

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI POMPALI ÇAMAŞIR KURUTMA MAKİNELERİNDE
ENERJİ TÜKETİMİNİN AZALTILMASI

Emre GEZE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Özden AĞRA

Haziran, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI POMPALI ÇAMAŞIR KURUTMA MAKİNELERİNDE
ENERJİ TÜKETİMİNİN AZALTILMASI

Emre GEZE tarafından hazırlanan tez çalışması 19.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Özden AĞRA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alihsan KOCA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Özden AĞRA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makinelerinde Enerji Tüketiminin Azaltılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Emre GEZE

İmza



Bu çalışma Arçelik A.Ş. tarafından desteklenmiştir.



Aileme
ve
arkadařlarırma

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemedi bana katkıda bulunan, önerileri ve yapıcı eleştirileri ile çalışmalarımı destekleyen ve yol gösteren danışman hocam Sn. Prof. Dr. Özden AĞRA'ya en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam için tüm imkân ve olanaklarını sunarak bana destek olan Arçelik A.Ş. Çamaşır Kurutma Makinesi İşletmesi'ne de teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışma hayatım ve tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleri ile çalışmaların her aşamasında desteğini sunan, değerli fikir ve görüşleri ile bu tez çalışmasına büyük katkıda bulunan, çalışmalar süresince gösterdiği ilgi ve içten yaklaşımlarından ötürü Sn. Fatih ÖZDEMİR'e çok teşekkür ederim. Tez çalışmalarım kapsamında bilgi ve tecrübelerini benle paylaşarak bana yardım eden Sn. Mak. Yük. Müh. Birsal İNAN ve Sn. Mak. Yük. Müh. Mehmet İNAN'a, Sn. Mak. Yük. Müh. Onur ERCAN'a, Sn. Erman Göksan'a Sn. Şafak ÜRKMEZ'e ve deneysel çalışmalar sırasında deney düzeneklerinin kurulması, devreye alınması, bu süre zarfında çıkan teknik problemlerin çözümü gibi konularda yardımlarını ve tecrübelerini esirgemedi katkıda bulunan başta Sn. Bülent BULUT'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde bana maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan, içine girdiğim her zorluğun altından kalkmamda bana güç veren aileme de en derin duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Emre GEZE

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	v
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	17
1.1 Tezin Amacı	19
1.2 Literatür Araştırması	21
1.3 Hipotez	33
2 ISI POMPALI ÇAMAŞIR KURUTMA MAKİNELERİ	35
2.1 Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makineleri Kullanım Verileri	35
2.2 Çamaşır Kurutma Makineleri Enerji Standardı	36
2.3 Çamaşır Kurutma Makinesi Nem Alma Adımları	39
2.4 Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makineleri	41
3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TEORİK ANALİZ	45
3.1 Deney Düzenekinin Tanıtılması	46
3.2 Belirsizlik Analizi	55
3.3 Deneylerin Yapılışı	57
3.4 Deney Tasarımının Oluşturulması	58
3.5 Deney Sonuçları	60
4 SONUÇ VE ÖNERİLER	86
KAYNAKÇA	88
A BELİRSİZLİK DEĞERLERİ	90
B ISILÇİFT KALİBRASYON SERTİFİKASI	91
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	92

SİMGE LİSTESİ

P_l	Açık Mod Güç Tüketimi (W)
E_t	Ağırlıklı Enerji Tüketimi (kWh)
T_t	Ağırlıklı Kurutma Süresi (dk)
ϕ	Bağıl Nem (%)
P	Basınç (Pa)
h_1	Buharlaştırıcı Çıkış Entalpisi (kJ/kg)
$\dot{m}_{a2}$	Buharlaştırıcı Çıkış Hava Debisi (kg/s)
$T_{a,2}$	Buharlaştırıcı Çıkış Hava Sıcaklığı (K)
w_2	Buharlaştırıcı Çıkış Özgül Nemi (kg su buharı/ kg kuru hava)
$\rho_{dönüş}$	Buharlaştırıcı Çıkış Soğutucu Akışkan Yoğunluğu (kg/m ³)
h_4	Buharlaştırıcı Giriş Entalpisi (kJ/kg)
$T_{a,1}$	Buharlaştırıcı Giriş Hava Sıcaklığı (K)
w_1	Buharlaştırıcı Giriş Özgül Nemi (kg su buharı/ kg kuru hava)
$\dot{m}_{a1}$	Buharlaştırıcı Hava Giriş Debisi (kg/s)
T_S	Çamaşır Yüzey Sıcaklığı (K)
$\dot{m}_a$	Çevrim Hava Debisi (kg/s)
E	Enerji
h	Entalpi (kJ/kg)
T_A	Hava Sıcaklığı (K)
P_o	Kapalı Mod Güç Tüketimi (W)
η_{vol}	Kompresör Hacimsel Verimi (%)
L	Litre
m	Metre
$\dot{m}_{su}$	Nem Alma Hızı (kg/s)
ω	Özgül Nem (kg su buharı/ kg kuru hava)
K	Sıcaklık (kelvin)
$\dot{m}_{ref}$	Soğutucu Akışkan Debisi (kg/s)
T	Süre (dk)
E_{dry}	Tam Yük Enerji Tüketimi (kWh)
T_{dry}	Tam Yük Kurutma Süresi (dk)
w_p	Toplam Hata Oranı

$E_{dry1/2}$	Yarım Yük Enerji Tüketimi (kWh)
$T_{dry1/2}$	Yarım Yük Kurutma Süresi (dk)
AE_c	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)
W	Watt



KISALTMA LİSTESİ

ANN	Yapay Sinir Ağı
ARGE	Araştırma ve Geliştirme
COP	Performans Katsayısı
DOE	Deney Tasarımı
EEI	Enerji Verimliliği Endeksi
FVM	Sonlu Hacim Yöntemi
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
MER	Nem Alma Oranı
PID	Oransal İntegral Türev
RH	Bağıl Nem
SMER	Spesifik Nem Alma Oranı
KD	Kompresör Devri
K	Kapasite
FH	Fan Hızı
KD	Kompresör Devri
VTs	Veri Toplama Sistemi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Çamaşır kurutma makinası tipleri (a)Bacalı (b)Yoğuşturuculu. (c)Isı pompalı	17
Şekil 1.2	Isı pompalı çamaşır kurutma makinesi şematik görseli	19
Şekil 1.3	Mevcut ve yeni enerji regülasyonu sınıflandırması	21
Şekil 1.4	Çamaşır kurutma makinesi ile birlikte deney düzeneği	22
Şekil 1.5	(a)Kurutma işleminde SMER değişimi. (b)Isı eşanjörlerinin alan oranının SMER ve kurutma süresine etkisi	23
Şekil 1.6	(a)Hava debisinin SMER ve kurutma süresine etkisi (b)Soğutucu şarjının SMER ve kurutma süresi üzerindeki etkisi.....	25
Şekil 1.7	Döner tamburdaki karmaşık hareketler	26
Şekil 1.8	Deney düzeneğinin şeması	26
Şekil 1.9	Deney düzeneği şematik görseli.....	29
Şekil 1.10	Fan hızının farklı kapasitelerde enerji tüketimine etkisi	33
Şekil 2.1	Batı Avrupa pazarı kapasiteye göre ısı pompalı çamaşır kurutma makinası için 2017-2021 yıllarına ait satış oranları.....	35
Şekil 2.2	Batı Avrupa pazarı enerji sınıfına göre ısı pompalı çamaşır kurutma makinası için 2017-2021 yıllarına ait satış oranları.....	36
Şekil 2.3	Ev tipi çamaşır kurutma makinesi enerji etiketlemesi.....	38
Şekil 2.4	Çamaşır kurutma makinesi nem alma adımları	39
Şekil 2.5	Isı pompası çalışma prensibinin P-h grafiği üzerinden gösterimi.	41
Şekil 2.6	Isı değiştirici	43
Şekil 2.7	Rotary kompresör	43
Şekil 2.8	Kısılma vanası(kapileri)	44
Şekil 3.1	Deney düzeneği şeması	45
Şekil 3.2	Isı pompası çevrim elemanları.	46
Şekil 3.3	Değişken devirli rotary(dönel) kompresör	47
Şekil 3.4	Isı değiştiriciler.....	47
Şekil 3.5	Hava çevrimi	48
Şekil 3.6	Hav filtresi ve tambur.....	49
Şekil 3.7	Proses fanı	49
Şekil 3.8	Tahrik motoru.....	50
Şekil 3.9	Eşanjörlerdeki ısıl çift konumları	51
Şekil 3.10	Hava tarafı ısıl çift konumları	52
Şekil 3.11	Veri toplama sistemi.....	53

Şekil 3.12 Nem sensörü	53
Şekil 3.13 Nem ve basınç sensörleri konumları	54
Şekil 3.14 Dijital hassas terazi.....	55
Şekil 3.15 Minitab programında deney tasarımının oluşturulması.....	59
Şekil 3.16 Değişken sayısına göre yapılması gereken deney sayısı	59
Şekil 3.17 Kilogram başına enerji tüketimine etki eden parametreler	61
Şekil 3.18 Kilogram başına kurutma süresine etki eden parametreler	62
Şekil 3.19 Kompresör devri, fan hızı ve kapasitenin birim enerji tüketimine etkileri	63
Şekil 3.20 Kompresör devri, fan hızı ve kapasiten kilogram başına kurutma süresine etkileri	64
Şekil 3.21 Fan hızlarının farklı çamaşır kapasitelerinde enerji tüketimine etkisi .	65
Şekil 3.22 4kg çamaşır kapasitesindeki en düşük enerji tüketim parametreleri	65
Şekil 3.23 6kg çamaşır kapasitesindeki en düşük enerji tüketim parametreleri	66
Şekil 3.24 8kg çamaşır kapasitesindeki en düşük enerji tüketim parametreleri	66
Şekil 3.25 MER değerinin farklı kapasitelerdeki dağılımı ve ortalaması.....	68
Şekil 3.26 SMER için DOE istatistiksel çözümü	68
Şekil 3.27 MER için DOE istatistiksel çözümü	69
Şekil 3.28 MER değerinin farklı kompresör rpm'lerindeki dağılımı ve ortalaması	70
Şekil 3.29 MER değerinin farklı fan hızlarındaki dağılımı ve ortalaması.....	71
Şekil 3.30 SMER değerinin farklı kapasitelerdeki dağılımı ve ortalaması	72
Şekil 3.31 SMER değerinin farklı kompresör rpm'lerindeki dağılımı ve ortalaması	73
Şekil 3.32 SMER değerinin farklı fan hızlarındaki dağılımı ve ortalaması	74
Şekil 3.33 SMER değeri için çoklu değişken grafiği	74
Şekil 3.34 MER değeri için çoklu değişken grafiği.....	75
Şekil 3.35 Proses havası sıcaklık-nem ve çamaşır nem grafiği, (a)4 kg,(b)6kg,(c)8kg	76
Şekil 3.36 4 kg zamana bağlı yoğuşan su miktarı ve denklemi.....	78
Şekil 3.37 4-6-8 kg'da yoğuşma hızı grafiği	79
Şekil 3.38 Soğutucu akışkan(R290) lnP-h diyagramı	80
Şekil 3.39 Psikometrik diyagram.....	80
Şekil 3.40 EES programı denklem çözüm akışı	82
Şekil 3.41 Deneysel ve teorik hesaplanan yoğuşma hızlarının karşılaştırılması ...	85

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Kurutma makineleri enerji sınıfları ve tüketim değerleri	20
Tablo 2.1 Kurutucu enerji verim sınıfları	36
Tablo 3.1 Isı pompası ısıtıcı çiftler	50
Tablo 3.2 Hava çevrimi ısıtıcı çiftler	51
Tablo 3.3 Bağıl nem sensör konumları	54
Tablo 3.4 Ölçüm cihazları hata oranları(belirsizlikleri).....	56
Tablo 3.5 Test koşulları.....	58
Tablo 3.6 Deney Matrisi	60
Tablo 3.7 Deney Parametreleri	61
Tablo 3.8 Parametreler ve yanıt seviyeleri.....	67
Tablo 3.9 Deneysel ve teorik nem alma hızları.....	84

Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makinelerinde Enerji Tüketiminin Azaltılması

Emre GEZE

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Özden AĞRA

Son yıllarda artan şehir nüfusu, yaşam alanlarının daralması, insanların kıyafetlerini yıkayıp kurutmaya ayırdıkları sürenin kısa olmaması ve pandemi sonrası artan hijyen hassasiyeti ile son zamanlarda kurutma makinesi kullanımında artış görülmektedir. Çamaşır kurutma makineleri ısı pompalı, hava yoğuşturmalı ve bacalı olmak üzere üç farklı modele ayrılmaktadır. Bunlardan enerji bakımından en verimli olanı ise ısı pompası sistemine sahip olan modellerdir. Isı pompalı kurutucular, bacalıya göre ~3 kat, hava yoğuşturmalılara göre de ~2,5 kat daha verimlidir. Pazar verileri incelendiğinde ısı pompalı çamaşır kurutabilen kurutma makinelerine talebin arttığı görülmektedir. Isı pompalı çamaşır kurutma makineleri diğer tipteki çamaşır kurutuculara göre en düşük enerji tüketimine sahip olsa da günümüzde enerji kaynaklarının hızla azalması, enerji maliyetlerinin artması beyaz eşya pazarındaki ürünlerin enerji seviyelerinde rekabetçi bir ortam oluşturmuştur. Ayrıca yapılan çalışmalarda enerji tüketim sınıfı düşük kurutucuların yanında müşterilerin en çok 8kg kapasiteye sahip çamaşır kurutma makineleri talep ettiği görülmüştür. Bu veriler neticesinde kapasitesi 8 kg, uygun maliyetli, kurutma çevrimi kısa sürecek olan ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinin enerji

verimini arttırmak beyaz eşya üreticileri için önemli bir hale gelmiştir. Bu çalışma kapsamında da ısı pompalı kurutucu sisteminde enerji tüketimini azaltmak için bir kurutma çevriminde kompresör devrinin ve fan hızının enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. Deneyler 8 kg, 4 kg, 6 kg olmak üzere 3 farklı yük kapasitesinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapasitelerde en optimum noktada fan hızı 2400rpm çıkmış olup, 2200rpm ve 2600rpm motor devrine göre %10'luk enerji kazancı sağlanmıştır. Aynı fan hızında farklı kompresör devirlerinde yapılan testlerde ise kapasiteye bağlı olarak optimum kompresör devrinde farklılıklar çıkmıştır. 4 kg kapasitede 1500rpm, 6 ve 8 kg kapasitede ise 1800rpm'in optimum olduğu görülmüştür.

Tez çalışması dört ana başlıktan oluşmaktadır. İlk bölümde ev tipi çamaşır kurutma makinelerinin genel çalışma prensipleri aktarılmış olup sonrasında literatür araştırmalarına yer verilmiştir. Literatür kısmında çamaşır kurutma makinelerinde enerji verimliliği için hangi tür çalışmalar gerçekleştirildiğine aktarılmıştır. Çalışmalar incelendiğinde ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde değişken devirli kompresörler ile yapılan sınırlı sayıda araştırma olduğu görülmüştür. Literatür kısmından sonra ise tez hipotezi aktarılmıştır.

İkinci bölümde ise ısı pompalı çamaşır kurutma makineleri hakkında detaylı anlatım yapılmıştır. Burada bu tipteki kurutucuların çalışma prensibi, enerji hesaplaması ve pazardaki kullanım verilerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde deneysel çalışmalar ve teorik analizler aktarılmış olup dördüncü bölümde de burada çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çamaşır kurutma makinesi, ısı pompası, değişken devirli kompresör, enerji verimliliği, soğutucu akışkan.

Reducing Energy Consumption in Tumble Dryer with Heat Pumps

Emre GEZE

Department of Mechanical Engineering

Master Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Özden AĞRA

There has been an increase in the use of tumble dryers in recent years, with the increase in urbanization, the narrowing of living spaces and the decrease in people's time to dry their clothes. Tumble dryers have three different technologies: vented, air condensing and heat pump. The most energy efficient of these are the models with a heat pump system. Heat pump dryers are ~3 times more efficient than vented and ~2,5 times more efficient than air condensers. When the market data is analyzed, it is seen that the demand for heat pump tumble dryers has increased. Although heat pump tumble dryers have the lowest energy consumption compared to other types of tumble dryers, the rapid decrease in energy resources and the increase in energy costs have created a competitive environment in the energy levels of products in the white goods market. For this reason, it is important for white goods manufacturers to increase the energy efficiency of heat pump dryers with a laundry drying capacity of 8 kg, a low production cost and a short drying time. In this paper, the effects of compressor speed and fan speed on energy consumption in a drying cycle were investigated in order to reduce energy consumption in the heat pump dryer system. Experiments were carried out in 3 different load capacities: 8 kg, 4 kg, 6 kg. In these capacities, the optimum fan speed

was 2400rpm achieved, and 10% energy gain was achieved compared to 2200rpm and 2600rpm engine speeds. In the tests performed at the same fan speed at different compressor speeds, there were differences in the optimum compressor speed depending on the capacity. It was found that 1500rpm for 4 kg capacity and 1800rpm for 6 and 8 kg capacity are optimum.

The thesis consists of four main sections. The first section provides an overview of the general working principles of tumble dryers, followed by a review of the literature. The literature section discusses the studies conducted to improve energy efficiency in tumble dryers. Upon reviewing the studies, it was observed that there are limited research efforts focused on variable-speed compressors in heat pump tumble dryers. After the literature review, the thesis presents the research hypothesis.

The second section provides a detailed explanation of heat pump tumble dryers. It covers the working principles of these dryers, energy calculations, and usage data in the market.

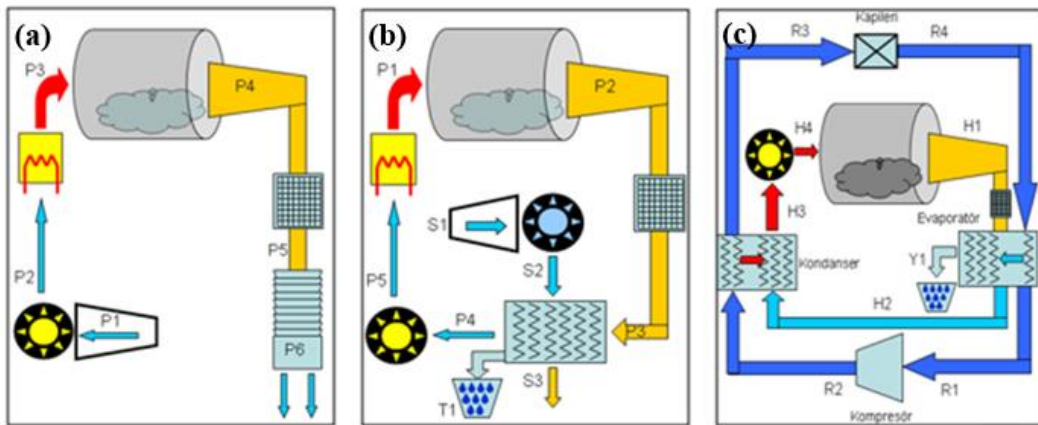
The third section presents experimental studies and theoretical analyses, while the fourth section evaluates the results obtained from these studies.

Keywords: Tumble dryer, heat pump, inverter compressor, energy efficiency, refrigerant.

1 GİRİŞ

Kurutma işlemi bir malzemede bulunan su veya sıvının mekanik, ısı, gibi farklı metotlarla uzaklaştırılması işlemidir. Kurutma prosesi tekstil, gıda, kâğıt endüstrileri ve farklı kimya sektörlerinde olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır.

Bu endüstriyel alanların dışında gündelik hayatımızda bu işlemten en çok faydalandığımız yerler ise çamaşır kurutma makineleridir. Çamaşır kurutma makineleri yıkanmış tekstilleri kurutmada hızlı olmaları ayrıca ev veya dış ortamda kurutmaya göre hijyenik ve kısıtlı alanlarda kurutmaya duyulan ihtiyaca yönelik bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde kullanılan çamaşır kurutma makinelerine baktığımızda 3 farklı tipte kurutma tasarımına sahip olduklarını görmekteyiz. Tarihsel olarak bu tasarımları ele aldığımızda ilk olarak bacalı ve yoğuşturmalı tipteki makinelerin kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Sonrasında ise enerji tüketim değeri bu iki tasarımdan daha düşük olan ısı pompalı kurutma makineleri tasarlanmıştır. Şekil 1.1’de bu farklı tiplerdeki çamaşır kurutma makinelerinin çalışma yöntemleri şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.1 Çamaşır kurutma makinası tipleri (a)Bacalı, (b)Yoğuşturuculu, (c)Isı pompalı[1]

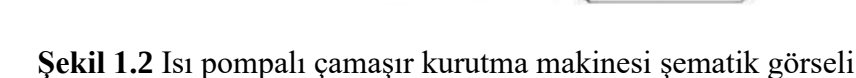
Bacalı kurutma makinelerinde, dış ortamdan emişi gerçekleştirilen hava ısıtıcı üzerinden geçirilir. Sonrasında bu hava ısıtılarak çamaşırdan nem alması sağlanır. Islak çamaşırlar üzerinden geçirilerek nemi alan hava daha sonrasında hav

filtresinden geçirilir. Bu tipte yoğuşturucu bulunmaması nedeni ile hav filtresinden çıkan nemli hava iç ortama verilmektedir. Bu nemli havanın makinenin bulunduğu ortama verilmesi istenmiyorsa, makine çıkışına takılan borular ile nemli hava bir baca deliği ile farklı ortama gönderilir. Bu işlem gerçekleştirilmezse havanın tutmuş olduğu nem ortamdaki mobilyalarda tahribat yaratabilir. Ayrıca bacalı tip, kurutma makineleri arasında en yüksek enerji tüketimine sahiptir.

Bacalı kurutma makinelerinin dezavantajlı yanlarını bir nebze elimine edebilmek için yoğuşturmalı çamaşır kurutma makineleri tasarlanmıştır. Yoğuşturmalı tip kurutma makinelerinde, bacalı tiplerden farklı olarak proses havası kapalı çevrim olarak çalışmaktadır. Bu kapalı çevrimde elektrik motoru ile tahrik edilen fan sayesinde havanın yönlendirilmesi sağlanır. Isıtıcıya yönlendirilen havanın burada sıcaklığı arttırılarak nem tutma kapasitesinin de arttırılması sağlanmış olur ve tambura yönlendirilir. Hava tambur içerisinden geçerken tekstillerin üzerindeki nemi alarak hav filtresinden geçip hava-hava tipli yoğuşturucuya ulaşır ve yoğuşturucuda nemini bırakarak tekrardan aynı çevrimi tamamlamak için ısıtıcıya yönlendirilir. Yoğuşturucuda nem alımı ise yine aynı elektirik motoruna bağlı farklı bir fanın soğuk ortama havasını yoğuşturucu üzerinden geçirmesi ile sağlanır. Yoğuşturucunun hava kanallarından geçen nemli proses havası kanalların alt ve üst kısmından geçen soğuk ortam havası sebebi ile nemini bırakır. Bu nedenle bu tip yoğuşturuculara hava-hava adlandırılması yapılmıştır. Kondanserden geçerken nemli havadan yoğuşan su makinenin tahliye kısmında birikir. Bu kısımdaki su tahliye pompası ile makinenin su tankına veya direkt tahliye hortumu ile gidere yönlendirilir. Bu tipteki kurutucularda nem alımını sağlayan hava dışardan fan ile alındığı için makinenin bulunduğu ortam şartları makine performansını etkileyebilmektedir. Bu olumsuzluğu gidermek için ısı pompalı kurutma makineleri tasarlanmıştır.

Şekil 1.2’de ısı pompası sistemine sahip bir çamaşır kurutma makinesinin görseli verilmiştir. Bu tipteki kurutucularda proses havası çevrimi ve soğutucu akışkan çevrimi olmak üzere iki kapalı çevrim bulunmaktadır. Diğer kurutucu tiplerden farklı olarak ısı pompalı kurutma makinelerinde ısıtıcı yerine ısı pompasının tasarımından dolayı soğutucu akışkanlı bir çevrim bulunmaktadır. Hava çevriminde yoğuşturucu üzerinden geçirilen sıcaklığı arttırılmış hava, motor tarafından sürülen bir fan yardımı ile tambura yönlendirilir. Tambur içerisindeki çamaşırların nemini

ma makinesi tasarımlarının yapılması sağlanmış olur.

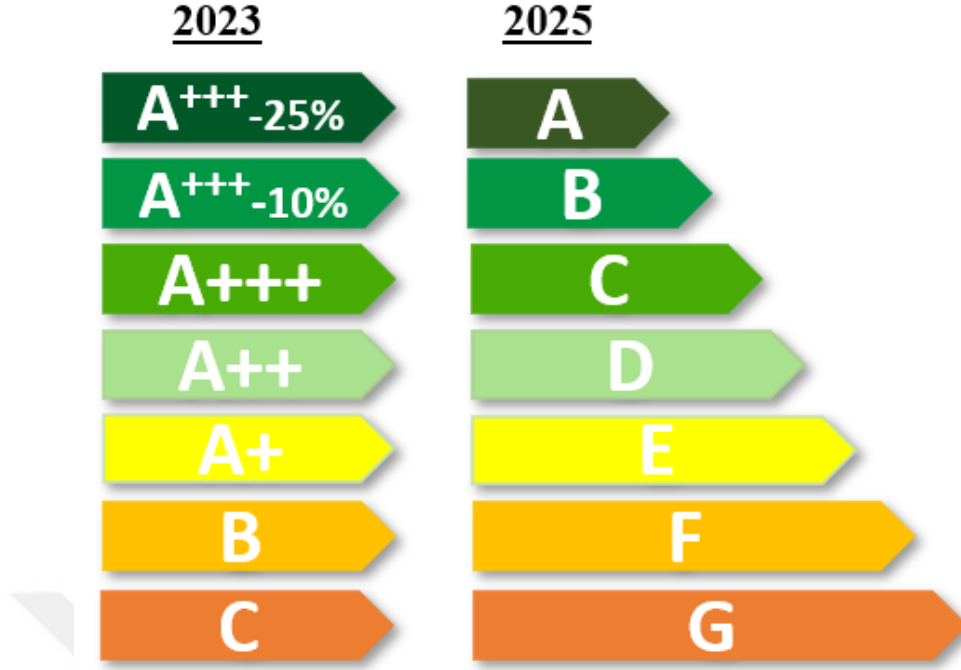


1.1 Tezin Amacı

Tablo 1.1 Kurutma makineleri enerji sınıfları ve tüketim değerleri

Kurutma makinesi tipi	Enerji Sınıfı	Birim kapasite başına enerji tüketimi (kWh/kg)
Bacalı	C	0,63
Yoğuşturmalı	B	0,61
Isı pompalı	A+	0,32
	A++	0,25
	A+++	0,19

Isı pompalı kurutma makineleri en düşük enerji değerlerine sahip olsa da günümüzde enerji kaynaklarının hızla azalması, enerji maliyetlerinin artması beyaz eşya pazarındaki ürünlerin enerji seviyelerinde rekabetçi bir ortam oluşturmuştur. Ayrıca Avrupa Birliği Eco-Design çalışmaları kapsamında sivil toplum kuruluşları ve Avrupa Birliği komisyonları düşük enerji tüketimleri içeren yeni regülasyon çalışması gerçekleştirmektedir. Bu durum ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinin üzerinde daha düşük enerji tüketimi sağlayacak yeni uygulamaların ve optimizasyonların geliştirilmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Şekil 1.3’de eski regülasyondaki enerji sınıflandırmasının yeni regülasyonda hangi harf sınıflandırmasına konumlandırılacağı son taslak regülasyonda paylaşılan bilgilere göre gösterilmiştir. Mevcut durumda pazarda en düşük enerji tüketimine sahip kurutma makinesi A+++ -%10 enerji seviyesine sahiptir. Yeni regülasyonda A enerji sınıfında ürünü müşterilere sunabilmek için A+++ -%25 enerji seviyesinde bir kurutma makinesi tasarımı gereklidir.



