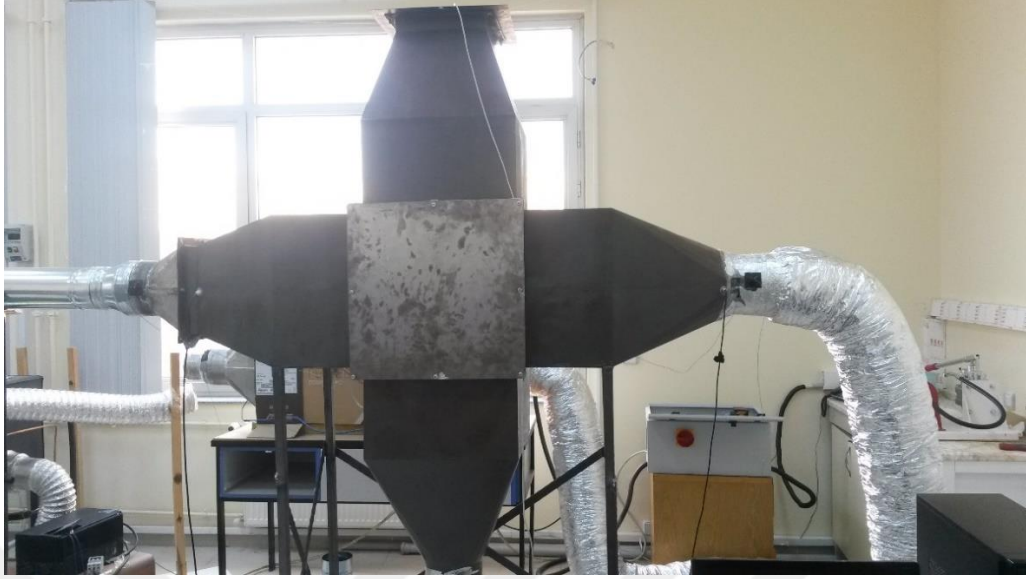
Deneyde Resim 5.4’de gösterilen KİMO TPL marka 6 mm çapında, 300 mm boyunda, paslanmaz çelikten yapılan bir pitot tüpü kullanılmıştır.



**Resim 5.4.** Pitot tüpü

### **5.3.3. Şartlandırma ünitesi**

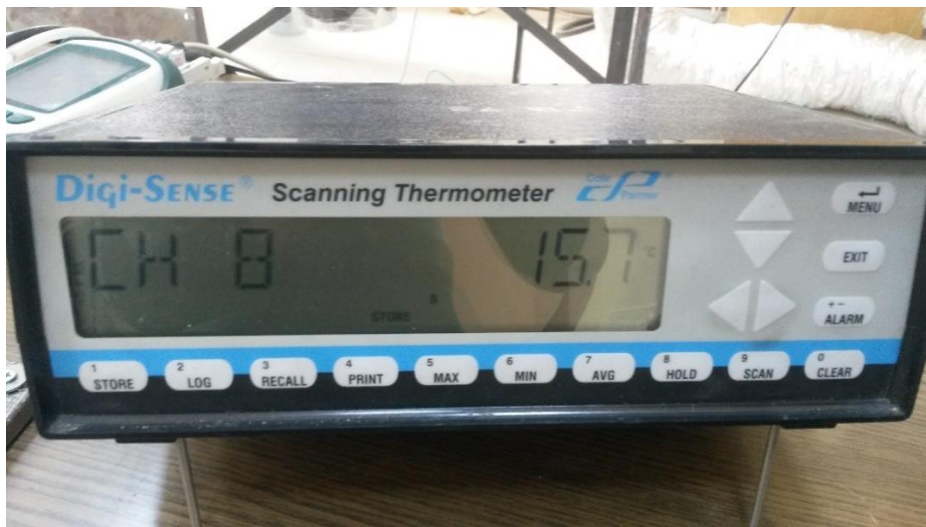
Şartlandırma ünitesi ya da kurutma odası diye adlandırabileceğimiz, tuğlanın kurutulduğu bölümdür ve Resim 5.5’de gösterilmiştir. Kabin 500x500x500 mm boyutlarındadır. İçerisine yerleştirilen delikli bir tepsi üzerine 1 adet tuğla koyularak işlem yapılır. Tepsi kütle ölçere bağlı olarak havada asılı durmaktadır. Şartlandırma ünitesine girişte ve çıkışta ısı çift bulunmaktadır. Bu sayede yaş tuğlaya giren hava sıcaklığı ile tuğladan çıkan hava sıcaklıkları karşılaştırılmış olacaktır. Kabinin bir kısmı yün izoleli alüminyum esnek boru ile ısıtıcıya, diğer tarafı alüminyum soba borusu ve alüminyum esnek boru ile endüstriyel fana bağlanmıştır ya da açıkta bırakılmıştır.



**Resim 5.5.** Şartlandırma ünitesi

#### 5.3.4. Sıcaklık veri toplayıcı

Yaş tuğlanın kuruma süresince gösterdiği sıcaklık değişimlerini ölçmek için, tuğla yüzeylerine ve içine 6 adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Ayrıca ısıtıcı girişi-çıkışı ve şartlandırma ünitesi girişi-çıkışı olmak üzere toplam 10 adet olan ısı çiftleri digi-sense markalı veri toplayıcıya bağlanarak değerleri okunmuştur. Resim 5.6'da gösterilen Digi-Sence Scanning Thermometers, 12 kanalı vardır ve bağlanılan verileri depolama ve görüntüleme özelliğine sahiptir. Otomatik veya elle görüntüleme sağlanabilir. Isıl çift tipi her kanal için farklı seçilebilir. Okunan veriler bilgisayara aktarılabilir.



**Resim 5.6.** Veri toplayıcı

### 5.3.5. Veri toplayıcı

Kanal içindeki akışın hızını, kurutma odasına giren ve çıkan havanın bağıl nemini ölçmek için kullanılmıştır. Bu cihaz pitot tüpünün ölçtüğü hız değerini okumamızı sağlar. Ayrıca tuğlanın konulduğu tepsiye bağlı ağırlık ölçerin değeri de bu cihazdan okunmuştur. Resim 5.7’de gösterilen Almemo marka 2990-8 model veri toplama cihazı ile sıcaklık, nem, hava ve su debisi, basınç, volt, amper vs. gibi toplamda 65 standart ölçüm değerleri okunmaktadır. Veri toplayıcı özelliği olan bu cihazla veriler daha sonra kullanılmak için depolanabilir. Ayrıca Almemo veri toplayıcı cihaza pitot tüpünün okuduğu değeri sayısal ifadeye döken Kimo marka CP112-PN model basınç okuyucu bağlanmıştır. Bu cihaz basma ve çekme basınçlarını maksimum 1000 Pa’ a kadar okuyabilir.



**Resim 5.7.** Almemo veri toplayıcı ve Kimo basınç okuyucu

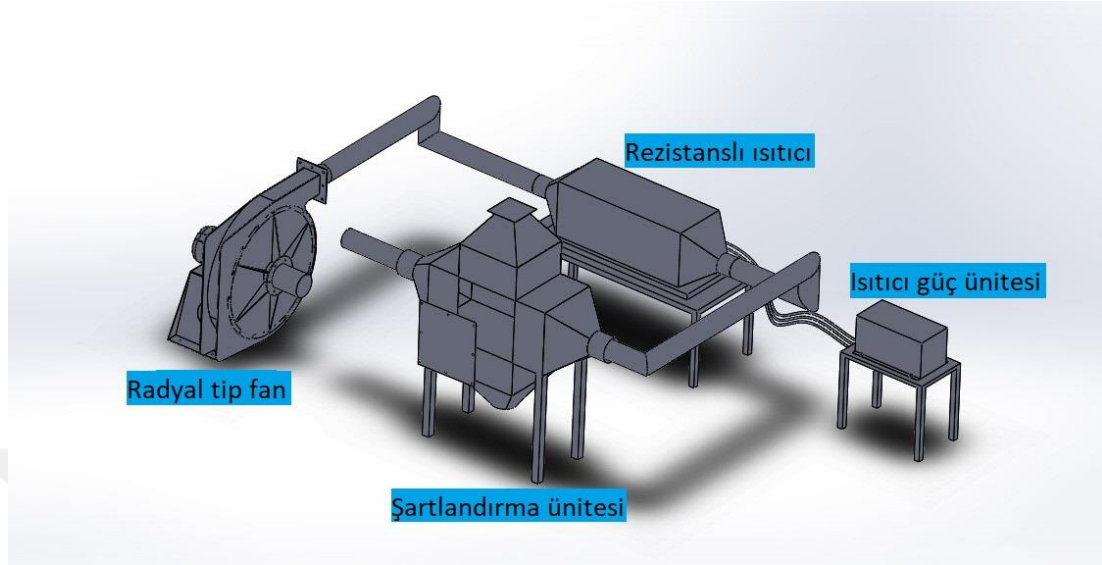
### 5.3.6. Radyal tip endüstriyel fan

Radyal tip fan ile akışkan olarak kullanılan havayı sistemde dolaştırma ve tuğlaların kuruma sırasındaki nemini uzaklaştırma işlemi yapılmaktadır. Radyal fanın devir sayısının değiştirilmesi ve istenilen güçlere çıkılması için fan bir frekans konvertörüne bağlanmıştır. Değiştirilebilen frekanslar ile havanın hızı istenilen seviyelere ayarlanmaktadır. Fan tercihi Euroventilatori marka APG 712/A model 2950 rpm dönme hızına sahip 18,5 kW motor gücünde salyangoz tipi bir fan olmuştur. Resim 5.8'de gösterilmiştir.



**Resim 5.8.** Salyangoz tip fan ve frekans konvertörü

#### 5.4. Deneylerin Yapılışı



Şekil 5.1. Deney düzeneği çizimi

Şekil 5.1’de deney düzeneğinin yerleşimi gösterilmiştir. Deney sistemi test ünitesinde 1 adet tepsi bulunmaktadır. Tepsi test ünitesi üzerine sabitlenmiş olan 50 N’ luk yük hücreğine asılı konumda bağlanmıştır. Yük hücresi Almemo marka bir veri toplayıcıya uygun bir konvektör yardımıyla veri aktarabilmektedir. Kesimden alınan yaş tuğla üzerinde, tuğla yüzeyine tuğla içerisine olacak şekilde 6 farklı noktaya ısı çiftleri yerleştirilmiştir. Ayrıca test ünitesi giriş-çıkış ve ısıtıcı giriş-çıkış sıcaklığı olmak üzere 10 noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri 0,2 mm kalınlığındaki K tipi bakır konstantan ısı çiftleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tuğla, test ünitesine tepsi üzerine yerleştirildikten sonra, test ünitesi kapatılarak izole edilmiştir. Daha sonra frekans konvertörü yardımıyla fan devri ayarlanarak kurutma havasının basılması ya da emilmesi sağlanmıştır. Pitot tüpü üzerinde basınç farkının 24, 37 ya da 50 Pa olacağı şekilde fan devri üzerinde ayarlama yapılmıştır. Pitot tüpü basınç farkı sağlandıktan sonra kurutma ünitesi giriş sıcaklığının 62, 76 ya da 90°C olabilmesi için PID kontrollü ısıtıcı rezistans devreye sokulmuştur. PID kontrol yardımıyla test ünitesi giriş sıcaklığının istenen değerde olabilmesi için belirlenen hava debisine göre ısıtıcı rezistansın çekeceği güç otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Test ünitesi çıkışındaki hava nemi ölçülmüştür. Deney sisteminde nem ve basınç ölçümü için Almemo marka 2990-8 model veri toplayıcı

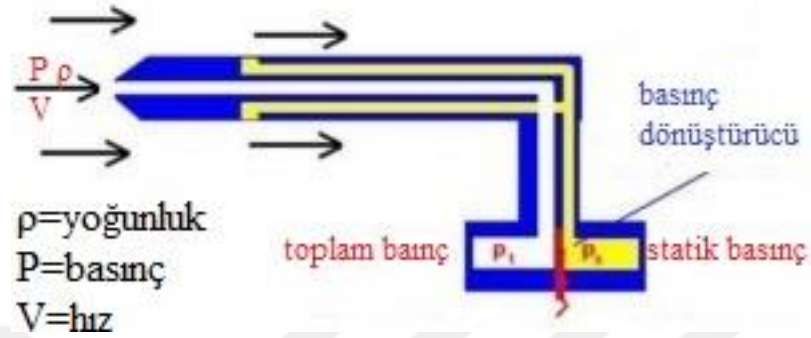


kullanılmıştır. Ayrıca sıcaklık ölçü için 12 kanallı Digi-Sence marka 92000-05 model veri toplayıcı kullanılmıştır. Ölçümler 15 dakikada bir yapılmış olup kayıt altına alınmıştır. Her bir basınç, sıcaklık ve tuğla konum deneyleri için emme ve basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylere başlandığında zaman parametresi 0 kabul edilerek 15 dakikada bir kütle ölçümleri, diğer parametrelerle birlikte kayıt altına alınmıştır. Her 15 dakikada bir ölçülen kütle değerlerinin 1,5 saat süreden sonra değişmediği ya da çok küçük değişimler gözlemlendiğinde kurumanın gerçekleştiği kabul edilerek değerler sonlandırılmıştır.



## 6. MATEMATİKSEL MODELLEME

### 6.1. Verilerin Analizi



Şekil 6.1. Pitot tüpünün çalışma prensibi (Meseli, 2011)

Şekil 6.1’de pitot tüpünün çalışma prensibi gösterilmiştir. Burada Bernoulli denklemi (6.1) sadeleştirilmiş şekilde uygulanırsa;

*statik basınç + dinamik basınç = toplam basınç*

$$\left( P_s + \rho \times \frac{V_{pit}^2}{2} \right) = P_t \quad (6.1)$$

burada hız ibaresi çekilip (6.2) düzenlenirse (6.3);

$$V_{pit}^2 = \frac{2(P_t - P_s)}{\rho} \quad (6.2)$$

$$V_{pit} = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad (6.3)$$

buradaki  $V_{pit}$  pitot hızı olarak düşünülür.

Uygulanacak basınç ve sıcaklık değerleri ile  $Re_d$  boyutsuz sayısı çıkarılabilir (6.4);

$$Re_d = \frac{\rho \times V_k \times D_h}{\mu} \quad (6.4)$$

hidrolik çap ve kanal hızları da açılırsa (6.5) ve (6.6);

$$D_h = \frac{4A}{U} \quad (6.5)$$

$$V_k = \frac{V_{pit} \times A_{pit}}{A_k} \quad (6.6)$$

Formüllerde kullanılması için gerekli olan havanın dinamik viskozite değerleri ve yoğunluk değerleri sıcaklıkla değişeceği için, EK-1’de verilen 1 atm basınç altındaki havanın termodinamik özelliklerini veren tablodan gerekli veriler alınarak işlemler yapılmıştır (Çengel ve Cimbala). Bu işlemler sonucunda oluşan  $Re_d$ ,  $Nu_d$ ,  $V_k$  ve  $V_{pit}$  değerleri Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 6.1. Deney verileri**

Basınç farkı (Pa) / Sıcaklık (°C)	$V_{pit}$ (m/s)	$V_k$ (m/s)	$Re_d$	$Nu_d$
24/62	6,75	1,75	23547,12	64,41
24/76	6,89	1,78	22239,18	60,46
24/90	7,03	1,82	21251,25	58,20
37/62	8,38	2,17	29198,43	75,32
37/76	8,55	2,21	27611,57	71,89
37/90	8,73	2,26	26388,91	69,21
50/62	9,75	2,52	33907,85	84,89
50/76	9,94	2,57	32109,38	81,11
50/90	10,14	2,62	30592,45	77,89

## 6.2. Matematiksel Modellemeler

Tuğlaların üzerinde yapılan deneyleri kurutma modelleri ile karşılaştırma yapmak için nem oranı, kuru baz ve yaş baza göre nem içerikleri ve buradan gelen kuruma hızı gibi bazı değerler alınmıştır.



### 6.2.1. Nem oranı

Yaş alınan tuğlaların kurumaya girmeden önceki nem miktarı ve kurumada geçen 15'er dakikalık süre aralıklarıyla nem miktarları ölçülmüştür. Buradan yola çıkılarak deneysel nem oranı denklemi (6.7) kullanılmış ve zaman aralıklarındaki nem oranları ortaya çıkmıştır (Saçılık ve ark., 2006; Lüle, 2014).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6.7)$$

Burada;

MR : Nem oranı

$M_t$  : Ürünün t zamanındaki nem miktarı

$M_e$  : Ürünün denge nem miktarı

$M_0$  : Ürünün başlangıç nem miktarı

Denge nem miktarı ( $M_e$ ), başlangıçtaki nem içeriği ( $M_0$ ) ve sonraki zamanlardaki nem içeriğine göre çok düşük bir değer olduğu için  $M_e=0$  kabul edilmiştir (Akdaş, 2014). Buradan düzenlenip yazılırsa (6.8);

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (6.8)$$

Buradaki nem oranları, 15'er dakikalık aralıklarla alınan değerlerin birim nem oranlarını ifade etmektedir. Aynı zamanda ürünün zaman bazlı nem içerikleri yüzde olarak bulunmuş ve grafiklerle belirtilmiştir.

### 6.2.2. Nem içeriği ve kuruma hızı

Numunelerin farklı sıcaklık ve hızlardaki nem oranlarına göre o dakikadaki nem içerikleri belirlenmiştir. Yaş baza göre nem içeriği denklem 6.9'da verilmiştir (Heybeli, 2017). Kuru baza göre nem içeriği de yüzde hesabı olarak denklem 6.10 ile bulunmuştur. Ürünün nem miktarından yola çıkılarak da ürün kuruma hızları denklem 6.11'de bulunmuştur (Lüle, 2014).

$$X_{yb} = \frac{W_y - W_k}{W_y} \times 100 \quad (6.9)$$

Burada;

$X_{yb}$  : Ürünün yaş baza göre nem içeriği (%)

$W_y$  : Ürünün t zamanındaki yaş ağırlığı (g)

$W_k$  : Ürünün kuru ağırlığı (g)

$$X_{kb} = \frac{W_t - W_k}{W_k} \times 100 \quad (6.10)$$

Burada;

$X_{kb}$  : Ürünün kuru baza göre nem içeriği (%)

$W_t$  : Ürünün toplam ağırlığı (g)

$W_k$  : Ürünün kuru ağırlığı (g)

Ürünün gram olarak nem miktarına göre, birim zamanda ürün üzerinden buharlaşan nem miktarını gösteren, kuruma süresi-kuruma hızı grafiği oluşturulmuştur.

$$KH = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (6.11)$$

Burada;

$KH$  : Ürün kuruma hızı (g/dak)

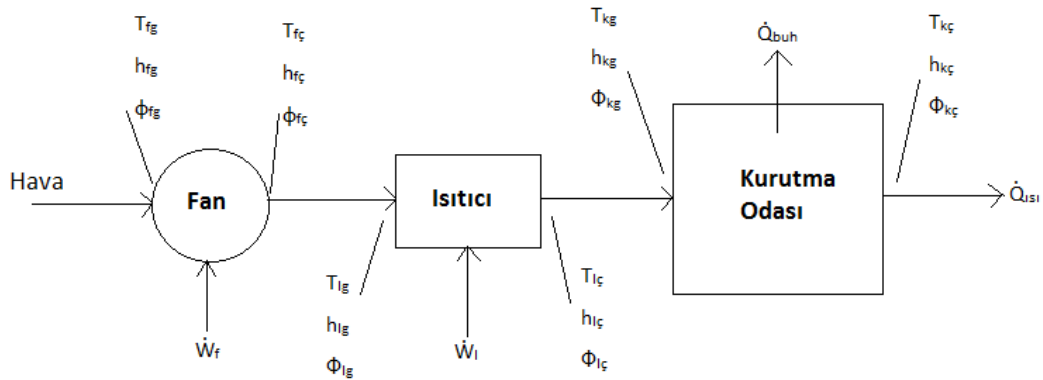
$M_t$  : t anındaki ürün nem miktarı (g)

$M_{t+\Delta t}$  : t+Δt anındaki ürün nem miktarı (g)

## 7. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZLERİ

### 7.1. Enerji Analizi

Termodinamiğin 1.kanunu olan enerjinin korunumu yasasından yola çıkılarak enerji analizi yapılmıştır. Kurutma sırasında ısıtma, soğutma, nem alma gibi işlemler olmaktadır. Sürekli akışta sistemin enerji değişimi, kurutma havasının nemi ve entalpisi gerekli eşitliklerle bulunmuştur (Karagüzel, 2009).



Şekil 7.1. Kurutma işlemi için enerji modellemesi

Şekil 7.1'de T:sıcaklık, h:entalpi, φ:bağıl nem olarak geçmektedir. Alt indisler olarak fg:fan girişi, fç:fan çıkışı, Ig:ısıtıcı girişi, Iç:ısıtıcı çıkışı, kg:kurutma odası girişi, kç:kurutma odası çıkışı olarak gösterilebilir. Ayrıca  $W_f$  fan işini,  $W_I$  ısıtıcı işini,  $Q_{buh}$  buharlaşma ile olan ısı transferini,  $Q_{ısı}$  ısı transferinden oluşan ısı geçişi olarak tanımlanır. Termodinamiğin 1.kanunundaki enerji denklemi denklem 7.1'de belirtilmiştir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c \left( h_c + \frac{v_c^2}{2} \right) - \sum \dot{m}_g \left( h_g + \frac{v_g^2}{2} \right) \quad (7.1)$$

### 7.1.1. Fan çıkış şartları

Sürekli akış ve sürekli açık sistem için kütleli debi değişimi olmamakla beraber giriş ve çıkış debileri birbirine eşittir. Bu durumda denklem 7.1 fanın çıkış koşullarına göre, ısı girişi olmadığı ve fan giriş hızının ihmal edilmesiyle tekrardan düzenlenmiş ve denklem 7.2 yazılmıştır. Bu denklemde fanın çıkıştaki entalpisi belirlenebilir (Karagüzel, 2009).

$$h_{fç} = \left[ \left( \dot{W}_f - \frac{V_{fç}^2}{2 \times 1000} \right) \left( \frac{1}{m_{kh}} \right) \right] + h_{fg} \quad (7.2)$$

Burada:

$\dot{m}_{kh}$  : kuru havanın kütleli debisi

$h_{fg}$  : fanın girişindeki kuru hava entalpisi

$h_{fç}$  : fanın çıkışındaki kuru hava entalpisi

$V_{fç}$  : fanın çıkışındaki kuru hava hızı

$\dot{W}_f$  : fan işi

### 7.1.2. Isıtıcı giriş ve çıkış şartları

Fan ile ısıtıcı arasındaki boru bağlantılarındaki ısı kaybının ihmal edilmesiyle fanın çıkış şartlarının ısıtıcı giriş şartlarına denk olduğu kabul edilmiştir. Eşitlik 7.3 ve 7.4'te bu durumlar gösterilmiştir (Karagüzel, 2009).

$$T_{fç} = T_{Ig} \quad (7.3)$$

$$h_{fç} = h_{Ig} \quad (7.4)$$

Isıtıcının giriş ve çıkış sıcaklıkları ile ısıtıcıdan kazanılan birim zamandaki faydalı enerji ( $\dot{Q}_f$ ) denklem 7.5'te hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_{kh} c_{p_{kh}} (T_{Iç} - T_{Ig}) \quad (7.5)$$

### 7.1.3. Kurutma odası giriş ve çıkış şartları

Kurutma odasının giriş şartlarını hesaplarırken kurutma odası girişindeki deneylerde bulunan sıcaklık ve bağıl nem değerler tanımlanmıştır. Isıtıcı ile kurutma odası arasındaki bağlantılarda ısı kayıpları olmuştur. Bu sebeple deneylerde de kontrol edilerek ısıtıcı çıkış sıcaklığının kurutma odası giriş sıcaklığıyla fark olduğu belirlenmiştir. Bu bağlantılarda meydana gelen birim zamandaki ısı kaybı ( $\dot{Q}_{IK}$ ) denklem 7.6'da hesaplanarak bulunmuştur (Karagüzel, 2009).

$$\dot{Q}_{IK} = \dot{m}_{kh} c_{p_{kh}} (T_{kg} - T_{I\zeta}) \quad (7.6)$$

Kurutma işlemi boyunca kurutma odasından nem alma sırasında kullanılan birim zamandaki ısı enerjisi ( $\dot{E}$ ) denklem 7.7 kullanılarak bulunmuştur.

$$\dot{E} = \dot{m}_{kh} (h_{kg} - h_{k\zeta}) \quad (7.7)$$

Burada:

$c_{p_{kh}}$  : kuru havanın özgül ısısı

$T_{kg}$  : kurutma odası giriş sıcaklığı

$T_{k\zeta}$  : kurutma odası çıkış sıcaklığı

$h_{kg}$  : kurutma odası giriş sıcaklığına göre entalpi değeri

$h_{k\zeta}$  : kurutma odası çıkış sıcaklığına göre entalpi değeri

Kurutma işlemi boyunca kurutma odasının enerji kullanımı oranı denklem 7.8'de belirlenmiştir.

$$EUR_{ko} = \frac{\dot{m}_{kh} (h_{kg} - h_{k\zeta})}{\dot{m}_{kh} c_{p_{kh}} (T_{kg} - T_{I\zeta})} \quad (7.8)$$

#### 7.1.4. Kurutma odası akış şartları

Akışta akışkan taneciklerinin birbirine karışmadan paralel bir şekilde hareket etmesine laminer, akışkan taneciklerinin paralel değil de gelişigüzel hareket etmesi ve bu şekilde birbirine karışması durumuna da türbülanslı akış denir. Boru içi akışta, akışın laminer mi yoksa türbülanslı mı olduğunun kararına kritik Reynolds ( $Re_d$ ) sayısının değerine göre karar verilir.  $Re_d$  boyutsuz bir sayıdır ve bu sayının 2300 değerinden küçük olması durumunda laminer, 20000 değerinden büyük olması durumuna türbülanslı ve arasında bir değer çıkmasına da geçiş bölgesindeki akış olarak adlandırılır (Karagüzel, 2009). Denklem 7.9'da  $Re_d$  sayısının formülü gösterilmiştir.

$$Re_d = \frac{\rho \times V \times D_h}{\mu} = \frac{V \times D_h}{\nu} \quad (7.9)$$

Burada:

$\rho$  : akışkanın yoğunluğu

$V$  : akışkanın hızı

$D_h$  : kanalın hidrolik çapı

$\mu$  : dinamik viskozite

$\nu$  : kinematik viskozite

Boru içindeki taşınım katsayısının hesaplanmasında,  $Re_d$  sayısı ve taşınım ile ısı geçişinin ölçüsü olan kritik Nusselt ( $Nu_d$ ) sayısı da kullanılmaktadır.  $Nu_d$  sayısının belirlenmesinde  $Re_d$  sayısının değeri önem arz etmektedir. Deneylerde kullanılan değerler hesaplanmaya koyulduğunda  $Re_d$  sayıları 23000 ile 31000 arasında çıkmıştır. Bu sonuçtan dolayı deney akışımız tam gelişmiş türbülanslı akıştır ve dairesel kesitli borularda tam gelişmiş türbülanslı akışta  $Nu_d$  sayısı Dittus-Boelter eşitliği olarak bilinen denklem 7.10 ile bulunmaktadır (Karagüzel, 2009).

$$Nu_d = 0,023 \times Re_d^{0,8} \times Pr^{0,4} \quad (7.10)$$

Burada Prandtl (Pr) sayısı boyutsuz bir sayı olup, EK-1 olarak verilen havanın termodinamik özellikleri tablosundan yararlanılarak bulunmaktadır.

