

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ISI POMPASI DESTEKLİ KURUTUCU PERFORMANSINA ETKİ EDEN  
PARAMETRELERİN DENEYSEL ANALİZİ

Muammer DURMUŞ

OCAK 2013

**Makine Anabilim Dalında** Muammer DURMUŞ tarafından hazırlanan ISI POMPASI DESTEKLİ KURUTUCU PERFORMANSINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN DENEYSEL ANALİZİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Yahya DOĞU  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Kemal BİLEN  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ali ERİŞEN \_\_\_\_\_  
Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Kemal BİLEN \_\_\_\_\_  
Üye : Prof. Dr. İbrahim UZUN \_\_\_\_\_

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Sevgili Eşime ve Kızıma

## ÖZET

### ISI POMPASI DESTEKLİ KURUTUCU PERFORMANSINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN DENEYSEL ANALİZİ

DURMUŞ, Muammer

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kemal BİLEN

Ocak 2013, xii, 75 sayfa

Günümüzde kurutma işlemi, endüstrinin birçok kolunda farklı kurutma makineleri kullanılarak yaygın ve etkin bir şekilde yapılmaktadır. Çamaşır (tekstil) kurutma makineleri, enerji alanında dışarıya bağımlı olan ülkemizde bir enerji çıktısı olarak evlerimize girmektedir. Bu nedenle, daha az enerji tüketen kurutma makinelerinin yapılmasına yönelik çalışmalar daha da önem kazanmıştır. Yapılan literatür araştırmasında; harcadıkları enerjiye nazaran daha fazla ısı transfer edebilen cihazlar olmaları nedeniyle ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinin, diğer kurutuculara göre daha verimli oldukları görülmüştür.

Bu çalışmada; farklı kuru tekstil kütlelerinde ve bu tekstilin farklı nemlendirilme oranlarında kurutma havasının debisinin değişiminin ısı pompası destekli tekstil kurutma makinesi performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için, üç farklı kuru tekstil kütlelerinde ve üç farklı nemlendirme oranında kurutma havasının debisi değiştirilerek 36 adet deney yapılmıştır. Her bir deney için belirli zaman aralıkları sonunda, soğutucu akışkan tarafındaki sıcaklık değerleri ile kurutma havası tarafındaki bağıl nem ve sıcaklık değerleri veri toplama sistemi aracılığı ile kaydedilmiştir. Ayrıca; her deney için deneylerin sonunda, uzaklaştırılan nem kütlesi ve makinenin harcadığı enerji tespit edilmiştir. Deneysel veriler kullanılarak oluşturulan grafikler ve çizelgeler tezin sonunda yorumlanarak verilmiştir. Son olarak, belirsizlik analizi yöntemi kullanılmak suretiyle bütün deneyler için hata analizi yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Çamaşır kurutma makinesi, Isı pompalı kurutucu, Isı pompası, Hava debisi, Nem alma, SMER, MER, Kurutma verimi.

## ABSTRACT

### EXPERIMENTAL ANALYSIS OF EFFECT OF PARAMETERS ON THE HEAT PUMP BASED DRYER PERFORMANCE

DURMUŞ, Muammer

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Kemal BİLEN

January 2013, xii, 75 pages

Nowadays, drying process is commonly and effectively made using different drying machines in many sectors of industry. Textile drying machines enter our homes as an energy output in our country which is dependent on foreign world in the energy area. Therefore, it has been more important to make drying machines consuming less energy. In the literature review of this study, it has been seen that heat pump-based dryers are more efficient due to their ability of transferring heat with respect to their energy consumption by considering the other dryers.

In this study; effects of drying air flow rate on the performance of the heat pump based dryer are investigated for different dry textile mass and different textile humidification rate, experimentally. For this purpose, 36 different tests were carried out by changing flow rate of drying air for three different dry textiles mass, and three different textile humidification rates. For each experiment, temperature values at the refrigerant side and relative humidity, and temperature values at the air side were collected by a data acquisition system at the end of the specific time intervals. In addition, moisture amount removed from textile and energy consumption of the machine were determined at the end of each experiment. Graphs and tables obtained by using experimental dates are given with comments in the conclusion. Finally, error analysis was performed by using uncertainty analysis for each experiment.

**Key words:** Tumble dryer, Heat pump based dryer, Heat pump, Air flow rate, Moisture extraction, SMER, MER, Drying efficiency.

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezimi hazırlarken yaptığım araştırmalar ve deneyler sırasında yardımlarını hiç esirgemeyen, bilgi, tecrübe ve görüşlerinden yararlandığım değerli danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Kemal BİLEN Bey'e, değerli görüşleri ile beni yönlendiren Sayın Prof. Dr. İbrahim UZUN Bey'e, deneylerin yapıldığı Üniversitemiz Mühendislik Fakültesi bünyesindeki Isı Transferi Laboratuvarının imkânlarının artırılmasındaki destekleri nedeniyle Fakülte Dekanımız Sayın Prof. Dr. Veli ÇELİK Bey'e ve Makine Mühendisliği Bölümündeki değerli hocalarıma çok teşekkür ederim.

Bu çalışmanın Üniversitemizde yapılmasını teşvik ederek üniversite-sanayi işbirliğine önemli katkı sağlayan ve çalışmanın her aşamasında her türlü bilgi ve donanım desteği veren Sayın Yalçın GÜLDALI, Sayın Önder BALIOĞLU ve Sayın Onur HARTOKA'ya içtenlikle teşekkür ederim.

Deney tesisatının hazırlanmasında büyük destekte bulunan Sayın Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ Bey'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY Bey'e, Mak. Müh. Çağatay OLCAY'a ve Mak. Müh. İsmail Engin ŞEKER'e teşekkür ederim.

Bütün öğrenim hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ve yardımları ile birlikte maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili aileme ve eşime şükranlarımı sunarım.

Ocak, 2013.

Muammer DURMUŞ

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	iv
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	vii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Kaynak Özetleri .....	2
<b>2. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	8
2.1. Çamaşır Kurutma Makineleri ve Çalışma Sistemleri .....	8
2.1.1. Çamaşır Kurutma Makinesi Çeşitleri.....	9
2.1.1.1. Bacalı Çamaşır Kurutma Makineleri .....	9
2.1.1.2. Kondenserli Çamaşır Kurutma Makineleri .....	11
2.1.1.3. Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makineleri .....	13
2.1.1.4. Mikrodalgalı Çamaşır Kurutma Makineleri .....	14
2.1.1.5. Vakumlu Kurutucular.....	15
2.1.1.6. Santrifüjlü Çamaşır Kurutma Makinesi.....	15
2.1.2. Çamaşır Kurutucularda Kurutma Süreçleri.....	15
2.2. Isı Pompalı Kurutucular ve Isı Pompası .....	16
2.2.1. Isı Pompaları ve Isı Pompalı Kurutmanın Geçmişi.....	18
2.2.2. Isı Pompalı Kurutucunun Çalışma Prensibi .....	19
2.2.3. Isı Pompasının Temel Prensibi .....	20
2.2.4. Isı Pompası Çevrimleri .....	20
2.2.4.1. Ters Carnot Çevrimi .....	20
2.2.4.2. İdeal Çevrim.....	21
2.2.5. Isı Pompalı Kurutucuların Üstünlükleri ve Sakıncaları .....	23
2.3. Kurutma Sistemlerinde Kullanılan Verim Tanımlamaları.....	24

2.3.1. Özgül Nem Alma Hızı ( <i>SMER</i> ).....	25
2.3.2. Nem Alma Hızı ( <i>MER</i> ) .....	25
2.3.3. Kurutma Verimi .....	25
2.3.4. Isı Pompası Etkenlik Katsayısı ( <i>COP<sub>IP</sub></i> ) .....	26
2.4. Psikrometri .....	26
2.4.1. Psikrometrinin Temelleri .....	26
2.4.2. Özgül Nem ve Bağlı Nem Kavramları .....	27
2.4.3. Psikrometrik Diyagram .....	29
2.5. Fan Kanunları.....	31
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>34</b>
3.1. Deneylede Kullanılan Ekipmanlar .....	35
3.1.1. Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makinesi .....	35
3.1.2. Masaüstü Bilgisayar .....	36
3.1.3. Veri Toplayıcı (Data Logger).....	36
3.1.4. Enerji Analizörü. ....	37
3.1.5. Nem ve Sıcaklıkölçer .....	38
3.1.6. Sıcaklıkölçer (Termoeleman).....	39
3.1.7. İntertör (Frekans Değişirici). ....	39
3.1.8. Hassas Terazı .....	40
3.1.9. Havlu .....	41
3.2. Deneyle Düzeneyinin Hazırlanması.....	41
3.3. Hata Analizi .....	43
3.3.1. Deneysel Hata Tipleri ve Nedenleri .....	43
3.3.2. Hata Analizinde Akılcı Yaklaşım .....	43
3.3.3. Hata Analizinde Belirsizlik Analizi Yöntemi .....	44
3.3.4. Yapılan Deneyleler İçin Hata Analizi Sonuçları.....	46
3.3.4.1. Sıcaklık Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata.....	46
3.3.4.2. Bağlı Nem Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata.....	47
3.3.4.3. Tekstil Kütlesinin Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata .....	47
3.3.4.4. Kurutma Süresinin Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata .....	48
3.3.4.5. Enerji Sarfiyatının Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata.....	48
3.3.4.6. <i>SMER</i> , <i>MER</i> ve Kurutma Veriminde Ortaya Çıkan Hatanın Tespiti .....	49
3.4. Deneylelerin Yapılmasında İzlenen Yol .....	52



<b>4. DENEYSEL SONUÇLAR</b> .....	54
4.1. Soğutucu Akışkan ve Kurutma Havası Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.	56
4.2. Yapılan Deneylerin <i>SMER</i> , <i>MER</i> ve Kurutma Verimi Değerleri .....	58
4.3. Korelasyon Oluşturma .....	66
<b>5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME</b> .....	68
<b>KAYNAKLAR</b> .....	71
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	75

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kurutucuda yer alan fanın güç ve debisinin frekans ile değişimi .....	33
3.1. Nem ve sıcaklıkölçerler ile termoelemanların konumlandırıldığı yerler .....	41
3.2. Terazî, enerji analizörü ve saat için sabit hata miktarları (belirsizlikler).....	49
3.3. <i>SMER</i> , <i>MER</i> ve kurutma verimi için hata analiz sonuçları.....	51
3.3. <i>SMER</i> , <i>MER</i> ve kurutma verimi için hata analiz sonuçları (devam).....	52
4.1. Çalışma kapsamında yapılan deneylere ilişkin karakteristik bilgiler.....	54
4.1. Çalışma kapsamında yapılan deneylere ilişkin karakteristik bilgiler (devam) ...	55
4.2. Yapılan deneylerden elde edilen veriler ve hesaplanan parametreler .....	59

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Isı pompalı (ters Brayton çevrimi) çamaşır kurutucunun akış şeması .....	5
1.2. Klimaya entegre edilmiş kurutucunun görünüşü .....	5
1.3. Kondenserli tip çamaşır kurutma makinesinin genel görünüşü .....	6
2.1. Bacalı çamaşır kurutucunun yapısı .....	9
2.2. Bacalı çamaşır kurutucunun çalışma şeması.....	10
2.3. Kondenserli çamaşır kurutucu sisteminin akış şeması.....	12
2.4. Yüzey gerilim elementi ve havadan-havaya ısı değiştirici .....	13
2.5. Isı pompalı çamaşır kurutucusunun çalışma şeması .....	13
2.6. Isı pompalı çamaşır kurutucusunun akış şeması.....	17
2.7. Isı pompalı kurutucunun prensip şeması ile ideal ve gerçek kurutma çevriminin psikrometrik diyagramda gösterimi.....	20
2.8. Carnot soğutma makinesinin tesisat şeması ve çevrimin $T-s$ diyagramı.....	21
2.9. İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin tesisat şeması ve $T-s$ diyagramı....	22
2.10. İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin $P-h$ diyagramı.....	22
2.11. Psikrometrik diyagramın genel çizimi.....	30
2.12. 19 numaralı deneyin 10.dakikasında nemli havanın izlediği yolun psikrometrik diyagramda gösterimi .....	31
3.1. Deney tesisatındaki kurutma makinesinin şematik resmi ve çalışma prensibi.....	35
3.2. Kurutma makinesinde yer alan ısı pompasının elemanları .....	35
3.3. Blomberg marka ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinin genel görünümü.....	36
3.4. Agilent marka veri toplayıcının genel görünümü.....	37
3.5. Veri toplayıcıda kullanılan ve 20 kanala sahip veri toplama kartı .....	37
3.6. ZES ZIMMER marka enerji analizörünün genel görünümü .....	38
3.7. Hava hattında yoğuşturucu ile buharlaştırıcı arasına yerleştirilmiş 1 adet Michell marka nem ve sıcaklıkölçerin genel görünümü .....	38
3.8. Hava hattında buharlaştırıcı girişinde yer alan iki adet termoeleman .....	39
3.9. ESKON marka frekans değiştirici (invertör).....	40
3.10. Deneylerde kullanılan hassas terazinin genel görünümü.....	40

3.11. Bazı nem ve sıcaklıkölçerler ile termoelemanların ısı pompası üzerindeki konumları .....	42
4.1. Isı pompası devresindeki soğutkan sıcaklığının zamana bağlı değişimi .....	57
4.2. Kurutma havasının sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi .....	57
4.3. Kurutma havasının bağıl nem değerlerinin zamana bağlı değişimi .....	58
4.4. 40 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin <i>SMER</i> 'e etkisi .....	60
4.5. 50 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin <i>SMER</i> 'e etkisi .....	60
4.6. 60 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin <i>SMER</i> 'e etkisi .....	61
4.7. 65 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin <i>SMER</i> 'e etkisi .....	61
4.8. 40 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin <i>MER</i> 'e etkisi .....	62
4.9. 50 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin <i>MER</i> 'e etkisi .....	62
4.10. 60 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin <i>MER</i> 'e etkisi .....	62
4.11. 65 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin <i>MER</i> 'e etkisi .....	63
4.12. 40 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine etkisi .....	63
4.13. 50 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine etkisi .....	64
4.14. 60 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine etkisi .....	64
4.15. 65l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine etkisi .....	64
4.16. %60 tekstil nemlendirme oranında, kurutma havası debisinin kurutma verimine olan etkisi .....	65
4.17. %75 tekstil nemlendirme oranında, kurutma havası debisinin kurutma verimine olan etkisi .....	65

4.18. %90 tekstil nemlendirme oranında, kurutma havası debisinin kurutma verimine olan etkisi .....	66
4.19. Kurutma verimi için oluşturulan korelasyondan elde edilen değerlerle gerçek değerlerin karşılaştırılması .....	67

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$CFC$	Kloroflorokarbon
$COP_{Carnot}$	Carnot çevriminin etkenliği
$COP_{IP}$	Isı pompası etkenlik katsayısı
$COP_{ts}$	Tüm sistem için etkenlik katsayısı
$E$	Enerji sarfiyatı ( $kWh$ )
$E_k$	Kompresörün enerji sarfiyatı ( $kWh$ )
$E_{ts}$	Tüm sistemin enerji sarfiyatı ( $kWh$ )
$HCFC$	Hidrokloroflorokarbon
$ITK$	Isıtma tesir katsayısı
$kv$	Kurutma verimi (%)
$m_1$	Kurutmadan önceki tekstil kütlesi ( $kg$ )
$m_2$	Kurutmadan sonraki tekstil kütlesi ( $kg$ )
$m_{kh}$	Kuru hava miktarı ( $kg$ )
$m_{b,d}$	Doymuş havada bulunabilecek maksimum su buharı miktarı ( $g$ )
$m_{su}$	Tekstilin başlangıçta içerdiği nem kütlesi ( $kg$ )
$m_b$	Nemli hava içindeki su buharı miktarı ( $g$ )
$M_{db,0}$	Kuru madde esasına göre $t=0$ anındaki nem miktarı ( $kg/kg$ )
$M_{db,t}$	Kuru madde esasına göre $t$ anındaki nem miktarı ( $kg/kg$ )
$MER$	Nem alma hızı (Moisture Extraction Rate) ( $kg-su/h$ )
$MR$	Nem oranı
$N$	Fanın devir sayısı ( $dev/dak$ )
$NO$	Nemlendirme Oranı (%)
$P$	Nemli havanın toplam basıncı, fanın sağladığı havanın basıncı ( $kPa$ )
$P_{kh}$	Kuru havanın kısmi basıncı ( $kPa$ )
$P_b$	Su buharının kısmi basıncı ( $kPa$ )
$P_{b,d}$	Doymuş havadaki su buharının kısmi basıncı ( $kPa$ )
$Q$	Fanın sağladığı havanın debisi ( $l/s$ )
$Q_H$	Birim zamanda ortama verilen ısı ( $kW$ )
$Q_L$	Birim zamanda ortamdaki çekilen ısı ( $kW$ )

<i>S.A.F.E.</i>	İsviçre Verimli Enerji Kullanımı Araştırma Merkezi (Swiss Agency for Efficient Energy Use)
<i>SMER</i>	Özgül nem alma hızı (Specific Moisture Extraction Rate) ( <i>kg-su/kWh</i> )
<i>SMER<sub>IP</sub></i>	Isı pompası için özgül nem alma hızı ( <i>kg-su/kWh</i> )
<i>SMER<sub>ts</sub></i>	Tüm sistem için özgül nem alma hızı ( <i>kg-su/kWh</i> )
<i>T<sub>buh</sub></i>	Buharlaştırıcı çalışma sıcaklığı (°C)
<i>T<sub>H</sub></i>	Isı verilen ortamın sıcaklığı (°C)
<i>T<sub>L</sub></i>	Isı çekilen ortamın sıcaklığı (°C)
<i>T<sub>yoğ</sub></i>	Yoğuşturucu çalışma sıcaklığı (°C)
<i>w</i>	Özgül nem ( <i>g-su buharı/kg-kuru hava</i> )
<i>Ẇ</i>	Fanın gücü ( <i>kW</i> )
<i>Ẇ<sub>g</sub>, Ẇ<sub>k</sub></i>	Soğutkan üzerine birim zamanda yapılan sıkıştırma işi veya kompresör gücü ( <i>kW</i> )
<i>Ẇ<sub>ts</sub></i>	Tüm sistem üzerine birim zamanda yapılan iş ( <i>kW</i> )
<i>Δt</i>	Kurutma süresi ( <i>h</i> )
<i>η</i>	Fanın verimi (%)
<i>φ</i>	Bağıl nem (%)
<i>ρ<sub>h</sub></i>	Kurutma havası yoğunluğu ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )

# 1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze tekstillerin kurutulması sadece evlerin balkonlarında veya açık alanlarda yapılmaktaydı. Fakat bu tür kurutmada kurutma işlemi doğrudan hava koşullarına bağlı olmakta ve kurutma uzun süren bir işlem olmaktadır. Günümüz yaşam koşullarında tekstilleri kurutacak alanların azalması, insanların hızlı bir kurutma işlemine ihtiyaç duyması ve özellikle bazı coğrafi bölgelerde iklimin kurutma için uygun olmaması nedeniyle çamaşır kurutma makinelerinin kullanılması ihtiyaç haline gelmiştir.

Geleneksel kurutma işlemlerinde herhangi bir enerji sarfiyatı olmamaktadır. Buna karşılık, çamaşır kurutma makineleri elektrik enerjisi harcamaktadır. Günümüzde enerjiye olan ihtiyaç; sanayinin gelişmesi, dünya nüfusunun artması, günlük yaşamda kullandığımız makinelerin sayısının artması gibi nedenlerle devamlı artmaktadır. Enerjiye olan ihtiyacın artmasına rağmen kullanılan enerji kaynakları ise sınırlıdır. Bu yüzden günlük yaşamda kullandığımız makineler arasında yer almaya başlayan kurutma makinelerinin enerji verimliliği önemli bir konu haline gelmiş olup bu konuda sürekli artan sayıda çalışmalar yapılmaktadır.

Çamaşır (tekstil) kurutma makineleri, tekstil yıkandıktan sonra tekstilde kalan nemi istenilen orana istenilen sürede kontrollü bir şekilde getiren elektrikli makinelerdir. Birçok farklı modeli olmasına rağmen genel olarak bu makineler, nem alma kapasitesi artırılmış ortam havasının tekstil üzerinden geçirilerek tekstilin nemini alma prensibi ile çalışırlar. Çamaşır kurutma makinesi olarak birçok farklı model yapılmıştır. Bunlar santrifüjli çamaşır kurutma makinesi, vakumlu çamaşır kurutma makinesi, mikrodalgalı çamaşır kurutma makinesi, kondenserli (yoğuşturuculu) çamaşır kurutma makinesi, bacalı çamaşır kurutma makinesi ve ısı pompalı çamaşır kurutma makinesidir. Piyasada en yaygın olarak kullanılan modeller ise bacalı, kondenserli ve ısı pompalı çamaşır kurutma makineleridir.

Bu tez çalışmasının konusu olan ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde sistemde dolaştırılan havanın nemini almak için ısı pompası kullanılır. Kurutma makinesi içindeki sıcak ve nemli hava ısı pompası üzerinden geçirilir. Bu sırada ısı pompasının buharlaştırıcısı havanın içindeki su buharını yoğuşturur ve elde edilen su, bir su toplama haznesine iletilir. Isı pompasının yoğuşturucusu ise kurutma havasını



ısıtır. Bu yüzden hem kurutma makinesi için dışarı açılan kanal sistemine gerek olmaz hem de ısıнын dışarı atılması yerine kurutucunun içinde kalması temin edilmiş olur. Bu yüzden ısı pompalı kurutma makineleri bacalı veya kondenserli kurutma makinelerine göre enerji sarfiyatı açısından çok daha verimli olmaktadır.

Bu tez çalışmasında; evlerde tekstil kurutmak için en sık kullanılan kurutma makinesi türü olan ısı pompalı çamaşır kurutma makinesine ait deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar üç farklı kuru tekstil kütlesinde ve bu tekstilleri üç farklı nemlendirme oranında nemlendirerek yapılmıştır. Ayrıca bir invertör (frekans değiştirici) yardımı ile sistemde dolaşan kurutma havasının debisi değiştirilerek dört farklı kurutma havası debisinde deneyler tekrarlanmıştır. Böylece kurutma havası debisinin; *SMER*, *MER* ve kurutma verimine olan etkisi incelenmiştir.

## 1.1. Kaynak Özetleri

Coşkun [1] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; basit nem alıcı ısı pompası destekli çapraz akımlı bir sürekli kurutma sistemi; ısı pompası ve sürekli kurutucu ünitesi olmak üzere iki bölümde incelenmiş olup, her iki bölümü oluşturan elamanların matematik modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra; bulunan nonlinear denklemler, her iki bölüm içinde ayrı ayrı Turbo Pascal programlama dili yardımıyla hazırlanan bir program vasıtasıyla çözülmüştür. Sürekli kurutucu bölümünün çıkış şartları, ısı pompası bölümünün giriş şartları olarak kabul edilerek, tüm sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistemin her noktasındaki sıcaklık, debi, nem değerleri gibi değişkenler ve bu değişkenlere bağlı olarak sistemin performansı incelenmiş ve bulunan sonuçlar literatürdeki mevcut deneysel ve sayısal değerlerle karşılaştırılmıştır.