Şekil 1.3 Mevcut ve yeni enerji regülasyonu sınıflandırması

Bu tez çalışmasında da pazarda en çok talep gören 8 kg kapasiteli ısı pompalı bir kurutma makinesinin enerji tüketiminin, değişken devirli bir kompresör ile optimum noktaya getirilmesi ve enerji tüketimini azaltırken de süreyi de minimumda tutmak amaçlanmıştır. Ayrıca EN61121:2013 [3] standardına göre yarım yük olan 4 kg ve müşterilerin kullanımı simüle eden 6 kg yük kapasitelerinde de testler gerçekleştirilmiştir.

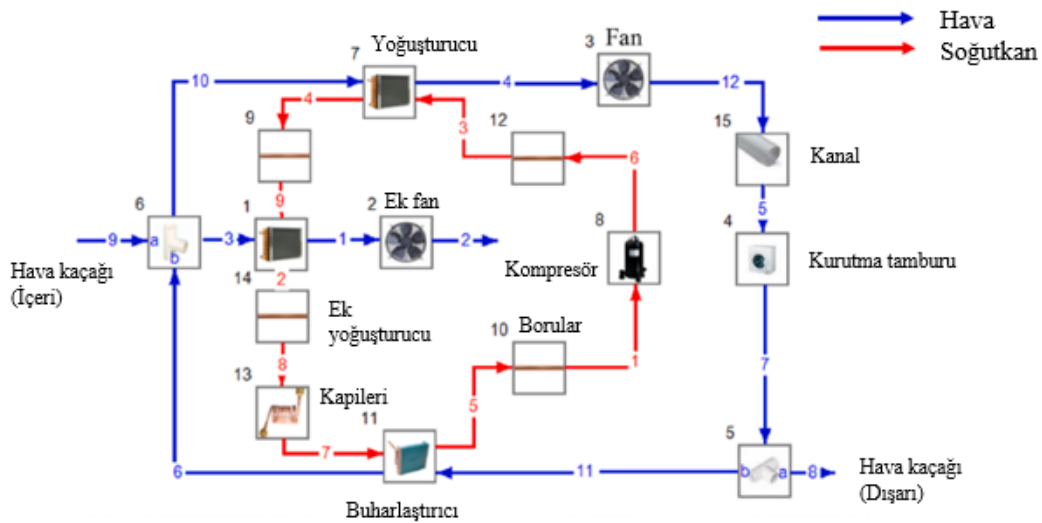
1.2 Literatür Araştırması

Gerçekleştirilen bu tez çalışması kapsamında çamaşır kurutma makinelerinde enerji tüketiminin azaltılması için ne tür çalışmalar gerçekleştirildiği incelenmiştir. Bu çalışmaların içeriğinde fan hızı, tambur devri, eşanjör tasarımı, hava debisi, çamaşır hareketi, kompresör devri gibi değişken parametrelerin ele alındığı görülmüştür. Tez kapsamında sunulan literatür araştırmalarında da bu parametrelerin bulunduğu çalışmalara yer verilmiş olup ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde değişken devirli kompresörler ile yapılan çalışmaların da detaylı anlatımı sağlanmıştır.

1.2.1 Kapalı Çevrim Bir Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makinesinin Simülasyon ve Analizi

Xiang Cao ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yapılan bu çalışmada, kapalı devre ısı pompalı bir çamaşır kurutucusunun sistem parametrelerinin SMER ve kurutma süresi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmalarında Xiang Cao ve arkadaşları kurutma sürecinin tamamını simüle edebilen ve de kurutma performansını iyileştirebilmek için kurutma parametrelerini optimize edebilen dinamik çamaşır kurutma modeli ve kararlı hal ısı pompası sistemi modeli için bir simülasyon modeli geliştirilmişlerdir. Bunu yaparken de Greatlab programını kullanmışlardır.

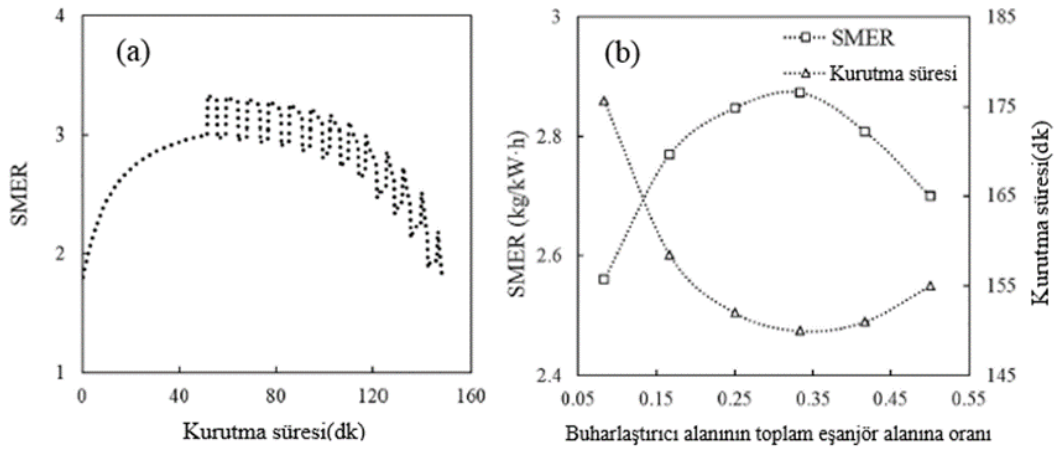
Yüksek kapasiteye sahip çamaşır kurutma makinelerinin kurutma süresinin 2 saatten fazla sürebildiği belirtilmiştir. Bunun nedeni olarak da kurutma işlemi süresince proses havasının ve çamaşırlar üzerindeki nem oranının değişimi ısı pompasındaki soğutucu akışkanın hal değişimine göre çok daha yavaş olması gösterilmiştir. Çalışmada enerji tüketiminin azaltılması hedeflendiği için ısı pompası sistem tasarımının oldukça önemli olduğu vurgusu yapılmıştır. Bu kriter göz önüne alınarak kararlı hal ısı pompası ile beraber çamaşırların kurutmasını sağlamak için bir tambur ile birlikte kurutma işleminin modellenmesi yapılmıştır. Isı pompası sisteminde R134a soğutucu akışkanı kullanılmıştır. Bu çalışma için oluşturulan deney düzeneğinin gösterimi Şekil 1.4’de gösterilmiştir.



Şekil 1.4 Çamaşır kurutma makinesi ile birlikte deney düzeneği

Bu çalışmada tambur içerisindeki kurutma işlemi üç farklı zaman aralığında incelenmiştir. Bunlardan ilki ısınma periyodudur. Sonrasında ise sabit oranda kurutma ve azalan oranda kurutma gelmektedir. Başlangıçta ısınma fazında tekstiller ve tambur beraber ısıtılmaktadır. Sabit hızlı kurutma aşamasında ise çamaşır yüzeyindeki ısı ve kütle transferi sabit bir eşitlik ile gerçekleşir. Kurutma işleminin son fazında ise kurutma işlemi tamamlana kadar çamaşırların sıcaklığı sürekli artarken kurutma hızı sürekli olarak düşer.

Şekil 1.5(a) oluşturulan simülasyondaki kurutma işlemi sırasında çamaşırlardan uzaklaştırılan nem miktarının (SMER) sonuçlarını göstermektedir. Kurutma çevriminde yoğuşma ve buharlaşma sıcaklıklarının zamanla çevrim içerisinde değişmesiyle ısı pompası sisteminin de performansı değişir. SMER değeri kurutma işleminde kurutucunun performansını analiz edilmesine yardımcı olmuştur. Tüm çevrim boyunca kurutma işleminin SMER'i 2,76 kg/kWh çıkmış olmasına rağmen bir kurutma prosesi için bu değer çok da yüksek değildir. Bunun da iki sebebinin olduğu belirtilmiştir. İlk çevrim başında çamaşırları ısıtmak için geçen sürede harcanan enerji değeri de çevrim sonunda nem miktarı düşen tekstilden nem almanın zorlaşmasıyla harcanan enerji olarak gösterilmiştir.



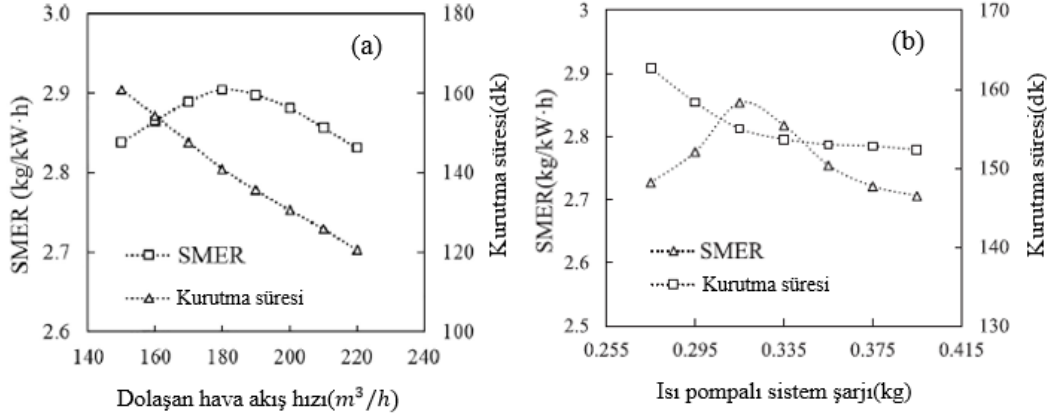
Şekil 1.5 (a)Kurutma işleminde SMER değişimi, (b)Isı eşanjörlerinin alan oranının SMER ve kurutma süresine etkisi

Bu çalışmanın parametrik analiz kısmında kompresör hacmi, ısı değiştirici boyutu, proses hava debisi, yoğuşma sıcaklığı ve sisteme basılan soğutucu akışkan miktarının kurutma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmada artan kompresör hacmiyle birlikte kurutma süresinin azalmasına yardımcı olan iki faktör oluşmaktadır. Birim zamana düşen ısıtma kapasitesi artarak bu durum tambura giren hava sıcaklığının artmasına yardımcı olmuştur. Bu koşullarda SMER değeri analiz edildiğinde kompresör hacminin artmasıyla kurutma süresi kısalıp toplam sistemin güç azalarak SMER artmıştır. Diğer yandan kompresörün güç tüketimindeki artış nedeniyle toplam sistemin güç tüketiminin artabileceği ve bu da SMER'in düşmesine neden olabileceği belirtilmiştir. Çalışmadaki sonuçlar gösteriyor ki kompresör hacmi değişikliği ile SMER yüksek bir değer alabilir ve bu da ısı pompası sisteminin performansının iyileştirilmesinde faydalı olacaktır. Bu durum SMER ve kurutma süresini düşürmek için doğru kompresör hacminin sisteme seçilmesinin önemini göstermektedir.

Şekil 1.5(b)'de ısı değiştiricilerin yüzey alanının SMER ve kurutma süresine etkisi gösterilmektedir. Isı değiştiricilerin (buharlaştırıcı ve yoğuşturucu) toplam alanı sıra sayıları değişmesine rağmen aynı tutulmuştur. Ön yüzey alanları da aynıdır.

Şekil 1.6(a) hava debisinin SMER ve kurutma süresi üzerindeki etkisini göstermektedir. Hava debisi dışındaki farklı değişkenleri sabit tutarak hava debisinin arttırılmasıyla kurutma süresinin azaldığı ve SMER'in optimum değere ulaştığı çalışmada görülmüştür. Dolaşan hava debisi yaklaşık $180 \text{ m}^3/\text{h}$ olduğunda SMER'in maksimuma ulaştığı görülmektedir. Kurutma süresi için hava debisinin artmasıyla birlikte birim zamandaki nem giderimi artmış ve bu da kurutma süresinin azalmasına yardımcı olmuştur. Hava debisinin artması ile bir yandan da kurutma süresinin kısalması nedeniyle toplam sistem güç tüketimi azalarak SMER değeri artabileceği belirtilmiştir. Bir diğer taraftan da debiyi arttırmak için fanlar yüksek devirde dönmeli ve bu da enerji tüketiminin arttırmasına neden olacağı için toplam güç tüketimi arttıracığı ve SMER'in düşmesine neden olabileceği belirtilmiştir.

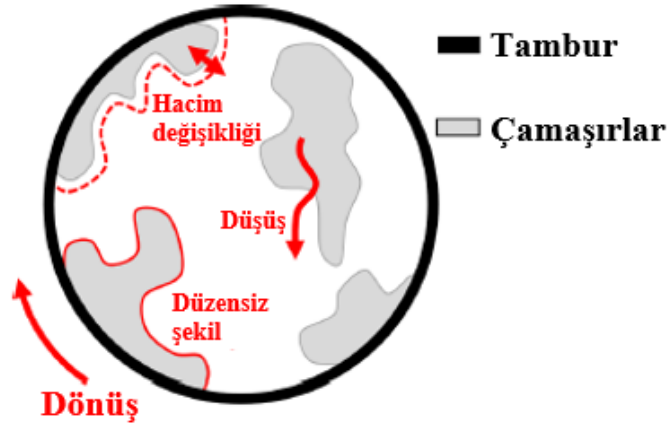


Şekil 1.6 a)Hava debisinin SMER ve kurutma süresine etkisi, (b)Soğutucu şarjının SMER ve kurutma süresi üzerindeki etkisi

Şekil 1.6(b) soğutucu akışkan şarjının SMER ve kurutma süresi üzerindeki etkisini göstermektedir. SMER değerinin en yüksek seviyedeki noktasında soğutucu akışkan miktarının artırıldığı ve kurutma süresinin azaldığı görülmektedir. Soğutucu akışkan miktarının artması ile yoğunlaştırıcı sıcaklığı artmakta ve bu da tambura giren havanın sıcaklığını yükseltmektedir. Bu durum da kurutma süresini kısaltmaktadır. Soğutucu akışkan miktarının artmasıyla kurutma süresinin kısalması, toplam sistem enerji tüketimini de azaltarak SMER değerini arttırmaktadır.

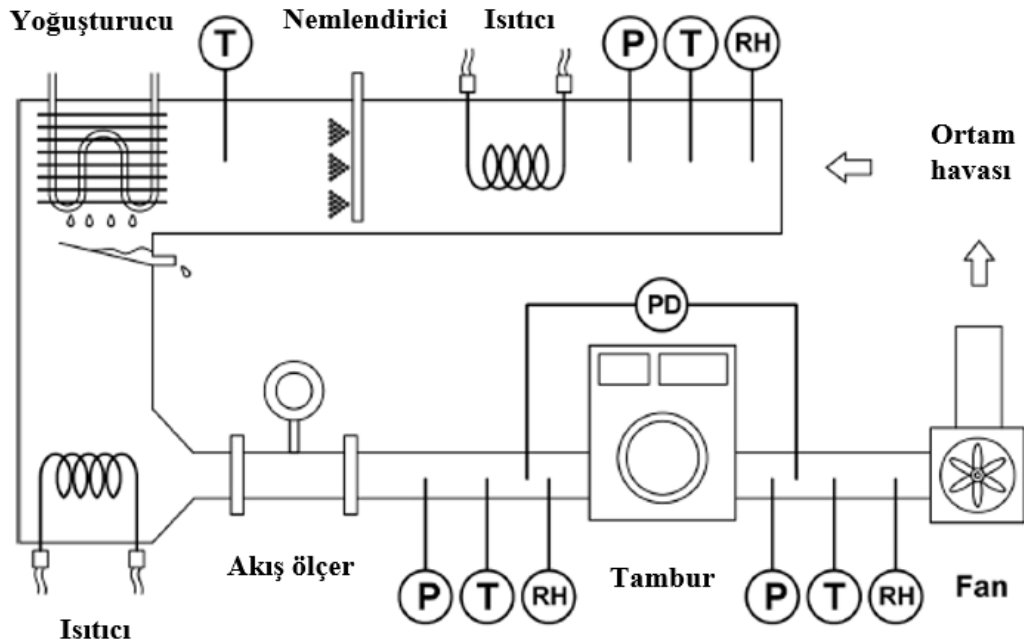
1.2.2 Çamaşır Kurutma Makinelerinde Tamburun Isı ve Kütle Transfer Özellikleri Üzerine Deneysel Değerlendirme ve Tahmin Modeli Geliştirme[5]

Dongchan Lee ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yapılan bu çalışmada kıyafetlerden, havaya suyun kütle aktarımı, havadan giysilere duyulur ısı aktarımı ve tamburdaki ısı kaybı, giysilerin üzerindeki hava akış hızı, nem, sıcaklık ve su içeriği değiştirilerek ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Giysilerin kurutulması sırasında kütle aktarım hızı ve ısı kaybı tahmin modelleri geliştirmek için yapay sinir ağı (ANN) kullanılmıştır. Giysilerin düzensiz şekilleri ve çeşitli fiziksel olaylar nedeniyle dönen tamburdaki kütle transferini tahmin etmek zor olabilir. Şekil 1.7’de bu düzensiz hareket gösterilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle ANN tabanlı tahmin modelleri, çeşitli girdi parametrelerine dayanarak çamaşır kurutucularındaki kütle aktarım hızını ve duyulur ısı aktarım hızını en iyi şekilde tahmin edebilir. Bu çalışma tamburlu kurutma makinelerindeki çamaşırların ısı ve kütle transferi özelliklerini açıklamaktadır.



Şekil 1.7 Döner tamburdaki karmaşık hareketler

Şekil 1.8’de tamburdaki hava akış hızını kontrol etmek için kurulan ısı kontrolörü dahil suyun ısı ve kütle aktarım hızlarının ölçülmesinde benimsenen deney düzeneğinin bir şeması gösterilmektedir. Kanala giren hava tambura geçmeden önce giriş şartını sağlamak için ısıtma, nemlendirme ve nem alma işlemlerinden geçirilir. Döner tamburun girişindeki sıcaklık PID’ler ile çalıştırılan elektrikli ısıtıcılar kullanılarak tambur içi şartlandırma kontrol edilir.



Şekil 1.8 Deney düzeneğinin şeması

Bu çalışmada tambur giriş sıcaklığı, tambur giriş bağıl nemi, tambur giriş mutlak nemi ve hacimsel akış hızı parametre olarak belirlenmiştir. Tambur giriş havası

sıcaklığı, hava debisi ve çamaşırlardaki su içeriği arttıkça kütle ve duyulur ısı transfer hızlarının arttığı görülürken, giriş havasının neminin arttırılmasıyla beraber kütle ve ısı transferinin azaldığı ortaya çıkmıştır. Çamaşırlardaki suyun buharlaşma durumu hava ile aralarında olan ısı transferi ile alakalıdır. Kütle transfer hızındaki artışın hava akış hızındaki artıştan çok giriş sıcaklığındaki artıştan kaynaklanması nedeni ile çevrimdeki kurutma süresini azaltmak için hava sıcaklığı artışı tercih edilebileceği belirtilmiştir. Yalnız bu sıcaklık seviyelerinin tekstillere zarar vermesinin de göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır. Çamaşır kurutma makinelerinin tamburundaki ısı kaybı, giriş havasının sıcaklığı arttıkça ve giysilerdeki su içeriği ile giriş havasının nemi azaldıkça artar. Çalışmada tamburdaki ısı kaybı giysilerin sıcaklığı ile ortam havası sıcaklığı arasındaki farkla doğrusal bir ilişki gösterirken, hava akış hızı ile net bir ilişkisi kurulamamıştır. Bu çalışmadaki parametreler kullanılarak yapay sinir ağları (ANN) ile ısı ve kütle transfer hızları ile ısı kaybı tahmin yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen model, mevcut benzer çalışmalarla karşılaştırıldığı zaman daha iyi sonuçlar elde edilmesine olanak sağladığı görülmüştür. Yeni yapılacak olan çalışmalarda elde edilen bu model kullanılarak, çamaşır kurutma makinalarında enerji tüketimi ve kurutma süresini azaltmak için sayısal bir optimizasyon çalışması yapılabileceği bildirilmiştir.

1.2.3 Hava Çevrimli Isı Pompalı Kurutucuların Enerji Verimlilik Analizi[6]

J.E.Braun ve arkadaşları 2001 yılında bu çalışmayı gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın amacı tamburlu kurutma makinelerinde hava kaynaklı ısı pompası çevriminin enerji verimliliğini araştırmaktır. Araştırmacıların tasarladığı düzenek kompresör, türbin, geri kazanımlı ısı değiştirici, hava-hava ısı değiştirici ve bir çamaşır tamburundan oluşmaktadır. Sistem verimliliğini ölçmek için bir simülasyon modeli oluşturulmuş ve bu modelle parametrelerin sistemin performansına etkisi incelenmiştir. Araştırmalar sonucunda, sistem performansını artırmak için gerekli ısı değiştirici ve kompresörün yanında türbin parametrelerinin de etkili olduğu belirlenmiştir.

Çalışmada hava kaynaklı ısı pompası ile oluşturulan kurutma sistemi geleneksel elektrikli çamaşır kurutucu performansı ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadaki ısı pompalı tamburlu kurutucu elektrikli kurutucuya göre %40'a kadar daha yüksek enerji verimliliği sağlamıştır. Bu verimliliğin yanında hava kaynaklı ısı pompalı

kurutucu diğer tipteki bacalı kurutuculardaki gibi dış ortama hava atmama avantajına sahiptir. Buhar sıkıştırılmalı ısı pompalı kurutucuların kullanımıyla karşılaştırıldığında, hava kaynaklı ısı pompalı çevrimi önemli bir avantaja sahiptir. Isı pompasında düşük basınçlı hava kullanımı, ısı değiştiricilerin toz alma ve temizleme işlemleri için kolayca ısı pompası sisteminden çıkarılabilmesine olanak sağlar. Ayrıca, hava kaynaklı ısı pompasına sahip kurutucunun maliyetinin buhar sıkıştırılmalı kurutucu maliyetinden daha az olduğu belirtilmiştir. Bu nedenlerden dolayı hava kaynaklı ısı pompalı kurutucuların kurutma makinelerinin enerji verimliliğini artırmak için önemli bir potansiyele sahip olduğu bu çalışmada belirtilmiştir.

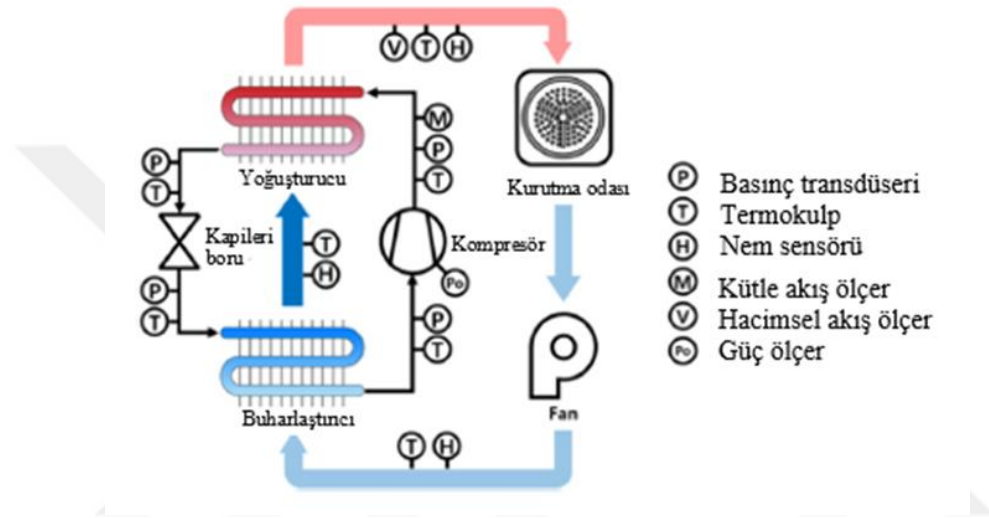
1.2.4 Isı Değiştirici Geometrisinin ve Kompresör Frekansının Isı Pompalı Kurutucuların Dinamik Performans Özellikleri Üzerinde Etkileri[7]

JunYoung Choi ve ekibi, 2021 yılında gerçek çalışma koşullarına uygun olarak bir kurutma odasındaki ısı ve kütle transferini dikkate alan bir simülasyon modellemesi oluşturmuşlardır. Bu model ile ısı pompalı kurutma makinelerinin dinamik özelliklerini analiz etmişlerdir. Bu çalışmada yapay sinir ağı(ANN) adı verilen bir yöntem kullanarak modeller oluşturulmuştur. Deney verileri ile karşılaştırılarak yapılan modelleme %6,1'den düşük hatalarla başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Geliştirilen bu model ile ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinin dinamik davranış performansı kompresör frekansı ile ısı değiştirici uzunluğu değiştirilerek analiz edilmiştir.

Isı değiştiricilerdeki ısı transferi geçici durum analizi yöntemi ile modellenmiştir. Kompresör ve kılcal boruda işlemler anlık olduğundan soğutucu akışkanın ani genişmesi ve sıkıştırılması için statik bir analiz kullanılmıştır. Hava dolaşımı için ise ANN yöntemi ile nem dikkate alınarak birleşik ısı ve kütle transferi tahmin edilmiştir. MATLAB, sayısal analiz için kullanılırken, REFPROP ise soğutucu ve nemli havanın özelliklerinin hesaplanması için tercih edilmiştir.

İlk olarak ısı pompalı kurutucunun fiziksel parametreleri ile çalışma koşulları giriş verileri olarak belirlenmiştir. Kurutucunun başlangıç halindeki durumları ise giriş verilerine göre tahmin edilmiştir. Belirlenen kontrol yöntemi kullanılarak kompresör frekansı belirlenmiş ve sonrasında kompresör ile kılcal boru boyunca soğutucu akışkanın kütle akış hızı hesaplanmıştır. Ardından deney düzeneğinde

çevrilen havanın koşulları ile başlangıçta varsayılan değerler arasındaki sapmalar kontrol edilmiş ve yakınsama kriteri sağlanana kadar hesaplama döngüsü yinelenmiştir. Ek olarak eşanjörler ve kurutma odasının durum vektörleri sonlu hacim yöntemi (FVM) ve verilen sınır koşulları altında soğutucu akışkan kütle akış hızı ve hava özelliklerine dayalı olarak giysilerin kütle dengesi kullanılarak hesaplanmıştır. Son olarak durum vektörünün integrali alınarak giysilerin sıcaklık değerleri ile içerisindeki su değişimleri hesaplanmıştır. Tüm hesaplamalar her bir değişen kompresör frekansı ile tekrar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.9 Deney düzeneği şematik görseli

Oluşturulan modeli standart çalışma modunda gerçek bir ısı pompalı çamaşır kurutma makinesinde doğrulamak için deneyler yapılmıştır. Isı pompası çevriminde her bir sistem elemanının giriş ve çıkışında soğutucu akışkanın basınç ve sıcaklık değerleri basınç ölçerler ve ısı ölçerler aracılığıyla ölçülmüştür. Kompresör çıkışında ise soğutucu akışkanın kütle akış hızı bir kütle akış ölçer kullanılarak doğrudan ölçülmüştür. Sıcaklık ve bağıl nem değerleri kullanılarak buharlaştırıcı ve yoğusturucunun mutlak nem ve entalpisi hesaplanmıştır. Ayrıca kurutma odasının girişindeki hava akış hızı hacimsel akış ölçer ile ölçülmüştür.