## 7.2. Ekserji Analizi

Belirli bir haldeki sistemin yapabileceği en çok iş olarak tanımlanan, termodinamiğin 2.kanunu ile bağlantılı olan ekserji analizi yapılmış ve kurutma odası girişindeki ekserji, kurutma odası çıkışındaki ekserji ve toplam ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Kurutma odasında yapılan ekserji analizinin temel amacı, ölü durumdaki ekserji değerlerini ve kurutma işlemindeki ekserji değişimlerini belirlemektir. Ekserji değerleri 1.kanun olan enerji dengesinden çalışma ortamının karakteristikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu amaçla ekserji eşitliği (Eks) denklem 7.11 üzerinden çalışılmıştır (Akpınar, 2004).

$$Eks = (u - u_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) + \frac{P_{\infty}}{J}(v - v_{\infty}) + \frac{v^2}{2gJ} + (z - z_{\infty})\frac{g}{g_cJ} + \dots (7.11)$$

Ekserji değerini belirlemede iç enerji değişiminden gelen ekserji, entropi, basınç işi, kinetik ekserji, potansiyel ekserji gibi eşitlikler kullanılır. Açık sistem için kinetik, potansiyel, kimyasal ekserji terimleri ihmal edilmesiyle herhangi bir andaki sıcaklık (T) ve basınç (P) şartlarındaki ürünün birim kütle başına ekserji ifadesi denklem 7.12'de gösterilmiştir (Karagüzel, 2009).

$$e = (h - h_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) \quad (7.12)$$

Burada  $\infty$  simgesi ölü durumu ifade etmektedir. Toplam ekserji düzenlenip denklem 7.13'de belirtilmesiyle;

$$Eks = \dot{m}_{kh}[(h - h_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty})] \quad (7.13)$$

havanın mükemmel gaz kabulü ile denklem 7.14;

$$\Delta h = c_{pkh}(T - T_{\infty}) \quad (7.14)$$

bir hal değişimi sırasında entropi değişimi denklem 7.15;

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{içten tr} \quad (7.15)$$

$c_p$  deneyde kullanılan sıcaklıklarda aynı değerlerde çıktığı ve sabit kaldığı kabulü ile entropi değişimi denklem 7.16 ile belirlenmiştir.

$$s - s_\infty = c_p \ln \frac{T}{T_\infty} - R \ln \frac{P}{P_\infty} \quad (7.16)$$

Kurutma işlemindeki basınç değişimi ihmal edilip yukarıdaki denklemler, denklem 7.12'de yerine yazılarak işlemler arasında düzenleme yapılırsa sonuç olarak denklem 7.17 elde edilmiş olur.

$$E\dot{k}s = \dot{m}_{kh} c_{p_{kh}} \left[ (T - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T}{T_\infty} \right] \quad (7.17)$$

Burada  $T_\infty = T_0$  (çevre sıcaklığı) olmuştur ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Bu denklemden yola çıkılarak kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıklarına göre ekserji verileri belirlenmiştir.

Kurutma odası girişindeki havanın birim zamandaki ekserjisi denklem 7.18 ile bulunmuştur.

$$E\dot{k}s_{kg} = \dot{m}_{kh} c_{p_{kh}} \left[ (T_{kg} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{kg}}{T_\infty} \right] \quad (7.18)$$

Kurutma odası çıkışındaki havanın birim zamandaki ekserjisi de denklem 7.19 ile bulunmuştur.

$$E\dot{k}s_{kç} = \dot{m}_{kh} c_{p_{kh}} \left[ (T_{kç} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{kç}}{T_\infty} \right] \quad (7.19)$$

Sistemdeki sürekli akış şartı göz önüne alınarak incelendiğinde denklem 7.20 çıkarılmıştır.

$$\Sigma \left( 1 - \frac{T_\infty}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \Sigma_g E\dot{k}s - \Sigma_ç E\dot{k}s - E\dot{k}s_y = 0 \quad (7.20)$$



Burada:

$\dot{Q}_k$  : sistemle ısı enerji deposu arasındaki ısı transferi

$T_k$  : ısı enerji deposunun sıcaklığı

$\dot{E}ks_y$  : ekserji yok oluşu

Sistemde herhangi bir ısı enerji deposu olmadığından  $\dot{Q}_k$  ve  $T_k$  değerleri ihmal edilerek ekserji yok oluşu (tersinmezlik) için eşitlik tekrar düzenlenip denklem 7.21 yazılmıştır (Karagüzel, 2009).

$$\sum \text{Ekserji yok oluşu} = \sum \text{Ekserji giriş} - \sum \text{Ekserji çıkış}$$

$$\sum \dot{E}ks_y = \sum \dot{E}ks_{kg} - \sum \dot{E}ks_{kç} \quad (7.21)$$

Tüm bu değerler altında ekserji verimini ( $\eta_{Eks}$ ) de bulmak için denklem 7.22'de gerekli veriler ile gösterilen formül kullanılmaktadır.

$$\text{Ekserji verimi} = \frac{\text{Sisteme giren ekserji} - \text{Ekserji yok oluşu}}{\text{Sisteme giren ekserji}}$$

$$\eta_{Eks} = \frac{\dot{E}ks_{kg} - \dot{E}ks_y}{\dot{E}ks_{kg}} = 1 - \frac{\dot{E}ks_y}{\dot{E}ks_{kg}} \quad (7.22)$$

Sonuçları elde etmek için Ek-1'de verilen havanın özgül ısı değerleri ( $c_{pkh}$ ) ve sıcaklıklara göre entalpi ( $h_{kg}$ ,  $h_{kç}$ ) değerleri tablolardan alınarak yapılmıştır (Çengel ve Boles).

## 8. DENEYSEL HATA VE BELİRSİZLİK ANALİZİ

Yapılan deneyler sonucunda çıkarılan bulguların değerlendirilmesi bakımından hata analizi ve ardından yapılacak belirsizlik analizi büyük bir önem arz etmektedir. Literatürde belirtilen standartlara uygun olan bir deney düzeneği için, yapılan deneylerin sonuçlarından çıkarılan verilerde hata iki farklı şekilde kaynaklanabilir. Birisi, deney seti ve ölçüm araçlarının yapısından kaynaklanan hatalar, bir diğeri ise deneyi yapandan kaynaklanan hatalardır.

Deneysel hatalar üç grup olarak ayrılabilir. Bunlar; dikkatsizlik ve tecrübesizlikten kaynaklanan hatalar, sabit veya sistematik olan hatalar ve rastgele olan hatalardır (Anonim, 2017). Bu çalışmada deneyden elde edilen verilerin, deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının hata oranlarına bakılarak belirsizlik analizleri yapılmıştır. Kline ve McClintock (1953), tarafından önerilen formülasyona göre sonuçlar alınmıştır. Denklem 8.1'de gösterilen bu yöntemde R bağımsız değişkenlerin (basınç, sıcaklık vb.) bir fonksiyonu olan herhangi bir deneysel parametre olarak geçmektedir.

$$R = R(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n) \quad (8.1)$$

Bağımsız değişkenlere ait belirsizlik değerleri ( $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ) şeklinde tanımlanır ve R için toplam belirsizlik analizi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial e_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial e_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial e_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8.2)$$

Deneysel sıcaklık ölçümleri yapılmış ve bu ölçümler için kullanılan veri okuyucu ve toplayıcı cihazlar, ısı çiftleri ve bağlantı elemanlarındaki hatalar bulunmuştur. Deneysel olarak ayrıca basınç ölçümleri, hız ölçümleri, bunlara bağlı Re ve Nu boyutsuz sayıları ölçümleri, kütle ve debi ölçümleri ve nem oranı ölçümleri gibi sonuçlar alınmıştır. Bu sonuçların ölçümünde kaynaklanan hatalar ve belirsizlik analizleri Çizelge 8.1, 8.2'de gösterilmiştir. Hataların bulunmasında yapılan işlemler EK-2'de verilmiştir.

**Çizelge 8.1.** Deney cihazları hata oranları

<b>Ölçüm Cihazları</b>	<b>Hata Oranları</b>
Pitot tüpü	$\pm 0,01$ m/s
Veri toplayıcı (basınç)	$\pm 0,1$ Pa
Veri toplayıcı (kütle)	$\pm 0,01$ g
Veri toplayıcı (sıcaklık)	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Isılçiftler	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$

**Çizelge 8.2.** Ölçülen verilerin belirsizlik değerleri

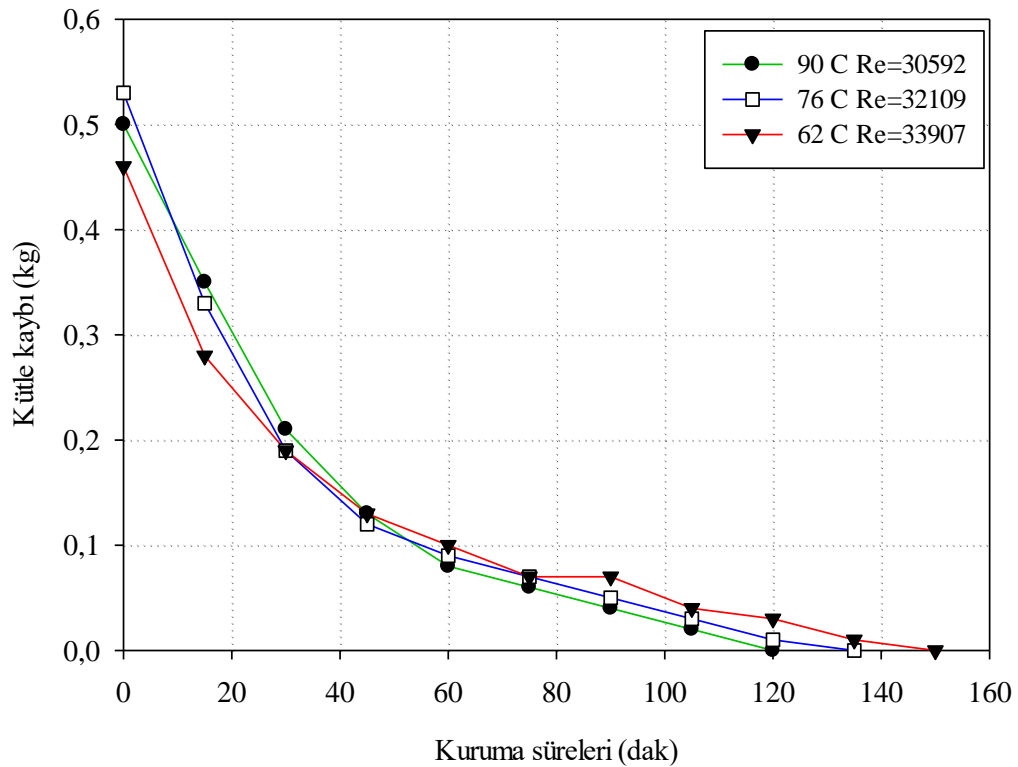
<b>Ölçülen Değerler</b>	<b>Belirsizlik Değerleri (%)</b>
Pitot hızı, $V_{pit}$	$\pm 1$
Kanal hızı, $V_k$	$\pm 1,04$
Hidrolik çap, $D_h$	$\pm 0,41$
Boyutsuz sayı, $Re$	$\pm 1,2$
Kanal giriş alanı, $A_k$	$\pm 0,29$
Sıcaklık, $T$	$\pm 5,6$
Debi, $\dot{m}$	$\pm 1,08$

## 9. BULGULAR VE İRDELEME

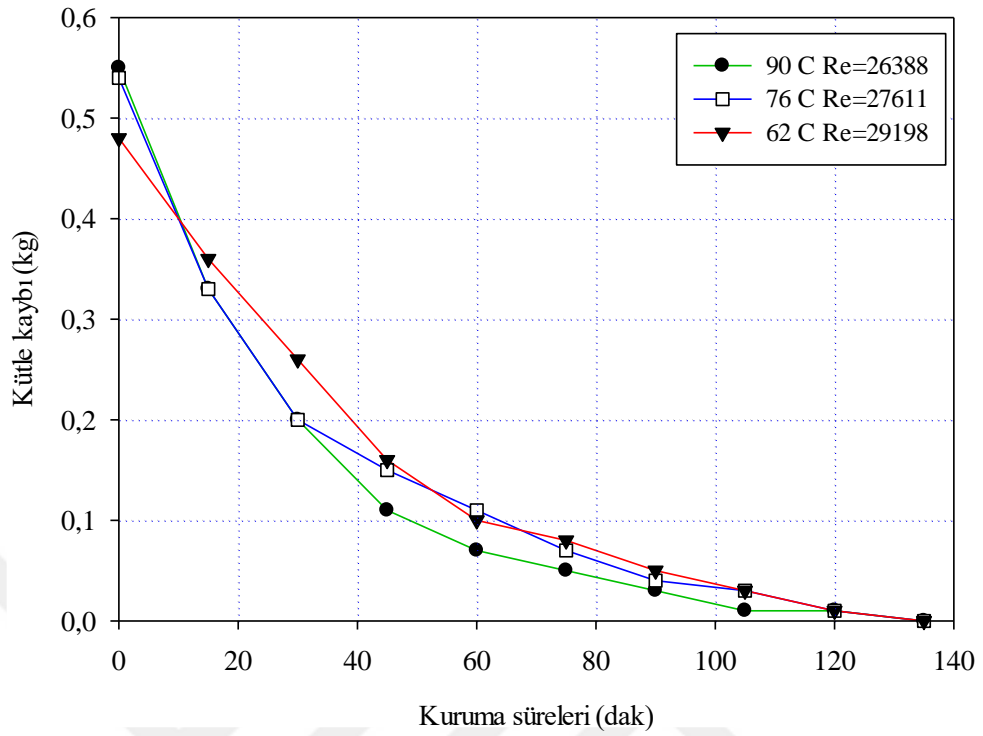
Tuğla kuruma süresi baz alınarak kütle kaybındaki, nem içeriğindeki, kuruma hızındaki değişimler grafiklere dökülmüştür. Grafikler SigmaPlot 12 programı kullanılarak çizilmiştir. Oluşan değişimlerde emme ve basma deneyleri arasındaki farklar karşılaştırılmıştır.

### 9.1. Kütle Kaybı-Kuruma Süresi Arasındaki İlişki

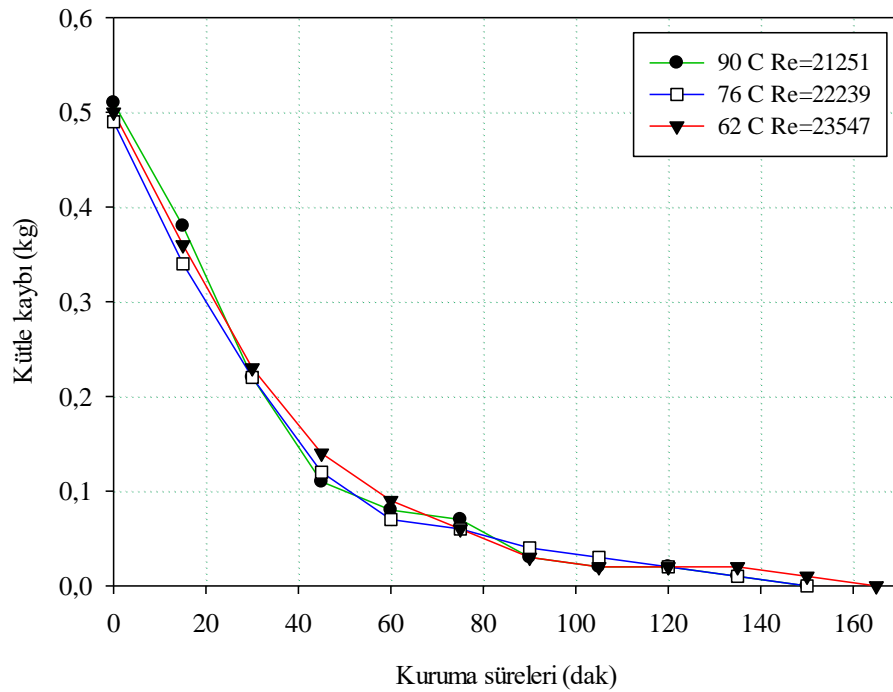
Şekil 9.1, 9.2 ve 9.3'te tuğla üzerine uygulanan emme deneylerinde, tuğla açısının 0 derecede (gözenekler hava akışına paralel) olduğu durumda kütle kaybının kuruma süresine göre sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü gibi tuğla üzerinden kuru havanın vakumlanması, hava hızının artması ve sıcaklığın yükselmesi ile kuruma süresinin düştüğü sonucu elde edilmiştir.



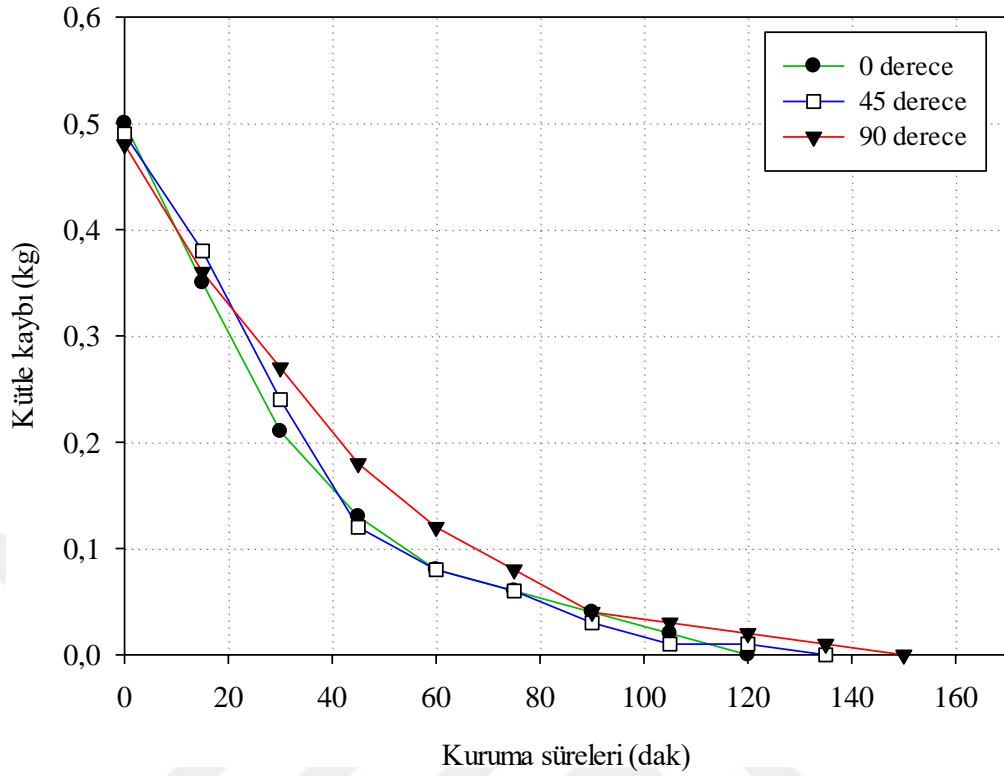
**Şekil 9.1.** Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 50 Pa)



**Şekil 9.2.** Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 37 Pa)



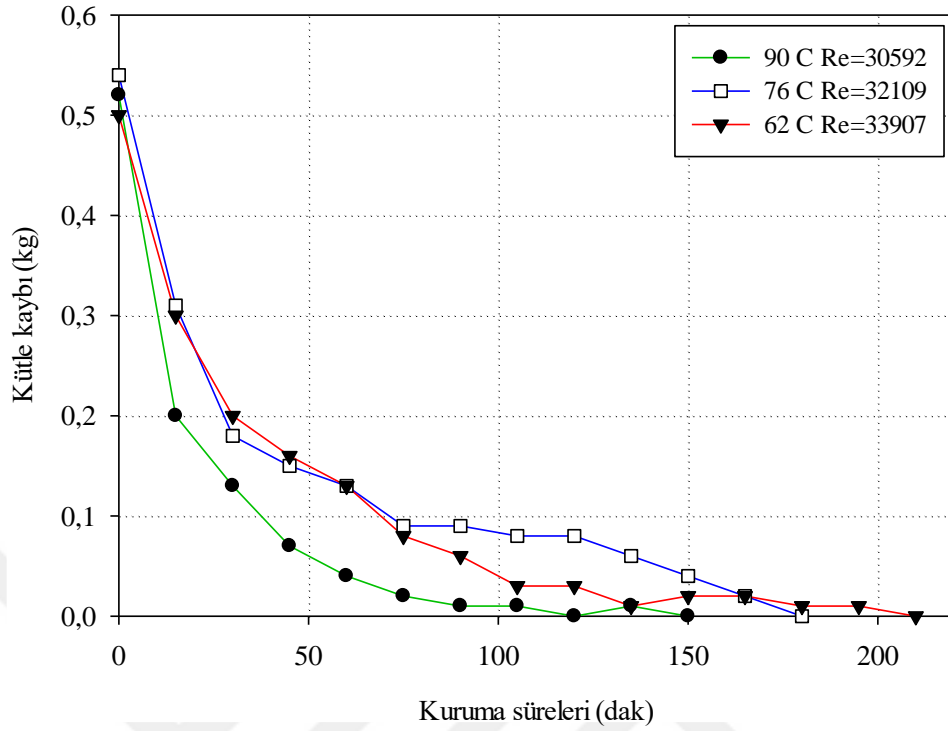
**Şekil 9.3.** Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 24 Pa)



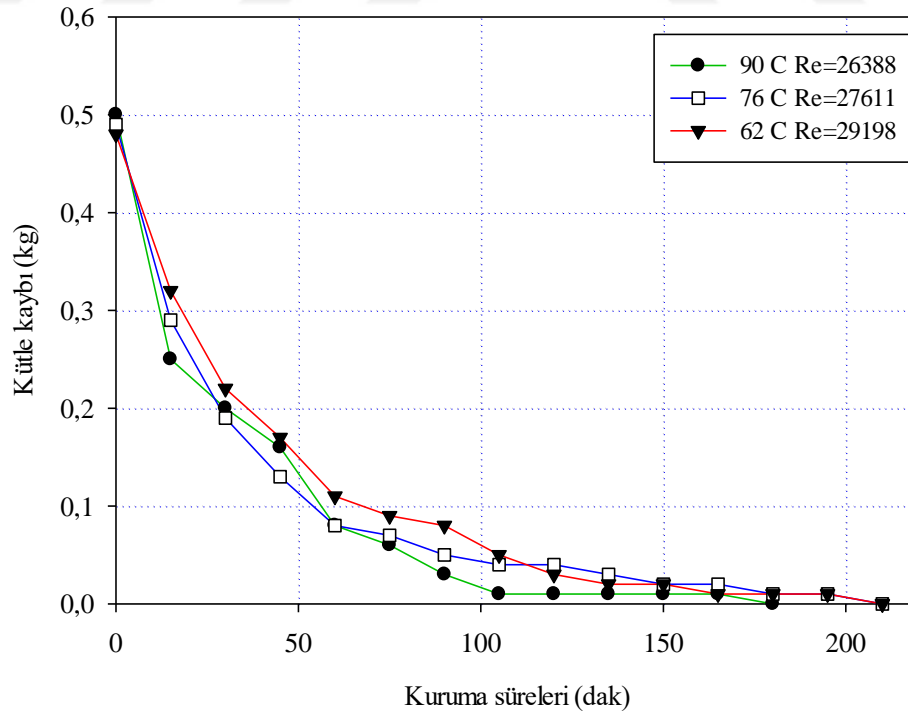
**Şekil 9.4.** Farklı açılarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 90°C Re=30592)

Şekil 9.4'te emme deneylerindeki, en yüksek hız ve en yüksek sıcaklık değerlerinde, tuğla açılarının değişiminin kütle kaybına etkisi görülmektedir. Aynı basınç ve sıcaklıktaki kurutma deneylerinde tuğla açısı arttıkça, kuruma süresinde de artış meydana gelmektedir. Gözenekler içinden havanın akması daha çok istenen durum olarak göze çarpmaktadır.