Akgün ve Küçük [2] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, ısı pompalı kurutucular için sayısal bir benzeşim modeli gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu sayısal benzeşim modelinde, klasik ısı pompası düzeneğinden farklı olarak egzoz havası enerjisini emiş havasına aktaran bir ısı geri-kazanım ünitesi modele eklenmiştir. Ayrıca, tasarlanan bu yeni sistemde ısı pompası yoğunlaştırıcısı dolaşım havası üzerinde bulunurken, buharlaştırıcı ise egzoz havası üzerine yerleştirilmiştir. Buharlaştırıcının egzoz havası üzerine yerleştirilmesi mevcut literatüre göre bir

yenilik getirmektedir. Bu çalışmada kurutma havası debisi ve atık hava oranının enerji tüketimine etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Ayrıca, bilgisayar ortamında geliştirilen bu model, kurutmadaki psikrometrik hesaplamaların yapılmasında kolaylık getirmektedir.

Ceylan ve Aktaş [3] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, ısı pompası destekli kurutma fırınında fındık kurutulması deneysel olarak incelenmiştir. Kurutma sonrası fındıklar duyusal olarak analiz edilmiş ve fındıklardaki nem değişimi kütle ölçüm metodu ile tespit edilmiştir. Aynı zamanda gerekli ön hazırlık ve son kontrol işlemleri uygulanarak fındıkların kurutma işlemi sonrası kalitelerinin artırılması, üreticilerin ihtiyacı olan ilk yatırım masrafı düşük ve enerji giderleri az olan bu kurutma fırını ile sağlanmıştır.

Ceylan vd. [4] tarafından yapılan yine deneysel bir çalışmada; kavak ve çam keresteleri, tespit edilen nem oranlarından istenilen nem oranlarına ısı pompalı kurutucu yardımıyla belirlenen sürelerde getirilmiştir. Bu kurutma işlemi sırasında, kurutma havasının bağıl nemi, sıcaklığı ve kerestelerdeki kütle değişimi değerleri bilgisayarda toplanarak, daha sonra kurutma süresi hesaplanmasında kullanılmıştır.

Yılmaz ve Yavuz [5] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, nem yoğunlaştırıcılı kurutma fırını tasarlanıp prototip olarak imal edilmiştir. Bu çalışmada; farklı ürünler için kurutma sürelerini ve farklı kurutma periyotlarını tespit etmek gerekir. Bu yüzden temel kurutma parametreleri olan kurutma süresi, sıcaklık, nem, kütle gibi değerler ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Sonra da bu değerler standart kurutma verileri ile karşılaştırılarak, bilgisayar ortamında otomatik olarak kontrolünün yapılabilirliği, bilgi okuma ve kontrol kartı (PCL-818HG), röle kartı (PCLD-785), uygun sensörler ve otomasyon programı (VisiDAQ, Advantech) kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçta da, kurutulması istenen ürünün standart verileri girildiğinde kurutma işlemi otomatik olarak yapılmaktadır.

Brunzell [6] tarafından yapılan bir başka çalışmada; nemli tekstilin kurutulmasının genellikle açık havada güneş ve rüzgâr yardımıyla olduğu, fakat bu kurutma yönteminin birçok sakıncayı da beraberinde getirdiği belirtilmiştir. Bu sakıncaların bazılarının; tekstilin tozlanması, yağmur yağması ve uzun kurutma süresi gibi sakıncalar olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada; günümüzde artık tekstil kurutmak için alanların azalması ve daha çabuk kurutma istenmesi gibi sebeplerden dolayı çamaşır kurutma makinelerinin yaygınlaştığı ve önümüzdeki yıllarda çamaşır

kurutma makinelerinin daha çok kullanılmaya başlanacağına beklendiği ifade edilmiştir. Yine bu çalışmada; şu an piyasada açık çevrimli kurutucu ve kapalı çevrimli kurutucu olmak üzere iki tip kurutucu bulunduğu belirtilmiş ve bu her iki çevrimde de ısıtıcı kullanılması nedeniyle çamaşır kurutma makinelerinin çok fazla elektrik enerjisi harcadıkları vurgulanmıştır.

Ayrıca bu çalışmada; çamaşır kurutma makinelerinde enerji sarfiyatını düşürmenin yolunun ısıyı geri kazanmakta olduğu ve bunun için kurutma havasının sürekli olarak dolaştırılması olduğu ifade edilmiştir. Kapalı çevrimli kurutucularda tamburdan çıkan nemli havanın ya doğrudan ısıtıcıya geri gönderildiği ya da yoğunlaştırıcıya gittiği belirtilmiştir.

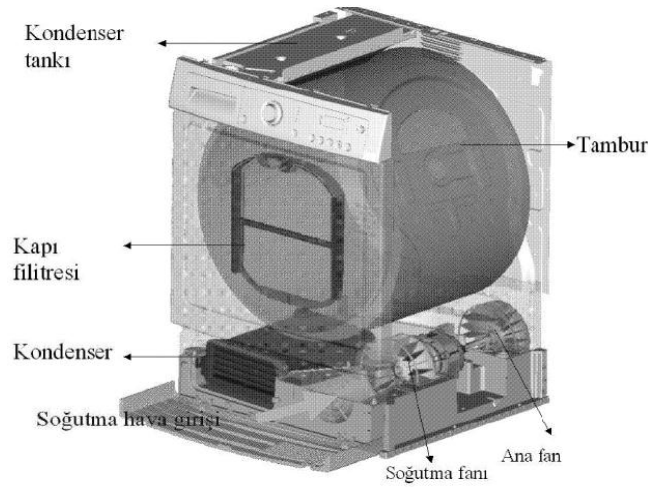
Palandre [7] tarafından yapılan çalışmada, buhar sıkıştırımlı çamaşır kurutucu ile ısı pompalı çamaşır kurutucu, kurutma süresi ve enerji sarfiyatı açısından mukayese edilmiş olup, kurutma süresi açısından buhar sıkıştırımlı çamaşır kurutucunun daha kısa sürede tekstili kuruttuğu gözlemlenmiştir. Fakat enerji sarfiyatı açısından her ikisinin de aynı seviyede enerji tükettikleri tespit edilmiştir.

Bush ve Nipkow [8] tarafından yapılan çalışmada, ısı pompalı kurutucuların daha yaygın kullanılması ve teşvik edilmesi için stratejiler geliştirmiştir. Ayrıca, İsviçre Verimli Enerji Kullanımı Araştırma Merkezi (S.A.F.E.), ısı pompalı kurutucunun enerji verimliliği üzerine karşılaştırmalı araştırmalar yapmış ve bu araştırmalar sonucunda, ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinin diğer kurutma makinelerinden çok daha verimli olduğu görülmüştür.

Braun [9] tarafından yapılan çalışmada; ısı pompalı çamaşır kurutucu ile açık çevrimli çamaşır kurutucu karşılaştırılmıştır. Braun'un çalışmasında kullandığı sistem, ısı pompasının temel prensibi olan ters Brayton çevrimine dayanmaktadır. Ayrıca sistemde akışkan olarak geri dolaşımli havayı kullanmıştır. Bu yaptığı kurutucunun, açık çevrimli kurutucu sistemlerinde %40 kadar enerji verimini artırması tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, hava çevrimli ısı pompasında düşük çalışma basıncı problem oluşturmaktadır. Isı pompalı kurutucuların geleneksel kurutuculara göre en büyük sakıncası, ısı pompalı kurutma makinelerinin bakım ve onarım maliyetinin çok daha yüksek olmasıdır. Fakat Braun'a göre hava çevrimli ısı pompasının bir başka üstünlüğü de buharla sıkıştırılmış ısı pompasından daha ucuz



Kartal [11] yaptığı çalışmada; kondenserli bir çamaşır kurutma makinesinin enerji tüketimine yönelik teorik ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmasında ilk olarak, en sık kullanılan programlardan olan pamuklu dolap kuruluğu programında, çamaşır kurutma makinesinin ayrıntılı bir şekilde sıcaklık, basınç, nem ve güç profillerini çıkarmıştır. Sonraki aşamada ise farklı nem oranları, debiler ve programlar için enerji tüketimini inceleyip bu koşulların enerji tüketimine olan etkilerini analiz etmiştir. Bu çalışmaya konu olan kondenserli tip çamaşır kurutma makinesinin genel görünüşü ise Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 1.3.** Kondenserli tip çamaşır kurutma makinesinin genel görünüşü [11]

Kayabaşı [12] 2009 yılında yaptığı çalışmada; çamaşır kurutma makinelerinin performansını belirleyen enerji tüketimi ve su toplama verimi gibi parametreleri doğrudan etkileyen yoğuşturucuyu incelemiştir. Çalışmasında ilk olarak yoğuşturucuya ait kurutma havası akış kanalı için bir matematik model oluşturmuştur. Sonrasında da korunum denklemlerini, uygun sınır şartları ve hız profilleri kullanarak integral forma dönüştürmüş ve sayısal olarak çözmüştür. Bu sayısal çözümü kullanarak yoğuşturucu kanalı içerisinde yoğuşma sonucu oluşan sıvı filmi kalınlığını hesaplamıştır. Daha sonra giriş şartlarını değiştirmek suretiyle, değişen bu parametrelerin yoğuşan sıvı filmi kalınlığına olan etkilerini araştırmıştır. Sonuçta da verilen çalışma şartları ve seçilen kanat geometrisi için örnek bir yoğuşturucu tasarımı yapmıştır.

Ganjehsarabi [13]yaptığı deneysel çalışmada; enerji tüketimi bakımından daha verimli bir ısı pompalı çamaşır kurutucusunun geliştirilmesini amaçlamıştır. Bu amaç kapsamında tasarladığı ısı pompalı çamaşır kurutucu ile iki farklı kumaşın kurutulması için dört ayrı deney yapmıştır. Yaptığı deneylerden elde ettiği verilerle ısı pompası etkenliği ( $COP_{IP}$ ), kurutucunun nem alma verimi ve özgül nem alma hızı ( $SMER$ ) gibi parametrelerin hesabı için termodinamik analiz gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak tasarladığı ısı pompalı çamaşır kurutucusunun yüksek sıcaklıkta hava sağlayan ve düşük enerji tüketimine sahip olan bir sistem olduğunu gözlemlemiştir.

Demirbaş [14] yaptığı çalışmada; ısı pompalı çamaşır kurutma makinesi ile pamuklu havluları %80 nemlendirerek üç farklı kütlede ve dört farklı kurutma süresinde kurutarak toplam 12 adet deney yapmıştır. Her deneyde, uzun programlar için 15 dakikada bir, kısa programlar için ise 10 dakikada bir, makine durdurulup havluların kütlesi tartılmıştır. Kurutma makinesinin daha önceden belirlenen yerlerine termoelemanlar ve nemölçerler yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında her on saniyede bir ölçüm alınarak bir adet veri kaydedici (data logger) yardımıyla bu veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Ayrıca bir güç analizörü sayesinde makinenin deney boyunca harcadığı enerji tespit edilebilmiştir. Elde edilen bu veriler tablolar ve grafikler şeklinde sunulmuştur. Ayrıca bu veriler kullanılarak termodinamik hesaplar yapılmış olup her deney için  $SMER$  ve  $MER$  değerleri bulunmuştur.

Sönmez [15] yaptığı deneysel çalışmayı; ek ısıtıcı, ek buharlaştırıcı ve ek yoğunlaştırıcı eklediği, ayrıca hava kanalı alanını değiştirdiği ısı pompalı çamaşır kurutucusu ile yapmıştır. Çalışmasında iki farklı dokuma yapısına sahip kumaşı %60 nemlendirerek üç farklı kurutma havası debisinde iki farklı özgül nem değerinde ve üç farklı kurutma havası sıcaklığında kurutarak deneyler yapmıştır. Deneylerde 40 dakika olarak belirlenen kurutma süresi boyunca kurutma odası giriş hava şartları sabit tutulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen veriler çerçevesinde, kurutma havası giriş şartlarının değiştirilmesinin, tekstil kurutma verimine olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada sonuç olarak; tekstilden uzaklaştırılan nemin, öncelikle kurutma havasının sıcaklık ve debisine, daha sonra da kurutma havasının özgül nemine bağlı olduğu ortaya çıkmıştır.

## 2. MATERYAL ve YÖNTEM

### 2.1. Çamaşır Kurutma Makineleri ve alışma Sistemleri

Kurutma, katı veya katı hale yakın durumdaki maddelerden uygun miktarda suyun/su buharının uzaklaştırılması işlemidir. Kurutma, günümüzde birçok sektörde kullanılan bir işlemdir. Kurutma işleminin uygulandığı sektörler arasında tekstil sektörü de bulunmaktadır. Tekstil ürünleri üretim süreci içerisinde bir takım ıslak işlemlere tabi tutulmakta ve bu işlemlerden sonra kurutulmaları gerekebilmektedir. Aynı zamanda, tekstil endüstrisi yanında insanların gündelik kullanımları sonucunda kirlenen tekstil ürünlerinin yıkanmasının ardından kurutulması da gerekmektedir.

Çağımızda nemi alınması istenen tekstil ürünlerinin kurutulması farklı yollardan gerçekleştirilmektedir. Bu kurutma yöntemlerinin başında tabii kaynaklar olan güneş ve rüzgârdan yararlanma gelmektedir. Fakat güneşte kurutmanın bir takım sakıncaları vardır. Kullanıcı açısından zahmetli ve zaman alıcı olmasının yanında açık havada ve güneş ışınlarına maruz kalan tekstilin kirlenme ve solma gibi durumları bu sakıncalar arasında sayılabilmektedir. Aynı zamanda günümüzde yapılan yeni binaların balkonlarının kurutma açısından çok uygun olmaması kurutma işlemini zorlaştırmaktadır. Yukarıda ifade edilen bu sakıncalarla birlikte tüketicilerin ihtiyaç ve beklentileri birleşince tekstil ürünleri kurutma makinesi ortaya çıkmıştır.

Çamaşır kurutma makineleri, ıslak tekstilde bulunan nemi, kontrollü bir şekilde belirli bir sürede istenilen nem oranına kadar azaltan elektrikli ev aletleridir. Evsel amaşır kurutma makinelerinin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bununla beraber, çamaşır kurutma makinelerinin tasarımında tekstilden nem alma karakterinin irdeleniyor olması önem taşımaktadır. Tüketicilerin amaşır kurutma makinelerinden beklentileri; kısa sürede, tekstil ürünlerine zarar vermeden ve az enerji tüketimi ile tasarruflu bir kurutma yapmasıdır [15].

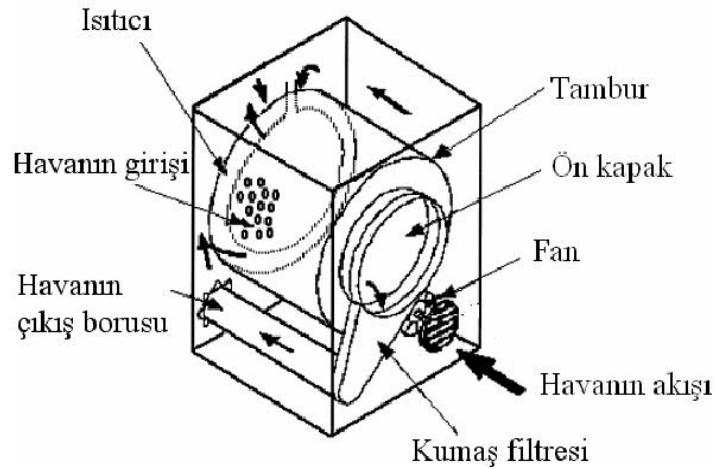
Günümüzde genel olarak piyasada kullanılan üç tip çamaşır kurutma makinesi modeli vardır. Bunlar; bacalı, kondenserli ve ısı pompalı çamaşır kurutma makineleridir. Bacalı tip çamaşır kurutma makinesinde tekstili kurutmak için kullanılan hava ortamdan alınır. Sonra ısıtıcıda ısıtılarak tambura verilir, tekstilin nemi alınır ve en son olarak da hava ortama geri verilir. Bacalı tip çamaşır kurutma

makinesindeki hava çıkış yeri ihtiyacını önlemek için başka bir tip çamaşır kurutma makinesi tasarlanmıştır. Bu da kondenserli tip çamaşır kurutma makinesidir. Bacalı çamaşır kurutma makinesi ile kondenserli çamaşır kurutma makinesi arasındaki ana fark, kondenserli çamaşır kurutma makinesinde kurutma çevrimi boyunca kullanılan aynı havanın tekstili kurutmak için sürekli kullanılmasıdır. Tekstili kurutmak için kullanılan hava kapalı bir çevrim içinde dolaşır. Havanın dolaşımı bir fanla sağlanır. Isıtıcıdan geçen hava tambura verilerek tekstilin neminin alınması sağlanır. Hava filtreden geçtikten sonra bir yoğuşturucuya gelir ve havanın aldığı nem burada yoğunlaşır. Hava yeniden ısıtılır, sürekli bir hava çevrimiyle tekstil kurutulmuş olur. Yoğuşma, havanın soğutulması ile gerçekleştirilir. Bu durumda ikinci bir fan, yoğuşturucu içinde hava akımını sağlar. Soğutucu hava ile kurutma havası arasındaki sıcaklık farkından dolayı su buharı yoğunlaşır. Yoğuşan su buharı, bir haznede toplanarak su tankına gönderilir. Aşağıda çamaşır kurutma makineleri ve çalışma sistemleri daha geniş olarak anlatılmıştır [13].

## 2.1.1. Çamaşır Kurutma Makinesi Çeşitleri

### 2.1.1.1. Bacalı Çamaşır Kurutma Makineleri

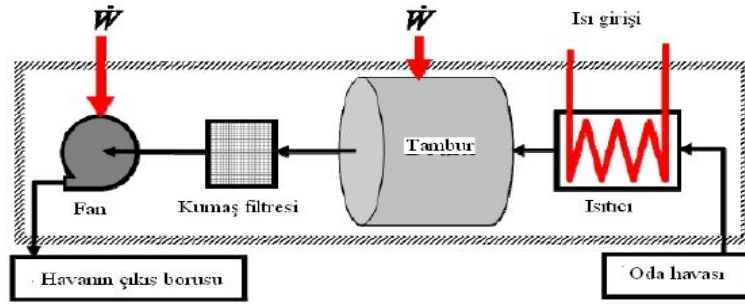
Bacalı çamaşır kurutma makineleri uluslararası pazarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de bu tip bir çamaşır kurutucu görülmektedir.



Şekil 2.1. Bacalı çamaşır kurutucunun yapısı [13]



Bacalı çamaşır kurutma makineleri, dışarıdan alınan havayı, doğal gaz benzeri bir yakıtı yakarak veya bir ısıtıcı kullanarak ısıtır. Sonra bu ısıtılmış hava tamburun arka kısmında bulunan delikten ıslak tekstilin üzerine verilir. Tamburdan çıkan hava, tekstilin nemini bir miktar aldıktan sonra bir çeşit kumaş filtresinden ve fandan geçer, son olarak açılmış boru haznesinden dışarıya çıkartılır. Yeni hava tekrar dış ortamdan emilir. Emilen hava, ısıtıcı üzerine üflenir. Bu durum tekrarlanır. Aşağıdaki Şekil 2.2’de sistemin akış şeması gösterilmektedir [16].



**Şekil 2.2.** Bacalı çamaşır kurutucunun çalışma şeması [16]

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere bu sistem bir açık hava sistemidir. Diğer makinelerdeki gibi kapalı hava çevrimine sahip değildir. Isıtılmış olan nemli havanın dışarı atılması verim kaybına neden olmaktadır. Bu dışarıya atılan nemli havanın enerjisinden hiç yararlanamamak bu sistemin verimsiz bir sistem olduğunu göstermektedir. Bu yüzden bu tip çamaşır kurutucuların enerji tüketimi de oldukça yüksektir. Çünkü devamlı olarak dışarıdan yeni hava almaktadır. Havayı bulunduğu ortamdan alan bacalı kurutucular, aynı havayı kullanan diğer kurutuculara göre daha fazla nem tutulmasına neden olabilir. Bacalı kurutucu tarafından kullanılan bu hava, evin ısıtma/soğutma sistemine göre değiştirilmelidir. Ev tipi ısıtma sistemlerinin enerji tüketimi kurutucu performansının bir parçası olarak ölçülemeyeceği gibi, bu kurutucunun tekstili kurutmak için ihtiyacı olan asıl enerji kullanımında da küçük bir hataya sebep olmaktadır. Bu da Avrupa’da, bacalı kurutucuları, enerji verimliliği sınıflandırması konusunda karalamak için bir neden teşkil eder.

İklim olarak daha ılıman bölgelerde, kurutucuya alınan odadaki hava, kurutucudaki işlemi bittikten sonra evin dışına çıkartılır. Bu yüzden ev tipi ısıtma sistemi ek bir ısıtma ile çıkan havayı dengelemelidir. İlave ısıtma masraflarını

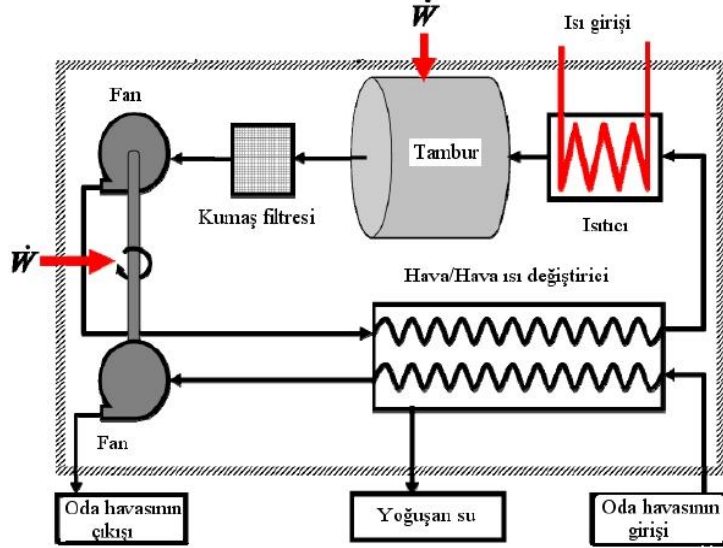
ortadan kaldırmak için en açık çözüm; kurutucudan çıkan nemli havayı evin içine aktarmaktır, ancak buna bağlı olarak iki problem meydana gelmektedir. Birincisi, kurutucunun filtre aşamasını atlayabilen tiftiğin, evin içine kaçarak ortamı kirletecek olmasıdır. Bu problemi aşmanın yolu; filtrenin, kurutucu çıkış haznesini bir çorap gibi sarmasına imkân vermektir. Böylece, eve dağılan tiftik miktarını büyük oranda azaltarak bu kirlenmeyi önleyebilmektedir. Kurutucudan çıkan havayı evin içine aktarmadaki ikinci sorun ise, kurutucunun çıkardığı havanın nem içeriğindeki artışın, kişinin yaşam tercihlerine göre rahat veya rahatsız edici olabilmesidir [16].