Yapılan testlerin sonucunda ısı pompalı kurutucunun kurutma performansının doğrudan kompresör devri ve proses havası sıcaklığı ile değiştiği söylenebilmektedir. Bu da bizlere yüksek kurutma performanslarına ulaşabilmek için kompresör devir değerinin optimize edilmesinin gerektiğini belirtmektedir. Ancak kompresör devrinin artması enerji tüketiminde artışa neden olmaktadır. Bu nedenle ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde her aşama için optimum

kompresör frekansına sahip bir çalışma modu araştırılmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Bu çalışmada yüksek kompresör devri durumunda buharlaşmadaki artışın MER değerini %16,5'e kadar arttırdığı gözlemlenmiştir. Daha düşük kompresör devirleri ile beraber ise güç tüketimindeki azalmanın etkisiyle SMER değeri %34,8'e kadar artmıştır. Bu sonuçlar da kurutma süresini kısaltmak için kompresör devrinin artırılması, enerji verimliliğini artırmak için ise kompresör devrinin düşürülmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, ısı değiştiricilerin uzunluğu değiştirilerek kapasiteleri artırılmış ve bu değişiklik ile birlikte MER ve SMER değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Sistem performansını maksimize etmek için kompresör devrinin artmasıyla optimal ısı değiştirici uzunluğunun da arttığı görülmüştür. Isı değiştirici uzunluklarının artırılmasıyla MER değeri %10 ve SMER değeri %14 artmıştır.

1.2.5 Ev Tipi Kurutucularda Tekstil Kurutma İşlemi[8]

2007 yılında V. Yadav ve ekibi tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada ev tipi ısıtıcılı çamaşır kurutma makinesindeki kurutma işleminin teorik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, makinenin enerji performansını etkileyen önemli parametreleri belirlemek ve ayrıca bir simülasyon modeli oluşturmaktır. Bunun için pazarda bulunan bir çamaşır kurutma makinesinin tipik parametre modeli kullanılarak bir deney düzeneği tasarlanmış ve makinenin enerji performansı üç farklı kurutma standardına göre değerlendirilmiştir.

Bu araştırmada ev tipi ısıtıcılı çamaşır kurutma makinelerinin fiziksel kurutma sürecinin teorik analizini yaparak enerji tüketimini etkileyen çeşitli termo-fiziksel parametreleri belirlemeyi ve bir simülasyon modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. Makinenin performansını ve parametre değerlerini belirlemek için çamaşır kurutma makinesi ile beraber oluşturulan deney düzeneği üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması için yaygın olarak kabul edilen üç kurutma standardı dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar simülasyon ve deneyin birbirleriyle uyumlu olduğunu net bir şekilde göstermiştir. Bu çalışmada SMER özelinde de bir korelasyon geliştirilmiştir.

Teorik modelleme ısıtıcılı çamaşır kurutma makinesinin kurutma işlemi için gerçekleştirilmiştir. Tambur giriş bağıl nemi, çamaşırların birim alan başına kütlesi

, çamaşırların kemik kuruluğu gibi faktörlerin sistem performansına olan etkisi de incelenmiştir. Performans parametrelerini hesaplamak için EES programı kullanılmıştır.

Doęrulama için gerekli deneysel verilerin elde edileceği test düzeneği önerilen modele uygun bir şekilde geliştirilmiştir. Uluslararası standartlar baz alınarak dört farklı yük ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda SMER değerinin çamaşırların birim alan başına kütlesinden önemli ölçüde etkilendiği görölmüştür. Birim alan başına kütle arttıkça SMER değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Deneysel bir ilişki sunularak kurutucunun genel sistem performansının farklı yük ve ortam koşulları altında tahmin edilebilmesi mümkün hale getirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde genel olarak testlerin ve simölasyon sonuçlarının yakın olduğu gözlemlenmiştir.

1.2.6 Ev Tipi amaşır Kurutma Makinesinde Yeni Bir Konseptin Termal Analizi[9]

Pradeep Bansal ve arkadaşlarının 2010 yılında gerçekleştirdiği çalışmada ev tipi kurutucuda çevrim havasını ısıtmak için ısıtıcı yerine sıcak su kullanımının fizibilitesi araştırılmıştır. Tasarlanan kurutucunun performans sonuçları orijinal kurutucuyla karşılaştırılmıştır. Operasyonel parametreler, orijinal kurutucuya göre farklılık gösteren toplam güç girişi ve ısı eşanjöründen akan suyun kütle akış hızları ve sıcaklıkları üzerinde değişiklikler yapılarak iki sistem arasındaki etkiler incelenmiştir. EES programı kullanılarak, ısı transferini karşılaştırmak için bir simölasyon modeli oluşturulmuştur. Bu model deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Yapılan testler sonrası modifiye edilmiş kurutucu, aynı çalışma koşullarında geleneksel kurutucuya kıyasla daha düşük bir MER değerine sahiptir. Modifiye edilmiş olan kurutucu %7 ile %10 daha verimli bir performans sergilemekte ve %5 ila %10 arasında daha hızlı kurutma çevrimi sunmaktadır. Suyun debisinin etkilerinin kritik bir ekinliğe sahip olmadığı görölmüştür. Isı değiştirici aracılığıyla sıcak suyun sıcaklığının artırılması, daha iyi bir kurutucu verimini garanti etmezken, su giriş sıcaklığının 70°C'ye düşürölmesi testlerdeki en düşük MER değeri olan 1.017 kWh/kg'ı sağlamıştır. Artan güç girişinin orijinal kurutucuda kurutma süresini azaltabileceği ancak daha düşük bir MER değerini garanti

etmeyeceği belirtilmiştir. Çalışmada oluşturulan ısı değiştirici modeli, ısı değiştiricinin etkinliğini %3,9 ve güç girdisini %6,8 hata oranında tahmin etmektedir.

1.2.7 Tekstil Hareketinin Ev Tipi Tamburlu Kurutucunun Performansına Etkisi[10]

Yuhui Wei ve arkadaşlarının 2018 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, kurutma makinelerinde çamaşır hareketinin performans üzerine etkileri incelenmiştir. Tekstil malzemesinin türü, tekstilin boyutları ve tambur devri gibi çeşitli parametreler ele alınmıştır. Kurutma işlemi sırasında çamaşırın hareketlerini inceleyebilmek için yüksek hızlı bir kameradan faydalanılmıştır.

Yapılan testlerin sonucunda çamaşır hareketinin, kurutma performansına direkt olarak etki ettiği gözlemlenmiştir. Kayma veya döndürme hareketleri ile karşılaştırıldığında, karmaşık hareket çamaşır ve kurutma havası arasındaki ısı ve nem transfer alanını artırabildiğinden, daha yüksek kurutma verimliliğine imkân sağlamıştır. Ayrıca tek bir hareket modeli koşulu altında hem kumaş hareketi hem de kumaşın konumu sınırlıdır ve bu nedenle kurutucunun kurutma verimini azaltmaktadır. Buna karşılık, karmaşık bir hareket modeli koşulu altında, çamaşırın hareketi ve konumu sürekli olarak değişmiş ve böylece kurutma verimliliği artmıştır.

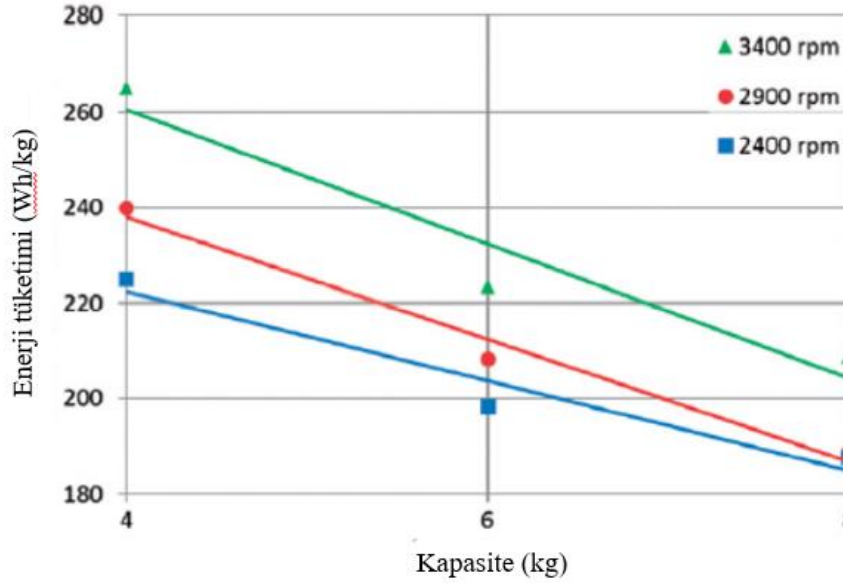
1.2.8 Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makinesinin Enerji Tüketimi Kurutma Süresinin Modellenmesi[11]

Bu çalışmada Pero Gataric ve arkadaşları farklı fan ve tambur hızı ayrıca farklı yük kapasitelerinde 27 farklı deney sonrası regresyon analizi kullanarak çamaşır kurutma makinesinde modelleme oluşturmuştur.

Bu çalışmada yüksek kapasitelerde, yüksek tambur hızının tambur içindeki gelişmiş ısı ve kütle hızını iyileştirmesi nedeni ile kurutma prosesinin enerji tüketimini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Çalışmadaki makinede ayrı motorlar tarafından tahriklenen fan ve tamburdan, fan hızının arttırılması ile makinede hem kurutma performansı düşmüş olup hem de yüksek elektrik gücü nedeni ile enerji tüketimi artmıştır. Düşük kapasiteli yüklerde yüksek tambur ve fan hızlarının kurutma süresini düşürdüğü görülürken, yüksek kapasitelerde kurutma süresinin, daha düşük

fan ve tambur hızlarına göre çalıştırılan çevrimlere göre yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Farklı kapasitelerde tambur devri sabit tutulup değişen fan hızları ile yapılan ölçümlerde birim kütle başına enerji tüketiminin, çamaşır kütlesi arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 1.10'da 47 rpm sabit tambur devrinde, farklı kapasitelerde fan hızının birim kütle başına enerji tüketimine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Fan hızının farklı kapasitelerde enerji tüketimine etkisi

Bu çalışmada ayrıca hava kaçağının da enerji verimliliğini ve kurutma süresini etkileyen önemli bir etmen olduğu belirlenmiştir. Yüksek fan hızlarında makine içerisindeki çevrim havasının hızı arttığından nemli hava kaçağının da arttığı tespit edilmiştir. Bununla beraber testler sonucunda kurutma süreleri de kısalmıştır.

1.3 Hipotez

Literatür araştırmasında görülmüştür ki enerji tüketimini azaltmak için kurutma makinelerinde hava debisi, tambur içerisindeki çamaşır hareketi, farklı kapasiteler, tambur devri, motor devri, kompresör devri, fan hızı, farklı tasarıma sahip ısı değiştiriciler ve farklı soğutucu akışkanlar çalışılmıştır. Bu değişkenlerden bazıları farklı çalışmalarda birbirleri ile olan etkileşimleri gözetilerek incelenmiştir. Bölüm 1.2.1'de aktarılan çalışmada oluşturulan deney düzeneğinde farklı kompresör devri, ısı değiştiricilerin yüzey oranları ve soğutucu akışkan şarj miktarının SMER ve kurutma süresi üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Bölüm 1.2.12'de ise farklı fan ve

tambur hızlarının farklı kapasitelerdeki enerji tüketimine ve süreye olan etkisi incelenmiştir.

Ancak incelenen literatür çalışmalarında kompresör devri ile fan hızının farklı kapasitelerdeki enerji tüketimi ile SMER ve MER'e olan etkisi ile ilgili çok fazla çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu tez çalışmasında ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde kompresör devri, fan hızı ve farklı yük kapasiteleri 4,6 ve 8 kg değişken olarak ele alınıp enerjini tüketimi ile SMER ve MER'e olan etkileri deneysel ve teorik olarak incelenmektedir.



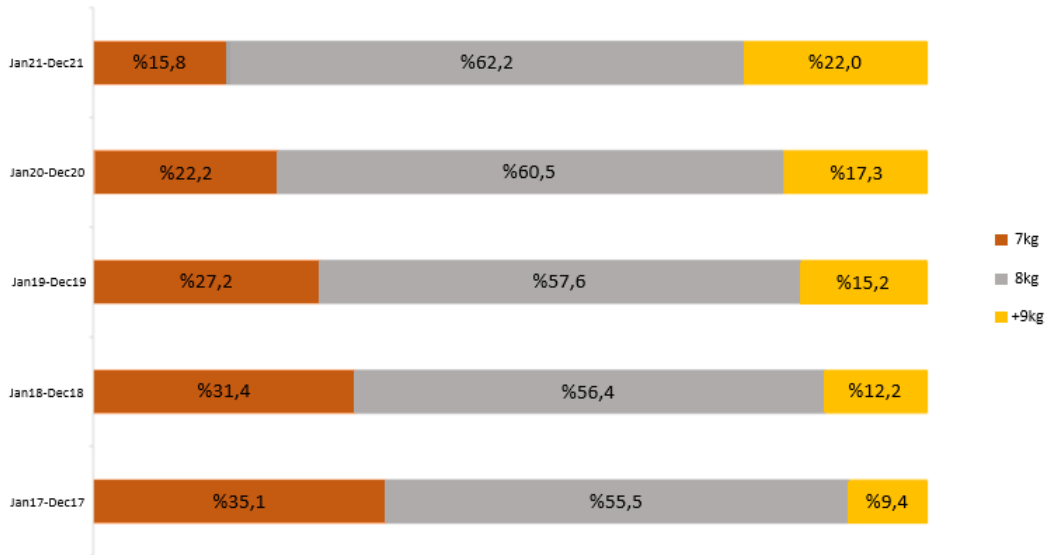
2

ISI POMPALI ÇAMAŞIR KURUTMA MAKİNELERİ

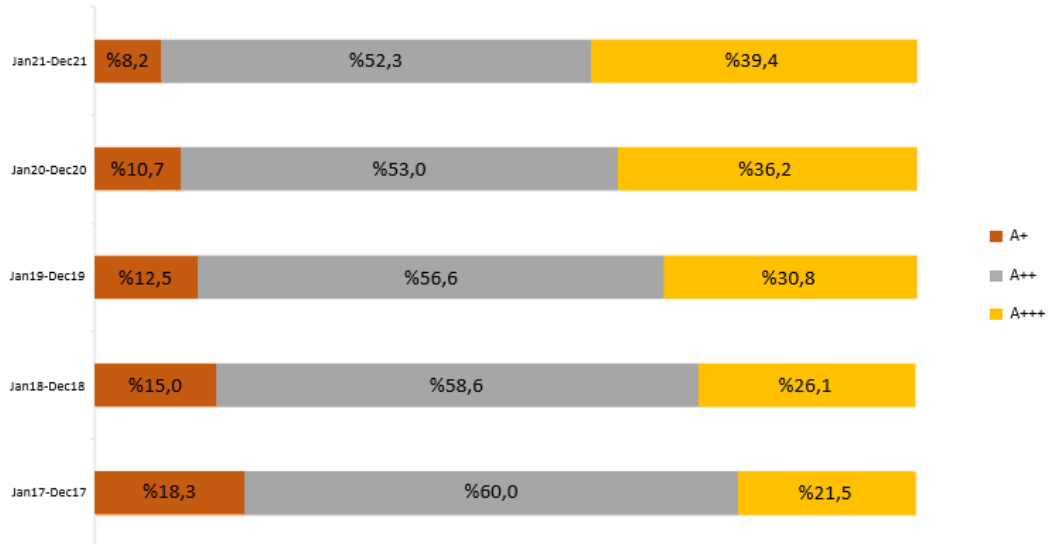
2.1 Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makineleri Kullanım Verileri

Son dönemde, enerji kaynaklarının azalması, enerji fiyatlarının artışı ve küresel ısınma gibi konular daha sık gündeme gelmekte ve bu da insanların enerji tasarrufuna olan hassasiyetini artırmaktadır. Dolayısıyla, enerji tasarrufu tüketici tercihlerinde önemli bir kriter haline gelmiştir.

Bilindiği üzere çamaşır kurutma makineleri içerisinde en enerji verimli seçeneklerden biri ısı pompalı makinelerdir. GFK verilerine göre, Batı Avrupa pazarı, bu tür makinelerin en çok satıldığı pazardır. Şekil 2.1 ve 2.2'de sunulan grafiklere göre, her geçen yıl yüksek kapasiteli ve enerji sınıflı ürünlerin pazardaki payı artmıştır. Ayrıca, düşük kapasiteli ve yüksek enerji sınıflı ürünlerin satış adetlerinin ise her yıl önemli oranda düştüğü açık bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 2.1 Batı Avrupa pazarı kapasiteye göre ısı pompalı çamaşır kurutma makinası için 2017-2021 yıllarına ait satış oranları.[12]



Şekil 2.2 Batı Avrupa pazarı enerji sınıfına göre ısı pompalı çamaşır kurutma makinası için 2017-2021 yıllarına ait satış oranları.[12]

2.2 Çamaşır Kurutma Makineleri Enerji Standardı

Ev tipi çamaşır kurutma makinelerinin enerji sınıfları için bazı standartlar belirlenmiştir. Avrupa'daki çamaşır kurutma makineleri için enerji standardı EN61121:2013.[3]'dür. Bu standarttaki sınıflar enerji verim katsayısına (EEI) göre belirlenmektedir. Tablo 2.1'de enerji verim katsayısına göre enerji verim sınıflarının eşleştirmesi bulunmaktadır.

Tablo 2.1 Kurutucu enerji verim sınıfları.[13]

Enerji Verim Sınıfı	Enerji Verim Katsayısı
A+++	$EEI < 24$
A++	$24 \leq EEI < 32$
A+	$32 \leq EEI < 42$
A	$42 \leq EEI < 65$
B	$65 \leq EEI < 76$
C	$76 \leq EEI < 85$
D	$85 \leq EEI$

EEI aşağıdaki gibi hesaplanır ve bir ondalık basamağa yuvarlanır:

$$EEI = \frac{AE_c}{SAE_c} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada, AE_c ev tipi çamaşır kurutma makinesinin ağırlıklı yıllık enerji tüketimini, SAE_c ev tipi çamaşır kurutma makinesinin standart yıllık enerji tüketimini ifade etmektedir.

$$SAE_c = 140 \times c^{0,8} \quad (2.2)$$

Burada c katsayısı, standart pamuklu programı için ev tipi çamaşır kurutma makinesinin nominal kapasitesini ifade etmektedir.

AE_c , kWh/yıl olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır ve iki ondalık basamağa yuvarlanır:

$$AE_c = E_t \times 160 + \frac{(P_o \times \frac{525600 - (T_t \times 160)}{2} + P_l \times \frac{525600 - (T_t \times 160)}{2})}{60 \times 1000} \quad (2.3)$$

Burada:

E_t = ağırlıklı enerji tüketimi, kWh cinsinden ve iki ondalık basamağa yuvarlanmış.

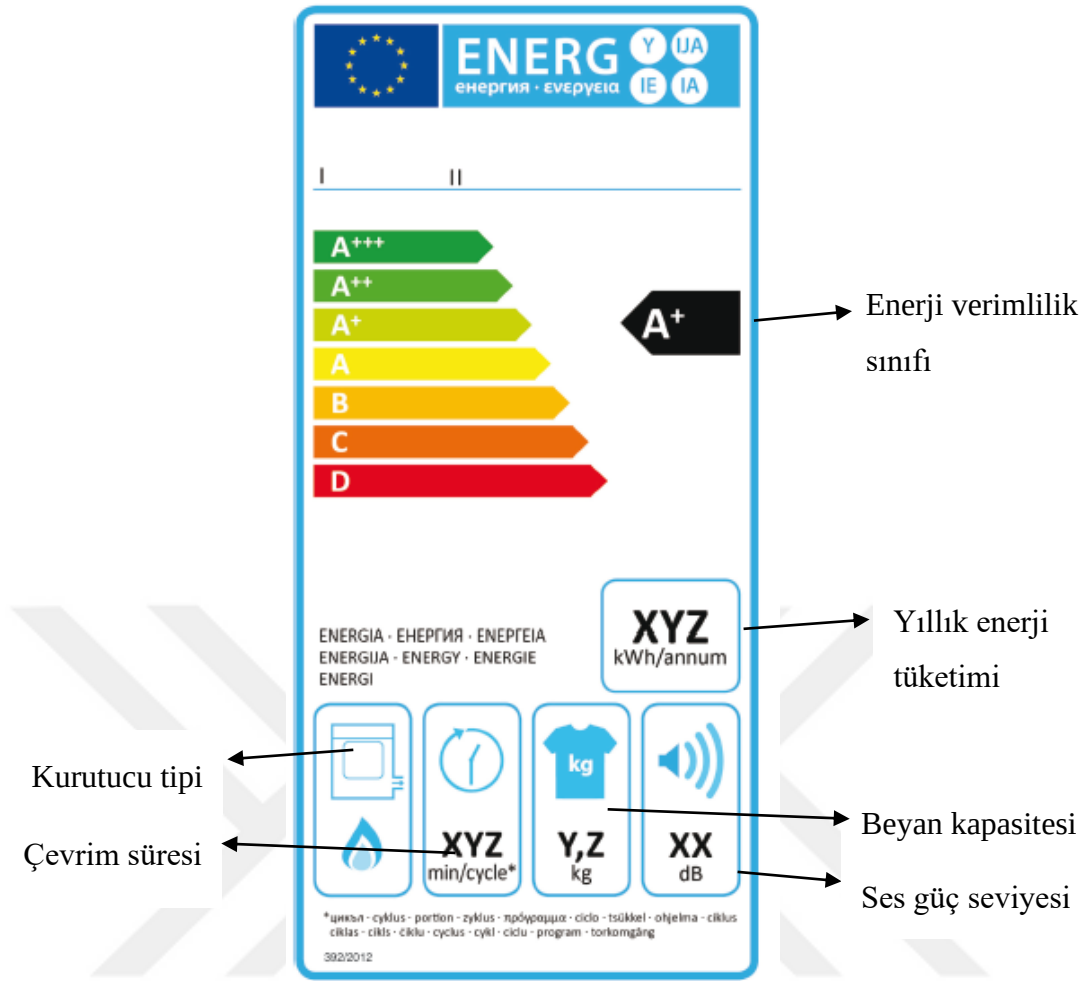
P_o = tam yükte, W cinsinden ve iki ondalık basamağa yuvarlanmış standart pamuklu programı için "kapalı modda" güç (makine elektronik kartlarının tükettiği güç miktarı).

P_l = tam yükte, W cinsinden ve iki ondalık basamağa yuvarlanmış standart pamuklu programı için "açık modda" güç (kurutma çevrimi tamamlandıktan sonra makinenin kapanmasına kadar elektronik komponentlerin tükettiği güç miktarı).

T_t = ağırlıklı program süresi, dakika cinsinden ve en yakın dakikaya yuvarlanır.

Bir çamaşır kurutma makinesi için standart olarak kabul edilen kullanım senaryosunda, genellikle üç tam yük ve dört yarım yük çalıştırma öngörülmektedir. Ayrıca, bu makinenin yılda yaklaşık 160 kez kullanıldığı varsayılmaktadır. Ev tipi çamaşır kurutma makinesinin enerji etiketlemesi ayrıntıları Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

Yıllık enerji tüketimini hesaplarken çamaşır kurutma kapasitesinin tam ve yarım yükteki kurutma süreleri ve enerji tüketimlerinin ağırlıklı ortalamaları dikkate alınarak ağırlaştırılmış kurutma süresi ve enerji tüketimi hesaplaması yapılır. Bu şekilde, gerçek kullanım senaryosuna daha uygun bir enerji tüketim tahmini elde edilir.



Şekil 2.3 Ev tipi çamaşır kurutma makinesi enerji etiketlemesi.[13]

Standart pamuklu programı için ağırlıklı program süresi (T_t) aşağıdaki gibi dakika cinsinden hesaplanır ve en yakın dakikaya yuvarlanır:

$$T_t = (3 \times T_{dry} + 4 \times T_{dry1/2}) / 7 \quad (2.4)$$

Burada,

T_{dry} = tam yükte standart pamuklu programı için program süresidir, dakika olaraktır ve en yakın dakikaya yuvarlanmıştır.

$T_{dry1/2}$ = yarım yükte standart pamuklu programı için program süresidir, dakika olaraktır ve en yakın dakikaya yuvarlanmıştır.

Ağırlıklı enerji tüketimi (E_t) aşağıdaki gibi kWh cinsinden hesaplanır ve iki ondalık basamağa yuvarlanır:

$$E_t = (3 \times E_{dry} + 4 \times E_{dry1/2}) / 7 \quad (2.5)$$

Burada,

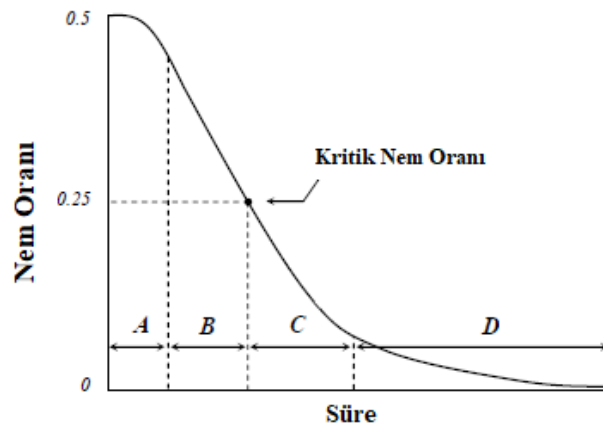
E_{dry} = standart pamuklu programının tam yükte, kWh cinsinden ve iki ondalık basamağa yuvarlanmış enerji tüketimi.

$E_{dry1/2}$ = standart pamuklu programının yarım yükte, kWh cinsinden ve iki ondalık basamağa yuvarlanmış enerji tüketimi.

2.3 Çamaşır Kurutma Makinesi Nem Alma Adımları

Kurutma makinelerinde nem almayı ıslak bir tekstil parçası içerisinde su buharının uzaklaştırılması olarak ifade edebiliriz. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için tambur içerisindeki su buharı kısmi basıncının proses süresince kendi doyma basıncı değerinin altında kalması gerekir. Çamaşırların kurutulması işlemi genellikle hava taşınımı prensibine dayanır. Sıcaklığı arttırılmış ve mutlak nemi az olan hava tambur içerisinde geçerken çamaşırların üzerinde kütle ve ısı transferi sağlayarak kurutma işlemini gerçekleştirir. Sıcaklık ve hava debisi kurutma adımlarında geçen süreyi doğrudan etkiler.