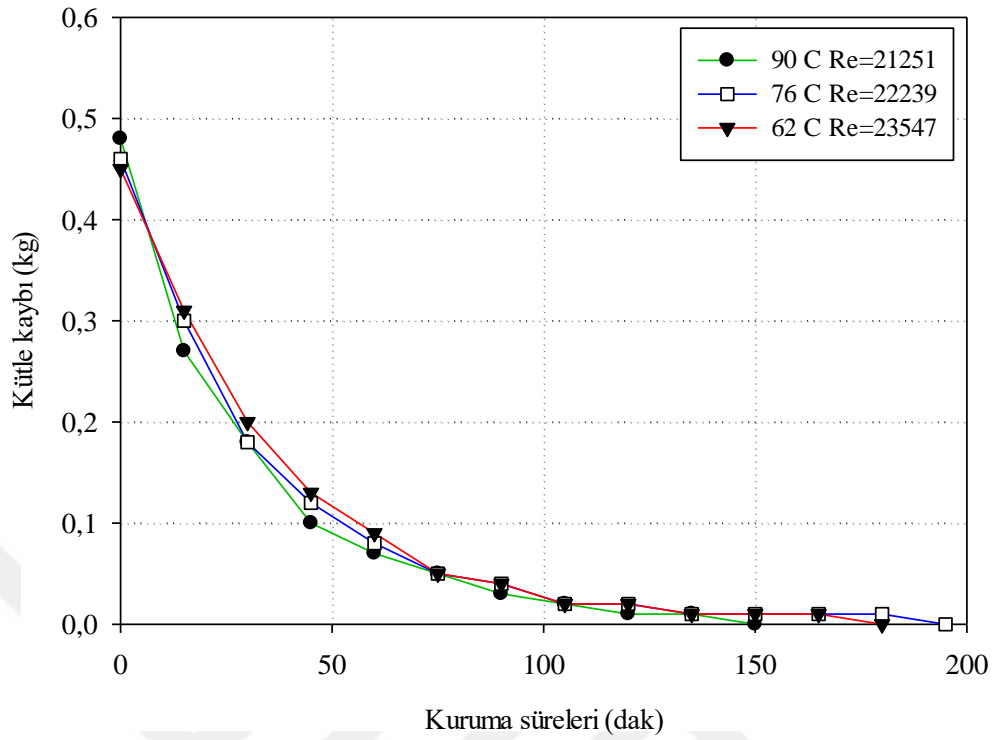
Şekil 9.5, 9.6 ve 9.7'de tuğla numuneleri üzerindeki basma deneylerinde, kütle kaybının, farklı hava sıcaklığı ve hızları etkisinde, tuğla açısının 0 derecedeki pozisyonuna göre değişimi gösterilmektedir. Emme deneylerinde de olduğu gibi sıcaklık artışları ile kütle kaybı hızında ve kuruma süresinde düşüş meydana gelmiştir. Yine hava hızının düşmesi ile kütle kaybı daha yavaş şekilde olmuştur.



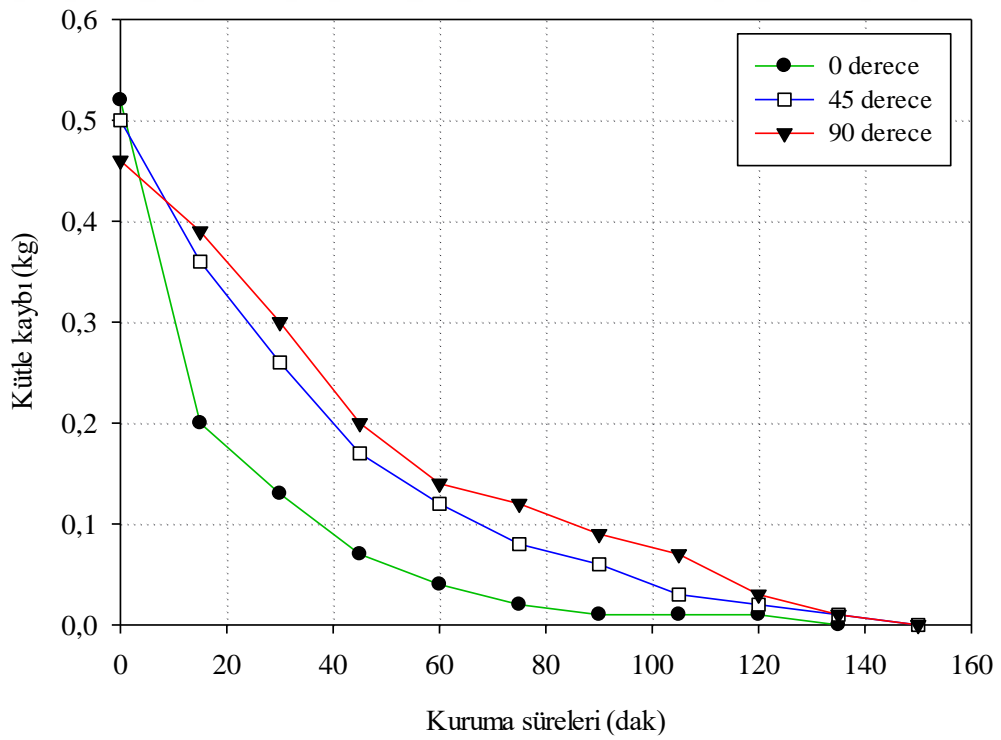
Şekil 9.5. Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 50 Pa)



Şekil 9.6. Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 37 Pa)



**Şekil 9.7.** Farklı sıcaklıklarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 24 Pa)

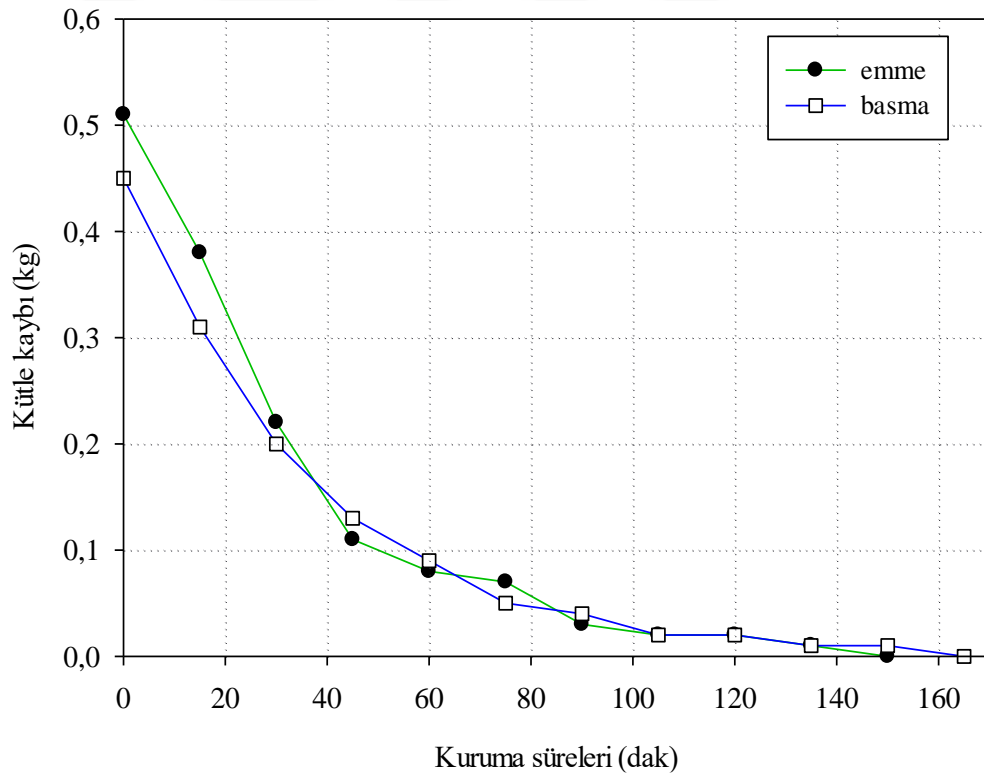


**Şekil 9.8.** Farklı açılarda kütle kaybının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 90°C Re=30592)

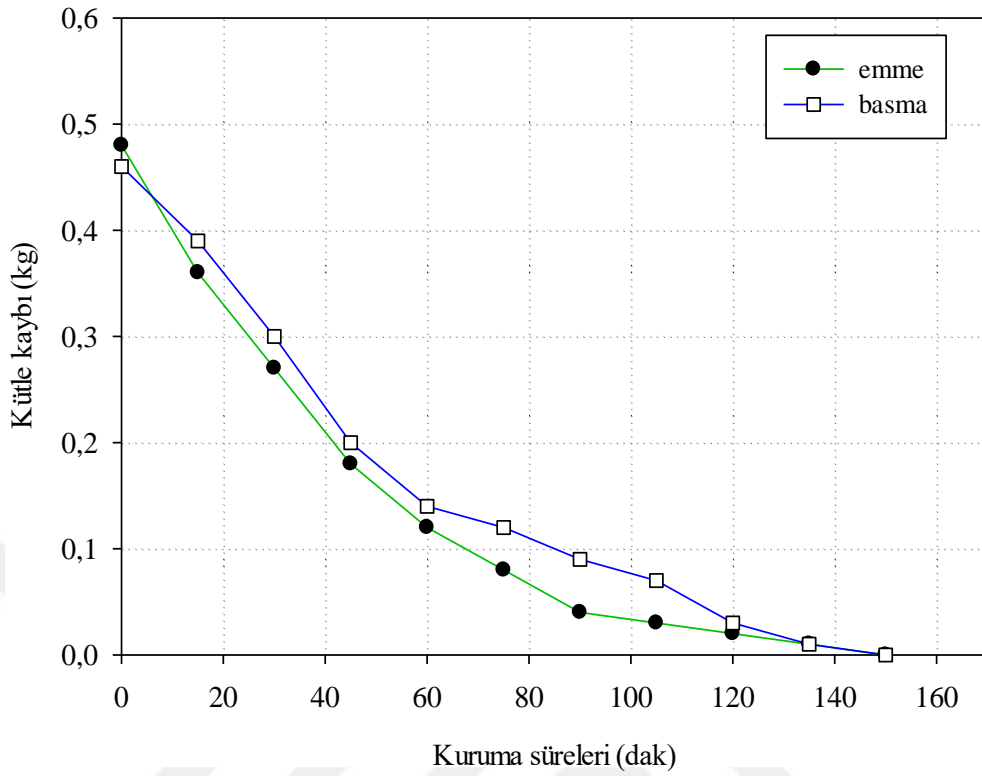


Şekil 9.8’de en yüksek hız ve en yüksek sıcaklık değerlerinde basma deneyleri ile kurutmada, tuğla açısının değişiminin kütle kaybına etkisi grafiğe dökülmüştür. Burada tuğla gözeneklerinin hava akışına paralel olacak şekilde konumlandırılmasının kütle kaybındaki kuruma süresini daha kısa tuttuğu gözlemlenmiştir.

Şekil 9.9 ve 9.10’deki grafiklerde en düşük derece, basınç, sıcaklık ve en yüksek derece, basınç, sıcaklık değerleri altında emme ve basma deneylerinin, kütle kaybı üzerindeki karşılaştırmaları gösterilmiştir. Tuğla numunelerinin emme deneyleri ile basma deneyleri arasındaki farkı, kütle kaybı olarak düşünüldüğünde grafiklerden de anlaşılacağı gibi emme deneylerinin daha iyi sonuçlar verdiği elde edilmiştir. Grafiğe bakıldığında emme deneyleri ile yapılan kurumanın daha kısa sürede sonuçlandığı sonucu çıkarılmıştır.



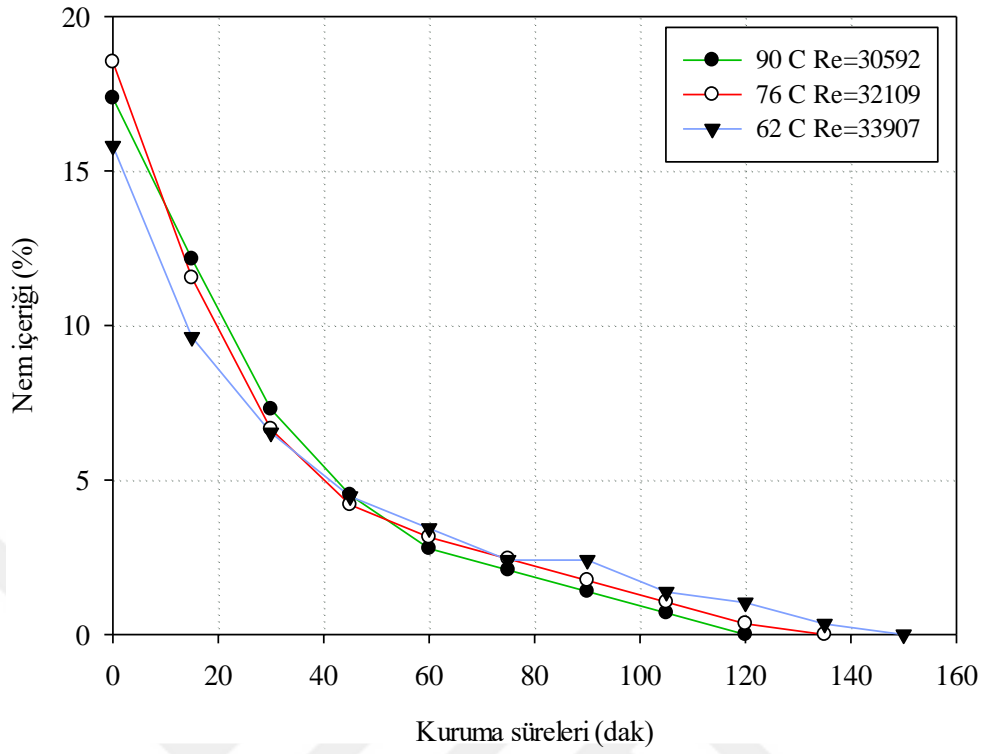
**Şekil 9.9.** Emme ve basma deneylerinin kütle kaybına göre karşılaştırılması  
(0 derece, 62°C Re=23547)



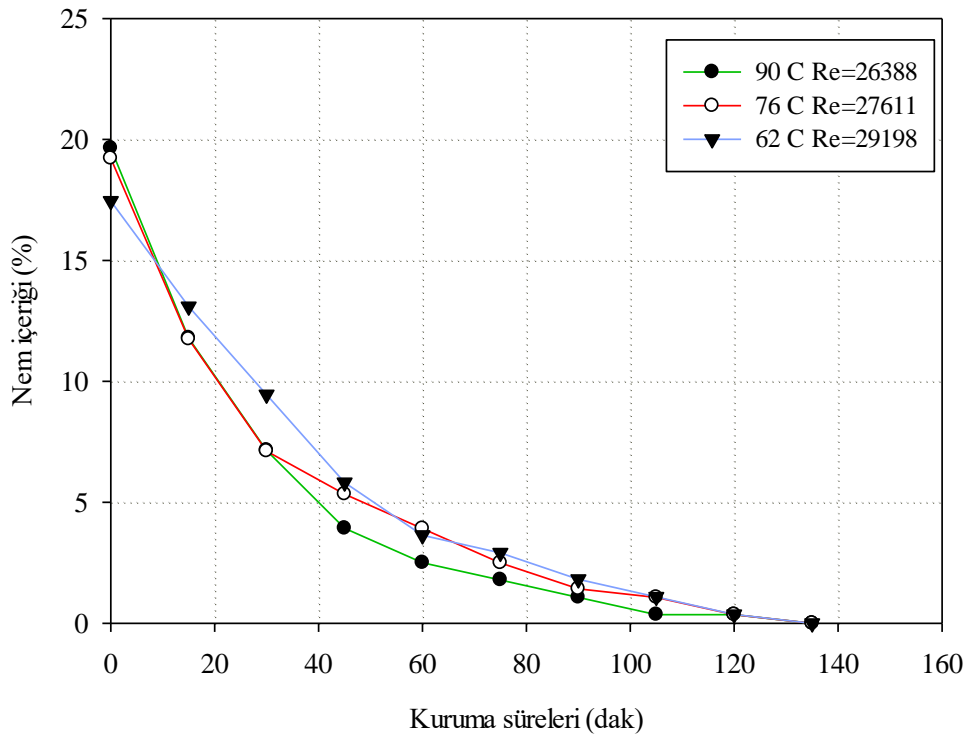
**Şekil 9.10.** Emme ve basma deneylerinin kütle kaybına göre karşılaştırılması  
(90 derece, 90°C Re=30592)

## 9.2. Nem İçeriği-Kuruma Süresi Arasındaki İlişki

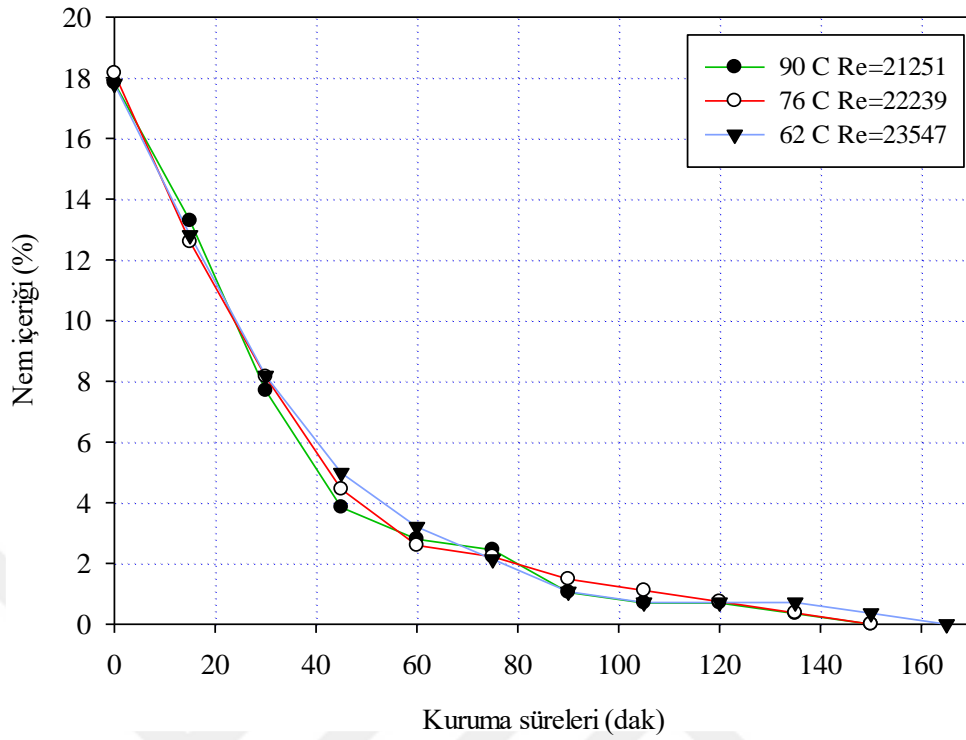
Şekil 9.11, 9.12 ve 9.13'te tuğla numuneleri üzerindeki emme deneylerinde, tuğla açısının 0 derece (gözeneklerin hava akışına paralel) olduğu durumdaki çıkan verilerin nem içeriği-kuruma süresi grafiği oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere nem içerik yüzdeleri fazla olsa bile tuğla üzerine gönderilen kuru havanın sıcaklığı yükseldikçe kuruma süresinde düşüş olmuştur. Grafiklerde de 90°C ve 76°C hava sıcaklığında yapılan deneylerin 62°C ye göre daha önce kuruduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda hava hızının artması ile birlikte, kuruma süresinde azalma meydana gelmiştir.



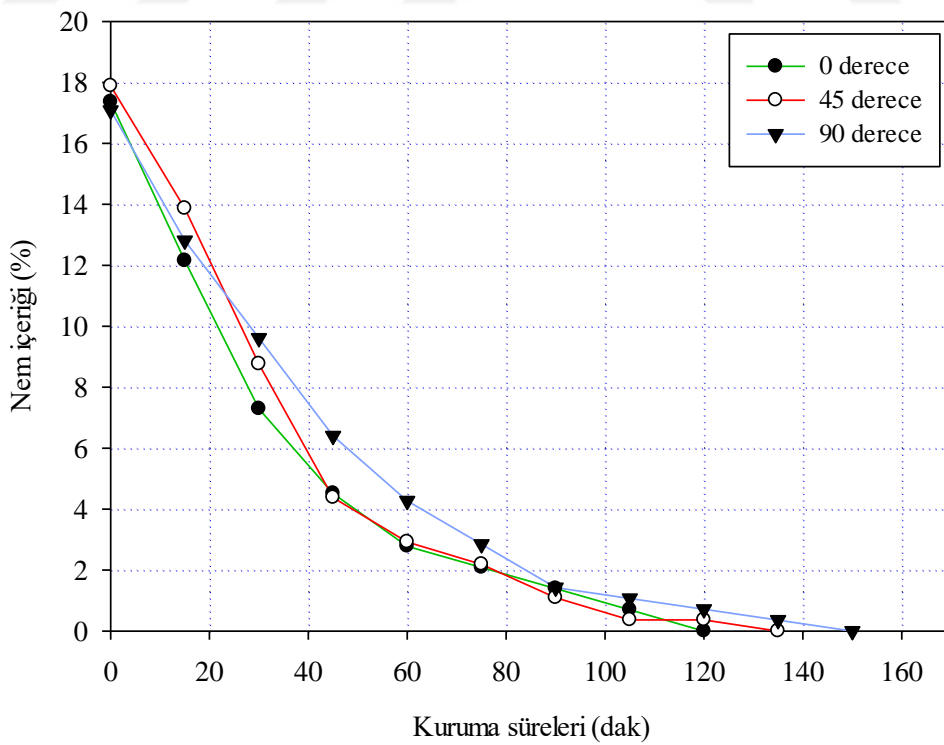
**Şekil 9.11.** Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 50 Pa)



**Şekil 9.12.** Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 37 Pa)



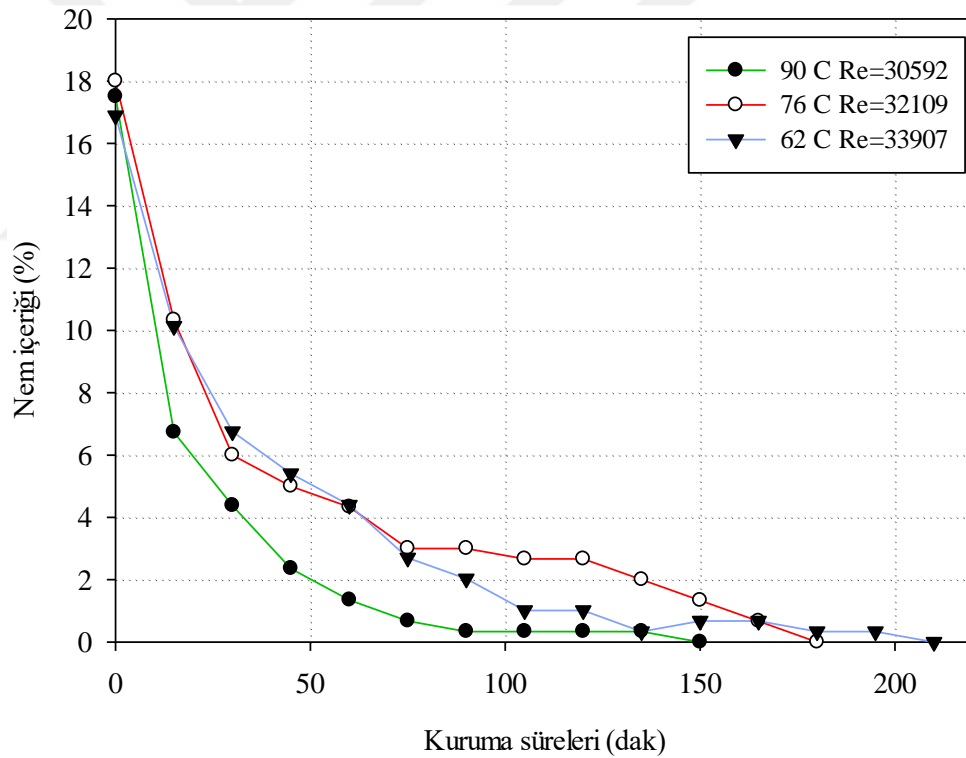
Şekil 9.13. Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 24 Pa)



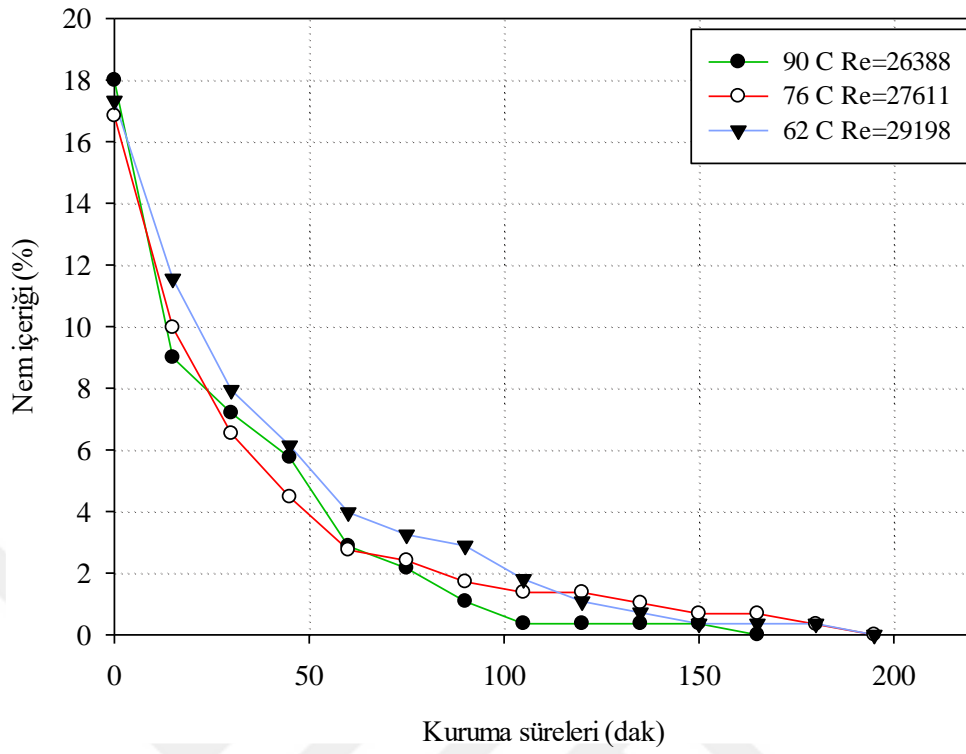
Şekil 9.14. Farklı açılarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 90°C Re=30592)

Şekil 9.14'te hava akışına göre yerleştirilmiş farklı tuğla açılarındaki deneylerin, en yüksek hız ve sıcaklık değerlerine göre nem içeriğindeki değişim grafiği oluşturulmuştur. Hava akışının paralel olarak tuğla üzerine geldiği 0 derece tuğla açısındaki çıkan sonuçlar diğer açılara oranla daha iyidir. Tuğla açısının artması ile kuruma süresinde de artış yaşanmıştır.