### **2.1.1.2. Kondenserli Çamaşır Kurutma Makineleri**

Kondenserli çamaşır kurutma makineleri, bacalı çamaşır kurutma makinelerine göre daha gelişmiş bir sisteme sahiptir. Kondenserli çamaşır kurutma makinelerine, ilave olarak yoğuşturucu eklenmiştir. Bunlar genellikle daha küçüktür ve evin hemen hemen her yerine kurulabilme özeliğine sahiptir, çünkü evin dışında bir havalandırma haznesine gerek duymazlar. Enerji tüketimi açısından bacalı ve kondenserli kurutucular karşılaştırılacak olursa, birim yük başına kondenserli kurutucuların bacalı kurutuculara göre biraz daha fazla enerji tükettiği sonucuna varılır. Kondenserli kurutucuda kapalı devre kurutma sistemi kullanılır. Havadan havaya dik akış gösteren ısı değiştiricisi, kurutma havasının nemini almak için işleme akış devresinde dâhil olur. Odadaki hava ısı değiştiricisinin bir tarafından, kurutma havası ise diğer tarafından üflenir. Isı değiştiricisine giren kurutma havası, tipik olarak 55 °C civarında ve %95 bağıl nem seviyesinde, odadaki hava ise genellikle 23°C'un altında olduğundan, odadaki hava ısı değiştiricisinin kanatçıklarını soğutur ve kurutma havasının sıcaklığında bir düşmeye sebep olur; bu da kurutulacak olan havadaki nem miktarının azalmasıyla sonuçlanır [16].

Tekrarlı olarak devam eden bu süreç kurutulan havanın su buharıyla aşırı doymun hale gelmesini engeller ve tekstilden buharlaşmanın devamını sağlar. Isı değiştiricinin kanatçıklarında meydana gelen yoğuşma, ısı değiştiricisi bölümünün dışına boşaltılır, aradaki tankta toplanır ve son olarak yoğuşan su periyodik olarak elle boşaltma için bir su yoluna veya daha büyük bir tanka pompalanır. Bu özellik, kurutucunun evin herhangi bir yerine kurulmasına olanak sağlar. İşi kolaylaştırmak

için, kurutucuyu bir suyunun yanına yerleştirmek avantajlıdır, çünkü bu durumda kullanıcının, yoğuşan suyu tanktan düzenli olarak boşaltmasına gerek kalmayacaktır. Sistemin akış şeması aşağıdaki Şekil 2.3’de gösterilmiştir [16].



Şekil 2.3. Kondenserli çamaşır kurutucu sisteminin akış şeması [16]

Kondenserli çamaşır kurutma makinelerinin çalışma sisteminde fan, dışarıdan aldığı havayı ısıtıcı üzerine üfler. Isıtıcıda belirli bir sıcaklığa kadar ısınan hava, yönlendirici yardımı ile tambur arkasındaki delikten tekstil üzerine gönderilir. Tambura verilen sıcak hava tekstilin nemini alır. Nemli hava yoğuşturucudan geçerek nemi alınır. Nemi alınmış hava, fan tarafından ısıtıcıya üflenir, böylece sürekli bir hava çevrimiyle tekstil kurutulmuş olur. Kondenserli kurutucularda yoğuşturucu önü kapatılmamalıdır. Verimli bir kurutma için, her kurutmadan sonra yoğuşturucu ve su tankı kontrol edilip gerekli bakım yapılmalıdır. Çünkü su yolundan çıkmamış olan fazla su, kurutucu kanallarının arasında kalabilir ve sorun oluşturabilir [17].

Cochran, havadan-havaya ısı değiştiricisi yerine kullanmış olduğu yüzey gerilim elementi teknolojisiyle enerji tüketimini  $0.643 \text{ kWh/kg}$ 'dan  $0.616 \text{ kWh/kg}$ 'a düşürmüştür. Böylece C sınıfı enerjiye sahip yoğuşturuculu kurutucuyu B sınıfı enerji sınıfına yükseltmiştir. Şekil 2.4’de, Cochra’nın kullandığı yüzey gerilim elementi gösterilmektedir.

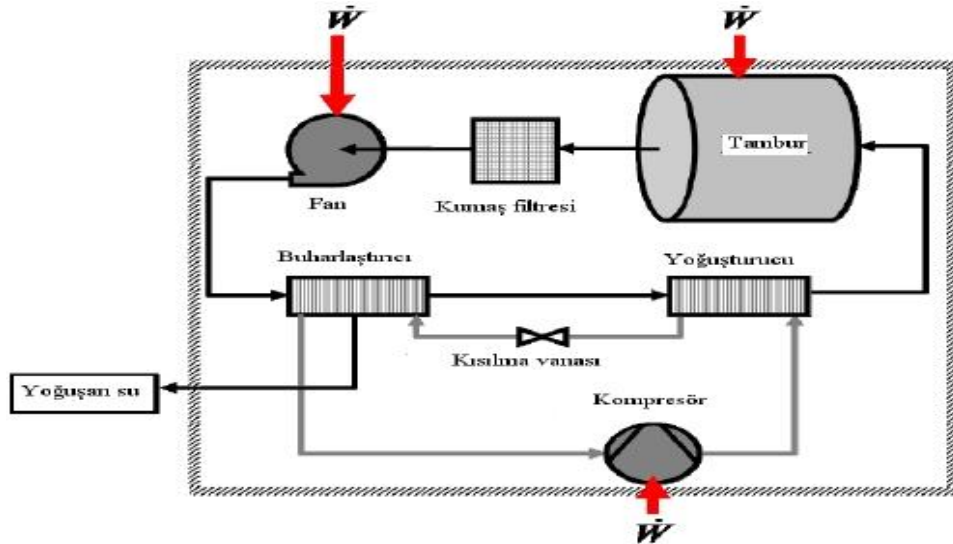


Şekil 2.4. Yüzey gerilim elementi ve havadan-havaya ısı değiştirici [16]

### 2.1.1.3. Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makineleri

Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerini diğerlerinden ayıran en büyük fark, diğer kurutucularda mevcut olan ve enerji tüketiminin artmasında önemli bir rol oynayan ısıtıcının ısı pompalı kurutucuda olmamasıdır. Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde gerçek anlamda enerji tasarrufu olmaktadır.

Isı pompalı çamaşır kurutma makinesi, kurutma havasından nemi uzaklaştıran kapalı devre bir kurutma sistemidir. Çalışma sistemi olarak kondenserli çamaşır kurutma makinesine benzese de ikisinin arasında önemli farklılıklar mevcuttur. Kurutucunun akış şeması Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Isı pompalı çamaşır kurutucusunun çalışma şeması [16]

Isı pompalı çamaşır kurutma makinesinde ilkönce tamburun içerisinden emilen nemli hava, buharlaştırıcının bakır borularından geçerek bu havadaki nem yoğuşur. Bۆylece hava, ısısını ve nemini buharlaştırıcının ۆzerine bırakarak yoğuşturucuya geçer. Kurutma havası yoğuşturucudan geçerken ısınır. Isınmış olan hava, bir fan yardımı ile tamburun içine ۆflenir. Tamburun hareketiyle nemli tekstil ile temas eden sıcak hava, tekstil içerisindeki nemin buharlaşmasını sağlar, bۆylece hava tekrar nemlenir. Tamburdan gelen nemli hava, kanaldan buharlaştırıcıya geçer. Kurutma işlemi sۆresince bu olaylar sۆrekli olarak tekrarlanır. Aynı zamanda ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinde dolaşan kurutma havasının sıcaklığının diğer kurutuculara gۆre dۆřük olmasından dolayı kurutulan tekstil zarar gۆrmez [16].

#### **2.1.1.4. Mikrodalgalı amaşır Kurutma Makineleri**

Sektۆrde mikrodalga fırın ۆreten ve bu konuda araştırma yapan kuruluşlar bu tekniğin tekstil kurutmada da uygulanması için araştırma çalışmalarını sۆrdۆrmektedir. Bu uygulamanın esasını, elektrik rezistanslı ısıtıcının kaldırılıp kurutucuya bir ya da daha fazla sayıda mikrodalga tۆplerinin monte edilmesi oluşturmaktadır. Uygulamada ayrıca, kullanıcıyı tehlikeli yayınımdan korumak için, koruyucu ۆnlemler de yer almaktadır. Magnetron kullanmanın en ۆnemli avantajı, kumaş ve makinenin değil yalnızca suyun ısıtılmasıdır. Isının aktarımı için hava kullanılmaz. Hava yalnızca buhar aktarımında kullanılır. Eğer tekstilin sıcaklığı ortamdaki havanın sıcaklığından daha yۆksek ise bu durum; ısıl difۆzyonun, dokumanın gۆzenekli yapısından buharlaşan suyun kurutma havasına taşınmasına yardımcı olması anlamına gelmektedir [16].

Bu uygulamada sorun olan faktۆr zamandır. ۆnkۆ kurutma sۆresi en az bir saat olduğundan, suyun ya da buharın kumaşı ve makineyi ısıtmasının ۆnüne geçilememektedir. Ayrıca; tekstil, ۆzellikle pamuklu kumaşlar, mikrodalga enerjisinin ۆnemli miktarını soğururlar. Bunun sonucunda ancak dıştaki bۆlgeler mikrodalga tarafından doğrudan doğruya ısıtılmış olur. Uygulamada gۆrۆlen başka bir sorun da magnetron tۆpünün verimliliğinin çok yۆksek olmamasıdır (yaklaşık %50-55); bu durum tekstilin ve makinenin ısınmasına yol açar. Enerjinin diğer bۆlümü doğrudan doğruya ısıya dۆnۆřür. Bۆtүн bunlara rağmen bir ۆlۆde enerji tasarrufu

yapılabilmektedir. Enerji tasarrufunun dışında getirdiği avantajlardan biri de yün gibi ince yapılı maddelerden oluşan kumaşları en kısa sürede kurutma özeliğine sahip olmasıdır. Hamid, bu teknolojiyi kullanmış ve 0.458 kWh/kg-kuru yük değerini elde etmiştir [16].

#### **2.1.1.5. Vakumlu Kurutucular**

Sektörde gerçek bir vakum çamaşır kurutucusu bulunmamaktadır. Çalışma sistemi olarak, çıkış akışında geleneksel bir vantilatör (itici değil çekici) kullanımının çok az bir etkisi bulunur. Vakumlu kurutma konusunda birkaç patent bulunmaktadır. Patentlerin çoğu kompresörlü sistemlerle ilgilidir. Bu yöntemin çamaşır kurutma konusunda pek başarılı bir sistem olduğu söylenemez [13].

#### **2.1.1.6. Santrifüjlü Çamaşır Kurutma Makinesi**

Tamburun çok yüksek devirlerle döndürülmesine dayanan bir sistemdir. Frigidaire firmasının yaptığı 2800 devir/dak devir sayısına sahip çamaşır kurutma makinelerindeki santrifüj hızları tekstilden nemin uzaklaşmasına izin verir. Kurutmanın sonunda %12 civarında bir nem tekstilde kalır ve böylece tekstil ütüye hazır hale getirilir. Bu sistemde tek sorun tekstilin çok yıpranmasıdır [13].

#### **2.1.2. Çamaşır Kurutucularda Kurutma Süreçleri**

Tekstil kurutma sistemlerinde, tekstilin ıslak halden kuru hale geçişinde belirgin olup ayırt edilebilir üç farklı süreç vardır. Bunlar; ısınma süreci, kararlı süreç ve düşme sürecidir [18].

Bu süreçlerden ilki olan ısınma sürecinde, tekstil en yüksek nem düzeyinde ve kuru hava da yeterli ölçüde kuru haldedir. Bu ilk süreçte, kurutulacak olan tekstilin yüzey sıcaklığı, kuru havanın yaş termometre sıcaklığından daha düşüktür. Bu durumda, kuru havanın yaş termometre sıcaklığı azaltılmalı ve tekstilin yüzey

sıcaklığı artırılmalıdır. Kuru hava bu yüzden tekstile ısı geçişi sağlarken tekstil de havaya nem geçişi sağlar. Bu süreç, tekstilin yüzey sıcaklığının havanın yaş termometre sıcaklığına eşit olduğu zaman sona erecektir.

Tekstil kurutma süreçlerinin ikincisi olan kararlı süreçte ise, tekstilin yüzey sıcaklığı ile havanın yaş termometre sıcaklığı sürekli aynı kalmaktadır. Tekstilden havaya dengeli bir nem geçişi meydana gelmektedir ve bu süre zarfında tamburdaki kurutma işlemi buharlaşma yoluyla olmaktadır. Kararlı durumdaki bu buharlaşmanın nedeni, ıslak tekstilin yüzeyine bitişik havanın kısmi basınç değeri ile tamburdaki sıcak havanın kısmi basınç değeri arasındaki farktır.

Tekstil kurutma süreçlerinin sonuncusu olan düşme sürecinde, değişmeyen hava-tekstil sınır tabakasında su buharının kısmi basıncını koruyan tekstil yüzeyinin yakınında yetersiz miktarda nem vardır. Böylece; hava-tekstil sınır tabakasında suyun kısmi basıncı azalırken, buharlaşma potansiyeli de azalır.

## **2.2. Isı Pompalı Kurutucular ve Isı Pompası**

Günümüzde piyasada yaygın olarak kullanılan kurutucularda enerji tasarrufu düşünüldüğünde, ısı değiştirici kullanımıyla atık ısının sistemden çıkan kurutma havasından geri kazanımı veya kurutma havasının taze hava ile karıştırılarak tekrar dolaşımının sağlanması uygulamaları ile sıklıkla karşılaşılır. Isı değiştirici ilave edilen bir kurutucuda amaç, kurutucudan ayrılan egzoz gazlarının ısını, kurutucuya giren gazlara vermek suretiyle bir ön ısıtma işlemini gerçekleştirmek ve bu yolla kurutma havasının ısıtılması için gerekli ısı miktarını ve dolayısıyla enerji giderlerini düşürmektir. Bazı kurutucularda ise yalnızca kurutucudan çıkan nemli havanın bir kısmını geri besleme yaparak, giriş taze havası ile karıştırılması sağlanır. Bu yöntemde kurutucuya giren havanın sıcaklığı ile beraber nem miktarı da artacağından, kurutma hızı azalacaktır. Kurutma havasının nemi kontrol edilerek egzoz miktarı kontrollü bir biçimde gerçekleşmektedir. Atık egzoz kurutma havasındaki ısı birçok farklı ısı değiştirici sistemi ile geri kazanılabilir. Örneğin bu yöntemlerden bazıları; levhalı ısı değiştirici kullanımı, ısı borulu ısı değiştirici ile ısı geri kazanımı, termosifon prensipli ısı geri kazanım sistemi, pompalı ısı taşıyıcı akışkanlı (su) ısı değiştiricili gibi yöntemler olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerden





yenidir. Oysaki evlerimizdeki buzdolabı, klima, nem giderici ve dondurucular aynı mantığın ürünüdür. Günümüzde soğutma makineleri herkesçe bilinmektedir. Isı pompası, çalışma prensibi yönünden bir soğutma makinesidir. İki sistemin birbirinden farkı sadece çalışma amaçlarıdır. Soğutma makinesinde ortamdaki ısı çekilirken, ısı pompasında ise düşük sıcaklıktaki kaynaktan ısı çekilerek yüksek sıcaklıktaki kaynağa verilmektedir. Termodinamiğin ikinci kanununa göre, ısının soğuk kaynaktan sıcak kaynağa kendiliğinden akması mümkün değildir. Bunun için mutlak suretle dışarıdan bir iş verilmesi gerekir. Isı pompası buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminin tersi bir çevrime sahiptir. İki sistem de termodinamik olarak aynı temeller üzerinde çalışmaktadır. Bu özeliğinden dolayı ısı pompası zıt yönde çalıştığında da soğutma işlemi yapabilmektedir. Bu da ısı pompasının kullanım avantajlarından [14].

### **2.2.1. Isı Pompaları ve Isı Pompalı Kurutmanın Geçmişi**

Tarihte ısı pompasının basit prensibi bir teori olarak ilk kez 1824 yılında Sadi Carnot tarafından öne sürülmüştür. Bu teoriden 26 yıl sonra, 1850 yılında Lord Kelvin ısıtma için soğutma makinelerinin kullanılabileceğini öne sürmüştür. Kelvin 1852 yılında yayınladığı yazısında, kompresör ile bağlantılı genişletici kullanan bir sistem tanıtmıştır fakat normal ısıtma masraflarına oranla makinenin masrafının çok daha yüksek olması nedeniyle, bu hava-ısıtma ısı pompası o zaman için kurulamamıştır. İlk olarak İsviçre’de, 1870-1880 yılları arasında Salina Bex’de mühendis olarak çalışan Paul Piccard tarafından sıkıştırılmış buharla çalışan ısı pompasının prensibi uygulanmıştır. Sonra da 1917’de Aarau’da Faerberei Jenny’de buna benzer ikinci bir tesis işletilmiştir [20].

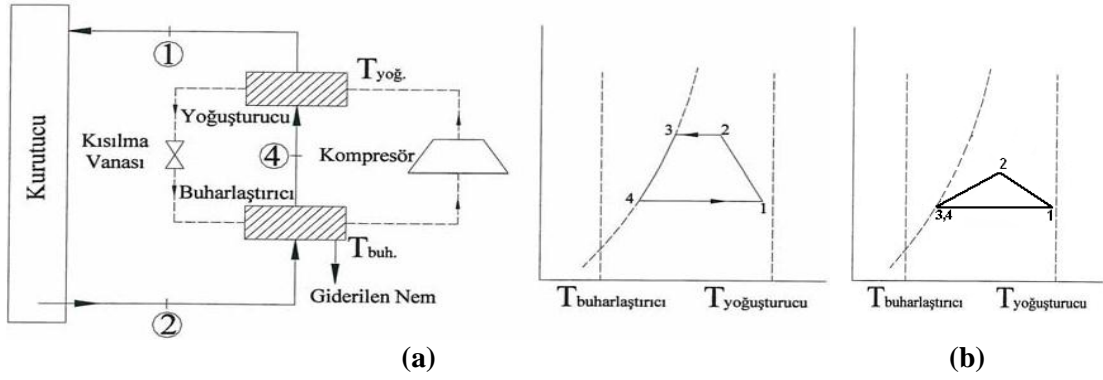
İlk pratik ısı pompası ise, 1930 yılında İskoç Haldane’nin yapıp, evinde kullanmasına kadar ortaya çıkmamıştır. Bu makine de kaynak olarak havayı kullanmış ve hava koşullarının iyi olmadığı zamanlarda su ile desteklenmiştir. 1950’lerde ısı pompasına ilgi az da olsa artmış; ancak petrol fiyatlarının gerilemesi ve ısı pompası sistemlerinin bazı işletim zorluklarından ötürü ısı pompaları fazla rağbet görmemiştir. Ancak soğutma endüstrisinin gelişip, kimi zorlukların alt

edilmesi ve yeni modellerin üretilmesine, bir de 1973-1974 yıllarında petrol fiyatlarının artması eklenince, ısı pompası yeniden ilginin odağı olmuştur [20].

1950'lerde Amerika ve İngiltere'de, evsel ısı pompalarında toprak kaynağının kullanımı ile ilgili çalışmalara başlanılmıştır. Baker, 1950-1951 kış ayları boyunca ortalama ısıtma tesir katsayısı 3'ün üzerine çıkan, çift tesirli, toprak kaynaklı bir ısı pompası geliştirmiştir. 1950'den 1960'a kadar düşük üretim güvenilirliği ve yüksek servis masrafları gelişmeyi engellemiştir. 1960'da Amerika'da elektrik fiyatlarının düşmesi ve daha yüksek üretim güvenilirlikleri nedeniyle ilgiyi yine ısı pompaları üzerine toplamıştır [21].

### **2.2.2. Isı Pompalı Kurutucunun Çalışma Prensibi**

Isı pompalı çamaşır kurutucusunun çalışma sistemi Şekil 2.7'de görülmektedir. Burada; kurutucudan gelen ve nispeten yüksek sıcaklıktaki hava yardımıyla soğutucu akışkan ısı pompası devresindeki buharlaştırıcıda buharlaşır. Aynı zamanda egzoz (kurutma) havasından yoğunlaşan nem uzaklaştırılır. Soğutucu akışkan kompresörde sıkıştırılır ve yoğunlaştırucudan geçirilerek taşıdığı enerji kurutma havasına transfer edilir. Sıcaklığı yükselen kurutma havası da kurutucuya verilir. Soğutucu akışkan ise adyabatik olarak buharlaştırıcı basıncına genişletilir. Bu uygulamada kurutucudan gelen egzoz havası, taşıdığı nemin uzaklaştırılabilmesi için yoğunlaşma sıcaklığının altına soğutulmalıdır. Bu sürecin izlediği yol, psikrometrik diyagramda yine Şekil 2.7'de görülmektedir. Kurutucudan gelen egzoz havasının ısı pompası buharlaştırıcısına giriş koşulları 2 noktası ile belirlenir. Buharlaştırıcıda önce egzoz havasının sıcaklığı düşer (3), ardından içerdiği nem yoğunlaşarak 4 noktası ile gösterilen koşullara ulaşılır. Nemi uzaklaştırılan egzoz havası ısı pompası yoğunlaştırucusunda kurutma sıcaklığına getirilerek 1 noktası ile gösterilen koşullara getirilir [22].



**Şekil 2.7. a)** Isı pompalı kurutucunun prensip şeması ve ideal çevriminin psikrometrik diyagramda gösterimi [22]  
**b)** Gerçek çevrimin psikrometrik diyagramda gösterimi

### 2.2.3. Isı Pompasının Temel Prensibi

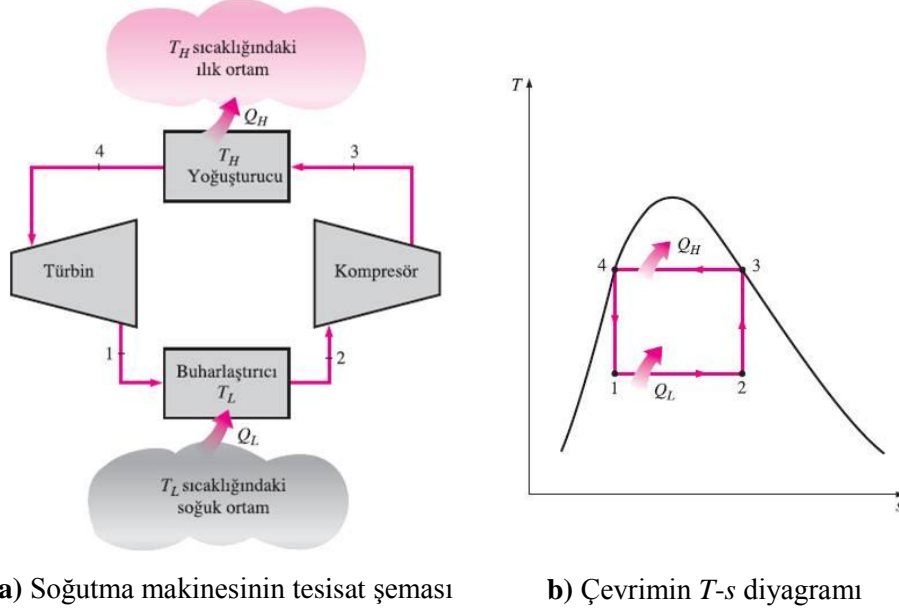
Termodinamiğin ikinci yasası, ısı pompasının çalışmasının temel prensibini açıklar. Isı pompası; düşük sıcaklıktaki ısı kaynağından alınan ısıyı, yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağına transfer edebilmek için yardımcı bir enerji kaynağına (örneğin kompresör için güç girişine) ihtiyaç duyar. Bu yüzden ısı pompasının çalışmasını, zorlanmış bir ısı transferi şeklinde yorumlayabiliriz. Günümüzde kullanılan soğutma makineleri ile ısı pompaları arasında temel prensip açısından fark yoktur. Aralarındaki tek fark; soğutma makinelerinde amaç “soğutmak”, ısı pompalarında ise amaç “ısıtmaktır” [20].