Çamaşır kurutma makinelerinde kurutma dört fazdan oluşmaktadır. Kurutma işleminin adımları ve nem oranındaki değişim Şekil 2.4’de[14] gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Çamaşır kurutma makinesi nem alma adımları

A - Isınma fazı

B - Sabit hızda nem alımı

C - 1.azalan hızda nem alımı

D - 2. azalan hızda nem alımı

Kurutma işleminin ilk adımı olan ısınma başında nem alma hızı oldukça düşük seviyededir. Proses havasının sıcaklığının artmasıyla çamaşırlar ısınmaya başlar ve buharlaşma süreci de hızlanmış olur. Buharlaşma hızının artmasıyla beraber giderek artar ve bir sonraki adım olan sabit hızda nem alımı başlar. Bu aşamada çamaşır yüzeyinden buharlaşan nem ile içerisinden yüzeyine olan kütle transferinin miktarları eşit seviyelerdedir. Bu sebeple de sabit bir kurutma adımı gerçekleşmektedir. Bu adım boyunca çamaşırın yüzeyinden buharlaşan nem için kullanılan enerji havadan çamaşıra geçen ısı miktarı ile eşit olduğundan bu süreçte sıcaklık sabit kalmaktadır.

Çamaşır içindeki nem miktarının kritik değerine ulaşması ile çamaşır içerisinden yüzeyine gerçekleşen kütle transferi hızı buharlaşma hızının altında kalmış olur. Bu kritik nem miktarının aşılmasıyla çamaşır yüzeyinin bir kısmı ıslak durumda kalırken bir kısmı da kurur. Bu nedenle de kurutma hızı yavaşlayan adıma geçmektedir. Bu süreç azalan hızda kurutmanın ilk adımını oluşturur. Diğer ikinci adımında ise çamaşır yüzeyindeki kısmi buhar basınç değerinin doyma basıncından düşük olması ve hava ile çamaşır arasındaki sıcaklık farkının azalması sebepleri ile ısı transferi miktarı düşer. Bu sebeple de Şekil 2.4 D kısmında görüldüğü gibi nem alma hızı azalan bir grafik oluşturur.

Çamaşır kurutma prosesinde hem kütle transferi hem de ısı transferi birlikte gerçekleşir. Çamaşır yüzeyindeki nemin havaya aktarılması sırasında ısı transferi ve kütle transferi gerçekleşmektedir.

Sabit hızda nem alımı adımında taşınım yolu ile havadaki ısı çamaşır yüzeyine geçmektedir. Taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dQ}{dt} = \bar{h} A (T_A - T_S) \quad (2.6)$$

Çamaşır yüzeyinden buharın kütle transferi ile havaya geçişi ise aşağıdaki şekilde hesaplanır.

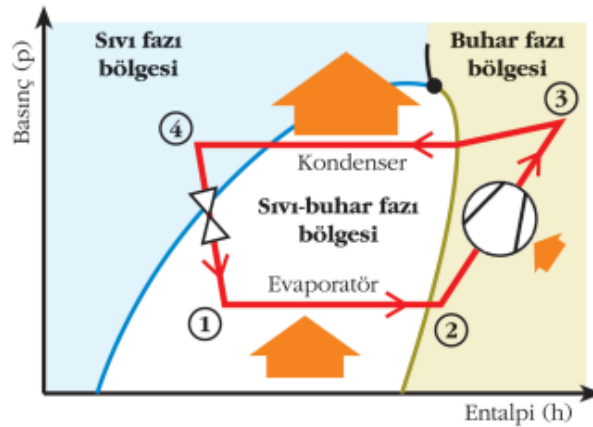
$$\frac{dN_v}{dt} = \bar{h}_m A (C_{v,A} - C_{v,S}) \quad (2.7)$$

Çamaşır yüzeyindeki nem miktarının kritik nem oranına ulaşması ve nem alma hızının azalmasıyla birlikte farklı modeller oluşturulmuştur. Bu adımdaki nem alma hızını etkileyen en önemli faktör çamaşır içerisindeki nemin yüzeye olan hareketidir. Çamaşır içerisindeki bu nemin yüzeye hareketi oluşturulan serbest suyun hareketi, buharın transferi ve kılcal akış gibi modellerle açıklanmaktadır.

2.4 Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makineleri

Bu tip çamaşır kurutma makinelerinin diğer tiplerden en önemli farkı, buhar sıkıştırılmalı soğutma çevrimine sahip olmalarıdır. Isı transferi genellikle sıcak ortamdan soğuk ortama doğal olarak gerçekleşir. Ancak ters yönde bir ısı transferi doğal olarak gerçekleşmez. Ters yönde bir ısı transferinin gerçekleşebilmesi için soğutma makinası veya ısı pompası gibi sistemlere ihtiyaç duyulur. Soğutma makineleri ve ısı pompaları aynı çalışma prensiplerini paylaşıyor da kullanım amaçları farklılık gösterir. Isı pompalı bir sistem, ortamın çevre sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta olmasını sağlamak için çalışırken, soğutma makineleri ortamın çevre sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta olmasını sağlamak için kullanılır.

Isı pompası sistemini kompresör, buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve kısılma vanası oluşturmaktadır. Şekil 2.5’de ısı pompası sisteminin çalışma prensibi P-h grafiği üzerinden şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Isı pompası çalışma prensibinin P-h grafiği üzerinden gösterimi.[15]

2-3: Soğutucu akışkan gaz fazında girdiği kompresörde sıkıştırılarak sıcaklığı ve basıncı yükseltilir ve gaz fazında kondensere (yoğuşturucu) gider.

3-4: Gaz fazında kondensere (yoğusturucu) giren soğutucu akışkan burada yoğuşarak sıvı fazına geçer ve bu sırada ortaya çıkan enerjisini ısıtmak istediğimiz ortama, örneğin ısıtma suyuna aktarır.

4-1: Soğutucu akışkan basıncı çok az düşmüş ve doyma sıcaklığından daha düşük bir seviyede soğumuş olarak sıvı fazında kondenserden çıkar ve genişleme valfine gelir. Buradan geçerek basıncı ve sıcaklığı düşürülmüş olan soğutucu akışkan az bir miktarı buhar ancak daha ziyade sıvı fazında evaporatöre (buharlaştırıcı) girer.

1-2: Buhar-sıvı (ıslak buhar) fazında buharlaştırıcıya giren akışkan burada çevresinden (toprak, su, hava vb.) enerji çekerek buhar fazına geçer ve buharlaştırıcıdan tamamen buhar fazında çıkarak tekrar kompresöre gider.[15]

Isı pompalarında ısıl değerlendirme etkinlik katsayısı(COP) ile yapılmaktadır. Etkinlik katsayısı denklem 2.8’de[16] gösterildiği gibidir.

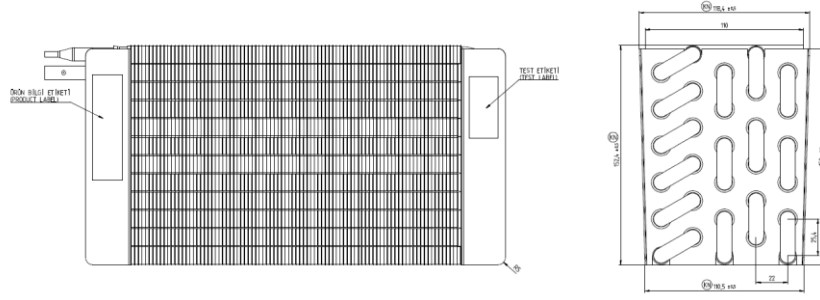
$$COP = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}} = \frac{\text{ısıtma etkisi}}{\text{iş girişi}} \quad (2.8)$$

2.4.1 Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makineleri Elemanları

2.4.1.1 Isı Değiştiriciler

Isı pompalı çamaşır kurutma makinalarında temelde 2 adet ısı değiştirici kullanılmaktadır. Nemli havadan suyun uzaklaştırılmasını sağlayan ve boyut olarak daha küçük yapıda olan ısı değiştirici buharlaştırıcı olarak adlandırılır. Boyutsal olarak buharlaştırıcıdan daha büyük olan ve havanın ısıtılarak tekrardan nem alma kapasitesinin artmasını sağlayan bileşen yoğusturucudur.

Akışkan tarafında ise kısılma vanasından çıkan iki fazlı soğutucu akışkan buharlaştırıcıda, havadan aldığı ısı ile doymuş gaz veya kızgın buhar haline gelmektedir. Daha sonra kompresörde sıcaklık ve basıncı artırılarak yoğusturucuya gelen akışkan, burada ısı transferi ile hava sıcaklığını arttırmaktadır.



Şekil 2.6 Isı değıştirici

2.4.1.2 Kompresör

Isı pompalarında sistemin, akışkanın sıcaklık ve basıncını arttırmak için kompresör kullanılmaktadır. Sistemin ihtiyaçlarına göre kullanılan kompresör tipi değışmektedir. Isı pompalı çamaşır kurutma makinalarında kullanılan kompresör tipi dönel(rotary) kompresördür. İstenilen kurutma süresi ve enerjiye göre kullanılan kompresör verimi ve COP(etkinlik katsayısı)'si değışmektedir. Dönel tip kompresör görseli Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 Rotary Kompresör

2.4.1.3 Kısılma Vanası(Kapileri)

Isı pompası sistemlerinde, yoğunlaştırucudan yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta çıkan soğutucu akışkanın sıcaklık ve basıncı kapileri kullanılarak düşürülmektedir. Kapileri boy ve çap ölçüleri, sistem basıncını doğrudan etkilemektedir. Kapileri görseli şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Kısılma vanası(kapileri)

2.4.1.4 Soğutucu Akışkan

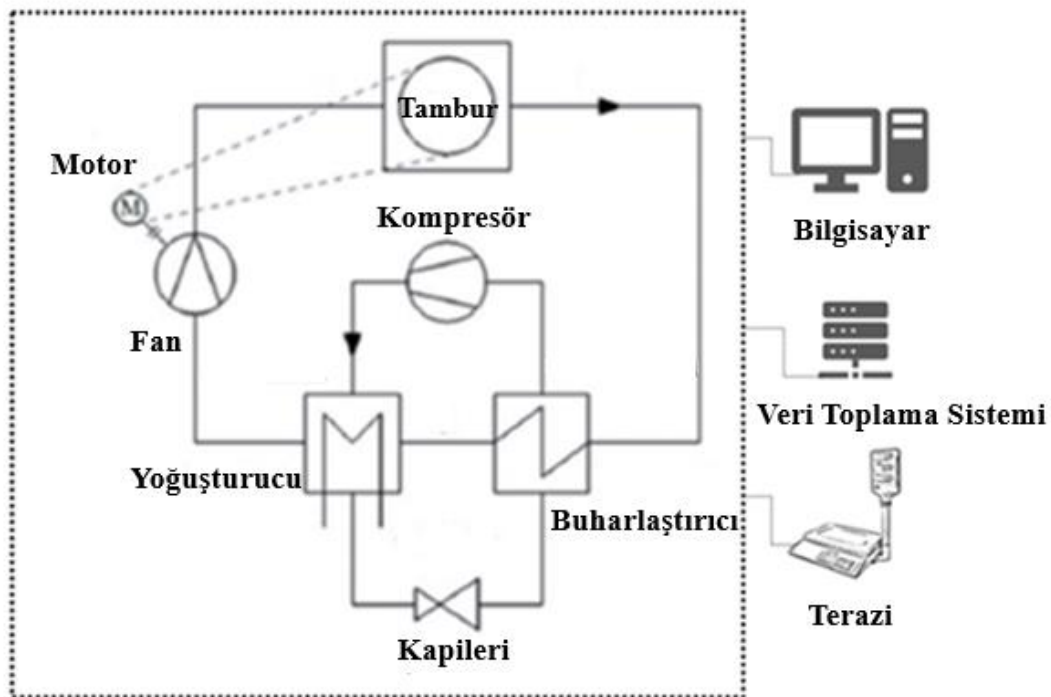
Isı pompası sistemlerinde soğutucu akışkan, ısıнын bir yerden başka bir yere aktarılmasında kullanılan bir taşıyıcı görevi görmektedir. Isı pompalı çamaşır kurutma makinalarında soğutucu akışkan sayesinde buharlaştırıcıda soğutulan hava yoğunlaştırıcuda ısıtılabilir. Bu çalışma kapsamında düşük GWP(küresel ısınma potansiyeli) ve yüksek verimi ile bilinen R290 gazı kullanılmıştır.

GWP, sera gazlarının küresel ısınmaya etkisini karşılaştırmak için oluşturulmuş bir değerdir. Bu değer ne kadar yüksek olursa, sera gazının küresel ısınmaya etkisi de o kadar yüksek olmaktadır.

Tüm bu yönetmeliklere uyum, ısı pompası performansını artırılması kriterleri göz önüne alındığında sektördeki yüksek enerji sınıflı çamaşır kurutma makinelerinde R290 soğutucu akışkanı kullanılmaktadır. R290 da yanıcı bir soğutucu akışkandır. Sektördeki birçok makinede sabit kapasiteli kompresör kullanılmaktadır. Sabit kapasiteli kompresör ve şarj miktarının limitinin getirmiş olduğu zorluklar düşük enerji tüketimi ve kısa çevrim süresine sahip kurutucu tasarımını güçleştirmektedir.

3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TEORİK ANALİZ

Deneysel çalışmalar için ev tipi bir ısı pompalı çamaşır kurutma makinesi üzerinde tasarım değişiklikleri yapılmıştır. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



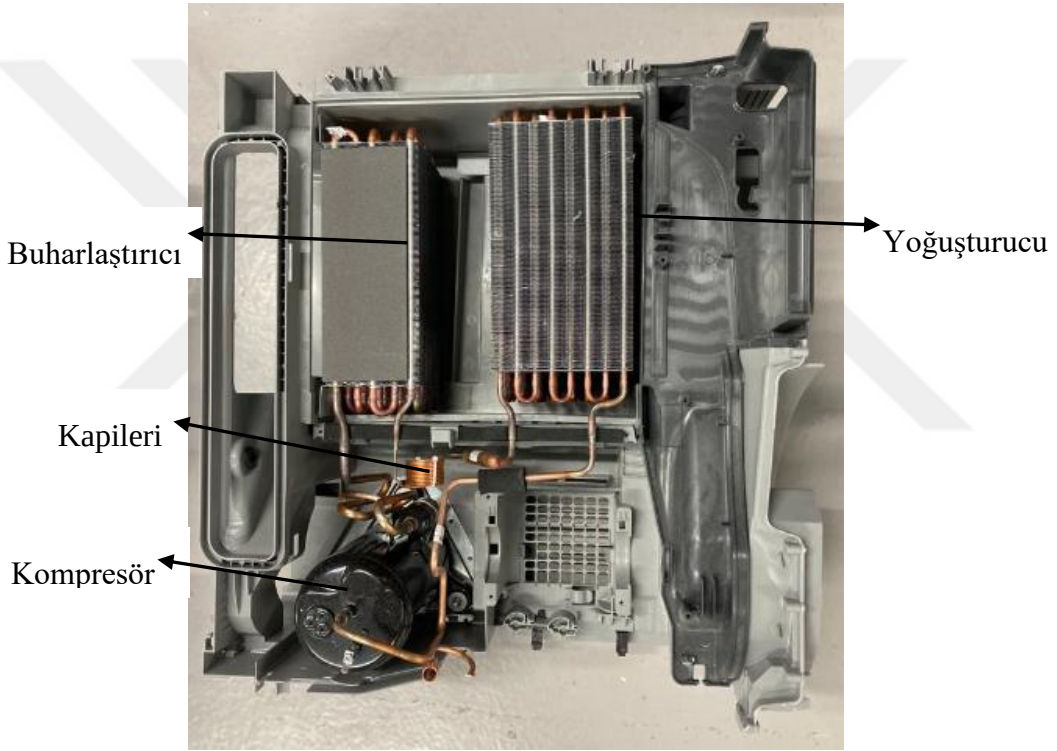
Şekil 3.1 Deney düzeneği şeması

Bu çalışmada kurulan deney düzeneği ısı pompalı kurutma makinesinin; değişken kapasiteli kompresörünün farklı devirlerde(rpm), proses havası fanının farklı hızlarda(rpm) ve bu farklı fan hızlarından dolayı değişken proses hava debisinin kurutma makinesinin enerji tüketimi ve kurutma çevriminin süresine etkisini incelemek için tasarlanmıştır. Isı pompası sisteminde 150gr R290 soğutucu akışkanı kullanılmıştır. Deneyler 4,6 ve 8kg olmak üzere üç farklı yük kapasitesi ile gerçekleştirilmiştir.

3.1 Deney Düzeneğinin Tanıtılması

Deney düzeneğinde, soğutucu akışkan ve hava çevrimleri olmak üzere iki adet kapalı çevrim bulunmaktadır. Gerçekleştirilen testler sonrasında veriler bir veri toplama sistemine, sonrasında da bilgisayara aktarılmıştır.

Şekil 3.2’de görülen ısı pompalı kurutma makinesi, kompresör, ısı değiştiriciler ve kapileri elemanlarından oluşmaktadır. Soğutucu akışkan olarak R290 sisteme şarj edilmiştir. Ayrıca kurutma prosesi fazları sırasında kompresör güç tüketimini minimumda tutabilmek için Şekil 3.3’de görseli paylaşılan değişken devirli kompresör kullanılmıştır.

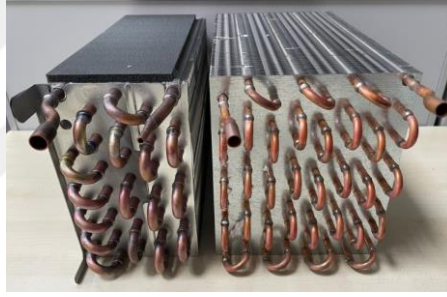


Şekil 3.2 Isı pompası çevrim elemanları



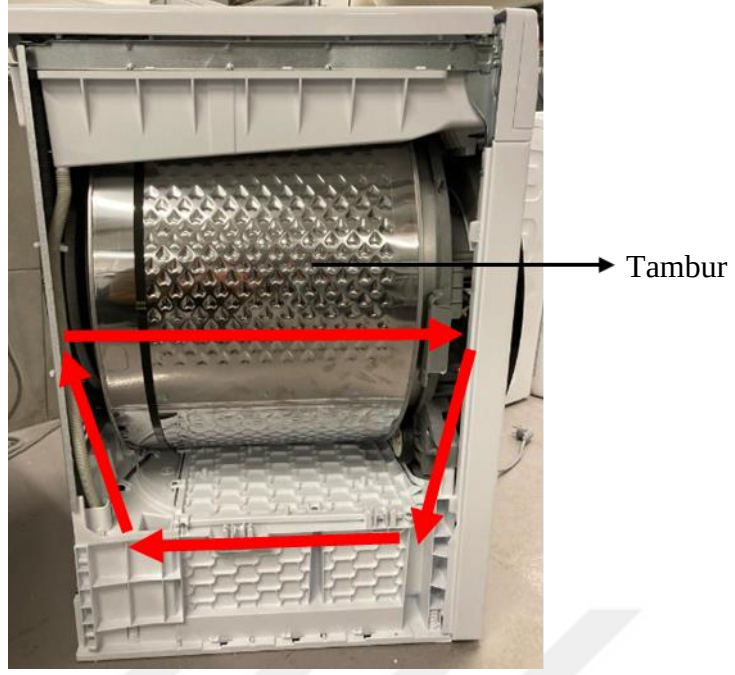
Şekil 3.3 Değişken devirli rotary(dönel) kompresör

Isı pompasında Şekil 3.4’de gösterilen 2 adet bakır borulu ısı değiştirici kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Isı değiştiriciler

Deney düzeneği hava çevriminde tambur, filtre, proses fanı, motor ve ısı değiştiriciler bulunmaktadır. Hava çevriminin kurutma makinesi üzerinde gösterimi Şekil 3.5’dedir.



Şekil 3.5 Hava çevrimi

Çamaşır kurutma makinelerinde, tekstiller tamburun içine yerleştirilir. Tamburun arka tarafında bulunan deliklerden geçen hava, yoğuşturucudan geçerken ısınır ve tambur içerisindeki ıslak çamaşırlardan nemi alarak filtreye geçer. Filtreden geçen nemli hava, buharlaştırıcıya geçerek burada nemini bırakır. Daha sonra proses fanı yardımıyla tekrar yoğuşturucudan geçerek tambura geri döner ve bu döngüyü tekrarlar. Çamaşırlardan çıkan havlar filtreye yakalanarak, ısı değiştiricilere gitmeleri engellenir. Bu sayede havanın ısı değiştirici finlerinden geçişi sırasında havların herhangi bir tıkanmaya neden olması önlenmiş olur. Her testin sonunda, filtreye biriken hava temizlenir. Tamburun içinde, çamaşırların homojen bir şekilde kurummasını ve topak oluşumunu engellemek için iki adet kanat bulunmaktadır.



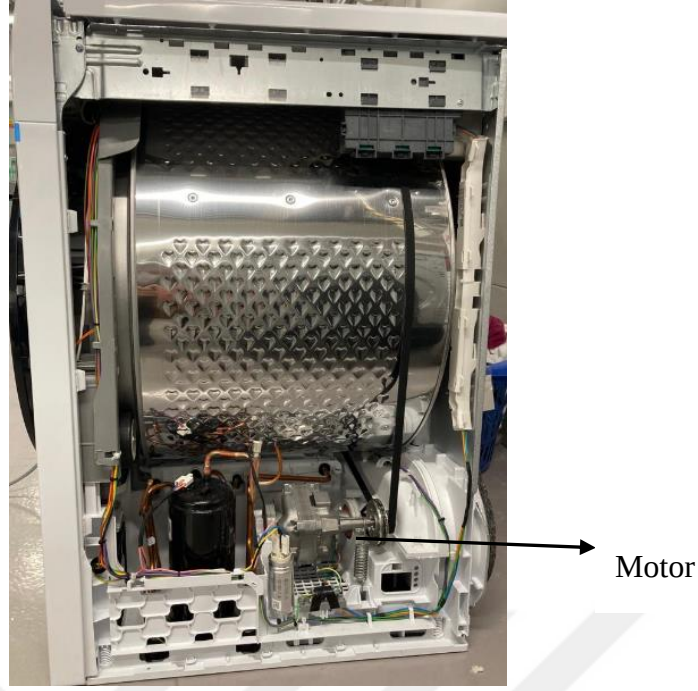
Şekil 3.6 Hav filtresi ve tambur

Kurutucu içerisindeki kurutma havası, proses fanı sayesinde devirdaim etmektedir. Fan, mil yardımıyla devir ayarını yapmaya yardımcı olacak şekilde bir motora bağlanmıştır. Motor devrindeki değişikliğe bağlı olarak fan devri de kurutma havası debisi de değiştirilebilmektedir. Şekil 3.7’de proses fanının görseli verilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada 3 farklı motor devri değeri test edilmiştir



Şekil 3.7 Proses fanı

Şekil 3.8’de gösterilen makine üzerindeki motor ile hem proses fanına hem de tambura tahrik verilmektedir. Proses fanındaki tahrik ile proses havası devirdaimi sağlanırken, tambur tahriği ile tambura dönme hareketi verilmektedir. Tamburdaki dönüş hareketleri ile çamaşırlar homojen bir şekilde kurutulmaktadır.



Şekil 3.8 Tahrik motoru

3.1.1 Sıcaklık Ölçümü

Deney düzeneğinde proses havası ve soğutucu akışkan çevriminin havasının sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla farklı noktalara T-tipi ısıl çiftler yerleştirilmiştir.

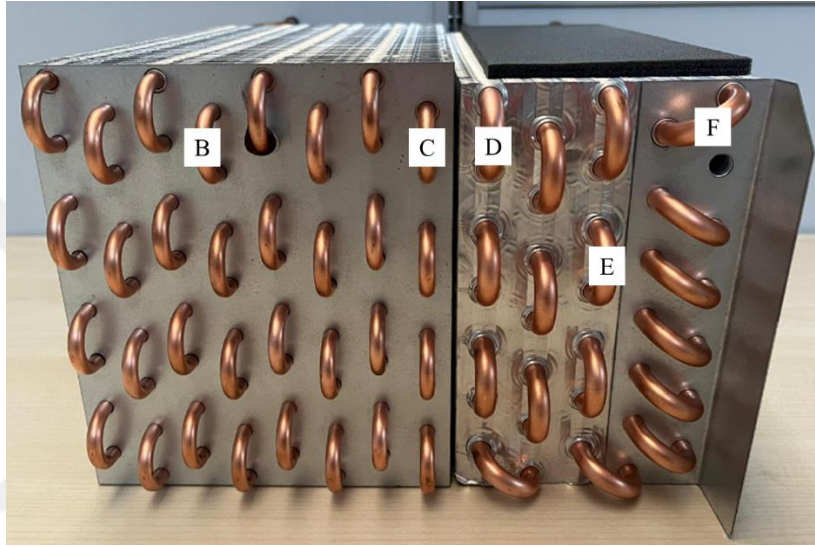
Soğutucu akışkan sıcaklığının belirlenmesi ve deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların kıyaslanması için ısı pompası sisteminde 6 noktaya ısıl çift yerleştirilmiştir. Tablo 3.1’de hangi konumlara yerleştirildikleri belirtilmiş olup Şekil 3.9’da eşanjörler üzerindeki konumları görsel olarak verilmiştir. Ayrıca Tablo 3.2’de de proses havası tarafındaki sıcaklık ölçümü için ısıl çift konumları paylaşılmıştır ve şematik görseli Şekil 3.10’da verilmiştir.