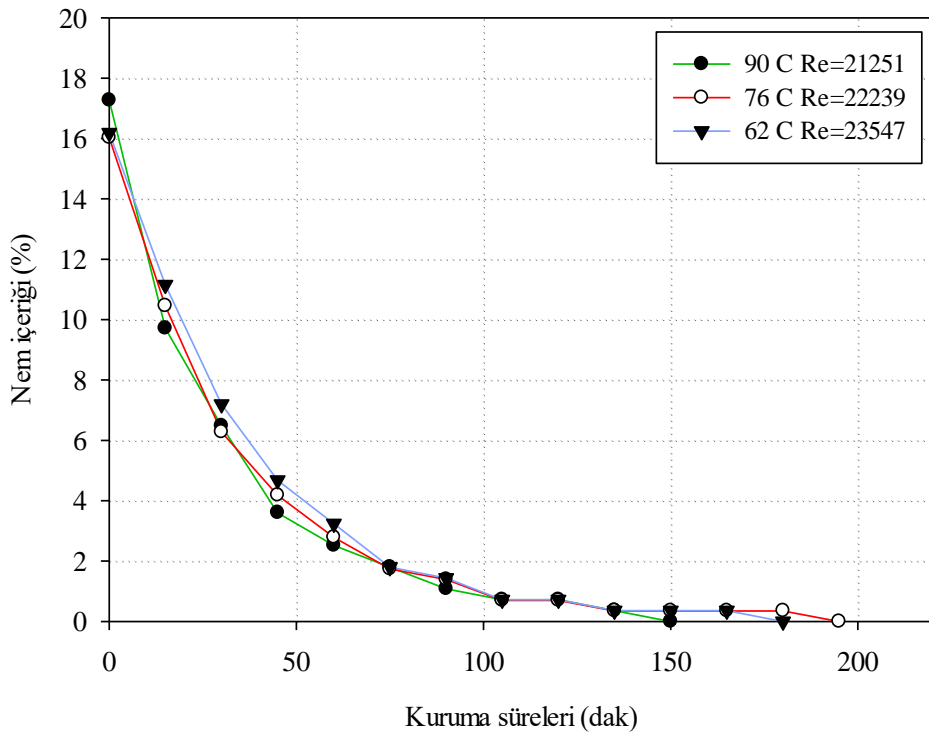
Şekil 9.15, 9.16 ve 9.17'de tuğla üzerindeki basma deneylerinde, tuğla açısının 0 derece olduğu durumdaki ölçülen verilerin farklı hava hızı ve sıcaklığına göre tuğla nem içeriğinin değişimi grafiği oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere kuru hava sıcaklığı yükseldikçe, kuruma süresinde düşüş yaşanmaktadır. 90°C hava sıcaklığı ile yapılan deneyler 76°C ve 62°C ye göre daha hızlı sonuçlanmıştır. Aynı şekilde hava hızının artmasının kuruma süresini düşürdüğü sonucu elde edilmiştir.



Şekil 9.15. Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 50 Pa)

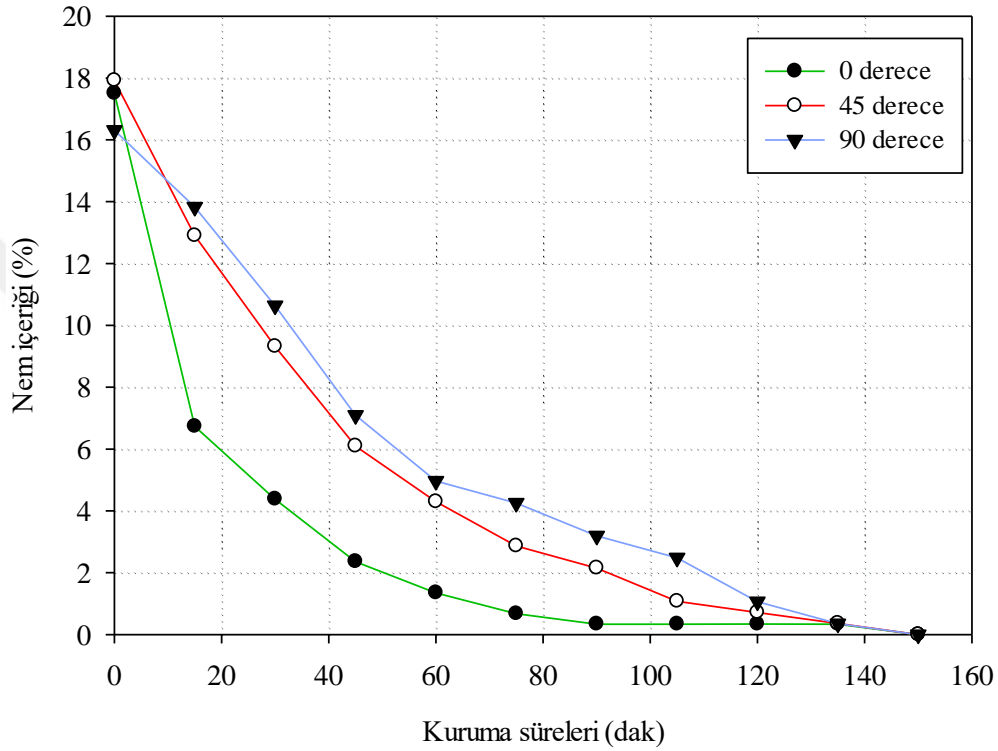


**Şekil 9.16.** Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 37 Pa)



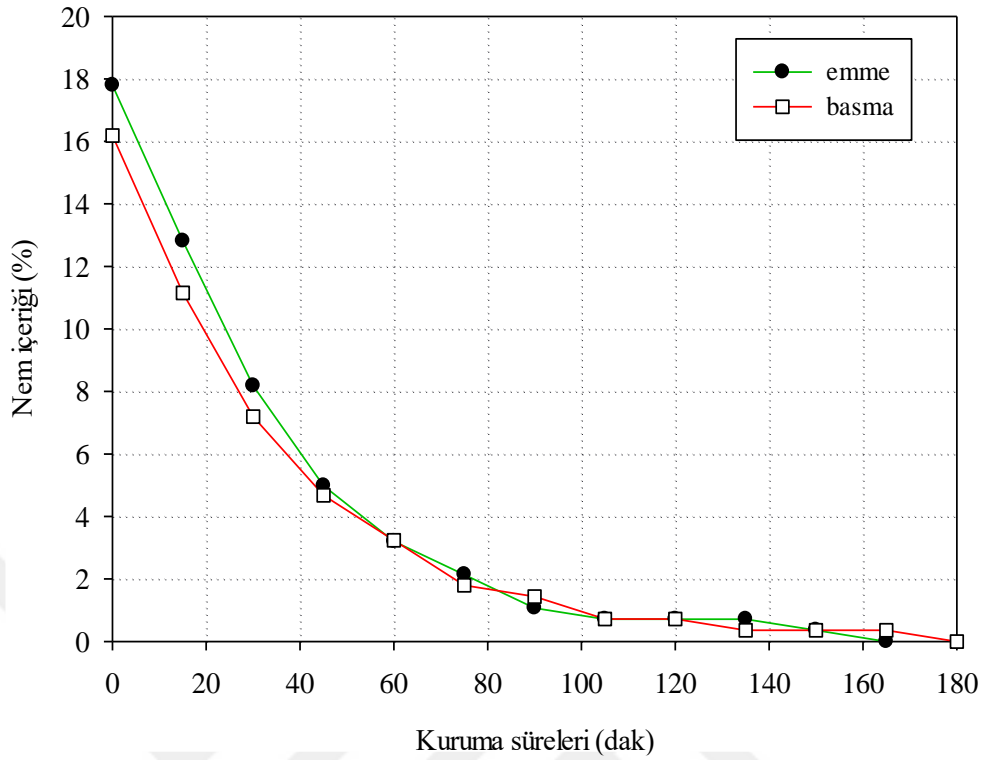
**Şekil 9.17.** Farklı sıcaklıklarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 24 Pa)

Şekil 9.18’de basma deneyleri ile yapılan kurutmada farklı tuğla açılarındaki, en yüksek hız ve sıcaklık altında gerçekleştirilen deneylerin nem içeriğine etkileri gösterilmiştir. Burada anlaşılmaktadır ki hava akışının tuğla gözeneklerine paralel olması kuruma süresini kısaltmıştır. Aynı yüzdelik nem içeriklerine sahip olmalarına karşı 0 derece açıdaki tuğlalar ile yapılan deneylerde daha hızlı nem kaybı yaşanmıştır.



**Şekil 9.18.** Farklı açılarda nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 90°C Re=30592)

Şekil 9.19’de ideal tuğla açısı olarak düşünülen 0 derecede yapılan deneyler arasından, en düşük hız ve sıcaklık parametreleri altındaki, emme deneyi ve basma deneyi yöntemleri karşılaştırılmıştır. Emme deneyleri ile yapılan kurutmadaki tuğlanın nem içeriği daha yüksek olmasına rağmen, hızlı bir kuruma gerçekleşmiş ve basma deneylerine oranla daha önce kuruma gerçekleşmiştir. Farklı nem içeriğine sahip numunelerde bile emme deneylerindeki kuruma süresinin basma deneylerine oranla daha düşük çıktığı sonucu elde edilmiştir.

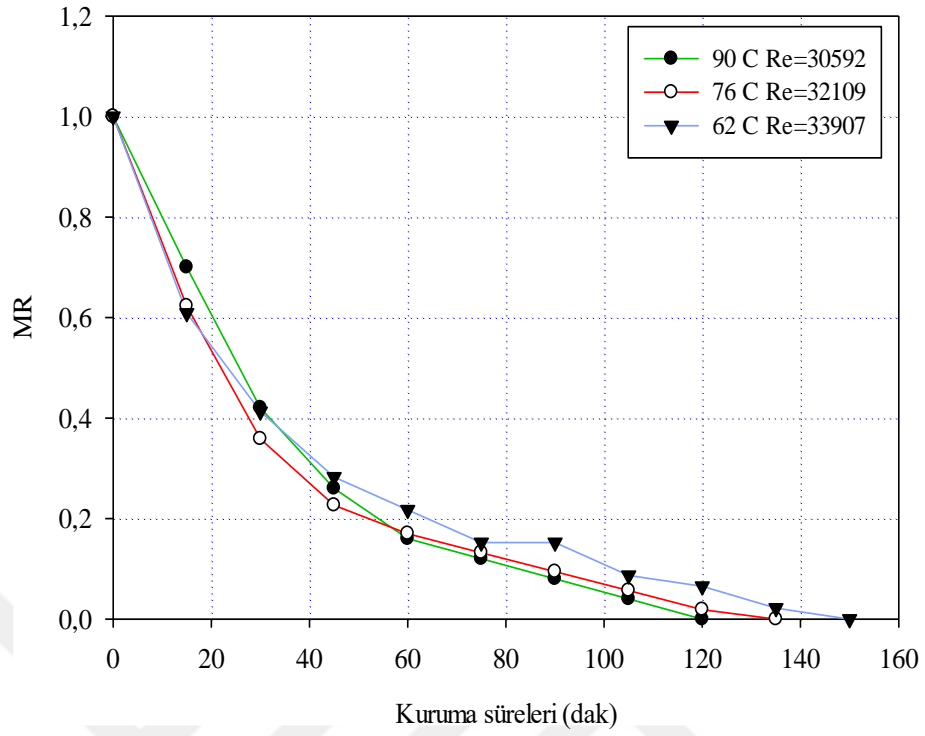


**Şekil 9.19.** Emme ve basma deneylerinin nem içeriğine göre karşılaştırılması  
(0 derece, 62°C Re=23547)

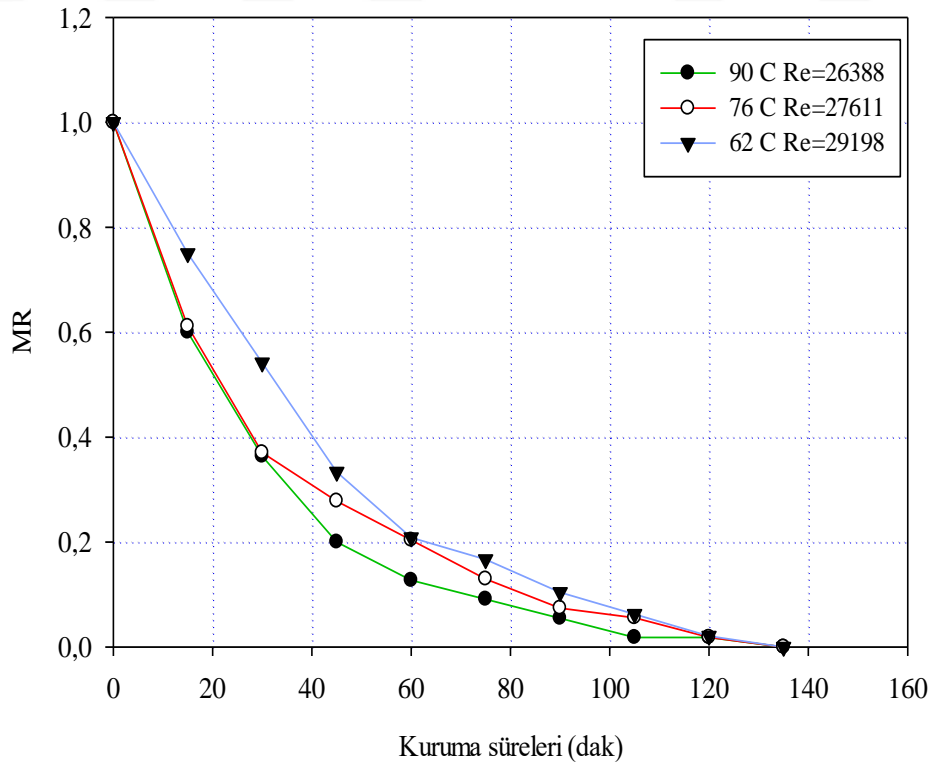
### 9.3. MR (Nem Oranı)-Kuruma Süresi Arasındaki İlişki

Şekil 9.20, 9.21 ve 9.22'de emme olarak yapılan deneylerde, tuğla açısı 0 derece olduğu durumda farklı sıcaklık ve hızlardaki nem oranının kuruma süresine göre değişim grafikleri verilmiştir. Sıcaklık artışının kuruma süresini düşürdüğü aynı zamanda hava hızındaki artışında kuruma süresini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Sabit bir nem oranı başlangıcına sahip farklı tuğlaların, yüksek hız ve sıcaklıklarda daha hızlı kuruma gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

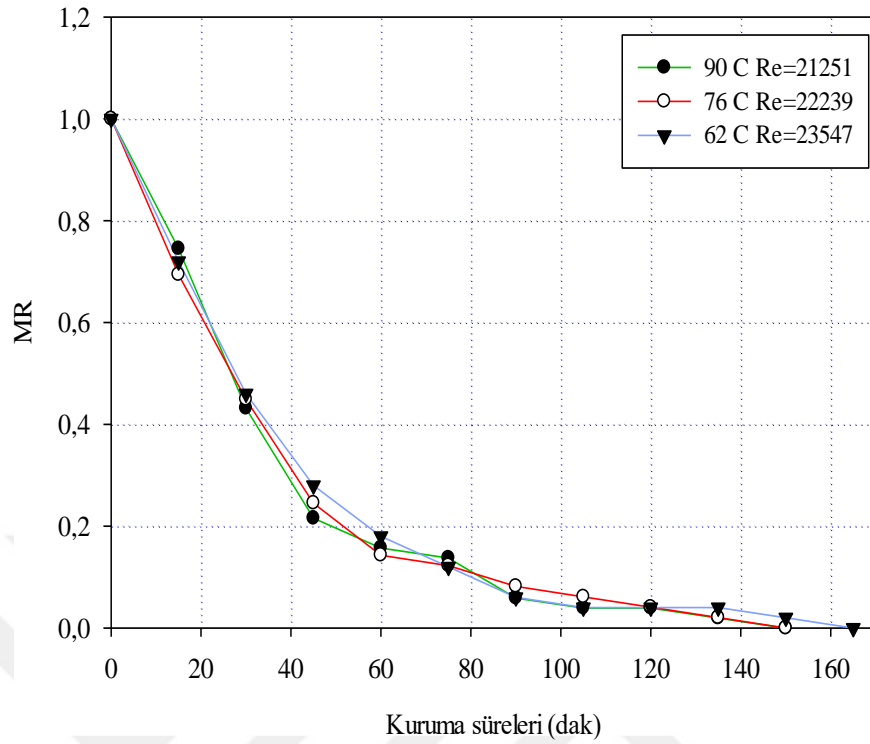




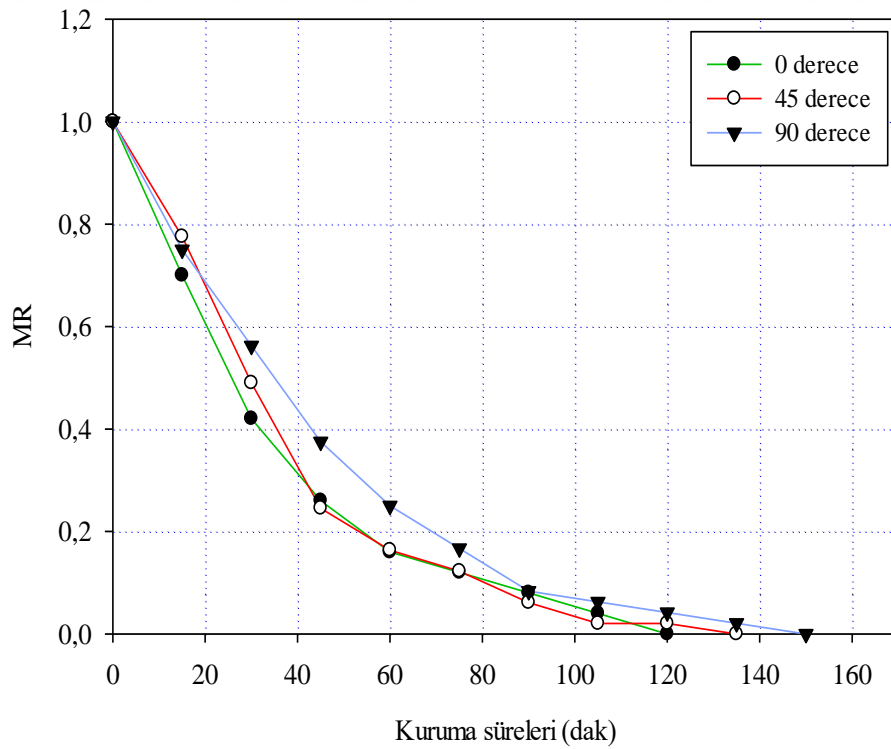
**Şekil 9.20.** Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 50 Pa)



**Şekil 9.21.** Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 37 Pa)



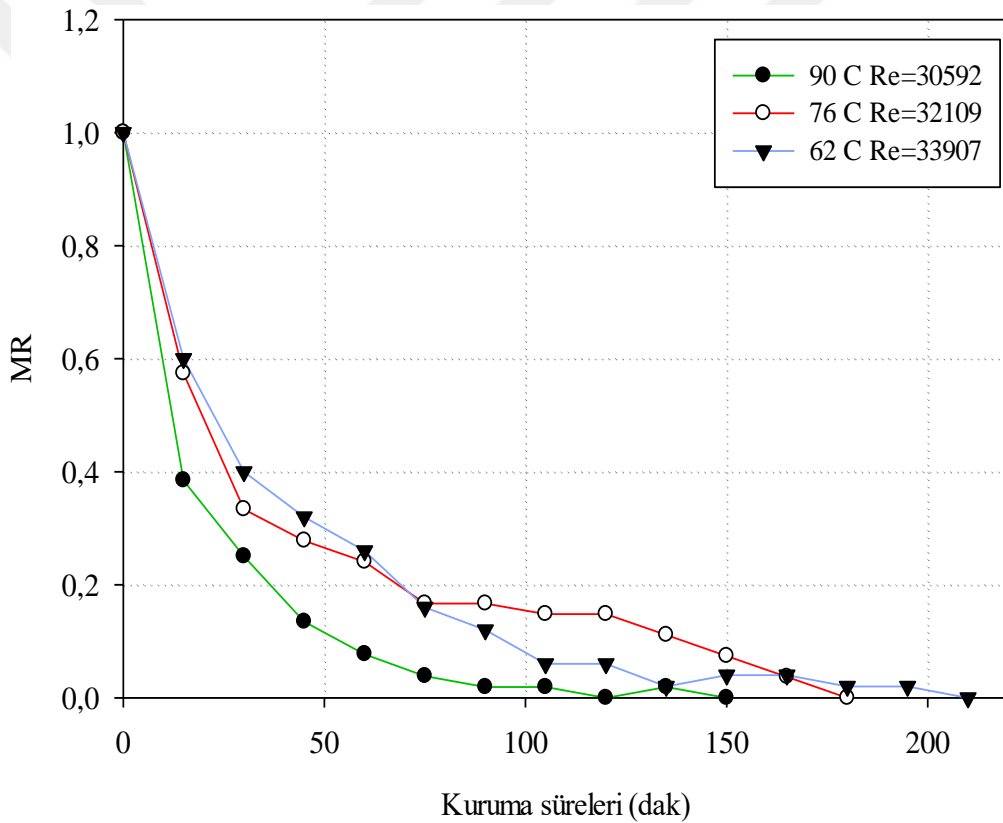
**Şekil 9.22.** Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 24 Pa)



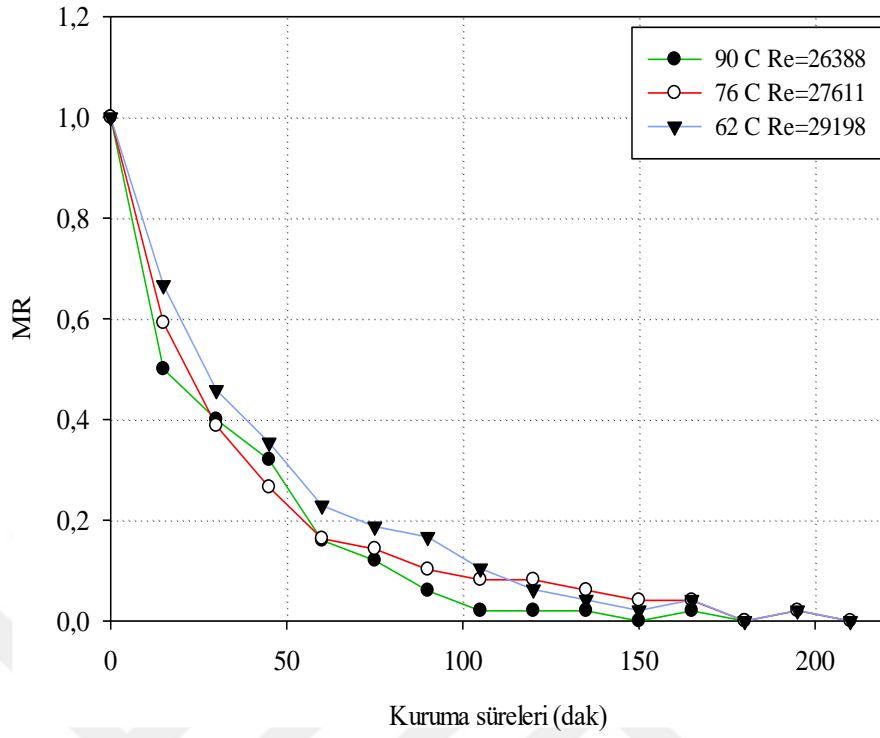
**Şekil 9.23.** Farklı açılarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 90°C Re=30592)

Şekil 9.23'te emme deneylerinde  $90^{\circ}\text{C}$  hava sıcaklığı ve  $\text{Re}=30592$  değeri baz alınarak, hava akışına göre farklı tuğla açılarının kuruma süresine göre değişimi grafiği verilmiştir. Açı küçüldükçe yaş tuğlanın kuruma süresi azalmaktadır. Tuğla deliklerinin hava akışına paralel olacak şekilde tuğlanın konumu belirlenmelidir.