### 2.2.4. Isı Pompası Çevrimleri

#### 2.2.4.1. Ters Carnot Çevrimi

Bir soğutucu akışkanın doyma bölgesi içinde gerçekleşen ters Carnot çevrimi Şekil 2.8’de görülmektedir. 1-2 hal değişimi sırasında, soğutucu akışkana  $T_L$  sıcaklığındaki soğuk ortamdan, sabit sıcaklıkta  $Q_L$  miktarında ısı geçişi olur. Akışkan daha sonra izentropik bir hal değişimiyle 3 haline sıkıştırılır ve hal değişimi sonunda sıcaklığı  $T_H$  olur. 3-4 hal değişimi sırasında, soğutucu akışkandan  $T_H$  sıcaklığındaki ortama sabit sıcaklıkta ısı geçişi olur ve daha sonra akışkan, 1 haline izentropik

olarak genişleyerek çevrimini tamamlar. 4-1 hal değişimi sonunda akışkanın sıcaklığı  $T_L$  olur. 3-4 hal değişimi sırasında soğutucu akışkan yoğuşturucuda doymuş buhar fazından doymuş sıvı fazına dönüşür [23].



a) Soğutma makinesinin tesisat şeması

b) Çevrimin  $T$ - $s$  diyagramı

**Şekil 2.8.** Carnot soğutma makinesinin tesisat şeması ve çevrimin  $T$ - $s$  diyagramı [23]

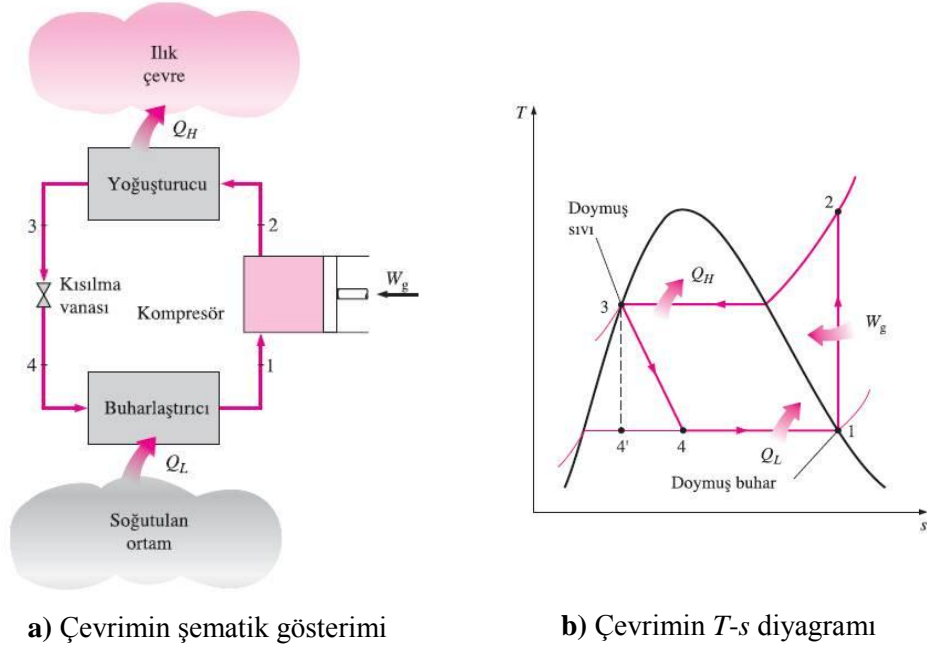
Ters Carnot çevrimi, belirli sıcaklıklardaki iki ısı enerji deposu arasında çalışan en etkin soğutma çevrimidir ancak uygulamada gerçekleştirilemez. Bu nedenle ters Carnot çevrimi, gerçek soğutma çevrimlerinin karşılaştırılabileceği bir standart oluşturur [23].

#### 2.2.4.2. İdeal Çevrim

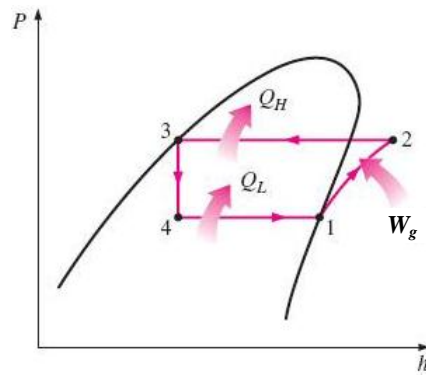
İdeal çevrime göre çalışan ısı pompası sisteminde bulunan kompresör, yoğuşturucu, kısılma vanası ve buharlaştırıcının bir araya gelerek oluşturduğu kapalı çevrim ve çevrimin  $T$ - $s$  diyagramı Şekil 2.9'da, çevrime ait  $P$ - $h$  diyagramı ise Şekil 2.10'da görülmektedir.

İdeal olarak kompresör, düşük basınç hattından (emiş tarafından) gelen çalışma akışkanı buharını izentropik olarak yüksek basınç hattına (atık tarafına) sıkıştırır (1-2 süreci). Çalışma akışkanına mekanik iş ilave edilince entalpi yükselir.

Normalde politropik bir süreç olan sıkıştırma işlemi ideal çevrimde tersinir adyabatik veya başka bir deyişle izentropiktir. Kızgın buhar yoğuşturucuda ısısını bırakır ve kısılma vanasından geçmeden önce (3-4 sürecinden önce) doymuş ya da aşırı soğumuş sıvı haline dönüşür. Düşük basınçlı sıvı buharlaştırıcıda buharlaşır (4-1 süreci) ve bunun etkisi olarak çevresinden, genellikle ortam havasından ısı çeker [23].



**Şekil 2.9.** İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin tesisat şeması ve  $T-s$  diyagramı [23]



**Şekil 2.10.** İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin  $P-h$  diyagramı [23]

## 2.2.5. Isı Pompalı Kurutucuların Üstünlükleri ve Sakıncaları

Diğer mekanik sistemlerde olduğu gibi ısı pompalı kurutucuların da, kurutma uygulamaları için kabul edilmeden önce incelenmesi gereken bazı üstünlükleri ve sakıncaları vardır. Bunlar, kaynaklarda [20] şu şekilde verilir:

### Isı pompalı kurutucuların üstünlükleri

- Isı pompalı kurutucular enerji verimliliği açısından diğer geleneksel kurutuculardan çok daha verimlidir. Isı geri kazanımının iyileştirilmesi sonucu elde edilen yüksek enerji verimliliği ile uzaklaştırılan her birim su miktarı için daha az enerji tüketilir.
- Isı pompalı kurutucularda kurutma sırasında sıcaklık, nem ve hava akış değerleri gibi değerler tam olarak kontrol altındadır. Sürekli kontrol edilen kurutma koşulları ısısal açıdan hassas malzemeler için fayda sağlarken açık bir şekilde daha iyi kalitede ürün elde edilir.
- Tipik olarak, ilave ısıtma ile sıcaklığı  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dan  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a ve nemlendirme sistemiyle %15-80 bağıl nemliliğe kadar çok geniş kurutma şartları sağlanabilir.
- Tekstil ürünlerini yaklaşık olarak aynı kalitede kurutur.
- Steril süreç şartları sağlanabilir.

### Isı pompalı kurutucuların sakıncaları

- Birçok ısı pompası sisteminde ozon tabakasına zararlı CFC'lerin kullanılması çevrecilerin bu konu ile ilgilenmelerine neden olmuştur. Bununla beraber, çevreyle dost HCFC'lerin ve hatta tamamen doğal olan amonyak ile suyun soğutucu akışkan olarak kullanıldığı ısı pompalı kurutucular bu sakıncayı ortadan kaldırmıştır.
- Isı pompalı kurutucunun kompresörleri, soğutucu akışkan filtreleri, ısı değiştiricileri vb. elemanlarına kurutucuyu optimum çalışma şartlarında tutabilmek için düzenli bakım yapılmalıdır.

- Isı pompası sisteminin borularında bir çatlak oluşması halinde soğutucu akışkan çevreye sızabilir. Sızıntı olması durumunda ısı pompası çevriminin basıncı yavaş yavaş düşecektir ve böylece kurutucunun performans değeri azalacaktır.
- Güneş enerjili kurutma gibi diğer kurutma sistemleriyle karşılaştırıldığında ısı pompalı kurutucuların ilk yatırım maliyetleri daha yüksek olabilir. Bunun yanında ısı pompalı kurutucuların ısıyı geri kazanmaları çalışma maliyetlerini düşürür, bu da yüksek maliyetlerini dengeler.
- Bazı soğutucu akışkanların kritik basınç ve sıcaklık seviyelerinden dolayı (örneğin R-22 için 99.6 °C) yüksek sıcaklıkta kurutma yapılabilmesi için ilave ısıtmaya ihtiyaç duyulur.
- Arzu edilen kurutma şartlarına ulaşmak için sistem, kararlı hal periyoduna ihtiyaç duyar.

### 2.3. Kurutma Sistemlerinde Kullanılan Verim Tanımlamaları

Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde sistemin veriminin ve etkinliğinin belirlenebilmesi için; özgül nem alma hızı, nem alma hızı, kurutma verimi ve ısı pompası etkenlik katsayısı gibi tanımlamalardan yararlanır. Bu tanımlamalarda kullanılan parametreler ve anlamları aşağıda verilmiştir.

- $m_1$ : Ürünün ilk durumdaki nemli kütlesi,  
 $m_2$ : Ürünün kurutmadan sonraki kütlesi,  
 $m_{su}$ : Ürünün başlangıçta içerdiği nem kütlesi,  
 $E$ : Enerji sarfıyatı,  
 $E_k$ : Kompresörün enerji sarfıyatı,  
 $E_{ts}$ : Tüm sistemin enerji sarfıyatı,  
 $\Delta t$ : Kurutma süresi.

### 2.3.1. Özgül Nem Alma Hızı (*SMER*)

Bir ısı pompalı kurutucunun enerji verimliliği genellikle özgül nem uzaklaştırma hızı ile belirlenir. Bu büyüklük; birim *kWh* enerji kullanımı için, kurutulacak üründen uzaklaştırılan su kütleini gösterir ve kısaca *SMER* olarak adlandırılır. Bir kurutucunun işletme maliyetleri enerji verimliliği için önemli bir parametredir. *SMER* için, *SMER<sub>IP</sub>* ve *SMER<sub>ts</sub>* şeklinde iki tanımlama yapılabilir [24].

$$SMER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Enerji sarfıyatı}} = \frac{m_1 - m_2}{E} \left[ \frac{kg - su}{kWh} \right] \quad (2.1)$$

$$SMER_{IP} = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Enerji sarfıyatı (kompresör için)}} = \frac{m_1 - m_2}{E_k} \left[ \frac{kg - su}{kWh} \right] \quad (2.2)$$

$$SMER_{ts} = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Enerji sarfıyatı (tüm sistem için)}} = \frac{m_1 - m_2}{E_{ts}} \left[ \frac{kg - su}{kWh} \right] \quad (2.3)$$

### 2.3.2. Nem Alma Hızı (*MER*)

Kurutucudan birim zamanda (ortalama olarak) uzaklaştırılan nem kütleine nem alma hızı denir ve kısaca *MER* olarak adlandırılır [24].

$$MER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Kurutma süresi}} = \frac{m_1 - m_2}{\Delta t} \left[ \frac{kg - su}{h} \right] \quad (2.4)$$

### 2.3.3. Kurutma Verimi

Kurutma verimi, başlangıçta tekstilde bulunan su miktarının ne kadarlık bir yüzdesinin uzaklaştığını ifade eder.

$$\% \text{ Kurutma verimi} = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Ürünün başlangıçta içerdiği nem kütlesi}} 100 = \frac{m_1 - m_2}{m_{su}} 100 \quad (2.5)$$



### 2.3.4. Isı Pompası Etkenlik Katsayısı ( $COP_{IP}$ )

Yoğuşturucuda hava tarafından alınan ısı'nın kompresöre verilen güce oranı olarak tanımlanır ve kısaca  $COP_{IP}$  şeklinde gösterilir.  $COP_{IP}$  (ITK) ve  $COP_{ts}$  şeklinde iki tanımlama yapılabilir [24].

$$COP_{IP} = \frac{\text{Yoğuşturucuda birim zamanda alınan ısı}}{\text{Kompresöre verilen güç}} = \frac{Q_H}{W_k} \quad (2.6)$$

$$COP_{ts} = \frac{\text{Yoğuşturucuda birim zamanda alınan ısı}}{\text{Tüm sisteme verilen toplam güç}} = \frac{Q_H}{W_{ts}} \quad (2.7)$$

Isı pompası için maksimum teorik etkenlik katsayısı, Carnot çevrimine göre çalışan ısı pompasının etkenlik katsayısı ile sınırlıdır. Buna göre;

$$COP_{Carnot} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} = \frac{1}{1 - T_{buh}/T_{yoğ}} \quad (2.8)$$

$COP_{Carnot}$  değerine fiziksel olarak ulaşmak mümkün değildir. Fakat bu değer, soğutma sisteminin ideal sistemden ne kadar uzak olduğuna dair ölçü olarak kullanılmaktadır. Pratikte ısı pompasının gerçek verimi genellikle teorik Carnot veriminin %40'ı ile %50'si arasındadır [22].

## 2.4. Psikrometri

### 2.4.1. Psikrometrinin Temelleri

Psikrometri; termodinamiğin, nemli havanın termodinamik özellikleri ve bu özellikleri kullanılarak nemli havadaki işlemler ile ilgilenen dalıdır. Kuru hava; içindeki su buharı tamamen alınmış atmosferik havadır. Kuru hava, izafi olarak sabit karışım oranına sahip birçok gazın karışımından meydana gelmektedir.

Nemli hava; kuru hava ile su buharının karışımı olarak kabul edilir. Hava içindeki su buharının miktarı; kuru hava durumundaki sıfır değerinden, sıcaklık ve basınca bağlı olarak doymuş durumdaki maksimum değerine kadar değişir.

Havadaki su buharının mükemmel gaz olarak ele alınması büyük kolaylık sağlar. Örneğin; 50 °C sıcaklıkta suyun doyma basıncı 12.3 *kPa*'dır. Daha düşük basınçlarda, doymuş buhar halinde olsa bile, su buharı çok az (%0.2'den az) bir hata ile mükemmel gaz olarak ele alınabilir. Böylece, nemli havayı oluşturan kuru hava ve su buharı ayrı ayrı;

$$PV = mRT \quad (2.9)$$

şeklindeki mükemmel (ideal) gaz denklemini sağlar. Bu durumda nemli hava, basıncı kuru havanın ve su buharının kısmi basınçlarının toplamı olan, mükemmel bir gaz karışımı olarak incelenebilir [15]:

$$P = P_{kh} + P_b \quad (2.10)$$

Burada;

$P$ : Nemli havanın basıncı (*kPa*),

$P_{kh}$ : Kuru havanın kısmi basıncı (*kPa*),

$P_b$ : Su buharının kısmi basıncı (*kPa*), anlamlarındadır.

#### 2.4.2. Özgül Nem ve Bağlı Nem Kavramları

Göz önüne alınan nemli hava içindeki su buharı kütesinin kuru hava kütesine oranına özgül nem veya mutlak nem denir.  $w$  ile gösterilen özgül nem aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$w = \frac{m_b}{m_{kh}} \left[ \frac{g - su}{kg - kuru\ hava} \right] \quad (2.11)$$

Burada;

$m_b$ : Nemli hava içerisindeki su buharı miktarı ( $g$ ),

$m_{kh}$ : Kuru hava miktarı ( $kg$ ), anlamlarındadır.

Mükemmel gaz denklemi, nemli hava içindeki her iki karışana da uygulanacak olursa su buharı için;

$$P_b V = m_b R_b T \quad (2.12)$$

kuru hava için de;

$$P_{kh} V = m_{kh} R_{kh} T \quad (2.13)$$

bağıntısı yazılabilir. Buna göre:

$$w = \frac{m_b}{m_{kh}} = \frac{P_b V / R_b T}{P_{kh} V / R_{kh} T} = \frac{R_{kh}}{R_b} \frac{P_b}{P_{kh}} \cong 0.622 \frac{P_b}{P - P_b} \Rightarrow w \cong \frac{0.622 P_b}{P - P_b} \quad (2.14)$$

Burada;

$V$ : Nemli havanın toplam hacmi ( $m^3$ ),

$T$ : Nemli havanın sıcaklığı ( $K$ ),

$R_b$ : Su buharının ideal gaz sabiti ( $J/kg \cdot K$ ),

$R_{kh}$ : Kuru havanın ideal gaz sabiti ( $J/kg \cdot K$ ), anlamlarındadır.

Nemli havadaki su buharı miktarının ( $m_b$ ), aynı sıcaklıktaki doymuş havada bulunabilecek su buharı miktarına ( $m_{b,d}$ ) oranı bağıl nem olarak tanımlanır. Bağıl nem aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$\varphi = \frac{m_b}{m_{b,d}} \quad (2.15)$$

Bağıl nem, kısmi basınçlar cinsinden ifade edilirse; nemli havadaki su buharı kısmi basıncının ( $P_b$ ), aynı sıcaklıktaki doymuş havada bulunabilecek su buharının kısmi basıncına ( $P_{b,d}$ ) oranı olarak tanımlanır. Bu durumda bağıl nem, aşağıdaki şekilde de formüle edilir:

$$\varphi = \frac{P_b}{P_{b,d}} \quad (2.16)$$

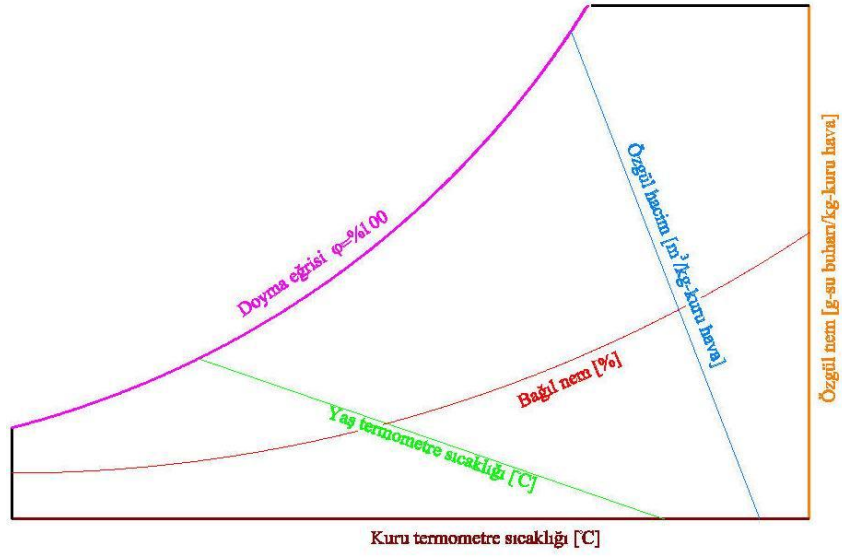
Bağıl nem ile özgül nem arasındaki ilişki ise aşağıdaki gibi olacaktır:

$$w = \frac{0.622P_b}{P - P_b} \Rightarrow P_b = \frac{wP}{0.622 + w} \text{ ve } \varphi = \frac{P_b}{P_{b,d}} \cong \frac{wP}{(0.622 + w)P_{b,d}} \Rightarrow w \cong \frac{0.622\varphi P_{b,d}}{P - \varphi P_{b,d}} \quad (2.17)$$

Bağıl nem kuru hava için 0, doymuş hava için 1 değerini alır. 1kg kuru hava göz önüne alındığında, tanımı gereği kuru havada su buharı yoktur, bu nedenle özgül nemi sıfırdır. Kuru havaya su buharı eklendikçe özgül nemi artar. Fakat belirli bir hale erişildikten sonra havaya daha çok su buharı katmak mümkün olmaz. Bu halde hava su buharına doymuştur ve doymuş hava diye adlandırılır [15].

### 2.4.3. Psikrometrik Diyagram

Psikrometrik diyagram, nemli havanın termofiziksel özelliklerini grafik halinde veren bir diyagramdır. Psikrometrik diyagramın temel öğeleri Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.11.** Psikrometrik diyagramın genel çizimi

Şekil 2.11’de gösterildiği gibi kuru termometre sıcaklık değerleri yatay ekseninde, özgül nem değerleri de dikey ekseninde yer almaktadır. Diyagramın sol tarafında ise havanın (su buharıyla) doymuş olduğu tüm hallerin yer aldığı doyma eğrisi yer almaktadır. Bu nedenle, bu eğri aynı zamanda %100 bağıl nem eğrisidir. Psikrometrik diyagramda yer alan öğelerin birimleri; özgül nem için *g-su buharı/kg-kuru hava*; entalpi için *kJ/kg-kuru hava*; sıcaklık için *°C*; özgül hacim için *m<sup>3</sup>/kg-kuru hava* şeklindedir.

Şekil 2.12’de verilen psikrometrik diyagramda ise, 19 numaralı deney için deneyin 10. dakikasında nemli havanın izlediği yol gösterilmiştir. Buna göre; 1-2 arasında kurutma havası tamburun içinden geçerken havanın özgül nemi artmakta sıcaklığı ise azalmaktadır. 2-3 arasında kurutma havası buharlaştırıcıdan geçerken nemi alınmaktadır. 3-1 arasında ise kurutma havası yoğuşturucudan geçerken sıcaklığı artmaktadır.



değiştirilerek fanın gücünün, dolayısıyla da fanın temin ettiği kurutma havasının debisinin değişmesi sağlanmıştır.

Deneyleer için ilk önce; fanın normal çalışma şartlarında yani fan, makine içerisindeki şebeke geriliminin frekansı olan 50 Hertz frekansında çalışırken fanın çektiği güç enerji analizörü sayesinde tespit edilmiştir. Ayrıca; üretici firmadan, fanın normal çalışma şartlarında sağladığı hava debisinin miktarı öğrenilmiştir. Sonra fan kanunları denklemleri kullanılarak deneyleer için belirlenen hava debilerinde fanın gücünün ne olması gerektiği hesaplanmıştır. Son olarak; yapılacak deney hangi hava debisi miktarında yapılmak isteniyorsa, invertör yardımıyla fanın gücü o hava debisi için hesaplanan değere getirilmiştir.

Mevcut bir fanın fiziksel ölçüleri değiştirilmeden fanın gücü değiştirildiğinde; fanın sağladığı havanın debisi, basınç değeri, fanın devir sayısı, fanın verimi ve fanın ses seviyesi gibi parametrelerdeki değişimleri gösteren denklemlere fan kanunları adı verilir ve fan kanunları aşağıda verilen denklemlerden oluşur [25].