Tablo 3.1 Isı pompası ısıl çiftler

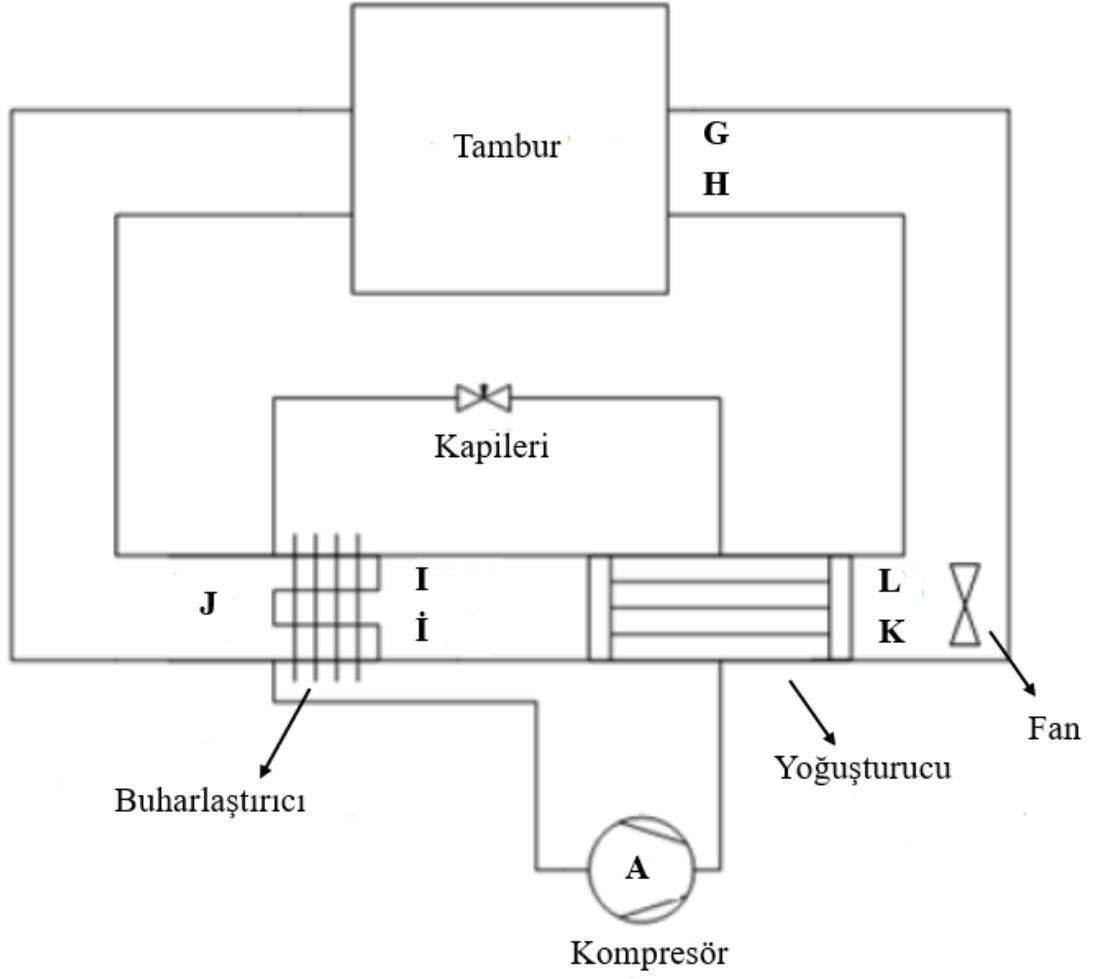
Isıl Çift	Bağlantı konumu
A	Kompresör Kafa
B	Yoğuşturucu 16. Pas
C	Yoğuşturucu Çıkışı
D	Buharlaştırıcı Girişi
E	Buharlaştırıcı 9. Pas
F	Buharlaştırıcı Çıkışı

Tablo 3.2 Hava çevrimi ısıt çiftler

Isıl Çift	Bağlantı konumu
G	Tambur Girişi Sağ
H	Tambur Girişi Sol
I	Buharlaştırıcı Çıkışı Sağ
İ	Buharlaştırıcı Çıkışı Sol
J	Filtre
K	Yoğuşturucu Çıkışı Sağ
L	Yoğuşturucu Çıkışı Sol



Şekil 3.9 Eşanjörlerdeki ısıt çift konumları



Şekil 3.10 Hava tarafı ısıt çift konumları

Testler sırasında deney düzeneğine takılan k tipi ısılıçiftlerin sıcaklık ölçümleri, kurutma makinesinin güç, enerji ve süre ölçümleri veri toplama sistemi(VTS) ile yapılmaktadır. Şekil 3.11’de veri toplama sisteminin görseli verilmiştir. Ayrıca B bölümünde testler sırasında kullanılan ısılıçiftlerin kalibrasyon tablosu paylaşılmıştır.



Şekil 3.11 Veri toplama sistemi

Deney düzeneğinde kapalı çevrimdeki proses havasının nem değeri belirlenmiştir. Bunun için de farklı noktalarda Honeywell HIH-5030 model nem sensörleri kullanılmıştır. Şekil 3.12’de kullanılan nem sensörünün görseli verilmiştir.



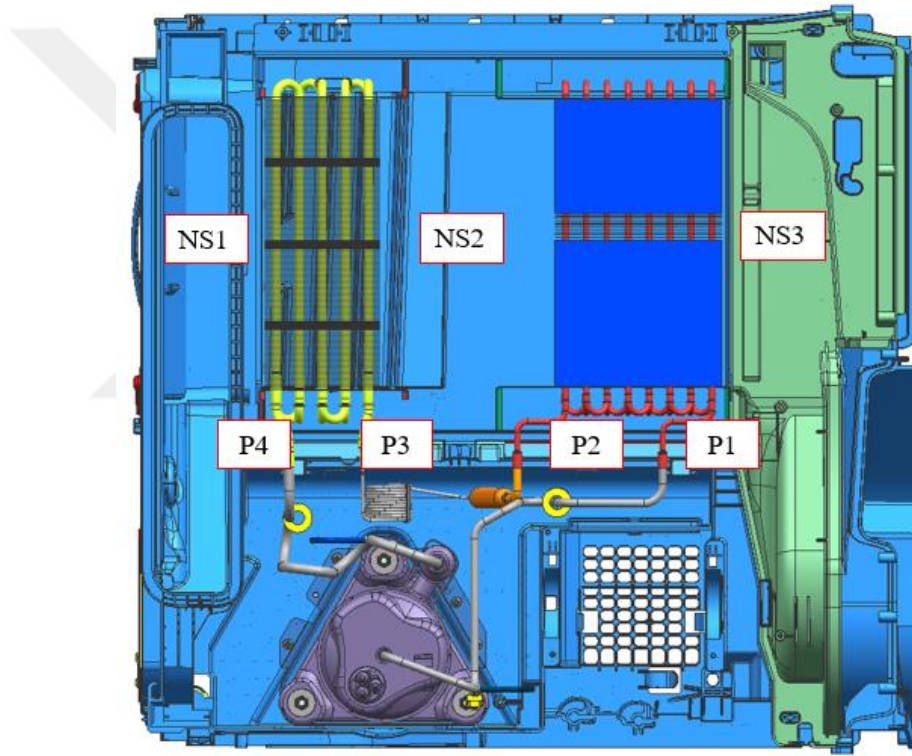
Şekil 3.12 Nem sensörü

Proses havasının bağıl nem değerinin farklı noktalarda ölçülmesi amacıyla yerleştirilen nem sensörlerin konumları Tablo 3.3’de belirtilmiştir.

Tablo 3.3 Bağıl nem sensör konumları

Nem Sensörü	Bağlantı konumu
NS1	Buharlaştırıcı Girişi
NS2	Buharlaştırıcı Çıkışı
NS3	Yoğuşturucu Çıkışı

Isı pompasındaki soğutucu akışkanın çalışma basıncının bulunması amacıyla 4 adet WIKA marka basınç transdüseri kullanılmıştır. Bunlar kompresör çıkış, yoğuşturucu çıkış, buharlaştırıcının giriş ve çıkış noktalarına konumlandırılmıştır. Şekil 3.13’de nem ve basınç sensörlerinin deney düzeneğindeki konumlarının gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.13 Nem ve basınç sensörleri konumları

3.1.2 Dijital Hassas Terazi

Testlerde kullanılan çamaşırlar her çevrim öncesinde ve sonrasında hassas terazi ile ölçülerek test sonu nem oranı belirlenmiştir. Ayrıca testler sırasında anlık olarak yoğuşan su miktarı da bu terazi yardımıyla okunmuştur. Şekil 3.14’de terazi ve kap görseli verilmiştir.



Şekil 3.14 Dijital hassas terazi

3.2 Belirsizlik Analizi

Deney düzeneğinde veri toplama sistemi ve ölçüm aletlerinden elde edilen verilerle SMER, MER ve nem alma hızı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan sıcaklık, ağırlık ve bağıl nem verilerinin belirsizliği elde edilen değerin belirsizliğinin hesaplanmasında büyük bir etkiye sahiptir.

Kline ve McClintock tarafından geliştirilen yöntemde, hesaplanması gereken P büyüklüğünün belirsizliği, deneysel olarak elde edilen n adet bağımsız değişken $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ için ait olan belirsizlik değerleri $w_1, w_2, w_3 \dots w_n$ ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.1 ile bu P değeri hesaplanabilmektedir.

$$P = P(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \quad (3.1)$$

Bu yöntemde toplam hata oranı w_p olarak adlandırılmaktadır.[15] Denklem 3.2'ye, Tablo 3.4'de belirtilen hata oranlarının konulması ile birlikte her bir test için belirsizlik sonuçları oluşturulmuştur. Belirsizlik değerleri A bölümünde ek olarak paylaşılmıştır.

Tablo 3.4 Ölçüm cihazları hata oranları

Ölçüm Ekipmanı	Kısaltma	Hata Oranı
Süre Ölçümleri VTS Kaynaklı	$w_{\Delta ta}$	$\pm 0,1$ sn
Süre Ölçümleri Operatör Kaynaklı	$w_{\Delta tb}$	$\pm 0,1$ sn
Hassas Terazı Kaynaklı	w_{ma}	$\pm 0,15$ gr
Nem Sensörü VTS Kaynaklı	$w_{\theta a}$	$\pm 1,8$ %
Enerji VTS Kaynaklı	w_{Ea}	$\pm 1,1$ Wh
Enerji VTS Operatör Kaynaklı	w_{Eb}	$\pm 0,2$ Wh
Isılçift VTS Kaynaklı	w_{Ta}	$\pm 0,2$ °C
Basınç Transdüseri VTS Kaynaklı	w_{Pa}	$\pm 0,5$ Pa

$$w_p = \pm \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Bağıl nem ölçümleri için nem sensöründen kaynaklanan hata $w_{\theta a}$, Denklem 3.3'deki gibi hesaplanabilir.

$$w_{\theta} = \pm w_{\theta a} \quad (3.3)$$

Terazi ölçümleri için hassas teraziden kaynaklanan hata w_{ma} olmak üzere Denklem 3.4'deki gibi hesaplanabilir.

$$w_m = \pm w_{ma} \quad (3.4)$$

Süre ölçümleri için VTS'den kaynaklanan hata w_{ta} , operatörden kaynaklanan hata w_{tb} olmak üzere hata Denklem 3.5'deki gibi hesaplanabilir.

$$w_t = \pm [(w_{ta})^2 + (w_{tb})^2]^{1/2} \quad (3.5)$$

Isılçift ölçümleri için ısıılçiftten kaynaklanan hata w_{Ta} , VTS sisteminden kaynaklanan hata w_{Tb} olmak üzere hata Denklem 3.6'deki gibi hesaplanabilir.

$$w_T = \pm [(w_{Ta})^2 + (w_{Tb})^2]^{1/2} \quad (3.6)$$

Basınç ölçümleri için basınç transdüserinden kaynaklanan hata w_{Pa} olmak üzere hata Denklem 3.7'deki gibi hesaplanabilir.

$$w_P = \pm w_{Pa} \quad (3.7)$$

Kurutma işleminde harcanan enerji tüketiminin ölçülmesinde ortaya çıkabilecek hatalar için VTS'den kaynaklanan hata w_{Ea} , operatörden kaynaklanan hata w_{Eb} olarak alınır. Bu bağlamda Denklem 3.8'deki gibi enerji tüketiminde yapılabilecek toplam hata hesaplanabilir.

$$w_E = \pm \left[(w_{Ea})^2 + (w_{Eb})^2 \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

SMER için belirsizlik w_S Denklem 3.9, MER için belirsizlik w_M Denklem 3.10 ve nem alma hızı $w_{\dot{m}_{su}}$ Denklem 3.11 ile bulunabilir.

$$w_S = \pm \left[\left(\frac{\partial S}{\partial m} w_m \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial E} w_E \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

$$w_M = \pm \left[\left(\frac{\partial M}{\partial m} w_m \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta t} w_{\Delta t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

$$w_{\dot{m}_{su}} = \pm \left[\left(\frac{\partial M}{\partial m} w_{Ta} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta t} w_{\theta a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

3.3 Deneylerin Yapılışı

Bu çalışmada gerçekleştirilen testler Arçelik Çamaşır Kurutma Makinası İşletmesi AR-GE Performans Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Testler iki tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar tekrarlı testlerin ortalaması alınarak analiz edilmiştir. Testlerin yapıldığı laboratuvar koşulları Tablo 3.5'de belirtilmiştir. Her test sonrasında makinenin şartlanması için aynı koşullarda 6 saat bekletilmiştir.

Tablo 3.5 Test koşulları

Parametre	Değer
Laboratuvar Sıcaklığı	23±2 °C
Laboratuvar Bağıl Nemi	%55 ±5
Şebeke Gerilimi	230±2 V

Testler EN 61121:2012 standardına uygun olarak yapılmıştır. Testler 4, 6 ve 8kg yükler ile gerçekleştirilmiştir.

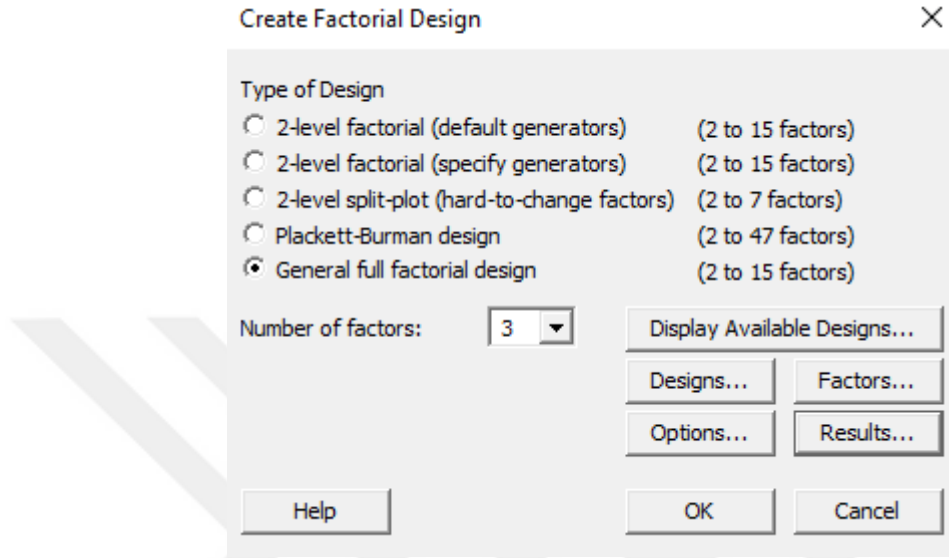
Testlerde kullanılan yükler EN 61121:2012 standardında belirtilen %100 pamuklu çamaşırlardır. Yükün hazırlanış aşamasında ilk etapta çamaşırlar çamaşır makinesinde 15 °C su sıcaklığında standarda uygun deterjan ile yıkanmaktadır. Yıkama işlemi tamamlandıktan sonra çamaşırlar sıkma programına alınarak burada kurutma testleri öncesi olması gereken %60 nem değerine kadar sıkılmaktadır. Sıkma programı sonrası %60 değeri altına düşülmesi durumunda ise su ile ıslatılarak bu değere ulaşması sağlanmaktadır.

Testlerin gerçekleştiriliş sürecinde ise ilk etapta odanın Tablo 3.5'deki değerleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Değerlerin kontrolü sağlandıktan sonra çamaşırlar kurutma makinesine yüklenir. Testler başlamadan önce test düzeneğindeki sensörlerin ve veri alınan sistemin aktif olup olmadığı kontrol edilir. Sonrasında makine çalıştırılır. Çalışma esnasında standartta belirtilen şebeke gerilim ve frekans değerlerinin sağlanıp sağlanmadığına bakılır. Testler makinenin bitiş sinyalini vermesi ile tamamlanır. Test sonrasında çamaşırlar tekrar tartılarak başlangıç ve test sonrası nem miktarı belirlenir. Ayrıca veri toplama sisteminden test sonrası makinenin tükettiği enerji miktarı ve çalışma süresi not edilerek test prosedürü tamamlanmış olur.

3.4 Deney Tasarımının Oluşturulması

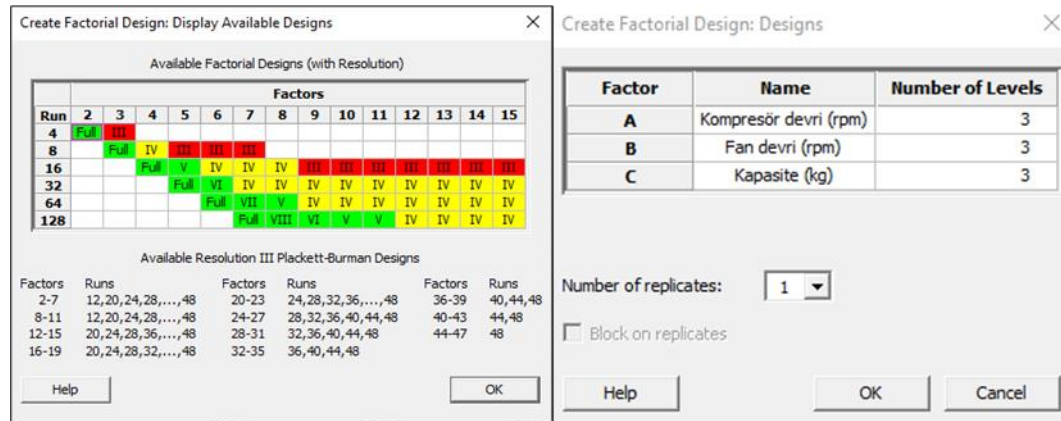
Deneyisel çalışma stratejisini doğru bir şekilde uygulamak ve gerekli olan deney sayısını tespit etmek amacıyla DOE yöntemi uygulanmıştır. Deney tasarımı (DOE), girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Minitab 18.0 istatistiksel analiz programı, deney tasarımını oluşturmak ve sonuçları analiz etmek için kullanılmıştır. Bu program, birden fazla bağımsız değişkenle

bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi hızlı ve güvenilir bir şekilde analiz etme imkanı sağlamaktadır. Ayrıca, Minitab programı nicel ve nitel girdilerle nicel çıktılar arasındaki ilişkiyi başarılı bir şekilde kurmaktadır. Deney sonuçlarının Minitab üzerinde analiz edilmesi için nasıl bir DOE tasarlandığı, Şekil 3.15'de gösterilmektedir.



Şekil 3.15 Minitab programında deney tasarımının oluşturulması

Şekil 3.16'da deney tasarımına göre 3 değişkenli bir deneyin 2 tekrarlı olacak şekilde toplamda kaç deney yapılacağını belirlediği program görselleri paylaşılmıştır.



Şekil 3.16 Değişken sayısına göre yapılması gereken deney sayısı

Minitab DOE yöntemi analizi ile 27 adet deneyin yapılması gerektiği hesaplanmıştır.

Tablo 3.6 Deney matrisi

Test No	Kompresör (rpm)	Fan Hızı (rpm)	Kapasite (kg)
1	1500	2200	4
2	1500	2200	6
3	1500	2200	8
4	1500	2400	4
5	1500	2400	6
6	1500	2400	8
7	1500	2600	4
8	1500	2600	6
9	1500	2600	8
10	1800	2200	4
11	1800	2200	6
12	1800	2200	8
13	1800	2400	4
14	1800	2400	6
15	1800	2400	8
16	1800	2600	4
17	1800	2600	6
18	1800	2600	8
19	2100	2200	4
20	2100	2200	6
21	2100	2200	8
22	2100	2400	4
23	2100	2400	6
24	2100	2400	8
25	2100	2600	4
26	2100	2600	6
27	2100	2600	8

3.5 Deney Sonuçları

3.5.1 Deney Parametrelerinin Enerji Tüketimi ve Kurutma Süresine Etkisi

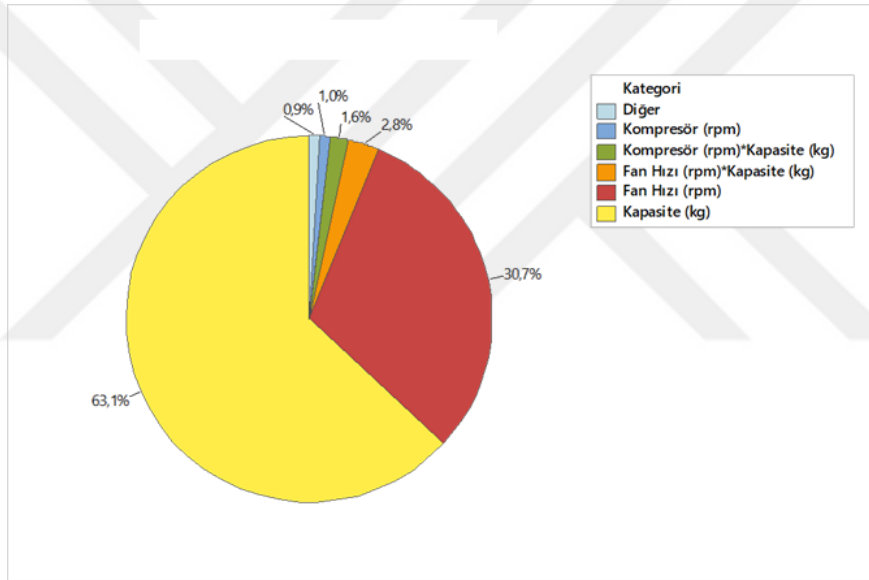
Yüksek kapasiteli ve enerji verimli çamaşır kurutma makinasının tasarlanması için seçilen 3 parametrenin kurutma süresi ve enerji tüketimine etkileri incelenmiştir. Parametrelerin etki derecelerini belirlemek için Minitab18.0 programı kullanılarak

6 Sigma dinamikleriyle analizler yapılmıştır. Seçilen parametreler ve değerleri Tablo 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.7 Deney parametreleri

Çamaşır Kapasitesi [kg]	Kompresör Devri [rpm]	Fan Hızı [rpm]
4	1500	2200
6	1800	2400
8	2100	2600

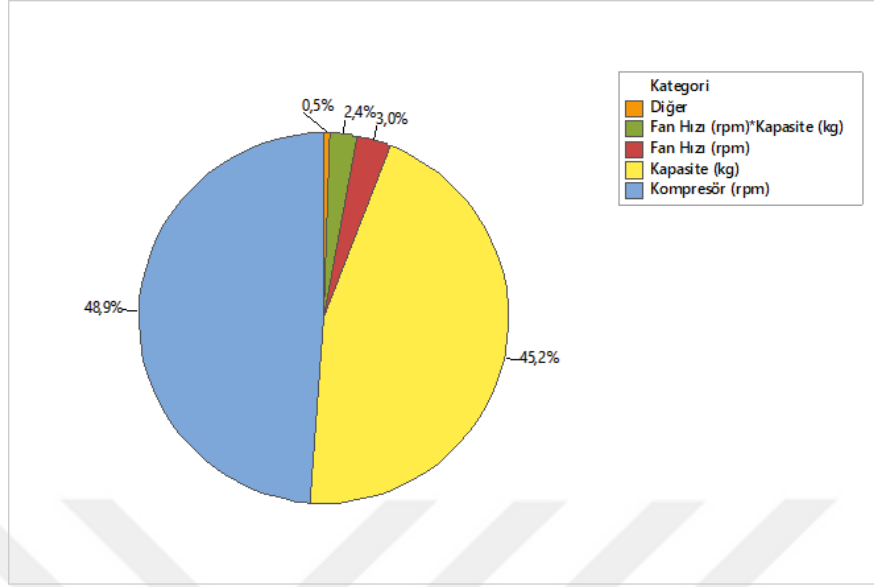
Deneysel veriler analiz edilip enerji tüketimi ve süre üzerinde en etkili parametreler belirlenmiştir. Şekil 3.17’de de görüldüğü üzere enerji tüketiminde çamaşır kapasitesi, fan hızının etkili olduğu belirlenmiştir. Birim enerji tüketiminde en etkili faktörün ise kapasite olduğu görülmüştür.



Şekil 3.17 Kilogram başına enerji tüketimine etki eden parametreler

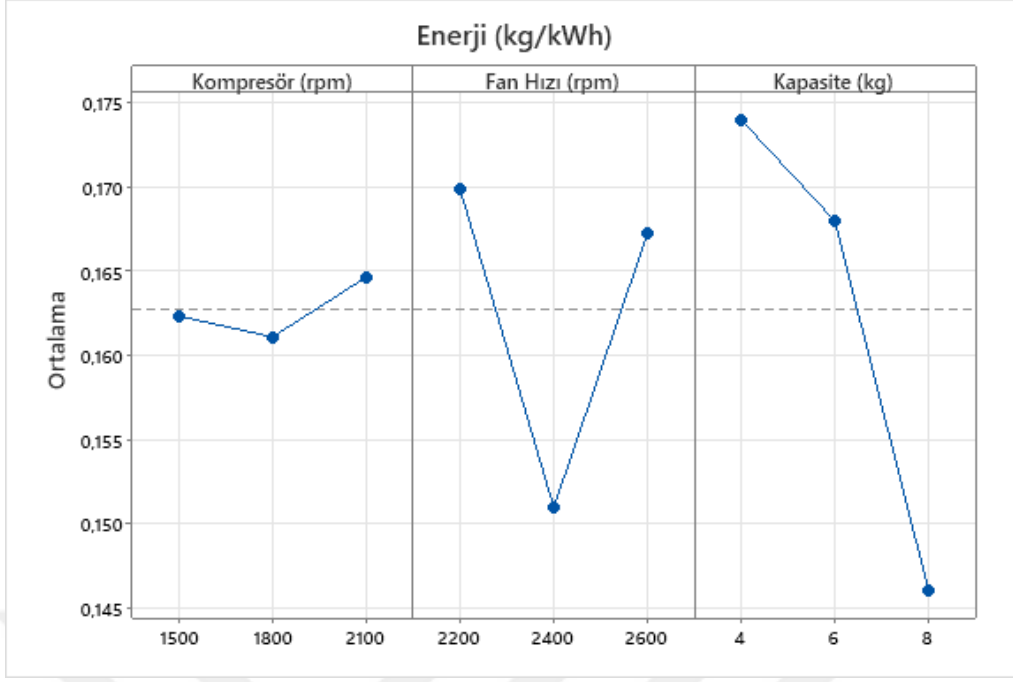
Şekil 3.18’de kilogram başına kurutma süresinde de kompresör rpm, çamaşır kapasitesi ve fan hızının etkisi gösterilmektedir. Kurutma süresi açısından en etkili

parametre olarak kompresör devri ve bunun yanı sıra çamaşır kapasitenin de kompresör devrine yakın bir değerde etkili olduğu tespit edilmiştir.



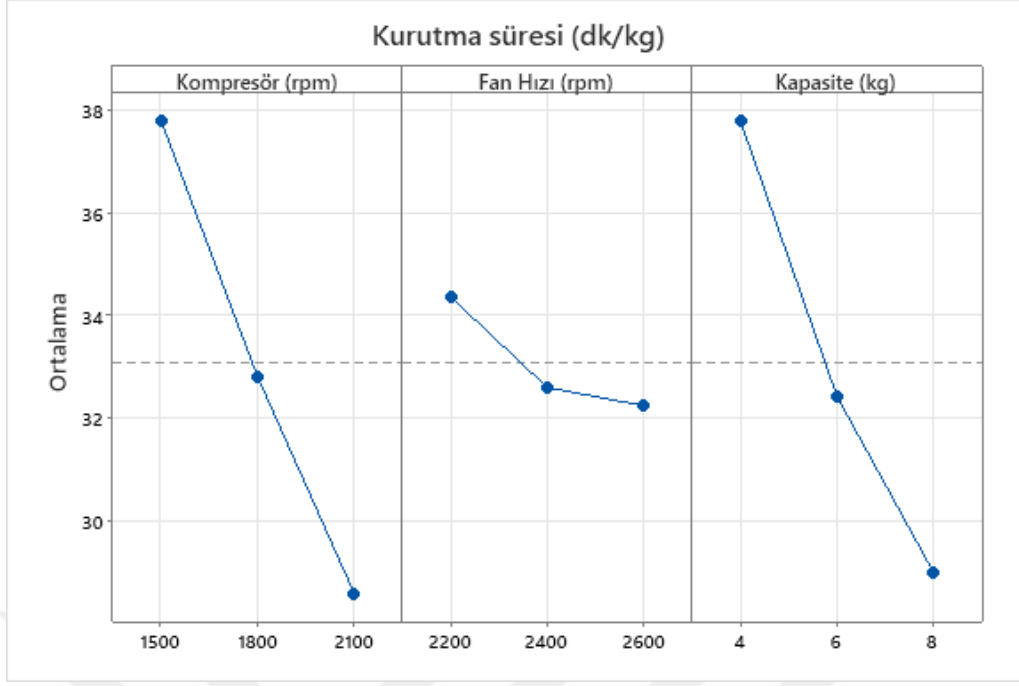
Şekil 3.18 Kilogram başına kurutma süresine etki eden parametreler

Şekil 3.19’da görülen ana etki grafiğinde kompresör rpm’in tekil olarak en az etkili parametre olduğu görülmüştür. Enerji tüketimini etkileyen parametreleri ayrı ayrı değerlendirdiğimizde ise 2100 rpm’de çalışan kompresörün enerji tüketimini arttırdığı belirlenmiştir. 2100 rpm enerji tüketimi daha yüksek çıksa da üç farklı devir birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Fan hızında ise 2400rpm’de çalışan fanın enerji tüketiminde 2200 ve 2600 rpm’e göre optimum nokta olduğu görülmüştür. 4,6 ve 8 kg çamaşır kapasitelerinde ise 8 kg kapasitesinde kilogram başına enerji tüketiminin en düşük olduğu görülmüştür.



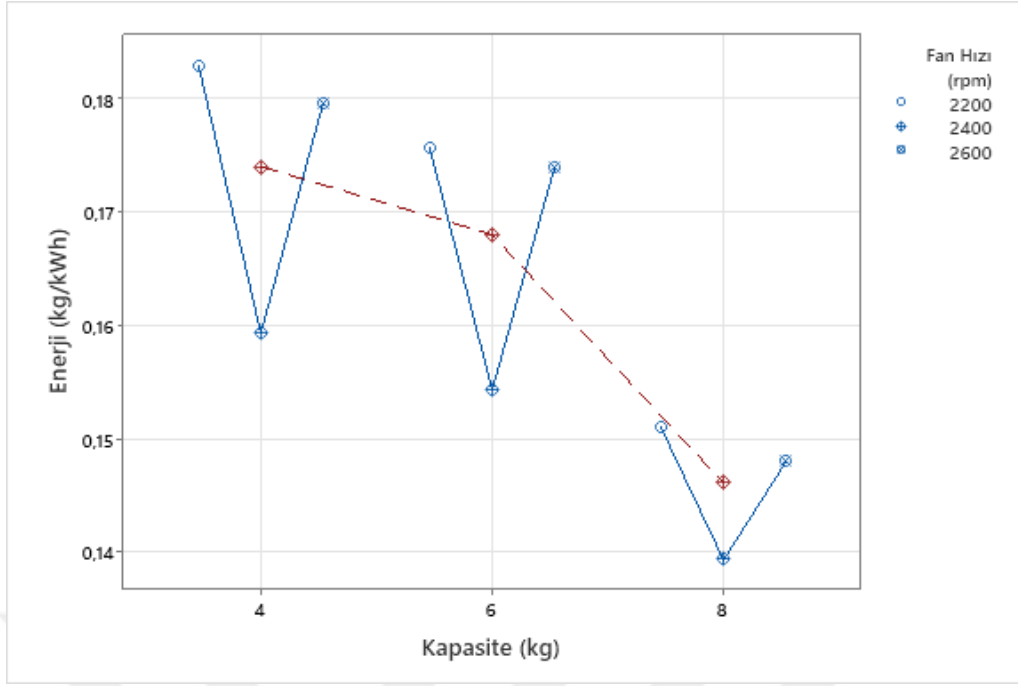
Şekil 3.19 Kompresör devri, fan hızı ve kapasitenin birim enerji tüketimine etkileri

Şekil 3.20’de görülen ana etki grafiğinde fan devrinin tekil olarak en az etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. Kurutma süresindeki analizleri değerlendirecek olursak kompresör devri arttıkça kurutma süresinin kısaldığı analizler sonucunda saptanmıştır. Fan hızları sonuçları yakın değerlerde çıksa da 2400 rpm’de en düşük kilogram başına kurutma süresi sonucuna ulaşılmıştır. Enerji tüketimi sonuçlarına benzer olarak çamaşır kapasite artışıyla beraber birim kilogram başına sürenin düştüğü görülmüştür.



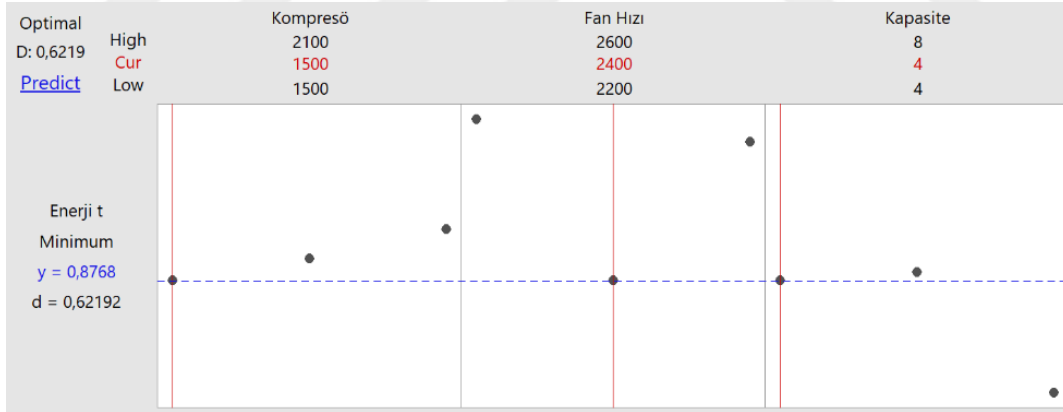
Şekil 3.20 Kompresör devri, fan hızı ve kapasiten kilogram başına kurutma süresine etkileri

Şekil 3.21’de değişen fan hızları ile farklı çamaşır kapasitelerinde birim kilogram başına enerjinin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Her bir çamaşır kapasitesinde en düşük enerji tüketiminin 2400 rpm fan hızında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.20’den farklı olarak tüm fan hızı koşullarında çamaşır kapasitesi arttıkça birim enerji tüketiminin düştüğü Şekil 3.21’de net olarak görülmüştür.



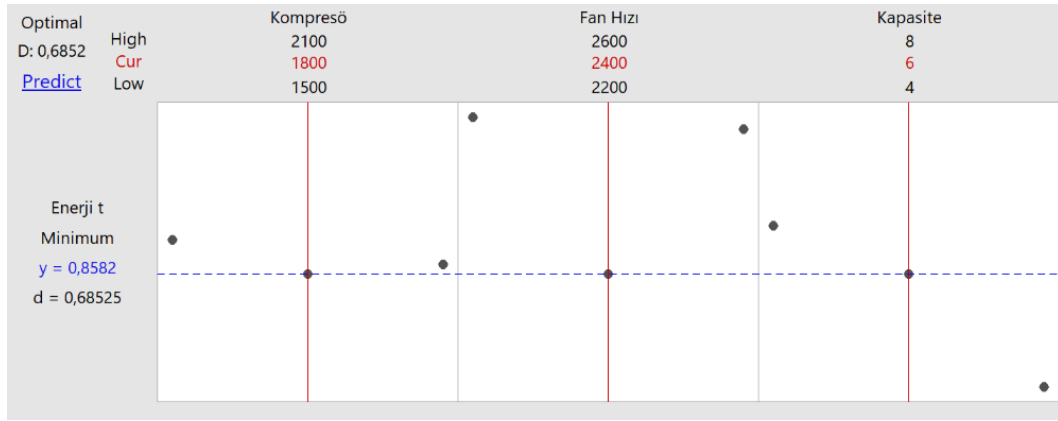
Şekil 3.21 Fan hızlarının farklı çamaşır kapasitelerinde enerji tüketimine etkisi

4 kg çamaşır kapasitesinde çıkan testlerin sonuçları ile gerçekleştirilen analizlerle bu çamaşır kapasitesindeki minimum enerji tüketimini 1500 rpm kompresör devri, 2400 rpm fan hızı ile elde edilebileceği sonucu ortaya çıkmıştır.



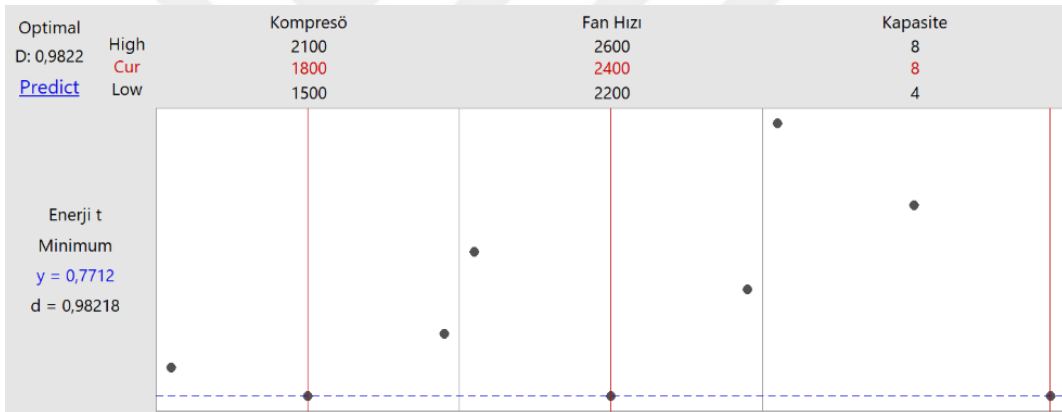
Şekil 3.22 4 kg çamaşır kapasitesindeki en düşük enerji tüketim parametreleri

6 kg test kapasitesindeki sonuçlar değerlendirildiğinde ise 1800 rpm kompresör devri 2400 rpm fanı hızı bu kapasitedeki minimum enerji tüketimini elde edeceğimiz parametre değerleri olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.23 6 kg çamaşır kapasitesindeki en düşük enerji tüketim parametreleri

8kg çamaşır kapasitesinde testlerin verileri analiz edildiğinde ise 6 kg kapasitesindeki analiz sonucuna benzer olarak 1800 rpm kompresör devrinin ve 2400 rpm fan hızının bu kapasitedeki en düşük enerji seviyesine ulaşmak için gerekli parametre değerlerinin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.24 8 kg çamaşır kapasitesindeki en düşük enerji tüketim parametreleri

3.5.2 Deney Parametrelerinin SMER ve MER Değerlerine Etkisi

SMER ve MER değerlerinin tanımları gereği sayısal değerleri ne kadar yüksek olursa makinenin enerji verimliliği de o kadar artmaktadır. Denklem 3.12’de SMER’in hesaplaması Denklem 3.13 de ise MER değerinin hesaplaması gösterilmiştir.[2] Her bir test koşulu için hesaplanan SMER ve MER değerlerinin test parametreleri ile olan etkileşimleri Minitab programında analiz edilmiştir.

$$SMER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi} \left[\frac{kg-su}{kWh} \right]}{\text{Enerji sarfiyatı}} \quad (3.12)$$

$$MER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi} \left[\frac{kg-su}{h} \right]}{\text{Kurutma süresi}} \quad (3.13)$$

Test sonuçları sonrası Minitab programı ile SMER ve MER değerleri için parametrelerin etki yüzdeleri ile beraber matematiksel model oluşturulmuştur. Bu programda tam faktörlü deney tasarımı çözdürülmüş olup parametreler için doğruluk ve güvenilirlikleri analiz edilmiştir. Bu metodun tercih edilme sebepleri arasında, tüm etkileşimler hakkında bilgi sağlaması ve nicel-nitel girdilerde geçerli olması yer almaktadır. Bu analizler sonucunda SMER için Denklem 3.14 ve MER için Denklem 3.15 elde edilmiştir.

$$SMER = 3,6623 + 0,0377 FH + 0,3345 K - 0,0050 FH * K \quad (3.14)$$

$$MER = 1,11298 + 0,15399 KD + 0,02719 FH + 0,15715 K + 0,03851 KD * K - 0,02582 FH * K \quad (3.15)$$

Aşağıdaki Tablo 3.7’de matematiksel modellemede kullanılan parametreler ve bu parametrelerden elde edilen denklemlerdeki yanıt seviyeleri gösterilmiştir.

Tablo 3.8 Parametreler ve yanıt seviyeleri

Parametreler/Seviyeler	-1	0	1
Kompresör Devri(rpm)	1500	1800	2100
Fan Hızı(rpm)	2200	2400	2600
Kapasite(kg)	4	6	8

Modelleme sonrası ortaya çıkan SMER ve MER denklemlerinin hangi güvenilirlikte olduğuna R-sq(adj) değerine bakılarak karar verilmektedir. Deney sonuçlarına göre elde edilen denklem, SMER değerini %94,45 MER değerini %99,55 oranında tahmin edebilme yeteneğine sahiptir. Bu tahmin modelinin kabul edilebilir olması için 6 sigma kurallarına göre R-sq(adj) değerinin %70’in üzerinde olması yeterli kabul edilmektedir. Bu da analiz sonuçlarından elde ettiğimiz

denklemlerin SMER için %94,45, MER için %99,55 güveninde doğru tahminleme edilebileceğini göstermektedir.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	3,1639	0,79098	111,54	0,000
Linear	4	3,1639	0,79098	111,54	0,000
Fan Hızı (rpm)	2	1,0319	0,51596	72,76	0,000
Kapasite (kg)	2	2,1320	1,06601	150,32	0,000
Error	22	0,1560	0,00709		
Total	26	3,3199			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0842119	95,30%	94,45%	92,92%

Şekil 3.25 SMER için DOE istatistiksel çözümü

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	0,920757	0,065768	407,57	0,000
Linear	6	0,887347	0,147891	916,48	0,000
Kompresör (rpm)	2	0,471514	0,235757	1460,99	0,000
Fan Hızı (rpm)	2	0,019573	0,009786	60,65	0,000
Kapasite (kg)	2	0,396260	0,198130	1227,82	0,000
2-Way Interactions	8	0,033410	0,004176	25,88	0,000
Kompresör (rpm)*Kapasite (kg)	4	0,019027	0,004757	29,48	0,000
Fan Hızı (rpm)*Kapasite (kg)	4	0,014383	0,003596	22,28	0,000
Error	12	0,001936	0,000161		
Total	26	0,922694			

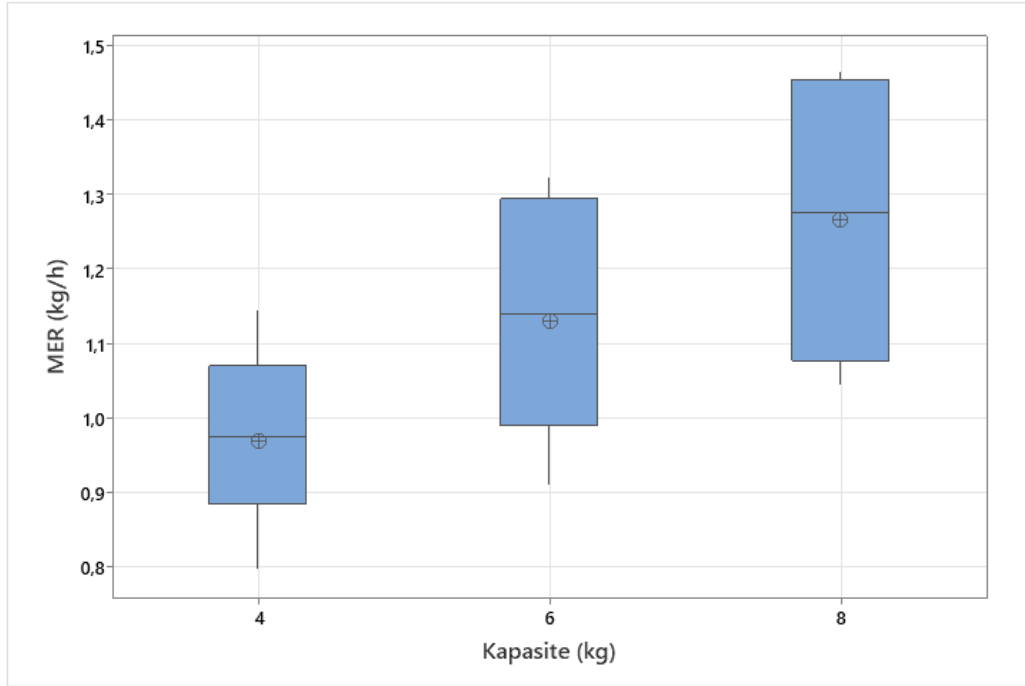
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0127031	99,79%	99,55%	98,94%

Şekil 3.26 MER için DOE istatistiksel çözümü

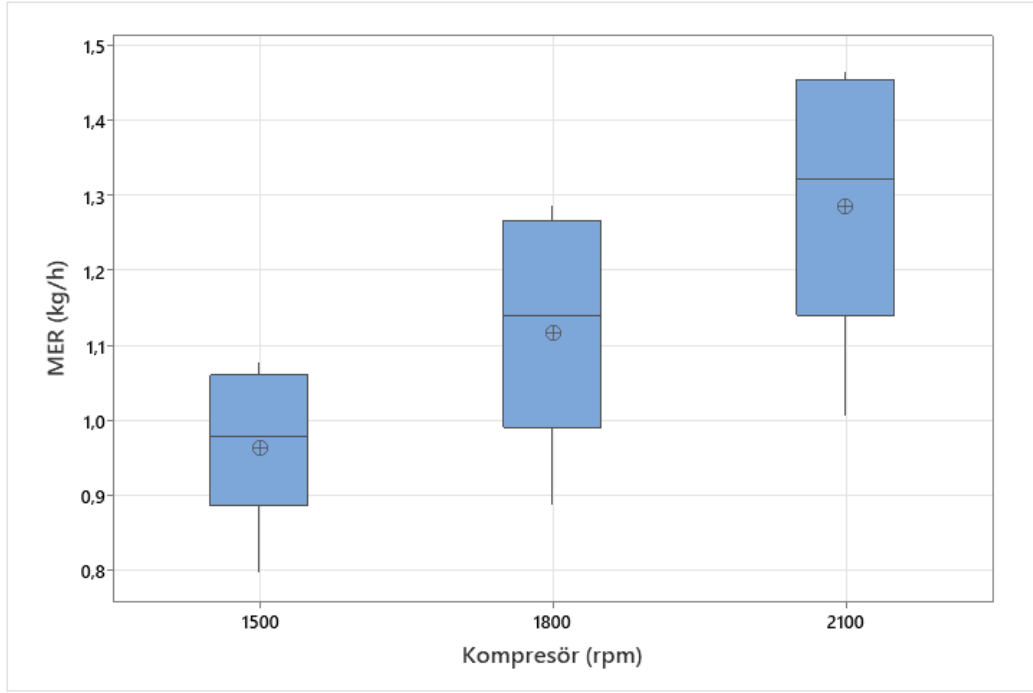
Şekil 3.27’de farklı yükleme kapasitelerinde MER değerinin her bir kapasite için dağılımı ve ortalama değerlerini gösteren grafik paylaşılmıştır. Yükleme kapasitesi arttıkça MER değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni yüksek kapasitede proses havasının tüm çamaşırlara etkin bir şekilde temas etmesi nedeniyle yoğunlaşma

hızının artması olarak yorumlanabilir. 8 kg kapasitedeki MER ortalaması 1,27 olup 6 kg kapasitedeki MER ortalamasından %12, 4 kg kapasitedeki MER ortalamasından ise %30 daha yüksektir. Yapılan testlerin sonucunda 8 kg kapasitedeki MER değerleri 1,05 - 1,47, 6 kg kapasitede 0,91 - 1,32 ve 4 kg kapasitede 0,80 - 1,13 arasında çıkmıştır.



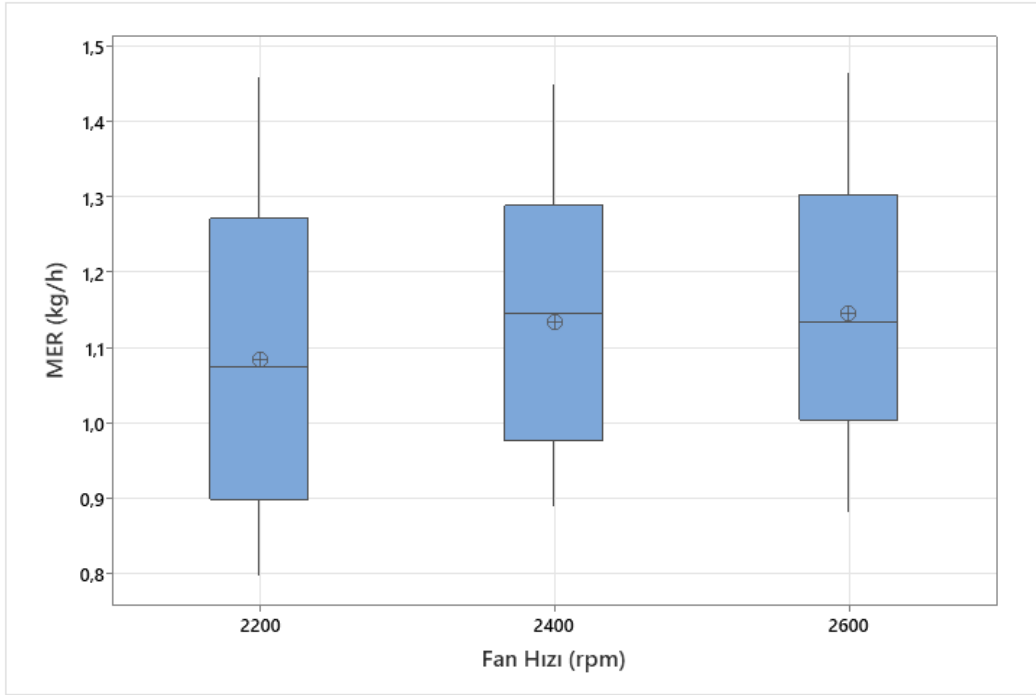
Şekil 3.27 MER değerinin farklı kapasitelerdeki dağılımı ve ortalaması

Bir diğer şekil 3.28’de farklı kompresör rpm’lerinde MER değerinin ortalama ve dağılım grafiği gösterilmiştir. Kompresör rpm değeri arttıkça MER değerinin de arttığı grafikte gözlemlenmektedir. Bunun en önemli nedeni diğer parametreler sabit tutulduğunda artan kompresör devri ile kurutma sürelerinin kısalmasıdır. Bu durum da MER değerini arttırmaktadır. 2100 kompresör rpm’inde ortalama MER değeri 1,29 olup 1800 rpm kompresör devrindenki MER ortalamasından %15, 1500 rpm kompresör devrindeki MER ortalamasından ise %34 daha yüksektir. Test sonuçlarına göre 2100 kompresör rpm’inde MER değerleri 1,01 – 1,47, 1800 rpm’de 0,89 – 1,29 ve 1500 rpm’de 0,80-1,08 değerleri arasındadır.



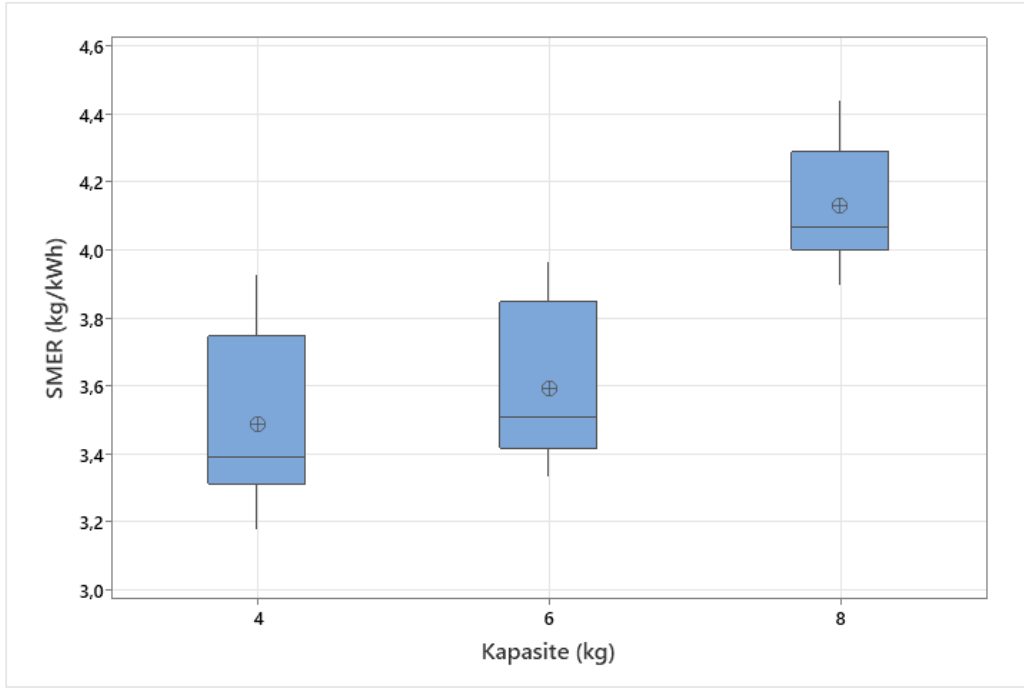
Şekil 3.28 MER değerinin farklı kompresör rpm'lerindeki dağılımı ve ortalaması

Şekil 3.29'da gerçekleştirilen testlerde farklı fan hızlarında MER değerinin nasıl bir dağılım oluşturduğu gösterilmektedir. Bu grafikte testlerde sürülen fanın 2200, 2400 ve 2600 rpm hızlarında yakın MER değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu fan hızları MER değerini diğer iki parametre kadar ayıştıramamıştır. Her bir hız için ortalama MER değerleri oldukça yakındır. 2200 rpm hızında MER 1,08, 2400'de 1,13 ve 2600 rpm hızında 1,14 çıkmıştır.



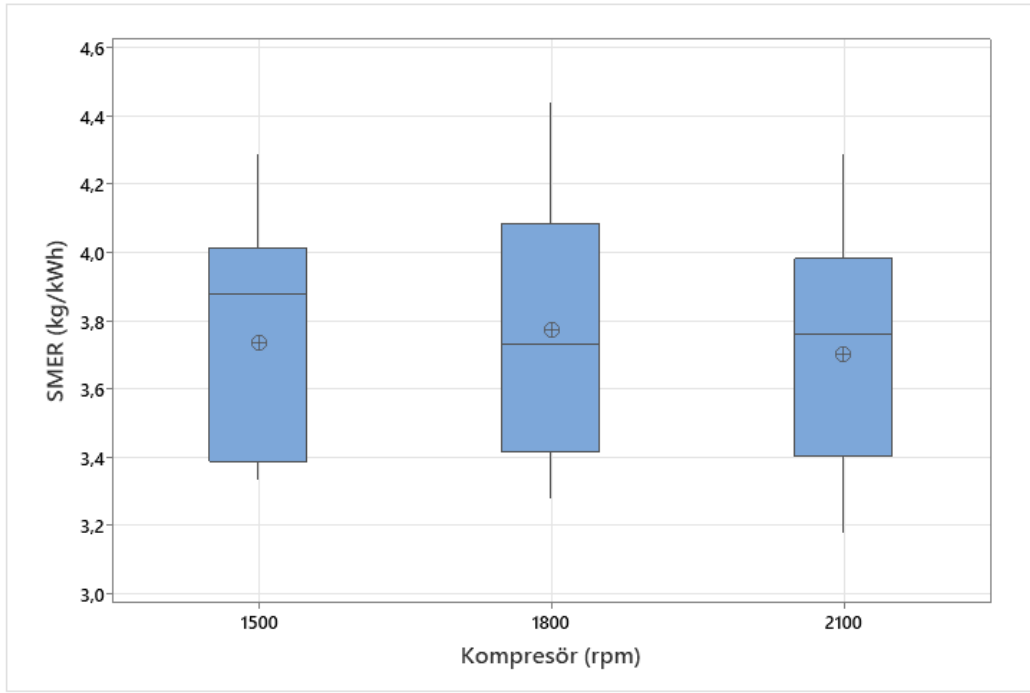
Şekil 3.29 MER değerinin farklı fan hızlarındaki dağılımı ve ortalaması

SMER değerlerinin parametrelerden nasıl etkilendiğini yorumlamak için de Minitab programında grafikler çizilmiştir. Şekil 3.30'da farklı yükleme kapasitelerinde SMER değerinin her bir kapasite için dağılımı ve ortalama değerlerini gösteren grafik paylaşılmıştır. Yükleme kapasitesi arttıkça SMER değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de kapasite arttıkça spesifik kurutma süresinin(birim kütle başına süre) düşmesidir. Çıkan sonuçlarda 8 kg kapasitedeki SMER değerleri ortalamasının diğer kapasitelere göre ayrıştığı görülmektedir. Bu kapasitedeki test sonuçlarının ortalaması 4,12 gelmiştir. Bu değer 6 kg'daki ortalamaya göre %14, 4 kg kapasitedeki ortalamaya göre ise %18 fazladır. Ayrıca grafikte 8 kg kapasiteli testlerde çıkan SMER değerlerinin daha yakın, diğer kapasitelerde ise SMER değerlerinin bir miktar daha geniş aralığa yayıldığı görülmektedir. 6 kg için ortalama 3,59, 4 kg için ise SMER 3,48'dir.



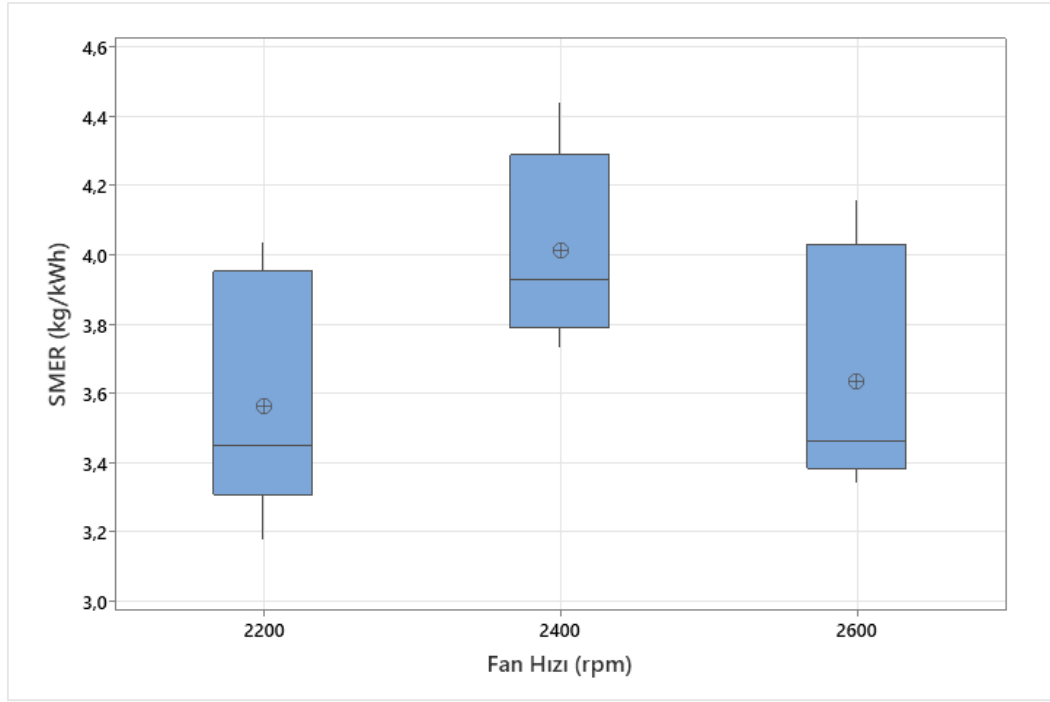
Şekil 3.30 SMER değerinin farklı kapasitelerdeki dağılımı ve ortalaması

Bir diğer Şekil 3.31’de farklı kompresör rpm’lerinde SMER değerinin ortalama ve dağılım grafiği gösterilmiştir. Üç farklı kompresör devri için ortalama SMER değerleri çok yakın gelmiştir. 1500 rpm’de 3,73, 1800 rpm’de 3,77 ve 2100 rpm’de 3,70 ortalama SMER değerleri görülmektedir. En yüksek SMER değeri 1800 rpm devrinde görülmüştür. Bu değer 4,44’dür. 2100 rpm devrinde kompresör diğer iki devire göre daha fazla güç çektiği için SMER ortalamasında geride kalmıştır. 1800 rpm devrinde kompresörün 1500 rpm’e göre daha fazla güç çekmesine karşılık 1800 rpm devrinde kurutma çevrimleri daha kısa sürdüğü için bu testlerdeki enerji tüketimleri 1500 rpm’deki testlere göre daha azdır. Bu durumda SMER değerlerinde 1800 rpm testlerinin öne çıkmasına neden olmuştur.



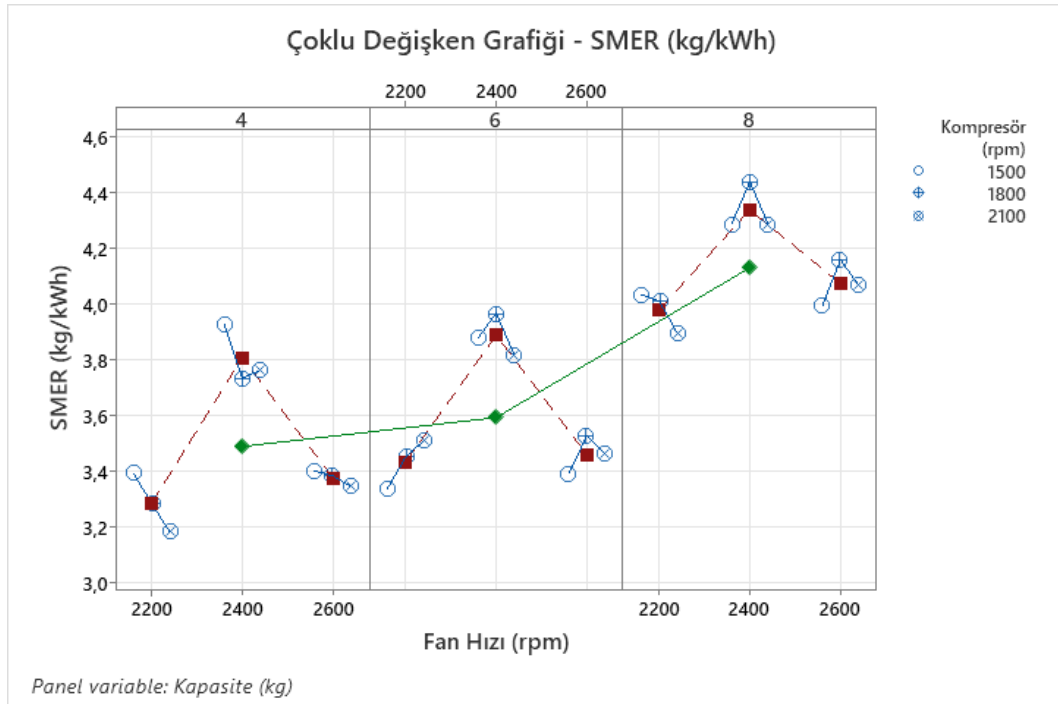
Şekil 3.31 SMER değerinin farklı kompresör rpm'lerindeki dağılımı ve ortalaması

Şekil 3.32'de gerçekleştirilen testlerde farklı fan hızlarında SMER değerinin nasıl bir dağılım oluşturduğu gösterilmektedir. 2200 ve 2600 rpm fan hızlarındaki testlerde SMER değerleri çok yakın çıkmıştır. Ortalamaları sırasıyla 3,56 ve 3,63'dür. 2400 rpm fan hızında ise en yüksek SMER değeri görülmüştür. Bu fan hızındaki testlerdeki ortalama 4,00'dır. Bunun nedeni olarak bölüm 3.5.1'de hesaplanan enerji tüketimi için hesaplana optimum noktalar gösterilebilir. Bu bölümde 2400 rpm fan hızında en düşük enerji tüketimlerinin gerçekleştiği anlatılmıştır. Bu sebeple de SMER değeri bu fan hızı parametre sınıfında 2400 rpm grubunda en yüksek ortalamaya ulaşmıştır. 2200 rpm fan hızında kurutma süreleri uzamış olup toplam enerji tüketimini arttırmış, 2600 rpm'de ise motor fanı daha yüksek rpm'de sürdüğü için güç tüketimi fazla olmuştur. Bu durum da SMER değerini olumsuz etkilemiştir.



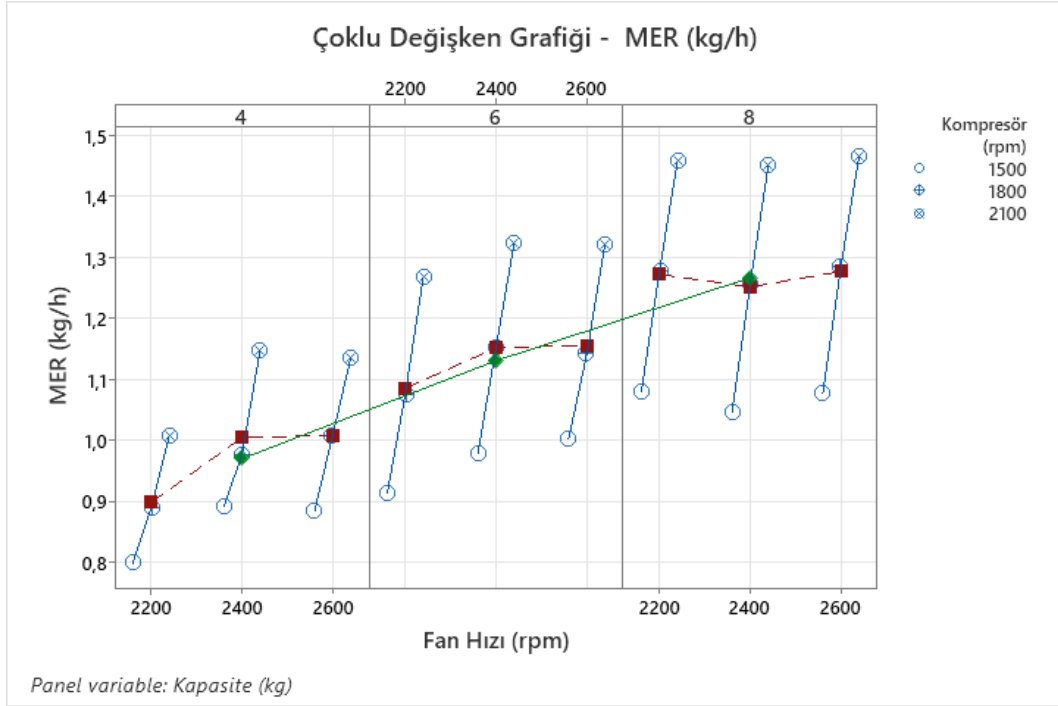
Şekil 3.32 SMER değerinin farklı fan hızlarındaki dağılımı ve ortalaması

Şekil 3.33’de SMER değeri için çoklu değişken grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre en yüksek SMER değerine 8 kg kapasitede 1800 rpm kompresör devrinde ve 2400 rpm fan hızında ulaşılmıştır. Bu noktadaki SMER değeri 4,44’dür.



Şekil 3.33 SMER değeri için çoklu değişken grafiği

Şekil 3.34’de MER değeri için çoklu değişken grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre en yüksek MER değerine 8 kg kapasitede 2100 rpm kompresör devrinde ve 2600 rpm fan hızında ulaşılmıştır. Bu noktadaki MER değeri 1,46’dır.



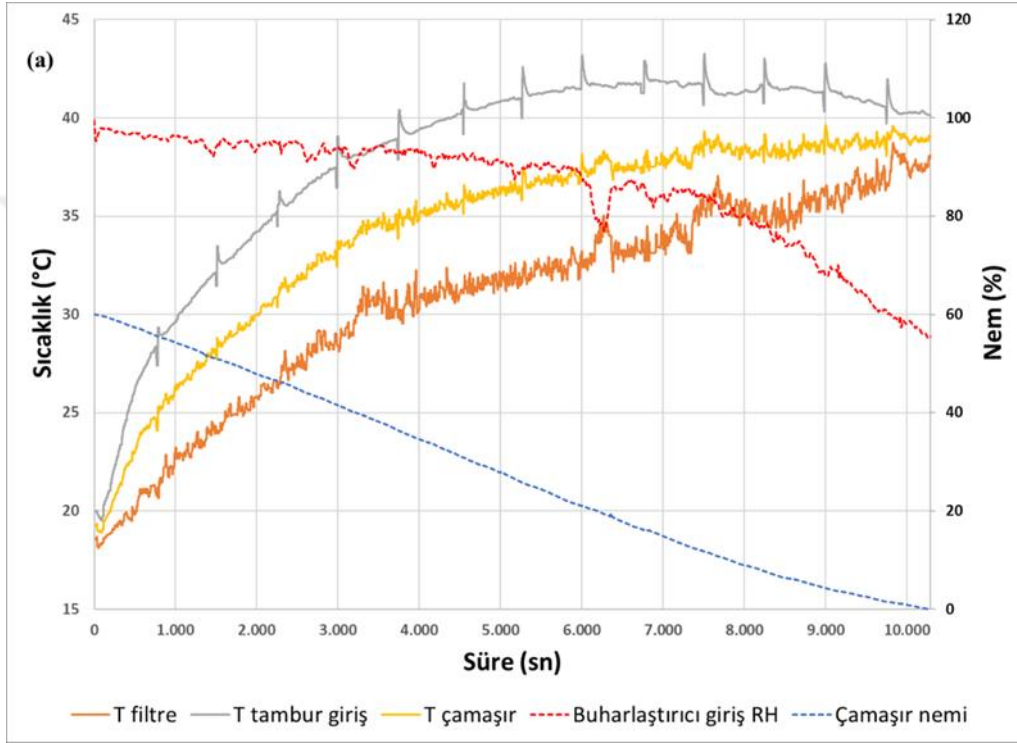
Şekil 3.34 MER değeri için çoklu değişken grafiği

3.5.3 Deney Sonuçlarında Nem Alma Hızlarının İncelenmesi

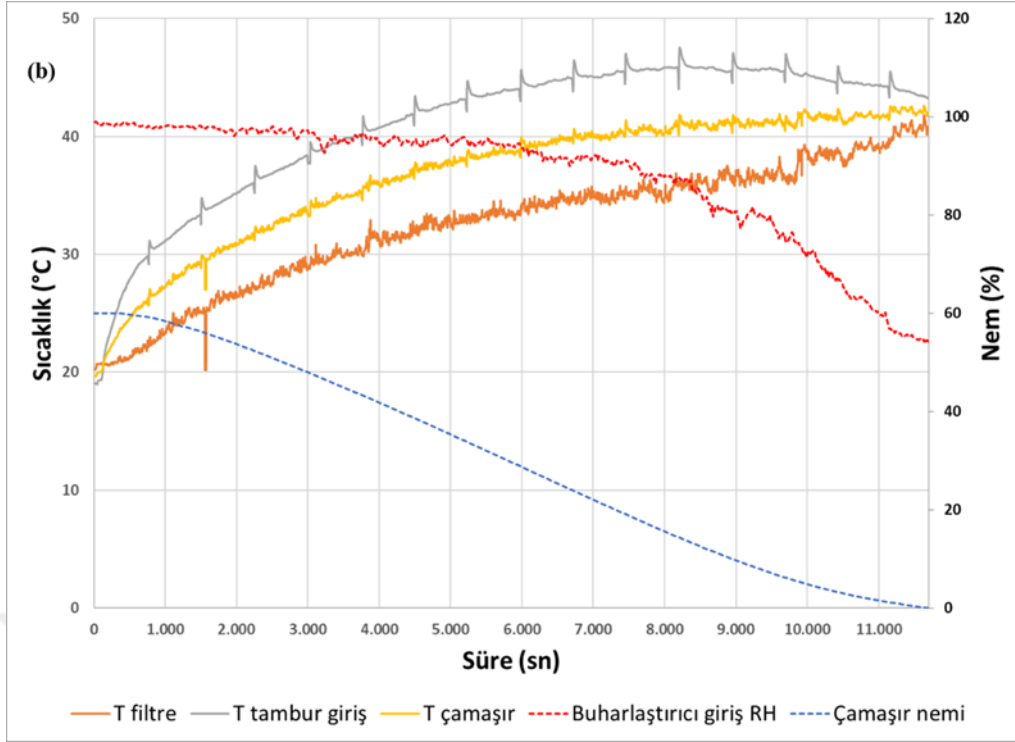
Nem alma hızı incelenirken her bir kapasitede optimum olarak çıkan (en düşük enerji tüketimine sahip) noktalar incelenmiştir. Şekil 3.35’de her bir kapasitenin en düşük enerji tüketimli durumundaki tambura giren hava sıcaklığı, çamaşır sıcaklığı, filtre sıcaklığı gösterilmiştir. Ayrıca çamaşır neminin bir kurutma çevrimi boyunca nasıl değiştiği ile beraber buharlaştırıcıdan çıkan havanın bağıl nem değeri değişimi verilmiştir.

Şekil 3.32’de verilen grafiklerde 4, 6 ve 8 kg kapasite için bütün kurutma çevrimi boyunca çamaşır ve makinenin farklı noktalarından bağıl nem ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi kurutma prosesinde farklı nem alma hızları vardır. Aşağıdaki grafiklerden de bu farklı nem alma hızları net şekilde görülmektedir. Özellikle çamaşırın yüzeyindeki ve bağlar arasında yer alan su çamaşır üzerinden uzaklaştırıldıktan sonra nem alma hızı ya da çamaşırın neminin uzaklaştırılma hızı düşmektedir. Bunun sebebi çamaşırın lifleri içinde yer alan

nemin uzaklaştırılmasının zorluğudur. Çevrimin sonuna doğru tambur girişindeki hava sıcaklığı düşmesine rağmen çamaşırın sahip olduğu nem zor uzaklaştırıldığı için hava sıcaklığı (filtre sıcaklığı) giderek artmakta ve maksimum ulaştığı nokta çevrimin son anında olmaktadır. Çevrimin ortasından itibaren buharlaştırıcı girişinde bağıl nem değeri giderek düşmesine rağmen havanın sıcaklığı arttığı ve nem tutma kapasitesi de arttığı için nem alma hızı sabit kalmaktadır.



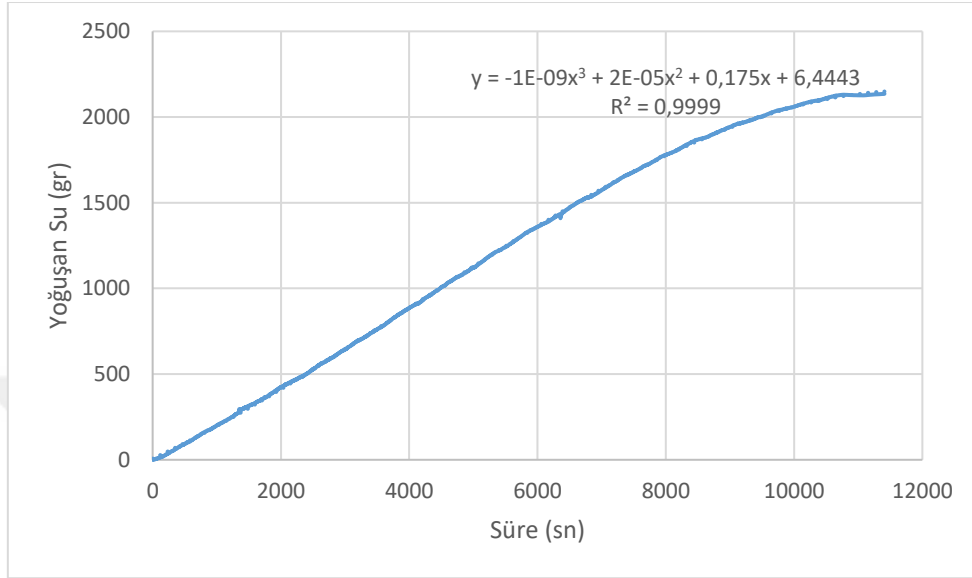
Şekil 3.35 Proses havası sıcaklık-nem ve çamaşır nem grafiği,
(a)4 kg, (b)6kg, (c)8kg



Şekil 3.35 Proses havası sıcaklık-nem ve çamaşır nem grafiği,
(a)4 kg, (b)6kg, (c)8kg (devamı)

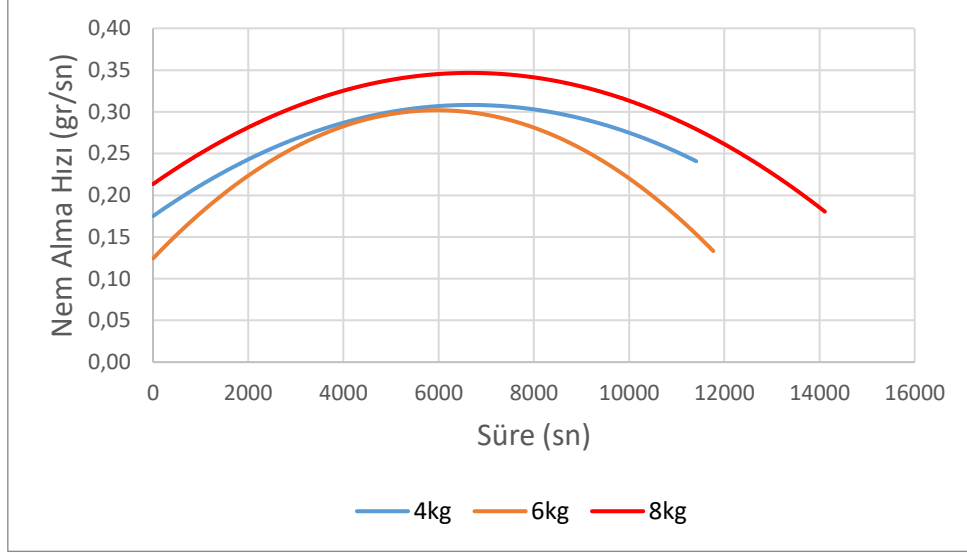
Nem alma hızının hesabı için anlık veri alınan teraziden yararlanılmıştır. Kurutma çevrimi boyunca yoğunlaşan su bir kapta birikmekte ve buradaki miktarı terazi yardımıyla ölçülmektedir. Her bir test için bu toplam yoğunlaşan su verisi

grafikleştirilmiştir. Sonrasında bu grafik üzerinden Şekil 3.36’da örnek gösterildiği gibi her bir test için üçüncü dereceden fonksiyonlar elde edilmiştir. Bu fonksiyonların türevi ile de oluşan fonksiyona anlık alınan su verileri girildiğinde nem alma hızına ulaşılmıştır.



Şekil 3.36 4 kg çamaşır kapasitesindeki zamana bağlı yoğuşan su miktarı ve denklemi

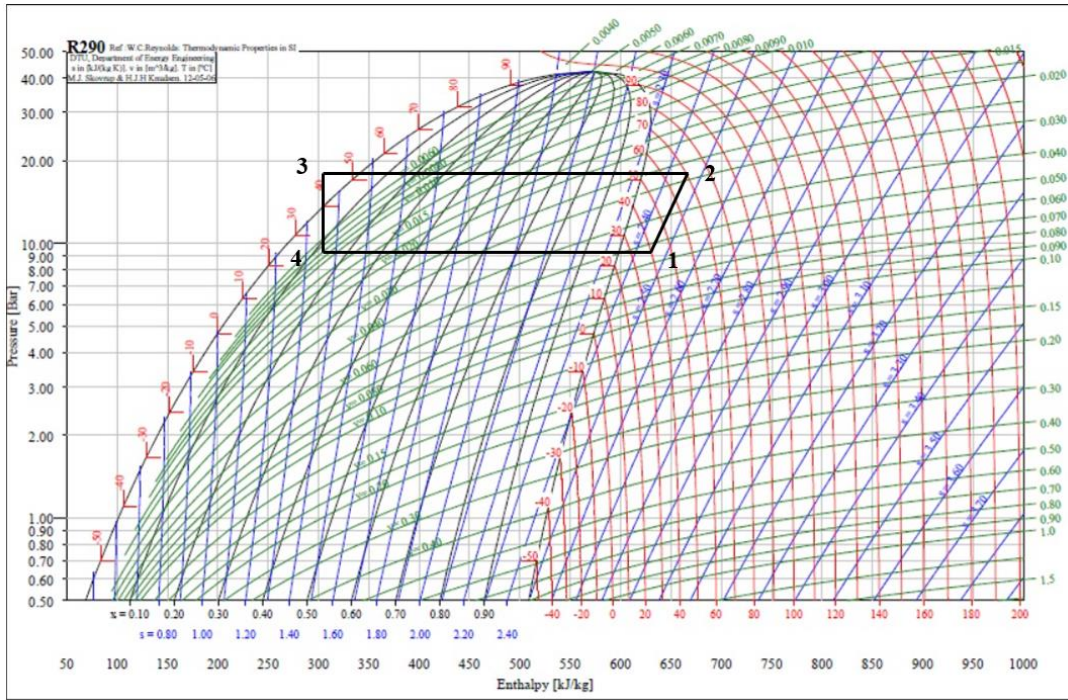
Şekil 3.37’de 4,6 ve 8kg çamaşır kapasitelerinin en düşük enerji tüketime sahip testlerinin nem alma hızlarının kıyas grafiği verilmiştir. 8kg kapasitedeki testlerin neden daha düşük enerji tüketimine ve MER değerlerinin daha yüksek olduğu olduğu bu grafikten de anlaşılmaktadır. Çünkü kurutmanın fazları olan ısınma, sabit hızda nem alma ve düşük hızda nem alma adımlarının her birinde 8kg testinde nem alma hızı fazladır. 4 ve 6 kg’da by-pass olan hava daha fazladır. Çamaşır kapasitesi arttıkça tambur içinde çamaşırlar daha homojen olarak dağılmakta ve proses havası çamaşırlara daha iyi nüfuz ederek daha fazla nem toplamaktadır. Buna ek olarak tambur içinde çamaşırların daha homojen dağılması ile topaklanma gibi durumlar görülmemektedir. Buna bağlı olarak da 4 ve 6 kg kapasite maksimum nem alma hızı 0,30 gr/sn olmuştur.



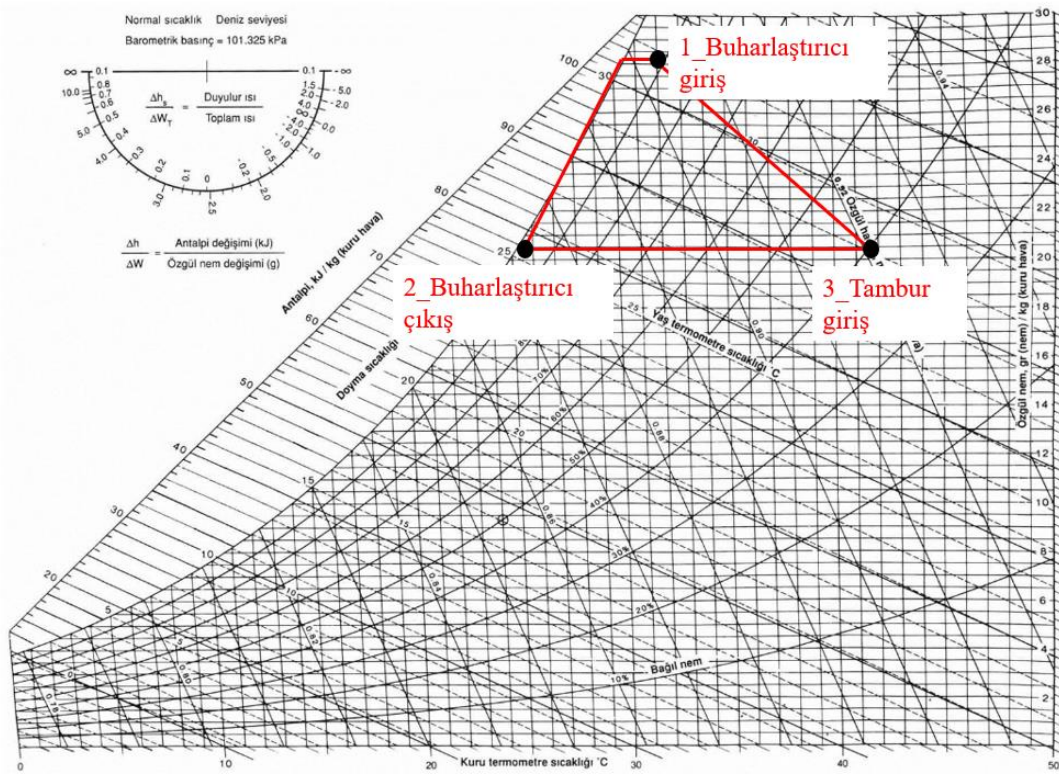
Şekil 3.37 4-6-8 kg çamaşır kapasitelerinin en düşük enerji tüketimdeki nem alma hızı grafiği

3.5.4 Deney Sonuçlarında Nem Alma Hızlarının İncelenmesi

Deneylerle elde edilen sonuçların teorik hesaplarla karşılaştırılıp sonuçlarda yüzdesel olarak ne kadar sapma olduğu bulunmaya çalışılmıştır. Burada nem alma hızı üzerinden ilerlenmiştir. Yapılan testlerde bulunan nem alma hızları ile teorik hesaplamalarda gelmesi gereken nem alma hızları karşılaştırılmıştır. Bunu gerçekleştirirken de her bir çevrimin en yüksek nem alma hızı noktası anındaki değerler kıyaslanmıştır. Bu hesaplamaları yaparken de enerjinin ve kütlenin korunum denklemlerinden yararlanılmıştır. Denklemlerdeki gerekli değerler için Şekil 3.38’de verilen psikometrik diyagram ve Şekil 3.39’da verilen soğutucu akışkan çevrimi için ise lnP-h diyagramı kullanılmıştır. Test düzeneğindeki verilerden yararlanılarak hesaplamalar için gerekli noktalar diyagramlarda belirtilmiştir.



Şekil 3.38 Soğutucu akışkan(R290) lnP-h diyagramı



Şekil 3.39 Psikometrik diyagram

Kuru hava kütle dengesi:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (3.16)$$

Su buharı kütle dengesi:

$$\dot{m}_{a1}w_1 = \dot{m}_{a2}w_2 + \dot{m}_{su} \quad (3.17)$$

$$\dot{m}_{su} = \dot{m}_a (w_1 - w_2) \quad (3.18)$$

Enerji korunumu:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta - \sum \dot{m}_g h_g \quad (3.19)$$

$$\dot{W} = 0 \quad (3.20)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) + \dot{m}_{su} h_{su} \quad (3.21)$$

$$\dot{m}_{su} = \dot{m}_a * (w_1 - w_2) \quad (3.22)$$

$$H = H_{kuru\ hava} + H_{su\ buharı} = m_{kh} h_{kh} + m_{sb} h_{sb} \quad (3.23)$$

$$h = \frac{H}{m_{kh}} = h_{kh} + \frac{m_{sb}}{m_{kh}} h_{sb} = h_{kh} + w * h_{sb} \quad (3.24)$$

$$h_1 = C_p * T_1 + w_1 * h_{g1} \quad (3.25)$$

Buharlaştırıcıdan soğutucu akışkana geçen ısı miktarı:

$$Q_{buh_R290} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_4) \quad (3.26)$$

$$\dot{m}_{ref} = RPM * V_{strok} * \rho_{dönüş} * \eta_{vol} \quad (3.27)$$

Havadan buharlaştırıcıya geçen ısı miktarı[17]:

$$Q_a = \dot{m}_a[1.006(T_{a,1} - T_{a,2}) + (1,805(W_1T_{a,1} - W_2T_{a,2}))] + 2501\dot{m}_{su} \quad (3.28)$$

Bu denklemlerdeki kompresör ile ilgili gerekli bilgiler kompresör firmasının teknik dokümanından alınmıştır. Sonrasında denklemler ve gerekli bilgiler EES programına girilerek Şekil 3.40'daki gibi çözümlemeler gerçekleştirilip sonuçlar elde edilmiştir.

Akışkan Tarafı

```

Q_buharlastirici;R290 = m_R290 * ( h_buharlastirici;cikis;R290 - h_buharlastirici;giris;R290 )
m_R290 = RPM * V_strok * rho_donus * eta_volumetrik
rho_donus = rho ( R290 ; T=T_buharlastirici;cikis;R290 ; X=X_buharlastirici;cikis;R290 )
h_buharlastirici;giris;R290 = h ( R290 ; T=T_buharlastirici;giris;R290 ; X=X_buharlastirici;giris;R290 )
h_buharlastirici;cikis;R290 = h ( R290 ; T=T_buharlastirici;cikis;R290 ; X=X_buharlastirici;cikis;R290 )
RPM = 30
V_strok = 0,0000076
eta_volumetrik = 0,95
T_buharlastirici;cikis;R290 = 29,22
T_buharlastirici;giris;R290 = 26,23
X_buharlastirici;giris;R290 = 0,2
X_buharlastirici;cikis;R290 = 1

```

Şekil 3.40 EES programı denklem çözüm akışı

Hava Tarafı

$$\dot{Q}_{\text{buharlastirici,R290}} = \dot{Q}_{\text{buharlastirici,hava}}$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{buharlastirici,hava}} - \dot{m}_{\text{hava}} \cdot (1,006 \cdot (T_{\text{hava,giris}} - T_{\text{hava,cikis}}) + 1,805 \cdot (\omega_{\text{giris,hava}} \cdot T_{\text{hava,giris}} - \omega_{\text{cikis,hava}} \cdot T_{\text{hava,cikis}}))}{2501} = \dot{m}_{\text{su,yogusan}}$$

$$\dot{m}_{\text{hava}} = \dot{V}_{\text{hava}} \cdot \rho_{\text{hava}}$$

$$\rho_{\text{hava}} = \rho \left[\text{AIRH2O}; T = \frac{T_{\text{hava,giris}} + T_{\text{hava,cikis}}}{2}; W = \frac{\omega_{\text{giris,hava}} + \omega_{\text{cikis,hava}}}{2}; P = P_{\text{atm}} \right]$$

$$T_{\text{hava,giris}} = 32,9$$

$$T_{\text{hava,cikis}} = 28,2$$

$$\dot{V}_{\text{hava}} = 0,0496$$

$$P_{\text{atm}} = 1,01325$$

$$\omega_{\text{giris,hava}} = \omega(\text{AIRH2O}; T = T_{\text{hava,giris}}; R = R_{\text{giris,hava}}; P = P_{\text{atm}})$$

$$\omega_{\text{cikis,hava}} = \omega(\text{AIRH2O}; T = T_{\text{hava,cikis}}; R = R_{\text{cikis,hava}}; P = P_{\text{atm}})$$

$$R_{\text{giris,hava}} = 0,955$$

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

$$\eta_{\text{volumetrik}} = 0,95$$

$$h_{\text{buharlastirici,giris,R290}} = 335,5 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\dot{m}_{\text{R290}} = 0,004985 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\omega_{\text{cikis,hava}} = 0,02426$$

$$P_{\text{atm}} = 1,013$$

$$\dot{Q}_{\text{buharlastirici,R290}} = 1,342 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\rho_{\text{hava}} = 1,113 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$R_{\text{giris,hava}} = 0,955$$

$$T_{\text{buharlastirici,cikis,R290}} = 29,22$$

$$T_{\text{hava,cikis}} = 28,2$$

$$\dot{V}_{\text{hava}} = 0,0496$$

$$x_{\text{buharlastirici,cikis,R290}} = 1$$

$$h_{\text{buharlastirici,cikis,R290}} = 604,8 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\dot{m}_{\text{hava}} = 0,05521 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\dot{m}_{\text{su,yogusan}} = 0,0004192 \text{ [kg/s]}$$

$$\omega_{\text{giris,hava}} = 0,0308$$

$$\dot{Q}_{\text{buharlastirici,hava}} = 1,342 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\rho_{\text{donus}} = 23,01 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$R_{\text{cikis,hava}} = 0,994$$

$$\text{RPM} = 30$$

$$T_{\text{buharlastirici,giris,R290}} = 26,23$$

$$T_{\text{hava,giris}} = 32,9$$

$$V_{\text{strok}} = 0,0000076$$

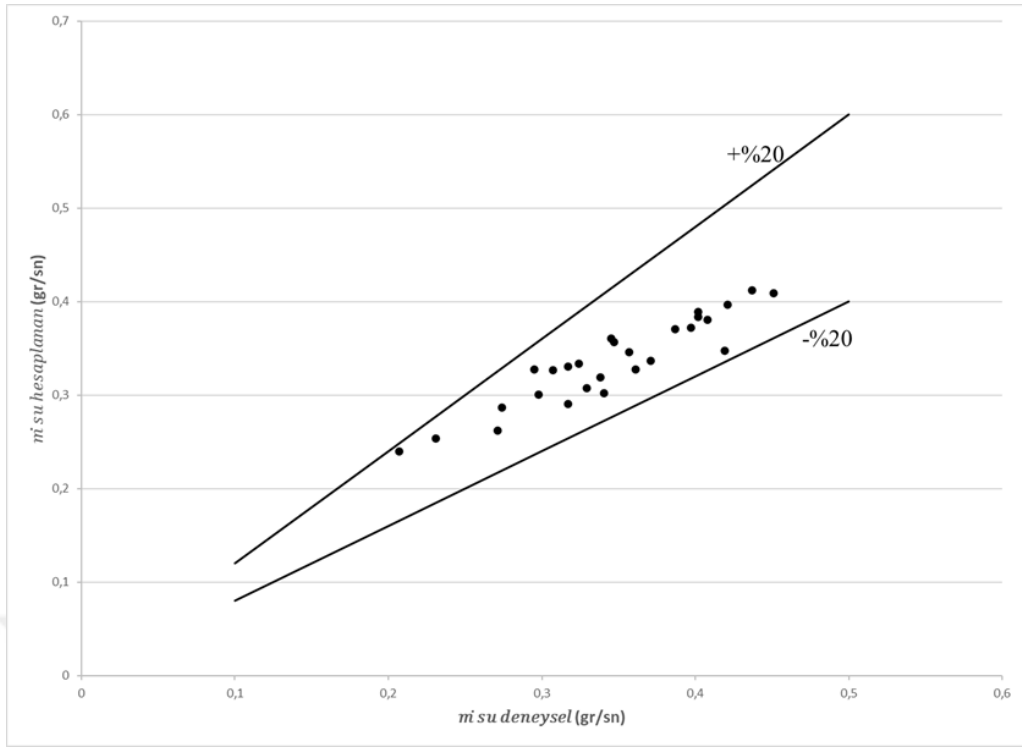
$$x_{\text{buharlastirici,giris,R290}} = 0,2$$

Şekil 3.40 EES programı denklem çözüm akışı (devamı)

Tablo 3.9’da deneysel ve teorik sonuçlar verilmiştir. Teorik sonuçlar elde edildikten sonra deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda Şekil 3.41’de görüldüğü gibi deneysel sonuçlar $\pm$ %20 güven aralığı içerisinde gelmiştir.

Tablo 3.9 Deneysel, teorik nem alma hızları ve hata oranları

Kompresör (Hz)	Fan hızı (rpm)	Kapasite (kg)	Nem alma hızı hesaplanan (g/sn)	Nem alma hızı deneysel (g/sn)	Hata oranı (%)
1500	2200	4	0,274	0,287	4,5
1500	2200	6	0,207	0,240	13,8
1500	2200	8	0,317	0,331	4,2
1500	2400	4	0,329	0,308	-6,8
1500	2400	6	0,231	0,254	9,1
1500	2400	8	0,307	0,327	6,1
1500	2600	4	0,338	0,319	-6,0
1500	2600	6	0,271	0,262	-3,4
1500	2600	8	0,324	0,334	3,0
1800	2200	4	0,295	0,328	10,1
1800	2200	6	0,317	0,291	-8,9
1800	2200	8	0,345	0,361	4,4
1800	2400	4	0,347	0,357	2,8
1800	2400	6	0,340	0,302	-12,7
1800	2400	8	0,410	0,348	-17,8
1800	2600	4	0,402	0,384	-4,7
1800	2600	6	0,298	0,301	1,0
1800	2600	8	0,387	0,371	-4,3
2100	2200	4	0,397	0,372	-6,7
2100	2200	6	0,361	0,328	-10,1
2100	2200	8	0,402	0,389	-3,3
2100	2400	4	0,451	0,409	-10,3
2100	2400	6	0,357	0,346	-3,2
2100	2400	8	0,408	0,381	-7,1
2100	2600	4	0,437	0,412	-6,1
2100	2600	6	0,371	0,337	-10,1
2100	2600	8	0,421	0,397	-6,0



Şekil 3.41 Deneysel ve teorik hesaplanan nem alma hızlarının karşılaştırılması

Bu yüksek lisans tez çalışmasında mevcut çamaşır kurutma makinelerinde regülasyonda test edilen 4 kg ve 8 kg kapasiteler ve müşteriler tarafından en çok tercih edilen 6 kg kapasitede daha düşük enerji tüketimine sahip ısı pompalı kurutma makinelerine ulaşmak amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak literatür araştırması yapılarak kapasitenin yanında kompresör devri ve fan hızı parametrelerinin değişken olarak seçileceğine karar verilmiştir. Parametreler deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiş ve teorik hesaplama ile doğrulanmıştır. Çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Testler sonrası gerçekleştirilen analizlerin sonucunda birim kilogram başına enerji tüketimine etki eden en önemli parametrenin çamaşır kapasitesi, bu parametreden sonra en etkili olan değişkenin fan hızı olduğu belirlenmiştir.
- Birim kilogram başına kurutma süresinde ise kompresör devri %48,9 oranında etki ile en önemli parametre olurken, kapasite de %45,2 oranındaki ağırlık ile önemli bir değişken olmuştur.
- Çalışmanın sonunda optimum çalışma noktaları belirlenmiştir. 4 kg kapasitede 1500 rpm kompresör devrinde ve 2400 rpm fan hızında minimum enerji tüketimine ulaşılmıştır. Referans ürüne göre %16'lık iyileşme sağlanmıştır.
- 6 kg kapasitede 1800 rpm kompresör devrinde ve 2400 rpm fan hızında minimum enerji tüketimine ulaşılmıştır. Referans ürüne göre %18'lik iyileşme sağlanmıştır.
- 8 kg kapasitede, 6 kg ile aynı çalışma noktaları optimum çıkmıştır. 1800 rpm kompresör devrinde ve 2400 rpm fan hızında minimum enerji tüketimine ulaşılmıştır. Referans ürüne göre %15'lik iyileşme sağlanmıştır.
- Tüm testler içerisinde kilogram başına en düşük enerji tüketimi 8 kg kapasite, 1800 rpm kompresör devri ve 2400 rpm fan hızı koşulunda görülmüş ve 0,136 kg/kWh çıkmıştır.
- Yükleme kapasitesi arttıkça SMER değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de kapasite arttıkça spesifik kurutma süresinin(birim kütle

başına süre) düşmesidir. Çıkan sonuçlarda 8 kg kapasitedeki SMER değerleri ortalamasının diğer kapasitelere göre ayrıştığı görülmektedir.

- En yüksek SMER değerine 8 kg kapasitede 1800 rpm kompresör devrinde ve 2400 rpm fan hızında ulaşılmıştır. Bu noktadaki SMER değeri 4,44'dür. 1800 rpm devrinde kompresörün 1500 rpm'e göre daha fazla güç çekmesine karşılık 1800 rpm devrinde kurutma çevrimleri daha kısa sürdüğü için bu testlerdeki enerji tüketimleri 1500 rpm'deki testlere göre daha azdır.
- Her bir kapasitenin optimum koşullarındaki nem alma hızlarının maksimum değerleri 8 kg'da 0,35 gr/sn, 4 kg'da 0,31 gr/sn ve 6 kg'da 0,30 gr/sn olmuştur.
- Deneysel sonuçlar teorik hesaplar ile karşılaştırıldığında $\pm$ %20 güven aralığı içerisinde gelmiştir.

Bu tezde yapılan çalışmaların bir ileri basamağa taşınabilmesi için aşağıdaki çalışmaların yapılması literatüre katkı sağlayacaktır.

- Çalışmada kullanılan ısı pompalı çamaşır kurutma makinası motoru hem tamburu döndürmekte hem de hava akış debisini ayarlamaktadır. Bu iki etken arasındaki bağlantıyı koparacak şekilde hava debisi için ayrı, tambur devri için ayrı motorlar kullanılarak iki değişkenin ayrı ayrı etki dereceleri incelenebilir. Bu çalışmada hava debisi ve tambur devri ikili etkileşimi için optimum nokta sağlayacak bir değer seçilebilmiştir.
- Bu çalışma kapsamında ısı değiştiriciler (yoğusturucu ve buharlaştırıcı) sabit tutulmuştur. Farklı özelliklere sahip ısı değiştiriciler ile özellikle optimum noktalar incelenerek ısı değiştirici çalışmaları da optimum edilmelidir.

- [1] Meryem, A. (2019). Hava Yoğuşturmalı Kurutma Makinelerinde Enerji Verimini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Durmuş, M., Bilen, K., Uzun,İ., (2012). Isı pompalı tekstil kurutma makinalarında kurutma havası debisinin kurutucu performansına etkisinin deneysel analizi, Mühendis ve Makina, 53, 40-50.
- [3] EN 61121, (2013), Tumble dryers for household use - Methods for measuring the performance, EN 61121
- [4] Xiang Cao, Jing Zhang, Zhen-Yu Li, Liang-Liang Shao, Chun-Lu Zhang. (2021). Process simulation and analysis of a closed-loop heat pump clothes dryer. Applied Thermal Engineering, 199, 117545.
- [5] Dongchan Lee, Minwoo Lee, Myeong Hyeon Park, Yongchan Kim. (2022). Experimental evaluation and prediction model development on the heat and mass transfer characteristics of tumble drum in clothes dryers. Applied Thermal Engineering, 202, 117900.
- [6] J.E. Braun, P.K. Bansal, E.A. Grolla. (2002). Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers. International Journal of Refrigeration 25, 954–965.
- [7] JunYoung Choi, DongChan Lee, Myeong Hyeon Park, Yongju Lee. (2021). Effects of compressor frequency and heat exchanger geometry on dynamic performance characteristics of heat pump dryers. Energy, 235, 121391.
- [8] V. Yadav, C.G. Moon. (2008). Fabric-drying process in domestic dryers. Applied Energy 85, 143–158.
- [9] Pradeep Bansal, Karishma Sharma, Sumana Islam. (2010). Thermal analysis of a new concept in a household clothes tumbler dryer. Applied Energy 87, 1562–1571.
- [10] Yuhui Wei, Zhaowei Su, Yiling Zhang, Pengfei Li & Huifen Yuan. (2018). The effect of fabric movement on drying performance of the domestic drum dryer. The Journal of The Textile Institute.
- [11] Pero Gatarić, Brane Širok, Marko Hočevan, & Lovrenc Novak (2019) Modeling of heat pump tumble Dryer energy consumption and drying time, Drying Technology, 37:11, 1396-1404.
- [12] Url-1 <<https://www.gfk.com/home>>, erişim tarihi 30.03.2022.
- [13] EU Regulation, (2012). Supplementing Directive 2010/30/EU Of The European Parliament And of The Council With Regard to Energy Labelling of Household Tumble Driers CEN, Belgium.
- [14] Barlas, B. (2019). Düşük GWP’li soğutucu akışkanların ısı pompalı kurutucularda deneysel analizi. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Url-2 <<https://www.verimli-enerji.com.tr/wp-content/uploads/2017/03/ısı-pompalarının-çalışma-prensibi.pdf>>, erişim tarihi 15.03.2022.

- [16] Çengel, Y.A., Boles, M.,A., (2006). Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th edition,
- [17] Karagöz, S. (2017). Minikanallı Isı Değişiricilerde Kanat Geometrilerinin Taşınım Katsayısı ve Basınç Düşüşüne Etkisinin İncelenmesi. (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



A

BELİRSİZLİK DEĞERLERİ

Test numarası	Kompresör (rpm)	Fan hızı (rpm)	Kapasite (kg)	MER belirsizlik (kg/h)	SMER belirsizlik (kg/kWh)	Nem alma hızı belirsizlik (g/s)
1	1500	2200	4	0,0173	0,0052	0,00665
2	1500	2200	6	0,0115	0,0033	0,00298
3	1500	2200	8	0,0087	0,0037	0,00299
4	1500	2400	4	0,0173	0,0068	0,00731
5	1500	2400	6	0,0116	0,0045	0,00315
6	1500	2400	8	0,0087	0,0042	0,00299
7	1500	2600	4	0,0173	0,0052	0,00752
8	1500	2600	6	0,0116	0,0035	0,00359
9	1500	2600	8	0,0087	0,0036	0,00305
10	1800	2200	4	0,0173	0,0049	0,00649
11	1800	2200	6	0,0116	0,0035	0,00392
12	1800	2200	8	0,0088	0,0036	0,00281
13	1800	2400	4	0,0174	0,0064	0,00707
14	1800	2400	6	0,0116	0,0046	0,00403
15	1800	2400	8	0,0088	0,0044	0,00342
16	1800	2600	4	0,0174	0,0052	0,0079
17	1800	2600	6	0,0116	0,0038	0,00353
18	1800	2600	8	0,0088	0,0039	0,00315
19	2100	2200	4	0,0174	0,0046	0,00778
20	2100	2200	6	0,0117	0,0037	0,00389
21	2100	2200	8	0,0089	0,0034	0,00295
22	2100	2400	4	0,0174	0,0062	0,00796
23	2100	2400	6	0,0118	0,0045	0,00379
24	2100	2400	8	0,0089	0,0040	0,00303
25	2100	2600	4	0,0174	0,0049	0,00775
26	2100	2600	6	0,0117	0,0035	0,00387
27	2100	2600	8	0,0089	0,0037	0,00308

B

ISILÇİFT KALİBRASYON SERTİFİKASI



ARÇELİK A.Ş.
Kurutucu Makinesi İşletmesi
Kalibrasyon Laboratuvarı
Çerkezköy Org. San Böl. Atatürk Cad. 8. Sokak No 8
Çerkezköy/TEKİRDAĞ

ARÇ-2022
1039
10-22

KALİBRASYON SERTİFİKASI
Calibration Certificate

Kalibrasyon Etiketi
Calibration Mark

Sayfa No :4/4
Page Number

Ölçüm Sonuçları:
Measurement Results

Sıcaklık Ölçümleri (°C)

1. Kanal

Uygulanan Değer Applied Value	Okunan Değer Indicated Value	Alt Sınır Low Limit	Üst Sınır High Limit	Hata Error	Ölç.Belirsizliği Measurement Unc.	
30 °C	29.68 °C	29.40 °C	30.00 °C	-0.320 °C	0.50 °C	✓
60 °C	59.80 °C	59.60 °C	61.20 °C	-0.310 °C	0.50 °C	✓
90 °C	89.73 °C	89.20 °C	91.80 °C	-0.270 °C	0.50 °C	✓

2. Kanal

Uygulanan Değer Applied Value	Okunan Değer Indicated Value	Alt Sınır Low Limit	Üst Sınır High Limit	Hata Error	Ölç.Belirsizliği Measurement Unc.	
30 °C	29.82 °C	29.40 °C	30.00 °C	-0.180 °C	0.50 °C	✓
60 °C	59.80 °C	59.60 °C	61.20 °C	-0.180 °C	0.50 °C	✓
90 °C	89.81 °C	89.20 °C	91.80 °C	-0.190 °C	0.50 °C	✓

3. Kanal

Uygulanan Değer Applied Value	Okunan Değer Indicated Value	Alt Sınır Low Limit	Üst Sınır High Limit	Hata Error	Ölç.Belirsizliği Measurement Unc.	
30 °C	29.81 °C	29.40 °C	30.00 °C	-0.190 °C	0.50 °C	✓
60 °C	59.81 °C	59.60 °C	61.20 °C	-0.190 °C	0.50 °C	✓
90 °C	89.82 °C	89.20 °C	91.80 °C	-0.180 °C	0.50 °C	✓

4. Kanal

Uygulanan Değer Applied Value	Okunan Değer Indicated Value	Alt Sınır Low Limit	Üst Sınır High Limit	Hata Error	Ölç.Belirsizliği Measurement Unc.	
30 °C	29.84 °C	29.40 °C	30.00 °C	-0.160 °C	0.50 °C	✓
60 °C	59.86 °C	59.60 °C	61.20 °C	-0.140 °C	0.50 °C	✓
90 °C	89.88 °C	89.20 °C	91.80 °C	-0.120 °C	0.50 °C	✓

5. Kanal

Uygulanan Değer Applied Value	Okunan Değer Indicated Value	Alt Sınır Low Limit	Üst Sınır High Limit	Hata Error	Ölç.Belirsizliği Measurement Unc.	
30 °C	29.86 °C	29.40 °C	30.00 °C	-0.140 °C	0.50 °C	✓
60 °C	59.88 °C	59.60 °C	61.20 °C	-0.120 °C	0.50 °C	✓
90 °C	89.86 °C	89.20 °C	91.80 °C	-0.140 °C	0.50 °C	✓

6. Kanal

Uygulanan Değer Applied Value	Okunan Değer Indicated Value	Alt Sınır Low Limit	Üst Sınır High Limit	Hata Error	Ölç.Belirsizliği Measurement Unc.	
30 °C	29.83 °C	29.40 °C	30.00 °C	-0.170 °C	0.50 °C	✓
60 °C	59.78 °C	59.60 °C	61.20 °C	-0.220 °C	0.50 °C	✓
90 °C	89.81 °C	89.20 °C	91.80 °C	-0.190 °C	0.50 °C	✓

Bu sertifika, Arçelik A.Ş. KMI Kalibrasyon Laboratuvarının yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz.
İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory.
Calibration certificates without signature and seal are not valid.

FRM-18219-0

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. E. Geze ve Ö. Ağra, “Değişken Kapasiteli Kompresör ile Çamaşır Kurutma Makinelerinde Enerji Optimizasyonu”, 8. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 08-10 Aralık 2022, İstanbul