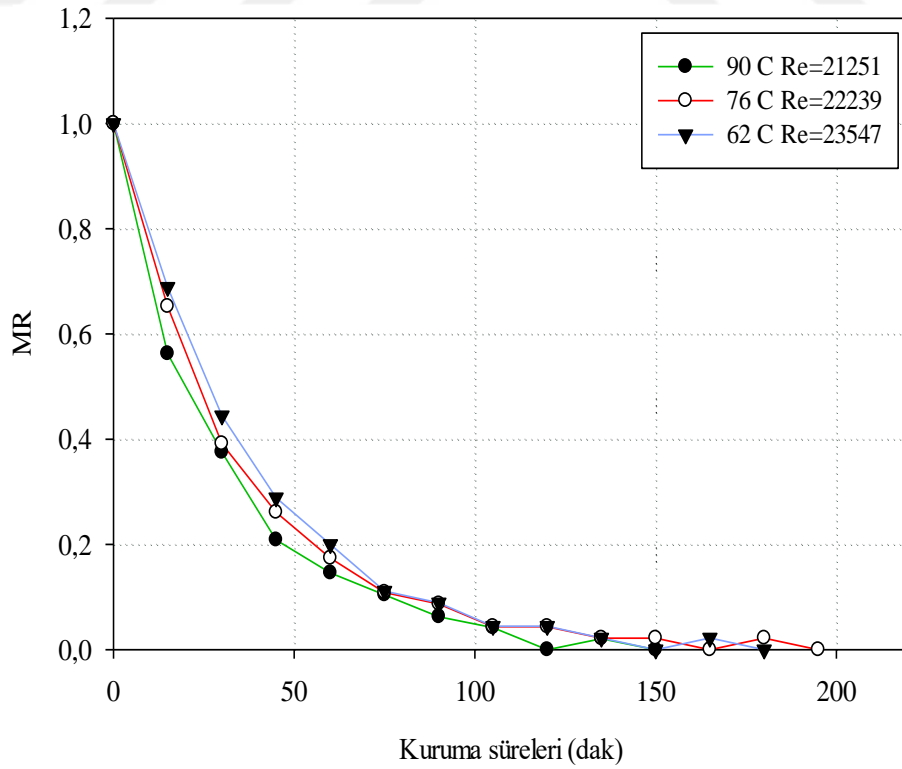
Şekil 9.24, 9.25 ve 9.26'da 0 derece tuğla açısında, farklı hava sıcaklıkları ve hızlarındaki parametreler doğrultusunda basma deneyleri için nem oranı-kuruma süresi grafikleri verilmiştir. Hava sıcaklığının artmasıyla nem oranındaki kayıp daha hızlı gerçekleşmiştir. Hava hızının yüksek olması ile de kuruma süresinin daha erken sonuçlandığı, daha hızlı kuruma olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 9.24.** Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 50 Pa)

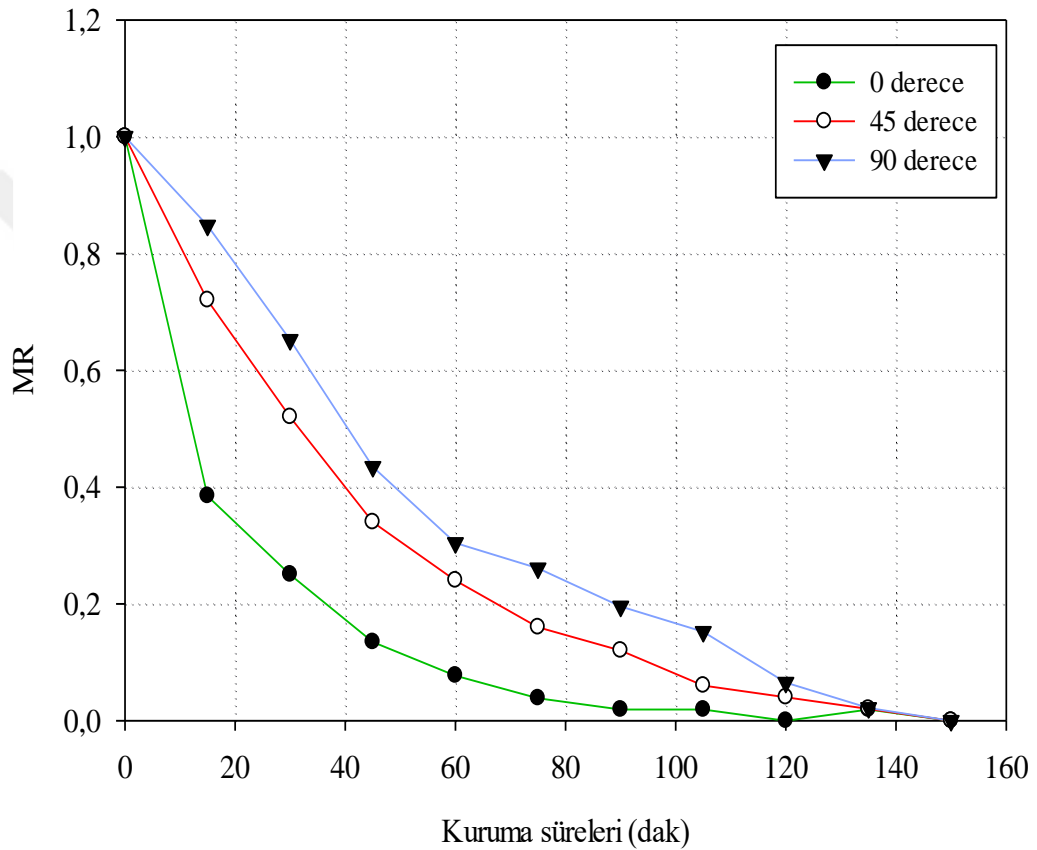


Şekil 9.25. Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 37 Pa)



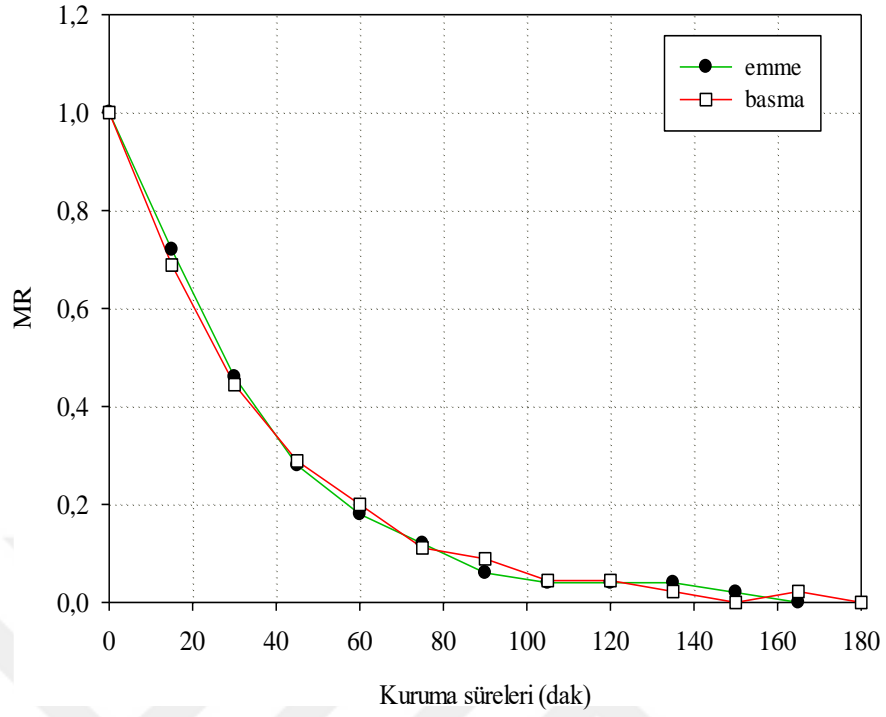
Şekil 9.26. Farklı sıcaklıklarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 24 Pa)

Şekil 9.27’de hava sıcaklığının  $90^{\circ}\text{C}$  ve  $\text{Re}=30592$  oluğu parametrelerde basma deneyleri için farklı tuğla açılarının kuruma süresine göre değişimleri incelenmiştir. Yüzdeler olarak aynı nem oranındaki farklı numunelerin, tuğla açılarının küçük olması ile daha hızlı kuruma gerçekleştiği gözlemlenmiştir.  $0$  derecede yani hava akışına paralel olacak şekilde yerleştirilen tuğlaların, kurutma havası ile etkileşimi daha iyi olmaktadır.



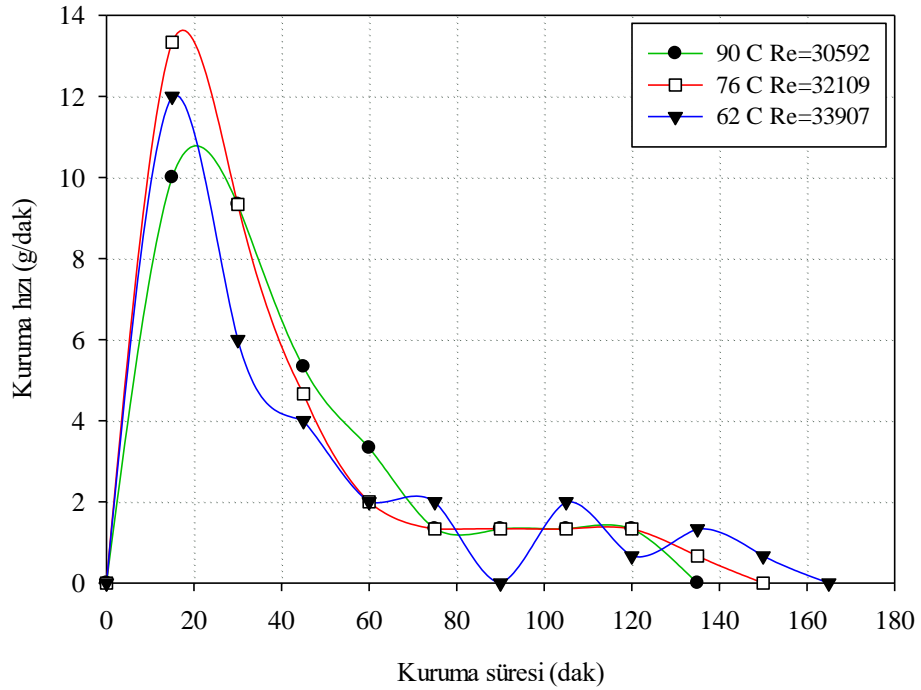
**Şekil 9.27.** Farklı açılarda nem oranının kuruma süresine göre değişimi (Basma deneyleri,  $90^{\circ}\text{C}$   $\text{Re}=30592$ )

Şekil 9.28’de en iyi sonuçların alındığı  $0$  derece tuğla açısı baz alınarak, hava sıcaklığının  $62^{\circ}\text{C}$  ve  $\text{Re}=23547$  olan parametrelere göre, emme ve basma deneylerinin karşılaştırılması verilmiştir. Her iki durumda da 120 dakika boyunca aynı oranda nem kaybı yaşayan tuğlalar, daha sonrasında emme deneylerindeki değerlerin basma deneylerine oranla daha iyi sonuçlar olduğu gözlemlenmiştir.

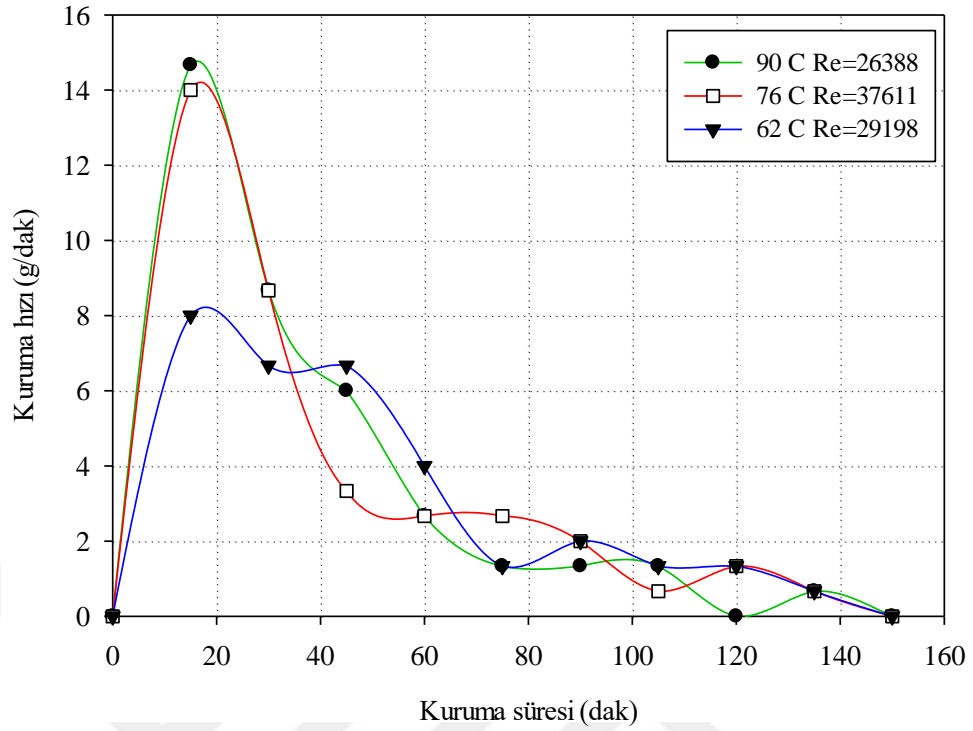


**Şekil 9.28.** Emme ve basma deneylerinin nem oranına göre karşılaştırılması  
(0 derece, 62°C Re=23547)

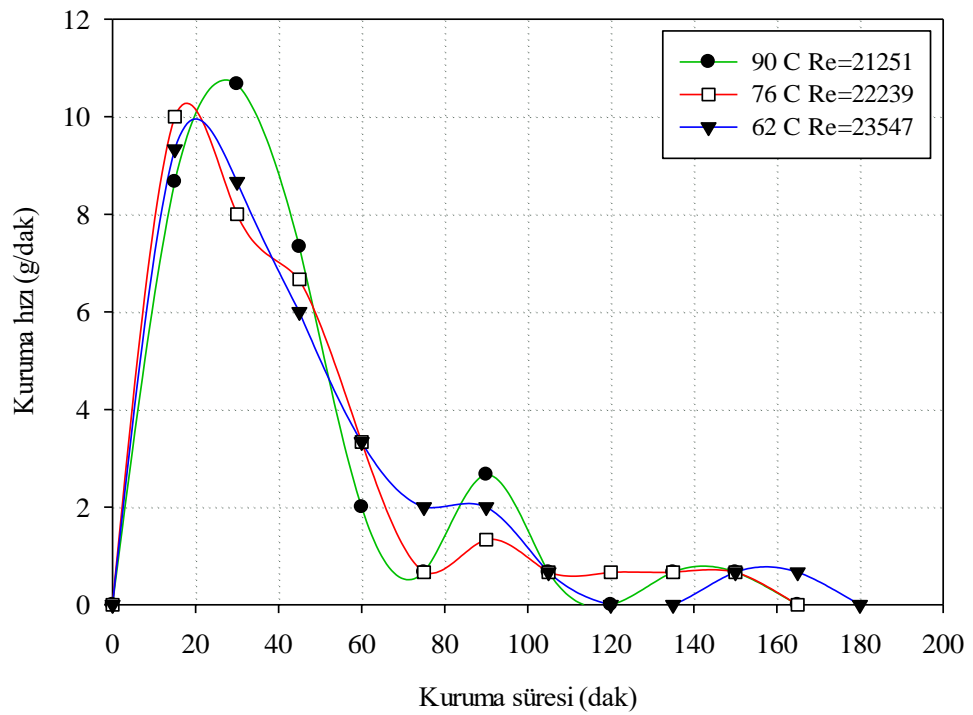
#### 9.4. Kuruma Hızı-Kuruma Süresi Arasındaki İlişki



**Şekil 9.29.** Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 50 Pa)



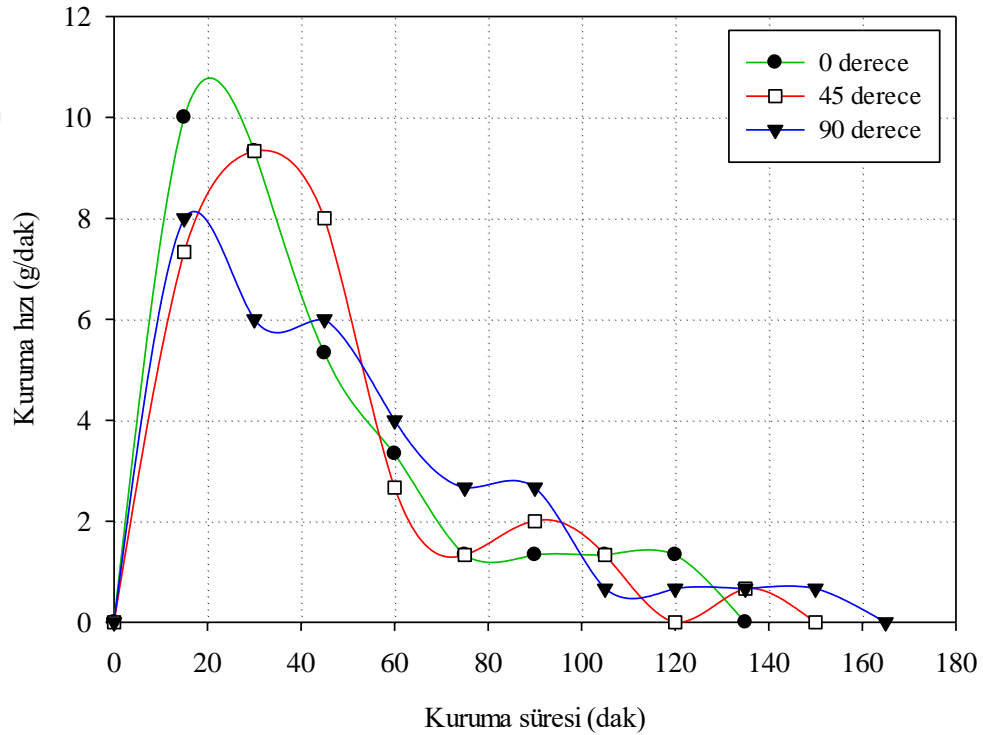
Şekil 9.30. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 37 Pa)



Şekil 9.31. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi  
(Emme deneyleri, 0 derece 24 Pa)

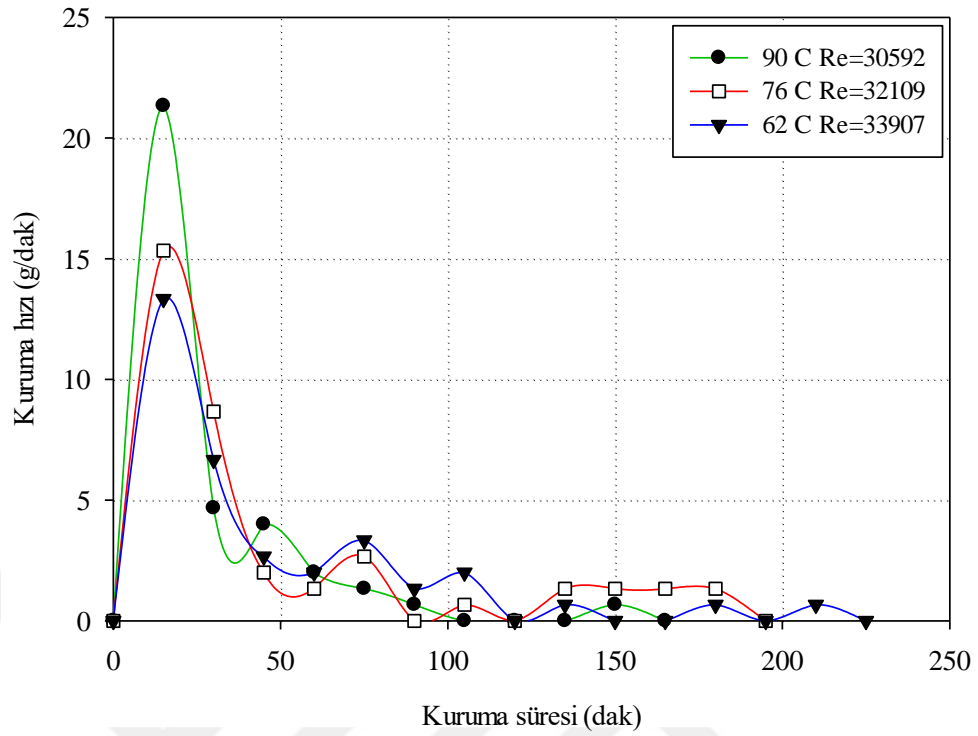
Şekil 9.29, 9.30 ve 9.31’de tuğla açısının 0 derece olduğu durumlarda yapılan emme deneylerinde, farklı hava hızı ve sıcaklık parametrelerine göre kuruma hızının değişimi gösterilmiştir. Yüksek sıcaklıklardaki kuruma hızları genel olarak başlangıçta ve devam eden sürelerde daha yüksek çıkmıştır. Kuruma sürelerine göre kıyaslandığında  $90^{\circ}\text{C}$  ve  $76^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarında daha önce kurumanın bittiği gözlemlenmiştir. Hava hızındaki değişime bakıldığında 50 Pa ve 37 Pa değerlerindeki kuruma hızı daha yüksek, kuruma süreleri daha düşük çıkmıştır.

Şekil 9.32’de emme deneylerinde tuğlaların farklı kurutma açıları parametrelerine göre, en yüksek hız ve sıcaklık değerlerindeki kuruma hızı değişimleri gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi tuğla açısı arttıkça kuruma hızı düşmekte bununla birlikte kuruma sürelerinde de artış gözlemlenmiştir. Yani hava akımına paralel olacak şekilde 0 derece açılı konumlandırılan tuğlaların kuruma hızı-kuruma süresi sonuçlarının diğer açılara oranla daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir.

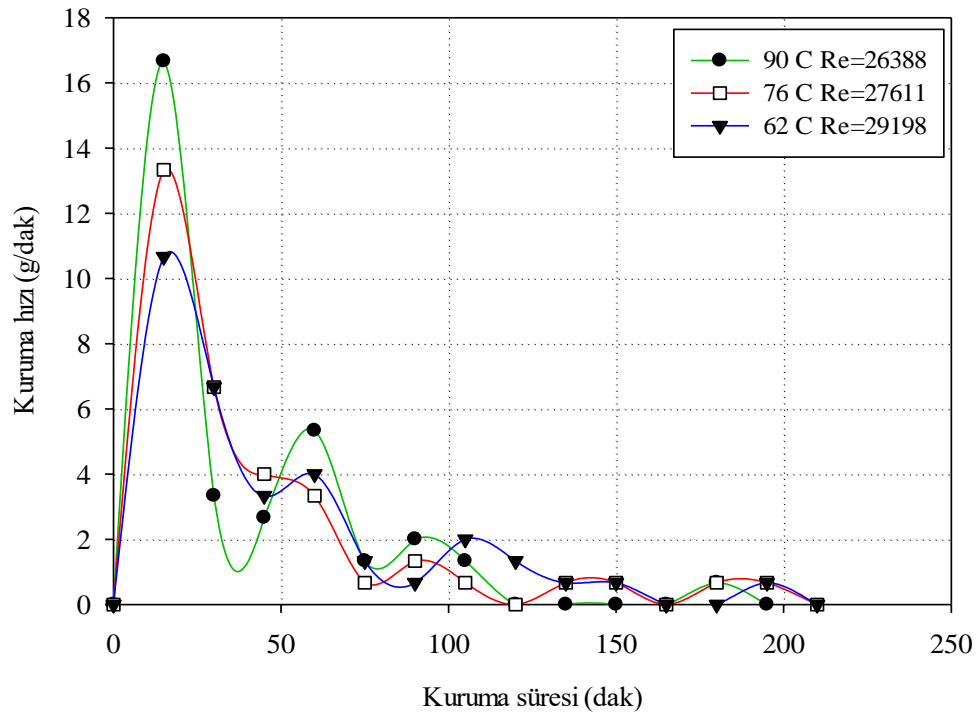


**Şekil 9.32.** Farklı açılarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Emme deneyleri,  $90^{\circ}\text{C}$   $\text{Re}=30592$ )

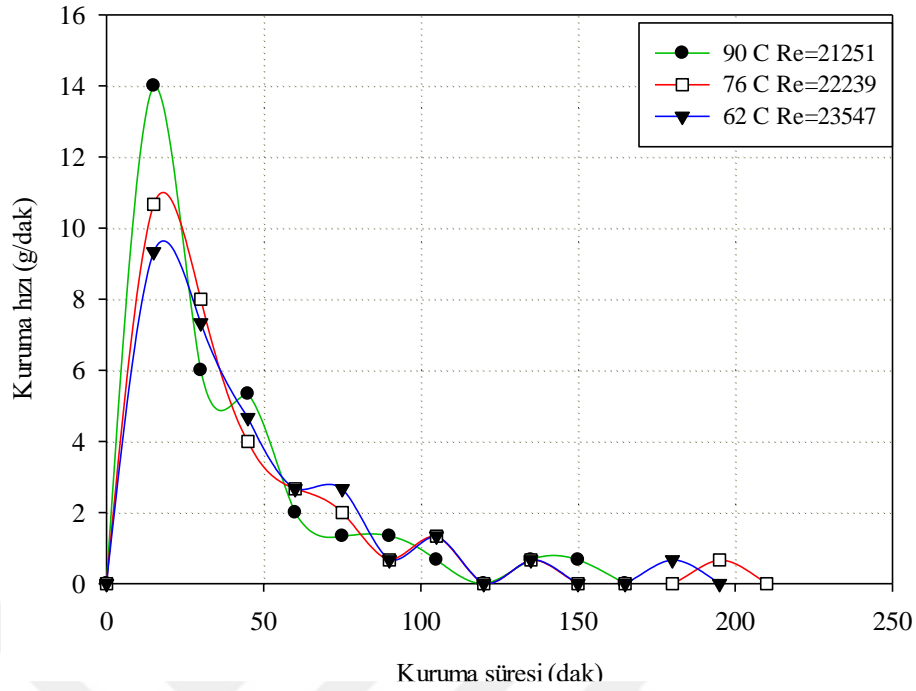




Şekil 9.33. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 50 Pa)



Şekil 9.34. Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 37 Pa)

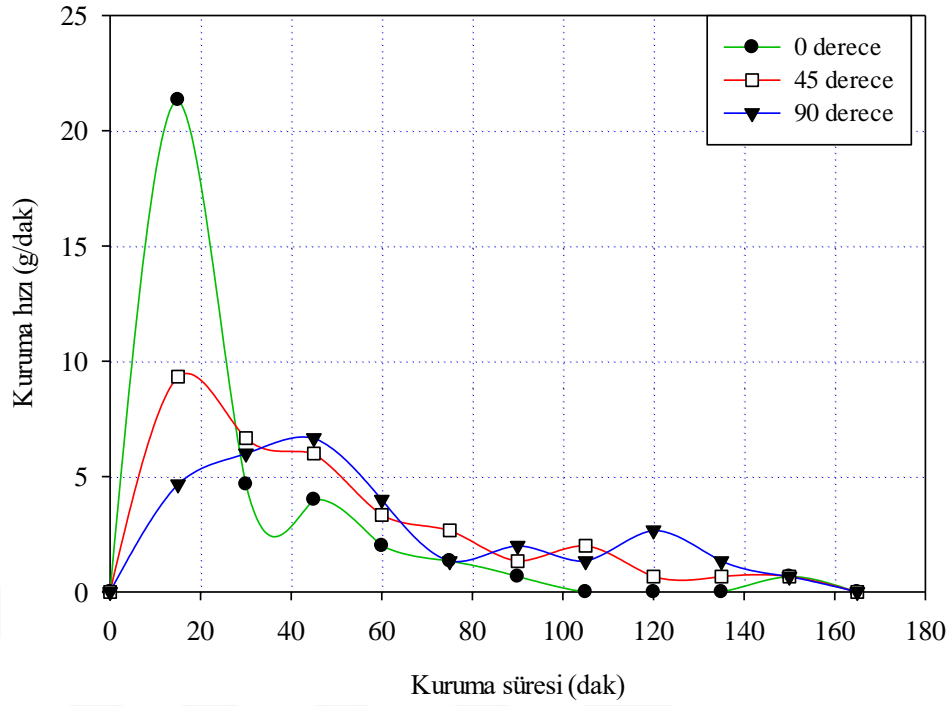


**Şekil 9.35.** Farklı sıcaklıklarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 0 derece 24 Pa)

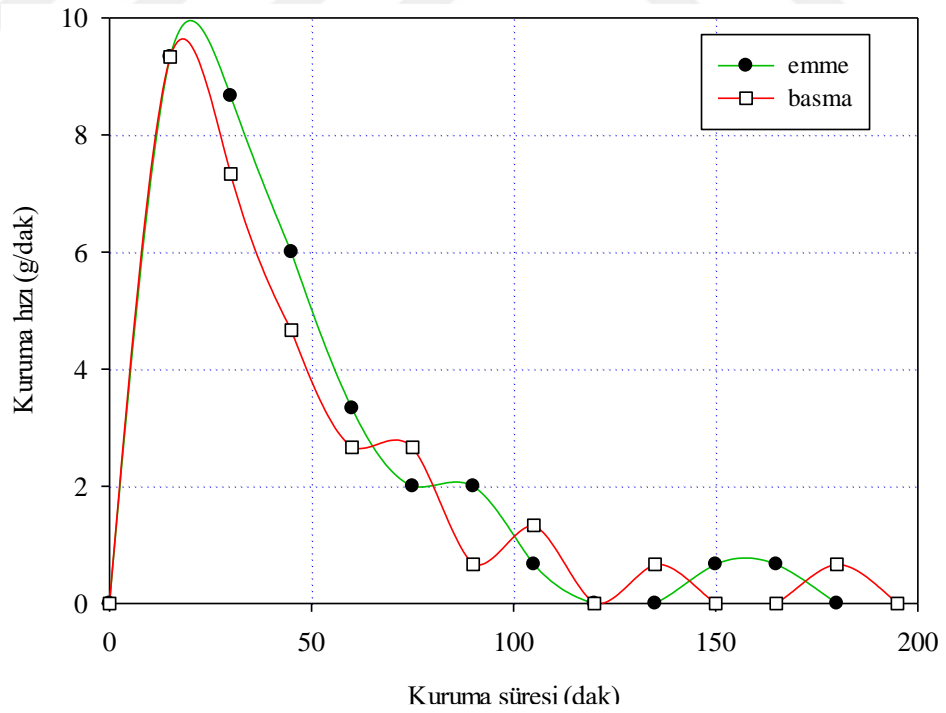
Şekil 9.33, 9.34 ve 9.35'te tuğla açısının 0 derece olduğu durumlarda, numunenin basma deneyi ile kurutulmasında, farklı hava hızı ve sıcaklık parametrelerine göre kuruma hızının değişimi gösterilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü üzere hava sıcaklığının artması kuruma hızını da artırmıştır. Aynı şekilde hava hızının artması da kuruma hızını da artırmış ve kuruma sürelerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 9.36'da basma deneylerindeki tuğlaların farklı kurutma açıları arasındaki, en yüksek hız ve sıcaklık parametrelerine göre kuruma hızındaki değişimleri gösterilmiştir. Burada olduğu gibi 0 derece tuğla açısında yapılan deneylerdeki kuruma hızı değerleri 45 ve 90 derecelere oranla daha yüksek değerlerde çıktığı sonucu elde edilmiştir. Ayrıca tuğla açısının artmasıyla kuruma sürelerinde artış gözlemlenmiştir.