1. Fanın debisi ( $Q$ ), devir sayıları ( $N$ ) oranı ile doğru orantılı olarak değişir. Yani; fanın devir sayısı iki katına çıktığında, debisi de iki katına çıkar.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.18)$$

2. Fanın gücü ( $\dot{W}$ ), devir sayıları ( $N$ ) oranının, diğer bir ifadeyle fanın sağladığı debiler ( $Q$ ) oranının küpüyle doğru orantılı olarak değişir. Yani; fanın devir sayısı iki katına çıktığında, diğer bir ifadeyle debisi iki katına çıktığında, gücü sekiz katına çıkar.

$$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 \quad (2.19)$$

3. Basınç ( $P$ ), devir sayıları ( $N$ ) oranının, diğer bir ifadeyle fanın sağladığı debiler ( $Q$ ) oranının karesiyle doğru orantılı olarak değişir. Yani; fanın devir sayısı iki katına çıktığında, diğer bir ifadeyle debisi iki katına çıktığında, basıncı dört katına çıkar.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 \quad (2.20)$$

4. Fanın verimi ( $\eta$ ), devir sayısının ( $N$ ) değişmesiyle değişmez. Çünkü verim ( $\eta$ ), aşağıdaki 2.21 numaralı denklem ile tanımlandığından, 2.22 numaralı denklemden de görüleceği gibi, devir sayısının değişmesiyle verimde bir değişim meydana gelmez. Yani; fanın devir sayısı iki katına çıktığında buna bağlı olarak diğer parametrelerdeki değişimler göz önüne alındığında, fanın bu yeni durumdaki veriminin başlangıçtakine eşit olduğu görülür.

$$\eta = \frac{QP}{\dot{W}} \quad (2.21)$$

$$\eta_2 = \frac{Q_2 P_2}{\dot{W}_2} = \frac{(2Q_1)(4P_1)}{8\dot{W}_1} = \frac{Q_1 P_1}{\dot{W}_1} = \eta_1 \quad (2.22)$$

5. Fanın ses seviyesindeki ( $S$ ) değişim, devir sayısındaki ( $N$ ) değişime bağlı olarak aşağıdaki formüle göre bulunur. Yani; fanın devir sayısı iki katına çıktığında, yeni durumdaki ses seviyesi birinci durumdaki ses seviyesinden yaklaşık olarak 15.052 dB daha fazla olmaktadır.

$$S_2 = S_1 + 50 \log_{10} \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (2.23)$$

Yukarıda açıklanan fan kanunları göz önüne alınarak deneylerde, kurutucuda yer alan fanın beslendiği elektrik geriliminin frekansı değiştirilerek gücü değiştirilmiş ve böylece fanın kurutucuya temin ettiği kurutma havasının debisi istenilen değerlere getirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen değerler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Kurutucuda yer alan fanın güç ve debisinin frekans ile değişimi

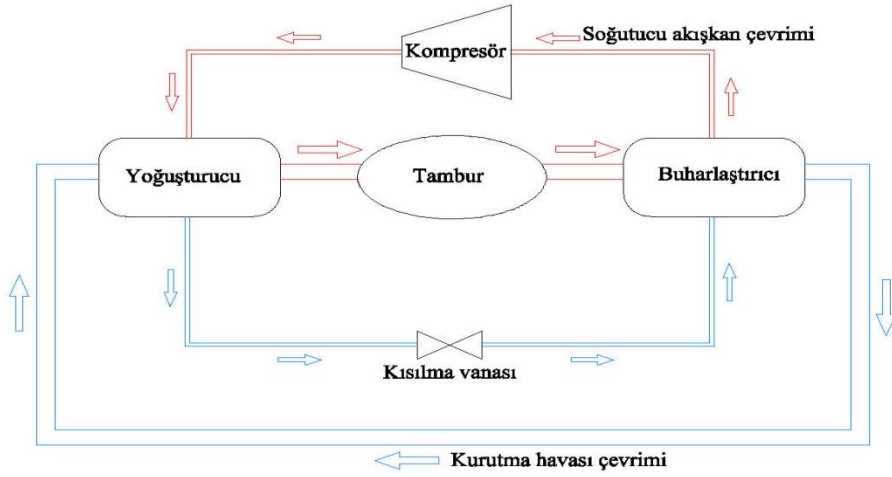
Frekans (Hz)	Güç (W)	Debi (l/s)
30.1	32.59	40
40.7	63.70	50
<b>50.0</b>	<b>110.00</b>	<b>60</b>
58.2	139.77	65



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmaya konu olan deney tesisatında yer alan kurutma makinesinin şematik resmi ve çalışma prensibi Şekil 3.1’de, kurutma makinesinde yer alan ısı pompası elemanlarının fotoğrafı ise Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu çalışma sistemine göre, ilk olarak kurutma havası yoğuşturucu tarafından ısıtılarak tamburun içine gönderilmektedir. Tamburun içinde ıslak tekstilin nemini alan kurutma havası buharlaştırıcıya gönderilir. Buharlaştırıcıda nemi alınan kurutma havası tekrar yoğuşturucuya gönderilir. Yoğuşturucuda sıcaklığı artırılan kurutma havası tambura gönderilir. Böylece bir tam hava çevrimi yapılmış olur. Bilindiği gibi; ısı pompalı çamaşır kurutma makinesi deney tesisatında, kurutma havası çevrimi ve soğutucu akışkan çevrimi olmak üzere iki kapalı çevrim bulunmaktadır. Buna göre soğutucu akışkan çevriminde ise; ısıl enerjinin aktarılmasını sağlayan soğutucu akışkanı sıkıştırma görevini kompresör yapar. Soğutucu akışkan yoğuşturucuya yüksek sıcaklıkta ve gaz fazında girer. Gaz fazında olan soğutucu akışkan, yoğuşturucuda ısı enerjisini kurutma havasına aktarır ve kendisi yoğuşturucuyu sıvı fazda terk eder. Soğutucu akışkan yoğuşturucudan sonra kısılma vanasına veya kılcal boruya girer. Kısılma vanasında veya kılcal boruda soğutucu akışkanın basıncı ve sıcaklığı düşer. Kısılma vanasından çıkan ve sıcaklığı düşmüş olan soğutucu akışkan buharlaştırıcıya girer. Buharlaştırıcı, ortam sıcaklığından daha düşük sıcaklıktadır ve çevresinden ısı alır. Sıvı haldeki soğutucu akışkan buharlaştırıcıdan aldığı ısı enerjisi sayesinde buhar haline gelir ve kompresöre döner. Böylece soğutucu akışkanda tam bir çevrim yapmış olur.

Çalışmaya konu olan ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinin çalışma sisteminde görüldüğü üzere, kurutma havası çevrimi ve soğutucu akışkan çevrimi aynı anda olmaktadır.



**Şekil 3.1.** Dene tesisatındaki kurutma makinesinin şematik resmi ve çalışma prensibi



**Şekil 3.2.** Kurutma makinesinde yer alan ısı pompasının elemanları

### 3.1. Deneilerde Kullanılan Ekipmanlar

#### 3.1.1. Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makinesi

Deneilerde 7 kg kapasiteli Blomberg marka ısı pompalı çamaşır kurutma makinesi kullanılmıştır. Deneiler sırasında gerekli olan sıcaklık ve bağıl nem

değerlerini ölçmek için, makinenin daha önceden belirlenmiş yerlerine 15 adet termoeleman, 5 adet de nem ve sıcaklıkölçer yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.3.** Blomberg marka ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinin genel görünümü

### 3.1.2. Masaüstü Bilgisayar

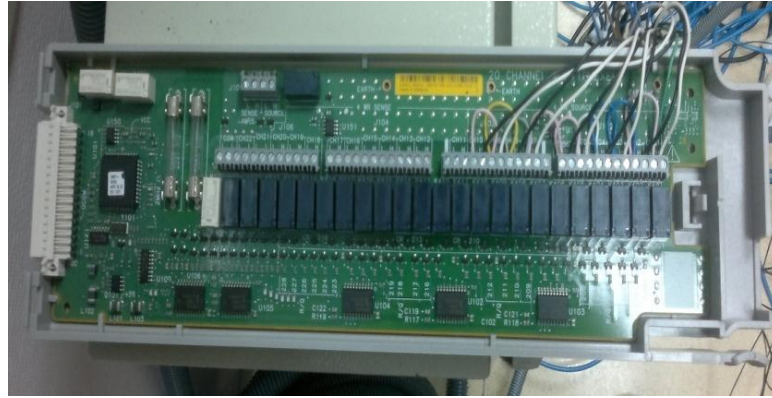
Deneyle esnasında veri toplayıcının (data logger) okuduğu verilerin kayıt altına alınmasında kullanılan deney tesisatı elemanıdır. Gerekli bağlantı kabloları ile veri toplayıcıya bağlantısı yapılmıştır.

### 3.1.3. Veri Toplayıcı (Data Logger)

Deneylede; sıcaklık, basınç ve nem değerlerinin okunması ve bunların bilgisayara aktarılması için her biri 20 kanallı 2 adet kartı (multiplexer) ile beraber Agilent marka bir veri toplayıcı kullanılmıştır.



**Şekil 3.4.** Agilent marka veri toplayıcının genel görünümü



**Şekil 3.5.** Veri toplayıcıda kullanılan ve 20 kanala sahip veri toplama kartı

### **3.1.4. Enerji Analizörü**

Bu çalışmada; ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinin deneyler esnasında harcadığı enerjiyi, gücü, akımı ve voltajı dijital olarak ekranında gösteren ZES ZIMMER marka enerji analizörü kullanılmıştır.



**Şekil 3.6.** ZES ZIMMER marka enerji analizörünün genel görünümü

### **3.1.5. Nem ve Sıcaklıkölçer**

Bu ölçüm aletleri, bağlantı yapıldıkları yerdeki havanın bağıl nemini ve kuru termometre sıcaklığını ölçen ölçüm cihazlarıdır. Mikroişlemci kontrolü ve birden fazla noktadan kalibre edilebilme özeliği nedeniyle net ve güvenilir sonuçlar verir. Bu ölçüm aletlerinin, bağıl nem ve sıcaklık ölçmelerindeki belirsizlikleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Bağıl nem ölçüm belirsizliği:  $< \pm \%2RH$

Sıcaklık ölçüm belirsizliği:  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}C$



**Şekil 3.7.** Hava hattında yoğuşturucu ile buharlaştırıcı arasına yerleştirilmiş bir adet Michell marka nem ve sıcaklıkölçerin genel görünümü

### 3.1.6. Sıcaklıkölçer (Termoeleman)

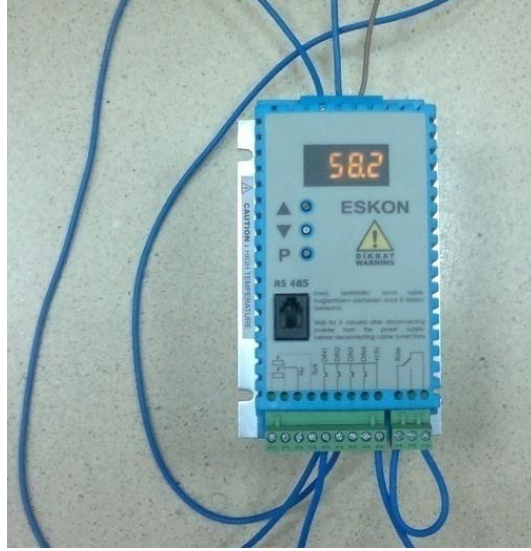
Günümüzde elektriksel sıcaklık ölçme yöntemlerinden en çok kullanılan termoelemanlardır. Termoelemanlarla pratikte  $-185$  ila  $+1820^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkları arasında, her türlü sıvı, katı ve gaz sıcaklıkları kolayca ölçülebilir [26]. Bu çalışmadaki deneylerde kullanılan termoelemanlar T tipi olup,  $\pm 0.75(\pm 1^{\circ}\text{C})$  hassasiyete sahiptirler. T tipi termoelemanlar Bakır-Konstantan ikilisinden müteşekkil olup mavi ve kırmızı renklere olurlar. Bunlar ucuz olup çıkış gerilimleri yüksektir. Bu termoelemanlarla  $-185$  ila  $+370^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklar ölçülebilir. Deneyler esnasında sıcaklık değerlerini tespit edebilmek için, kurutma makinesi üzerinde 15 farklı noktaya termoeleman bağlanmıştır. Bu termoelemanlardan, hava hattında buharlaştırıcı girişinde yer alan iki tanesi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8.** Hava hattında buharlaştırıcı girişinde yer alan iki adet termoeleman

### 3.1.7. İnvörtör (Frekans Değiştirici)

İnvörtörler, bağlantı yapıldıkları elektrikli makinelerin beslendiği elektriğin frekansını değiştirerek bu makinelerin elektriksel gücünü değiştiren cihazlardır. Bu çalışmadaki deneylerde kurutma havasının debisini değiştirmek için, Şekil 3.9’da görülen ESKON marka bir invörtörün fan ile bağlantısı yapılmış ve böylece fanın beslendiği elektrik geriliminin frekansı değiştirilerek fanın gücü değiştirilmiştir.



Şekil 3.9. ESKON marka frekans değiştirici (invertör)

### 3.1.8. Hassas Terazı

Deneylerde kurutulacak olan tekstilin kütlesini ölçmek için maksimum 5000 g kapasiteli ve  $\pm 2g$  hassasiyete sahip Oertling marka hassas terazi kullanılmıştır. Kullanılan bu terazinin genel görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Deneylerde kullanılan hassas terazinin genel görünümü

### 3.1.9. Havlu

Deneyleerde kurutulacak tekstil olarak, her biri yaklaşık 100 g kütleyle sahip pamuklu havlu kullanılmıştır.

### 3.2. Deney Düzenekinin Hazırlanması

Deneyleer esnasında, belirlenen yerlerdeki sıcaklık ve bağıl nem değerlerini elde edebilmek için ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinin, Çizelge 3.1’de de gösterildiği gibi, çeşitli yerlerine 5 adet nem ve sıcaklıkölçer, 15 adet de termoeleman yerleştirilmiştir. Bu nem ve sıcaklıkölçerler ile termoelemanlardan bazılarının ısı pompası üzerindeki konumları ise Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Nem ve sıcaklıkölçerler ile termoelemanların konumlandırıldığı yerler

Ölçüm cihazı	Ölçüm yeri	
	Hava hattı	Isı pompası hattı
Nem ve Sıcaklıkölçer	Buharlaştırıcı girişi sol	
	Buharlaştırıcı girişi sağ	
	Yoğuşturucu girişi sağ	
	Yoğuşturucu girişi orta	
	Yoğuşturucu çıkışı orta	
Sıcaklıkölçer (Termoeleman)	Buharlaştırıcı girişi sağ	Kompresör girişi
	Buharlaştırıcı girişi sol	Kompresör çıkışı
	Buharlaştırıcı çıkışı orta	Yoğuşturucu girişi
	Yoğuşturucu çıkışı sağ	Yoğuşturucu çıkışı
	Yoğuşturucu çıkışı orta	Kılcal boru girişi
	Yoğuşturucu çıkışı sol	Buharlaştırıcı girişi
	Fan girişi	Buharlaştırıcı çıkışı
		Akümülatör girişi





**Şekil 3.11.** Bazı nem ve sıcaklıkölçerler ile termoelemanların ısı pompası üzerindeki konumları

Deney tesisatı hazırlanırken daha sonra, nem ve sıcaklıkölçerler ile termoelemanların veri toplayıcıya bağlantısı yapılmıştır. Veri toplayıcının, elde ettiği verileri kaydetmesi için bir masaüstü bilgisayara bağlantısı yapılmıştır. Daha sonra bu ölçülen verilerin bilgisayarda kayıt altına alınabilmesi için gerekli bilgisayar programı masaüstü bilgisayara kurulmuştur.

Ayrıca, ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinin deneyler sırasında harcadığı enerjiyi tespit edebilmek için bir enerji analizörünün, gerekli bağlantı kabloları ile kurutma makinesine bağlantısı yapılmıştır.

Isı pompalı çamaşır kurutma makinesinde kurutma havası debisini değiştirebilmek için bir invertörün, kurutma makinesinde yer alan fana bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede fanın beslendiği elektriğin frekansı değiştirilerek fanın gücü, dolayısıyla fanın gönderdiği havanın debisi değiştirilmiştir.

Deney tesisatının bu şekilde hazırlanmasından sonra deneylerin yapılmasına başlanmıştır.

### **3.3. Hata Analizi**

#### **3.3.1. Deneysel Hata Tipleri ve Nedenleri**

Deneysel çalışmaların tümü, çeşitli nedenlerden dolayı hata içerir. Deneysel çalışmalarda yapılan bu hatalar genellikle üç grupta toplanabilir. Bunlardan birincisi deneyi yapan araştırmacının dikkatsizlik ve tecrübesizliğinden ileri gelen hatalardır. Deney tesisatlarında kullanılan ölçme cihazlarının yanlış seçiminden veya ölçme sistemlerinin yanlış tasarımından kaynaklanan hatalar bu grup içinde düşünülebilir. İkinci grup hatalar sabit veya sistematik olarak adlandırılan hatalardır. Bunlar genellikle tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla tespit edilemeyen hatalardır. Üçüncü grup hatalar ise rastgele hatalardır. Bunlar ise; deneyi yapan kişilerin değişmesinden, deneyi yapanların dikkatlerinin zamanla azalmasından, elektrik geriliminin değişmesinden, ölçme aletlerindeki histerizis olaylarından veya cihazların ısınması nedeniyle elektronik ölçme aletlerinde oluşan salınımlardan kaynaklanabilmektedir [27].

Deneysel sonuçların geçerliliğinin belirlenebilmesi için mutlaka bir hata analizi yapmak gerekmektedir. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan parametrelere ait hata miktarlarının/oranlarının tespiti için pratikte bir kaç yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler içerisinde, akılcı yaklaşım (commonsense basis) ve belirsizlik analizi (uncertainty analysis) yöntemleri en çok kullanılanlarıdır. Son yıllardaki çalışmalarda hata analizinde; ilk olarak Kline ve McClintock tarafından ortaya atılan ve diğerlerine göre daha hassas bir yöntem olan belirsizlik analizi yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Söz konusu bu hata analiz yöntemleri müteakip bölümlerde sırasıyla ayrıntılı bir şekilde izah edilmiştir [27].

#### **3.3.2. Hata Analizinde Akılcı Yaklaşım**

Bu hata analiz yönteminde, ölçme sisteminde bulunan bütün ölçüm cihazlarının aynı anda (pozitif veya negatif yönde) maksimum hatayı yaptığı kabul edilir. Örnek olarak; bir elektrik devresindeki güç, gerilim ve akım şiddeti çarpımı olan [27];

$$P = EI \quad (3.1)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmak istensin. Elektrik gerilimi ve akım şiddetini ölçen cihazların sabit hata miktarları (belirsizlikleri) sırasıyla,  $\pm w_E$  ve  $\pm w_I$  şeklinde verilmiş olsun. Bu durumda; ölçme esnasında elektrik gerilimi  $e$  olarak ve elektrik akımı da  $i$  olarak okunmuş ise,  $E$  ve  $I$  için şu ifadeler yazılabilir.

$$E = e \pm w_E \quad (3.2)$$

$$I = i \pm w_I \quad (3.3)$$

Böyle bir ölçmede nominal güç (anma gücü);

$$P_N = ei \quad (3.4)$$

değerindedir. Böyle bir deney sonucundan hareketle akılcı yaklaşıma göre elde edilebilecek en hatalı iki değer:

$$P_{maks.} = (e + w_E)(i + w_I) \quad (3.5)$$

$$P_{min.} = (e - w_E)(i - w_I) \quad (3.6)$$

şeklinde olacaktır. Bu tip bir ölçmede belki hiçbir zaman böyle bir hataya ulaşamayacaktır. Çünkü tesadüfi olarak, gerilimi ölçen cihaz ile yapılan ölçümde ortaya çıkan hata en büyük değerde iken, akımı ölçmede kullanılan cihaz ile yapılan ölçümde de ortaya çıkan hatanın en büyük değerde olacağı şüphelidir. Bu durum, hata analizinde akılcı yaklaşımı kullanmanın sakıncasını açıkça göstermektedir [27].

### 3.3.3. Hata Analizinde Belirsizlik Analizi Yöntemi

Herhangi bir deney tesisatı aracılığı ile tespit edilmesi/hesaplanması gereken büyüklük  $R$ , bu büyüklüğe etki eden  $n$  adet bağımsız değişkenler ise;  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$

olsun. Bu durumda;  $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  yazılabilir. Deneilerde etkili olan her bir bağımsız değişkene ait sabit hata miktarları;  $\pm w_{x_1}, \pm w_{x_2}, \pm w_{x_3}, \dots, \pm w_{x_n}$  olsun.  $R$  büyüklüğünün sabit hata miktarı  $\pm w_R$  ise [27];

$$w_R = \frac{\partial R}{\partial x_1} w_{x_1} + \frac{\partial R}{\partial x_2} w_{x_2} + \frac{\partial R}{\partial x_3} w_{x_3} + \dots + \frac{\partial R}{\partial x_n} w_{x_n} \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda,  $R$  büyüklüğüne ilişkin maksimum belirsizlik aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$w_{R_{maks.}} = \left| \frac{\partial R}{\partial x_1} w_{x_1} \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial x_2} w_{x_2} \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial x_3} w_{x_3} \right| + \dots + \left| \frac{\partial R}{\partial x_n} w_{x_n} \right| \quad (3.8)$$

Bu durum, mümkün olabilecek en kötü durum olup, olasılığı en küçüktür. Bu durumu iyileştirebilmek için, Pythagorean Teoremine göre belirsizlik aşağıdaki gibi yazılır.

$$w_R = \pm \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_{x_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} w_{x_3} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki bağıntı dikkatle incelendiği zaman, belirsizlik analizi yönteminin diğer yöntemlere göre en önemli üstünlüklerinden birinin, deneilerde en büyük hataya neden olan değişkenin hemen tespit edilebilmesinin olduğu görülecektir. Böylece hatayı azaltmak için, söz konusu bu değişkenin ölçümünde kullanılan cihaz üzerine yoğunlaşılabilir. Ayrıca, yukarıdaki bağıntıda yer alan terimlerin eş boyutluluk ilkesi açısından uyumlu olduğuna dikkat edilmelidir [27].

Deneilerde kullanılan ölçüm cihazlarında meydana gelebilecek belirsizlikler, bu cihazların kalibrasyonu yapılmak suretiyle belirlenir. Buna göre; bağımsız değişkenlere (ölçülecek parametrelere) ilişkin belirsizlikler bilindiğinden, yukarıdaki bağıntı kullanılmak suretiyle bağımlı değişkenlere (hesaplanacak parametrelere) ilişkin belirsizlikler de tespit edilebilir [27].

### 3.3.4. Yapılan Deneyler İçin Hata Analizi Sonuçları

Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler için, belirsizlik analizi yöntemi kullanılarak hata analizi yapılmıştır. Ölçülen büyüklüklerin hata analizinde kullanılacak olan belirsizlik değerleri, ölçüm aletlerinin imalatçı firmaları tarafından bildirilen hata değerlerinden ve deneysel tecrübelerden elde edilmiştir.

Deneylerde ölçülen büyüklükler; ısı pompası hattında kullanılan borular üzerindeki sıcaklık değerleri, kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı ve bağıl nem değerleri, kuru ve nemlendirilmiş tekstilin kurutma öncesi ve kurutma sonrası kütlesi, kurutma süresi ve kurutma için harcanan toplam enerji şeklindedir.

#### 3.3.4.1. Sıcaklık Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata

Kurutma havası hattı ve ısı pompası hattı üzerindeki sıcaklık ölçümünde ortaya çıkabilecek olan hatalar deneylerde kullanmış olduğumuz ölçüm aletlerine göre değişmektedir. Termoelemanlarla sıcaklık ölçümünde ortaya çıkan hatalar kaynaklarda [28] şu şekilde verilir:

$w_{T_a}$  : Termoelemandan kaynaklanan hata,

$w_{T_b}$  : Bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hata,

$w_{T_c}$  : Ölçümün gerçekleştirildiği yerdeki ortam sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata,

$w_{T_d}$  : Veri toplayıcıdan kaynaklanan hata şeklindedir.