Şekil 9.37'de tuğla açısı 0 derece olan, en düşük hız ve sıcaklık parametrelerindeki yapılan deneylerde emme deneyleri ile basma deneyleri arasındaki değişim kuruma hızı grafiğinde gösterilmiştir. Emme deneyleri ile basma deneylerinin kuruma hızlarında başlangıçta benzer şekilde oldukları görülse de emme deneyleri ile kurutmada kuruma hızı yüksek olan yerler daha fazladır. Bu parametreler göz önüne alındığında kuruma sürelerinde büyük farklılık olmadığı sonucu elde edilmiştir.



Şekil 9.36. Farklı açılarda kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi  
(Basma deneyleri, 90°C Re=30592)



Şekil 9.37. Emme ve basma deneylerinin kuruma hızına göre karşılaştırılması  
(0 derece, 62°C Re=23547)

### 9.5. Ekserji Analizi Verileri

Yapılan deneyler sonucunda enerji ve ekserji analizleri yapılmış ve bu analizler deneyin yapılış şekillerine göre farklılıklar göstererek kıyaslaması yapılmıştır. Elde edilen veriler tuğla açısının 0, 45, 90 derece olduğu ve kurutma havasının basma ve emme olarak iki farklı şekilde kurutulduğu durumlara göre oluşturulmuştur. Deneylerde çıkan değerler bazında enerji (E), enerji kullanım oranı ( $EUR_{ko}$ ), kurutma odası girişindeki ekserji ( $Eks_{kg}$ ), kurutma odası çıkışındaki ekserji ( $Eks_{kç}$ ), ekserji yok oluşu ( $Eks_y$ ) ve ekserji verimi ( $\eta_{Eks}$ ) ifadeleri bulunmuştur.

Kurutma havasının tuğla üzerine basılarak yapılan deneyler için bulunan sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. Tuğla açısı (0) derece olan deney sonuçları Çizelge 9.1'de, (45) derece olan deney sonuçları Çizelge 9.2'de, (90) derece olan deney sonuçları Çizelge 9.3'de gösterilmiştir.

**Çizelge 9.1.** Basma deneyleri, 0 derece açılı deney sonuçları

Re	$T_{\infty}$ (°C)	$V_k$ (m/s)	E (kJ/s)	$EUR_{ko}$ (%)	$Eks_{kg}$ (kJ/s)	$Eks_{kç}$ (kJ/s)	$Eks_y$ (kJ/s)	$\eta_{Eks}$ (%)
30592	90	2,62	0,946	9,528	0,768	0,636	0,132	82,81
32109	76	2,57	0,773	10,913	0,391	0,313	0,077	80,17
33907	62	2,52	0,581	10,629	0,235	0,189	0,047	80,21
26388	90	2,26	0,957	10,768	0,719	0,577	0,142	80,29
27611	76	2,21	0,828	11,431	0,478	0,380	0,099	79,34
29198	62	2,17	0,667	12,801	0,247	0,189	0,058	76,47
21251	90	1,82	0,916	12,560	0,597	0,463	0,134	77,60
22239	76	1,78	0,785	12,875	0,418	0,320	0,098	76,51
23547	62	1,75	0,538	12,401	0,212	0,164	0,048	77,18

**Çizelge 9.2.** Basma deneyleri, 45 derece açılı deney sonuçları

Re	T <sub>∞</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (m/s)	E (kJ/s)	EUR <sub>ko</sub> (%)	Eks <sub>kg</sub> (kJ/s)	Eks <sub>kç</sub> (kJ/s)	Eks <sub>y</sub> (kJ/s)	η <sub>Eks</sub> (%)
30592	90	2,62	0,946	10,099	0,683	0,559	0,124	81,78
32109	76	2,57	0,963	12,574	0,458	0,354	0,104	77,32
33907	62	2,52	0,581	11,447	0,202	0,159	0,043	78,73
26388	90	2,26	0,977	11,188	0,688	0,550	0,138	79,92
27611	76	2,21	0,828	11,697	0,455	0,359	0,096	78,87
29198	62	2,17	0,500	9,921	0,232	0,176	0,056	75,72
21251	90	1,82	1,045	14,332	0,595	0,462	0,133	77,59
22239	76	1,78	0,785	12,875	0,419	0,321	0,099	76,51
23547	62	1,75	0,404	10,263	0,175	0,131	0,044	74,92

**Çizelge 9.3.** Basma deneyleri, 90 derece açılı deney sonuçları

Re	T <sub>∞</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (m/s)	Ė (kJ/s)	EUR <sub>ko</sub> (%)	Eks <sub>kg</sub> (kJ/s)	Eks <sub>kç</sub> (kJ/s)	Eks <sub>y</sub> (kJ/s)	η <sub>Eks</sub> (%)
30592	90	2,62	1,318	12,127	0,924	0,724	0,200	78,36
32109	76	2,57	0,963	11,697	0,531	0,419	0,112	78,87
33907	62	2,52	0,775	12,025	0,327	0,255	0,072	77,86
26388	90	2,26	1,137	11,922	0,826	0,650	0,176	78,73
27611	76	2,21	0,986	12,749	0,544	0,419	0,125	77,00
29198	62	2,17	0,667	12,401	0,265	0,204	0,060	77,19
21251	90	1,82	1,174	14,783	0,708	0,523	0,185	73,93
22239	76	1,78	0,917	13,297	0,539	0,410	0,130	75,93
23547	62	1,75	0,673	14,172	0,255	0,190	0,066	74,22

Kurutma havasının tuğla üzerinden çekilerek yapılan deneyler için bulunan sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. Tuğla açısı (0) derece olan deney sonuçları Çizelge 9.4'de, (45) derece olan deney sonuçları Çizelge 9.5'de, (90) derece olan deney sonuçları Çizelge 9.6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 9.4.** Emme deneyleri, 0 derece açılı deney sonuçları

Re	$T_{\infty}$ (°C)	$V_k$ (m/s)	$\dot{E}$ (kJ/s)	$EUR_{ko}$ (%)	$\dot{E}_{ks_{kg}}$ (kJ/s)	$\dot{E}_{ks_{kç}}$ (kJ/s)	$\dot{E}_{ks_y}$ (kJ/s)	$\eta_{Eks}$ (%)
30592	90	2,62	0,946	8,859	0,889	0,747	0,142	84,02
32109	76	2,57	0,771	9,367	0,528	0,437	0,090	82,91
33907	62	2,52	0,581	9,921	0,270	0,220	0,050	81,49
26388	90	2,26	0,977	10,985	0,712	0,572	0,140	80,28
27611	76	2,21	0,989	13,360	0,498	0,378	0,119	76,00
29198	62	2,17	0,667	11,338	0,317	0,251	0,066	79,09
21251	90	1,82	1,174	14,314	0,757	0,566	0,191	74,75
22239	76	1,78	0,917	13,297	0,538	0,408	0,129	75,93
23547	62	1,75	0,673	13,053	0,302	0,230	0,072	76,18

**Çizelge 9.5.** Emme deneyleri, 45 derece açılı deney sonuçları

Re	$T_{\infty}$ (°C)	$V_k$ (m/s)	$\dot{E}$ (kJ/s)	$EUR_{ko}$ (%)	$\dot{E}_{ks_{kg}}$ (kJ/s)	$\dot{E}_{ks_{kç}}$ (kJ/s)	$\dot{E}_{ks_y}$ (kJ/s)	$\eta_{Eks}$ (%)
30592	90	2,62	1,318	10,990	1,129	0,907	0,221	80,39
32109	76	2,57	1,342	12,525	0,910	0,706	0,204	77,63
33907	62	2,52	0,969	11,810	0,535	0,420	0,116	78,40
26388	90	2,26	1,297	11,803	1,107	0,875	0,232	79,07
27611	76	2,21	0,991	10,949	0,754	0,606	0,148	80,32
29198	62	2,17	0,834	11,536	0,484	0,382	0,102	78,90
21251	90	1,82	1,174	13,069	0,914	0,703	0,211	76,93
22239	76	1,78	1,048	13,871	0,652	0,489	0,162	75,08
23547	62	1,75	0,538	9,019	0,408	0,308	0,100	75,51

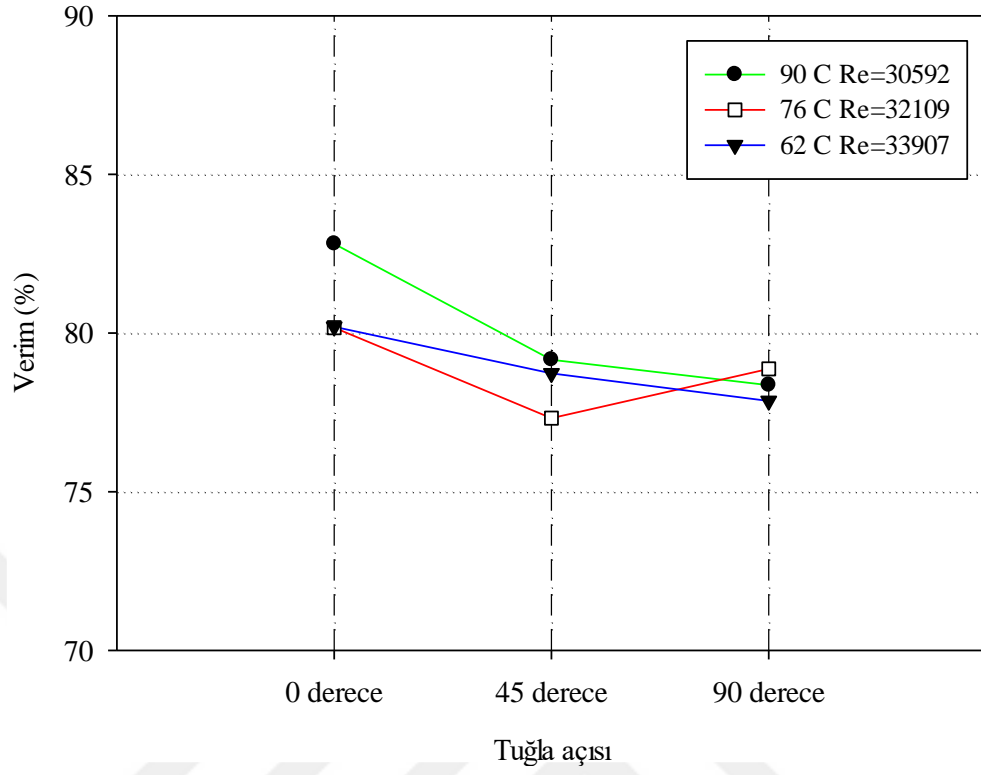
**Çizelge 9.6.** Emme deneyleri, 90 derece açılı deney sonuçları

Re	T <sub>∞</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (m/s)	Ė (kJ/s)	EUR <sub>ko</sub> (%)	Ė <sub>ks<sub>kg</sub></sub> (kJ/s)	Ė <sub>ks<sub>kç</sub></sub> (kJ/s)	Ė <sub>ks<sub>y</sub></sub> (kJ/s)	η <sub>Eks</sub> (%)
30592	90	2,62	1,502	11,964	1,245	0,980	0,265	78,75
32109	76	2,57	1,342	12,525	0,910	0,706	0,204	77,63
33907	62	2,52	0,969	11,536	0,562	0,443	0,119	78,90
26388	90	2,26	1,297	11,979	1,074	0,846	0,228	78,75
27611	76	2,21	0,991	10,753	0,782	0,631	0,151	80,67
29198	62	2,17	0,834	11,810	0,461	0,361	0,100	78,40
21251	90	1,82	1,298	14,662	0,886	0,657	0,229	74,16
22239	76	1,78	0,917	12,348	0,628	0,488	0,141	77,63
23547	62	1,75	0,673	12,098	0,354	0,276	0,078	77,89

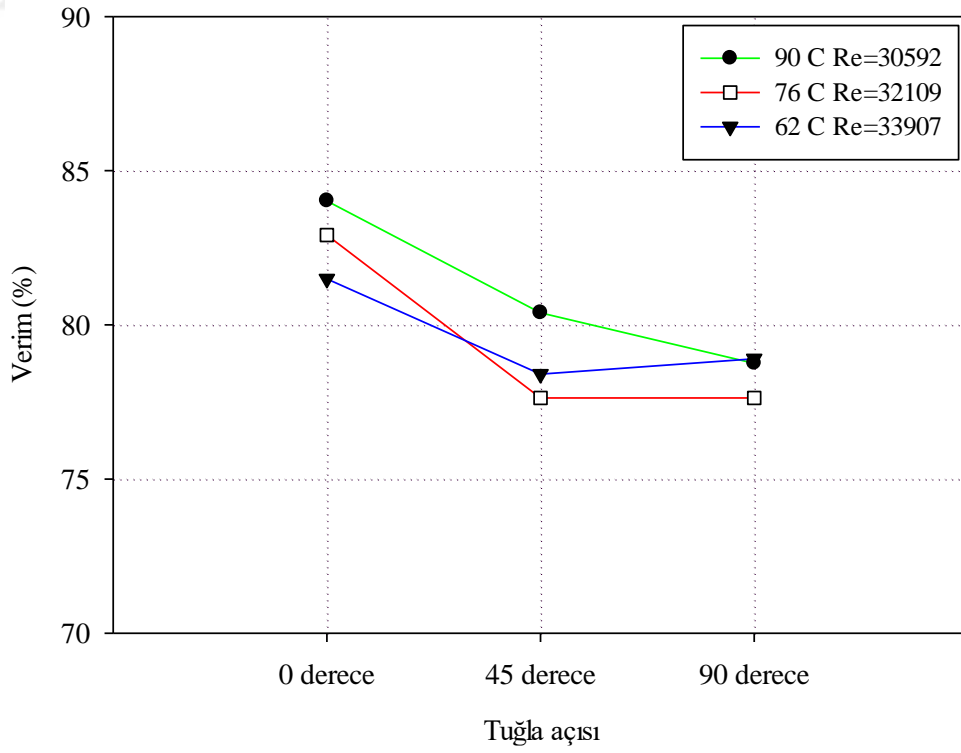
Kurutma odası girişindeki ve çıkışındaki ekserji değerlerinin basma deneyleri için sırasıyla 0,175-0,924 kJ/s, 0,131-0,724 kJ/s değerleri, emme deneyleri için sırasıyla 0,27-1,245 kJ/s, 0,22-0,98 kJ/s değerleri arasında çıktığı görülmektedir. Ekserjinin bulunmasında kullanılan denklem 7.17 ve 7.18'deki ifadelerden de anlaşılacağı gibi, kurutma havasının kütleli debisi, kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıkları ve ortam sıcaklığının etkileri ile bu değerler değişiklik göstermiştir. Mevsimsel değişikliklerin etkisiyle yapılan deneylerin, hava sıcaklığından etkilenmesi ile çıkan sonuçlar arasındaki farklılıklarda büyüme olduğu sonucu elde edilmiştir.

Kurutma odasında meydana gelen ekserji yok oluşu değerlerinin basma deneyleri için 0,043-0,2 kJ/s arasında, emme deneyleri için 0,050-0,265 kJ/s arasında çıktığı görülmektedir. Kurutma odasına giriş ekserjisi ile çıkış ekserjisi arasındaki fark olan ekserji yok oluşunun, istenmeyen bir durum olduğu düşünülürse, tuğla açısının büyümesiyle yok olan ekserjinin attığı gözlemlenmiştir.

Ekserji verimi de basma deneyleri için %73,93-82,81 değerleri, emme deneyleri için %74,16-84,02 değerleri arasında değişiklik göstermiştir. İki farklı deney için kurutma odasına giriş çıkış koşullarındaki sıcaklıklar ve havanın kütleli debisi eşit olsa bile ortam havasının artmasıyla ekserji veriminde düşüş olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 9.38. Basma deneyleri ekserji verimi

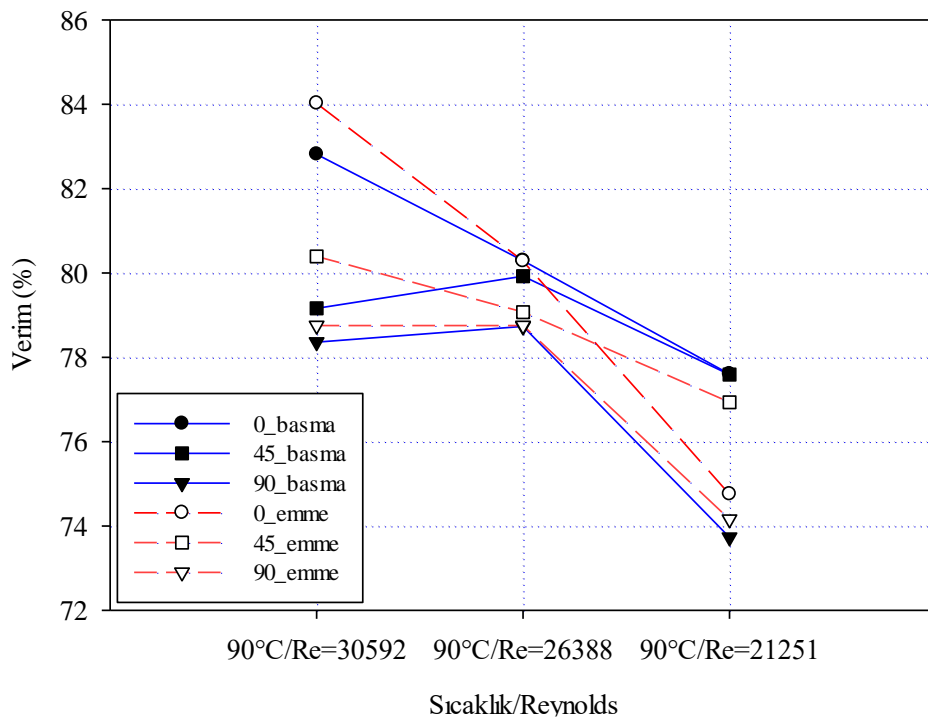


Şekil 9.39. Emme deneyleri ekserji verimi



Şekil 9.38 ve 9.39’da basma ve emme deneylerinde çıkarılan verilerin ekserji verimi değerlerinin, en yüksek hava hızı bağlamında, farklı tuğla açısı ve sıcaklıklardaki değişimleri gösterilmiştir. Her iki grup deneyleri içinde 0 derece tuğla açısı verileri en iyi sonuçlar olduğu elde edilmiştir. Tuğla açısı arttıkça verim düşmektedir. Sıcaklık baz alınarak düşünüldüğünde 90<sup>0</sup>C sıcaklık deneylerde, en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

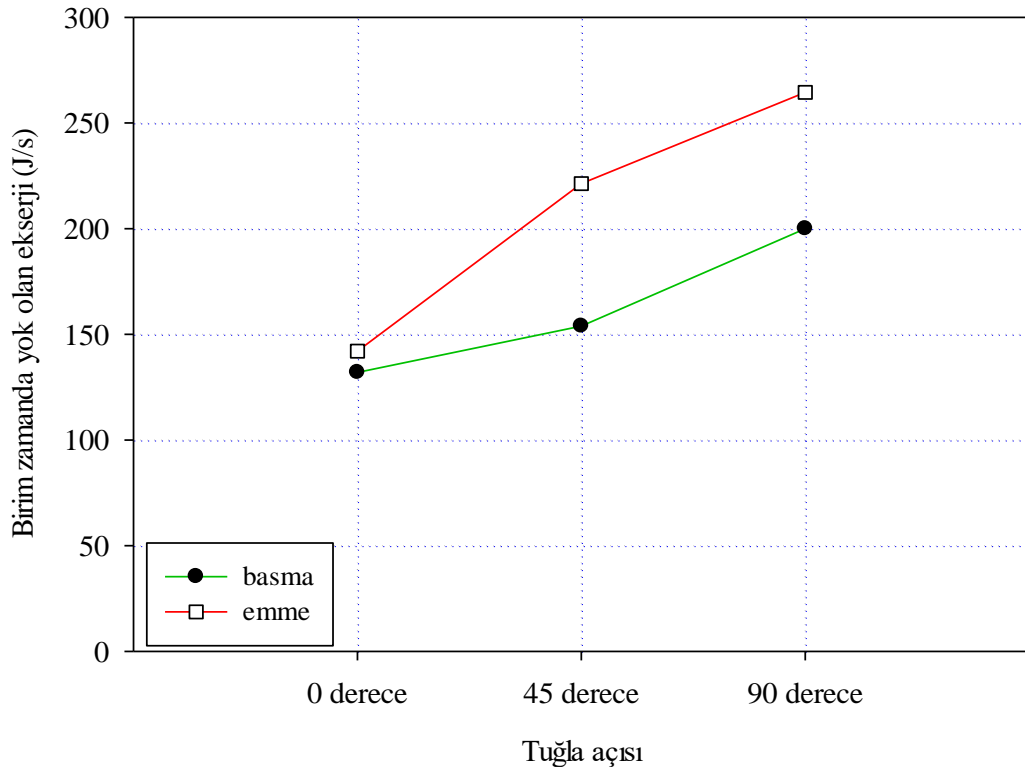
Şekil 9.40’da en yüksek sıcaklık değeri olan 90<sup>0</sup>C ile yapılan deneylerden elde edilen verilerin, basma deneyleri ve emme deneyleri için ayrı ayrı düşünülerek, 0, 45 ve 90 derece tuğla açıları ve hava hızlarına göre değişimleri grafik olarak verilmiştir. Grafikten anlaşılıyor ki genel itibariyle hız düşmesi ile ekserji veriminde azalma olmuştur. Tuğla açısının 0 dereceden 90 dereceye artmasıyla verimin düştüğü belirlenmiştir. Özellikle 0 derece tuğla açısında yapılan deneylerin ekserji verimleri, diğer deneylerden daha iyi çıkmıştır. Basma deneyleri ile emme deneylerinin karşılaştırılması burada görülmektedir. Emme deneyleri sonuçlarında en yüksek ekserji verimi %84,02 iken basma deneylerinde %82,81 çıkmıştır. Emme deneylerinin daha iyi sonuçlar olduğu elde edilmiştir. Diğer açılardaki farklılıklarda, bilindiği üzere ekserji veriminin, kurutma odasının giriş çıkış sıcaklıkları ve ortam sıcaklıklarının değişimi ile ilişkili olmasındandır. Bu değişimler verimi oldukça etkilemiştir.



Şekil 9.40. 90<sup>0</sup>C sıcaklık için ekserji verimleri

Şekil 9.41’de farklı hava hızları ve en yüksek sıcaklık değerleri için, basma deneyleri ile emme deneylerinin deney sonuçlarının ekserji yok oluşu gösterilmiştir. Kanal içindeki hava akış hızının  $Re=30592$  olduğu,  $90^{\circ}C$  hava sıcaklığında yapılan deneylerde  $0$  derece tuğla açısı değerleri en iyi çıkmıştır. Tuğla açısı arttıkça ekserji yok oluşu da artmaktadır. Basma deneyinin deney verileri, emme deneyinin deney verilerine göre daha iyi sonuçlar oluşturmuştur.

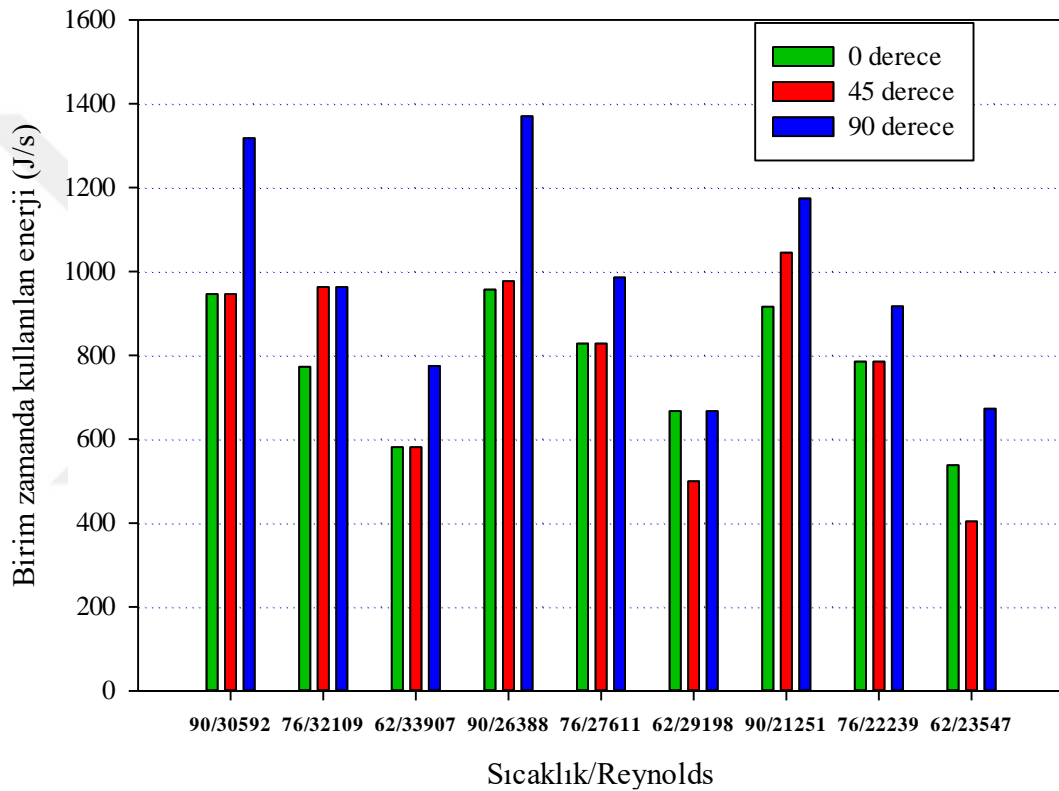
Çizelgelerde çıkarılan sonuçlara bakıldığında enerji değerleri basma deneyleri için tüm tuğla açıları arasında  $0,404-1,318$  kJ/s değerleri arasında değişiklik göstermektedir. Hava hızının ve sıcaklığının yükselmesiyle enerjinin de arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde emme deneyleri için de enerji değerleri  $0,5-1,504$  kJ/s değerleri arasında değişime uğramaktadır. Bu farkların oluşmasında havanın kütsel debisinin ve kurutma odası giriş çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak belirlenen entalpilerin etkisi olduğu sonucu elde edilmiştir.



Şekil 9.41.  $90^{\circ}C$   $Re=30592$  değerleri için ekserji yok oluşu

Şekil 9.42’de basma deneyleri için yapılan deneylerdeki enerji değerleri hava hızı, sıcaklık ve tuğla açısı değişimlerine göre olan değerler gösterilmiştir. Tuğla açısı,

kurutma havası hızı aynı olduğu ve sıcaklığın değiştiği durumlarda, grafikten görülmektedir ki kurutma odası giriş sıcaklıkları yükseldikçe enerji kullanımı da artmıştır. Çünkü enerji teriminin formülü düşünüldüğünde, kurutma odası giriş ve çıkışındaki entalpi değeri farklarından oluşur. Yüksek sıcaklıkla giren kuru hava ile numune arasında ısı ve kütle transferi gerçekleşmektedir. Hava kurutma odasından çıkarken sıcaklığı düşmektedir. Sıcaklığın 90°C olduğunda yapılan deneylerde en yüksek olmuştur.

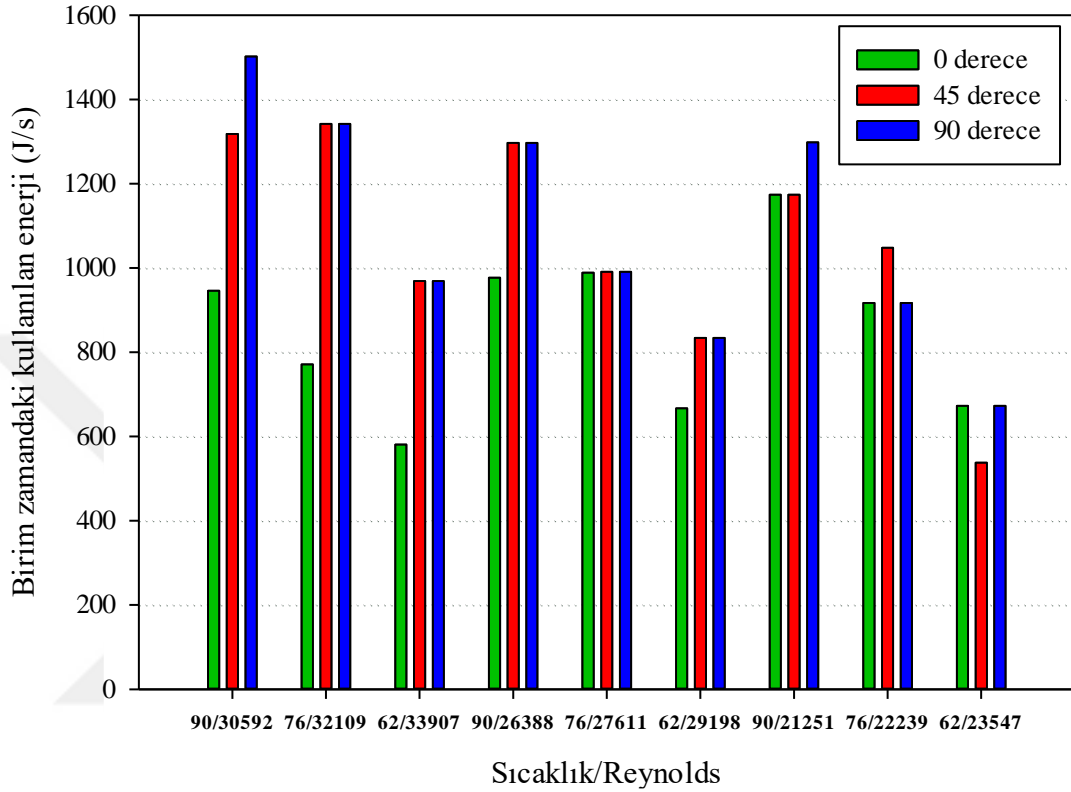


**Şekil 9.42.** Basma deneyleri enerji kullanım değerleri

Basma deneyleri için oluşturulan Şekil 9.42, genel olarak tuğla açısının artmasıyla enerji kullanımının arttığını göstermektedir. Aynı sıcaklık ve hızlarda giren kuru hava, tuğla açısı arttıkça numune ile teması artmakta ve giriş-çıkış sıcaklıkları ve bu yüzden giriş-çıkış entalpileri farkı daha yüksek çıkmaktadır.

Şekil 9.43'te emme deneyleri için yapılan deneylerdeki enerji kullanım değerlerinin hava hızı, sıcaklık ve tuğla açısı değişimlerine göre olan farklılıkları gösterilmiştir. Kurutma havası sıcaklığının artması basma deneylerinde olduğu gibi burada da enerji kullanımını artırmıştır. Yine aynı şekilde tuğla açısının artması, bazı noktalarda benzer

sonuçlar vermesine rağmen, enerji kullanımını da artmıştır. Kurutma hava hızının enerji kullanımına etkisi burada daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Kurutma hava hızı arttıkça enerji kullanımında da artış gözlemlenmiştir.



Şekil 9.43. Emme deneyleri enerji kullanım değerleri

## 9.6. Verilerin İstatistiksel Analizi

Kurutma deneylerinde matematiksel modelleme yapmak için nem oranının, zamana bağlı olarak değişimini ifade eden denklem (6.7) kullanılmaktadır. Bu denkleme göre deneysel sonuçlardan elde edilen nem oranı  $MR = (M_t - M_e)/(M_0 - M_e)$  formülü baz alınarak hesaplanmıştır. Ancak daha önceki matematiksel modelleme-nem oranı konu başlığında aktarıldığı gibi deneysel nem oranları, sadeleştirilmiş şekli ile:  $MR = (M_t - M_0)$  denklemi baz alınarak bulunmuştur.

Matematiksel modelleme için ince tabaka kurutma eşitlikleri Çizelge 9.7'de belirtilmiştir. Bu teorideki modellemeler arasında, bu çalışmada yapılan kurutma deneylerine en uygun modeli tanımlamak için lineer olmayan regresyon analizleri, Statistica 10.0 bilgisayar programı ile yapılmıştır. En iyi modeli seçmek için ilk olarak,

her bir sıcaklık ve Re değerlerine göre değişen korelasyon katsayıları ( $R^2$ ) hesaplanmıştır. Korelasyon katsayısına ek olarak, deneysel ve hesaplanan veriler arasındaki karesel sapma anlamına gelen azaltılmış ( $\chi^2$ ) ve karesel ortalama hata (RMSE) hesaplanmıştır. Bu değerler denklem 9.1, 9.2 ve 9.3'te gösterilmiştir. Seçilecek en iyi modelin,  $R^2$  değerinin 1'e en yakın olması,  $\chi^2$  değerinin 0'a en yakın olması ve RMSE değerinin de oldukça küçük çıkması gerekmektedir (Akpınar, 2005).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{pre,i}) \cdot \sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{exp,i})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{pre,i})^2] \cdot [\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{exp,i})^2]}} \quad (9.1)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (9.2)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (9.3)$$

Burada;  $MR_{exp,i}$  deneysel olarak bulunmuş nem oranı,  $MR_{pre,i}$  teorik olarak verilen nem oranı, N deney sayısı, n kurutma modellerindeki sabit katsayı sayısı olarak geçmektedir.

**Çizelge 9.7.** Kurutma kinetiğini belirlemede kullanılan modeller (Akpınar, 2005)

Model Numarası	Model Adı	Denklem
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Henderson ve Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
3	Logaritmik	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$
4	Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
5	Difüzyon yaklaşımı	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-kbt)$

Bu çalışmadaki uygunluklarına bakılan 5 modelin regresyon analizi ile  $R^2$ ,  $\chi^2$ , RMSE, standart sapma sonuçlarını çıkarmak için Statistica programı kullanılmıştır. Ayrıca bu

program ile modellerdeki (k, a, b, c) gibi katsayılar da bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 9.8'den itibaren Çizelge 9.16'ya kadar farklı sıcaklık ve Reynolds değerlerine bağlı olarak dokuz parça halinde verilmiştir.

Teorideki kurutma modelleri incelendiğinde, yapılan regresyon analizi sonuçlarına göre en büyük  $R^2$ , en küçük  $\chi^2$  ve RMSE değerlerine bakarak, en iyi modelin Difüzyon Yaklaşımı modeli olduğu anlaşılmaktadır. Difüzyon Yaklaşımı modeli için  $R^2=0,994-0,999$  değerleri arasında,  $\chi^2=0,000094-0,000205$  değerleri arasında, RMSE= $0,0075-0,0272$  değerleri arasında çıkmıştır.



**Çizelge 9.8.** 0 derece açıda Re=30592 ve T=90°C için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	MR=exp(-k.t)	-	-	-	0,0515	0,99407	0,000986	0,030	-	-	-	0,0028
Henderson ve Pabis	MR=a.exp(-k.t)	0,9783	-	-	0,0504	0,99433	0,001037	0,02939	0,03141	-	-	0,00322
Logaritmik	MR=a.exp(-k.t)+c	0,9651	-	0,019	0,0542	0,99559	0,000896	0,025918	0,03076	-	0,01146	0,00395
Wang ve Singh	MR=1+a.t+b.t <sup>2</sup>	-0,202	9,2E-05	-	-	0,84666	0,02596	0,147091	0,00192	1,4E-05	-	-
Difüzyon yaklaşımı	MR=a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.b.t)	0,34	0,039	-	0,887	0,99953	9,63E-05	0,008499	0,066	125,932	-	2778,49

**Çizelge 9.9.** 0 derece açıda Re=32109 ve T=76°C için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	MR=exp(-k.t)	-	-	-	0,0264	0,96626	0,004731	0,066277	-	-	-	0,0023
Henderson ve Pabis	MR=a.exp(-k.t)	0,9134	-	-	0,0236	0,97095	0,004423	0,061575	0,05795	-	-	0,00252
Logaritmik	MR=a.exp(-k.t)+c	0,8946	-	0,0735	0,0337	0,98268	0,002894	0,047684	0,05209	-	0,02187	0,004344
Wang ve Singh	MR=1+a.t+b.t <sup>2</sup>	-0,0144	5,1E-05	-	-	0,8584	0,020329	0,132003	0,00133	0,0000	-	-
Difüzyon yaklaşımı	MR=a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.b.t)	0,5316	0,1579	-	0,079	0,99439	0,000944	0,027228	0,10096	0,0311	-	0,02368

**Çizelge 9.10.** 0 derece açıda Re=33907 ve T=62°C için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	MR=exp(-k.t)	-	-	-	0,0262	0,99328	0,001039	0,031139	-	-	-	0,00106
Henderson ve Pabis	MR=a.exp(-k.t)	0,9557	-	-	0,025	0,99328	0,000935	0,02846	0,02695	-	-	0,00119
Logaritmik	MR=a.exp(-k.t)+c	0,9458	-	0,0209	0,027	0,99535	0,000839	0,025908	0,02698	-	0,01254	0,00175
Wang ve Singh	MR=1+a.t+b.t <sup>2</sup>	-0,0143	4,8E-05	-	-	0,92469	0,012103	0,102419	0,00092	0,0000	-	-
Difüzyon yaklaşımı	MR=a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.b.t)	0,2184	0,136	-	0,151	0,99854	0,000255	0,014276	0,06037	0,08591	-	0,10132

**Çizelge 9.11.** 0 derece açıda  $Re=26388$  ve  $T=90^{\circ}C$  için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	$MR=\exp(-k.t)$	-	-	-	0,0313	0,98868	0,00190	0,041881	-	-	-	0,00188
Henderson ve Pabis	$MR=a.\exp(-k.t)$	0,954902	-	-	0,299	0,98986	0,00185	0,039651	0,0393	-	-	0,002156
Logaritmik	$MR=a.\exp(-k.t)+c$	0,950773	-	0,007342	0,0307	0,98997	0,00202	0,039432	0,0433	-	0,0212	0,003245
Wang ve Singh	$MR=1+a.t+b.t^2$	-0,010168	0,000067	-	-	0,93019	0,01241	0,102505	0,0011	0,0000	-	-
Difüzyon yaklaşımı	$MR=a.\exp(-k.t)+(1-a).\exp(-k.b.t)$	0,229093	0,027122	-	0,9013	0,99543	0,00092	0,026647	0,11	417,04	-	13865,05

**Çizelge 9.12.** 0 derece açıda  $Re=27611$  ve  $T=76^{\circ}C$  için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	$MR=\exp(-k.t)$	-	-	-	0,02919	0,99364	0,000956	0,029868	-	-	-	0,00119
Henderson ve Pabis	$MR=a.\exp(-k.t)$	0,966067	-	-	0,02813	0,99427	0,000926	0,028339	0,0275	-	-	0,0013
Logaritmik	$MR=a.\exp(-k.t)+c$	0,950794	-	0,032181	0,03192	0,99712	0,000315	0,015898	0,0214	-	0,00875	0,00157
Wang ve Singh	$MR=1+a.t+b.t^2$	-0,014632	0,00005	-	-	0,89223	0,014677	0,112784	0,0010	0,0000	-	-
Difüzyon yaklaşımı	$MR=a.\exp(-k.t)+(1-a).\exp(-k.b.t)$	0,603815	0,30045	-	0,0511	0,99913	0,000098	0,008868	0,1138	0,0229	-	0,00786

**Çizelge 9.13.** 0 derece açıda  $Re=29198$  ve  $T=62^{\circ}C$  için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	$MR=\exp(-k.t)$	-	-	-	0,02364	0,99749	0,000408	0,019522	-	-	-	0,00057
Henderson ve Pabis	$MR=a.\exp(-k.t)$	0,976629	-	-	0,02309	0,99780	0,000382	0,018214	0,01724	-	-	0,00068
Logaritmik	$MR=a.\exp(-k.t)+c$	0,974492	-	0,004149	0,02343	0,99782	0,000396	0,017803	0,01876	-	0,01002	0,00106
Wang ve Singh	$MR=1+a.t+b.t^2$	-0,01378	0,000045	-	-	0,95217	0,007409	0,080135	0,00077	0,0000	-	-
Difüzyon yaklaşımı	$MR=a.\exp(-k.t)+(1-a).\exp(-k.b.t)$	0,127656	0,194714	-	0,10747	0,99880	0,000205	0,012824	0,07889	0,16727	-	0,09741



Çizelge 9.14. 0 derece açıda Re=21251 ve T=90°C için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	MR=exp(-k.t)	-	-	-	0,03357	0,9981	0,00034	0,01774	-	-	-	0,00089
Henderson ve Pabis	MR=a.exp(-k.t)	0,98284	-	-	0,33008	0,99826	0,00034	0,01694	0,01723	-	-	0,00103
Logaritmik	MR=a.exp(-k.t)+c	0,97484	-	0,01309	0,03455	0,99862	0,00031	0,01513	0,01727	-	0,00839	0,00142
Wang ve Singh	MR=1+a.t+b.t <sup>2</sup>	-0,0182	0,00078	-	-	0,93906	0,01174	0,09889	0,00129	0,0000	-	-
Difüzyon yaklaşımı	MR=a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.b.t)	0,12056	0,07298	-	0,40634	0,99936	0,00014	0,01031	0,06025	1,16257	-	6,18153

Çizelge 9.15. 0 derece açıda Re=22239 ve T=76°C için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	MR=exp(-k.t)	-	-	-	0,02948	0,99927	0,00012	0,010515	-	-	-	0,00042
Henderson ve Pabis	MR=a.exp(-k.t)	0,99862	-	-	0,02944	0,99928	0,00012	0,010508	0,01032	-	-	0,00052
Logaritmik	MR=a.exp(-k.t)+c	0,99331	-	0,00905	0,03036	0,99949	0,000076	0,007833	0,00937	-	0,00396	0,00063
Wang ve Singh	MR=1+a.t+b.t <sup>2</sup>	-0,0150	0,000052	-	-	0,92488	0,011113	0,098138	0,00095	0,0000	-	-
Difüzyon yaklaşımı	MR=a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.b.t)	0,94854	0,316492	-	0,03155	0,99952	7,92E-05	0,007959	0,11705	0,39789	-	0,00268

Çizelge 9.16. 0 derece açıda Re=23547 ve T=62°C için olan kurutma modelleri

Denklem	Formül	a	b	c	k	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	Standart Sapma			
									a	b	c	k
Newton	MR=exp(-k.t)	-	-	-	0,02714	0,999397	0,000110	0,010118	-	-	-	0,00036
Henderson ve Pabis	MR=a.exp(-k.t)	1,0099	-	-	0,02739	0,999448	0,000109	0,009674	0,00938	-	-	0,00043
Logaritmik	MR=a.exp(-k.t)+c	1,0112	-	-0,00207	0,027218	0,999457	0,000117	0,009601	0,01018	-	0,00510	0,000636
Wang ve Singh	MR=1+a.t+b.t <sup>2</sup>	-0,0154	0,00005	-	-	0,958952	0,00796	0,0826	0,00053	0,0000	-	-
Difüzyon yaklaşımı	MR=a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.b.t)	-0,0530	0,07635	-	0,37319	0,999665	7,23E-05	0,007537	0,04013	6,444	-	1,3474

Bu deneyde bağımsız değişken parametreler kullanılarak bir denklem türetilmiştir. Deneylerdeki değişkenler olarak sıcaklık, Reynolds ve tuğla açısı parametreleri kullanılmış ve zamana göre değişimlerini de içeren bir nem oranı kurutma modellemesi yapılmıştır. Bu kurutma deneyi için türetilen model denklem 9.4'te gösterilmiştir. Basma deneyleri ve emme deneyleri için çıkan farklı katsayılar Statistica programında hesaplanmıştır. Basma deneyleri için çıkan katsayılar denklem 9.5'te, emme deneyleri için olan katsayılar denklem 9.6'da düzenlenerek verilmiştir. Kurutma modeli katsayıları (b, k, c, m, d) ve aynı zamanda hesaplanan  $R^2$ ,  $\chi^2$ , RMSE, standart sapma değerleri de Çizelge 9.17'de verilmiştir.

$$MR = b \cdot \exp(-k \cdot t) \cdot Re^c \cdot \theta^m \cdot (1 + \sin\alpha)^d \quad (9.4)$$

$$MR = 1,527 \cdot \exp(-0,0217 \cdot t) \cdot Re^{-0,057} \cdot \theta^{-0,01} \cdot (1 + \sin\alpha)^{0,309} \quad (9.5)$$

$$MR = 1,372 \cdot \exp(-0,026 \cdot t) \cdot Re^{-0,027} \cdot \theta^{0,039} \cdot (1 + \sin\alpha)^{0,202} \quad (9.6)$$

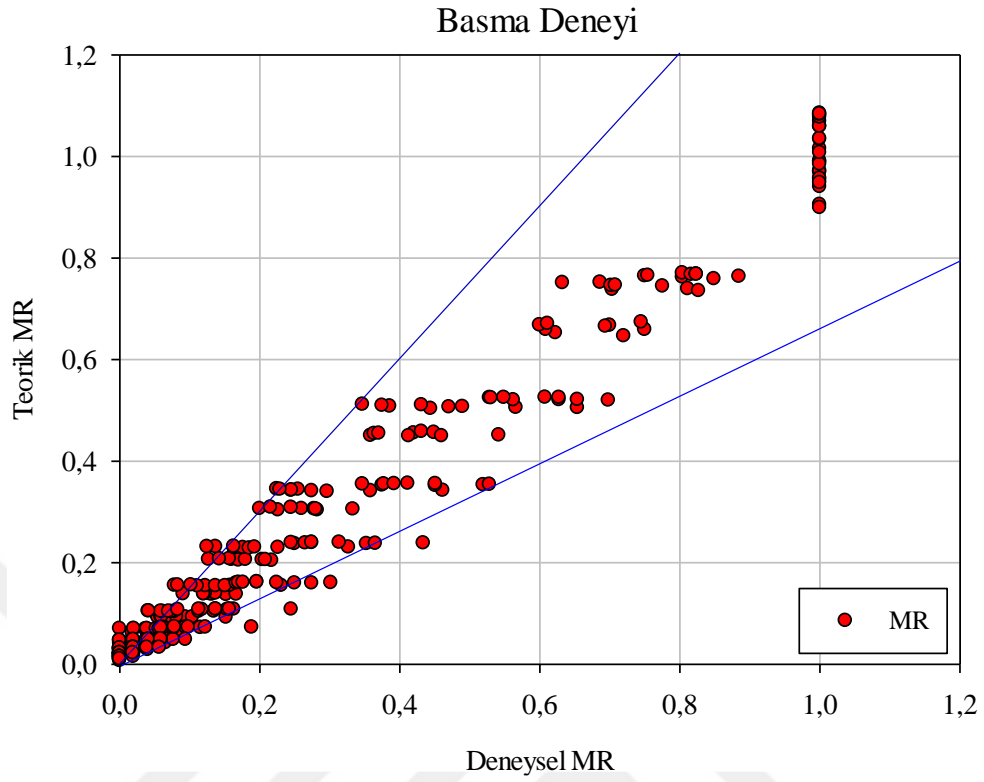
$$\theta = \frac{T_m - T_g}{T_{\text{şg}} - T_g} \quad (9.7)$$

Burada; ' $\theta$ ' sıcaklık değişimini,  $T_m$  tuğla yüzeyinden ölçülen sıcaklıkların ortalaması,  $T_g$  ortamdaki havanın sıcaklığı,  $T_{\text{şg}}$  şartlandırma ünitesine giren havanın sıcaklığıdır. ' $\alpha$ ' tuğla açısını ifade etmektedir.