Buna göre; sıcaklık ölçümünde yapılabilecek toplam hatayı hesaplamak için aşağıdaki (3.10) numaralı denklem kullanılır [28].

$$w_T = \pm \left[ (w_{T_a})^2 + (w_{T_b})^2 + (w_{T_c})^2 + (w_{T_d})^2 \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

### 3.3.4.2. Bağıl Nem Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata

Kurutma havası hattı üzerindeki bağıl nem ölçümünde ortaya çıkabilecek olan hatalar, yine deneylerde kullanmış olduğumuz ölçüm aletlerine göre değişmektedir. Bağıl nem ölçümünde ortaya çıkan hatalar kaynaklarda [28] şu şekilde verilir:

$w_{\varphi_a}$  :Nem ve sıcaklıkölçerden kaynaklanan hata,

$w_{\varphi_b}$  :Havanın bağıl neminin okunmasından kaynaklanan hata şeklindedir.

Bağıl nem ölçümünde yapılabilecek toplam hatayı hesaplamak için (3.11) numaralı denklem kullanılır [28].

$$w_{\varphi} = \pm \left[ (w_{\varphi_a})^2 + (w_{\varphi_b})^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

### 3.3.4.3. Tekstil Kütlesinin Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata

Tekstil kütlesi ölçümünde ortaya çıkabilecek olan hatalar; deneylerde kullanılan hassas teraziden ve okuyucudan kaynaklanan hatalardır. Tekstil kütlesi ölçümünde ortaya çıkan hatalar kaynaklarda [28] şu şekilde verilir:

$w_{m_a}$  : Hassas teraziden kaynaklanan hata,

$w_{m_b}$  : Okumaktan kaynaklanan hata,

$w_{m_c}$  : Tekstilin makineden çıkartılırken el ile temasından kaynaklanan hata şeklindedir.

Tekstil kütlesi ölçümünde yapılabilecek toplam hatayı hesaplamak için (3.12) numaralı denklem kullanılır [28].

$$w_m = \pm \left[ (w_{m_a})^2 + (w_{m_b})^2 + (w_{m_c})^2 \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

#### 3.3.4.4. Kurutma Süresinin Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata

Deneyleerde kurutma süresi dijital bir saat yardımıyla ölçülmüştür. Kurutma süresinin ölçülmesinde ortaya çıkabilecek hatalar kaynaklarda [28] şu şekilde verilir:

$w_{\Delta t_a}$  : Dijital saatten kaynaklanan hata,

$w_{\Delta t_b}$  : Kurutma süresinin ölçümünde okuyucudan kaynaklanan hata şeklindedir.

Kurutma süresi ölçümünde yapılabilecek toplam hatayı hesaplamak için (3.13) numaralı denklem kullanılır [28].

$$w_{\Delta t} = \pm \left[ \left( w_{\Delta t_a} \right)^2 + \left( w_{\Delta t_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.13)$$

#### 3.3.4.5. Enerji Sarfıyatının Ölçümünde Ortaya Çıkan Toplam Hata

Kurutma sırasındaki toplam enerji sarfıyatı bir enerji analizörü yardımıyla ölçülmüştür. Toplam enerji sarfıyatının ölçülmesinde ortaya çıkabilecek hatalar kaynaklarda [28] şu şekilde verilir:

$w_{E_a}$  : Enerji analizöründen kaynaklanan hata,

$w_{E_b}$  : Okuyucudan kaynaklanan hata şeklindedir.

Toplam enerji sarfıyatının ölçümünde yapılabilecek toplam hatayı hesaplamak için (3.14) numaralı denklem kullanılır [28].

$$w_E = \pm \left[ \left( w_{E_a} \right)^2 + \left( w_{E_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerin kapsamlı bir hata analizini yapmak için, yukarıda verilen hesaplama yöntemi takip edilmelidir. Bu hesaplamalarda kullanılacak verilerin bir kısmı deneylerde kullanılan cihazların kataloglarından, bir kısmı bu çalışmada elde edilen tecrübelerden, bir kısmı da yukarıdaki kaynakta [28] verilen sayısal değerlerden alınmıştır. Belirsizlik analizi

yönteminin takip edildiği hata analizinde kullanılan bu sayısal değerler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Terazi, enerji analizörü ve saat için sabit hata miktarları (belirsizlikler)

Hassas terazi için				Enerji analizörü için			Dijital saat için		
$W_{m_a}$	$W_{m_b}$	$W_{m_c}$	$W_m$	$W_{E_a}$	$W_{E_b}$	$W_E$	$W_{\Delta t_a}$	$W_{\Delta t_b}$	$W_{\Delta t}$
(g)	(g)	(g)	(g)	(Wh)	(Wh)	(Wh)	(s)	(s)	(s)
± 2	± 0.5	± 3	± 3.640	± 1.078	± 0.5	± 1.188	± 0.018	± 3	± 3.00005

### 3.3.4.6. SMER, MER ve Kurutma Veriminde Ortaya Çıkan Hatanın Tespiti

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin hata analizi; ölçüm aletlerinin imalatçı firmaları tarafından bildirilen hata değerleri, deneysel tecrübelerden elde edilen değerler ve kaynaklarda [28] verilen değerler yardımıyla yapıлып, bu analizden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmiştir. Ayrıca; 1 numaralı deney için *SMER*, *MER* ve kurutma verimine ait hata analizindeki hesaplamalar, örnek oluşturması için aşağıda açık bir şekilde izah edilmiştir.

1 numaralı deney için; *SMER*, *MER* ve kurutma verimine ait hata analiz hesaplamaları:

$w_s$ : *SMER* için sabit hata miktarını (belirsizliği) göstermek üzere;

$$SMER = f(m_1, m_2, E) \quad (3.15)$$

şeklinde tanımlandığından;

$$w_s = \pm \left[ \left( \frac{\partial S}{\partial m_1} w_{m_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial m_2} w_{m_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial E} w_E \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

veya;

$$w_s = \pm \left[ \left( \frac{1}{E} w_{m_1} \right)^2 + \left( -\frac{1}{E} w_{m_2} \right)^2 + \left( -\frac{m_1 - m_2}{E^2} w_E \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$



olacaktır. Bu durumda; 1 numaralı deney için *SMER*'deki belirsizlik aşağıdaki gibi bulunur.

$$w_s = \pm \left[ \left( \frac{1}{0.57594} 3.64 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \left( -\frac{1}{0.57594} 3.64 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \left( -\frac{1.920 - 1.433}{0.57594^2} 1.188 \cdot 10^{-3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$w_s = \pm 0.00911 \left[ \frac{kg-su}{kWh} \right]$  bulunur. Bu deneydeki *SMER* değeri göz önüne alınırsa;  $\%w_s = \% \pm 1.07693$  bulunmuş olur.

$w_M$ : *MER* için sabit hata miktarını (belirsizliği) göstermek üzere;

$$MER = f(m_1, m_2, \Delta t) \quad (3.18)$$

şeklinde tanımlandığından;

$$w_M = \pm \left[ \left( \frac{\partial M}{\partial m_1} w_{m_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial M}{\partial m_2} w_{m_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial M}{\partial \Delta t} w_{\Delta t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.19)$$

veya;

$$w_M = \pm \left[ \left( \frac{1}{\Delta t} w_{m_1} \right)^2 + \left( -\frac{1}{\Delta t} w_{m_2} \right)^2 + \left( -\frac{m_1 - m_2}{\Delta t^2} w_{\Delta t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.20)$$

olacaktır. Bu durumda; 1 numaralı deney için *MER*'deki belirsizlik aşağıdaki gibi bulunur.

$$w_M = \pm \left[ \left( \frac{1}{0.66667} 3.64 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \left( -\frac{1}{0.66667} 3.64 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \left( -\frac{1.920 - 1.433}{0.66667^2} 8.334 \cdot 10^{-4} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$w_M = \pm 0.00778 \left[ \frac{kg-su}{h} \right]$  bulunur. Bu deneydeki *MER* değeri göz önüne alınırsa;  $\%w_M = \% \pm 1.06439$  bulunmuş olur.

$w_{kv}$ : Kurutma verimi için sabit hata miktarını (belirsizliği) göstermek üzere;

$$Kurutma\ verimi = f(m_1, m_2, m_{su}) \quad (3.21)$$

şeklinde tanımlandığından;

$$w_{kv} = \pm \left[ \left( \frac{\partial kv}{\partial m_1} w_{m_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial kv}{\partial m_2} w_{m_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial kv}{\partial m_{su}} w_{m_{su}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

veya;

$$w_{kv} = \pm \left[ \left( \frac{1}{m_{su}} w_{m_1} \right)^2 + \left( -\frac{1}{m_{su}} w_{m_2} \right)^2 + \left( -\frac{m_1 - m_2}{m_{su}^2} w_{m_{su}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

olacaktır. Bu durumda; 1 numaralı deney için kurutma verimindeki belirsizlik aşağıdaki gibi bulunur.

$$w_{kv} = \pm \left[ \left( \frac{1}{0.720} 3.64 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \left( -\frac{1}{0.720} 3.64 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \left( -\frac{1.920 - 1.433}{0.720^2} 3.64 \cdot 10^{-3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$w_{kv} = \pm 0.00793$  bulunur. Bu deneydeki kurutma verimi değeri göz önüne alınırsa  $\%w_{kv} = \% \pm 1.17169$  bulunmuş olur.

**Çizelge 3.3.** SMER, MER ve kurutma verimi için hata analiz sonuçları

D deney no	$\pm w_s$ (SMER için)	$\% \pm w_s$ (SMER için)	$\pm w_M$ (MER için)	$\% \pm w_M$ (MER için)	$\pm w_{kv}$ (Kurutma verimi için)	$\% \pm w_{kv}$ (Kurutma verimi için)
1	0.00911	<b>1.07693</b>	0.00778	<b>1.06439</b>	0.00793	<b>1.17169</b>
2	0.00946	1.02598	0.00778	1.01121	0.00617	1.08190
3	0.00965	1.01169	0.00778	0.99656	0.00504	1.04483
4	0.00991	0.85836	0.00782	0.79698	0.00375	0.82665
5	0.00942	0.77279	0.00783	0.75439	0.00296	0.77098
6	0.00958	0.75544	0.00784	0.73580	0.00245	0.74437
7	0.00938	0.69896	0.00786	0.67933	0.00246	0.68869
8	0.00944	0.67607	0.00787	0.65555	0.00195	0.65743
9	0.00933	0.66178	0.00787	0.64165	0.00161	0.63918
10	0.00958	1.00041	0.00778	0.98476	0.00805	1.09994
11	0.00944	0.92155	0.00780	0.90548	0.00627	0.98376
12	0.00943	0.90650	0.00780	0.89028	0.00510	0.94377
13	0.00933	0.71758	0.00785	0.69862	0.00381	0.73235

**Çizelge 3.3.** *SMER*, *MER* ve kurutma verimi için hata analiz sonuçları (devam)

Deneý no	$\pm W_S$ ( <i>SMER</i> için)	% $\pm W_S$ ( <i>SMER</i> için)	$\pm W_M$ ( <i>MER</i> için)	% $\pm W_M$ ( <i>MER</i> için)	$\pm W_{kv}$ (Kurutma verimi için)	% $\pm W_{kv}$ (Kurutma verimi için)
14	0.00955	0.69176	0.00786	0.67092	0.00299	0.68943
15	0.00975	0.66884	0.00787	0.64621	0.00247	0.65602
16	0.00949	0.62356	0.00789	0.60149	0.00248	0.61196
17	0.00950	0.59389	0.00791	0.57100	0.00196	0.57323
18	0.00972	0.59141	0.00792	0.56692	0.00162	0.56431
19	0.00935	0.97112	0.00779	0.95681	0.00810	1.07435
20	0.00935	0.88460	0.00780	0.86891	0.00632	0.94988
21	0.00892	0.84115	0.00781	0.82660	0.00516	0.88393
22	0.00895	0.68011	0.00786	0.66274	0.00384	0.69816
23	0.00927	0.66139	0.00787	0.64165	0.00300	0.66107
24	0.00940	0.63412	0.00789	0.61290	0.00248	0.62322
25	0.00901	0.56032	0.00794	0.53998	0.00250	0.55165
26	0.00903	0.53897	0.00796	0.51805	0.00197	0.52042
27	0.00910	0.52635	0.00797	0.50462	0.00163	0.50161
28	0.00904	0.93515	0.00779	0.92123	0.00817	1.04343
29	0.00904	0.85075	0.00781	0.83568	0.00637	0.91998
30	0.00883	0.82343	0.00782	0.80905	0.00517	0.86748
31	0.00858	0.64489	0.00788	0.62909	0.00386	0.66626
32	0.00882	0.62189	0.00789	0.60413	0.00302	0.62464
33	0.00941	0.62798	0.00790	0.59563	0.00248	0.60616
34	0.00875	0.51997	0.00797	0.50061	0.00252	0.51314
35	0.00893	0.51153	0.00799	0.49066	0.00198	0.49317
36	0.00876	0.49862	0.00800	0.47873	0.00164	0.47559

### 3.4. Deneylerin Yapılmasında İzlenen Yol

Deneylerde ilk olarak kurutma işlemi yapılacak olan tekstil (havlu) hassas terazide tartılmıştır. Daha sonra bu tekstil, belirlenen nem oranına kadar kontrollü bir şekilde nemlendirilmiştir ve 60 dakikalık kurutma programında 40 dakika boyunca kurutulmuştur. 40 dakika sonra makineden alınan tekstilin kütlesi hassas terazi yardımıyla, bu 40 dakikalık kurutma süresi içerisinde makine tarafından sarf edilen toplam enerji ise enerji analizörü yardımıyla ölçülmüştür. Aynı zamanda; kurutma süresi boyunca 10 s aralıklarla, ısı pompalı çamaşır kurutucunun belirlenen yerlerine

tespit edilen termoelemanlar ile nem ve sıcaklıkölçerler yardımıyla ölçülen sıcaklık ve nem değerleri bilgisayara kaydedilmiştir.

Deneyle aynı şartlar altında yapabilmek için, her bir deneye başlamadan önce tamburun kapağında ve makinenin alt kısmında bulunan filtreler temizlenmiş ve su tankında biriken su tahliye edilmiştir. Ayrıca, yeni bir deneye başlanmadan önce makinenin belirli bir sıcaklığa kadar soğuması beklenmiş, sonra deneye başlanmıştır.

Deney sürelerinin ne kadar olacağını tespit edilebilmesi için yapılan çalışmada; kurutma işleminin ısınma, sabit kurutma ve düşük kurutma fazlarından oluştuğu hususu göz önüne alınmıştır. Bununla beraber, ısınma ve sabit kurutma fazlarındaki kurutma veriminin, birinci derecede kurutma havası özelliklerine bağlı olduğu belirlenmiş olup bu durum literatür ile de uyumludur. Bu çalışmadaki deneylerin amacının da bu doğrultuda yani kurutma havası özelliklerinin kurutma işlemi üzerindeki etkisinin belirlenmesi olması nedeniyle, çalışmada sadece ısınma ve sabit kurutma fazları ele alınmıştır. Bu iki fazın toplam süresinin tespiti için yapılan çalışmalar sonucunda, 60 dakikalık programın 40. dakikasında sabit kurutma fazının bittiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden bu çalışmadaki deneylerin tamamı için deney süresi 40 dakika olarak belirlenmiştir.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada; 4 farklı hava debisinde, 3 farklı kuru tekstil kütlesinde ve 3 farklı tekstil nemlendirme oranında toplam 36 adet deney yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde; kurutma havasının debisi, kuru tekstil kütlesi ve bu tekstilin nemlendirilme oranı gibi parametreleri değiştirerek bu parametrelerin; *SMER*, *MER* ve kurutma verimi gibi, kurutma sistemlerinde sıklıkla kullanılan verim tanımlamalarını nasıl etkilediği incelenmiştir. Deneylerde değiştirilen parametreler ve ölçülen büyüklükler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Çalışma kapsamında yapılan deneylere ilişkin karakteristik bilgiler

Deney no	Kuru tekstil kütlesi (g)	Tekstili nemlendirme oranı	Kurutma süresi (dak)	Kurutma havası debisi (l/s)	Ölçülen değerler
1	1200	% 60	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
2	1200	% 75	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
3	1200	% 90	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
4	2400	% 60	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
5	2400	% 75	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
6	2400	% 90	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
7	3600	% 60	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
8	3600	% 75	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
9	3600	% 90	40	40	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
10	1200	% 60	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
11	1200	% 75	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
12	1200	% 90	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
13	2400	% 60	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
14	2400	% 75	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
15	2400	% 90	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
16	3600	% 60	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
17	3600	% 75	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
18	3600	% 90	40	50	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
19	1200	% 60	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
20	1200	% 75	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
21	1200	% 90	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
22	2400	% 60	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
23	2400	% 75	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
24	2400	% 90	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
25	3600	% 60	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$

**Çizelge 4.1.** Çalışma kapsamında yapılan deneylere ilişkin karakteristik bilgiler (devam)

Deney no	Kuru tekstil kütlesi (g)	Tekstili nemlendirme oranı	Kurutma süresi (dak)	Kurutma havası debisi (l/s)	Ölçülen değerler
26	3600	%75	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
27	3600	%90	40	60	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
28	1200	%60	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
29	1200	%75	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
30	1200	%90	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
31	2400	%60	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
32	2400	%75	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
33	2400	%90	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
34	3600	%60	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
35	3600	%75	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$
36	3600	%90	40	65	$m, T, \varphi, \Delta t, E$

Yukarıdaki tabloda yer alan harfler aşağıda açıklanmıştır. Buna göre;  
 $m$ : Kuru ve nemlendirilmiş tekstil kütlesi değerleri,  
 $T$ : Isı pompası devresindeki boruların yüzey sıcaklığı değerleri ile kurutma havası çevrimindeki havanın sıcaklık değerleri,  
 $\varphi$ : Kurutma havası çevrimindeki havanın bağıl nem değerleri,  
 $\Delta t$ : Kurutma süresi,  
 $E$ : Deneylerin sonundaki toplam enerji tüketim değerleri anlamlarıdır.

Yukarıdaki 36 adet deney için hesaplamaların nasıl yapıldığı ise 1 numaralı deney esas alınarak aşağıda açıklanmıştır.

Buna göre, yapılan bu 1 numaralı deneyde pamuklu kumaştan üretilen 1200 g kuru havlu kütlesi, kütleli olarak %60 nemlendirilerek 1920 g ıslak halde 60 dak'lık kurutma programında 40 dak kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutma havasının debisi 40 l/s'dir. Deney sonunda havluların kütlesi ve sistemin toplam enerji tüketimi ölçülmüştür. Buna göre, hesaplamalarda aşağıdaki yol izlenmiştir.

Kurutma sonrası tekstilin kütlesi: 1433 [g]

Toplam enerji tüketimi: 575.944 [Wh]

$m_1$ : Tekstilin ilk durumdaki nemli kütlesini,

$m_2$ : Tekstilin kurutmadan sonraki kütlesini,

$m_{su}$ : Tekstilde ilk durumda bulunan su kütlesini temsil ettiğine göre;

$$SMER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Enerji sarfıyatı}} = \frac{m_1 - m_2}{W} = \frac{1.920 - 1.433}{0.575944} = 0.84557 \left[ \frac{kg - su}{kWh} \right]$$

$$MER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Kurutma süresi}} = \frac{m_1 - m_2}{\Delta t} = \frac{1.920 - 1.433}{0.6667} = 0.73046 \left[ \frac{kg - su}{h} \right]$$

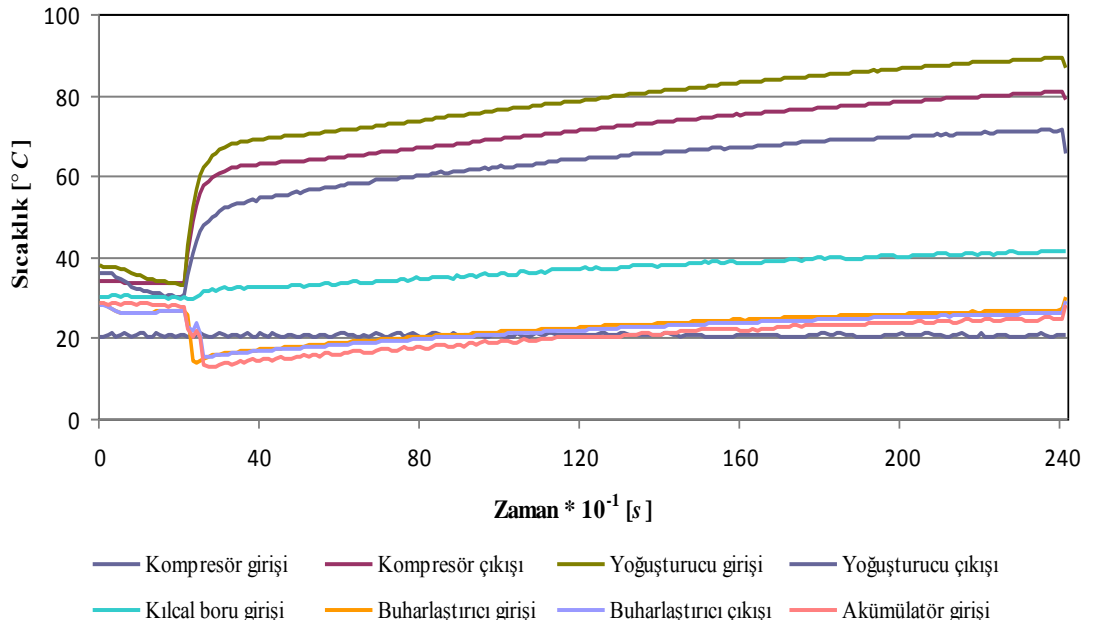
$$(\%) \text{Kurutma verimi} = \frac{m_1 - m_2}{m_{su}} 100 = \frac{1.920 - 1.433}{0.720} 100 = \%67.639$$

sonuçları bulunur.

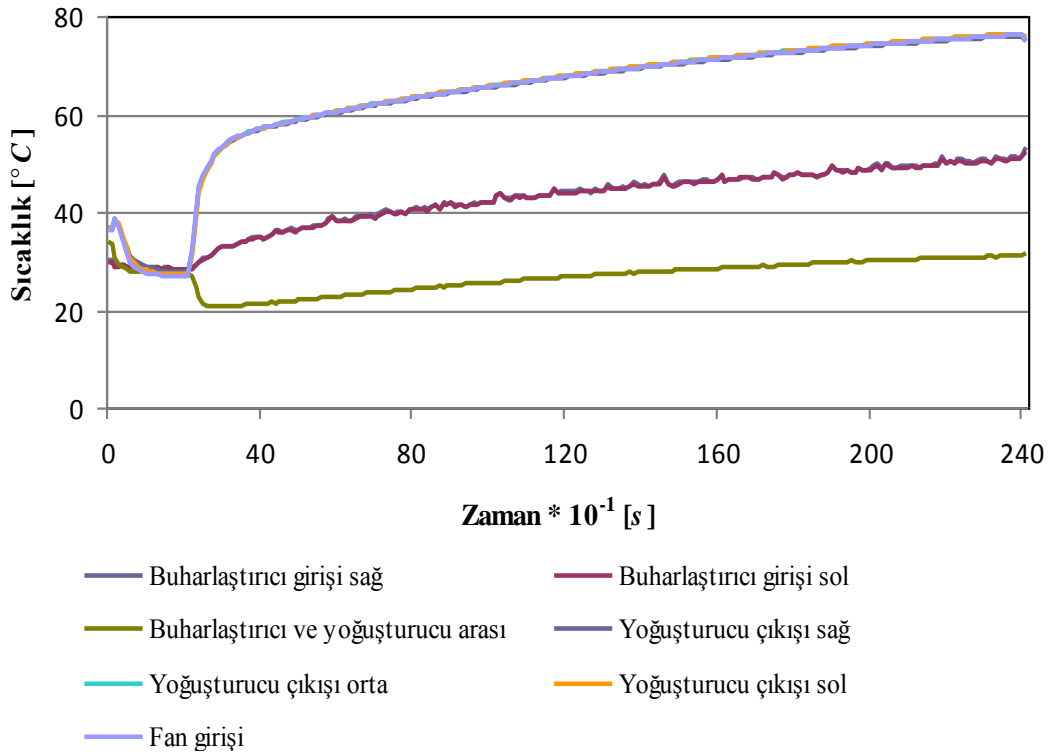
Buna göre; yukarıda 1 numaralı deney için verilen hesaplamalar, diğer tüm deneyler için de yapılmış ve elde edilen sonuçlardan hareketle çizilen grafikler bu bölümde gösterilmiştir.

#### 4.1. Soğutucu Akışkan ve Kurutma Havası Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi

Soğutucu akışkanın ve kurutma havasının termoelemanlar yardımıyla ölçülen sıcaklıklarının zamana bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Ayrıca; kurutma havasının, nemölçerler yardımıyla ölçülen bağıl nem değerlerinin zamana bağlı değişimleri de Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

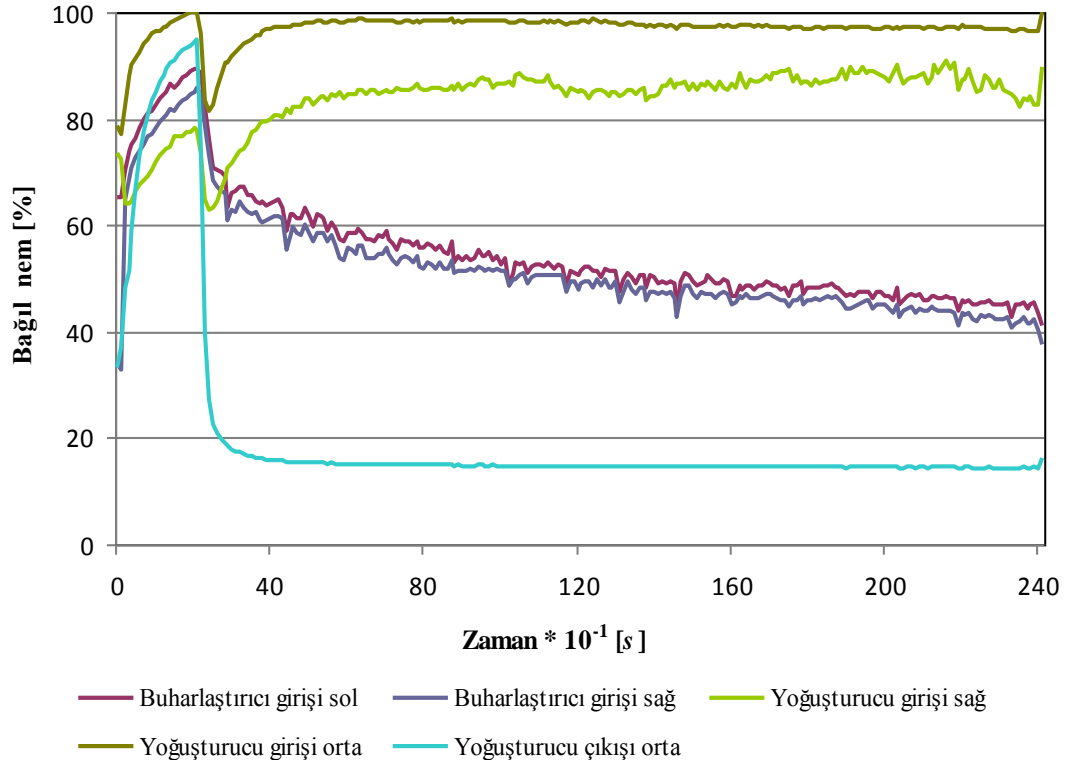


**Şekil 4.1.** Isı pompası devresindeki soğutkan sıcaklığının zamana bağlı değişimi



**Şekil 4.2.** Kurutma havasının sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi





Şekil 4.3. Kurutma havasının bağıl nem değerlerinin zamana bağlı değişimi

#### 4.2. Yapılan Deneylerin *SMER*, *MER* ve Kurutma Verimi Değerleri

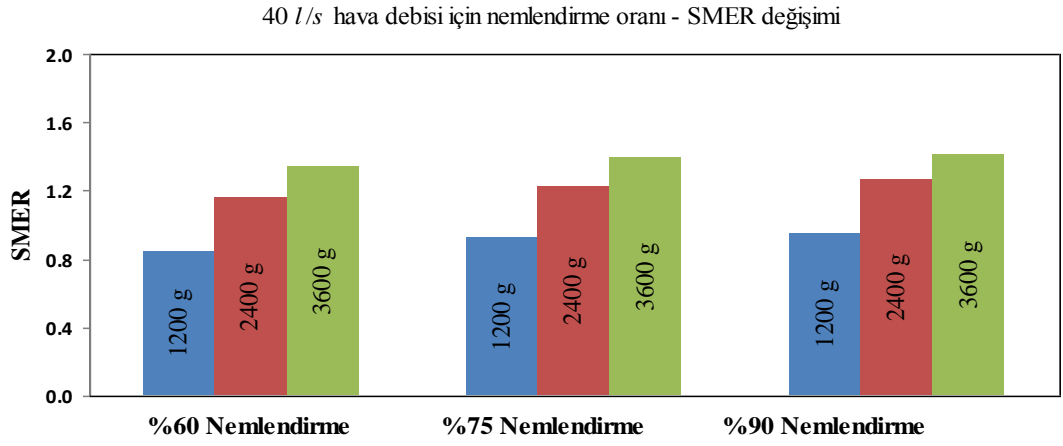
Yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda her bir deney için bulunan *SMER*, *MER* ve kurutma verimi değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Yapılan deneylerden elde edilen veriler ve hesaplanan parametreler

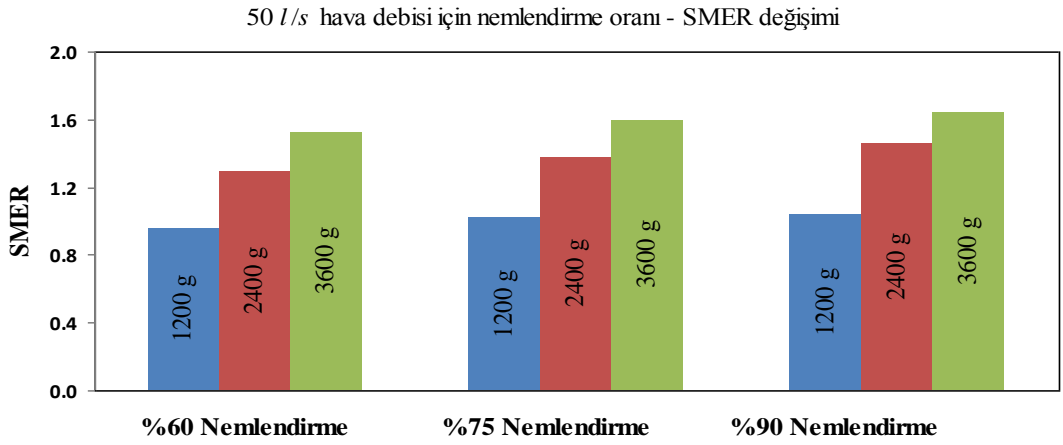
Deney no	Kurutma havası debisi (l/s)	Kuru tekstil kütlesi (g)	Kütlesel olarak nemlendirme oranı (%)	Nemli tekstil kütlesi (g)	Kurutma süresi (dak)	Kurutma sonrası tekstil kütlesi (g)	Toplam enerji sarfıyatı (Wh)	SMER (kg-su/kWh)	MER (kg-su/h)	Kurutma verimi (%)
1	40	1200	60	1920	40	1433	575.944	0.8456	0.7305	67.64
2	40	1200	75	2100	40	1587	556.311	0.9221	0.7695	57.00
3	40	1200	90	2280	40	1759	546.079	0.9541	0.7810	48.20
4	40	2400	60	3840	40	3186	539.501	1.1543	0.9810	45.42
5	40	2400	75	4200	40	3508	567.706	1.2189	1.0379	38.44
6	40	2400	90	4560	40	3850	559.896	1.2681	1.0649	32.87
7	40	3600	60	5760	40	4989	574.319	1.3425	1.1564	35.69
8	40	3600	75	6300	40	5500	572.854	1.3965	1.1999	29.63
9	40	3600	90	6840	40	6022	580.110	1.4101	1.2269	25.25
10	50	1200	60	1920	40	1393	550.037	0.9581	0.7905	73.19
11	50	1200	75	2100	40	1526	560.272	1.0245	0.8610	63.78
12	50	1200	90	2280	40	1696	561.486	1.0401	0.8760	54.07
13	50	2400	60	3840	40	3091	575.763	1.3009	1.1234	52.01
14	50	2400	75	4200	40	3419	565.699	1.3806	1.1714	43.39
15	50	2400	90	4560	40	3748	557.096	1.4576	1.2179	37.59
16	50	3600	60	5760	40	4885	574.859	1.5221	1.3124	40.51
17	50	3600	75	6300	40	5376	577.361	1.6004	1.3859	34.22
18	50	3600	90	6840	40	5909	566.188	1.6443	1.3964	28.73
19	60	1200	60	1920	40	1377	564.214	0.9624	0.8140	75.42
20	60	1200	75	2100	40	1501	566.537	1.0573	0.8980	66.55
21	60	1200	90	2280	40	1650	594.423	1.0599	0.9450	58.33
22	60	2400	60	3840	40	3049	601.338	1.3154	1.1864	54.93
23	60	2400	75	4200	40	3382	583.785	1.4012	1.2269	45.44
24	60	2400	90	4560	40	3702	578.713	1.4826	1.2869	39.72
25	60	3600	60	5760	40	4780	609.217	1.6086	1.4699	45.37
26	60	3600	75	6300	40	5276	611.176	1.6755	1.5359	37.93
27	60	3600	90	6840	40	5787	609.048	1.7289	1.5794	32.50
28	65	1200	60	1920	40	1356	583.549	0.9665	0.8460	78.33
29	65	1200	75	2100	40	1477	586.518	1.0622	0.9345	69.22
30	65	1200	90	2280	40	1636	600.802	1.0719	0.966	59.63
31	65	2400	60	3840	40	3005	627.856	1.3299	1.2524	57.99
32	65	2400	75	4200	40	3329	613.899	1.4188	1.3064	48.39
33	65	2400	90	4560	40	3676	579.720	1.4990	1.3259	40.93
34	65	3600	60	5760	40	4698	631.284	1.6823	1.5929	49.17
35	65	3600	75	6300	40	5215	621.314	1.7463	1.6274	40.19
36	65	3600	90	6840	40	5726	634.185	1.7566	1.6709	34.38

Çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen verilerden hareketle çeşitli tablolar ve grafikler oluşturulmuştur. Oluşturulan bu tablo ve grafiklerden

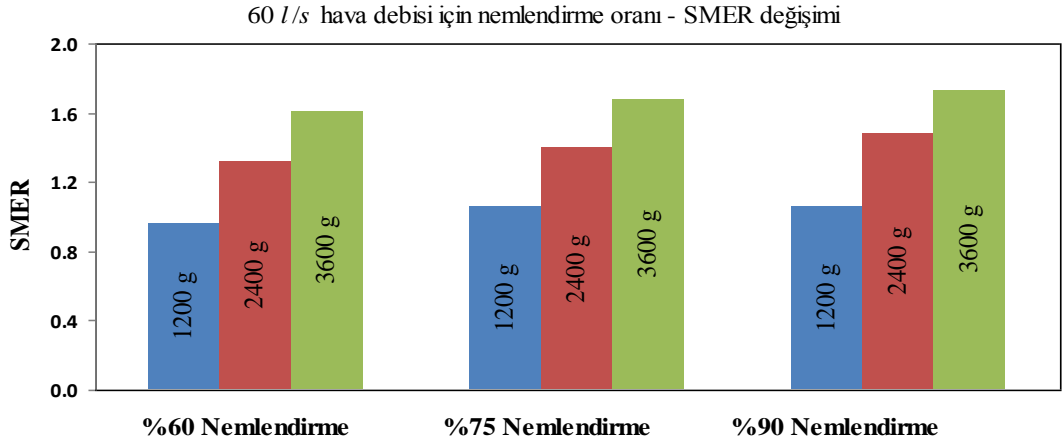
Şekil 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’de 4 farklı kurutma havası debisi için tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *SMER*’e olan etkisi görülmektedir.



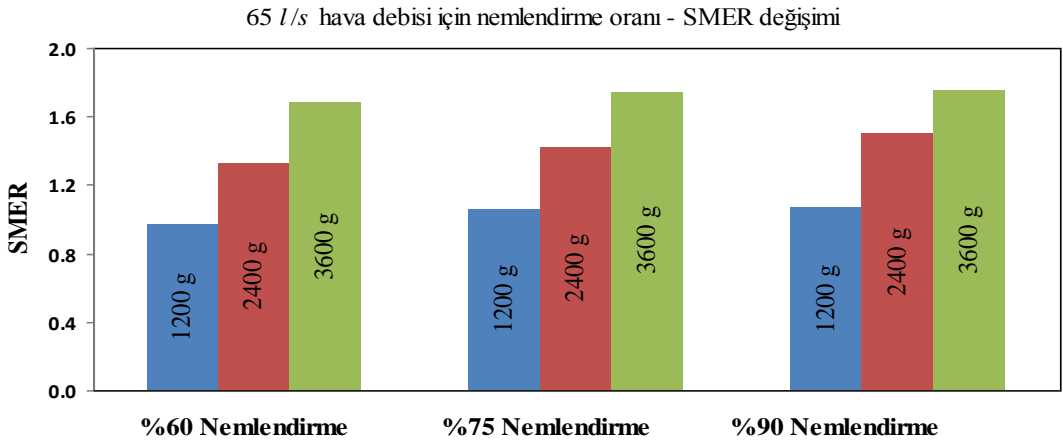
Şekil 4.4. 40 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *SMER*’e etkisi



Şekil 4.5. 50 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *SMER*’e etkisi

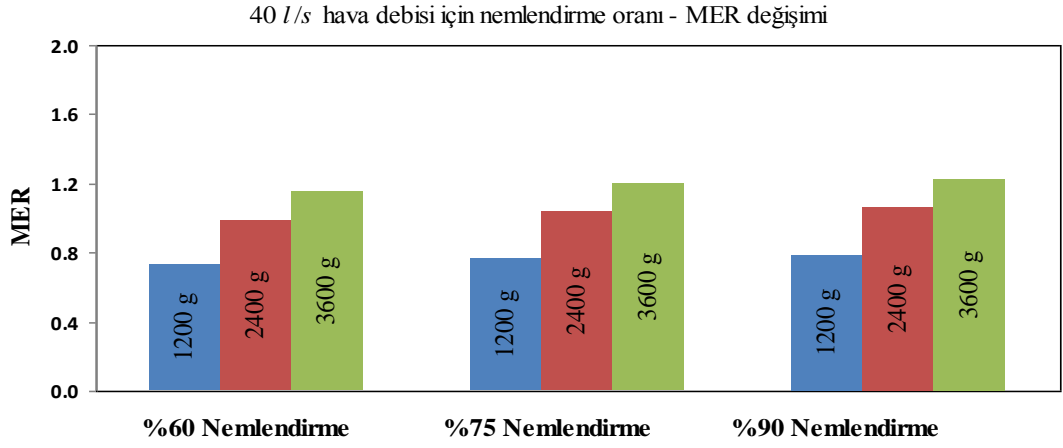


**Şekil 4.6.** 60 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *SMER*'e etkisi

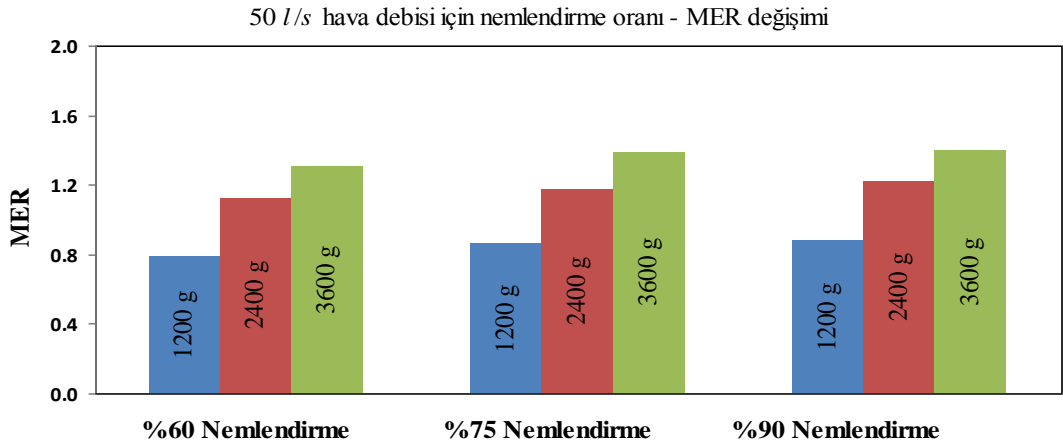


**Şekil 4.7.** 65 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *SMER*'e etkisi

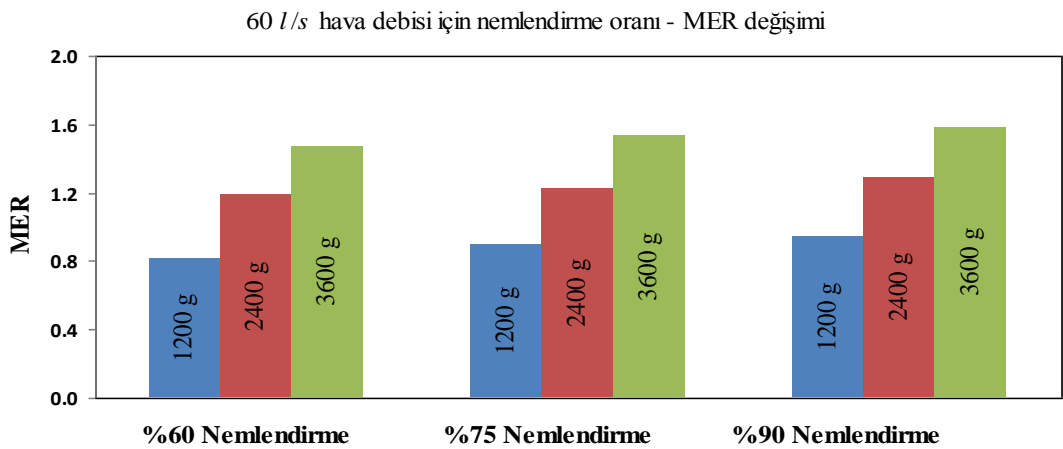
Aşağıda verilen Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11'de ise, yine 4 farklı kurutma havası debisi için tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *MER*'e olan etkisi görülmektedir.



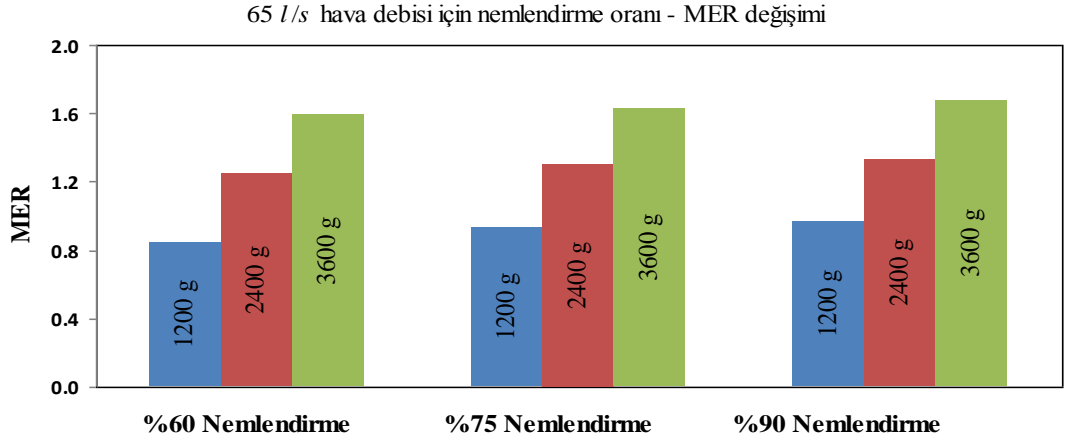
Şekil 4.8. 40 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *MER*'e etkisi



Şekil 4.9. 50 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *MER*'e etkisi

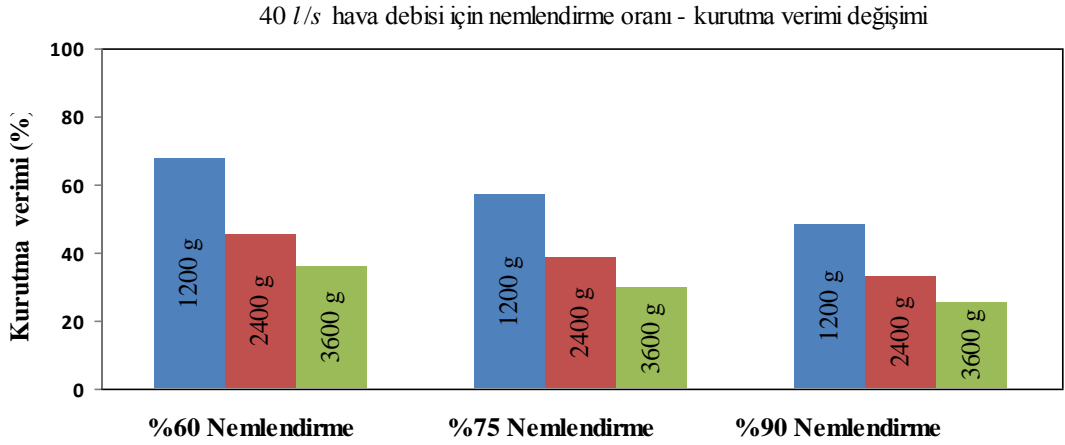


Şekil 4.10. 60 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *MER*'e etkisi

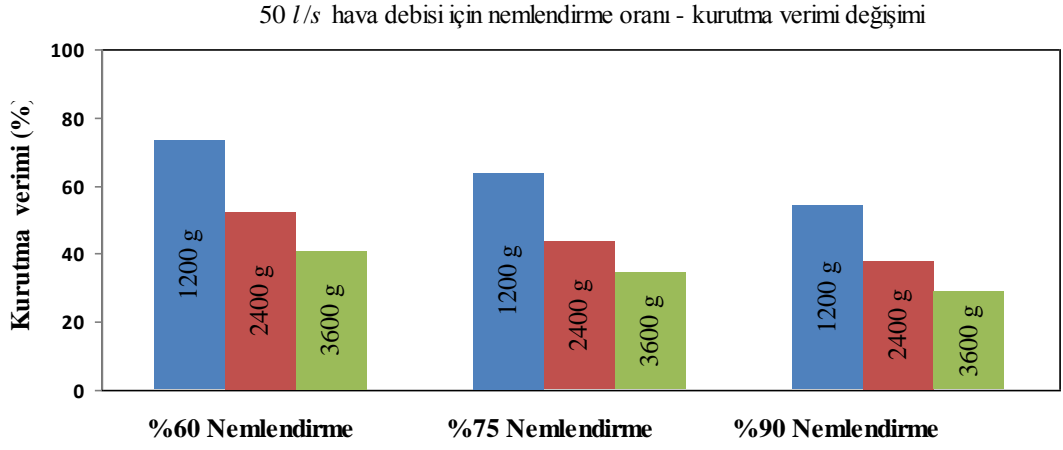


**Şekil 4.11.** 65 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin *MER*'e etkisi

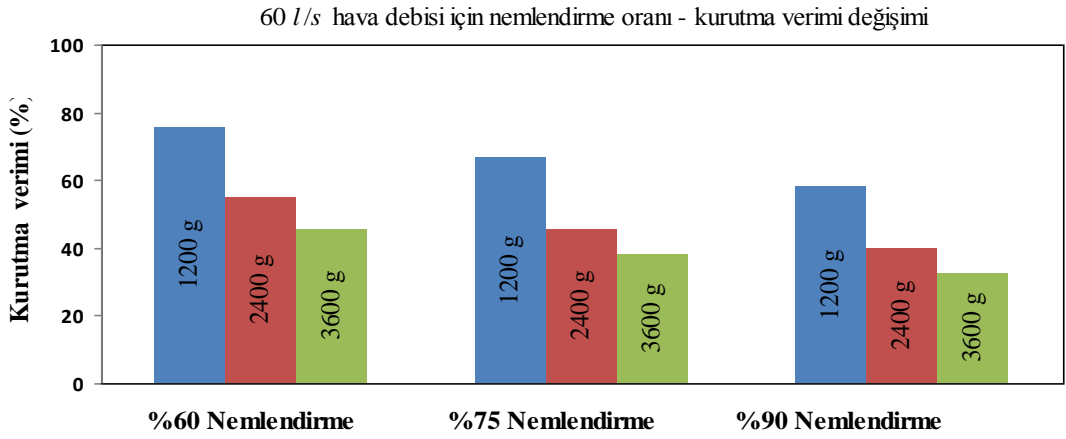
Aşağıda verilen Şekil 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15'de 4 farklı kurutma havası debisi için yine tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine olan etkisi görülmektedir.



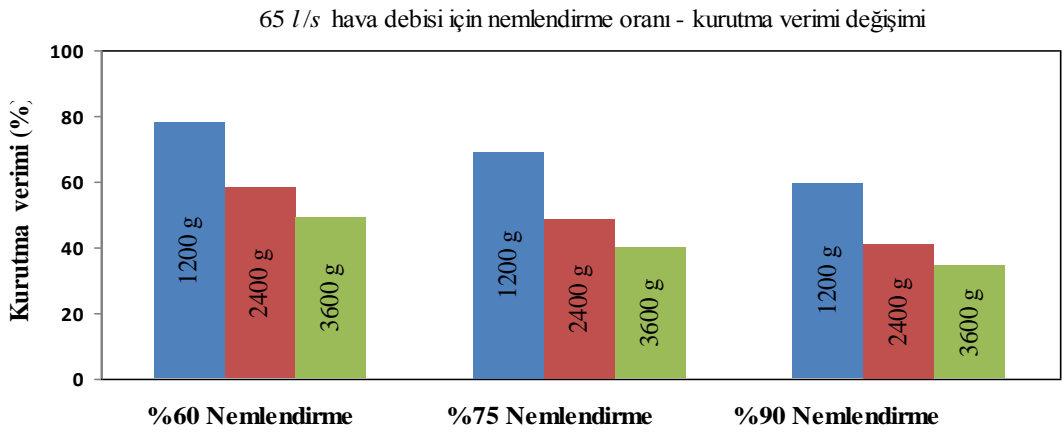
**Şekil 4.12.** 40 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine etkisi



Şekil 4.13. 50 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine etkisi

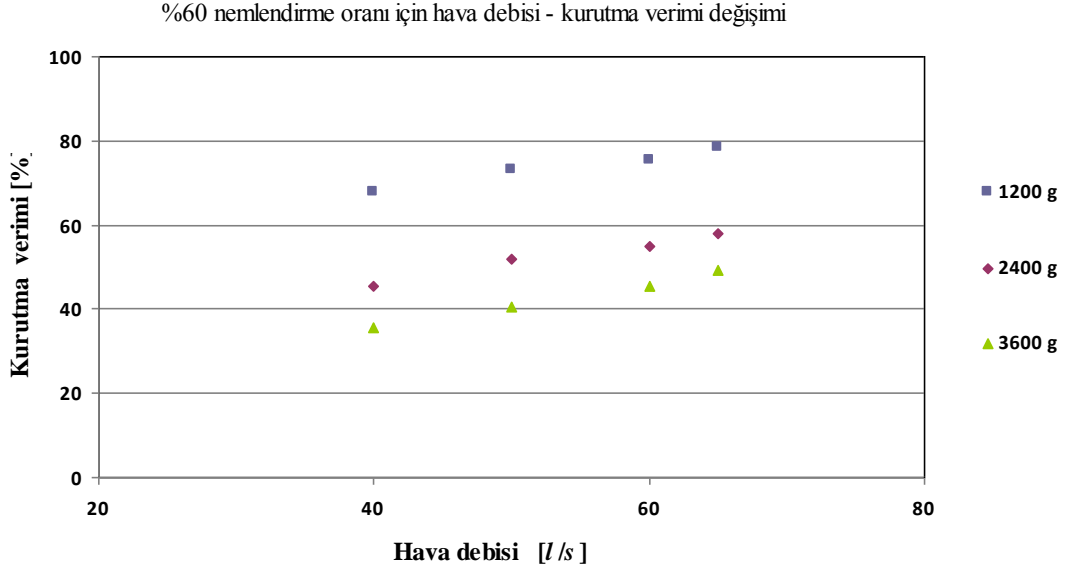


Şekil 4.14. 60 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine etkisi

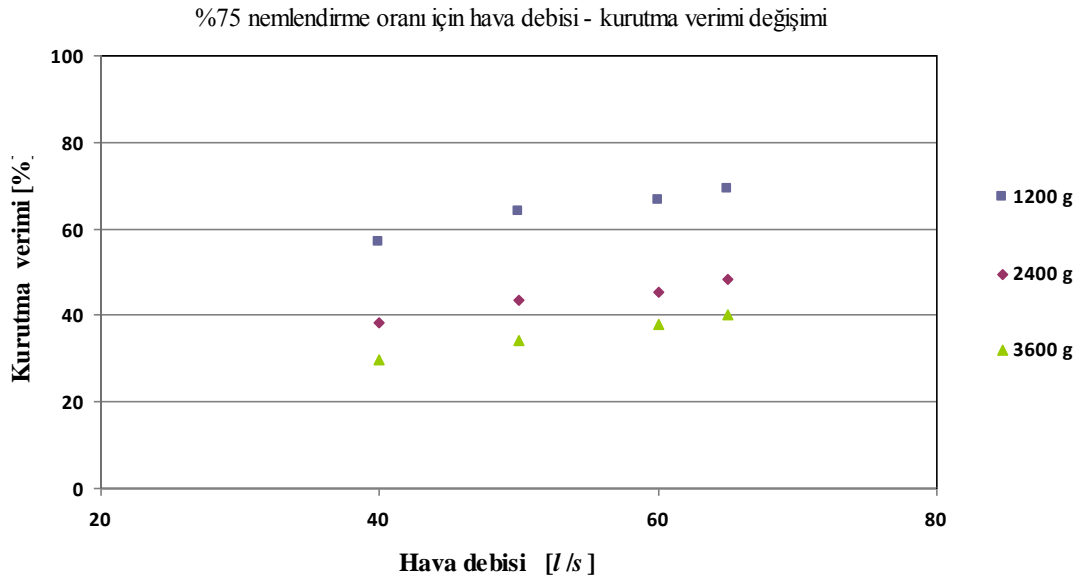


Şekil 4.15. 65 l/s kurutma havası debisinde, tekstil nemlendirme oranının ve kuru tekstil kütlesinin kurutma verimine etkisi

Aşağıda verilen Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18’de ise, 3 farklı nemlendirme oranı için kurutma havası debisinin kurutma verimine olan etkisi görülmektedir.

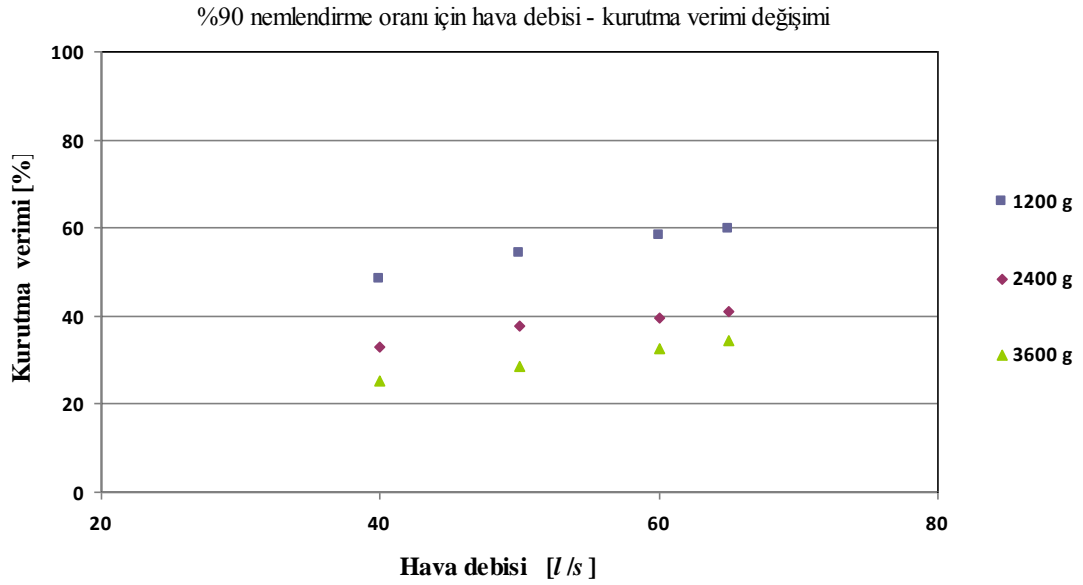


Şekil 4.16. %60 tekstil nemlendirme oranında, kurutma havası debisinin kurutma verimine olan etkisi



Şekil 4.17. %75 tekstil nemlendirme oranında, kurutma havası debisinin kurutma verimine olan etkisi





**Şekil 4.18.** %90 tekstil nemlendirme oranında, kurutma havası debisinin kurutma verimine olan etkisi

### 4.3. Korelasyon Oluşturma

Bu çalışmada; 1200, 2400 ve 3600 g kuru tekstil kütlelerinde, %60, %75 ve %90 nemlendirme oranlarında ve 40, 50, 60 ve 65 l/s kurutma havası debilerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara göre, kurutma veriminin bu parametrelere bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle kurutma verimi ile bu parametreler arasında bir korelasyon geliştirilmiştir. Korelasyon oluşturulurken, kaynaklarda [29] en küçük kareler yönteminin, çok değişkenli doğrusal eğri uydurmada kullanılmasına ilişkin verilen bilgilerden yararlanılarak (4.1) numaralı bağıntı geliştirilmiştir.

Bu bağıntıda;

$k_v$ : Kurutma verimini (%)

$M$ : Kuru tekstil kütlesini (g),

$NO$ : Nemlendirme oranını (%),

$Q$ : Kurutma havası debisini (l/s) göstermektedir.

$$\%k_v = 12138.975M^{-0.531}(NO)^{-0.794}Q^{0.487} \quad (4.1)$$



## 5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu deneysel çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen verilere göre oluşturulan tablolar ve grafikler Bölüm 3 ve Bölüm 4’de verilmiştir. Bu bölümlerde yer alan ilgili tablo ve grafikler incelendiğinde aşağıdaki çıkarsamalar yapılabilir.

- Zamana bağlı bir grafik olan Şekil 4.1 incelendiğinde; soğutucu akışkanın yoğuşturucu girişindeki sıcaklığının zamanla arttığı gözlemlenmektedir. Sistemden tahliye edilen su nedeniyle sistem açık bir sistem olup, bu nedenle de sürekli rejimde çalışılmamaktadır. Tekstil doğal olarak, sürekli nem ile beslenmediğinden giderek kurumakta ve kompresöre verilen enerjinin sürekliliği nedeniyle soğutucu akışkanın sıcaklığının zamanla artması beklenen bir durumdur.
- Yine zamana bağlı bir grafik olan Şekil 4.2 incelendiğinde; kurutma havasının yoğuşturucu çıkışındaki sıcaklığının zamanla arttığı gözlemlenmektedir. Yine; sürekli rejimde çalışılmadığından ve sistemin açık bir sistem olmasından dolayı, kompresöre verilen enerji nedeniyle soğutucu akışkanın sıcaklığının zamanla artması bu duruma yol açmaktadır.
- Zamana bağlı sonuncu grafik olan Şekil 4.3 incelendiğinde ise; kurutma havasının tambur çıkışındaki bağıl neminin zamanla azaldığı ve bunun da kurutma işleminin amacına uygun olduğu gözlemlenmektedir.
- Şekil 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 incelendiğinde; 4 farklı kurutma havası debisi ve 3 farklı kuru tekstil kütlesi için de tekstil nemlendirme oranı arttıkça özgül nem alma hızının (*SMER*) arttığı gözlemlenmiştir.
- Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11 incelendiğinde; 4 farklı kurutma havası debisi ve 3 farklı kuru tekstil kütlesi için de tekstil nemlendirme oranı arttıkça nem alma hızının (*MER*) arttığı gözlemlenmiştir.
- Şekil 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15 incelendiğinde; 4 farklı kurutma havası debisi ve 3 farklı kuru tekstil kütlesi için de tekstil nemlendirme oranı arttıkça kurutma veriminin azaldığı gözlemlenmiştir.

- Yine, Şekil 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 incelendiğinde; 4 farklı kurutma havası debisi ve 3 farklı tekstil nemlendirme oranı için de kuru tekstil kütlesi arttıkça özgül nem alma hızının (*SMER*) arttığı gözlemlenmiştir.
- Yine, Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11 incelendiğinde; 4 farklı kurutma havası debisi ve 3 farklı tekstil nemlendirme oranı için de kuru tekstil kütlesi arttıkça nem alma hızının (*MER*) arttığı gözlemlenmiştir.
- Yine, Şekil 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15 incelendiğinde; 4 farklı kurutma havası debisi ve 3 farklı tekstil nemlendirme oranı için de kuru tekstil kütlesi arttıkça kurutma veriminin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Şekil 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 incelendiğinde; 3 farklı kuru tekstil kütlesi ve 3 farklı tekstil nemlendirme oranı için de kurutma havası debisi arttıkça özgül nem alma hızının (*SMER*) arttığı gözlemlenmiştir.
- Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11 incelendiğinde; 3 farklı kuru tekstil kütlesi ve 3 farklı tekstil nemlendirme oranı için de kurutma havası debisi arttıkça nem alma hızının (*MER*) arttığı gözlemlenmiştir.
- Şekil 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18 incelendiğinde; 3 farklı kuru tekstil kütlesi ve 3 farklı tekstil nemlendirme oranı için de kurutma havası debisi arttıkça kurutma veriminin arttığı gözlemlenmiştir.

Görüldüğü gibi tekstil nemlendirme oranı ve kuru tekstil kütlesi arttıkça kurutma verimi düşmektedir. Buna karşılık kurutma havası debisi arttıkça kurutma veriminin arttığı görülmektedir.

Son olarak belirsizlik analizi sonucu elde edilen Çizelge 3.2 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

- *SMER* belirsizlik analizi sonuçlarının yer aldığı Çizelge 3.2 incelendiğinde; en büyük belirsizlik miktarının  $\% \pm 1.07693$  olduğu görülmektedir. Bu değer ise, ölçme tekniğinde kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.
- *MER* için Çizelge 3.2 incelendiğinde; en büyük belirsizlik miktarının  $\% \pm 1.06439$  olduğu görülmektedir. Bu değer ise, deneysel çalışmalarda yine kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.

- Kurutma verimi için yine Çizelge 3.2 incelendiğinde; en büyük belirsizlik miktarının  $\% \pm 1.17169$  olduğu görülmektedir. Bu değer ise, yine ölçme tekniğinde kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.

Sonuç olarak; ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde daha verimli bir kurutma sağlamak için kurutma havası debisini artırmaya yönelik çalışmaların yapılması gerektiği açıktır. Bu durumun, az da olsa enerji sarfiyatını artırdığı gözden uzak tutulmamalıdır.

Çizelge 4.2 incelendiğinde; kurutma havası debisini artırmak için fanın beslediği elektrik geriliminin frekansının artırılması nedeniyle sistemin toplam enerji sarfiyatının arttığı görülmektedir. Çizelge 4.2'deki verilerden yararlanarak yapılan hesaplamalar sonucunda; aynı kuru tekstil kütlesinde ve aynı nemlendirme oranında, kurutma havası debisini  $60 \text{ l/s}$ 'den  $65 \text{ l/s}$ 'ye çıkarılması durumunda; kurutma veriminde  $\%2.23$  ile  $\%8.38$  arasında bir artış temin edilirken sistemin enerji sarfiyatının  $\%0.17$  ile  $\%5.16$  oranında arttığı görülmüştür. Bu durum, kurutma havası debisinin artırılmasının net bir kazanç sağladığını göstermektedir.

Son olarak Şekil 4.19 incelendiğinde; kurutma verimi için oluşturulan korelasyondan elde edilen değerlerle gerçek değerlerin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Coşkun, S., Basit Nem Alıcı Isı Pompalı Sürekli Kurutma Sisteminin Simülasyonu, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 4, Sayı 2, s. 79-96, 2002.
- [2] Akgün, A., Küçüka, S., Isı Pompalı Kurutucuların Enerji Etkin Tasarımı Modelleme Çalışması, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 13-16 Nisan 2011.
- [3] Ceylan, İ., Aktaş, M., Isı Pompası Destekli Bir Kurutucuda Fındık Kurutulması, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt: 23, No: 1, s. 215-222, 2008.
- [4] Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., Isı Pompalı Bir Kurutucuda Kerestelerin Kurutma Süresinin Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt: 22, No: 4, s. 847-854, 2007.
- [5] Yılmaz, S., Yavuz, C., Isı Pompası Destekli Kurutma Fırınlarında Kurutma Parametrelerinin Kontrolü İçin Alternatif Bir Yöntem, Teknoloji Dergisi, Cilt: 9, Sayı: 4, s. 237-244, 2006.
- [6] Brunzell, L., Energy Efficient Textile Drying, M.S. Thesis, Karlstad University, 2006.
- [7] Palandre, L., Cladic, D., Comparison of Heat Pump Dryer and Mechanical Steam Compression Dryer, International Congress of Refrigeration, Washington DC, 2003.
- [8] Nipkow, J., Bush, E., Promotion of Energy-Efficient Heat Pump Dryers, Swiss Agency for Efficient Energy Use (S.A.F.E.), Topten International Group.

- [9] Bansal, P. K., Braun, J. E., Groll, E. A., Improving the Energy Efficiency of Conventional Tumbler Clothes Drying Systems, *International Journal of Energy Research*, 25(9):1315, 2001.
- [10] Ameen, A., Bari, S., Investigation into the Effectiveness of Heat Pump Assisted Clothes Dryer for Humid Tropics, *Journal of Energy Conversion and Management*, 45(2004), p. 1397-1405, 2003.
- [11] Kartal, T., Çamaşır Kurutma Makinesi Enerji Tüketim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2008.
- [12] Kayabaşı, M., Çamaşır Kurutma Makinesi Kondenser Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2009.
- [13] Ganjehsarabi, H., Isı Pompalı Çamaşır Kurutucunun Tasarımının Geliştirilmesi ve Termodinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2009.
- [14] Demirbaş, P., Isı Pompası Destekli Çamaşır Kurutucusu Tasarımı ve Deneysel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale, 2011.
- [15] Sönmez, H., Tekstil Ürünlerinde Zorlanmış Kütle Geçişine Etki Eden Parametrelerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2010.
- [16] Cochran, P. M., A Feasibility Study of Incorporating Surface Tension Elements to Improve the Efficiency of Residential Clothes Dryers, M.S. Thesis, Kansas State University, 2007.

- [17] Braun, J. E., Bansal, P. K., Groll, E. A., Energy Efficiency Analysis of Air Cycle Heat Pump Dryer, *International Journal of Refrigeration*, 25(7), p. 954-965, 2002.
- [18] Goldberg, M., Truman, J., Kniffin, A., Heat Pump Clothes Dryer, Patent Application Publication, 2006.
- [19] Başaran, B., Bitlisli, B. O., Sarı, Ö., Özbalta, N., Güngör, A., Deri Kurutulmasında Yeni Teknolojiler: Isı Pompalı Kurutucular, I. Ulusal Deri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ege Üniversitesi, İzmir, s. 634-647, 2004.
- [20] Mirza, M., Isı Pompalı Kurutucunun Isıl Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2006.
- [21] Erbil, T., Güneş Enerjisi Destekli Toprak Kaynaklı Hibrit Isı Pompası Tesisinin Enerji ve Ekserji Analizinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2002.
- [22] Özbalta, N., Güngör, A., Kurutma Sistemlerinde Isı Pompası Kullanım Potansiyeli, III. GAP Mühendislik Kongresi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, s. 107-114, 2000.
- [23] Çengel, Y. A., Boles, M. A., Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla, İzmir Güven Kitabevi, Beşinci Baskı, Çeviren: Ali Pınarbaşı, İzmir, s. 608-614, 2008.
- [24] Oktay, Z., Testing of a Heat Pump Assisted Mechanical Opener Dryer, *Applied Thermal Engineering*, 23(2003), p. 153-162, 2003.
- [25] Fan Kanunları, İMCO Havalandırma Sistemleri Bilgi Merkezi, <http://www.imco.com.tr/bilgimerkezi.html> (Erişim tarihi: 12.08.2012)



- [26] Genceli, O. F., Ölçme Tekniği (Boyut, Basınç, Akış ve Sıcaklık Ölçmeleri), Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [27] Bilen, K., Ölçme Teknikleri Ders Notları (*Yayımlanmamış*), Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2012.
- [28] Akpınar, E. K., Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneyleindeki Hata Analizi, Mühendis ve Makina Dergisi, Cilt: 46, Sayı: 540, s. 41-48, Ocak 2005.
- [29] Uzun, İ., Nümerik Analiz Mühendislikte Nümerik Çözüm Yöntemleri, Beta Yayınevi, 4. Baskı, İstanbul, 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

Muammer DURMUŞ, 1979 yılında Afyonkarahisar/Bolvadin’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Balıkesir’de tamamladı. Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi’nden 2005 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2009 yılında Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2008 yılından beri Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumunun (MKEK) Kırıkkale’deki Silah Fabrikasında Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmaktadır. Muammer DURMUŞ, evli ve bir çocuk babasıdır.