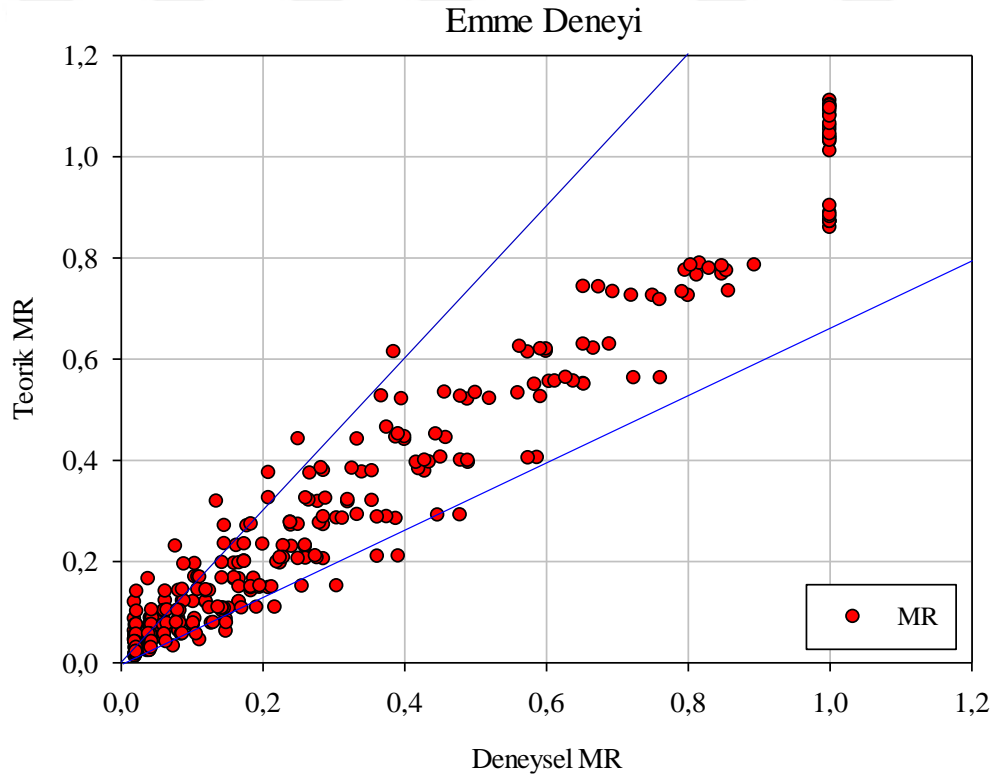
**Çizelge 9.17.** Tasarlanan kurutma modeli katsayıları

Deney Türü	Katsayılar					Standart Sapma					Regresyon Analizi		
	b	k	c	m	d	b	k	c	m	d	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
<b>Basma</b>	1,527	0,021	-0,057	-0,01	0,309	0,829	0,0005	0,053	0,0084	0,03	0,97928	0,00382	0,06149
<b>Emme</b>	1,372	0,026	-0,027	0,039	0,202	0,688	0,0005	0,048	0,0092	0,026	0,98486	0,00306	0,05494

Türetilen kurutma modelinin basma ve emme deneyleri için çıkarılan katsayıları, standart sapmaları ve regresyon analizi sonuçları Çizelge 9.9'da verilmiştir. Deneysel olarak bulunan nem oranları ile teorikte olan nem oranları karşılaştırılmış ve basma deneyleri için Şekil 9.44, emme deneyleri için Şekil 9.45 oluşturulmuştur.

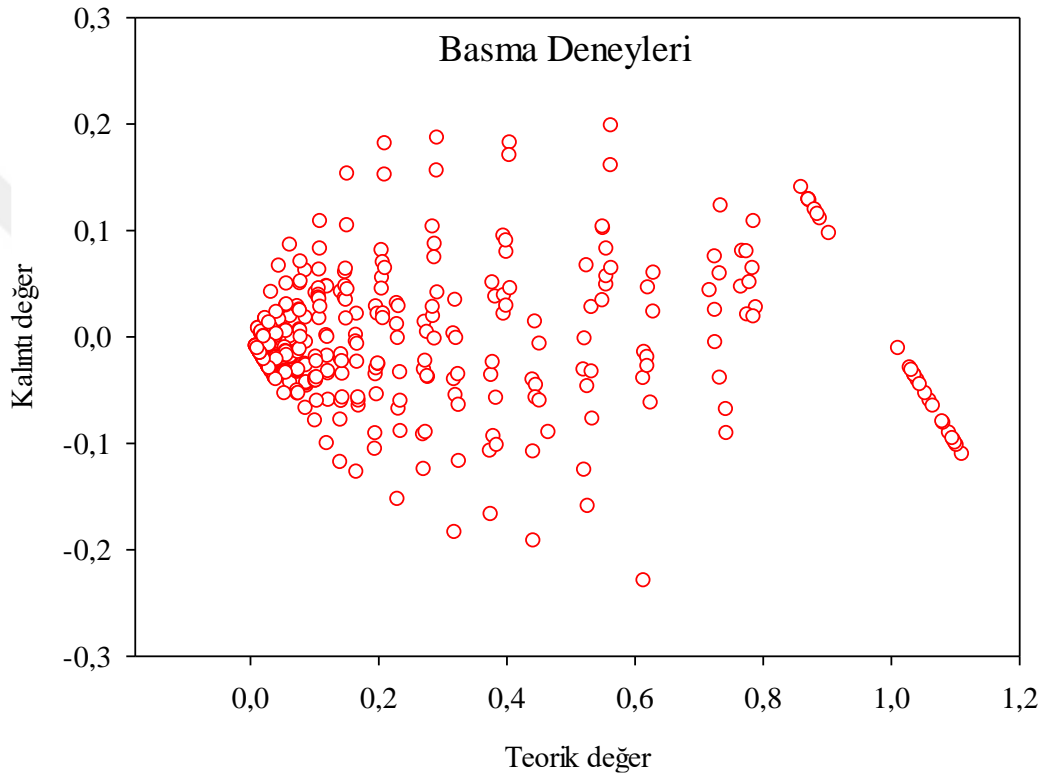


**Şekil 9.44.** Basma deneyindeki nem oranının teorik nem oranı ile karşılaştırılması

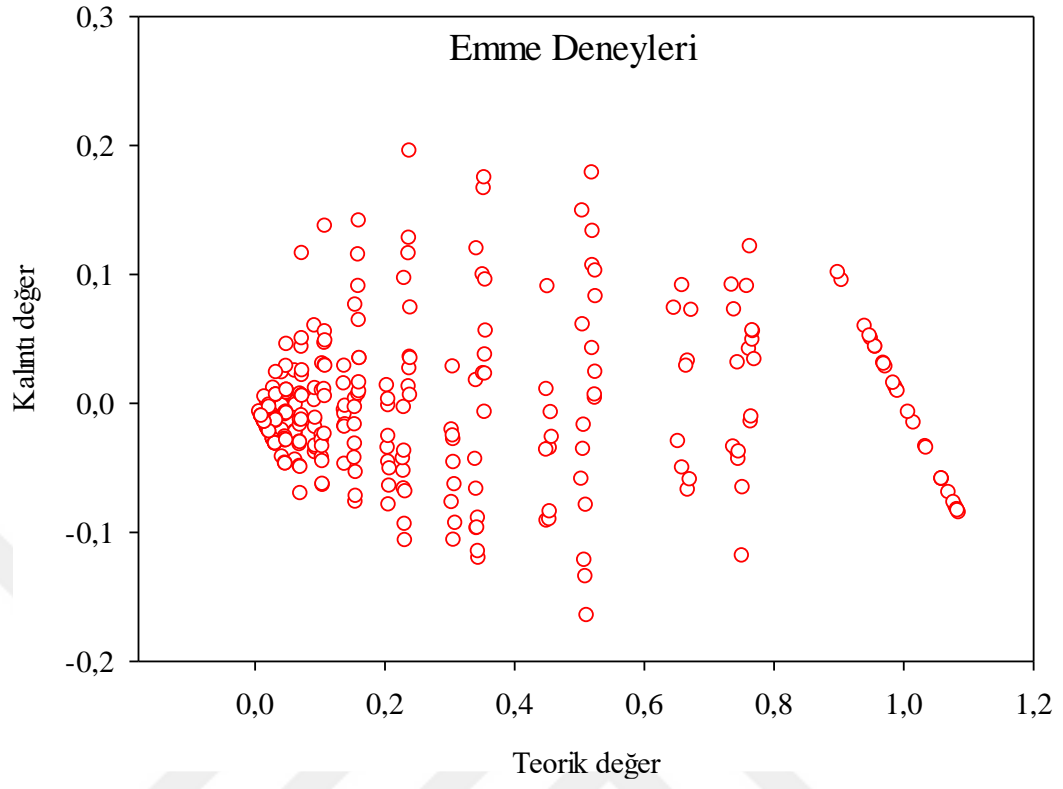


**Şekil 9.45.** Emme deneyindeki nem oranının teorik nem oranı ile karşılaştırılması

Şekil 9.46 de basma için şekil 9.47’de ise emme için teorik verilerin kalıntı değerleri verilmektedir. Her iki durum için kalıntı değerleri  $\pm 0,2$  aralığında değişmektedir. En büyük sapmanın hızlı kuruma evresinde gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca teorik değerlerin özellikler kurumanın ilk evresinde sapma gösterdiği belirlenmiştir. Deneysel ve teorik değerler arasında elde edilen bu sapma aralığı kabul edilebilir değerdedir.



**Şekil 9.46.** Basma deneylerinde oluşan kalıntı değerlerin teorik ile karşılaştırılması



Şekil 9.47. Emme deneyleerinde oluşan kalıntı değerlerin teorik ile karşılaştırılması

## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kurutma üzerine birçok alanda çalışma yapılmıştır ancak tuğla kurutma üzerine yapılan çalışmalar sınırlı düzeyde kalmıştır. Tuğla kurutma, konsantrasyon farkından kaynaklanan kütle transferi işlemidir. Bu alanda yapılan birkaç çalışma olmasına rağmen kuruma kinetiği üzerine herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu tez çalışmasının konusu, özellikle Çorum ili toprak yapısına özgü bir çalışma olmamasından ve ülke genelinde önemli üretim potansiyeline sahip Çorum ili tuğlasının kurutulması üzerine bir çalışma olmamasından doğmuştur. Diğer kurutma çalışmalarına kıyasla tuğla kurutma kinetiği üzerine yapılan bu çalışma literatürdeki eksikliği gidermeye yönelik olmuştur. Ayrıca tuğla fabrikalarının ürün kalitesini artırarak zaman, maliyet ve iş gücünden tasarruf etmeye yönelik yapılmıştır. Deneyler konvektif tip sıcak havalı kabin tipi kurutucu ile yapılmış ve kuruma havası sıcaklığı, kurutma havası hızı ve tuğlanın konum açısı gibi değişken parametreler altında çalışılmıştır. Basma basıncının yanı sıra, vakum basıncının etkisi de incelenmiştir.

Tuğla ocaklarından her gün, yeni kesilmiş ve yaş olarak alınan tek bir tuğla tipinde (19x19x13,5 cm<sup>3</sup>) yapılan deneyler, değişken parametrelerin birbiri arasındaki farklı kombinasyonları ile toplamda 54 adet olmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen verilerden çıkarılan sonuçlar ve bu çalışma hakkındaki öneriler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

Sonuçlar:

- Deneylerde, yaş tuğlalar kurutma havasının yönüne göre 0, 45, 90 derece olacak şekilde kabine yerleştirilmiştir. Kuru havanın tuğla gözeneklerinden geçerken daha fazla alanı süpürerek çıkması iyi bir etkidir. Bu yüzden tuğlanın delikli kısmının hava akışına paralel olması yani 0 derecede olması hızını artırmış ve kuruma süresini de azaltmıştır. Bu sebeple daha tercih edilebilir olmuştur.
- 62, 76, 90<sup>0</sup>C sıcaklıklarında yapılan deneyler sonucunda, kurutma havası sıcaklığı arttıkça kuruma hızı da artmış ve kuruma süresi ise azalmıştır. Yüksek sıcaklıktaki nem kaybının daha hızlı gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- Kurutma havası hızının 1,75 m/s ile 2,62 m/s arasında değişken hızlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Hava hızının 2,5-2,62 m/s olduğu yani Re=30000 civarında

yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar daha iyi olmuştur. Hava hızının artması kuruma süresini düşürmüştür. Bu şekilde daha hızlı bir kuruma gerçekleşmiştir.

- Düşük hızlarda ve yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerde tuğlaların bazılarında çatlama meydana gelmiştir ve bu istenmeyen bir durumdur.
- Deneyler kurutma havasının numune üzerine basılarak ve tuğladan emilerek iki şekilde yapılmıştır. Deneyde elde edilen veriler karşılaştırıldığında farklılıklar gözlemlenmiştir. Emme deneyleri ile olan deneylerin daha kısa süreli olduğu gözlemlenmiştir. Enerji ve ekserji analizi sonuçlarına bakıldığında emme deneylerinde daha iyi sonuçlar çıkmıştır.
- Ekserji yok oluşu değerlerinde, emme deneylerinin deney sonuçları, basma deneylerinin deney sonuçlarına oranla daha yüksek çıkmıştır. Yani yok olan ekserji istenmeyen bir durumdur.
- Ekserji verimlerine bakıldığında emme deneylerinin, basma deneylerine oranla daha yüksek değerlerde çıktığı görülmüştür.
- Deneysel sonuçlara göre regresyon analizi yapılmış, literatürdeki kurutma modellemeleri ile kıyaslama yapılmıştır.  $R^2=0,994-0,999$  aralığında,  $\chi^2=0,000072-0,00094$  aralığında ve  $RMSE=0,0075-0,027$  aralığında değişim gösteren en uygun modelin Difüzyon yaklaşımı modeli olduğu görülmüştür.
- Literatürde eksikliği görülen kurutma kinetiği üzerine yapılan bu çalışmada, bağımsız değişken parametrelere göre yeni bir model türetilmiş ve literatür eksikliği kapatılmaya çalışılmıştır. Bu modelde basma deneyi için  $R^2=0,98$ ,  $\chi^2=0,0038$ ,  $RMSE=0,061$  ve emme deneyi için  $R^2=0,984$ ,  $\chi^2=0,0031$ ,  $RMSE=0,055$  değerleri analiz sonucunda çıkarılmıştır.

Yapılan bu yüksek lisans teziyle yaş tuğlanın kurutulması sürecinde hava sıcaklığı, hava hızı ve tuğla koyulma açısı ile ilgili değişikliklerde, kuruma süresinin değişimi incelenmiştir. Kuruma sürelerine ve farklı parametrelere göre, numunenin nem içeriğindeki, kütle kaybındaki, nem oranındaki ve kuruma hızındaki değişimler incelenmiş ve grafikleri oluşturularak teze eklenmiştir. Yapılan regresyon analizi sonuçlarından elde edilen veriler ve bulgular tez içeriğinde verilmiştir. Kuru havanın yüksek sıcaklıkta, yüksek hızda olması ve tuğla açısının hava akışına paralel olması deneyin daha iyi sonuçlanmasında etkili olmuştur.

Öneriler:

- Yapılan deneyler 19x19x13,5 cm ölçülerinde tuğlalar ile yapılmıştır. Farklı boyuttaki tuğlalarda da denenmeli ve farklılıkları araştırılmalıdır.
- Deneylerin uzunluğundan dolayı değişen hava koşullarının kurumaya olan etkisini en aza indirmek için aynı mevsim döneminde deneyler yapılmalıdır.
- Birkaç tuğlanın koyulabileceği kabinler tasarlanarak, farklı sıralardaki ve durumlardaki tuğlaların kuruma davranışları incelenmelidir.





## KAYNAKLAR

- Akdaş, S., 2014. Mandalinaların Farklı Kurutma Şartlarında Biyoaktif Bileşenlerinin Degradasyon Kinetikleri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akpınar, K.E., Midilli, A., Biçer, Y., 2002. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44, 1689–1705.
- Akpınar, K.E., Biçer Y. 2003. Siklon Tipi Bir Kurutucuda Kabağın Kuruma Davranışının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1), 159-169.
- Akpınar, K.E., Biçer, Y., Yıldız, C., 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59, 99–104.
- Akpınar, K.E., 2004. Energy and Exergy Analyses of Drying of Red Pepper Slices in a Convective Type Dryer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 31, 1165-1176.
- Akpınar, K.E., 2005. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73, 75–84.
- Akpınar, K.E., 2005. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering*, 77, 864-870.
- Aktaş, M., 2007. Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalatı Ve Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Alibaş, İ., 2012. Sıcak Havayla Kurutulan Enginar (*Cynara cardunculus* L. var. *scolymus*) Dilimlerinin Kuruma Eğrilerinin Tanımlanmasında Yeni Bir Modelin Geliştirilmesi ve Mevcut Modellerle Kıyaslanması. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 26 (1), 49-61.
- Anonim, 2017. Deneysel Çalışmalarda Hata Ve Belirsizlik Analizi, [http://cdn.hitit.edu.tr/mf/files/66164\\_2047113654.pdf](http://cdn.hitit.edu.tr/mf/files/66164_2047113654.pdf), (15.06.2018).
- Ceylan, İ., 2002. Güneş Enerjili Kurutma Fırınında Kurutma Havası Neminin Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Çengel, A.Y., Boles, A.M., 2011. Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla. Güven Bilimsel Yayınevi, İzmir, 946 s.
- Çengel, A. Y., Cimbala, J., 2006. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. The McGraw-Hill Companies, New York, USA, 929 p.

- Demir, Ö., 2012. Güneş Enerjili Isı Borulu Kurutucu İle Sera Tipi Kurutucuda Defne Yapağı Kurutulması ve Kurutma Parametrelerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Dinçer, İ., Şahin A., 2004. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 645-652.
- Gök, S., 2011. Farklı Sıcaklıklarda Çalışan Vakumlu Bir Kereste Kurutucu Tasarımı ve Kurutma Parametrelerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Gönül, A., 2014. Çini Kurutmasının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Günerban, H., 2005. Temel Bilgiler, Tasarım ve Uygulama Eki. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 13(6).
- Hashim, N., Daniel, O., Rhaman, E., 2014. A preliminary study: Kinetic model of drying process of pumpkins (*cucurbita moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 345 – 352.
- Hayaoglu, A.A., Karabulut, I., Alpaslan., M., Kelbaliyev., G., 2005. Mathematical modeling of drying characteristics of strained yoghurt in a convective type tray-dryer. *Journal of Food Engineering*, 78, 109–117.
- Heybeli, N., 2017. Farklı Kurutma Sistemlerinin Birlikte Kullanımı İle Stanley Erik Çeşidinin Kurutulması Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Karagüzel, İ., 2009. Tarım Ürünlerinin Akışkan Yatakta Kurutulmasının Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Kaya, A., Kamer, S.M., Şahin, E.H., Sönmez, K., İmal, M., 2016. Kabak ve Patlıcan Dilimlerinin Kuruma Davranışının Deneysel İncelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2).
- Kılıç, E.E., 2014. Konvektif Koşullarda Kurutulan Sebze Ve Meyvelerin Kuruma Karakteristiklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Kırmızııkaya, S.E., 2016. Ispanak (*Spinacia Oleracea*) ve Isırgan Otu (*Urtica Dioica*) Kurutmada Halojen Isıtıcı ve Konvektif Sistemlerin Kıyaslanması. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Kline, S.J., McClintock, F.A., 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*.

- Köse, B., Erentürk, S., 2010. Drying characteristics of mistletoe (*Viscum album L.*) in convective and UV combined convective type dryers. *Industrial Crops and Products*, 32, 394–399.
- Kurtbaş, İ., Yatağanbaba, A., 2016. A scientific approach with bibliometric analysis related to brick and tile drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 206-224.
- Lüle, F., 2014. Malatya-Arguvan Yöresinde Toplanan Çadır Mantarında (*Pleurotus Eryngii*) Farklı Kurutma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Mançuhan, E., 2011. Yaş Tuğla Kurutulan Bir Tünel Kurutucuda Enerji ve Ekserji Analizi. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği*, 120.
- Mançuhan, E., Özen, S., Sayan, P., Tititz-Sargut, S., Ciğer, E.G., Özoğul, B., 2015. Yaş Tuğla Kurutma Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi -A Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 16 (2).
- Meseli, İ., 2011. Mühendislik Ölçüm, <http://www.ilkaymeseli.com/2011/05/pitot-tupu/> (15.04.2018)
- Midilli, A., Olgun, H., Ayhan, T., (1999). Experimental studies on mushroom and pollen drying. *International Journal Of Energy Research*, 23, 1143-1152.
- Mishra, H. N., Shiby V. K., 2007. Thin layer modelling of recirculatory convective air drying of curd (indian yoghurt). *Food and Bioproducts Processing*, 85 (3), 193–201.
- Mujumdar, A.S., 1997. *Drying fundamentals (Industrial drying of foods)*, Blackie Academic Professional, London, 7-29.
- Mwithiga, G., Olwal, O.J., 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering*, 71 (4), 373–378.
- Özgen, F. 2014. Elma Kurutulmasında Kullanılan Konvektif Tip Bir Kurutma Sisteminin Tasarımı. *Mühendis ve Makina*, 656.
- Öztop, F.H., Akpınar, K.E., 2008. Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 169–177.
- Saçılık, K., Eliçin, K.A., 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73, 281–289.
- Saçılık, K., Eliçin, K.A., Ünal, G., 2005. Drying kinetics of Üryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76, 362–368.
- Saçılık, K., Keskin, R., Eliçin, K.A., 2006. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73, 231-238.

- Singh, L.P., 2011. Silk cocoon drying in forced convection type solar dryer. *Applied Energy*, 88 (5), 1720–1726.
- Tzempelikos, A.D., Vouros., P.A., Bardakas., V.A., Filios., E.A., Margaris., P.D., 2015. Experimental study on convective drying of quince slices and evaluation of thin-layer drying models. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8 (3), 169-177.
- Vega-Galvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martinez-Monzo, J., Garcia-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R., Scala, D.K., 2011. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132, 51–59.
- Yılmaz, S., Ceylan, İ., 2002. Çapraz Akımlı Sulu Yıkayıcıda Kurutma Havası Neminin Alınması. *Teknoloji*, 1-2, 29-33.
- Yılmaz, S., Yavuz, C., 2006. Isı Pompası Destekli Kurutma Fırınlarında Kurutma Parametrelerinin Kontrolü İçin Alternatif Bir Yöntem. *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Teknoloji Dergisi*, Zonguldak, 9 (4), 237-244.
- Yüzgeç, U., 2005. Kurutma Sürecinin Modellenmesi ve Akıllı Öngörülü Denetimi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Zhu, A., Shen, X., 2014. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 345–351.
- Zecchi, B., Clavijo, L., Garreiro, M.J., Gerla, P., 2010. Modeling and minimizing process time of combined convective and vacuum drying of mushrooms and parsley. *Journal of Food Engineering*, 104, 49–55.

## **EKLER**



## EK-1. Termodinamik tablo

860  
EK

TABLO A-15

Havanın 1 atm basınçta özellikleri

Sıcaklık $T, ^\circ\text{C}$	Özgül Kütle $\rho, \text{kg/m}^3$	Özgül Isı $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Isıl İletkenlik $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Isıl Yayımlı Katsayısı $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Dinamik Viskozite $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Kinematik Viskozite $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Sayısı Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Not: İdeal gazlar için  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  ve Pr özellikleri basınçtan bağımsızdır. 1 atm'den farklı bir  $P$  (atm) basıncındaki  $\rho$ ,  $\nu$  ve  $\alpha$  özellikleri, verilen sıcaklıktaki  $\rho$  değerleri  $P$  ile çarpılarak,  $\nu$  ve  $\alpha$  değerleri  $P$  ile bölünerek bulunur.

Kaynak: Veriler S. A. Klein ve F. L. Alvarado tarafından geliştirilen EES yazılımıyla oluşturulmuştur. Orijinal kaynaklar: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter. Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

## EK-1. (Devam) Termodinamik tablo

934  
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>P<sub>r</sub></i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v<sub>r</sub></i>	<i>s<sup>o</sup></i> kJ/kg·K	<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>P<sub>r</sub></i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v<sub>r</sub></i>	<i>s<sup>o</sup></i> kJ/kg·K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

## EK-1. (Devam) Termodinamik tablo

935  
APPENDIX 1

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air (Concluded)

$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg·K	$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg·K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Note: The properties  $P_r$  (relative pressure) and  $v_r$  (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of isentropic processes, and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 785–86, table A-5. Originally published in J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables* (New York: John Wiley & Sons, 1948).



## EK-2. Hata analizi

Deney sonuçlarındaki belirsizlik değerleri için standart hata analizi yöntemi olarak, Kline ve McClintock (1953), tarafından önerilen formül kullanılmıştır. Yapılan deney sonucunda  $x$  bağımsız değişkenlerinin belirlenmesi ile olan  $R$  bağımlı değişkeni denklem (1.1)'de olduğu gibi belirtilirse;

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, \dots, \dots, x_n) \quad (\text{E1.1})$$

burada  $R$  sonuç değişkeni,  $x_1, x_2, \dots$  ise bağımsız değişkenler olmaktadır. Kline ve McClintock tarafından oluşturulan denklem (1.2)'deki bağıntı ile belirsizlik hesaplanmaktadır.

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E1.2})$$

Burada  $w_1, w_2, \dots$  bağımsız değişkenlere ait belirsizlik değerlerini,  $W_R$  ise sonuç değişkenine ait belirsizlik değerini göstermektedir.

Ölçülen bazı değerlerdeki hata oranlarına göre belirsizlik değerleri sırayla belirtilmiştir.

Tuğlanın bulunduğu kabin içine girişteki kanal alanı ( $A_k$ ) için;

$$A_k = a \times b \quad (\text{E1.3})$$

$$\frac{W_{A_k}}{A_k} = \sqrt{\left( \frac{W_a}{a} \right)^2 + \left( \frac{W_b}{b} \right)^2} \quad (\text{E1.4})$$

Hidrolik çap ( $D_h$ ) hesabındaki belirsizliğini bulmak için;

$$D_h = \frac{4A_k}{U_k} \quad (\text{E1.5})$$

$$\frac{W_{D_h}}{D_h} = \sqrt{\left( \frac{W_{A_k}}{A_k} \right)^2 + \left( \frac{W_{U_k}}{U_k} \right)^2} \quad (\text{E1.6})$$

## EK-2. (Devam) Hata analizi

Deneyleerde kullanılan Reynolds ( $Re_d$ ) değeriinin hesaplanmasındaki belirsizliği bulmak için;

$$Re_d = \frac{\rho \cdot V_k \cdot D_h}{\mu} \quad (E1.7)$$

$$\frac{W_{Re_d}}{Re_d} = \sqrt{\left(\frac{W_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{W_{V_k}}{V_k}\right)^2 + \left(\frac{W_\mu}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{W_{D_h}}{D_h}\right)^2} \quad (E1.8)$$

Kanal içinde akan havanın debisinin hesaplanmasında oluşan belirsizlik değeriini bulmak için;

$$\dot{m} = \rho \cdot V_k \cdot A_k \quad (E1.9)$$

$$\frac{W_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{W_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{W_{V_k}}{V_k}\right)^2 + \left(\frac{W_{A_k}}{A_k}\right)^2} \quad (E1.10)$$

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KARATAŞ, Bedrettin Osman

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 24.07.1993 – Amasya

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 (538) 676 38 78

e-mail : [osmanbkaratas@gmail.com](mailto:osmanbkaratas@gmail.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Hitit Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2015
Lise	Çorum Anadolu Lisesi	2011

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-	Bursa Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce