T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI POMPALI ÇAMAŞIR KURUTMA MAKİNESİNİN SİSTEM TASARIM PARAMETRELERİ OPTİMİZASYON MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Gökhan SIR

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Isı Proses Programı

Danışman
Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ

Mart, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI POMPALI ÇAMAŞIR KURUTMA MAKİNESİNİN SİSTEM TASARIM PARAMETRELERİ OPTİMİZASYON MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Gökhan SIR tarafından hazırlanan tez çalışması 06.03.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail TEKE, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yakup Erhan BÖKE, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Özden AĞRA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makinesinin Sistem Tasarım Parametreleri Optimizasyon Modelinin Oluşturulması 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.

Gökhan SIR

İmza

Bu çalışma Arçelik A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

Aileme ve en yakın arkadaşlarıma
adanmıştır

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim ve tez çalışmam süreci boyunca çok değerli önerileri ve eleştirileri ile katkıda bulunan danışman hocam Sn. Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ'a en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmamın gerçekleşmesini sağlayan ve büyük destek olan Arçelik A.Ş.'ye, başta Sn. Nihat BAYIZ, ve Sn. Dr. Emre OĞUZ'a şahıslarında teşekkür ederim.

Doktora öğrenim ve tez çalışma süresi boyunca göstermiş oldukları destekten dolayı Sn. Prof. Dr. İsmail TEKE ve Sn. Prof. Dr. Yakup Erhan BÖKE'ye teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerini her zaman paylaşan ve tez çalışmamın daha nitelikli olmasına katkıda bulunan Sn. Gökmen PEKER, Sn. Çağlar ŞAHİN, Sn. Dr. Önder BALİOĞLU, Sn. Muhammed ERGÜN'e teşekkürü borç bilirim. Deneysel çalışmalar süresince göstermiş oldukları teknik destekten dolayı başta Sn. Salih GÖK olmak üzere tüm Arçelik A.Ş. Ar-Ge Temizleme Teknolojileri ailesi teknisyenlerine teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde bana maddi ve manevi her türlü desteği esirgemeden sağlayan çok değerli AİLEME teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her anında desteğinin ve sevgisinin yanımda olduğunu bildiğim sevgili eşim Sn. Zuhal BENEK SIR'a en derin duygularımla sonsuz teşekkür ederim.

Ocak, 2023

Gökhan SIR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ xiii

ŞEKİL LİSTESİ xiv

TABLO LİSTESİ xix

ÖZET xx

ABSTRACT xxii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 39

1.3 Özgün Katkı 39

2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 41

2.1 Deney Düzeneği 41

2.2 Deney Prosedürü 45

2.3 Ölçüm Belirsizliği Analizi 45

2.4 Deney Matrisi 46

3 TEORİK ÇALIŞMALAR 50

3.1 Tambur İçerisindeki Anlık Nem Alma Hızının Hesaplanması 50

3.2 Tambur İçerisindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transferi Katsayısı Hesaplamaları 51

3.3 Hava Debisi Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi 54

3.4 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Tambur İçerisindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi 56

3.5 Tambur Devir Değişiminin Tambur içindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi 58

3.6 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Tambur içindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi 60
3.7 Hava Debisi Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi 62
3.8 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi 64
3.9 Tambur Devir Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi 65
3.10 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi 66

4 İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYON MODELİ OLUŞTURULMASI 67
4.1 Kütle Transfer Katsayısının Yarı Ampirik Modelinin Oluşturulması . . . 69
4.2 Taşınım Isı Transfer Katsayısının Yarı Ampirik Modelinin Oluşturulması 73
4.3 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Değerinin Yarı Ampirik Modelinin Oluşturulması 77

5 MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYON MODELİ OLUŞTURULMASI 83
5.1 Nicel Çıktılar İçin Makine Öğrenmesi Tanımları 84
5.1.1 Karar Ağaçları Algoritması 86
5.1.2 Rassal Orman Yöntemi 88
5.1.3 Gradyanı Arttırılmış Karar Ağaçları Yöntemi 89
5.1.4 Polinomsal Regresyon Yöntemi 91
5.1.5 Yapay Sinir Ağı - Çok Katmanlı Algılayıcı Yöntemi 92
5.2 Makine Öğrenmesi Yöntemiyle Isı Pompalı Kurutma Sistemleri Optimizasyon Modelinin Kurulması 95
5.2.1 Knime Programı İle Modelin Kurulması 95
5.2.2 Knime Programı İle Kütle Transfer Katsayısı Modelinin Kurulması 98
5.2.3 Knime Programı İle Taşınım Isı Transfer Katsayısı Modelinin Kurulması 100
5.2.4 Knime Programı ile Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Modelinin Kurulması 102

6 SİSTEM TASARIM PARAMETRELERİ OPTİMİZASYON MODELİ ÇIKTILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 105
6.1 Sistem Tasarım Parametreleri Optimizasyon Modeli Doğruluk Oranlarının İncelenmesi 105
6.2 Sistem Tasarım Parametrelerinin Optimizasyon Modeli Algoritma Önerilerinin İncelenmesi 106

7 SONUÇ VE ÖNERİLER **110**
7.1 Sonuçlar 110
7.2 Öneriler 115

Kaynakça **117**

A İSTATİSTİKSEL ANALİZ MODEL VERİLERİ **120**
A.1 Kütle Transfer Katsayısı Model Verileri 120
A.2 Isı Transfer Katsayısı Model Verileri 121
A.3 Spesifik Nem Alma Oranı Model Verileri 122

B PYTHON PROGRAM KODLARI **124**
B.1 Python Programında Yazılan Kodlar 124

Tezden Üretilmiş Yayınlar **130**

SİMGE LİSTESİ

α	Aktivasyon katsayısı
m_{A}	Birim yüzey alandaki tekstil kütlesi (kg)
D_b	Boru çapı (cm)
P_v	Buhar basıncı (Pa)
$\dot{Q}_{buh}$	Buharlaştırıcı ısı transferi kapasitesi $(Watt)$
m_v	Buhar kütlesi (kg)
j	Colburn faktörü (-)
m_{nem}	Çamaşır içerisindeki nem miktarı (kg)
X	Çamaşır üzerindeki su miktarının birim kuru çamaşır miktarına oranı (%)
C_2	Çamaşır yüzeyindeki nem konsantrasyonu (kg/m^3)
ω_r	Çamaşırın tambur içerisindeki açısal hızı (rad/s)
J	Difüzyon akısı (kg/m^2s)
D	Difüzyon katsayısı (m^2/s)
P_{eff}	Effektif basınç (bar)
$\dot{W}_{fan}$	Fanın çektiği güç $(Watt)$
V	Hacim (m^3)
P_a	Hava basıncı (Pa)
u	Hava hızı (m/s)
m_a	Hava kütlesi (kg)
D_{im}	Hava su karışımının difüzyon katsayısı (m^2/s)
$RH_{\mathrm{hava,c}}$	Havanın çıkış bağıl nemi (%)
$i_{hava,c}$	Havanın çıkış entalpisi (J/kg)
$\dot{m}_{hava,c}$	Havanın çıkış kütlesel debisi (kg/s)

$T_{\text{hava,c}}$	Havanın çıkış sıcaklığı $(^{\circ}C)$
R_a	Havanın gaz sabiti (j/kgK)
$RH_{\text{hava,g}}$	Havanın giriş bağıl nemi (%)
$i_{hava,g}$	Havanın giriş entalpisi (J/kg)
$\dot{m}_{hava,g}$	Havanın giriş kütlesel debisi (kg/s)
$T_{\text{hava,g}}$	Havanın giriş sıcaklığı $(^{\circ}C)$
$\dot{m}_{hava}$	Havanın kütlesel debisi (kg/s)
$C_{p,hava}$	Havanın özgül ısısı (J/kgK)
ρ_h	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
C	Islak kumaşın nem içeriği (%)
λ_L	Islak kumaşın ısı iletim katsayısı (W/mK)
c_L	Islak kumaşın özgül ısısı (J/kgK)
T_f	Islak kumaşın sıcaklığı $(^{\circ}C)$
ρ_l	Islak tekstilin yoğunluğu (kg/m^3)
β	Katsayı sabitleri
δ	Katsayı sabitleri
γ	Katsayı sabitleri
m_{BD}	Kemik kuruluğunda tekstil kütlesi (kg)
$f_{\text{kompresor}}$	Kompresör çalışma frekansı (Hz)
$\dot{W}_{kompresor}$	Kompresörün çektiği güç $(Watt)$
C_f	Kumaşın nem içeriği (%)
$\rho_{hava,kuru}$	Kuru hava yoğunluğu (kg/m^3)
$\dot{m}_{hava,kuru}$	Kuru havanın kütlesel debisi (kg/s)
$\dot{Q}_{\text{hava}}$	Kurutma havası debisi (lt/s)
λ_a	Kurutma havası ısı iletim katsayısı (W/mK)
C_a	Kurutma havasının nem içeriği (%)
c_a	Kurutma havasının özgül ısısı (J/kgK)
ρ_a	Kurutma havasının yoğunluğu (kg/m^3)
k	Kütle transfer katsayısı (m/s)

Le	Lewis sayısı (-)
n_1	Model parametreleri
n_2	Model parametreleri
q_{11}	Model parametreleri
q_{12}	Model parametreleri
q_{21}	Model parametreleri
q_{22}	Model parametreleri
$\dot{W}_{motor}$	Motorun çektiği güç $(Watt)$
RH_0	Ortam havasının bağıl nemi (%)
Re	Reynolds sayısı (-)
f_w	Su miktarı (kg)
R_v	Su buharı gaz sabiti (j/kgK)
f	Sürtünme faktörü (-)
r	Tambur çapı (m)
ω_c	Tambur çıkışı havanın özgül nemi $(kg_{\text{subuharı}}/kg_{\text{kuruhava}})$
d_{tambur}	Tambur devri (rpm)
ω_g	Tambur girişi havanın özgül nemi $(kg_{\text{subuharı}}/kg_{\text{kuruhava}})$
C_1	Tambur içerisindeki havanın nem konsantrasyonu (kg/m^3)
T_a	Tambur içerisindeki kurutma havasının sıcaklığı $(°C)$
ϵ	Tamburda ısı ve kütle transferinin etkinliği (-)
$\dot{W}_{tambur}$	Tamburun çektiği güç $(Watt)$
h_c	Taşınım ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
A	Tekstil yüzey alanı (m^2)
$C_{p,hava,t}$	Tekstil yüzeyindeki havanın özgül ısısı (J/kgK)
$\dot{m}_{hava,buh}$	Tekstilden buharlaşan anlık su miktarı (kg/s)
$\omega_{ort,t}$	Tekstil yüzeyindeki havanın özgül nem değeri $(kg_{\text{subuharı}}/kg_{\text{kuruhava}})$
ρ_b	Tekstil yüzeyindeki su buharı yoğunluğu (kg/m^3)
θ	Türbülans enerjisi (m^2/s^2)
$\dot{Q}_{yog}$	Yoğuşturucu ısı transferi kapasitesi $(Watt)$

$m_{\text{çamaşır}}$	Yük kapasitesi (kg)
t	Zaman (s)

KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
COP	Performans Katsayısı
RMC	Kalan Nem Miktarı
SMER	Spesifik Nem Alma Hızı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Kanat Aralığının (a) 1,7 mm ve (b) 3,3 mm Olduğu Durumlar İçin Boru Sıra Sayısının Isı Transferi Üzerine Etkisi [2] 3
Şekil 1.2 Paralel Sondaj Delik Sayısına Bağlı Yıllık Toplam Yatırım Tutarının Değişimi [3] 4
Şekil 1.3 Paralel Sondaj Delik Sayısına Bağlı Yıllık Yatırım ve Elektrik Tüketim Tutarının Değişimi [3] 4
Şekil 1.4 Bobin Boyutları [4] 5
Şekil 1.5 Viskon Bobinlerin Kurutma Davranışı (D_b=14 cm, $\dot{Q}_{\text{hava}}$= 42.5 m^3/h, $P_{eff} = 1bar$)[4] 5
Şekil 1.6 Viskon Bobinlerin Kurutma Davranışı (D_b=14 cm, $\dot{Q}_{\text{hava}} = 67.5$ m^3/h, $P_{eff} = 1bar$)[4] 6
Şekil 1.7 Nem Alma Karakteristiğinin Bir Boyutlu Isı Transferi ile Modellenmesi [5] 7
Şekil 1.8 Farklı Isıtıcı Güçlerinde Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Hava Hızı = 8.5 m/s) [5] 9
Şekil 1.9 Farklı Giriş Bağıl Nem Değerleri İçin Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Isıtıcı Gücü= 4500W, Hava Hızı = 8.5 m/s, Tambur dönüş hızı =1200 rpm) [5] 10
Şekil 1.10 Farklı Çamaşır Kapasitesi İçin Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Isıtıcı Gücü = 4500W, Hava Hızı = 8.5 m/s, Tambur Dönüş Hızı = 1200 rpm) [5] 10
Şekil 1.11 Farklı Hava Hızlarında Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Isıtıcı Gücü = 4500 W) [5] 11
Şekil 1.12 Farklı Tambur Dönüş Devir Değerlerinde Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Isıtıcı Gücü= 4500W, Hava Hızı = 8.5 m/s) [5] 11
Şekil 1.13 Tambur İçerisinde Tekstil Hareketinin Koordinat Gösterimi [6] 13
Şekil 1.14 Kumaşın Tambur İçerisinde Yaptığı Hareketlerin Gösterimi [6] 13
Şekil 1.15 Kumaş Tipine Göre Kurutma Makinesinde İzlediği Yolun Değişimi [6] 14
Şekil 1.16 Kumaş Tipi ve Yüke Bağlı Olarak Kumaşın İzlediği Yolun Değişimi [6] 15

Şekil 1.17 Kumaş Tipi ve Motor Devri Değişimine Bağlı Olarak Kumaşın İzlediği Yolun Değişimi [6] 16
Şekil 1.18 Kurutma Performans Değerlerinin Değişimi [6] 17
Şekil 1.19 Kurutma Çevriminde Çamaşırın Üzerindeki ve Tambur Çıkışında Sıcaklık ve Bağıl Nem Değişimleri (a) Bağıl Nem, (b) Sıcaklık [7] . . 18
Şekil 1.20 Çamaşır Üzerinden Nem Uzaklaştırmanın Mekanizmaları [7] 19
Şekil 1.21 Kırışıklık Görünümleri (a) Test-1 (b) Test-2 [7] 21
Şekil 1.22 Zamana Bağlı Kurutma Sisteminin Model Sonuçları [8] 24
Şekil 1.23 Emme ve Basma Basınç Değeri Değişimi [8] 24
Şekil 1.24 Zamana Bağlı SMER Değişimi [8] 25
Şekil 1.25 Zamana Bağlı COP Değişimi [8] 25
Şekil 1.26 Nem Oranının Hava Debisine Bağlı Değişimi [8] 26
Şekil 1.27 Emme ve Basma Basıncının Zamana Bağlı Değişimi [8] 27
Şekil 1.28 Tamburdaki Hava Sıcaklığının Farklı Hava Debilerine Göre Değişimi [8] 27
Şekil 1.29 Hava Debisi Değişiminin COP Değerine Etkisi [8] 28
Şekil 1.30 SMER Değerinin Farklı Hava Debi Değerine Göre Değişimi [8] . . . 28
Şekil 1.31 Isı Değiştirici Genişliğine Bağlı Emme ve Basma Basınç Değerlerinin Zamana Bağlı Değişimi [8] 29
Şekil 1.32 Isı Değiştiricisi Genişliğinin Kurutma Çevrimi İçerisinde Tekstil Üzerindeki Nem Oranı ve SMER Değerine Olan Etkisi [8] 29
Şekil 1.33 Farklı Buharlaştırıcı ve Yoğuşturucuların Simülasyon Sonuçları [8] . 30
Şekil 1.34 Tambur Giriş ve Çıkışındaki Bağıl Nemin Farklı Kurutma Kapasiteleri ile Değişimi [13] 34
Şekil 1.35 Yük Kapasitesi ve Fan Devrinin Sabit Tambur Devrinde Enerji Tüketimine Etkisi [13] 34
Şekil 1.36 Isı Transferinin Deneysel ve Model Sonuçları ile Karşılaştırılması [17] 36
Şekil 2.1 Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi 41
Şekil 2.2 Yoğuşturucu ve Buharlaştırıcı Termokupl Yerleşimi 42
Şekil 2.3 Deney Düzeneği Görseli 43
Şekil 2.4 Hava Akış Sensörü 44
Şekil 2.5 Rüzgar Tüneli Kalibrasyonu 44
Şekil 2.6 Rüzgar Tüneli & Basınç Sensörü Kalibrasyon Denklemi 45
Şekil 3.1 Kurutma Makinası Nem Alma Mekanizması 50
Şekil 3.2 Farklı Tip Kumaşlar İçin Aktivasyon Katsayısının Değişimi [25] . . . 53
Şekil 3.3 Hava Debisi Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Transfer Katsayısına Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, d_{tambur}:52 rpm 55
Şekil 3.4 Hava Debisi Değişiminin Tambur İçindeki Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, d_{tambur}:52 rpm . . . 56

Şekil 3.5 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Transfer Katsayısına Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, d_{tambur}:62 rpm, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:68 lt/s 57
Şekil 3.6 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Tambur İçindeki Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, d_{tambur}:62 rpm, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:68 lt/s 58
Şekil 3.7 Tambur Devir Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Transfer Katsayısına Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg 59
Şekil 3.8 Tambur Devir Değişiminin Tambur İçindeki Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg 60
Şekil 3.9 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Transfer Katsayısına Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, d_{tambur}:42 rpm, $f_{\text{kompresor}}$:35 Hz . . . 61
Şekil 3.10 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Tambur İçindeki Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, d_{tambur}:42 rpm, $f_{\text{kompresor}}$:35 Hz . . . 62
Şekil 3.11 Hava Debisi Değişiminin Spesifik Nem Alma Oranına (SMER) Olan Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, d_{tambur}:52 rpm 63
Şekil 3.12 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:68 lt/s, d_{tambur}:62 rpm 64
Şekil 3.13 Tambur Devir Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg 65
Şekil 3.14 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, d_{tambur}:42 rpm, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz 66
Şekil 4.1 Kütle Transfer Katsayısı Modeli Artık Grafikleri 69
Şekil 4.2 Kütle Transfer Katsayısına Etki Eden Paremetrelerin Pareto Şeması . 70
Şekil 4.3 Kütle Transfer Katsayısına Etki Eden Ana Parametreler 71
Şekil 4.4 Hava Debisi ve Kompresör Çalışma Frekansının Kütle Transfer Katsayısına Olan Etkisi, $\text{m}_{\text{çamaşır}} : 5kg, d_{\text{tambur}} : 52rpm, t : 77.dk, T_{\text{hava,g}} : 321K, RH_{\text{hava,g}}$:%33 71
Şekil 4.5 Tambur Devri ve Kurutma Kapasitesinin Kütle Transfer Katsayısına Olan Etkisi, $\text{Q}_{\text{hava}} : 64lt/s, f_{\text{kompresor}} : 35Hz, t : 77.dk, T_{\text{hava,g}} : 321K, RH_{\text{hava,g}}$:%33 72
Şekil 4.6 Program Süresi ve Tambur Giriş Bağıl Nem Değerinin Kütle Transfer Katsayısına Olan Etkisi, $\text{Q}_{\text{hava}} : 64lt/s, f_{\text{kompresor}} : 35Hz, m_{\text{çamaşır}} : 5kg, d_{\text{tambur}} : 52rpm$ 72
Şekil 4.7 Taşınım Isı Transferi Katsayısı Modeli Artık Grafikleri 73
Şekil 4.8 Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etki Eden Paremetrelerin Pareto Şeması 74
Şekil 4.9 Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etki Eden Paremetrelerin Ana Etki Grafiği 75
Şekil 4.10 Hava Debisi ve Kompresör Çalışma Frekansının Taşınım Isı Transfer Katsayısına Olan Etkisi, $\text{m}_{\text{çamaşır}} : 5kg, d_{\text{tambur}} : 52rpm, t : 77.dk, T_{\text{hava,g}} : 321K, RH_{\text{hava,g}}$:%33 76

Şekil 4.11 Tambur Devri ve Kurutma Kapasitesinin Taşınım Isı Transfer Katsayısına Olan Etkisi, Q_{hava} : $66lt/s, f_{kompresor}$: $35Hz, t$: $77.dk, T_{hava,g}$: $321K, RH_{hava,g}$:%33 76
Şekil 4.12 Program Süresi ve Tambur Giriş Bağıl Nem Değerinin Taşınım Isı Transfer Katsayısına Olan Etkisi, Q_{hava} : $66lt/s, f_{kompresor}$: $35Hz, m_{çamaşır}$: $5kg, d_{tambur}$: $52rpm$ 77
Şekil 4.13 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Modeli Artık Grafikleri 78
Şekil 4.14 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Modeline Etki Eden Parametrelerin Pareto Şeması 79
Şekil 4.15 Spesifik Nem Alma Hızına Etki Eden Paremetrelerin Ana Etki Grafiği 80
Şekil 4.16 Kurutma Kapasitesi ve Hava Debisi Değerinin Spesifik Nem Alma Hızına Olan Etkisi, $m_{çamaşır}$: $5kg, d_{tambur}$: $52rpm, t$: $77.dk, T_{hava,g}$: $321K, RH_{hava,g}$:%33 81
Şekil 4.17 Tambur Devri ve Kompresör Çalışma Frekansının Spesifik Nem Alma Hızına Olan Etkisi, Q_{hava} : $66lt/s, t$: $77.dk, T_{hava,g}$: $321K, RH_{hava,g}$:%33 81
Şekil 4.18 Program Süresi ve Tambur Girişindeki Havanın Bağıl Neminin Spesifik Nem Alma Hızına Olan Etkisi, Q_{hava} : $66lt/s, f_{kompresor}$: $35Hz, m_{çamaşır}$: $5kg, d_{tambur}$: $52rpm$ 82
Şekil 5.1 Veri Madenciliğinin Genel Yapısı 84
Şekil 5.2 İstatistik, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Genel Yapısı 85
Şekil 5.3 Makine Öğrenmesi Süreci Adımları 86
Şekil 5.4 Hava Durumuna Bağlı Olarak Karar Veren Örnek Bir Karar Ağacı . . 86
Şekil 5.5 Olasılık-Entropi Değişim Eğrisi 87
Şekil 5.6 Model Oluşturulması Sırasında Karşılaşılan Farklı Öğrenme Tipleri . 88
Şekil 5.7 Rassal Orman Yönteminin Ağaç Yapısı 89
Şekil 5.8 Gradyanı İyileştirilmiş Karar Ağaçları Yöntemi Ağaç Yapısı 90
Şekil 5.9 Gradyanı İyileştirilmiş Karar Ağaçları Yönteminde Hatanın Azaltılması 90
Şekil 5.10 Biyolojik Sinir Hücresi 92
Şekil 5.11 Tek Katmanlı Yapay Sinir Ağı Modeli 93
Şekil 5.12 Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı Model Yapısı 94
Şekil 5.13 Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağı Modeli 94
Şekil 5.14 Optimizasyon Modeli İçin Kurulan Sistem Şeması 96
Şekil 5.15 Sütun Filtreleme Ekranı 96
Şekil 5.16 Kütle Transfer Katsayısı - Makine Öğrenmesi Şeması 98
Şekil 5.17 Kütle Transfer Katsayısı - Geleneksel Bölme Yöntemi Doğruluk Oranı 99
Şekil 5.18 Kütle Transfer Katsayısı - K katlamalı Çapraz Validasyon Doğruluk Oranı 99
Şekil 5.19 Kütle Transfer Katsayısı - Korelasyon Matrisi 100
Şekil 5.20 Taşınım Isı Transfer Katsayısı - Makine Öğrenmesi Şeması 100

Şekil 5.21 Taşınım Isı Transfer Katsayısı - Geleneksel Bölme Yöntemi Doğruluk Oranı 101
Şekil 5.22 Taşınım Isı Transfer Katsayısı - K Katlamalı Çapraz Validasyon Doğruluk Oranı 101
Şekil 5.23 Taşınım Isı Transfer Katsayısı - Korelasyon Matrisi 102
Şekil 5.24 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) - Makine Öğrenmesi Şeması 102
Şekil 5.25 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) - Geleneksel Bölme Yöntemi Doğruluk oranı 103
Şekil 5.26 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) - K katlamalı Çapraz Validasyon Doğruluk Oranı 103
Şekil 5.27 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) - Korelasyon Matrisi 104
Şekil 6.1 2 kg Çamaşır Kütlesini Kurutmak İçin Sistem Parametreleri Değişimi 107
Şekil 6.2 5 kg Çamaşır Kütlesini Kurutmak İçin Sistem Parametreleri Değişimi 107
Şekil 6.3 8 kg Çamaşır Kütlesini Kurutmak İçin Sistem Parametreleri Değişimi 108

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Kullanılan Parametreler 1
Tablo 1.2 Isı Değiştiricilerde İncelenen Geometrik Özellikler 2
Tablo 1.3 Modelde Sabit Tutulan Parametreler 2
Tablo 1.4 Testlerde Kullanılan Çamaşır Yükünün Özelliği 7
Tablo 1.5 Modelde Sabit Tutulan Parametreler 9
Tablo 1.6 Deneylerde Kullanılan Kumaşların Özellikleri 12
Tablo 1.7 Deneylerde Uygulanan Kurutma Parametreleri 12
Tablo 1.8 Deneylerde Kullanılan Tekstil Özellikleri 18
Tablo 1.9 Kurutma Fazlarında Tambur Çıkış Hava Bağıl Nem Değerleri Değişimi 19
Tablo 1.10 Kurutma Parametreleri 20
Tablo 1.11 Test Sonuçları 20
Tablo 1.12 Hava Soğutmalı Isı Değiştirici Geometrik Özellikleri 23
Tablo 1.13 Kapileri, Kompresör ve Tambur Özellikleri 23
Tablo 2.1 Farklı Çalışma Frekanslarında RECHI 39Q1ALK Model Kompresörün Giriş Gücü ve Soğutma Kapasitesi Değişimi 42
Tablo 2.2 Termokupl ve Bağıl Nem Sensörü Yerleşim Bölgeleri 42
Tablo 2.3 Deney Düzeneğinde Kullanılan Cihazların Doğruluk Değerleri 46
Tablo 2.4 Hesaplanan Belirsizlik Değerleri 46
Tablo 2.5 Deney Matrisi 47
Tablo 4.1 Modelin Doğruluğu 69
Tablo 4.2 Modelin Doğruluğu 74
Tablo 4.3 Modelin Doğruluğu 78
Tablo 5.1 Yapay Sinir Ağları ve Biyolojik Sinir Sistemi Arasındaki Bağlantı . . 92
Tablo 5.2 Farklı Makine Öğrenme Algoritmalarının Model Doğruluk Oranları . 97
Tablo 6.1 Kütle Transfer Katsayısı Model Doğruluk Oranları 105
Tablo 6.2 Isı Transfer Katsayısı Model Doğruluk Oranları 106
Tablo 6.3 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Model Doğruluk Oranları 106
Tablo 6.4 Makine Öğrenme Yöntemi ile Oluşturulan Algoritmanın Enerji Tüketim Değeri Değişimi 109

ÖZET

Isı Pompalı Çamaşır Kurutma Makinesinin Sistem Tasarım Parametreleri Optimizasyon Modelinin Oluşturulması

Gökhan SIR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ

2009 yılından itibaren kurutma makinelerinde ısı pompası sistemleri yaygınlaşmaya başlamış, 2020 yılı itibariyle kurutucu pazar payında ısı pompalı çamaşır kurutma makinaları birinci sırayı almıştır. 2025 yılı itibariyle kurutma makinelerinde yeni enerji standardı regülasyonunun gelmesi planlanmaktadır. AB'de artan enerji krizi sebebiyle özellikle ısı pompalı kurutma sistemlerinde enerji verimliliğini arttırmak için yapılan çalışmalar ön plana çıkmıştır. Bu sistemlerin fiyat rekabetçi olarak tasarlanması, sistemlerin modellenmesini ve en uygun performans seviyesine getirilmesini önemli kılmaktadır. Bu doktora tez çalışmasında, söz konusu ısı pompalı çamaşır kurutma sistem tasarım parametrelerinin optimizasyon modelinin kurulması, tambur içerisindeki spesifik nem alma hızı, kütle ve taşınım ısı transfer katsayılarının, kurutma kapasitesi, tambur devri, kompresör frekansı ve hava debisi ile etkileşimi incelenmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde, literatürdeki çalışmalar ve yürütülen doktora çalışmasının özgün yönü paylaşılmıştır. Son dönemde Çin ve avrupa menşeili firmaların sponsorluğunda kurutma sistemleri üzerine çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Ancak bu çalışmalarda istatistiksel analiz yöntemleri ve makine öğrenme modellerinin kurulmadığı gözlemlenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, deneylerin yürütüldüğü deney düzeneği hakkında detaylı bilgi paylaşımında bulunulmuştur. Deney düzeneğinde kullanılan cihazlar ve araçlar paylaşılmıştır.

Üçüncü bölümde deneysel çalışmaların sonuçları ve teorik olarak ısı pompalı kurutma makinelerinde kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı hesaplama yaklaşımı paylaşılmıştır.

Dördüncü bölümde istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak ısı pompalı kurutma makinelerinde SMER, kütle ve taşınım ısı transfer katsayıları modellenmiş, her üç değer için, kurutma kapasitesi, hava debisi, tambur devri, kompresör frekansı, tambur giriş hava sıcaklığı ve giriş hava bağıl nemine bağlı olarak yarı ampirik ifadeler oluşturulmuştur.

Beşinci bölümde gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması kullanarak spesifik nem alma hızı, kütle ve taşınım ısı transfer katsayıları için sistem optimizasyon modelleri makine öğrenmesi yöntemleri ile modellenmiştir. Geliştirilen modeller sonucunda oluşan korelasyon matrisleri paylaşılmıştır.

Altıncı bölümde sistem tasarım parametreleri optimizasyon modeli çıktılarının doğruluk oranları ve algoritma önerilerinin incelenmesi çalışmaları paylaşılmıştır. Tez çalışmasının son bölümünde ise elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı pompası, optimizasyon, modelleme, ısı ve kütle transferi, spesifik nem alma hızı

ABSTRACT

Development of an Optimization Model of System Design Parameters of Heat Pump Clothes Dryer

Gökhan SIR

Department of Mechanical Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ

Heat pump dryers have become increasingly popular since 2009, and by 2020 they have become the market leader in the dryer industry. A new energy standard regulation is scheduled to be introduced by 2025. In response to the increasing energy crisis in the EU, studies focused on improving energy efficiency in dryers have become prominent. It is essential to design these systems competitively and optimize their performance levels. This doctoral thesis aims to optimize the design parameters for heat pump dryers, specifically investigating the SMER, mass, and heat transfer coefficients within the drum, drying capacity, drum speed, compressor frequency, and air flow interaction.

The first section of the thesis shares the original aspects of the literature review and doctoral study. Although recent studies on drying systems have been conducted, they lack statistical analysis methods and machine learning models.

The second section provides detailed information on the experimental setup where the experiments were conducted, including the devices and tools used.

The third section presents the results of the experimental studies and the theoretical approach for calculating the mass and heat transfer coefficients in heat pump drying machines. The fourth section uses statistical analysis methods to model SMER, mass, and heat transfer coefficients in heat pump dryers. Semi-empirical expressions are created for all three values based on drying capacity, air flow rate, drum speed, compressor frequency, drum inlet air temperature, and inlet air relative humidity.

In the fifth section, optimization models for SMER, mass, and heat transfer coefficients are modeled using machine learning methods with the gradient boosting algorithm. The resulting correlation matrices from the models are shared.

The sixth section shares the accuracy of the output of the system design parameter optimization model and the study of algorithm recommendations. The final section presents the obtained results and recommendations for future studies.

Keywords: Heat pump, optimization, modelling, heat and mass transfer, spesific moisture extraction rate

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Literatür çalışmaları kapsamında, ısı pompalı kurutma sistemleri performansının incelenmesi, ısı pompalı kurutma sistem model çalışmaları ve tekstil üzerinden optimum koşullarda nem almanın incelenmesi konu başlıkları altında literatür araştırması gerçekleştirilmiştir.

2015 yılında Serkan Erdem ve arkadaşlarının yayınladığı makalede [1], buharlaştırıcı tasarımının kurutma süresi ve enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. İlgili çıktılara ulaşabilmek için hava ve soğutkan tarafı, ısı transferi, kütle transferi ve basınç düşüşleri incelenmiştir.

Tablo 1.1 Kullanılan Parametreler

Ekipmanlar	Kullanılan Korelasyonlar				
Buharlaştırıcı	Hava Tarafı			CO_2 Tarafı	
	Isı Transferi	Kütle Transferi	Basınç Düşmesi	Isı Transferi	Basınç Düşmesi
	Pirompugd et al. (2008)	Pirompugd et al. (2008)	Wang et al. (1999)	Cheng et al. (2008a)	Cheng et al. (2008a)
	Kuehn et al. (1998)		Kays and London (1984)	Cheng et al. (2008b)	Cheng et al. (2008b)
	Wang et al. (1997)				VDI (2010)
Gaz Soğutucu	Wang and Chi (2000)	-	Kays and London (1984)	Fang (1999)	Fang (1999)
	Wang et al. (2000)		Wang and Chi (2000)	Churchill (1977)	Churchill (1977)
	Wang et al. (2002)		Wang et al. (2000)		Darby (2001)
	VDI (2010)		Wang et al. (2002)		Blevins (1992)
	Spalding and Taborek (1983)				
Kompresör	İzentropik ve hacimsel verimlilik				
	Ortiz et al. (2003)				
Tambur	Kurutucu verimliliği	Hava basıncı düşmesi			
	Prasertsan et al. (1996)	Klöcker et al. (2001)			
Fan	Güç				
	Sarkar et al. (2006a)				

Tablo 1.1'de makalede buharlaştırıcı, gaz soğutucu, kompresör, tambur ve fan için karşılaştırmada kullanılan literatürdeki korelasyonlar gösterilmektedir.

Tablo 1.2 Isı Değiştiricilerde İncelenen Geometrik Özellikler

Özellikler	Birimler	Gaz Soğutucu	Buharlaştırıcı
Yatay Boru Sayısı	-	8	Parametrik olarak değiştirilmiş
Dikey Boru Sayısı	-	6	Parametrik olarak değiştirilmiş
Boru Dış Çapı	mm	9.52	Parametrik olarak değiştirilmiş
Boru Duvar Kalınlığı	mm	1	1
Fin Kalınlığı	mm	0.12	0.12
Fin Aralığı	mm	2	3
Dikey Boru Yüksekliği	mm	21	Parametrik olarak değiştirilmiş
Yatay Boru Yüksekliği	mm	25.4	25.4
Kanat Açısı	°	18	18
Boru Uzunluğu	mm	238	238
Boru Yapısı	-	Dirsekli	Dirsekli
Boru Malzemesi	-	Paslanmaz çelik	Paslanmaz çelik
Fin Malzemesi	-	Alüminyum	Alüminyum

Tablo 1.2'de buharlaştırıcı ve gaz soğutucu ısı değiştiricilerinin geometrik özellikleri gösterilmekdetir. Tablo 1.1'de gösterilen korelasyonlarda ilgili parametrelerin değişimi incelenmiştir.

Tablo 1.3 Modelde Sabit Tutulan Parametreler

Özellikler	**Birimler**	
Çamaşırdaki su miktarı	kg	4.8
Buharlaştırıcıya giren CO_2 sıcaklığı	°C	10
Gaz soğutucusuna giren CO_2 basıncı	bar	100
Ortam hava sıcaklığı	°C	25
Ortam havası bağıl nem	%	55
Ortam hava basıncı	Pa	101325
Sızıntı oranı	%	15
Kurutucu verimliliği	%	85
Hava kütle debisi	kg/h	250
Kompresörün yer değiştirme hacmi	cm^3	3.5
Kompresör hızı	rpm	2900
Filtre basıncı düşüşü	Pa	200
Fan verimliliği	%	60

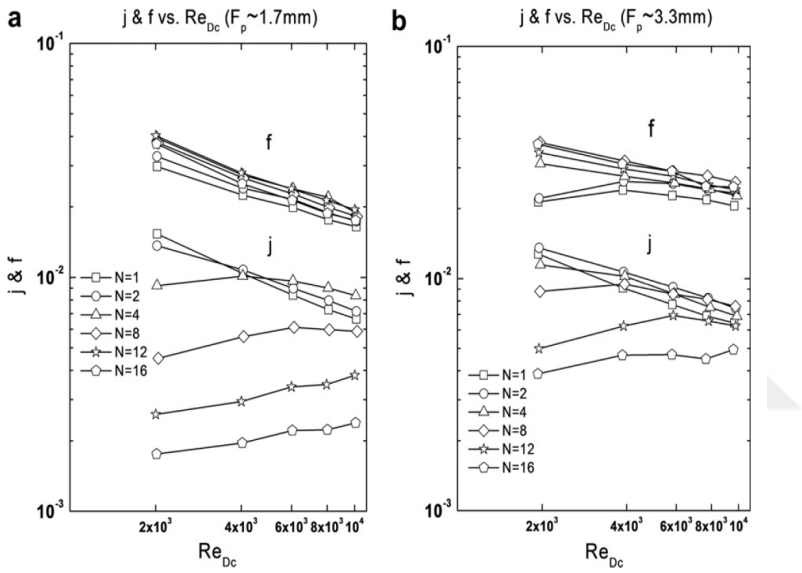
Tablo 1.3'te ise modele girdi olarak uygulanan sabit parametreler gösterilmektedir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda,

- Buharlaştırıcı sıra sayısının 2'den 4'e çıkması durumunda sistem enerji tüketimi %12 azalmıştır.
- Buharlaştırıcı sütün sayısının 2'den 4'e çıkması durumunda enerji tüketimi %8 azalmaktadır.

- Boru dış çapının 6 mm'den 10 mm'ye çıkması durumunda enerji tüketimi %18 artmıştır.

Wang C.C. ve arkadaşlarının 2011 yılında yayınladığı makalede [2], kanatlı boru ısı değiştiricilerde büyük boru çapına sahip ısı değiştiricilerin (Boru çapı = 16,59 mm) hava tarafı ısı transferi performansı incelenmiştir. İncelemeler deneysel olarak gerçekleştirilmiş olup boru sıra sayısı 1 ile 16 arasında değiştirilmiştir. Buharlaştırıcıda soğutkan tarafı şartlandırma su ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında 1,7 mm ve 3,3 mm kanat aralığına sahip ısı değiştiriciler kullanılırken ısı değiştiricinin derinliği 1 sıra için 33 mm ölçümüyle 528 mm arasında değiştirilmiştir.



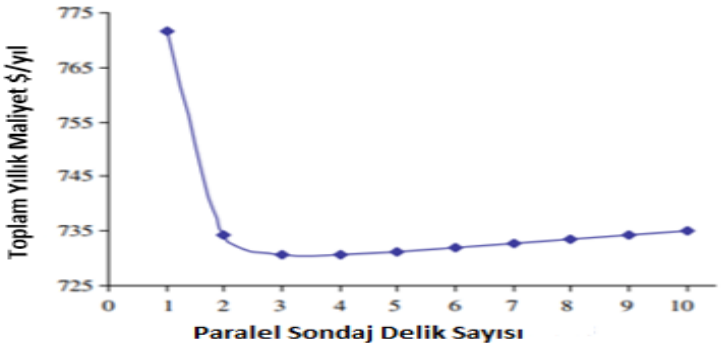
Şekil 1.1 Kanat Aralığının (a) 1,7 mm ve (b) 3,3 mm Olduğu Durumlar İçin Boru Sıra Sayısının Isı Transferi Üzerine Etkisi [2]

Şekil 1.1'de kanat aralığının (a) 1,7 mm ve (b) 3,3 mm olduğu durumlar için boru sıra sayısının ısı transferi üzerine etkisi gösterilmiştir. Boru sıra sayısının 1 ve 2 olduğu durumda ısı transferi performansı büyük bir artış göstermezken, boru sıra sayısının artışı ile birlikte ısı transferi performansında gözle görülür bir artış olduğu sonucu paylaşılmıştır.

Reynolds sayısının daha düşük olduğu durumlarda ise ısı transferinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun tam tersine, reynolds sayısının artışı ile birlikte ısı transferinin arttığı her iki kanat sıklığı durumu için de tespit edilmiştir.

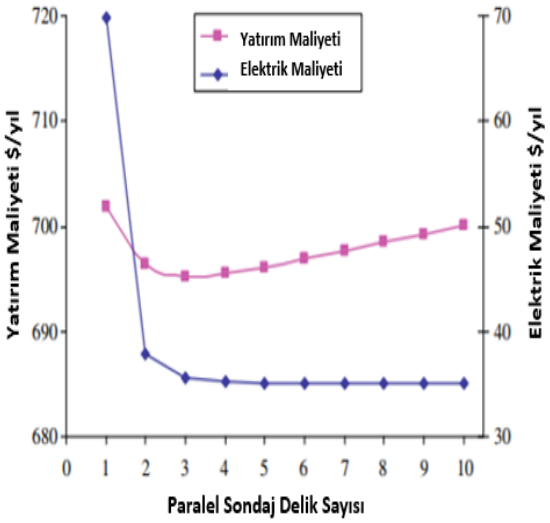
Kanat sıklığının 3,3 mm olduğu durumda ise, etkiler benzer eğilimde etki ederken boru sıra sayısının 1 ve 2 olduğu durumlarda kanatlar arasındaki mesafeden bağımsız olarak ısı transferinin değişmediği sonucu paylaşılmıştır.

S. Sanaye ve arkadaşlarının yayınlamış olduğu makalede [3], toprak kaynaklı ısı pompalı sistemlerde termoekonomik modelleme ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu bulunan değerler, literatürde kabul edilen modeller ile karşılaştırılmış ve kabul edilebilir seviyede doğrulanmıştır. Çalışmanın amacı olan minimum operasyon ve yatırım maliyeti için optimizasyon çalışmaları yapılmış, bu hedefi sağlamak amacıyla optimum ısı pompası parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 1.2 Paralel Sondaj Delik Sayısına Bağlı Yıllık Toplam Yatırım Tutarının Değişimi [3]

Şekil 1.2'de paralel sondaj delik sayısına bağlı yıllık toplam yatırım tutarının değişimi gösterilmektedir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda toplam yatırım bedelinin minimum olduğu sondaj delik sayısı 3 olarak belirlenmiştir.

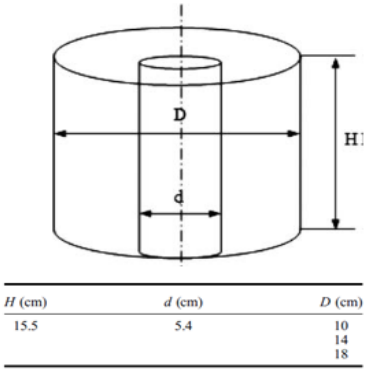


Şekil 1.3 Paralel Sondaj Delik Sayısına Bağlı Yıllık Yatırım ve Elektrik Tüketim Tutarının Değişimi [3]

Şekil 1.3'te paralel sondaj delik sayısına bağlı yıllık yatırım ve elektrik tüketim tutarının değişimi gösterilmektedir. Sondaj delik sayısının 2 ve üzeri olduğu

durumlarda yatırım maliyetinin lineer olarak arttığı görülmektedir. Elektrik tüketim değerinin ise 2 ve üzeri sondaj delik sayılarında hemen hemen değişmediği gözlemlenmiştir.

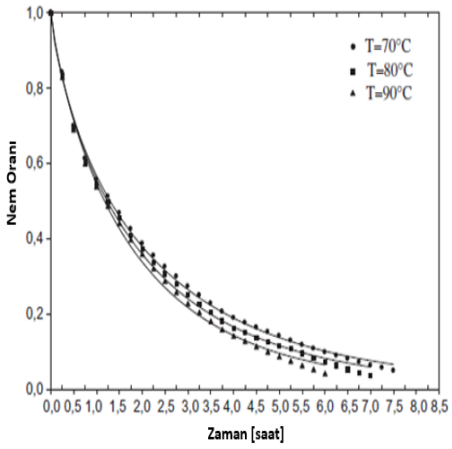
Uğur Akyol ve arkadaşlarının 2015 yılında yayınladığı makalede [4], viskon iplik bobinlerinin optimum kurutma koşullarının belirlenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sistem kapalı çevrimdir ve hava akışı fan ile zorlanmış taşınım olarak gerçekleştirilmektedir. Hava debisi sistem üzerine yerleştirilen akış ölçer ile takip edilmektedir. Isıtıcı ile sıcaklığı kontrol edilebilen hava bobinin kapalı olarak yerleştirildiği silindir bir kutu içerisinden geçirilerek nem alma işlemi gerçekleştirilir. Nemli hava buharlaştırıcıdan geçirilerek nemi alınmakta ve tekrar kapalı çevrimde sirkülasyona devam etmektedir.



H (cm)	*d* (cm)	*D* (cm)
15.5	5.4	10 14 18

Şekil 1.4 Bobin Boyutları [4]

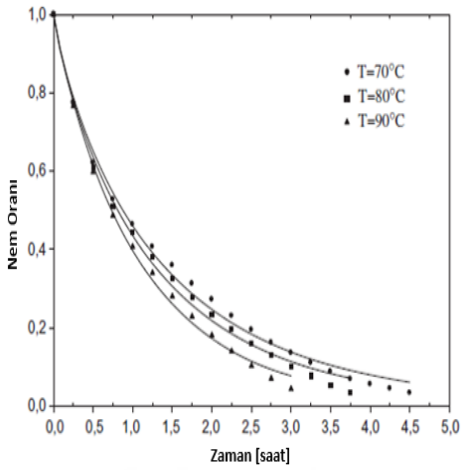
Şekil 1.4'te gösterildiği üzere bobinin yüksekliği ve iç çapı sabit tutularak dış çapının değişimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.5 Viskon Bobinlerin Kurutma Davranışı (D_b=14 cm, $\dot{Q}_{\text{hava}}$= 42.5 m^3/h, $\text{P}_{eff} = 1bar$)[4]

Şekil 1.5'te viskon bobinlerin farklı sıcaklık değerlerinde nem alma karakteristiği

incelenmiştir. Sistemde sıcaklık harici parametreler sabit tutulduğunda kurutma sıcaklığının artışına bağlı olarak kurutma süresinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 1.6 Viskon Bobinlerin Kurutma Davranışı (D_b=14 cm, $\dot{Q}_{\text{hava}} = 67.5$ m^3/h, $\text{P}_{eff} = 1bar$)[4]

Şekil 1.6'da viskon bobinlerin farklı sıcaklık değerlerinde, hava debisinin 67.5 m^3/h olduğu durum için nem alma karakteristiği incelenmiştir. Grafikte de görüleceği üzere kurutma havası sıcaklık değerinin artmasına bağlı olarak kurutma süresinde azalma görülmektedir.

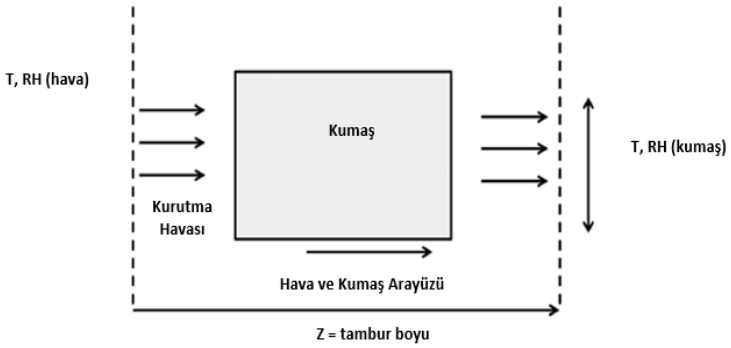
Sonuç olarak, ısıtıcı gücü, hava debisi ve sistem basıncı kurutmada en etkili faktörler olarak belirlenmiştir. En iyi sonuç 67.5 m^3/h debi, 1 bar efektif basınç, 90 °C koşullarında elde edilmiştir.

Yuhui Wei ve arkadaşlarının 2017 yılında yayınladığı makalede [5], bacalı kurutma makinalarında, gözenekli kumaştaki ısı ve kütle transferini simüle eden matematiksel model çalışması gerçekleştirilmiştir. Tambur içerisinde nem alma işlemi, ısıtıcıda sıcaklığı ve nem alma kapasitesi arttırılmış, zorlanmış taşınım ile havadan kumaşa aktarılmaktadır. Kumaş içerisinde iletim ile ısı transferi ve difüzyon ile nem transferi olmaktadır. Kumaştaki nemin alınmasıyla taşınım ile havaya ısı transferi olmaktadır. Ayrıca suyu buharlaştırmak için sistemde bir ısı transferi gerçekleşmektedir. Son olarak nemli hava ve ısıtılmış hava sistemi terk etmektedir.

Tablo 1.4 Testlerde Kullanılan Çamaşır Yükünün Özelliği

Parametre	Değer
Kumaş Türü	Saf Pamuk
Kumaş Yapısı	Dokuma
Kumaş Ağırlığı (g/m^2)	145 (±0.03)
Kalınlık (mm)	0.79 (±0.03)
Kumaş Gözenekliliği (%)	76.7
Giriş Nem Miktarı (%)	70
Yük (kg)	5
Cp Çamaşır (kJ/kg.K)	1.224 (±140)

Testlerde kullanılan çamaşır yükünün özelliği tablo 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.7 Nem Alma Karakteristiğinin Bir Boyutlu Isı Transferi ile Modellenmesi [5]

Şekil 1.7'de nem alma karakteristiğinin bir boyutlu ısı transferi ile oluşturulan modeli şematik olarak gösterilmiştir. Model kurgulanırken aşağıdaki kabuller gerçekleştirilmiştir.

- Tekstil ve kurutma havası uniform bir başlangıç nem değerinde homojendir.
- Kurutma sırasında tekstilin boyut değişikliği ihmal edilmiştir.
- Kumaş tambur içerisinde eşit olarak dağıtılmış ve uniform dairesel bir hareket gerçekleştirmektedir.
- Tüm kurutma boyunca basınç atmosferik basınçtır ve değişmemektedir.
- Hava, ısıtıcı tarafından ısıtıldıktan sonra tamamen kurudur ve hava içerisindeki nem tekstil üzerindeki sudan sağlanmaktadır.
- Havada ısı transferi iletim ve taşınım ile gerçekleşmektedir.
- Havada suyun kütle transferi difüzyon ve taşınım ile gerçekleşmektedir.
- Tekstil içerisinde ısı transferi iletim ile gerçekleşmektedir.

- Tekstil içerisinde kütle transferi difüzyon ile gerçekleşmektedir.
- Hava ve tekstil ara yüzeyinde buharlaşma olayı gerçekleşmektedir.
- Hava pamuk tekstil malzemesi etrafında laminerdir.

Yukarıdaki kabuller altında ısı ve kütlenin korunumdan bir boyutlu, kararsız, ısı ve kütle transfer modeli oluşturulmuştur. Kurutma anında iletim ve taşınım yolu üzerinden hava ile aktarılan ısı, tekstilin sıcaklığını iletim yolu ile yükseltmek ve suyun tekstil yüzeyinde buharlaşması için kullanılmıştır. Bu nedenle, kurutma havası içindeki ısı dengesi, konvektif faz, buharlaşma fazı ve çift fazdan oluşur ve denklem 1.1'de gösterilmiştir.

$$\rho_L c_L \left(\frac{\partial T_f}{\partial t}\right) = \lambda_L \frac{\partial^2 T_f}{\partial Z^2} + \rho_a c_a u \frac{\partial T_f}{\partial Z} - n_1 \left(T_f - T_a\right) - q_{11}\left(T_a\right) C_f + q_{12}\left(T_a\right) C_a \quad (1.1)$$

Fourier yasasına göre enerji dengesi halinde kurutma akışkanı da konvektif faz, buharlaşma fazı ve çift fazdan oluşur. İletim ve taşınım durumları altında denklem 1.2 elde edilmiştir.

$$\rho_a c_a \left(\frac{\partial T_a}{\partial t}\right) = \lambda_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} - \rho_a c_a u \frac{\partial^2 T_a}{\partial z} + n_2 \left(T_f - T_a\right) + q_{21}\left(T_a\right) C_f - q_{22}\left(T_a\right) C_a \quad (1.2)$$

Fick'in 2. yasasına göre tekstil kurutma sürecinin kütle transferi ifadeleri denklem 1.3 ve denklem 1.4'te gösterilmiştir. Nemli tekstil içerisinden zamana bağlı kütle transferi difüzyon fazı ve hava ile tekstil ara yüzeyinde ısı ve kütle transferi fazı denklem 1.3'te,

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - n_{11}\left(T_f\right) C_f + n_{12}\left(T_f\right) C_a + \dot{m}_{hava,buh} \quad (1.3)$$

Tekstil içerisinden difüzyonla oluşan su akısı ile tekstil yüzeyinden kurutma havasına aktarılan buhar debisi arasındaki buhar debisi dengesi dikkate alınarak, konvektif faz ve buharlaşma fazını içeren kurutma havası kütle transfer modeli denklem 1.4'te verilmiştir.

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial c}{\partial z} + n_{21}\left(T_a\right) C_f - n_{22}\left(T_a\right) C_a \quad (1.4)$$

Motor hareketi aynı zamanda tekstilin hareket etmesini de sağlar. Zorlanmış taşınım durumu altında ıslak tekstilin momentum ifadesi, denklem 1.5 ile gösterilmiştir.

$$\dot{W}_{motor}\, t = m_{\text{çamaşır}}\, r\, \omega_r^2 * \frac{m_{\text{çamaşır}}}{\theta} \quad (1.5)$$

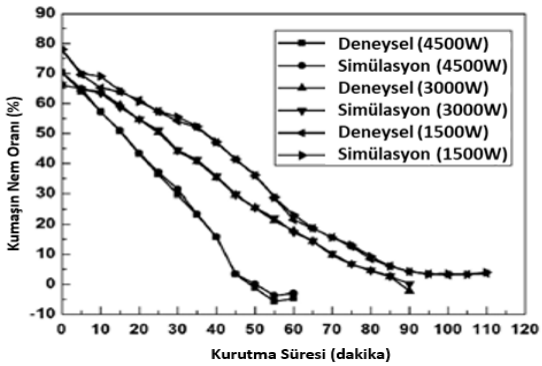
Modelde kullanılan sabit parametreler Tablo 1.5'te gösterilmiştir.

Tablo 1.5 Modelde Sabit Tutulan Parametreler

Parametre	Değer
Suyun buharlaşma entalpisi	2502-2265 J/g
Suyun ısı iletim katsayısı	0.606 W/mK
Tekstilin ısı iletim katsayısı	0.03-0.05 W/mK
Havanın ısı iletim katsayısı	0.03 W/mK
Tekstilin özgül ısısı	1.34x10^3 J/kgK
Suyun özgül ısısı	1.25x10^3 J/kgK
Havanın özgül ısısı	1.007x10^3 J/kgK
Suyun yoğunluğu	0.997054 kg/m^3
Tekstilin yoğunluğu	1.5-1.55x10^{-3} kg/m^3
Havanın yoğunluğu	1.16 kg/m^3

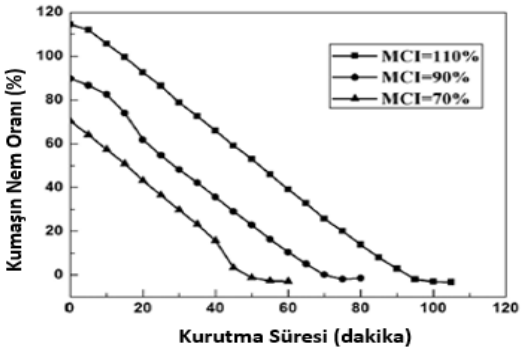
Bu diferansiyel denklemler farklı başlangıç durumları altında örtülü sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmesi planlanmıştır. Hesaplama prosedüründe öncelikle hava bağıl nemi, sıcaklık, havanın veya tekstil içindeki boşlukların ısı taşınım katsayısı, sensörler kullanılarak kaydedilmiş veya yukarıda paylaşılan ifadeler kullanılarak hesaplar gerçekleştirilmiştir.

Tekstil üzerinden yoğuşan nemin hesaplanması içeren bir boyutlu ısı ve kütle transferi gerçekleştiği kabulleri yapılarak oluşturulan matematiksel model, deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.



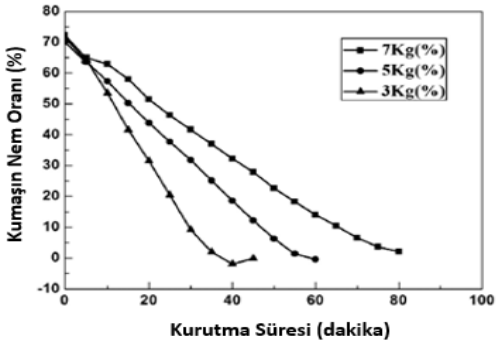
Şekil 1.8 Farklı Isıtıcı Güçlerinde Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Hava Hızı = 8.5 m/s) [5]

Şekil 1.8'de deneysel ve teorik olarak sabit hava hızında farklı ısıtıcı güçlerinde çamaşır üzerindeki nem değişiminin grafikleri gösterilmektedir. Isıtıcı gücü arttıkça kurutma performansının arttığı gözlemlenmiştir. Teorik ve deneysel çalışmaların ise birbirine çok benzer çıktığı görülmektedir.



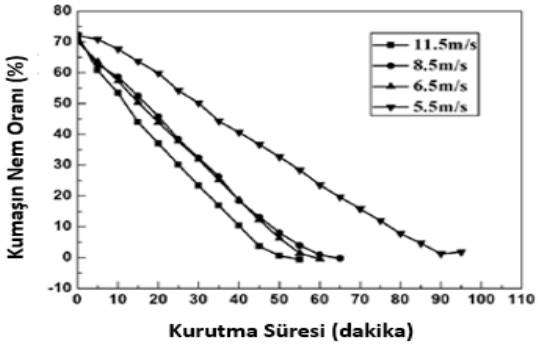
Şekil 1.9 Farklı Giriş Bağıl Nem Değerleri İçin Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Isıtıcı Gücü= 4500W, Hava Hızı = 8.5 m/s, Tambur dönüş hızı =1200 rpm) [5]

Şekil 1.9'da havanın farklı giriş bağıl nem değerleri için çamaşır üzerindeki nemin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Havanın giriş bağıl nem değeri düştükçe kurutma süresinin azaldığı görülmektedir.



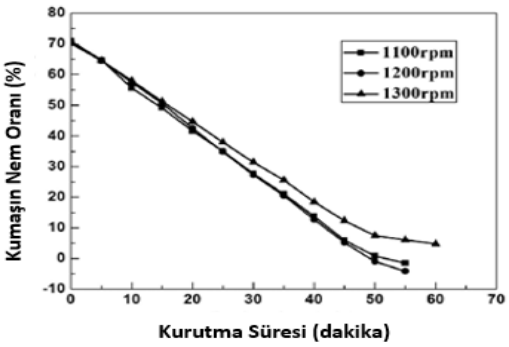
Şekil 1.10 Farklı Çamaşır Kapasitesi İçin Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Isıtıcı Gücü = 4500W, Hava Hızı = 8.5 m/s, Tambur Dönüş Hızı = 1200 rpm) [5]

Şekil 1.10'da farklı çamaşır kurutma kapasitesi için çamaşır üzerindeki nemin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Çamaşır yük kapasitesinin düşmesine bağlı olarak çamaşırın içerdiği su miktarı da azaldığı için kurutma süresinin en düşük değere sahip olduğu eğri, giriş çamaşır kapastesinin 3 kg olduğu durumda gözlemlenmiştir.



Şekil 1.11 Farklı Hava Hızlarında Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Isıtıcı Gücü = 4500 W) [5]

Şekil 1.11'de farklı hava hızlarında çamaşır üzerindeki nemin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Hava hızının artışına bağlı olarak kurutma süresinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 1.12 Farklı Tambur Dönüş Devir Değerlerinde Çamaşır Üzerindeki Nemin Zamana Bağlı Değişimi (Isıtıcı Gücü= 4500W, Hava Hızı = 8.5 m/s) [5]

Şekil 1.12'de farklı tambur dönüş devir değerlerinde çamaşır üzerindeki nemin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. 1100 ve 1200 rpm dönüş değerleri için kurutma hızının aynı olduğu ancak 1300 rpm motor devri için kurutma süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, tambur devrinin artmasına bağlı olarak, çamaşıra uygulanan merkezkaç kuvvetinin arttığı, bu sebeple de çamaşırların tambur çeperine yapışarak, duvar etkisi oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu koşulun nem alma hızına olumsuz etki ettiği belirtilmiştir.

Sonuç olarak,

- Isıtma gücü, hava debisi ve tambur dönüş hızı çamaşır kurutmada en etkili faktörler olarak belirlenmiştir.

- Daha az enerji tüketimi ve süre için çamaşırın giriş bağıl nem değeri düşürülmelidir.
- Isıtma gücü ve hava debisi, tambur dönüş hızına göre kurutmada çok daha önemli bir faktördür.
- Oluşturulan matematiksel model, deneysel sonuçlar ile %6 oranında sapma ile ortak sonuç vermiştir.

Wei ve arkadaşlarının 2019 yılında gerçekleştirdiği çalışmada [6], kurutma makinalarında kumaş hareketinin kurutma performansına etkisi incelenmiştir.

Tablo 1.6 Deneylerde Kullanılan Kumaşların Özellikleri

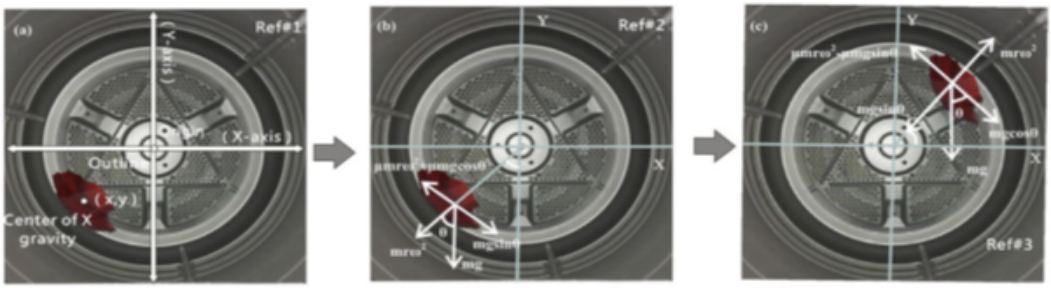
Karakteristikleri	C1	C2	W1	W2
Lif içeriği	100% pamuk	100% pamuk	100% yün	100% yün
Örgü tipi	Düz	Düz	Fitil	Fitil
Ağırlık (g/m^2)	57.9	116,5	368,8	514,9
Kalınlık (mm)	0.167	0.392	0.893	1.103
Su içeriği (%)	106.7	267.5	486.2	627.9
Örtü katsayısı (%)	53.4	61.2	91.4	96.2

Tablo 1.6'da gösterilen pamuklu ve yün kumaş tiplerinde farklı yoğunluklara sahip yüklerin kurutma makinesindeki çizdikleri yol kurulan deney düzeneği ile incelenmiştir. Kurutma makinesinin ön tarafı bir cam ile görsel hale getirilmiştir. Kurutucu önüne yerleştirilen dijital çıktı verebilen yüksek hızlı görüntü almayı sağlayan bir kamera ile Tablo 1.6'da belirtilen 4 farklı yük, farklı koşullarda test edilmiştir. Düzenekte sıcaklık, enerji tüketimi ve debi otomatik olarak kontrol edilmektedir. Tablo 1.7'de kurutma koşulları gösterilmiştir.

Tablo 1.7 Deneylerde Uygulanan Kurutma Parametreleri

Parametre	**Değer**
Kurutma Sıcaklığı (°C)	28
Ortam Nemi (%)	68
Yük Ağırlığı (kg)	5.0
Kumaşın Başlangıç Nem Değeri (%)	70
Isıtıcı Gücü (W)	4000
Hava Hızı (m/s)	8.5

Kurutma havasının ısıtıcı öncesi giriş sıcaklığı 28°C, giriş bağıl nemi %68, kurutulacak yük ağırlığı 5 kg, kumaş üzerindeki giriş nem miktarı %70, ısıtıcı gücü 4000 W ve hava debisi 8.5 m/s değerinde sabit tutulmuştur.



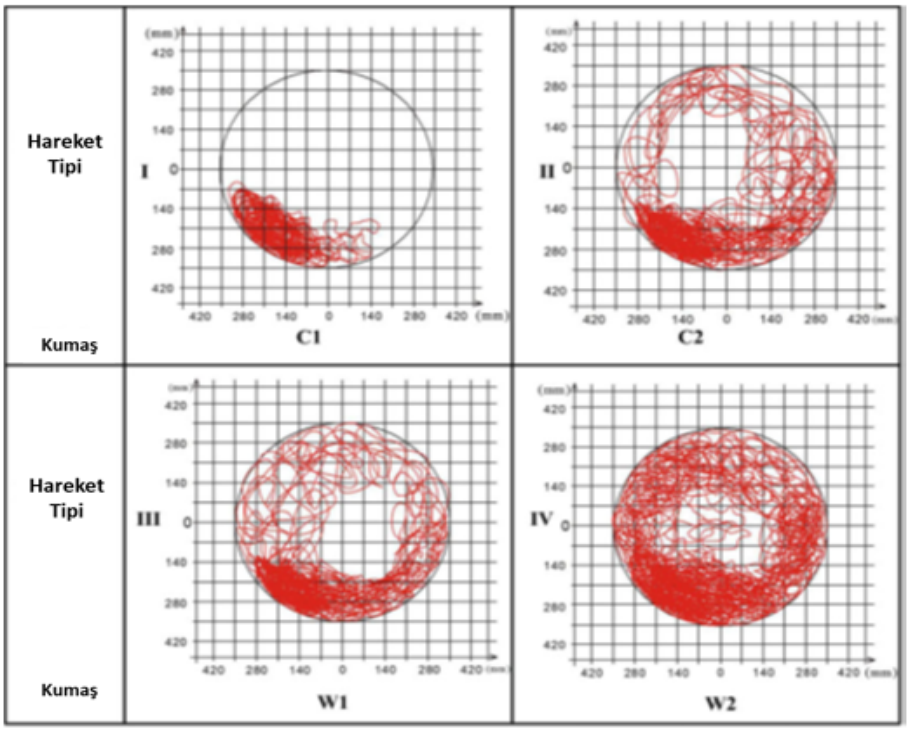
Şekil 1.13 Tambur İçerisinde Tekstil Hareketinin Koordinat Gösterimi [6]

Şekil 1.13'te kumaş hareketinin analizini gerçekleştirmek için kurulan koordinat sistemi gösterilmiştir. İlgili koordinat sistemlerinde kumaşa etki eden kuvvetler gösterilmiştir. Kumaş üzerine etki eden kuvvetler, kumaşın ağırlığından oluşan yerçekimi kuvveti, tamburun dönmesine bağlı olarak oluşan merkezkaç kuvveti, tambur yüzeyi ile kumaş arasında oluşan sürtünme kuvveti olarak belirtilmiştir.



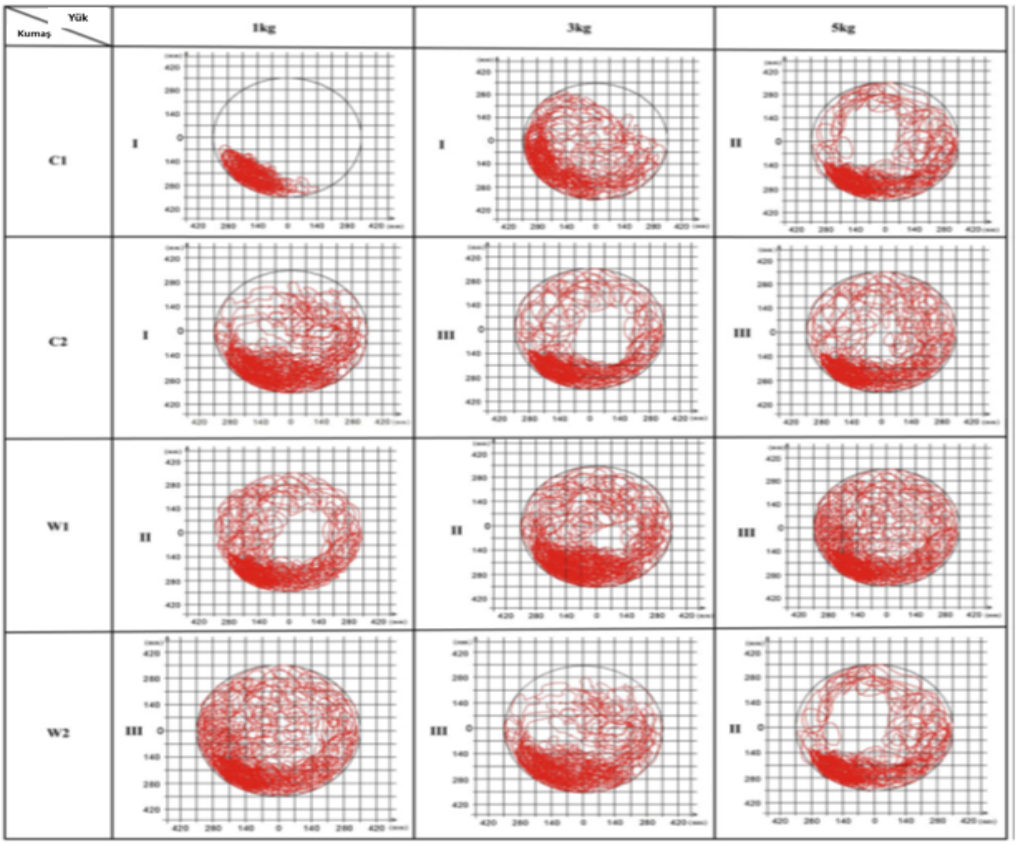
Şekil 1.14 Kumaşın Tambur İçerisinde Yaptığı Hareketlerin Gösterimi [6]

Şekil 1.14'te yapılan testlerde kumaşın izlediği yola göre yaptığı hareketler 4 ana grupta toplanmıştır. Birinci hareket kayma (I) hareketi olarak tanımlanmıştır. Genellikle kurutmanın ilk fazında görülen bir hareket olduğu belirtilmiştir. Bu fazda tekstil üzerinde bulunan nem miktarının fazla olmasına bağlı olarak ağırlığı fazladır. Böylece kumaşın hareketinde ağırlığından dolayı oluşan yerçekimi kuvveti baskın olmaktadır. Bu adımda kumaş tamburda kayma hareketi yapmaktadır. Kurutmanın orta fazı olarak belirtilen etkin nem alma aralığında kumaş üzerindeki nem miktarının azalmasına bağlı olarak önce ikinci hareket olan kayma ve düşme (II) hareketini bir arada yapmaktadır. Kumaş üzerindeki nemin azalmasına bağlı olarak etkin nem alma fazının sonuna doğru kumaş dönüş ve düşme (III) hareketini bir arada yapmaktadır. Kumaş üzerindeki kılcal yapılar içerisindeki suların buharlaştığı kurutmanın son fazında ise kumaş artık tamamen dönüş (IV) hareketi yapmaktadır. Bu fazda kumaş üzerinde merkez kaç kuvvetinin etkisi yerçekimi kuvvetinin etkisini yenmektedir.



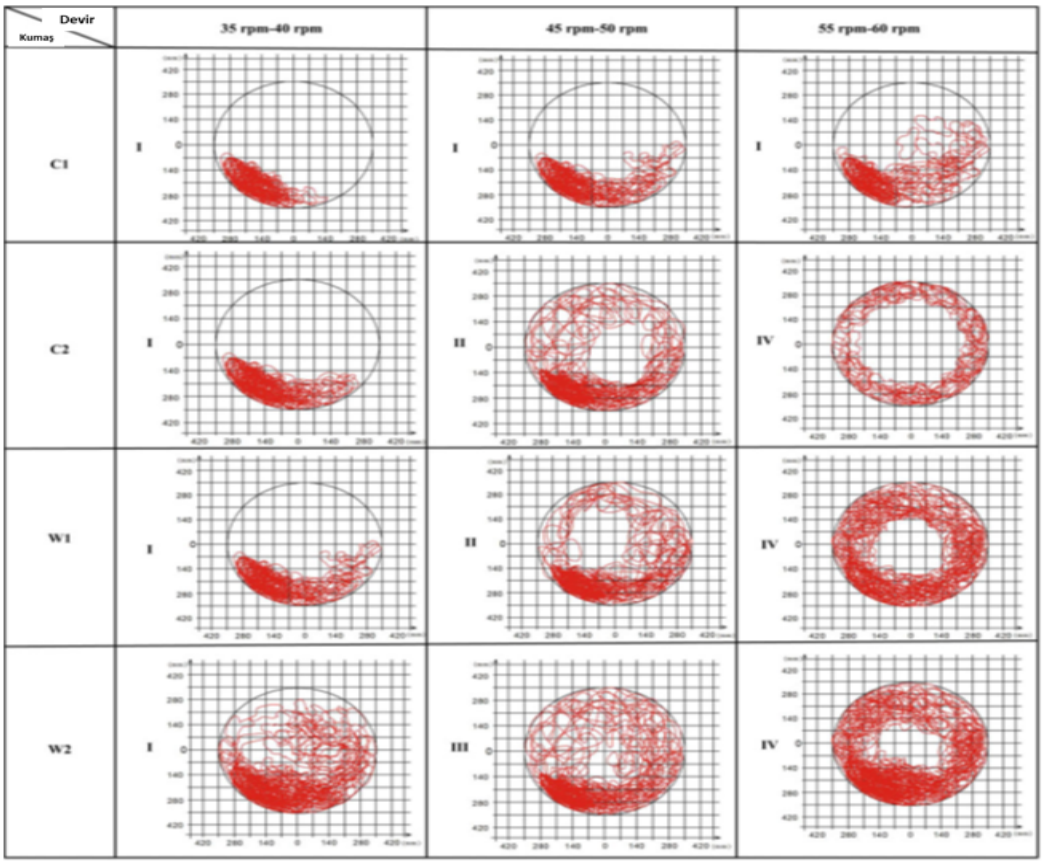
Şekil 1.15 Kumaş Tipine Göre Kurutma Makinesinde İzlediği Yolun Değişimi [6]

Şekil 1.15'de kumaş yapısına göre kumaşın kurutma makinesinde izlediği yolun değişimi gösterilmektedir. C1 tipi olarak belirtilen %100 pamuk, düz, katman kalınlığı ince ve hafif olan kumaş sadece kayma hareketi yapabildiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak düşük sürtünme katsayısının oluşturduğu yetersiz miktarda sürtünme kuvvetinin kumaş üzerinde etkisinin az olması gösterilmektedir. Kurutma çevriminin tüm fazlarında C1 tipi kumaş kayma hareketine maruz kalmıştır. W2 tipi olarka belirtilen %100 yün, ribana tipindeki kumaş, kurutmanın ilk fazında C1 tipli kumaşa benzer olarak kayma hareketi gerçekleştirmiştir. Kurutmanın optimum nem alma bölümü olan orta fazında kumaş üzerindeki ağırlığın azalması ve merkezkaç kuvvetinin etkisiyle kayma + düşme hareketi yapmaya başlamıştır. Bu fazın sonuna doğru kumaş hareketi düşme + dönme olarak devam etmiştir. Kurutmanın son fazında ise kumaş tamamen dönme hareketi yapmaktadır. Yapılan bu analiz sonucunda kumaş tipinin farklılığı kumaşın tambur içinde gerçekleştirdiği hareketlerde farklılık yaratsa da bunun belirgin bir ayrışması söz konusu değildir. Kumaşların kalınlığı ve ağırlığının kumaş hareketine olan etkisi kumaş tipine göre çok daha kritiktir.



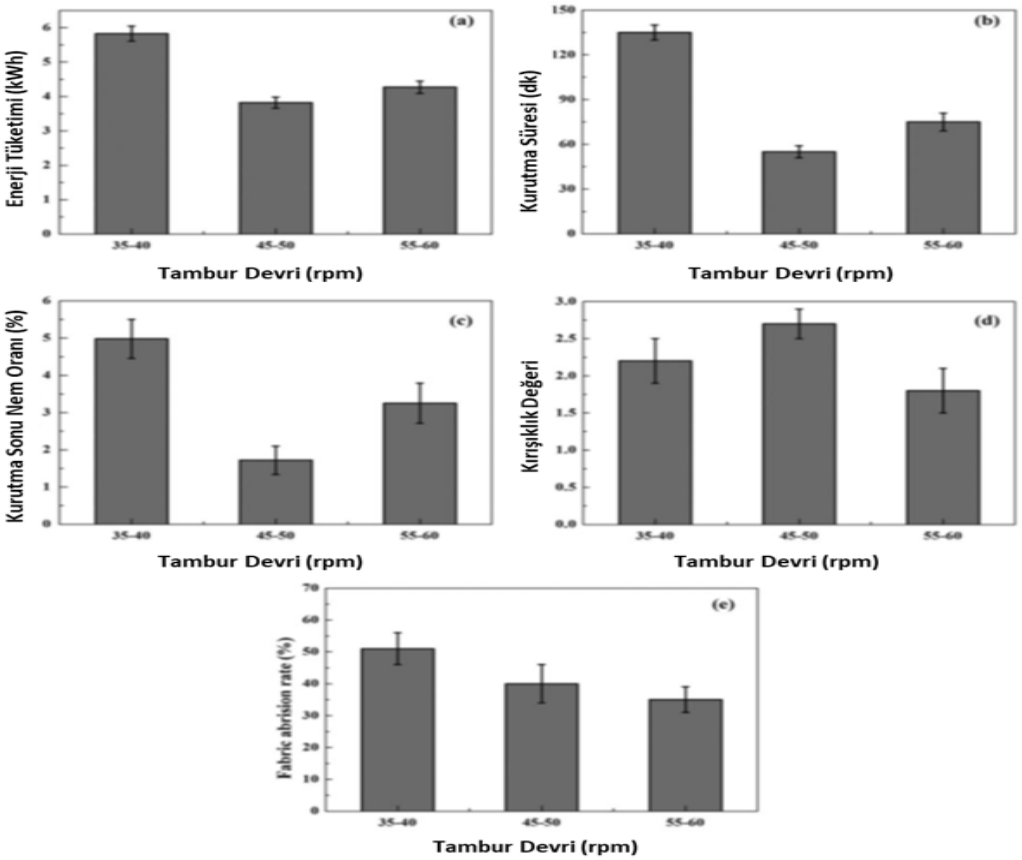
Şekil 1.16 Kumaş Tipi ve Yüke Bağlı Olarak Kumaşın İzlediği Yolun Değişimi [6]

Şekil 1.16'da kumaş hareketinin farklı kurutma yüklerine göre değişimi gösterilmektedir. C1 tipindeki kumaşın kurutma yükü değişimine bağlı olarak tambur içindeki hareketi kayma ve kayma + düşme hareketleri ile sınırlı kalmaktadır. Bunun sebebi, kumaş hareketinin uzunluğunun, kurutma kapasitesinin artmasına bağlı olarak artmasıdır. W1 ve W2 tipindeki kumaşların haraketleri karşılaştırıldığında, 1 kg kapasitedeki testlerde kayma + düşme hareketi gerçekleşmektedir. Yükün artmasına bağlı olarak kumaşın hareket tipi düşme + dönüş olarak gerçekleşmektedir. Ancak W2 yükünde yük miktarı arttıkça, haraket tipi, düşme + dönüşten kayma + düşme hareketine doğru geçiş yapmıştır. Bunun sebebi olarak yük miktarının artmasına bağlı, yüklerin üzerine kurutma makinasının dönüşü sebebiyle oluşan merkezkaç kuvvetinin eşit olarak dağılamaması gösterilmektedir. Bu sebeple hareket tipi, yük arttıkça bu değişken merkezkaç kuvveti sebebiyle değişmektedir. Yapılan bu testler sonucunda kurutma yükünün kumaş hareketi üzerinde etkili bir parametre olmadığı söylenmektedir.



Şekil 1.17 Kumaş Tipi ve Motor Devri Değişimine Bağlı Olarak Kumaşın İzlediği Yolun Değişimi [6]

Şekil 1.17'de tambur devri değişiminin kumaş hareketi üzerine ektisi incelenmiştir. Tüm kumaş tipleri için tambur devri artmasına bağlı olarak merkezkaç kuvvetinin artması sebebiyle kumaş hareketi düşme + dönme ve dönme hareketi olarak görülmektedir.



Şekil 1.18 Kurutma Performans Değerlerinin Değişimi [6]

Şekil 1.18'de 5 kg kurutma kapasitesinde farklı tambur devir değerlerinde kurutma performans parametrelerinin değişimi gösterilmektedir. 45-50 rpm tambur dönüş devri ile gerçekleştirilen testlerde minimum enerji tüketim değeri, minimum kurutma süresi değeri ve minimum çamaşır üzerinde kalan nem miktarı değerleri elde edilmiştir. Bu değerler optimum kurutma performansının 5 kg çamaşır için 45-50 rpm tambur devrinde olduğunu göstermektedir. Minimum tekstil hasarlanması ise tambur devrinin 55-60 rpm arasında olduğu durumda elde edilmiştir.

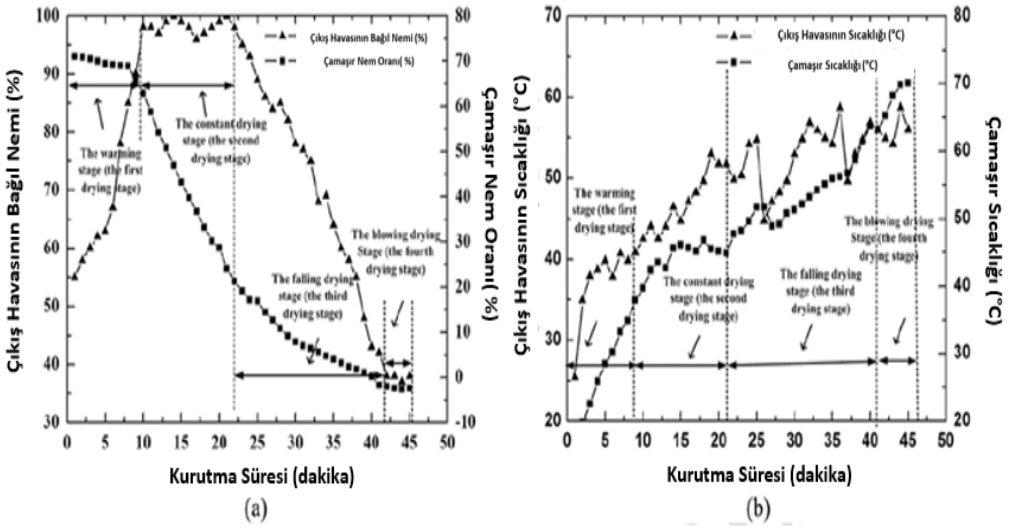
Yuhui Wei ve arkadaşlarının 2018 yılında gerçekleştirdiği bu çalışmada [7], kurutma makinalarında enerji verimliliğini arttırmak için kurutma çevriminin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1.8'de deneylerde kullanılan çamaşırın spesifik özellikleri verilmiştir. Test edilen çamaşırın özelliklerinden kurutma makinaları standardında kulanılan wfk yükleri ile testlerin yapıldığı görülmektedir.

Tablo 1.8 Deneylerde Kullanılan Tekstil Özellikleri

Parametre	Değer
Kumaş tipi	%100 pamuk
Kumaş tasarımı	Basit
Kumaş ağırlığı (g/m^2)	145(±0.03)
Kalınlık (mm)	0.79(±0.03)
Bağıl gözeneklilik (%)	76.7
Yük (g)	5000(±10)
Özgül ısı kapasitesi (kJ/kg.K)	1.224(±0.14)

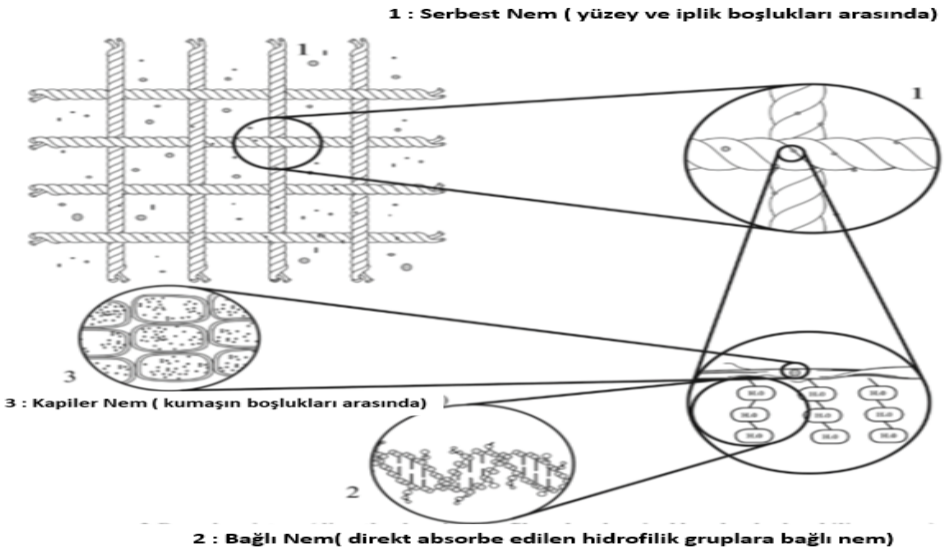
Kurulan deney düzeneğinde ısıtıcı gücünü ayarlamak için voltaj regülatörü, sistemde hava akışı sağlamak için fan, ısıtma enerjisini yaratmak için kullanılan elektrik ısıtıcısı, tamburun dönüşünü sağlayan motor, tambur devrini ölçen sensör, yoğuşmayı ölçen ağırlık ölçer, çamaşırın sıcaklığını ölçmek için kızılötesi sıcaklık ölçer, sistemin kontrolünü anlık olarak sağlamak için bilgisayar ve plc sistemi kullanılmıştır.



Şekil 1.19 Kurutma Çevriminde Çamaşırın Üzerindeki ve Tambur Çıkışında Sıcaklık ve Bağıl Nem Değişimleri (a) Bağıl Nem, (b) Sıcaklık [7]

Kurulan deney düzeneğinde gerçekleştirilen öncül testlerde, Şekil 1.19'da gösterilen kurutma çevrimi içerisinde sıcaklık ve bağıl nem değişimlerinin hem çamaşır üzerinde hem de çıkış havasındaki değişimleri incelenmiştir.

Yuhui Wei ve arkadaşları yaptıkları inclemelerde kurutma fazını 4 bölüme ayırmıştır. İlk faz çamaşırın ısınmaya başladığı, çamaşırın üzerindeki nemin maksimum seviyede olduğu başlangıç fazıdır. Bu faza ısınma adı verilmiştir. Bu fazda çamaşırın üzerindeki nem miktarı %100 ve üzeridir. İkinci faz sabit kurutma fazı olarak adlandırılmıştır. Bu fazda çamaşır üzerinden nem alma hızı maksimum seviyededir ve sabittir.



Şekil 1.20 Çamaşır Üzerinden Nem Uzaklaştırmanın Mekanizmaları [7]

Bu fazda çamaşır üzerinden Şekil 1.20'de gösterilen kapileri nemlerin uzaklaştırması gerçekleştirilmektedir. Son faz ise artık çamaşırın içindeki kumaşa bağlanmış su moleküllerinin uzaklaştırıldığı esme fazı olarak belirtilmiştir.

Tablo 1.9 Kurutma Fazlarında Tambur Çıkış Hava Bağıl Nem Değerleri Değişimi

Çıkış havası nemi (%)		**Aşamalı kurutma modeli**
Çıkış havasında sıcaklık ve bağıl nem değerleri	**1. Fazın Sonu**	100%
	2. Fazın Sonu	95%
	3. Fazın Sonu	42%
	4. Faz Başlangıcı	38%

Yapılan testler sonucunda yukarıda belirtilen bu 4 farklı kurutma fazı, tamburun çıkışındaki proses havasının bağıl nemine bağlı olarak Tablo 1.9'da gösterilmiştir. Tambur çıkışındaki havanın bağıl nemi, ısınma fazının bitişinde %100, sabit nem alma fazının bitişinde %95, kapileri suyun alındığı düşüş fazının bitişinde %42, son faz olan esme fazında ise %38 olarak belirtilmiştir.

Tablo 1.10'da gösterilen kurutma parametrelerine göre 11 adet farklı çalışma koşullarında kurutma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde 4 farklı kurutma fazında ısıtıcı gücü, hava debisi ve tambur devri değişiklikleri yapılarak optimum kurutma çevrimi için test sonuçları değerlendirilmiştir.

Tablo 1.10 Kurutma Parametreleri

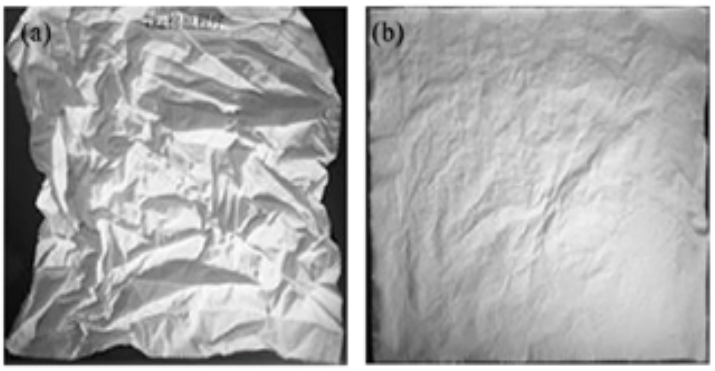
Test numarası	Her periyodun kurutma koşulları – parametreleri											
	Isıtıcı gücü (W)				Hava akış hızı (m/s)				Kurutma tamburunun dönme hızı (rpm)			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
1	4000	4000	4000	4000	6.8	6.8	6.8	6.8	45-50	45-50	45-50	45-50
2	4000	4000	3000	1500	6.8	8.5	8.5	6.8	50-55	45-50	40-45	45-50
3	4000	4000	3000	4000	8.5	8.5	8.5	8.5	50-55	40-45	40-45	45-45
4	1500	4000	4000	1500	8.5	6.8	8.5	8.5	40-45	40-45	50-55	40-45
5	1500	4000	1500	4000	8.5	8.5	6.8	6.8	50-55	40-45	50-55	50-55
6	1500	4000	1500	1500	6.8	6.8	6.8	8.5	50-55	50-55	40-45	40-45
7	4000	4000	4000	1500	6.8	8.5	6.8	6.8	50-55	50-55	50-55	40-45
8	4000	1500	1500	4000	8.5	8.5	8.5	8.5	50-55	45-50	50-55	40-45
9	1500	1500	4000	4000	8.5	6.8	6.8	6.8	40-45	50-55	40-45	40-45
10	1500	4000	4000	4000	6.8	8.5	8.5	8.5	40-45	50-55	40-45	50-55
11	4000	1500	4000	1500	8.5	6.8	6.8	8.5	50-55	40-45	45-50	50-55

Tablo 1.11 Test Sonuçları

Test No	Enerji tüketimi (kWh)	Kurutma Süresi (dakika)	Kumaşın nihai nem içeriği (%)	Kumaş düzgünlüğü
1	4.82	55	-2.17	1.2
2	3.78	60	1.78	2.1
3	4.42	55	-2.75	1.3
4	4.32	75	2.98	2.4
5	4.62	85	-1.76	1.6
6	4.89	120	4.78	2.5
7	3.98	50	0.98	1.7
8	4.65	110	2.87	1.9
9	4.22	105	1.12	1.6
10	3.87	65	0.98	1.2
11	4.36	100	2.13	2.1
12	4.06	95	2.96	2.4

Tablo 1.11'de yapılan testlerin enerji tüketim değerleri, kurutma süreleri, kurutma çevrimi sonunda çamaşır üzerinde kalan nem miktarı ve tekstil kırışıklık değerleri verilmiştir. 1. Test kurutma parametrelerinin sabit olarak bırakıldığı referans test olarak belirlenmiştir. Bu testlerde ısıtıcı gücü 4000W, hava debisi 6.8 m/s, tambur devri de 45-50 rpm olarak sabitlenmiştir. Bu testin sonucunda toplam enerji tüketimi 4.82 kWh, kurutma süresi 55 dk, kurutma sonu nem oranı -%2.17 ve kırışıklık değeri 1.2'dir. Yapılan testlerin sonucunda en iyi sonuçlara 2.test koşulunda ulaşılmıştır. 2. Test sonucunda enerji tüketimi 3.78 kWh, kurutma süresi 60 dk, kurutma sonu nem oranı %1.78 ve kırışıklık değeri 2.1 olarak ölçülmüştür. Test 2'de kullanılan kurutma parametreleri Tablo 1.10'da gösterilmektedir. Bu test koşulunda ilk fazda ısıtıcı gücü 4000W, hava debisi 6.8 m/s, tambur devri ise 50-55 rpm olarak sabitlenmiştir. Yapılan testlerde ısınma fazında sistemin maksimum nem alma hızına minimum sürede

ulaşması için ısıtıcı gücü maksimum seviyededir. Bu fazda çamaşır üzerindeki serbest nemin uzaklaştırılması kolay olduğu için debi 6.8 m/s olarak uygulanmıştır. Tambur devrinin 50-55 rpm bandında olması çamaşırın üzerine etkiyen merkezkaç kuvvetinin artmasını sağlayarak tüm çamaşırların hızlı bir şekilde ısınma fazını tamamlamasına olanak sağlamıştır. İkinci fazda ısıtıcı gücü yine maksimum seviyede tutulmuş, hava debisi de 8.5 m/s hızına çıkarılmıştır. Tambur devri ise 45-50 rpm seviyesine düşürülmüştür. Bu faz çamaşır üzerinden maksimum seviyede suyun uzaklaştırıldığı fazdır. Bu sebeple hava debisinin arttırılması ile çamaşır üzerinden uzaklaştırılan nem miktarı arttırılmıştır. Bu fazda çamaşırların daha fazla ısınmasının önüne geçmek için tambur devri düşürülmüştür. Bununla birlikte tamburu döndüren motorun çektiği güç değeri azaldığı için enerji verimliliği sağlanmıştır. Kurutmanın üçüncü fazında ise çamaşır sıcaklığının daha fazla yükselmemesi için ısıtıcı gücü 3000 W seviyesine indirilmiştir. Hava debi değeri 8.5 m/s hızında sabit tutulurken, tambur devri de 40-45 rpm seviyesine indirilmiştir. Son faz olan 4. kurutma fazında ise çamaşıra aktarılacak enerjinin azaltılmasını sağlamak amacıyla ısıtıcı gücü 1500W seviyesine indirilmiştir. Hava debisi 6.8 m/s seviyesine düşürülmüş, tambur devri ise 45-50 rpm seviyesine çıkarılmıştır. Bu parametrelerin uygulanması ile birlikte enerji tüketim değerinde %21 azalma gerçekleşmiştir.



Şekil 1.21 Kırışıklık Görünümleri (a) Test-1 (b) Test-2 [7]

Şekil 1.21'de çevrim sonunda çamaşırların kırışıklık seviyelerinin görselleri gösterilmektedir. Geliştirilen algoritma ile kırışıklık seviyesi 0.9 puan iyileştirilmiştir.

Bing-Hung Lee ve arkadaşlarının [8] 2019 yılında yayınladığı makalede, ısı pompalı kurutma makinalarında kurguladıkları matematiksel model incelenmiştir. Simülasyon kurutma adımının 3 aşamadan oluştuğunu göstermiştir. Bu aşamalar sırasıyla ön ısıtma, sabit buharlaşma ve azalan kuruma hızı bölümlerinden oluşmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucu tekstil sıcaklığı, sistemin emme ve basma basınçları ilk fazda fark edilir bir artış gösterdiği, ikinci fazda neredeyse sabit kaldığı ve son fazda tekrar arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca spesifik nem alma hızı (SMER) ikinci aşama sonunda en yüksek değerini görürken performans katsayısı (COP) sürekli olarak

düşmektedir. Makale ayrıca hava debisinin artmasıyla daha düşük emme ya da basma basıncının, daha yüksek COP değerinin ve daha kısa kurutma sürelerinin elde edildiğini göstermektedir. Sonuçlar, daha yüksek COP değeri için ilk aşamada daha düşük, ikinci aşamada daha yüksek, son aşamada ise ara değerde bir hava debisi önermektedir. Isı değiştirici boyutunu (boru sayısını veya ısı değiştirici genişliğini) arttırmak daha düşük emme ve basma basıncı ve daha düşük kurutma süreleri sağlamıştır. İki durum da yüzey alanını artırmayı sağlamaktadır. Ancak ısı değiştirici genişliğini artırmak daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Kurulan matematiksel modelde aşağıda kabuller gerçekleştirilmiştir.

- Buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda oluşan basınç kayıpları ihmal edilmiştir.
- Isı pompasından çevreye ısı kaybı ihmal edilmiştir.

Buharlaştırıcı üzerinden kurutma havasına aktarılan ısı transferi denklem 1.6'da gösterilmiştir.

$$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_{hava}\left(i_{hava,g} - i_{hava,c}\right) \tag{1.6}$$

Yoğuşturucu üzerinden kurutma havasına aktarılan ısı transferi denklem 1.7'de gösterilmiştir.

$$\dot{Q}_{yog} = \dot{m}_{hava} C_{p,hava} \Delta T \tag{1.7}$$

Hava nem oranındaki değişim hava ve tekstil arasındaki kütle transferinden belirlenebilir. Bu eşitlik denklem 1.8'de verilmiştir.

$$\dot{m}_{hava}\left[\omega_g - \omega_c\right] = kA\left[\alpha\omega_g - \frac{\omega_g + \omega_c}{2}\right] \tag{1.8}$$

Kompresörde ısı transferi izentropik olarak kabul edilmiştir. Literatürden alınan bilgiler ışığında kompresör üzerinden 100 Watt değerinde ısıl kayıp olduğu kabul edilmiştir.

Sistem buharlaştırıcı, yoğuşturucu, kapileri, tambur ve kompresör olmak üzere beş ana modülden oluşmaktadır. Bu modüller birbiri ile ilişkili, hava ve soğutkan olmak üzere iki adet çevrim oluşturmaktadır. Sistem zamana bağlı bir sistemdir ve zaman içerisinde sıcaklık, basınç, COP, kurutma oranı, buharlaşma oranı, kütlesel debi, SMER, bağıl nem vb. gibi özellikler değişmektedir. Tüm parametreler kompresör, yoğuşturucu ve kapileride basma basıncı tarafında ve buharlaştırıcıda emme basıncı tarafında ısıl denge sağlanana kadar iterasyonlar ile elde edilmektedir. Hesaplamalar öncelikle soğutkan R134a'nın kütlesel debisinin bulunması için kompresörde gerçekleştirilir. Sonuçlar yoğuşturucuya girdi olarak gönderilir. Yoğuşturucudan alınan çıktılar

kapileriye girdi olur. Kapileri çıktıları ise buharlaştırıcıya girdi olur. Elde edilen bu değerler ile tambur içerisinde çevrim tamamlanmaktadır. Hava kısmında, hava buharlaştırıcı üzerinden hava içerisindeki suyu yoğuşturmak için geçirilir. Yoğuşturucu üzerinden ise havayı ısıtmak ve tambura göndermek için geçirilir. Tüm sistem 3 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla ısıtma, buharlaştırma ve kurutma olarak belirtilmiştir.

Çalışmada kullanılan hava soğutmalı ısı değişitirici geometrik özellikleri Tablo 1.12'de gösterilmektedir.

Tablo 1.12 Hava Soğutmalı Isı Değiştirici Geometrik Özellikleri

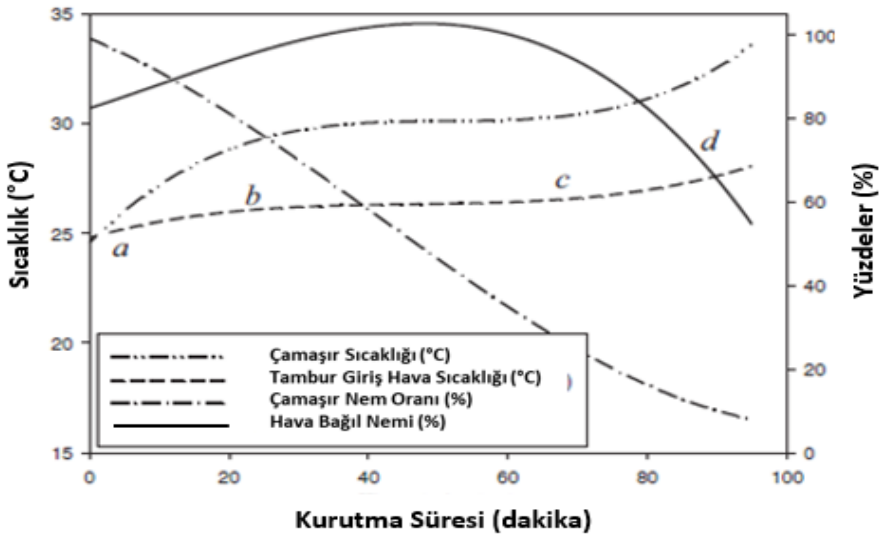
Isı Değiştirici Tipi	**Hava Soğutmalı Isı Değiştirici**
Fin Yapısı	Louver
Uzunluk (mm)	225
Genişlik (mm)	40
Yükseklik (mm)	180
Enine fin aralığı (mm)	40
Boyuna fin aralığı (mm)	12.5
Tüp Çapı (mm)	7.37
Kanat aralığı (mm)	1.2
Boru sıra sayısı	3

Sistemde kullanılan kapileri, kompresör ve tambur özellikleri Tablo 1.13'te gösterilmiştir.

Tablo 1.13 Kapileri, Kompresör ve Tambur Özellikleri

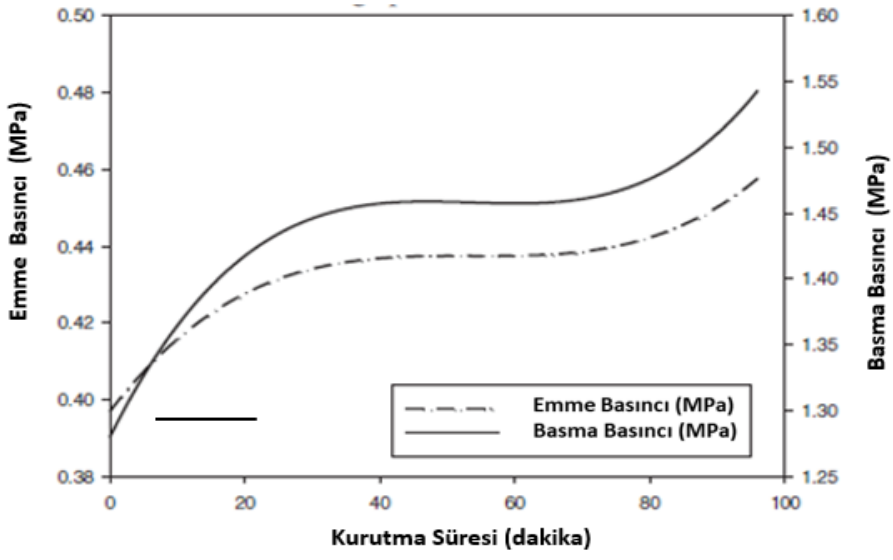
Kapileri Tüp Çapı (mm)	1.35
Kapileri Tüp Uzunluğu (mm)	500
Kompresör Hızı (rpm)	1500
Tambur Kurutma Kapasitesi (kg)	8
Tambur Ağırlığı (kg)	61

Zamana bağlı kurutma sürecinin model sonuçları, şekil 1.22'de tekstil sıcaklığı, hava sıcaklığı tekstil nem değeri ve hava bağıl nem değeri değişimi olarak gösterilmektedir.



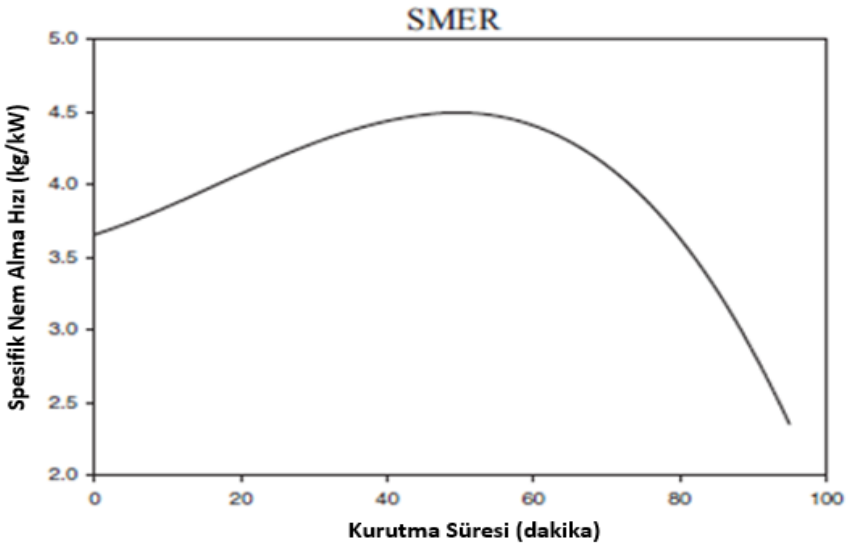
Şekil 1.22 Zamana Bağlı Kurutma Sisteminin Model Sonuçları [8]

Şekil 1.23'te emme ve basma basınç değerinin değişimi gösterilmektedir. Emme ve basma basıncının zamanla arttığı grafiklerde paylaşılmıştır. En önemli artış ise ön ısıtma adımında görülmektedir. Kurutma çevriminin başında, tekstil ve hava sıcaklığının artma hızı yüksek olduğu ve sistem kapalı bir çevrim olduğu için bu sıcaklık değişimi, emme ve basma basıncındaki değişikliğe neden olmaktadır.



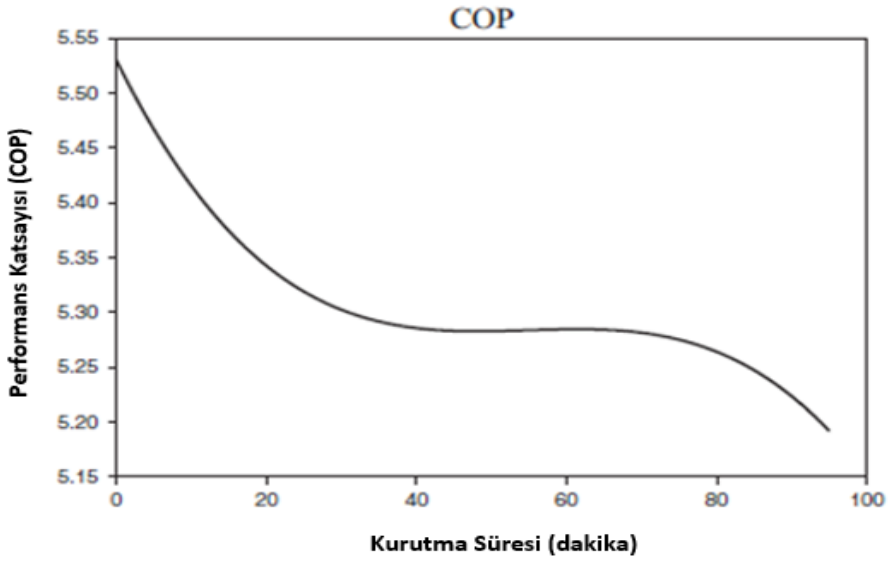
Şekil 1.23 Emme ve Basma Basınç Değeri Değişimi [8]

Şekil 1.24'te simülasyon sonucu SMER değişimi gösterilmiştir. SMER değeri çevrim içerisinde kurutmanın en hızlı olduğu alanda maksimum değeri elde etmiştir. Kurutma çevrimi sonuna doğru ortamda kalan nem miktarının azalmasına bağlı olarak nem alma hızı düşmekte, buna paralel olarak SMER değerinde azalma görülmektedir.



Şekil 1.24 Zamana Bağlı SMER Değişimi [8]

Şekil 1.25'te de COP değerinin zamanla değişimi gösterilmiştir. COP, havaya aktarılan ısının, kompresör ve sirkülasyon fanının giriş gücünün toplamı üzerine oranı olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 1.25 Zamana Bağlı COP Değişimi [8]

SMER, buharlaştırılmış su miktarı ile sisteme verilen toplam enerji arasındaki oran olarak tanımlanır. İlgili oran denklem 1.9'da paylaşılmıştır.

$$SMER = \frac{\dot{m}_{hava}\left(\omega_c - \omega_g\right)}{\dot{W}_{kompresor} + \dot{W}_{fan}} \tag{1.9}$$

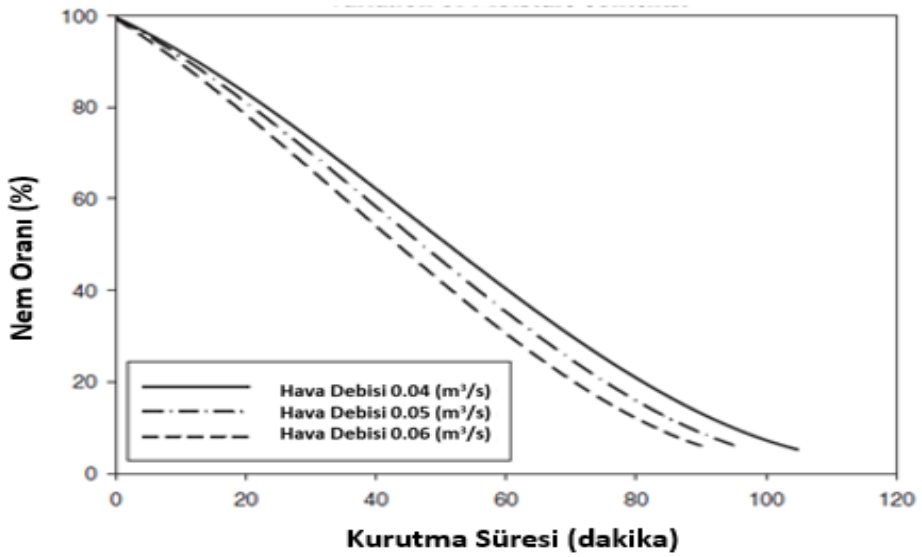
SMER değeri buharlaşma oranıyla bağlantılıdır. Ön ısıtma adımında yükselmektedir.

Sabit kurutma fazının sonunda ise tepe değerine ulaşmakta ve son bölümde düşmektedir. COP değeri emme ve basma değerinin artması yani kompresör işinin artmasından dolayı zaman içerisinde düşmektedir.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Yog}}{\dot{W}_{kompresor} + \dot{W}_{fan}} \tag{1.10}$$

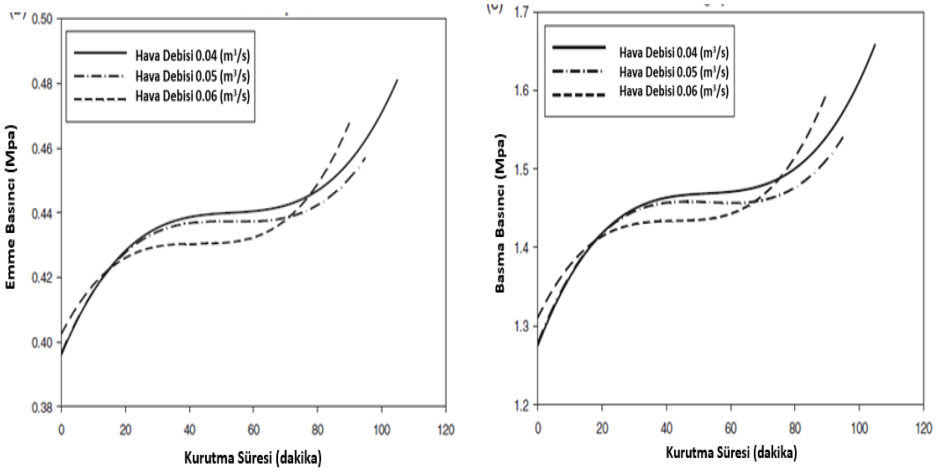
COP hesabı denklem 1.10'da gösterilmiştir.

Şekil 1.26'da görüldüğü gibi hava debisinin artırılmasıyla tekstil üzerindeki nem yüksek taşınım değerinden dolayı daha hızlı bir şekilde kurutma havasına transfer edilebilir.



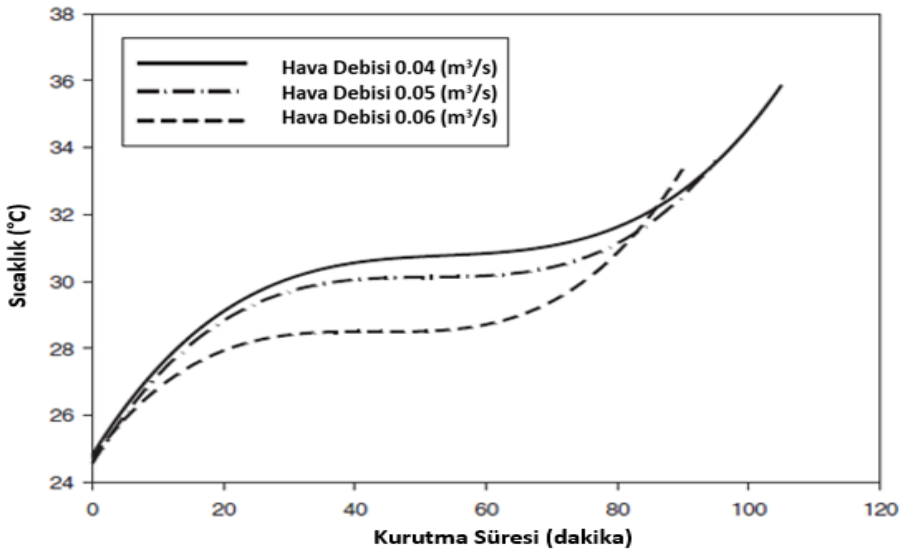
Şekil 1.26 Nem Oranının Hava Debisine Bağlı Değişimi [8]

Şekil 1.27'de hava debisine bağlı sırasıyla emme ve basma basınç değerlerinin değişimini göstermektedir. Sabit kurutma adımı incelendiğinde daha yüksek hava debilerinde daha düşük emme ve basma basınç değerleri elde edilmiştir. Buna sebep olarak ise tekstil üzerinden kurutma havasına yüksek kütle transferinden dolayı tekstil sıcaklığının düşmesi gösterilmektedir.



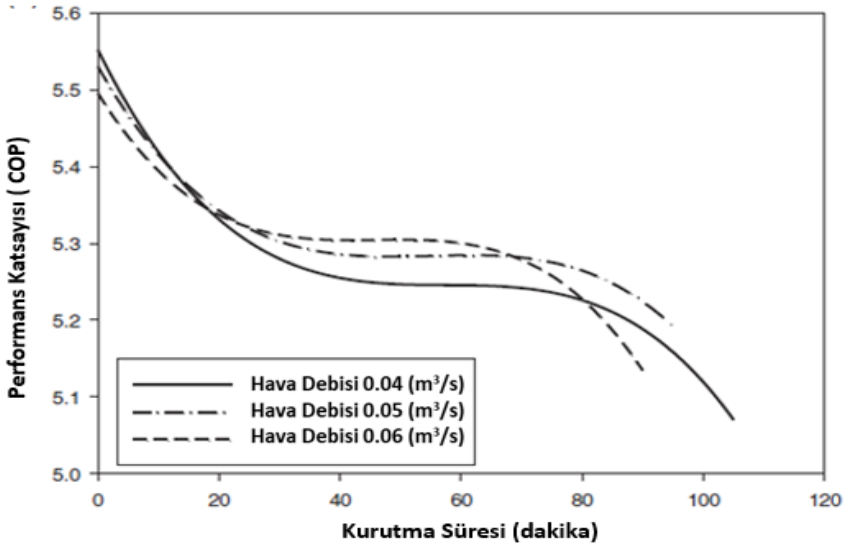
Şekil 1.27 Emme ve Basma Basıncının Zamana Bağlı Değişimi [8]

Bu durum şekil 1.28'de 0,06 ve 0,04 m^3/s hava debileri arasında yaklaşık 2,5 °C sıcaklık farkı olarak gözlemlenmiştir. Şekil 1.28'de incelendiğinde yüksek hava debisinde düşük hava debisine göre daha düşük sıcaklıklar olduğu görülmüştür.



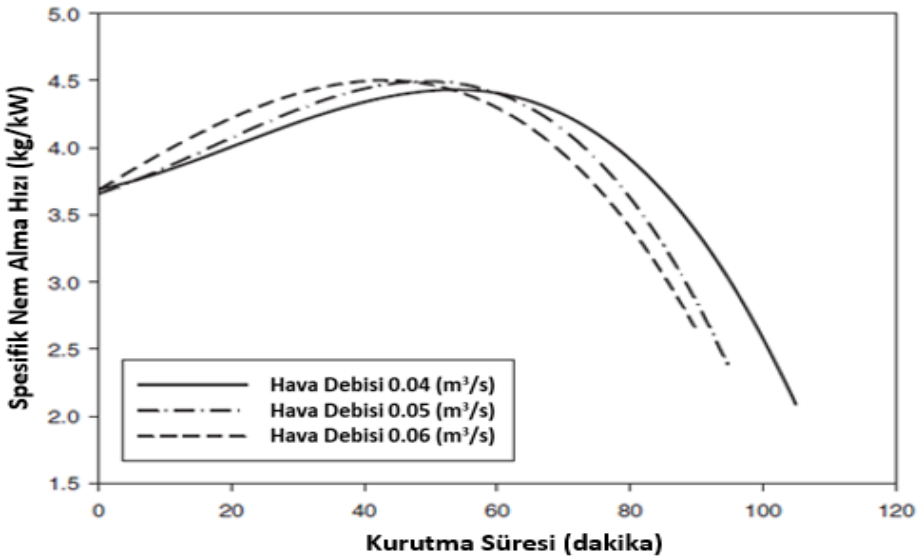
Şekil 1.28 Tamburdaki Hava Sıcaklığının Farklı Hava Debilerine Göre Değişimi [8]

Şekil 1.29'de görüldüğü üzere kurutmanın son aşamasında yüksek emme ve basma basınç değerleri daha düşük COP değerlerine sebep olmaktadır. Daha yüksek hava debisi daha iyi COP değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır.



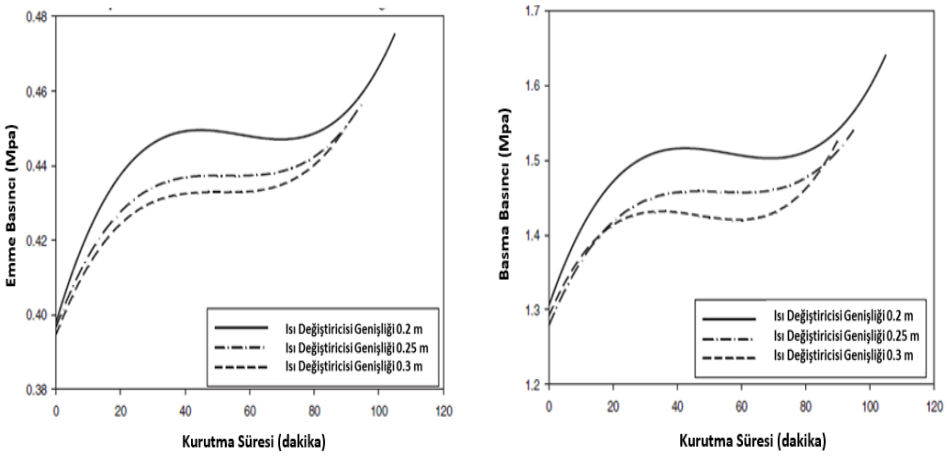
Şekil 1.29 Hava Debisi Değişiminin COP Değerine Etkisi [8]

Şekil 1.30'da görüldüğü üzere ilk kurutma aşamasında yüksek hava debisi daha yüksek SMER değeri vermektedir. Ancak tepe noktasına ulaşıldıktan sonra tüm debi değerlerinde SMER değerleri aynı oranda düşüş görülmektedir. Yoğuşturucu ve buharlaştırıcıdaki ısı değiştirici genişlikleri incelenmiştir. Bu durumda hava debisi 0,05 m^3/s değerinde sabit tutulmuştur.



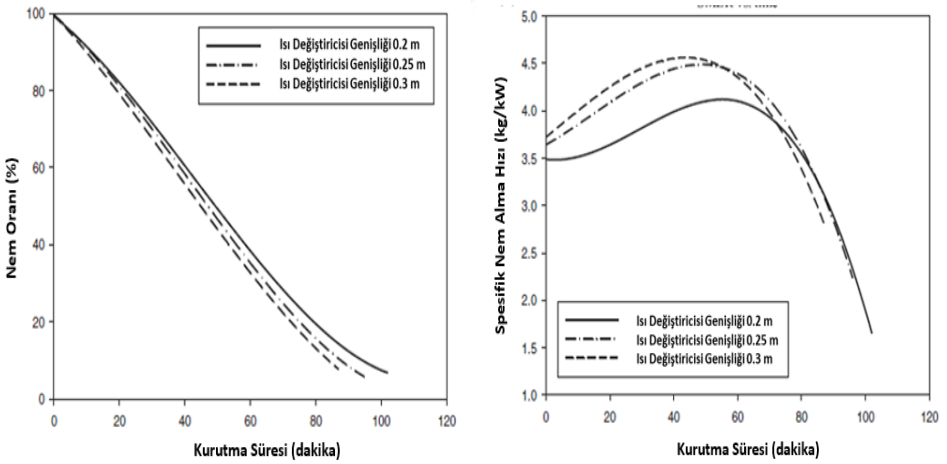
Şekil 1.30 SMER Değerinin Farklı Hava Debi Değerine Göre Değişimi [8]

Şekil 1.31'de ısı değiştirici genişliğine bağlı emme ve basma basınç değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Isı değiştiricinin genişliğinin artırılması daha büyük ısı transferi kapasitesi sağlamıştır. Bu durum soğutkan sisteminin ortalama verimini arttırmıştır.



Şekil 1.31 Isı Değiştirici Genişliğine Bağlı Emme ve Basma Basınç Değerlerinin Zamana Bağlı Değişimi [8]

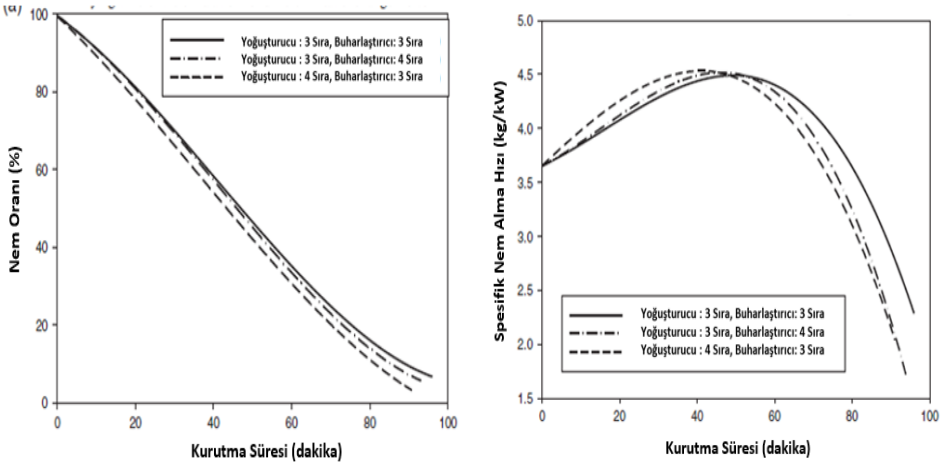
Şekil 1.32'de tekstil üzerindeki nem oranı ve SMER değerinin zamana bağlı değişimi, ısı değiştirici genişliğine bağlı olarak gösterilmektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere daha geniş ısı değiştiricisi daha hızlı nem alma oranına sebep olmuştur. Bu duruma sebep olarak ise daha yüksek ısı transferi kapasitesi düşünülmektedir. Isı değiştirici genişliği %25 oranında artırıldığında SMER değerinde %12'den fazla bir iyileşme gözlemlenmiştir.



Şekil 1.32 Isı Değiştiricisi Genişliğinin Kurutma Çevrimi İçerisinde Tekstil Üzerindeki Nem Oranı ve SMER Değerine Olan Etkisi [8]

Ayrıca yoğuşturucu ve buharlaştırıcıdaki boru sayısının performansa etkisi de incelenmiştir. Hava debisi 0,05 m^3/s ve ısı değiştirici genişliği 0,25 m değerinde sabit tutulmuştur.

Şekil 1.33'te farklı buharlaştırıcı ve yoğuşturucuların simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Isı değiştiricideki sıra sayısının arttırılması daha yüksek yüzey alanı oluşturmuş, bunun sonucunda da SMER değeri artmış ve kurutma süresi azalmıştır.



Şekil 1.33 Farklı Buharlaştırıcı ve Yoğuşturucuların Simülasyon Sonuçları [8]

Sonuçlara göre yoğuşturucu sıra sayısın artırılması buharlaştırıcı sıra sayısının artırılmasından daha verimlidir. Ancak SMER'deki değişim ısı değiştiricilerdeki sıra sayısı değiştirilse bile kısmen aynı değerde kaldığı belirtilmiştir.

İlgili çalışmada R134a'lı bir ısı pompalı kurutucu sisteminin bilgisayar üzerinde modellenip çözdürülmesi gerçekleştirilmiştir. Diğer çalışmalarda sabit olarak alınan kurutma adımı, bu çalışmada 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar literatürden alınan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

- Kurutma adımı 3 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla, tekstil sıcaklığını yükselten ön ısıtma adımı, tekstil sıcaklığının sabit kaldığı sabit kurutma adımı ve tekstil sıcaklığının ciddi oranda yükseldiği düşen kurutma oranı adımıdır. COP değeri sürekli düşerken SMER değeri sabit kurutma adımının sonunda maksimum değerine ulaşmaktadır. Emme ve basma basıncı ilk aşamada artmakta, ikinci aşamada sabit kalmakta ve son aşamada artmaktadır.

- Hava debisinin artırılması emme ve basma basınç değerlerinin azalmasına, COP değerinin artmasına ve kurutma sürelerinin azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca COP değerini maksimize etmek için ilk aşamada düşük bir hava debisi, ikinci aşamada yüksek hava debisi ve son aşamada ara bir hava debisi değeri önerilmektedir.

- Isı değiştirici genişliğini arttırarak ya da boru sıra sayısını arttırarak yüzey alanın arttırılması daha düşük emme ve basma basınç değerine ve daha kısa kurutma sürelerine sebep olmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde ısı değiştirici genişliğinin arttırılması sıra sayısının arttırılmasına göre daha verimli olduğu görülmüştür.

Ayrıca süre açısından da genişliğin arttırılması daha kısa kurutma sürelerine sebep olmaktadır.

Xinchen Yu ve arkadaşlarının 2021 yılında gerçekleştiği çalışmada [9], ev tipi tamburlu kurutuculardа enine tekstil hareketinin dinamik davranışı incelenmiş, kumaş boyutu, kurutma yükü boyutu ve ilk nem içeriği dahil olmak üzere çeşitli kurutma parametreleriyle hız dağılımı ve kesme hızı dağılımının değişimi gösterilmiştir. Kumaş hareketinin kurutma performansı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır.

Yapılan çalışmada,

- Hız profillerinin dağılımının, kalma süresinin ve kesme hızının gözlemlenmesinden, kumaş hareketinin büyük ölçüde kumaş boyutuna ve kurutma yükü boyutuna bağlı olduğu, ancak başlangıçtaki nem içeriği ile hiçbir ilişkisi olmadığı gözlemlenmiştir.
- Spesifik nem çekme oranı ve pürüzsüzlük görünümü ile ilgili olarak kumaş hareketinin kurutma performansı üzerindeki etkisi incelenmiş, kumaşlar ve kumaşları çevreleyen hava arasında daha fazla karıştırmayı içeren hareket desenleri, ısı ve kütle transferi için kumaş ve sıcak hava arasındaki etkin temas alanını arttırdığı için daha yüksek kurutma verimliliği gösterdiği gözlemlenmiştir.

Novak ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada [10], ısı pompalı kurutma makinalarında, kurutma yükü kapasitesi ve tambur hızının kurutucu performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Çalışma parametrelerinin ve kurutma aşamasının bir fonksiyonu olarak anlık yoğuşma hızının tahmini için modeller geliştirmek için regresyon analizi kullanılmıştır. Ek olarak, kumaş hareket dinamikleri ile kurutucu performans parametreleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için kumaş hareketi ve tamburdaki dağılımı kaydedilmiş ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

İlgili çalışma sonucunda,

- Toplam enerji tüketimi ve kilogram yük başına kurutma süresinin ölçümleri, daha yüksek yük kütlelerinin her iki performans parametresi üzerinde de olumlu bir etkisi olduğunu açıkça göstermektedir. Ancak tambur hızının etkisinin yük kütlesine bağlı olduğu bulunmuştur. 2 kg yük için, tambur hızı etkisi doğrusal olarak görülmemiş ve ikinci dereceden bir polinom fonksiyonu ile modellenmiştir. Bunun sonucunda optimum tambur devrinin yaklaşık 47 rpm'de

olduğunu göstermektedir. Daha yüksek kurutma kapasiteleri için (4 ve 6 kg) tambur devri etkisi doğrusaldır.

- Tambur hızı ve yük kütlesinin etkilerinin etkileşim içinde ortaya çıktığı yoğuşma hızı için regresyon modelleri temelinde de benzer sonuçlar çıkarılmıştır. Ek olarak, regresyon modelleri, bağıl yoğuşma kütlesi olarak ifade edilen, kurutma aşamasının bir fonksiyonu olarak ısı pompalı tamburlu kurutucu performansının tahmin edilmesini sağlar. Yoğuşma hızının kuruma süresine göre değişiminin, farklı tambur hızlarından dolayı değişimi kadar önemli olduğu ve her iki değişkenin de yoğuşma hızı ile doğrusal olmayan bir şekilde ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

- Kumaş hareketi ve dağılımının incelenmesi sonucunda, dönen bir tambur içindeki kumaş dağılımının ısı ve kütle transfer oranlarına önemli bir katkısı olduğu ve dolayısıyla kurutucu performansını etkilediği sonucuna varmaktadır. Kumaştan kurutma havasına nem transfer oranını iyileştirmek için homojen bir kumaş dağılımı elde etmek ve yerel kumaş birikimini ve tamburda kumaş olmayan alanların oluşumunu azaltmak uygundur. Gözlenen penceredeki alan ve zaman ortalamalı kumaş dağılımı ile modellenen kurutucu performansı arasındaki ilişkinin, ikinci dereceden bir polinom ile tanımlanabileceği, bu polinomun deneyler ile karşılaştırılmasının gözlemlenen ilk kurutma aşamasında güçlü olduğu gözlemlenmiştir. Kurutma çevriminin sonuna doğru, oluşturulan denklem ile deneysel sonuçlar zayıf regresyon istatistiklerine yansıyan ilişki gibi zayıflar. Bu, kumaşın kurudukça yüzey alanının artmasıyla açıklanabilir. Bu durum gözlemlenen alanda kumaş varlığının artmasıyla sonuçlanır.

Özetle, ilgili çalışmada dönen tambur içinde daha homojen bir kumaş dağılımına ulaşmak için çalışmalarını ayarlayabilen, kendinden uyarlamalı ısı pompalı tamburlu kurutucuların daha fazla geliştirilmesi için olasılıkları göstermektedir. Bu amaçla, tambur dönüş hızının ve yönünün yük tipine ve kütlesine göre sürekli değişimi gibi çözümlerden yararlanılabilir.

Xinchen Yu ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği [11] ev tipi bir çamaşır kurutma makinesinde kumaşın mekanik özelliklerinin hareket ve kurutma performansı üzerindeki etkileri başlıklı çalışmada, ev tipi çamaşır kurutma makinesindeki kumaş hareketini karakterize etmek için bir takip sistemi geliştirilmiştir. Tambur hareketi gerçekleşirken kumaş kurutma işlemi sırasında kumaş özelliklerini zamana bağlı olarak incelenmesinin kompleks olduğu gözlemlenmiştir. Hareket yörüngelerindeki farklılıklar, farklı kurutma aşamalarında da gözlemlenebilir. ANOVA ve çoklu

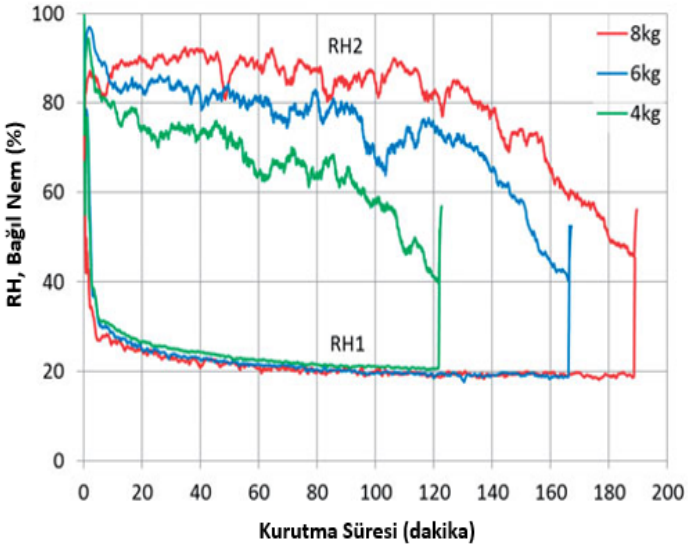
karşılaştırma testlerinin sonuçlarından, kumaş hareketlerini etkileyen en önemli faktörün kumaş ağırlığı olduğu bulunmuştur. Farklı hareket kalıpları için hız ve kalma süresi dağılımlarının gözlemlenmesine dayalı olarak on farklı hareket indeksi ortaya konmuş ve daha sonra bunların kurutma performansı ile ilişkileri araştırılmıştır. İki kurutma indeksi için tahmin modelleri kurutma hızı ve sabit hızlı kurutma aşamasının süresi, %98 doğrulukla lineer regresyon denklemleri ile belirlenmiştir.

Deneyler, kumaş mekanik özelliklerinin hareketine etkisini araştırmak ve vurgulamak amacıyla, sadece altı parça kumaştan oluşan kurutma yükleri ile gerçekleştirilmiştir.

Wei Bao ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada [12], çamaşır kurutma makinesinde mekanik hareketin, yün kumaşın aşınması ve tekstil kırışıklık değeri üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Kumaşlara değişen dönme hızlarında uygulanan mekanik işlemler çamaşır kurutma makinesindeki kumaş hareketlerine bağlıdır. Tambur dönüş hızı 17 rpm'den 66 rpm'e yükseldiğinde, kumaş hareketinin dairesel alanı artar. Tamburun dönüş hızı 66 rpm'e ulaştığında, kumaş örnekleri tambur duvarına yapışır ve tamburla birlikte döner. Böylece çok az darbe veya sürtünme oluşur. Kumaşların tamburla kurutulması sırasında tamburun dönüş hızının belirli sınırlar içinde düşürülmesiyle, kumaşlara uygulanan toplam mekanik etki artar. Düşük bir tambur dönüş hızında (17 rpm), kumaşlar tamburun bir köşesindeki küçük alanda hareket eder ve kumaşlara uygulanan temel mekanik hareketler sürtünme kuvvetleridir. Bununla birlikte, 50 rpm'de kumaşlar üzerindeki ana mekanik etkiler darbe kuvvetidir. 34 rpm'de hem sürtünme hem de darbe kuvvetleri kumaşlara etki eder. Mekanik etki ile yün kumaşın aşınması arasındaki ilişkinin analizinden, mekanik etkinin hem şiddetinin hem de türünün yünlü kumaşın aşınmasını etkilediği görülmüştür. Mekanik etki ne kadar şiddetli olursa, yünlü kumaşın aşınmasının o kadar büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Kumaşların tambur çeperi üzerindeki etkileri, kumaşlar arasındaki sürtünmeden daha az aşınmasına katkıda bulunduğu görülmüştür. Yünlü kumaşın aşınmasını önlemek için, kumaşların tamburun çeperine yapışmasını ve tamburla birlikte kurutma makinesinde dönmesini sağlamak gerekmektedir.

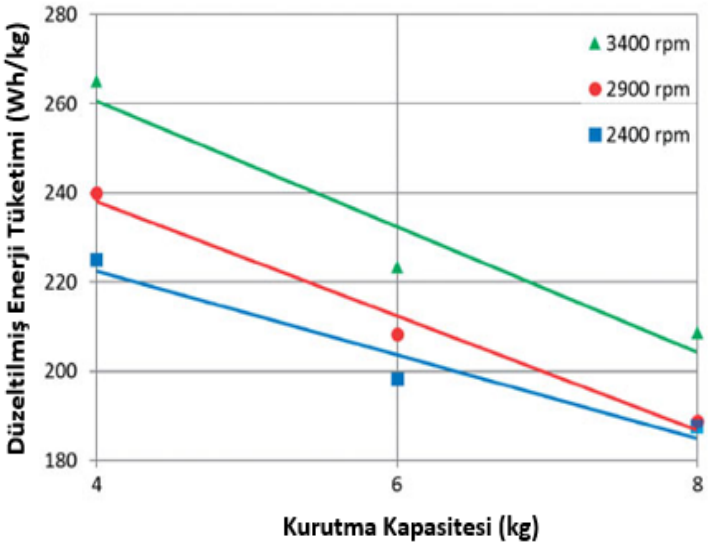
Pero Gataric ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada [13], ısı pompalı kurutma makinesinin enerji tüketimi ve kurutma süresinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda tekstillerin dönen bir tamburda kurutma havası ile etkileşimi, enerji verimliliğinin arttırılması için büyük önem taşıdığı görülmüştür. Sabit bir tambur hacminde kütle yükünün arttırılması, tekstiller ile kurutma havası arasındaki temas alanını arttırır. Temas alanı, ısı ve kütle transfer hızı arasındaki ilişki ile açıklanabilir. Bu durum enerji verimliliğini arttırır. Geniş bir temas alanı, kuruyan havadan tekstil yüzeyine ısı geçişini arttırır ve tekstil yüzeyinden kuruyan havaya daha

büyük nem geçişi sağlar. Kütle yükü çok küçükse, tekstillerle zayıf temas nedeniyle tamburdan ayrılırken havanın doymamış olması mümkündür. Değişen kütle yükünün kurutma işlemi üzerindeki etkisi Şekil 1.34 ve Şekil 1.35'te sunulmuştur.



Şekil 1.34 Tambur Giriş ve Çıkışındaki Bağıl Nemin Farklı Kurutma Kapasiteleri ile Değişimi [13]

Şekil 1.34, 2400 rpm sabit fan hızında ve 36 rpm tambur hızında tambur giriş ve çıkışında ölçülen hava bağıl nem değişimini göstermektedir. Daha yüksek kurutma kapasitelerinin tambur çıkış havasının bağıl nemini artırdığını ve bu da tambur içinde daha yüksek nem taşıma hızına işaret ettiğini göstermektedir.



Şekil 1.35 Yük Kapasitesi ve Fan Devrinin Sabit Tambur Devrinde Enerji Tüketimine Etkisi [13]

Toplam enerji tüketimi, kütle yükü arttıkça artar. Bu nedenle, şekil 1.35'te olduğu gibi,

kurutma yükünün kilogramı başına enerji tüketimini sunmak daha açıklayıcıdır. Şekil 1.35, 47 rpm sabit tambur hızında kütle yükü ve fan hızının yük başına enerji tüketimi veya enerji verimliliği üzerindeki etkisini göstermektedir. Kurutma kapasitesinin arttırılması, tüm fan hızı değerlerinde daha yüksek enerji verimliliği ile sonuçlanır.

Lovrenc Novak ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada [14], kurutma sistemlerinde hava giriş koşullarının kurutma kinetiğine olan etkisini analiz etmek için açık çevrimli kurutma makinalarında tekstil kurutması üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Yapılan testlerde ısı pompası sistemini temsil etmesi için hava debi değerleri ve kurutma kapasitesi parametre olarak seçilmiştir.

Yapılan modellemeler sonucunda elde edilen kurutma süresi tahmin modelinin deneysel çalışmalar ile uygun sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Oluşturulan model korelasyonları havanın giriş koşullarının kurutma süresine doğrudan etkisi olduğunu göstermiştir. Tambur girişindeki yüksek hava debi değeri, yüksek hava sıcaklığı ve düşük bağıl nem değeri kurutma süresini radikal olarak düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Akilesh Singh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [15], ısı pompalı kurutma sistemlerinde genellikle kullanılan R134a soğutucu akışkanı yerine kullanılabilecek daha çevreci soğutucu akışkanların performansları incelenmeştir. R134a soğutucu akışkanı yerine çeşitli düşük küresel ısınma potansiyeli değeri (GWP) olan soğutucu akışkanlar (R290, R600, R600a, R32, R152a, R1234yf, R1234ze(E)), hava giriş koşullarının etkileri, kurutma performans katsayısı üzerinde zaman ve malzeme nem içeriği, nem alma hızı oranı, özgül nem değişim hızı, özgül enerji tüketimi, kurutma verimliliği, ekserji yıkımı ve ekserji verimliliği tartışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, anlık nem yoğuşturma miktarı R32 soğutucu akışkanı için maksimum değere ulaşmıştır. SMER değerinde en yüksek değere R1234ze(E) soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde ulaşılmıştır. Minimum özgül enerji tüketimi ve maksimum kurutma verimliliğine ise R152a soğutkanı ile ulaşılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, R152a'nın ısı pompalı kurutucu için R134a'nın potansiyel bir ikamesi olabileceğini ortaya koymaktadır.

Philip Boudreaux ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada [16], kurutma makinelerinde hava kaçaklarının sistemde nerede oluştuğuna dair bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda iki adet bacalı, bir adet kapalı çevrime sahip tekstil kurutma makinaları kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda sistemde hava kaçaklarının %60 oranında fan çıkışı kısmında olduğu görülmüş, bu hava kaçaklarının da sistem performansına olan etkisinin ihmal edilebilir değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Kyle Gluesenkamp ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada [17], bacalı kurutma makinalarında ısı ve kütle transferi verimliliği üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada bulunan korelasyonlar dört ölçülebilir değer ile üretilmiştir. Bu değerler, kurutma havası debisi, yük miktarı, tambur içerisindeki hava kütlesi ve tambur içerisindeki tam yükün düşme zamanı olarak belirlenmiştir. Bu parametreler Buckingham Pi teoremi kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

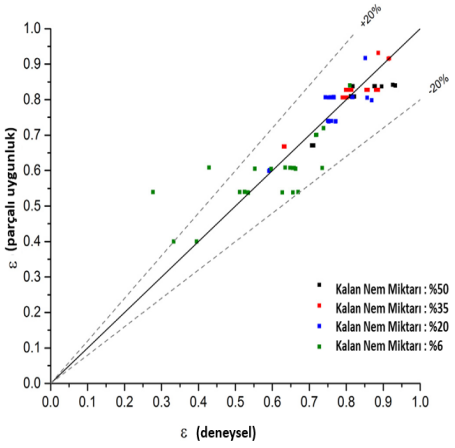
Yukarıda bahsedilen dört farklı parametrenin ısı transferi ile olan etkileşimi denklem 1.11'de gösterilmiştir.

$$\varepsilon = f\left(t, \dot{m}_{hava,kuru}, \dot{m}_{hava}, m_{\text{çamaşır}}, m_{nem}\right) \tag{1.11}$$

Denklem 1.11'de fonksiyon parametreleri t süre, $\dot{m}_{hava,kuru}$ sistemdeki kuru havanın kütlesel debisi, $\dot{m}_{hava}$ havanın kütlesel debisi, m_{yuk} yük kapasitesi, m_{nem} yük içerisindeki nem miktarı olarak belirtilmiştir.

$$\varepsilon = f\left(\frac{\dot{m}_{hava}\,t}{\dot{m}_{hava,kuru}}, \frac{m_{\text{çamaşır}}}{\dot{m}_{hava,kuru}}, \frac{m_{nem}}{\dot{m}_{hava,kuru}}\right) \tag{1.12}$$

Denklem 1.12'de ilgili parametrelerin Buckingham Pi teoremi ile sonucunda oluşan yeni boyutsuz sayıları belirlenmiştir. Yapılan boyutsuzlaştırma sonucunda deneysel çalışmalar ve modelin ısı transfer verimliliğinin sonuçları Şekil 1.36'da gösterilmiştir.



Şekil 1.36 Isı Transferinin Deneysel ve Model Sonuçları ile Karşılaştırılması [17]

Şekil 1.36'da farklı kurutma sonu nem oranlarında (RMC) deneysel sonuçların ve model sonuçlarının birbirleri ile olan doğruluk oranları gösterilmiştir. %6 nem oranında ±%20 doğruluk çizgisi içerisinden uzaklaştığı, kurutma sonu nem miktarı arttıkça modelin doğruluk oranının da arttığı görülmektedir.

Vipin Yadav ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada [18], elektrilkli ısıtıcı

içeren ev tipi kurutma makinalarında enerji tüketimini etkileyen termofiziksel parametrelerinin bulunması için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ışığında spesifik nem alma hızının (SMER) modellenmesi sağlanmıştır. Spesifik nem alma hızının korelasyonu denklem 1.13'te gösterilmiştir.

$$\mathrm{SMER} = 1.219 + \frac{\mathrm{RH}_0^{0.76} M_\mathrm{A}^{0.5}}{M_\mathrm{BD}^{1.4} \Delta f_\mathrm{w} (1 + \Delta f_\mathrm{w})^{0.5}} \tag{1.13}$$

Denklem 1.13'te RH_0 ortam havasının bağıl nemi, M_{BD} kemik kuruluğunda tekstil kütlesi, M_A birim yüzey alandaki tekstil kütlesi ve Δf_w su miktarındaki anlık değişim olarak belirtilmiştir.

Korelasyonun ilgili parametreler için sınır koşulları aşağıda belirtilmiştir.

$$0.4 < \mathrm{RH}_0 \leqslant 0.9, \quad 0.1 \leqslant M_\mathrm{A} \leqslant 0.6, \quad 1.0 \leqslant M_\mathrm{BD} \leqslant 4.5 \quad \text{and} \quad 0.5 \leqslant \Delta f_\mathrm{w} \leqslant 0.9$$

İlgili sınır koşulları içerisinde korelasyonun doğruluk oranı %87.4 olarak hesaplanmıştır.

Bassily ve arkadaşlarının 2003 yılında gerçekleştirdiği çalışmada [19], çamaşır kurutma makinalarında tambur içerisindeki kütle transferi incelenerek, tambur içerisindeki alan kütle transfer katsayısı için korelasyon oluşturma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kurutma makinasında yapılan 32 deneyin deneysel sonuçları kullanılarak, tambur hızı, çamaşırların ağırlığı, Reynolds, Schmidt ve Gukham sayısı ile korele edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kurutma makinasının tamburunda gerçekleşen ortalama kütle transfer verimliliğinin, ideal sürecin sadece %26.4'ü olduğu sonucuna varılmıştır. Kütle transfer katsayısının tambur içerisindeki kurutma havasının hızına, kurutucunun girişindeki sıcaklık ve bağıl nem oranına, yük tipine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Tambur devri değişimi, çamaşırların tambur içerisindeki karışma oranını etkileyeceği için kütle transfer katsayısına etki edebileceği belirtilmiştir.

Deans ve arkadaşlarının 2001 yılında gerçekleştirdiği çalışmada [20], ev tipi kurutma makinalarında kurutma performansı testleri gerçekleştirilmiş, kurulan matematiksel model ile karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda kurutma performansına etki eden parametreler, tambur içerisindeki çamaşırların kütlesine, üzerinde bulunan su miktarına ve kurutulan çamaşırın tipine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Tambur içerisindeki çamaşır hareketinin belirsiz olması sebebiyle tambur içerisindeki kütle ve ısı transferi değişimi, tamburun giriş ve çıkışındaki hava koşulları ile ölçülmesi gerektiği belirtilmiştir. Kurutma kumaşındaki yüzey nemlerinin, malzemenin sorpsiyon izotermlerine bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir.

Prasertsan ve arkadaşları 1996 ve 1997 yılları arasında ısı pompalı çamaşır kurutma sistemleri üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda [21] [22] [23], ev tipi ısı pompalı çamaşır kurutma makinalarının sistem modelini, deneysel çalışmalar ve matematiksel modeller ile oluşturmak için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk yayınlarında [21], Isı pompalı kurutucunun performansını derinlemesine araştırmak için, ısı pompalı kurutucunun simülasyon modelleri, her bir bileşen için oluşturulmuştur. Model oluşturma çalışmalarında sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. İkinci yayınlarında [22], iki açık, iki kapalı sistem olmak üzere dört farklı konfigürasyona sahip ısı pompalı kurutma sistemlerinin modelleri oluşturulmuştur. Sistem performansını değerlendirmek için spesifik nem alma hızı (SMER) incelenmiştir. Makinaların bulunduğu ortam sıcaklık ve bağıl nem koşullarının kurutma performansı değişiminde etkili olduğu bulunmuştur. Faklı ısı pompalı konfigürasyonlarında optimum performans değerlerinin farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Kurutma havasının sıcaklık, bağıl nem ve hızının sistem performansına etkisi görülmüş, buharlaştırıcı önünden taze hava alınarak yapılan testlerde ise kapalı çevrimlere göre performansta bir değişim gözlemlenmemiştir. Yayınladıkları son makalede ise [23], oluşturulan dört farklı konfigürasyon için doğrulama testleri gerçekleştirilmiş, geliştirilen model ile deneysel sonuçların benzer sonuçlar verdiği bilgisi paylaşılmıştır. İlgili yayınlarda hata oranları yüzdesel olarak belirtilmemiştir. Ancak oluşan hataların ana nedeninin kompresör üzerinden atılan atık ısıdan kaynaklandığı belirtilmiştir.

Literatür araştırması sonucunda kurutma makinalarında farklı tambur devri, yük kapasitesi, hava debi değeri değişimlerinin kurutma performansına olan etkisinin incelendiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar genellikle kurutma süresi, enerji tüketimi değişimleri üzerine odaklanmıştır. Bu incelemeler içerisinde kütle ve ısı transferi üzerine yaklaşımlarda bulunulmuş fakat tambur içerisindeki taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayısı ve kütle transfer katsayısının kurutma çevrimi boyunca anlık olarak değişiminin incelenmediği görülmüştür. Buna ek olarak son yıllarda enerji verimli ürünlerin artmasına bağlı olarak kurutma makinaları sistemlerinde değişken devirli kompresörlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. İlgili literatür araştırmasında değişken devirli kompresör uygulamalarının olmadığı görülmüştür.

Bu doktora tezinde ise tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısının, çamaşır kütlesi, hava debisi, tambur devri ve kompresör çalışma frekansı değişimine göre anlık olarak değişimi incelenmiş, ilgili parametre değişimlerinin spesifik nem alma hızına olan etkisi değerlendirilmiştir. Tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı ve spesifik nem alma hızının istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak yarı ampirik denklemleri oluşturulmuş, sistem tasarım parametrelerinin optimizasyon modeli için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Avrupa'da artan çevre bilincinin yanı sıra Eko-tasarım gereklilikleri ve ilgili yasal düzenlemeler dayanıklı tüketim malları pazarındaki rekabeti artırmaktadır. Ev tipi çamaşır kurutucular açısından bakıldığında, ısı pompası sisteminin ev tipi çamaşır kurutma makinelerine entegrasyonu ile enerji verimliliğindeki artış hızlanmıştır. Bu sistemlerin fiyat rekabetçi tasarımı, bu sistemlerin modellenmesini ve en uygun performans düzeyine getirilmesini önemli kılmaktadır.

Bu doktora tezinde ise tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısının, çamaşır kütlesi, hava debisi, tambur devri ve kompresör çalışma frekansı değişimine göre anlık olarak değişimi incelenmiş, ilgili parametre değişimlerinin spesifik nem alma hızına olan etkisi değerlendirilmiştir. Tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı ve spesifik nem alma hızının istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak yarı ampirik denklemleri oluşturulmuş, sistem tasarım parametrelerinin optimizasyon modeli için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır.

Testler üç farklı yük miktarı, tambur devri, hava debisi ve kompresör frekansında gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayılarının değişimi incelenmiştir. Kurutma sistemine etki eden tüm parametrelerin detaylı olarak analizi gerçekleştirilmiştir. Taşınım ısı transfer katsayısı, kütle transfer katsayısı ve SMER değerleri istatistiksel analiz yöntemleri ile yarı ampirik olarak modellenmiş, buna ek olarak makine öğrenmesi yöntemi ile sistem tasarım parametrelerinin optimizasyon modeli oluşturulmuştur.

1.3 Özgün Katkı

Literatür araştırması sonucunda kurutma makinalarında farklı tambur devri, yük kapasitesi, hava debi değeri değişimlerinin kurutma performansına olan etkisinin incelendiği görülmüştür.

Yuhui Wei ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı çalışmada [5] bacalı kurutma makinalarında kurutulan çamaşırların poroz yapı içerisindeki ısı ve kütle transferi incelenmiştir. Yuhui Wei ve arkadaşları 2019 yılında gerçekleştirdiği çalışmada ise [6] farklı tekstil tiplerinin, kurutma makinesi tambur içerisindeki hareketinin kurutma performansına etkisi incelenmiştir. Bing-Hung Lee ve arkadaşlarının 2019 yılında yayınladığı çalışmada [8] ısı pompası kurutma makinalarının sistem matematiksel modeli oluşturulmuş, sistemin zamana bağlı SMER ve COP değeri değişimi modellenmiştir. Xinchen Yu ve arkadaşlarının 2021 yılında yayınladığı çalışmada [9] kurutma makinalarında tekstil hareketinin kurutma performansına olan

etkisi araştırılmıştır. Novak ve arkadaşlarının 2019 yılında yayınladığı çalışmada [14], kurutma yükü kapasitesi ve tambur hızının kurutma performansına olan etkisi incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, kurutma makinalarında farklı tambur devri, yük kapasitesi, hava debi değeri değişimlerinin kurutma performansına olan etkisinin incelendiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar genellikle kurutma süresi, enerji tüketimi değişimleri üzerine odaklanmıştır. Bu incelemeler içerisinde kütle ve ısı transferi üzerine yaklaşımlarda bulunulmuş fakat tambur içerisindeki taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayısı ve kütle transfer katsayısının kurutma çevrimi boyunca anlık olarak değişiminin incelenmediği görülmüştür. Buna ek olarak son yıllarda enerji verimli ürünlerin artmasına bağlı olarak kurutma makinaları sistemlerinde değişken devirli kompresörlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. İlgili literatür araştırmasında değişken devirli kompresör uygulamalarının olmadığı görülmüştür.

Bu doktora tezinde ise tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısının, çamaşır kütlesi, hava debisi, tambur devri ve kompresör çalışma frekansı değişimine göre anlık olarak değişimi incelenmiş, ilgili parametre değişimlerinin spesifik nem alma hızına olan etkisi değerlendirilmiştir. Tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı ve spesifik nem alma hızının istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak yarı ampirik denklemleri oluşturulmuş, sistem tasarım parametrelerinin optimizasyon modeli için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır.

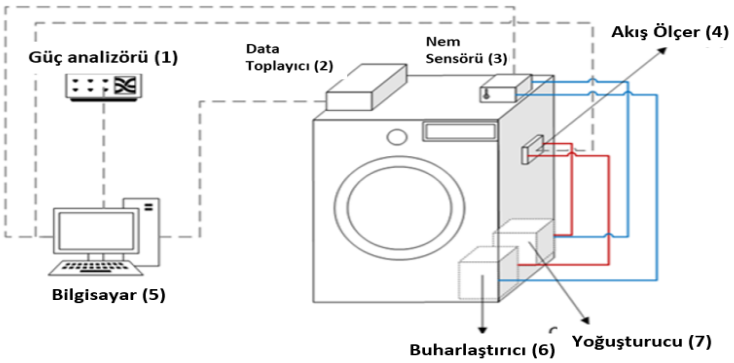
Kurulan deney düzeneğinde literatürde ilk defa kurutma makinalarında hava debisi çevrim boyunca anlık olarak ölçülmüştür. Isı Pompalı kurutma makinalarında literatürde ilk defa, tambur devri, hava debisi, kurutma kapasitesi ve kompresör çalışma frekansı değişimi ile tambur içi kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı değişimi yarı ampirik model ile oluşturulmuş, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak sistem tasarım parametrelerinin optimizasyon modeli oluşturulmuştur.

2
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu doktora tez çalışması kapsamında, ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde tambur devri, yük kapasitesi, hava debisi ve kompresör çalışma frekansının tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısına olan etkisini incelemek için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı değişimine ek olarak, kurutma makinesinin spesifik nem alma hızını (SMER) maksimize eden parametreler belirlenerek, sistem tasarım parametreleri optimizasyonunun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

2.1 Deney Düzeneği

Doktora tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve teorik çalışmaların oluşturulabilmesi için deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 2.1 Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi

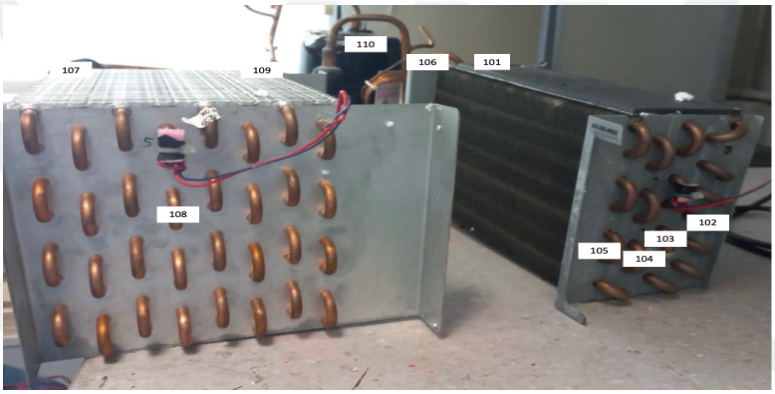
Şekil 2.1'de doktora tez çalışmaları kapsamında kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir. Kütle ve taşınım ısı transfer katsayısını anlık olarak inceleyebilmek için, deney düzeneğinde sıcaklık ve nem sensörleri kullanılmış, tambur içerisindeki hava akışının anlık olarak takip edilebilmesi için basınç sensörleri kullanılarak sistem içerisindeki basınç kaybı değerlerinden anlık debi değerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Isı pompalı kurutma sistemlerinde soğutucu akışkan

olarak R290 (propan) gazı kullanılmıştır. Sistemde değişken devirli kompresör olarak RECHI firmasının 39Q1ALK kodlu kompresörü kullanılmıştır.

Tablo 2.1 Farklı Çalışma Frekanslarında RECHI 39Q1ALK Model Kompresörün Giriş Gücü ve Soğutma Kapasitesi Değişimi

Parametre	35 Hz	40 Hz	50 Hz
Soğutma Kapasitesi [Watt]	616	770	1074
Giriş Gücü [Watt]	176	226	318

İlgili kompresör için, deneylerin gerçekleştiği çalışma frekanslarında Arçelik A.Ş. Merkez Ar-Ge Termodinamik ve Sistem Bazlı Modelleme Yöneticiliği altyapısında bulunan kaloritmetre cihazında test edilerek, giriş gücü ve soğutma kapasitesi ölçümleri gerçeleştirilmiştir. Tablo 2.1'de ölçüm sonuçları paylaşılmıştır.



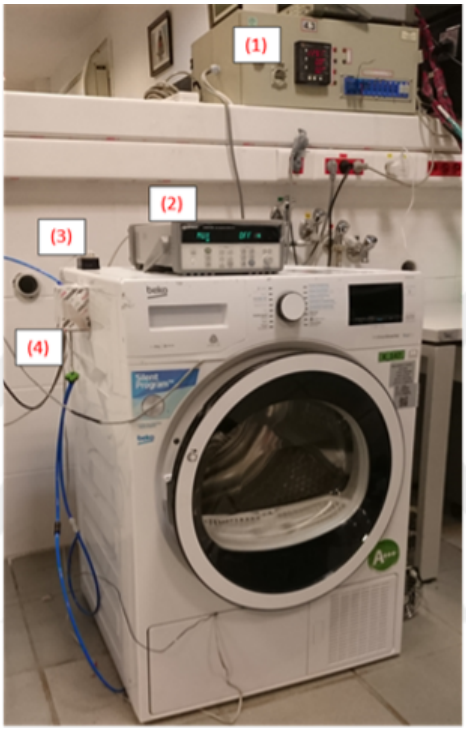
Şekil 2.2 Yoğuşturucu ve Buharlaştırıcı Termokupl Yerleşimi

Şekil 2.2'de ısı pompalı kurutma sistemlerinde ısıtma ve soğutma görevlerini yerine getiren yoğuşturucu ve buharlaştırıcıya yerleştirilen termokupl yerleri gösterilmiştir. Yerleşim yerleri sistemdeki soğutucu akışkanın sıcaklığını takip etmek için belirlenmiştir.

Tablo 2.2 Termokupl ve Bağıl Nem Sensörü Yerleşim Bölgeleri

Hava Tarafı	Soğutkan Tarafı
111 Buharlaştırıcı Giriş	101 Buharlaştırıcı Giriş
112 Buharlaştırıcı Çıkış	102 Buharlaştırıcı 4P
113 Yoğuşturucu Çıkış	103 Buharlaştırıcı 8P
	104 Buharlaştırıcı 11P
	105 Buharlaştırıcı 14 P
	106 Buharlaştırıcı Çıkış
	107 Yoğuşturucu Giriş
	108 Yoğuştucu 11 P
	109 Yoğuşturucu Çıkış
	110 Kompresör Yüzey

Tablo 2.2'de deney düzeneğinde hava tarafı ve soğutucu akışkan tarafından alınan sıcaklık sensörleri gösterilmektedir. Hava tarafında buharlaştırıcı giriş, buharlaştırıcı çıkış ve yoğuşturucu çıkışında belirtilen noktalarda dörder adet sıcaklık ve bağıl nem sensörü yerleştirilmiştir. Soğutucu akışkan tarafında ise buharlaştırıcı ve yoğuşturucunun üzerinde belirlenen noktalara termokupl yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak kompresör yüzey sıcaklığı da termokupl yerleştirilerek anlık olarak takip edilmiştir.



Şekil 2.3 Deney Düzeneği Görseli

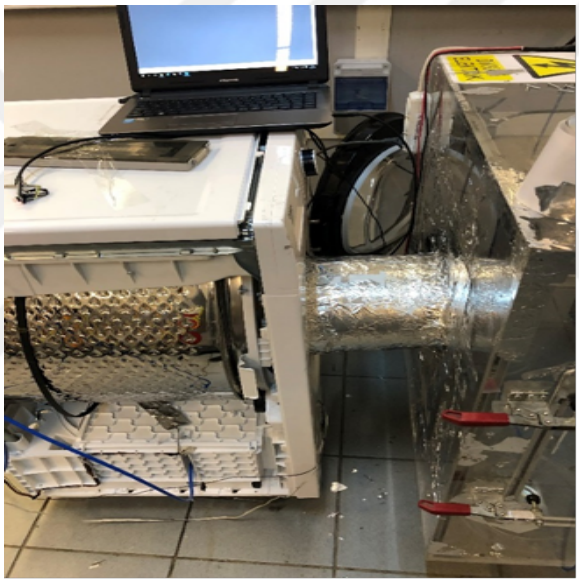
Şekil 2.3'te deney düzeneği ve ölçüm sistemleri gösterilmiştir. Deney sürelerinin ve tüketilen enerjinin kayıt altına alınması için veri toplama sistemi kullanılmıştır. Veri toplama sistemi şekilde 1 numaralı olarak işaretlenmiştir. Sıcaklık datalarının toplanması için data logger sistemi kullanılmıştır. Data logger sistemi Keysight 34970a modeli olarak kullanılmıştır ve şekilde 2 numara olarak gösterilmektedir. Sıcaklık ölçümleri için T tipi termokupllar kullanılmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem datalarından özgül nem hesapları ve tüm sistem denklemleri python programı içerisinde Coolprop programı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Kurutucudaki akış ölçümleri Arduino Nano ve akış sensörü ile yapılmıştır. Arduino Nano ekipmanı şekilde 3 numara ile, akış sensörü 4 numara ile gösterilmektedir.

Şekil 2.4'te akış sensörü gösterilmektedir. Akış sensörü, yoğuşturucu çıkışından çıkan ve buharlaştırıcı ile yoğuşturucu arasındaki iki standart boruyu akış sensörüne bağlayarak çalışır ve burada okunan basınç farkı değerleri arduino tarafından okunur



Şekil 2.4 Hava Akış Sensörü

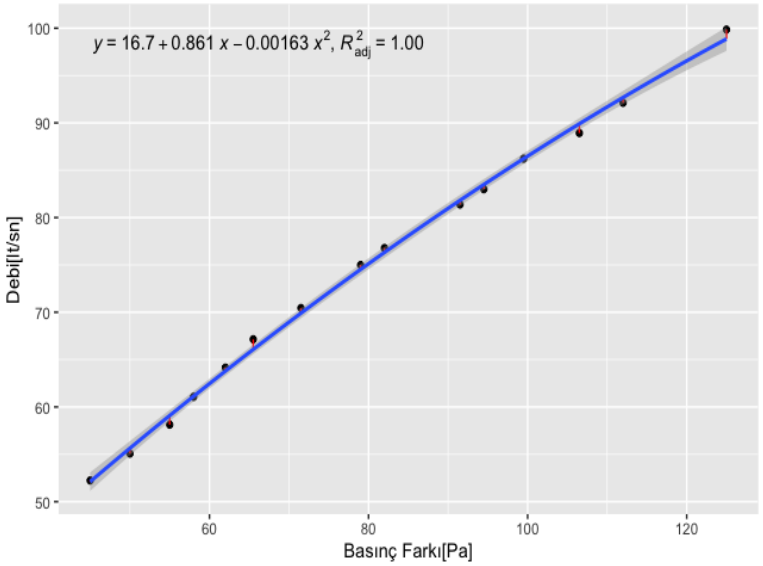
ve Agilent programı üzerinde hem basınç farkı hem de akış değeri VEE pro yazılımı üzerinden takip edilmektedir.



Şekil 2.5 Rüzgar Tüneli Kalibrasyonu

Şekil 2.5'te akış sensörünün sistemdeki hava debisini doğru ölçebilmesi için Arçelik Merkez Ar-Ge Akışkanlar Dinamiği laboratuvarlarında bulunan rüzgar tünelindeki kalibrasyonu gösterilmektedir. Kurutma makinalarında hava akışını yaratan BLDC motoru 2000 rpm ile 3400 rpm arasında 16 farklı noktada çalıştırarak debi değerleri ve akış sensörünün bu debi değerlerine göre basınç kayıpları kayıt edilmiştir. Hava debileri ve basınç kayıp değerleri incelenerek ısı pompalı kurutma makinasının hava debisi, akış sensörünün basınç kaybına göre formülize edilmiştir.

Şekil 2.6'da debi ve akış sensörünün basınç farkı kalibrasyon denklemi gösterilmektedir. Yapılan kalibrasyon sonucunda basınç farkı ile debi arasındaki denklem $y = 16.7 + 0.861x - 0.00163x^2$ olarak bulunmuştur.



Şekil 2.6 Rüzgar Tüneli & Basınç Sensörü Kalibrasyon Denklemi

2.2 Deney Prosedürü

Deneysel çalışmalarda kullanılan pamuk tekstiller EN 61121 Avrupa birliği kurutucu standardına uygun olarak kullanılmıştır. Yapılan tüm testlerde ortam sıcaklığı 23±2 °C, bağıl nem değeri %55 ± %5, gerilim değeri 230V ± %1 olarak sabit tutulmuştur.

2.3 Ölçüm Belirsizliği Analizi

Gerçekleştirilen çalışmalarda ısı ve kütle transfer katsayısı hesabında deney düzeneğinden ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerleri kullanıldığı için, sıcaklık, bağıl nem ve özgül nem değerlerinin belirsizliği, sonuçların doğruluğu için analiz edilmelidir.

Bu ölçüm belirsizliğini hesaplamak için literatürde Kline ve McClintock tarafından oluşturulan yöntem kullanılmıştır. Geliştirilen bu yöntemde bir takım deneysel ölçümler yaparak hesaplanması gereken büyüklük K ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken ise $x_1, x_2, x_2, x_3 .... x_n$ olmak üzere,

$$K = K(x_1, x_2, x_3, ...x_n) \tag{2.1}$$

olarak yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, ...w_n$ ve K büyüklüğünün hata oranı w_k ise, belirsizlik analizi yöntemine göre,

$$w_k = \pm \left[\left(\frac{\partial K}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + .. + \left(\frac{\partial K}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \tag{2.2}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan ölçme aletlerinin ölçüm doğruluk değerleri Tablo 2.3'te gösterilmektedir.

Tablo 2.3 Deney Düzeneğinde Kullanılan Cihazların Doğruluk Değerleri

Sensör Tipi	**Ölçüm Doğruluk Değeri**
Termokupl	$\pm 0,2\,^{\circ}\mathrm{C}$
Nem Sensörü	T : $\pm 0,2\,^{\circ}\mathrm{C}$, %RH : $\pm 0,3\%$
Hava Debisi	Q : $\pm 0,1\mathrm{lt/s}$

Denklem 2.2'de gösterilen değerler python programında bulunan numpy ve math kütüphanesi aracılığıyla hesaplanmıştır. Belirsizlik analizi hesaplarında uzunluk ölçüm terimleri ihmal edilmiştir.

$$\dot{m}_{\text{hava,buh}} = kA\frac{\rho_b}{0.622}\left[a\omega_{\text{ort,t}} - \frac{\omega_g + \omega_c}{2}\right] \tag{2.3}$$

$$\dot{m}_{\text{hava,buh}} = \rho_{hava,kuru} x \dot{Q}_{\text{hava}} x \Delta\omega \tag{2.4}$$

$$w_{\dot{m}_{\text{hava,buh}}} = \pm\left[\left(\frac{\partial \dot{m}_{\text{hava,buh}}}{\partial \rho_{hava,kuru}} w_{\rho_{hava,kuru}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_{\text{hava,buh}}}{\partial \dot{Q}_{hava}} w_{\dot{Q}_{hava}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_{\text{hava,buh}}}{\partial \Delta\omega} w_{\Delta\omega}\right)^2\right]^{1/2} \tag{2.5}$$

$$w_\omega = \pm[(w_T)^2 + (w_{RH})^2]^{1/2} \tag{2.6}$$

$$w_k = \pm[(w_{\dot{m}_{\text{hava,buh}}})^2 + (w_\omega)^2]^{1/2} \tag{2.7}$$

$$k = \frac{h_c}{\text{Le} * c_{p,hava,t} * \rho_b} \tag{2.8}$$

$$w_k = w_{h_c} \tag{2.9}$$

yukarıda belirtilen denklemler baz alınarak belirsizlik analizleri hesaplanmıştır. Elde edilen belirsizlik değerleri bir deney sonucu için Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Hesaplanan Belirsizlik Değerleri

	$k[m/s]$	$h_c[\mathrm{W/m^2K}]$	$\dot{m}_{\text{hava,buh}}\,[kg/s]$	$\Delta\omega[\mathrm{kg\ H_2O/kg kuruhava}]$
$\pm\%$ **w**	6,44	6,44	1,04	6,36

2.4 Deney Matrisi

Isı pompalı çamaşır kurutma sistemlerinde tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı değişimini incelemek, taşınım ısı transfer katsayısı, kütle transfer katsayısı ve SMER değerinin yarı ampirik modelini oluşturabilmek için Tablo 2.5'te gösterilen deney matrisi kurgulanmıştır. Bu deney matrisinde seçilen değerler ışığında deney matrisi kurgulanmış, her koşul için 3 tekrarlı test gerçekleştirilerek toplamda

243 adet test gerçekleştirilmiştir. Çamaşırlar testin başlangıcında % 60 nem içerecek şekilde çamaşır makinesi içerisinde şartlandırılmıştır.

Tablo 2.5 Deney Matrisi

Yük Miktarı	Tambur Devri	Hava Debisi	Kompresör Çalışma Frekansı
2 kg	42 rpm	48 lt/s	35 Hz
2 kg	42 rpm	48 lt/s	40 Hz
2 kg	42 rpm	48 lt/s	50 Hz
2 kg	42 rpm	58 lt/s	35 Hz
2 kg	42 rpm	58 lt/s	40 Hz
2 kg	42 rpm	58 lt/s	50 Hz
2 kg	42 rpm	68 lt/s	35 Hz
2 kg	42 rpm	68 lt/s	40 Hz
2 kg	42 rpm	68 lt/s	50 Hz
2 kg	52 rpm	48 lt/s	35 Hz
2 kg	52 rpm	48 lt/s	40 Hz
2 kg	52 rpm	48 lt/s	50 Hz
2 kg	52 rpm	58 lt/s	35 Hz
2 kg	52 rpm	58 lt/s	40 Hz
2 kg	52 rpm	58 lt/s	50 Hz
2 kg	52 rpm	68 lt/s	35 Hz
2 kg	52 rpm	68 lt/s	40 Hz
2 kg	52 rpm	68 lt/s	50 Hz
2 kg	62 rpm	48 lt/s	35 Hz
2 kg	62 rpm	48 lt/s	40 Hz
2 kg	62 rpm	48 lt/s	50 Hz
2 kg	62 rpm	58 lt/s	35 Hz
2 kg	62 rpm	58 lt/s	40 Hz
2 kg	62 rpm	58 lt/s	50 Hz
2 kg	62 rpm	68 lt/s	35 Hz
2 kg	62 rpm	68 lt/s	40 Hz
2 kg	62 rpm	68 lt/s	50 Hz
5 kg	42 rpm	48 lt/s	35 Hz
5 kg	42 rpm	48 lt/s	40 Hz
5 kg	42 rpm	48 lt/s	50 Hz
5 kg	42 rpm	58 lt/s	35 Hz
5 kg	42 rpm	58 lt/s	40 Hz

Tablo 2.5 Deney Matrisi (devamı)

Yük Miktarı	Tambur Devri	Hava Debisi	Kompresör Çalışma Frekansı
5 kg	42 rpm	58 lt/s	50 Hz
5 kg	42 rpm	68 lt/s	35 Hz
5 kg	42 rpm	68 lt/s	40 Hz
5 kg	42 rpm	68 lt/s	50 Hz
5 kg	52 rpm	48 lt/s	35 Hz
5 kg	52 rpm	48 lt/s	40 Hz
5 kg	52 rpm	48 lt/s	50 Hz
5 kg	52 rpm	58 lt/s	35 Hz
5 kg	52 rpm	58 lt/s	40 Hz
5 kg	52 rpm	58 lt/s	50 Hz
5 kg	52 rpm	68 lt/s	35 Hz
5 kg	52 rpm	68 lt/s	40 Hz
5 kg	52 rpm	68 lt/s	50 Hz
5 kg	62 rpm	48 lt/s	35 Hz
5 kg	62 rpm	48 lt/s	40 Hz
5 kg	62 rpm	48 lt/s	50 Hz
5 kg	62 rpm	58 lt/s	35 Hz
5 kg	62 rpm	58 lt/s	40 Hz
5 kg	62 rpm	58 lt/s	50 Hz
5 kg	62 rpm	68 lt/s	35 Hz
5 kg	62 rpm	68 lt/s	40 Hz
5 kg	62 rpm	68 lt/s	50 Hz
8 kg	42 rpm	48 lt/s	35 Hz
8 kg	42 rpm	48 lt/s	40 Hz
8 kg	42 rpm	48 lt/s	50 Hz
8 kg	42 rpm	58 lt/s	35 Hz
8 kg	42 rpm	58 lt/s	40 Hz
8 kg	42 rpm	58 lt/s	50 Hz
8 kg	42 rpm	68 lt/s	35 Hz
8 kg	42 rpm	68 lt/s	40 Hz
8 kg	42 rpm	68 lt/s	50 Hz
8 kg	52 rpm	48 lt/s	35 Hz
8 kg	52 rpm	48 lt/s	40 Hz
8 kg	52 rpm	48 lt/s	50 Hz
8 kg	52 rpm	58 lt/s	35 Hz

Tablo 2.5 Deney Matrisi (devamı)

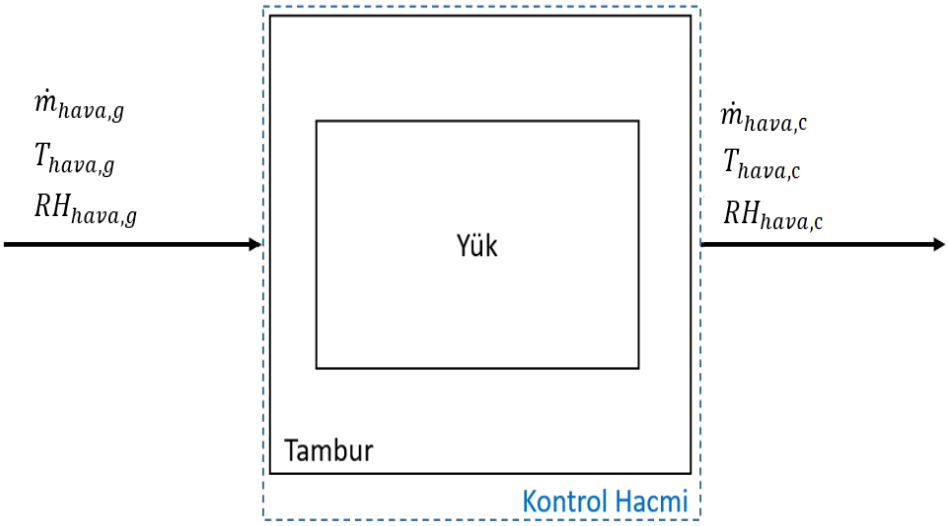
Yük Miktarı	Tambur Devri	Hava Debisi	Kompresör Çalışma Frekansı
8 kg	52 rpm	58 lt/s	40 Hz
8 kg	52 rpm	58 lt/s	50 Hz
8 kg	52 rpm	68 lt/s	35 Hz
8 kg	52 rpm	68 lt/s	40 Hz
8 kg	52 rpm	68 lt/s	50 Hz
8 kg	62 rpm	48 lt/s	35 Hz
8 kg	62 rpm	48 lt/s	40 Hz
8 kg	62 rpm	48 lt/s	50 Hz
8 kg	62 rpm	58 lt/s	35 Hz
8 kg	62 rpm	58 lt/s	40 Hz
8 kg	62 rpm	58 lt/s	50 Hz
8 kg	62 rpm	68 lt/s	35 Hz
8 kg	62 rpm	68 lt/s	40 Hz
8 kg	62 rpm	68 lt/s	50 Hz

3
TEORİK ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar doğrultusunda tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısının değişimi teorik yaklaşımlar ile değerlendirilmiştir. Isı pompalı çamaşır kurutma makinalarında tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısına ulaşmak için belirli kabuller eşliğinde, literatürde kullanılan yaklaşımlar uygulanmıştır.

3.1 Tambur İçerisindeki Anlık Nem Alma Hızının Hesaplanması

Kurutma makinalarında nem alma prosesi, sabit basınç altında, sıcaklığı arttırılmış havanın bağıl nemini düşürerek, birim kütlede nem alma kapasitesi arttırılmış havanın tambur içerisine yönlendirilerek, tekstilden nem alınmasının sağlanması olarak tarif edilebilir.



Şekil 3.1 Kurutma Makinası Nem Alma Mekanizması

Şekil 3.1'de kurutma makinası içerisindeki kontrol hacmi gösterilmektedir. Belirlenen

kontrol hacminde tekstil üzerinden anlık nem alma hızı 3.1'de gösterilmektedir.

$$\dot{m}_{\text{hava,buh}} = \rho_{hava,kuru} x \dot{Q}_{hava} x \Delta\omega \tag{3.1}$$

İlgili denklemde $\dot{m}_{\text{hava,buh}}$ birim zamanda tekstil üzerinden alınan nem hızını, $\rho_{hava,kuru}$ kurutma havasının yoğunluğunu, $\dot{Q_{hava}}$ kurutma havasının debi değerini, $\Delta\omega$ tambur giriş ve çıkışındaki özgül nem değeri farkını göstermektedir. Deney düzeneğinde yerleştirilen sıcaklık, bağıl nem ve akış sensörleri ile ilgili parametreler her deney koşulu için anlık olarak ölçülmüştür.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V/(R_v T)}{P_a V/(R_a T)} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} \tag{3.2}$$

Özgül nem denklem 3.2'deki eşitlik ile hesaplanmaktadır. İlgili denklemde P_v su buharının kısmi basıncı, P_a kuru havanın kısmi basıncıdır.

3.2 Tambur İçerisindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transferi Katsayısı Hesaplamaları

Tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transferi hesaplamaları için aşağıdaki kabuller doğrultusunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Kullanılan tekstil malzemesinin termo-fiziksel özellikleri, kullanılan hacim boyunca aynıdır.
- Tekstil malzemesinin içerisindeki nem dağılımı homojendir.
- Kurutma akışkanının anlık nem değişimi eşittir.
- Tekstil malzemesinin içerisindeki sıcaklığı dağılımı anlık olarak eşittir.
- Kurutma akışkanına tekstil malzemesine nem geçişi belirlenen kontrol hacminde gerçekleşmektedir.
- Düşük nem değerindeki kurutma havası bir noktadan girer ve diğer noktadan çıkar.
- Tekstil üzerinden havaya geçen nem miktarı hesaplanırken çamaşırın sadece bir yüzeyinden kütle transferi gerçekleşmiştir.

Kurutma işleminde, kütle ve enerji korunmaktadır. Kurutma işlemi sırasında kimyasal reaksiyon olmadığı için kütle transferi, kuru havanın, suyun (sıvı/buhar) ve tekstil

malzemesinin özelliğine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Tekstil üzerinden nem alma sırasındaki sıvı ve buhar geçişi kurutma için en önemli olan aşamadır. Kurutma prosesi boyunca havanın basıncı 101.325 kPa olarak kabul edilmiştir.

Kütle ve taşınım ısı transfer katsayılarını hesaplamak için en önemli işlem, kurutma havası ile çamaşır arasındaki ısı ve kütle transferidir. Bu süreci tam olarak tanımlamak zordur. Bu durum her kurutucu tipi, tekstil tipi vb. değişiklikler için farklı olacaktır.

Tambur içerisindeki çamaşır üzerinden gerçekleşen kütle transferi Fick yasasından yola çıkarak hesaplanabilir [24].

Fick 1. Yasası denklem 3.3'de gösterilmiştir.

$$J = -D * \frac{dC}{dx} \tag{3.3}$$

ilgili denklemde J difüzyon akısı, D difüzyon katsayısı, $\frac{dC}{dx}$ birim uzunluktaki konstrasyon farkı olarak belirtilmektedir.

Isı pompalı kurutma makinalarında tambur içerisindeki kütle transferi katsayısını hesaplamak Fick'in 1. Yasası denklem 3.4'de aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\dot{m}_{\text{hava,buh}} = k * A * (C_1 - C_2) \tag{3.4}$$

İlgili denklemde k kütle transfer katsayısı, A çamaşırın yüzey alanı, C_1 tambur içerisindeki çamaşır yüzeyindeki nemin konsantrasyonu, C_2 ise tambur içerisindeki hava neminin konstrasyonudur.

Çamaşır yüzeyindeki nemin konsantrasyonu ile tambur içerisindeki hava neminin konstrasyon farkını, tekstil yüzeyindeki su buharının yoğunluğu ve özgül nem farkları ile hesaplamak için literatürde Yadav ve arkadaşlarının yaklaşımı kullanılarak [18], denklem 3.4, denklem 3.5 olarak yazılabilir.

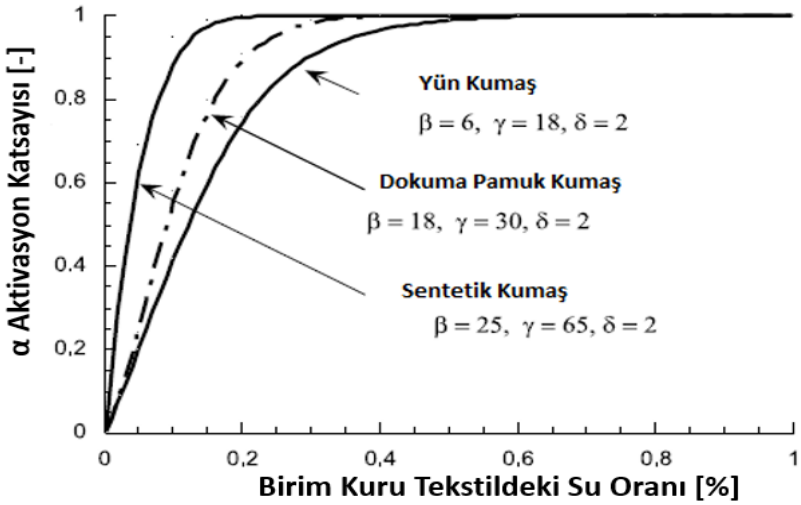
$$\dot{m}_{\text{hava,buh}} = kA\frac{\rho_b}{0.622}\left[a\omega_{\text{ort,t}} - \frac{\omega_g + \omega_{\text{c}}}{2}\right] \tag{3.5}$$

İlgili denklemde $\dot{m}_{\text{hava,buh}}$ tambur içerisinde çamaşır yüzeyinden havaya aktarılan nemin kütlesel debisi, a aktivasyon katsayısı, ρ_b tekstil yüzeyindeki su buharının yoğunluğu, $\omega_{\text{ort,t}}$ tambur içerisinde kurutulan çamaşırın sıcaklığı ve bağıl nemine bağlı olarak hesaplanan özgül nem değeri, ω_g tambur girişindeki havanın özgül nem değeri, ω_{c} tambur çıkışındaki havanın özgül nem değeridir.

Aktivasyon katsayısı kurutulacak ortamın nem içeriğinin bir fonksiyonudur. Karmaşık

bir şekilde işlemin sıcaklığına ve yönüne bağlı olmasına rağmen, yaklaşık eğrilerin uygulanması burada ele alınan toplama seviyesinde tatmin edicidir. Bu tür eğriler literatürde sorpsiyon izotermleri olarak bilinmektedir [25]. Belirli koşullarda katıda bulunabilecek sıvı miktarının tayini için sorpsiyon kavramı kullanılır. Belirli bir sıcaklıkta malzemenin nem içeriği ile malzeme üzerinde su buharı-gaz karışımının bağıl nemi arasındaki ilişkiyi, başka bir deyişle malzemedeki sıvı miktarı ile gazdaki buhar basıncı arasındaki dengeyi gösteren eğriye sorpsiyon izotermi denir.

Lambert ve arkadaşlarının 1991 yılında yaptığı çalışmada [25], yün, sentetik ve dokuma pamuk kumaşlar için aktivasyon katsayıları eğrileri çıkarılmıştır. İlgili eğriler 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Farklı Tip Kumaşlar İçin Aktivasyon Katsayısının Değişimi [25]

3.2'de gösterilen eğrilerden yola çıkarak Lambert ve arkadaşlarının oluşturduğu aktivasyon katsayısı denklemi [25] denklem 3.6'de gösterilmektedir.

$$a = 1 - \frac{\beta X + \delta}{1 + \delta^{\gamma - x}} \tag{3.6}$$

Burada β, δ ve γ katsayı sabitidir. X ise çamaşır üzerindeki su miktarının birim kuru çamaşır miktarına oranı olarak belirtilmektedir. Lambert ve arkadaşlarının [25] yaptığı çalışmalar sonucunda β, δ ve γ katsayı sabitleri, sorpsiyon izotermleri eğrileri çıkartılarak, pamuk tipi tekstiller için sırasıyla 18,30 ve 2 olarak bulunmuştur.

Tambur içerisindeki kütle transfer katsayısı ve taşınım ısı transfer katsayısı arasındaki ilişki ise Yadav ve arkadaşlarının 2008 yılında yayınladığı makalede denklem 3.7'de gösterilmektedir [18].

$$k = \frac{h_c}{\mathrm{Le} * c_{p,hava,t} * \rho_b} \tag{3.7}$$

Burada h_c taşınım ısı transferi katsayısı, $C_{p,hava,t}$ tekstil yüzeyindeki havanın özgül ısı değeri, Le Lewis sayısı, ρ_{b} ise tambur içerisindeki su buharının yoğunluğudur.

Lewis sayısı ise denklem 3.8'de gösterilen formül ile hesaplanmaktadır [24]. Lewis sayısı Le, termal yayınımın kütle yayınımına oranı olarak tanımlanan boyutsuz bir sayıdır. Eşzamanlı ısı ve kütle transferinin olduğu sıvı akışlarını karakterize etmek için kullanılır.

$$\mathrm{Le} = \frac{\lambda_a}{\rho_h D_{im} c_{p,hava}} \tag{3.8}$$

Burada λ ısı iletim katsayısı, ρ_h yoğunluk, $\mathrm{D_{im}}$ hava su karışımının difüzyon katsayısı, Cp_{hava} ise özgül ısı olarak belirtilmiştir.

Isı Pompalı kurutma makinalarında spesifik nem alma hızı (SMER) aşağıda belirtilen denklem 3.9 ile hesaplanmaktadır.

$$SMER = \frac{\dot{m}_{\mathrm{hava,buh}}}{\dot{W}_{\mathrm{fan}} + \dot{W}_{\mathrm{tambur}} + \dot{W}_{\mathrm{kompresor}}} \tag{3.9}$$

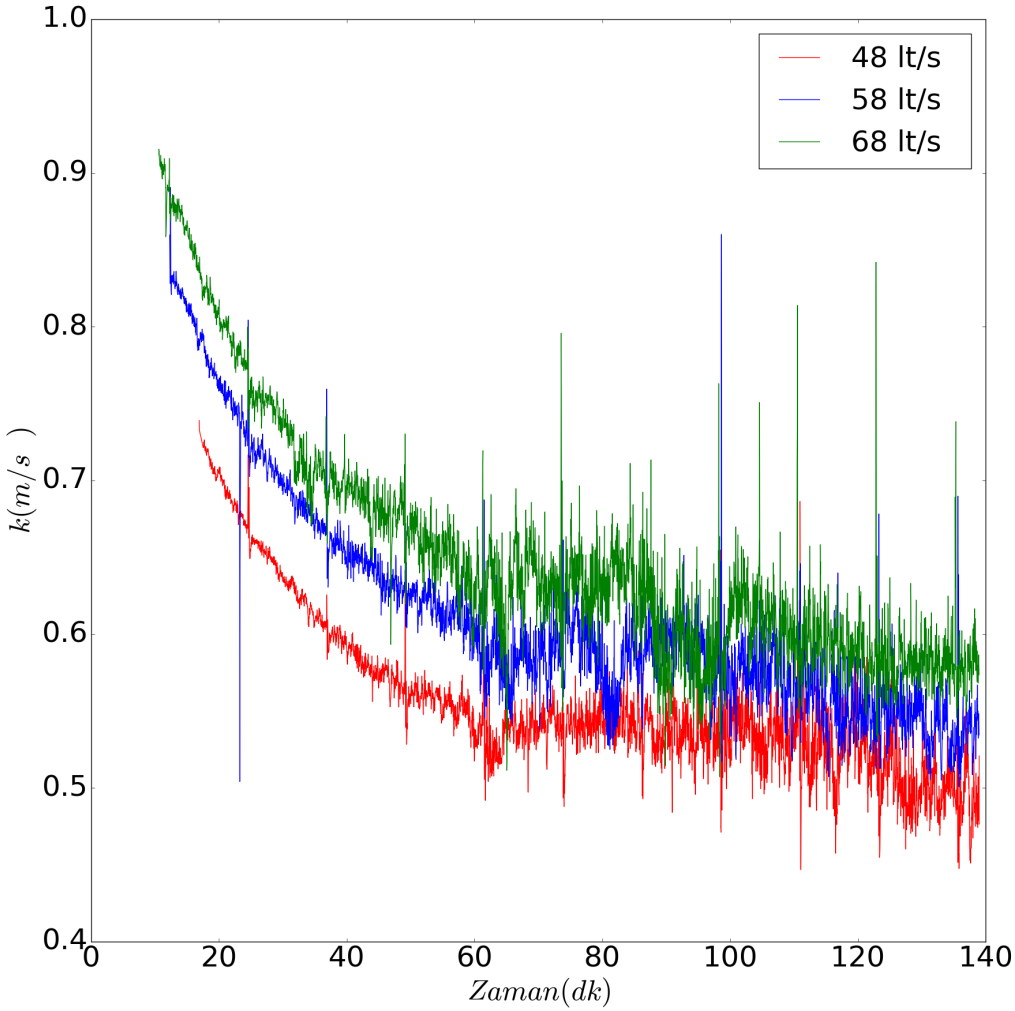
Burada spesifik nem alma hızı SMER, $\dot{W}_{\mathrm{fan}}$ hava debisini sağlayan fan motorunun çektiği güç, $\dot{W}_{\mathrm{tambur}}$ tamburu döndüren motorun çektiği güç, $\dot{W}_{\mathrm{kompresor}}$ ise ısı pompası sisteminde soğutma ve ısıtma kapasitesini yaratan kompresörün çektiği güç olarak verilmektedir.

Yukarıdaki yaklaşımlar ışığında tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı değerlerinin değişimi ve spesifik nem alma hızı (SMER), farklı yük tipi, hava debisi, tambur devri ve kompresör çalışma frekanslarında incelenmiştir.

3.3 Hava Debisi Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi

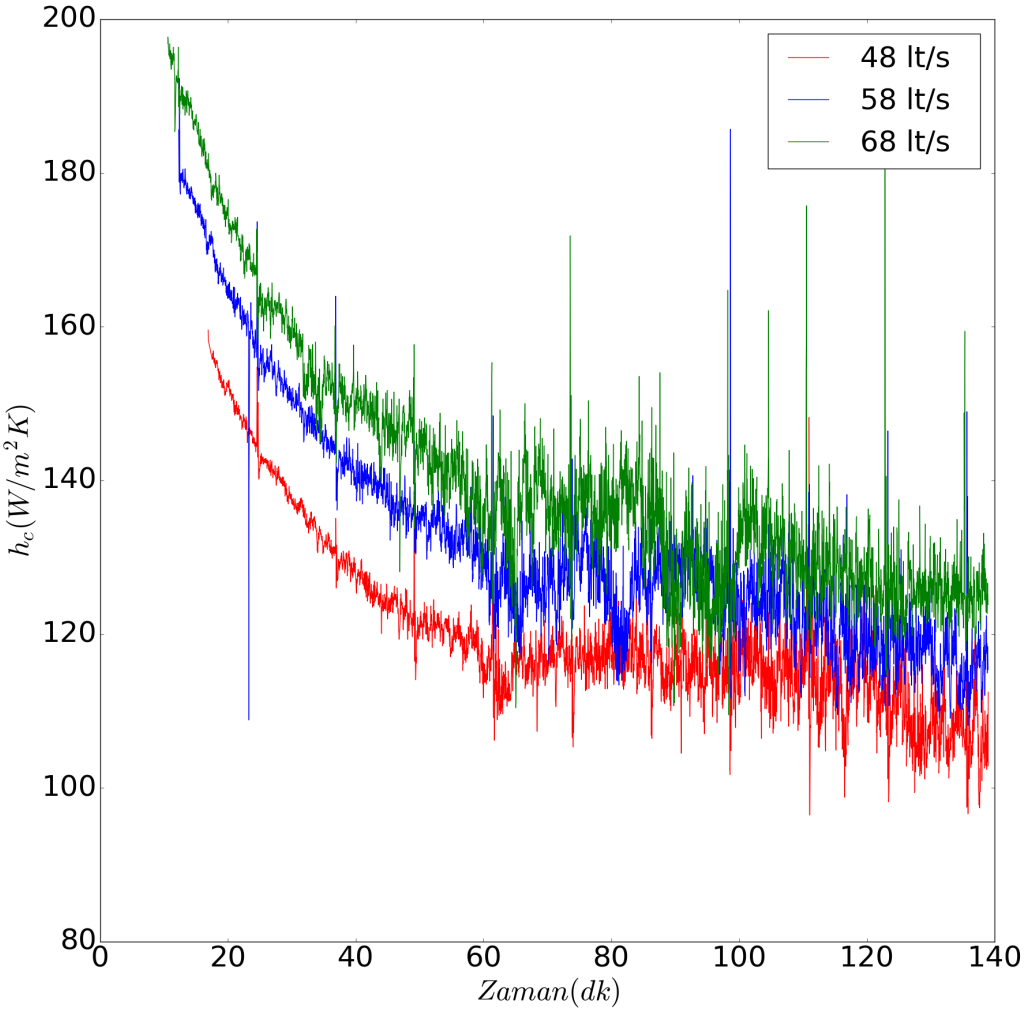
Kurulan deney düzeneğinde yapılan testlerde elde edilen sonuçlar doğrultusunda, Bölüm 3.2'de gösterilen yaklaşım uygulanarak, tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayılarının değişimi incelenmiştir.

Şekil 3.3'te hava debisi değişiminin tambur içerisindeki kütle transfer katsayısına etkisi gösterilmektedir. Hava debisinin etksini görmek için, kurutma kapasitesi 5 kg, kompresör çalışma frekansı 40 Hz, tambur devri 52 rpm'de sabit tutularak testler gerçekleştirilmiştir. Kurutmanın ilk 60 dakikasında hava debisi değişiminin tambur içerisindeki kütle transfer katsayısına olan etkisi daha net görülmektedir. Ancak kurutmanın 60. dakikasından itibaren çamaşırlar yüzeyindeki nemi kaybederek ağırlığını kaybetmiş, bunun sonucunda da yüzeyleri tambur içerisinde daha da açılarak



Şekil 3.3 Hava Debisi Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Transfer Katsayısına Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, d_{tambur}:52 rpm

havanın geçtiği yüzey alanı azaltmıştır. Bunun sonucunda da kütle transfer katsayısı üç farklı hava debisi koşulu için de kurutmanın 60. dakikasından itibaren lineer bir seviyeye ulaşmıştır. Bununla birlikte çevrimin sonuna kadar hava debisine bağlı olarka kütle transfer katsayısının değişimi ayırt edilebilmektedir. En yüksek kütle transfer katsayısına 68 lt/s hava debisinde ulaşılmıştır.



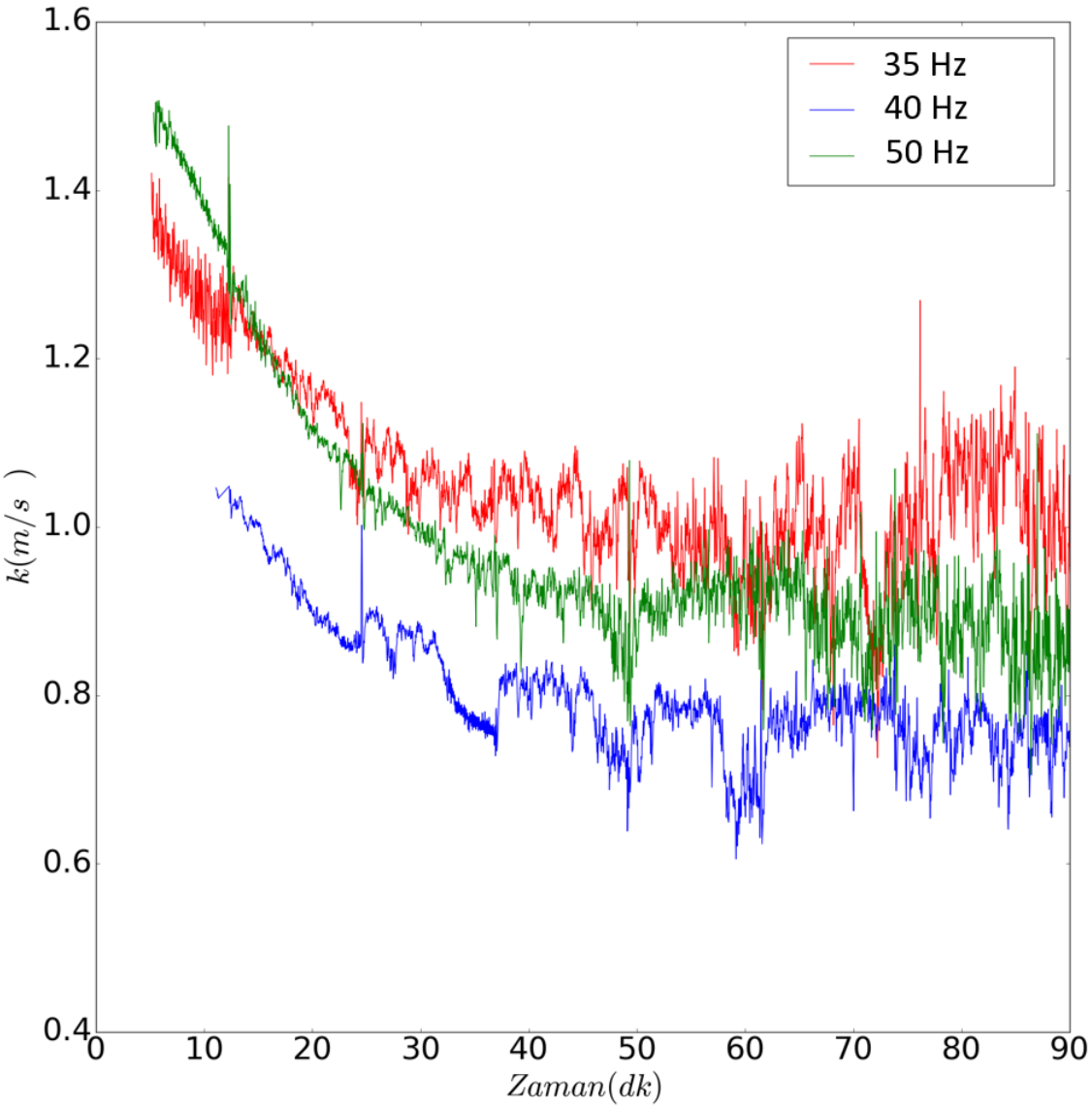
Şekil 3.4 Hava Debisi Değişiminin Tambur İçindeki Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, d_{tambur}:52 rpm

Şekil 3.4'te hava debisi değişiminin tambur içerisindeki ısı transfer katsayısına olan etkisi gösterilmektedir. Kütle transfer katsayısı değişimine paralel olarak taşınım ısı transfer katsayısı değişiminde de hava debisinin artması, taşınım ısı transfer katsayısının da artmasına neden olmuştur.

3.4 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Tambur İçerisindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi

Şekil 3.5'de kompresör çalışma frekansı değişiminin tambur içerisindeki kütle transfer katsayısı değeri değişimine olan etkisi gösterilmektedir.

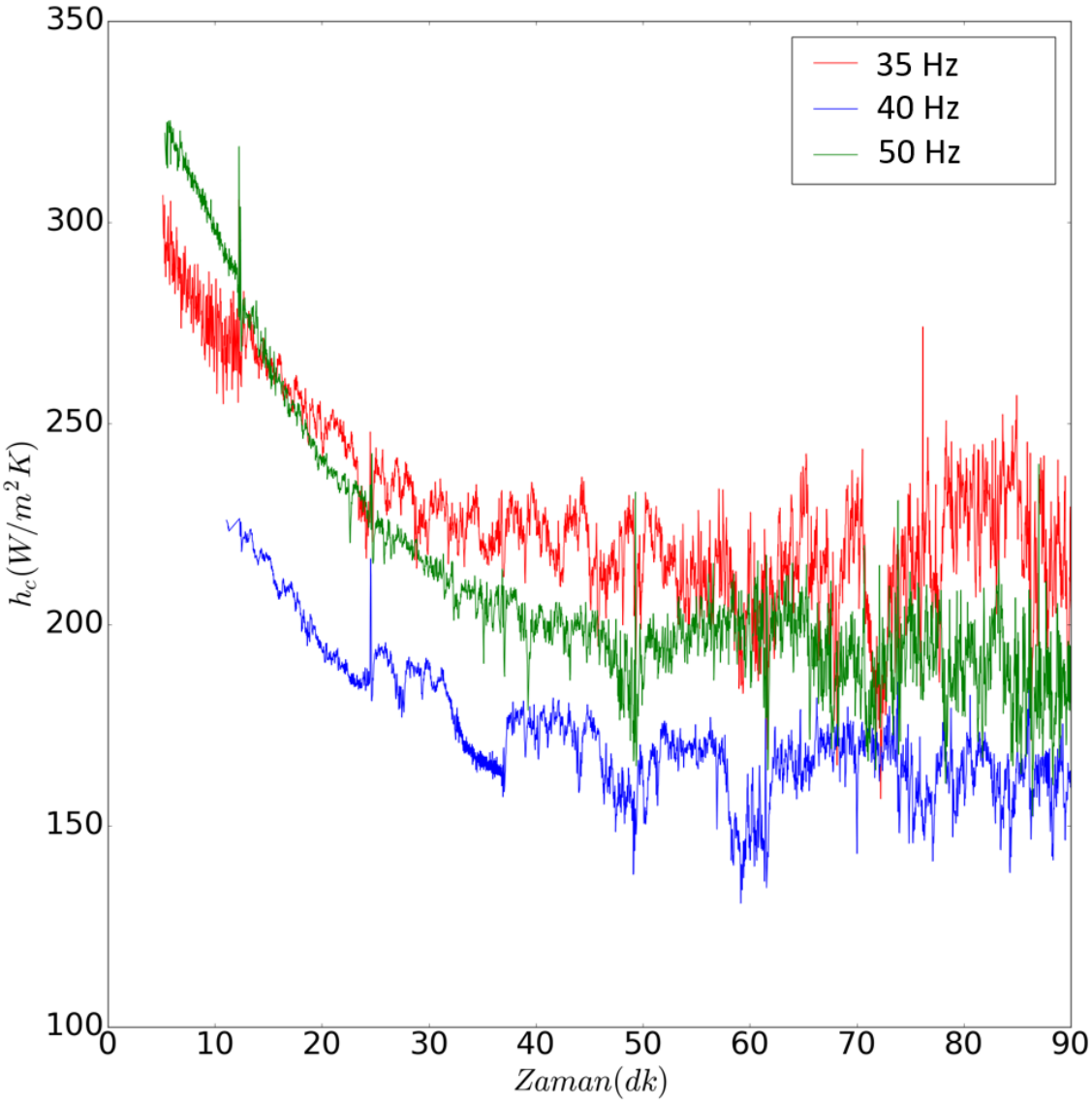
Kompresör çalışma frekansı, ısı pompalı kurutma sistemlerinde buharlaştırıcı ve



Şekil 3.5 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Transfer Katsayısına Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, d_{tambur}:62 rpm, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:68 lt/s

yoğuşturucu çalışma sıcaklıklarına ve soğutkanın ısı değiştiriciler içerisindeki debi ve doluluk oranına doğrudan etki etmektedir. Kurutma fazının ilk 10 dakikasında en yüksek kütle transfer katsayısına, kompresör çalışma frekansı değeri 50 Hz olduğunda ulaşılmıştır. Çevrimin 10. dakikasından itibaren ise tambur içerisindeki kütle transfer katsayısı değerinin en yüksek olduğu değerlere kompresör çalışma frekansı değerinin 35 Hz olduğu koşulda ulaşılmıştır. En düşük kütle transfer katasayısına ise kompresör çalışma frekansı değeri 40 Hz olduğu koşulda ulaşılmıştır.

Şekil 3.6'da kompresör çalışma frekansı değişiminin tambur içerisindeki taşınım ısı transfer katsayısına etkisi gösterilmektedir. Kütle transfer katsayısına paralel olarak kurutma çevriminin ilk 10 dakikasında en yüksek taşınım ısı transfer katsayısı değerine kompresör çalışma frekansının 50 Hz olduğu koşulda ulaşılmış, 10. dakikadan sonra

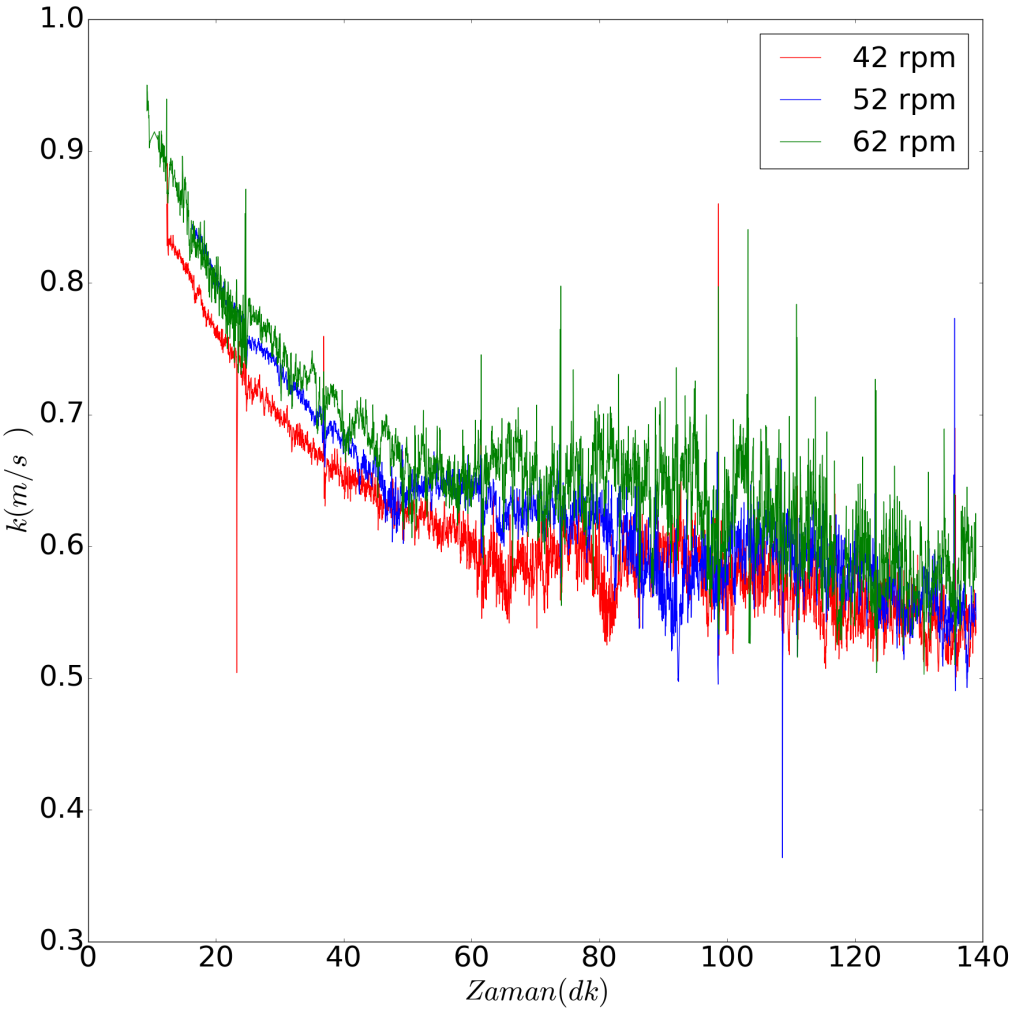


Şekil 3.6 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Tambur İçindeki Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, d_{tambur}:62 rpm, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:68 lt/s

ise en yüksek taşınım ısı transfer katsayısı değerine kompresör çalışma frekansı 35 Hz olduğu test koşulunda ulaşılmıştır. En düşük taşınım ısı transfer katsayısı değerine ise kompresör çalışma frekansının 40 Hz olduğu koşulda ulaşılmıştır.

3.5 Tambur Devir Değişiminin Tambur içindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi

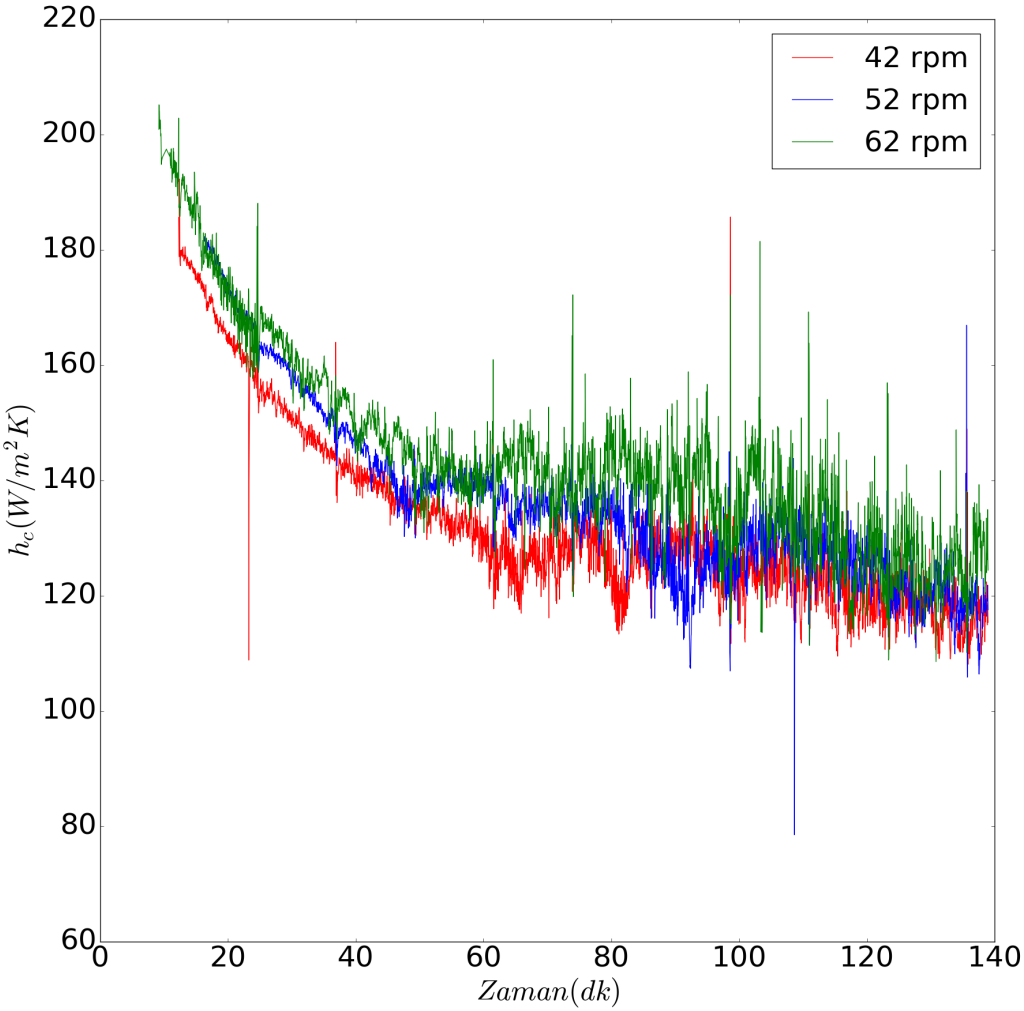
Şekil 3.7'de tambur devir değişiminin tambur içerisindeki kütle transfer katsayısına olan etkisi gösterilmektedir. Tambur devrinin etkisinin net olarak belirlenebilmesi için kurutma hava debisi 58 lt/s, kompresör çalışma frekansı 40 Hz ve yük kapasitesi 5 kg'da sabit tutularak testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7 Tambur Devir Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Transfer Katsayısına Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg

42 rpm, 52 rpm ve 62 rpm olarak üç farklı tambur devrinde testler gerçekleştirilmiştir. Üç farklı koşul için kütle transfer katsayıları birbirine yakın olsa da en yüksek kütle transfer katsayısına 62 rpm tambur devrinde ulaşılmıştır. Tambur devri çamaşırların kurutma makinası içerisindeki dağılımına doğrudan etki etmektedir. Düşük tambur devirlerinde çamaşırlar literatürde bilinen kayma hareketini gerçekleştirir. Bu hareket içerisinde çamaşırların tambur içerisindeki hareketi sınırlıdır. Bunun sonucunda da tambur içerisindeki kütle transfer katsayısı en düşük seviyeye 42 rpm tambur devrinde ulaşmıştır.

Şekil 3.8'de tambur devir değişiminin tambur içerisindeki taşınım ısı transfer katsayısına olan etkisi gösterilmektedir. Kütle transfer katsayısına benzer olarak en yüksek taşınım ısı transfer katsayısına 62 rpm tambur devrinde ulaşılmıştır. Kurutma

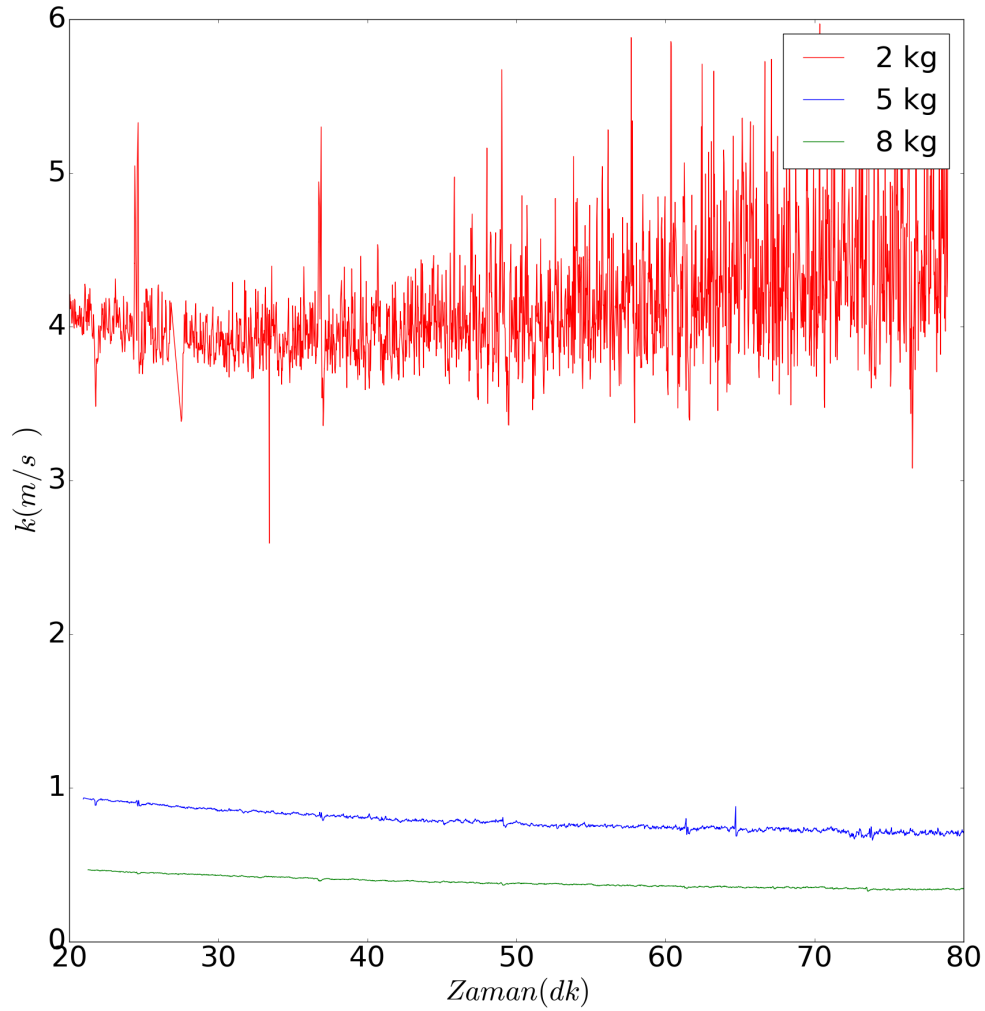


Şekil 3.8 Tambur Devir Değişiminin Tambur İçindeki Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg

çevriminin 60 ile 140. dakikaları arasında taşınım ısı transfer katsayıları her üç tambur devri içinde birbirine çok yakındır.

3.6 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Tambur içindeki Kütle Ve Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi

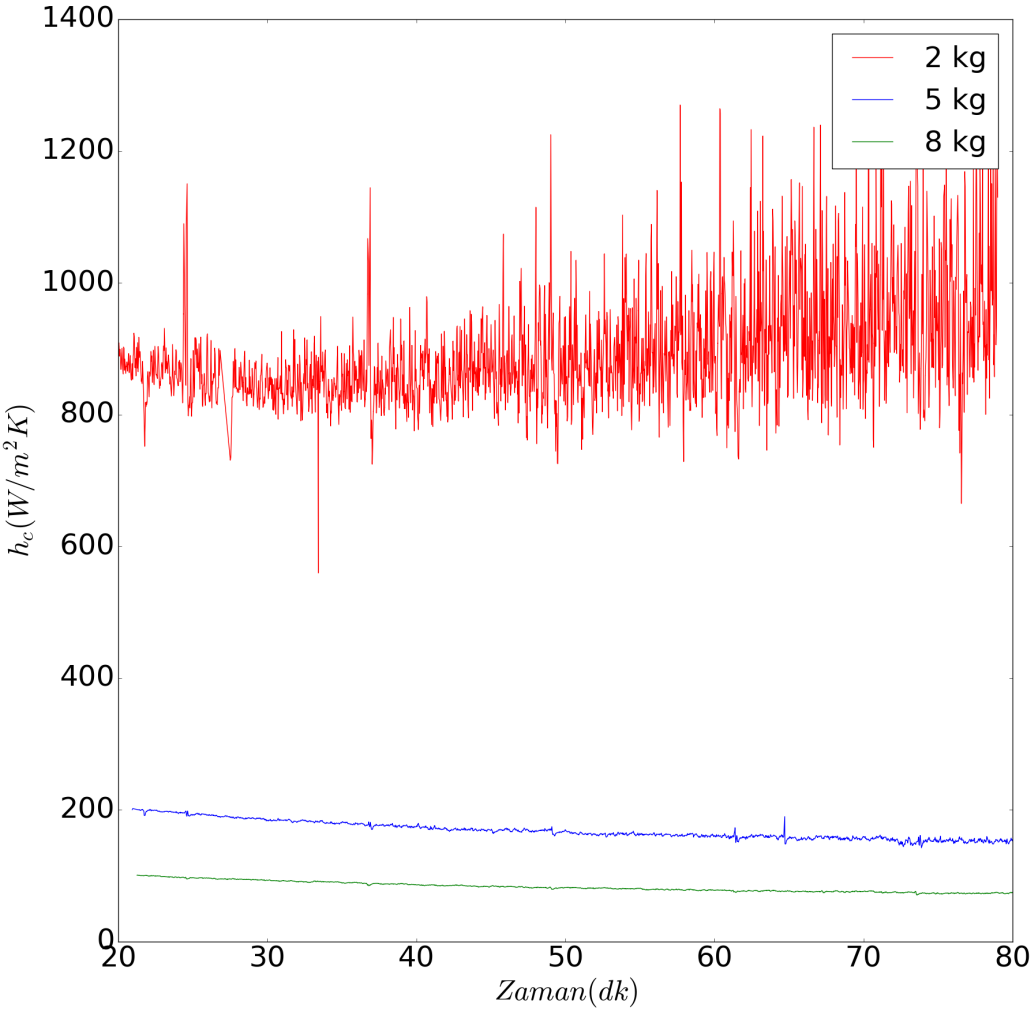
Şekil 3.9'da kurutma kapasitesi değişiminin tambur içerisindeki kütle transfer katsayısına olan etkisi gösterilmiştir. Kurutma kapasitesinin kütle transferine olan etkisini incelemek için yapılan testlerde, hava debisi 58 lt/s, tambur devri 42 rpm, kompresör çalışma frekansı 35 Hz'de sabit tutularak testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Tambur İçindeki Kütle Transfer Katsayısına Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, d_{tambur}:42 rpm, $f_{\text{kompresor}}$:35 Hz

Kurutma kapasitesinin kütle transfer katsayısına doğrudan etki ettiği görülmektedir. En yüksek kütle transfer katsayısına kurutma kapasitesi 2 kg olduğu durumda ulaşılmıştır. Birim tambur hacmi içerisinde kurutulacak çamaşırların kapasitesinin değişimi kütle ve taşınım ısı transfer katsayısına doğrudan etki etmektedir. Kurutma hava debisi düşük kurutma kapasitelerinde tekstil yüzeyine daha çok nüfuz ettiği için birim zamanda tekstil üzerindeki etkileşimi daha fazla olmaktadır. Kurutma kapasitesi arttıkça kütle transfer katsayısının da radikal olarak azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük kütle transfer katsayısı değerine 8 kg kurutma kapasitesinde ulaşılmıştır.

Şekil 3.10'da kurutma kapasitesi değişiminin tambur içerisindeki taşınım ısı transfer katsayısına etkisi gösterilmiştir. Kütle transfer katsayısına paralel olarak kurutma kapasitesinin 2 kg olduğu durumda tambur içerisindeki taşınım ısı transfer katsayısı

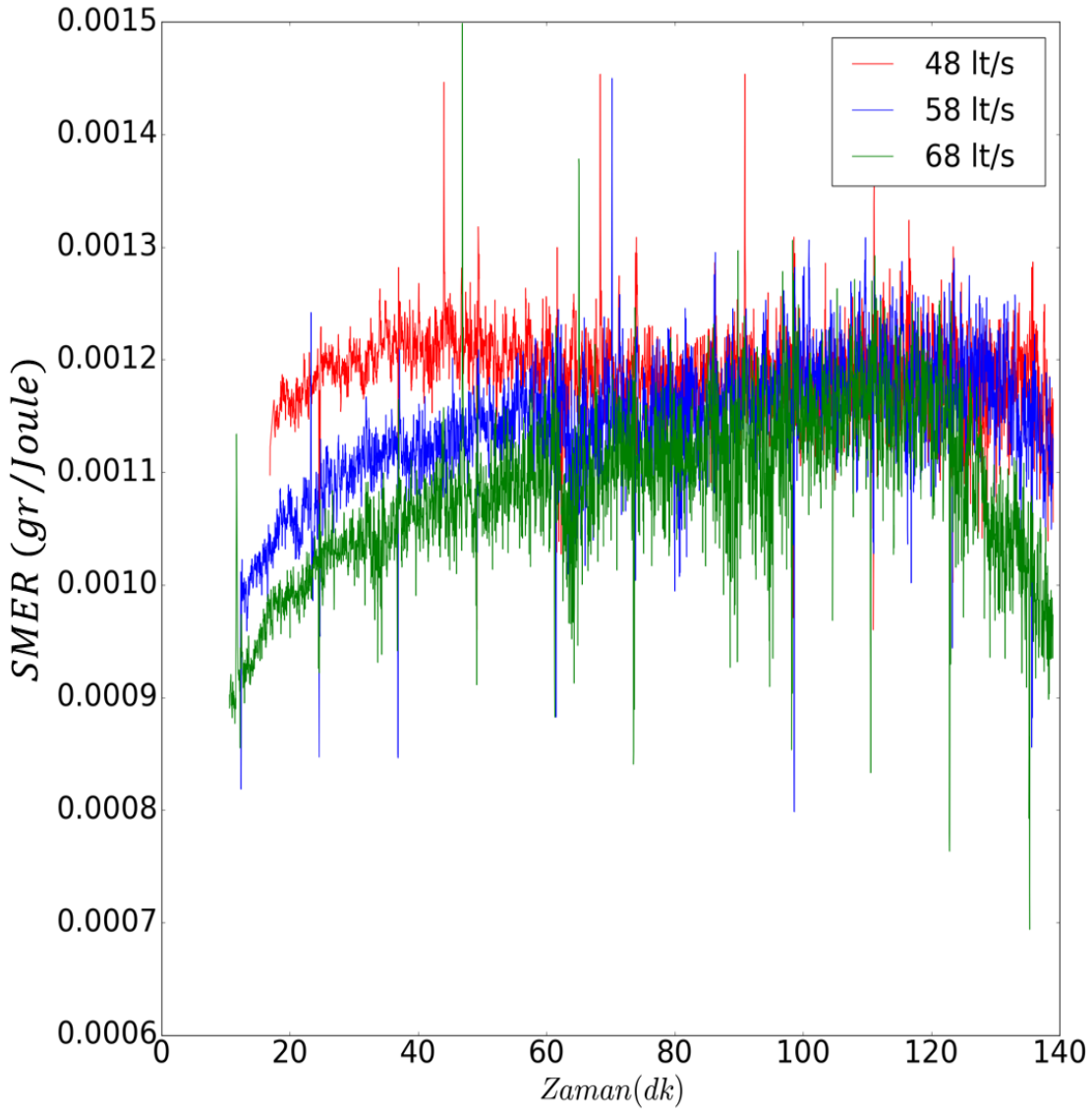


Şekil 3.10 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Tambur İçindeki Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, d_{tambur}:42 rpm, $f_{\text{kompresor}}$:35 Hz

değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. En düşük taşınım ısı transfer katsayısına ise 8 kg kurutma kapasitesinde ulaşılmıştır.

3.7 Hava Debisi Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi

Şekil 3.11'de hava debisi değişiminin kurutma sistemi spesifik nem alma hızına olan etkisi gösterilmektedir. Hava debisinin spesifik nem alma oranına olan etksini görmek için, kurutma kapasitesi 5 kg, kompresör çalışma frekansı 40 Hz, tambur devri 52 rpm'de sabit tutularak testler gerçekleştirilmiştir.

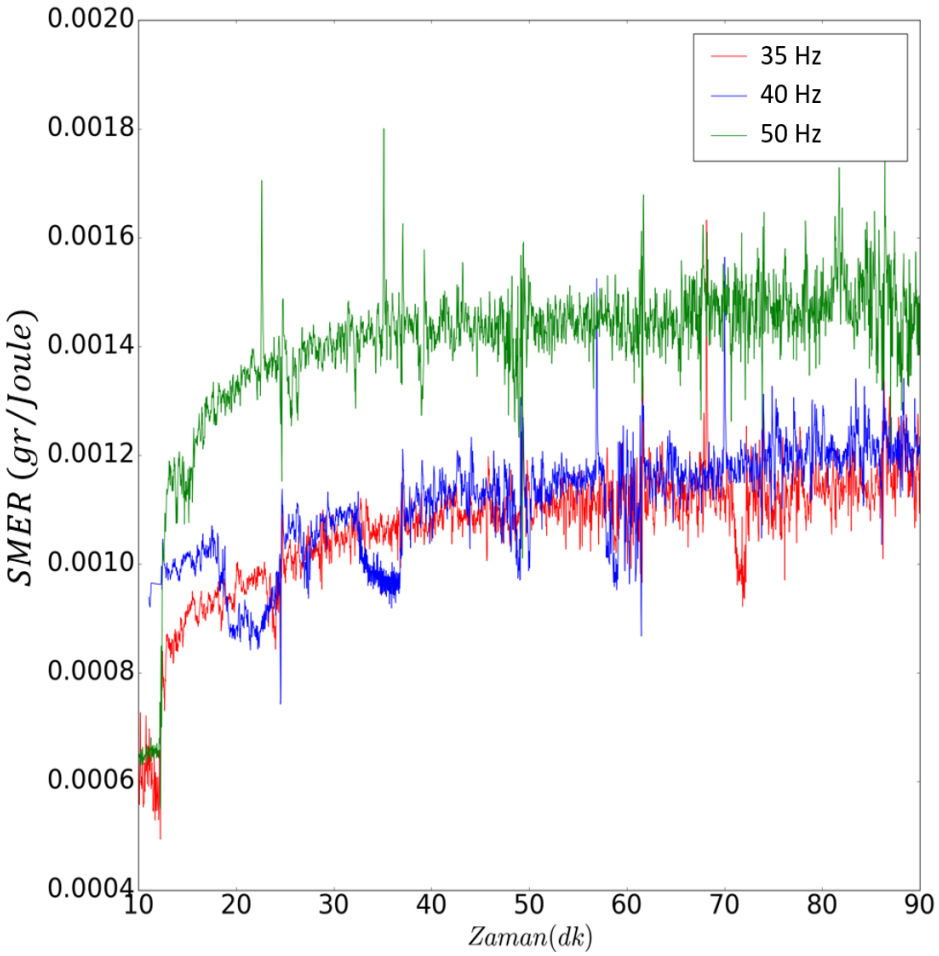


Şekil 3.11 Hava Debisi Değişiminin Spesifik Nem Alma Oranına (SMER) Olan Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, d_{tambur}:52 rpm

Kurutma çevriminin başlangıcından bitişine kadar geçen sürede hava debisinin 48 lt/s olduğu koşulda en iyi SMER değerine ulaşılmıştır. Kurutmanın ilk 60 dakikalık periyodunda hava debisine bağlı olarak SMER değeri %30 farklılık gösterirken 60. dakika sonrasında SMER değerinin hava debisine bağlı olarak değişimi 3 farklı koşul için de benzerdir. Kurutmanın son fazında (120. dk ve sonrası) 68 lt/s hava debisi değerinde SMER değerinin ciddi azalış gösterdiği görülmektedir. Kurutma çevrim sonlarında tekstilin iç yüzeyindeki nemin uzaklaştırılması sırasında hava debisinin yarattığı etki, hava debisini oluşturmak için harcanan fan gücüne kıyasla daha az olması sebebiyle SMER değerinde düşüş gözlemlenmiştir.

3.8 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi

Şekil 3.12'de kompresör çalışma frekansı değişiminin spesifik nem alma oranına olan etkisi incelenmiştir. Kompresör devrinin SMER değerine olan etkisini görmek için yapılan testlerde kurutma kapasitesi 5 kg, hava debisi 68 lt/s, tambur devri 62 rpm'de sabit tutularak testler gerçekleştirilmiştir.

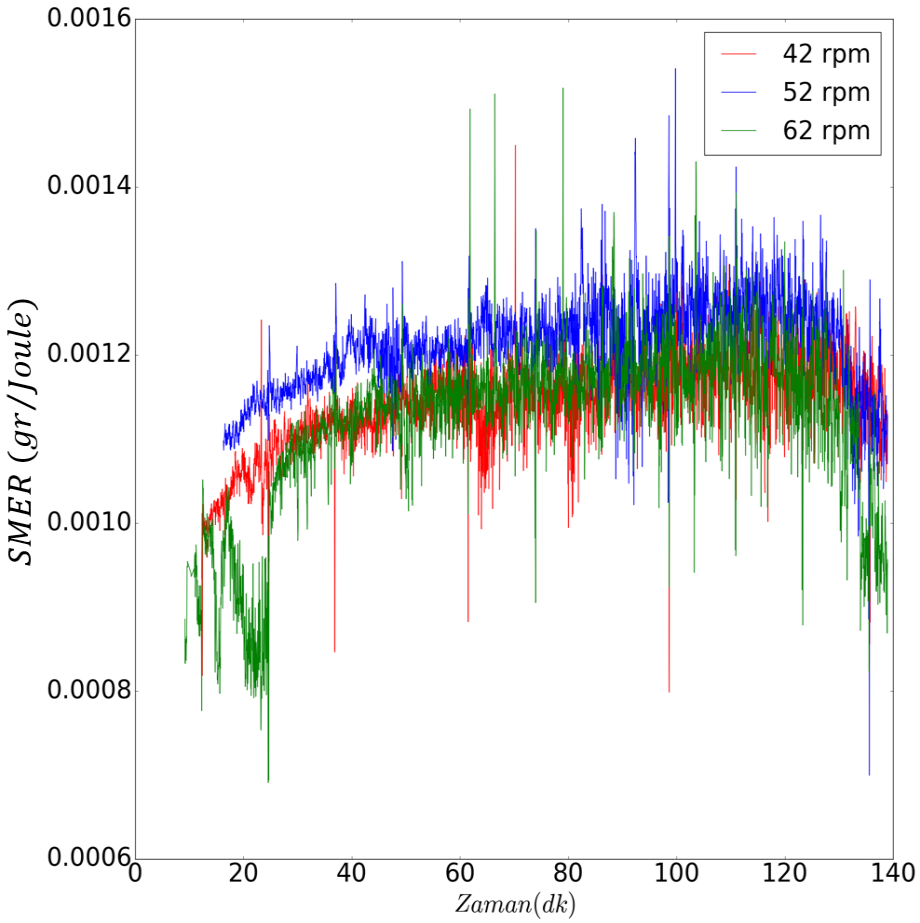


Şekil 3.12 Kompresör Çalışma Frekansı Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:68 lt/s, d_{tambur}:62 rpm

Kurutma çevriminin 90 dakikalık periyodu içerisinde en yüksek SMER değerine kompresör çalışma frekansının 50 Hz olduğu koşulda ulaşılmıştır. 35 ve 40 Hz kompresör çalışma frekanslarında benzer SMER değerleri elde edilmiştir. Yüksek kompresör çalışma frekanslarında sistem fazla güç tüketimi gerçekleştirse de birim nem alma hızındaki pozitif etkisi sebebiyle en yüksek SMER değerine 50 Hz'de ulaşılmasına sebep olmuştur.

3.9 Tambur Devir Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi

Şekil 3.13'te tambur devir değişiminin spesifik nem alma hızına olan etkisi gösterilmiştir. Tambur devrinin etkisinin SMER değerine olan etkisini incelemek için kurutma hava debisi 58 lt/s, kompresör çalışma frekansı 40 Hz ve yük kapasitesi 5 kg'da sabit tutularak testler gerçekleştirilmiştir.

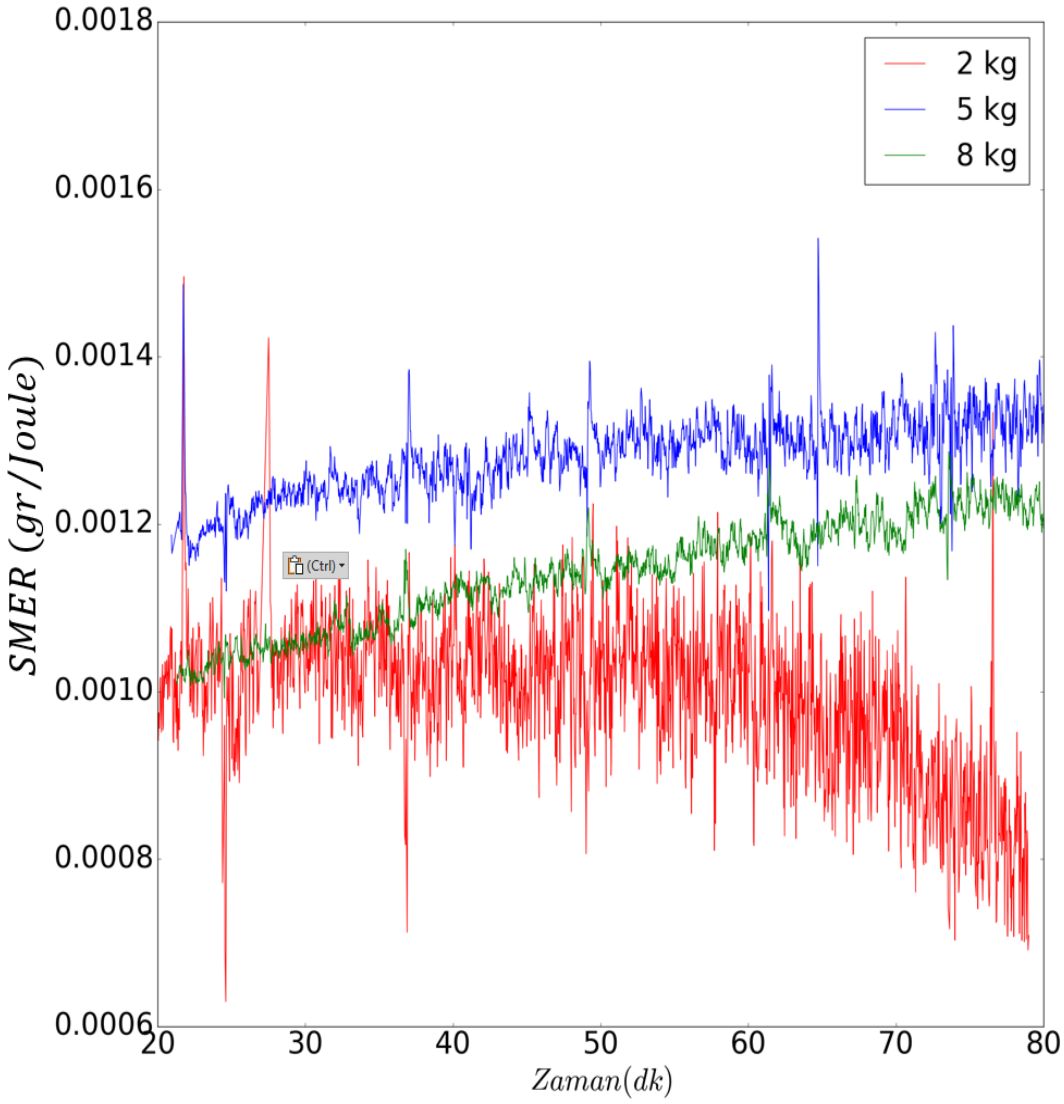


Şekil 3.13 Tambur Devir Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz, $m_{\text{çamaşır}}$:5 kg

Kurutma çevriminin tüm fazlarında en yüksek SMER değerine tambur devri 52 rpm olduğunda ulaşılmıştır. 42 rpm ve 62 rpm tambur devirlerinde SMER değerleri benzer olarak görülmektedir.

3.10 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi

Şekil 3.14'te kurutma kapasitesinin spesifik nem alma oranına olan etkisi gösterilmekteidir. Kurutma kapasitesinin SMER değerine etkisini görmek için yapılan testlerde hava debisi 58 lt/s, tambur devri 42 rpm, kompresör çalışma frekansı 35 Hz de sabit tutulmuştur.



Şekil 3.14 Kurutma Kapasitesi Değişiminin Spesifik Nem Alma Hızına (SMER) Olan Etkisi, $\dot{Q}_{\text{hava}}$:58 lt/s, d_{tambur}:42 rpm, $f_{\text{kompresor}}$:40 Hz

Yapılan deneyler sonucunda en yüksek SMER değerine kurutma kapasitesinin 5 kg olduğu durumda ulaşılmıştır. En düşük SMER değeri ise 2 kg kurutma kapasitesinde görülmüştür.

4
İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYON MODELİ OLUŞTURULMASI

Yapılan deneyler sonucunda kurutma sisteminde tambur içerisindeki ısı ve kütle transfer katsayısı, spesifik nem alma oranı, kurutma kapasitesi, hava debisi, kompresör çalışma frekansı ve tambur devri değişimine göre incelenmiştir. Her bir parametrenin kütle ve taşınım ısı transfer katsayısına ve spesifik nem alma oranına olan etkisinin parametrik olarak incelenmesi, taşınım ısı transfer katsayısı, kütle transfer katsayısı ve spesifik nem alma oranının yarı ampirik modellenmesi için istatistiksel analiz yöntemlerinin kullanılması hedeflenmiştir.

Mühendis, toplumu ilgilendiren problemleri bilimsel ilkeler ışığında verimli uygulama yoluyla çözen kişidir. Mühendisler bu problemleri mevcut bir ürünü geliştirerek veya süreç geliştirerek çözer. Mühendislik veya bilimsel yöntem bu problemlerin formülize edilmesi ve çözülmesi yaklaşımıdır.

Mühendislik yaklaşımı,

- Problemin açık ve özlü bir tanımını geliştirmek,
- Problemi etkileyen ve etkileyebilecek önemli faktörleri belirlemek,
- Belirli sınırlar çerçevesinde bilimsel veya mühendislik bilgisini kullanarak problem için bir model önermek,
- Modele uygun deneyler yapmak ve problemi sonuca ulaştıracak dataları test etmek veya doğrulamak için veri toplamak,
- Kurulan modeli, gözlemlenen verilere göre optimize etmek,
- Problem çözümüne dayalı olarak sonuçları çıkarmak ve önerilerde bulunmak,

olarak Montgomery ve arkadaşları tarafından belirtilmiştir [26].

İstatistiksel analiz için izlenen yöntem, lineer regresyon modeli olarak belirlenmiştir. Lineer regresyon modeli, yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin, hedeflenen çıktı üzerine etkilerini tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır.

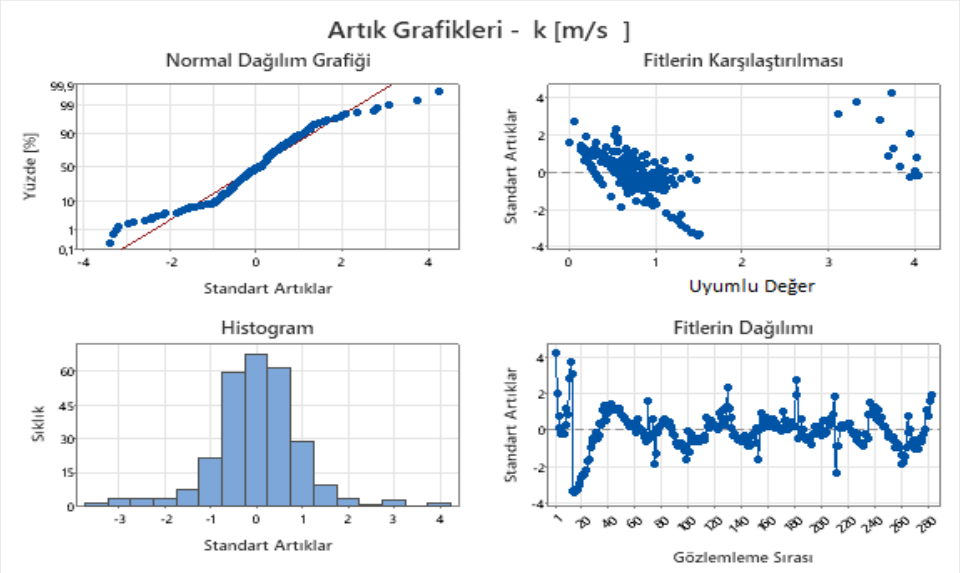
Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan modelin doğruluğundan emin olmak için,

- Deney matrisinde elde edilen verilerin normal dağılımı, sağlayıp, sağlayamadığı,
- Hipotez testleri ve P değeri yaklaşımı,
- Değişkenlerin (Varyansların) analizi,
- Artıkların analizi,
- Modelin kontrolü,

aşamalarından geçirilmiştir. Deney tasarımından çıkan sonuçlar doğrultusunda tambur içerisindeki ısı ve kütle transfer katsayıları, Spesifik nem alma hızı (SMER) yarı ampirik olarak modellenmiştir. Yarı ampirik modellerin kapsadığı sınır şartları, $2kg \leq m_{\text{çamaşır}} \leq 8kg, 48lt/s \leq Q_{hava} \leq 68lt/s, 35Hz \leq f_{\text{kompresor}} \leq 50Hz, \%20 \leq RH_{hava,g} \leq \%60, 296K \leq T_{hava,g} \leq 338K$ olarak belirlenmiştir.

4.1 Kütle Transfer Katsayısının Yarı Ampirik Modelinin Oluşturulması

Isı pompalı kurutma sistemlerinde tambur içerisinde kütle transferine etki eden parametrelerin, etki oranlarının belirlenmesi ve kütle transfer katsayısının yarı ampirik modellenmesi için lineer regresyon modeli uygulanmıştır.



Şekil 4.1 Kütle Transfer Katsayısı Modeli Artık Grafikleri

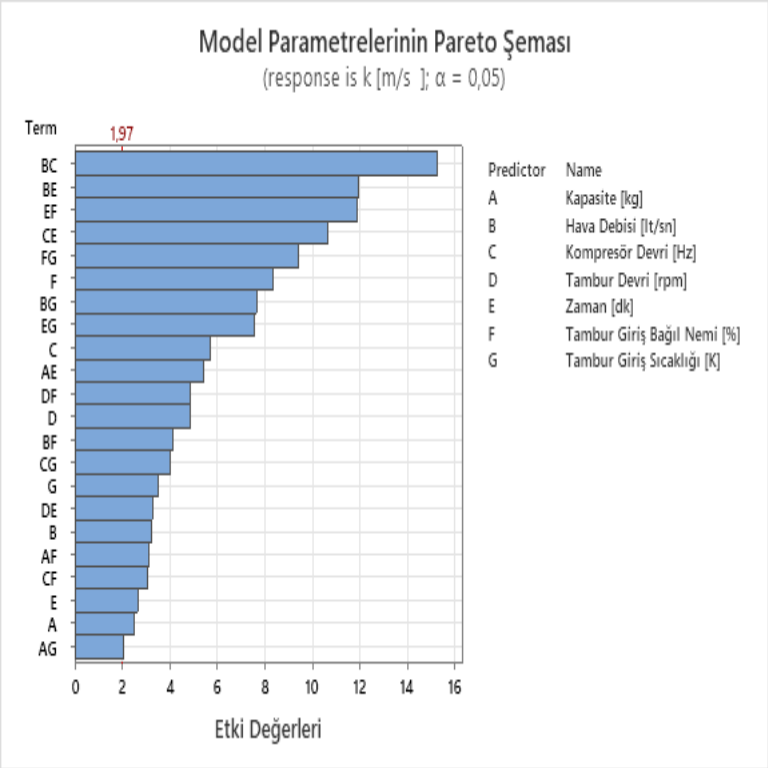
Şekil 4.1'de kütle transfer katsayısı için kurulan modelin artık analizleri gösterilmektedir. Normal dağılım grafiğinde p değerinin 0.05 değerinden büyük olması ve standart artıkların dağılımı homojen olarak görüldüğü için kurulan modelin anlamlı olduğu görülmüştür.

Tablo 4.1 Modelin Doğruluğu

Standart Sapma	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.183	94.24%	93.76%	92.53%

Tablo 4.1'de modelin R kare değerinin %94.24, standart sapma değerinin ise 0,183 olduğu görülmektedir.

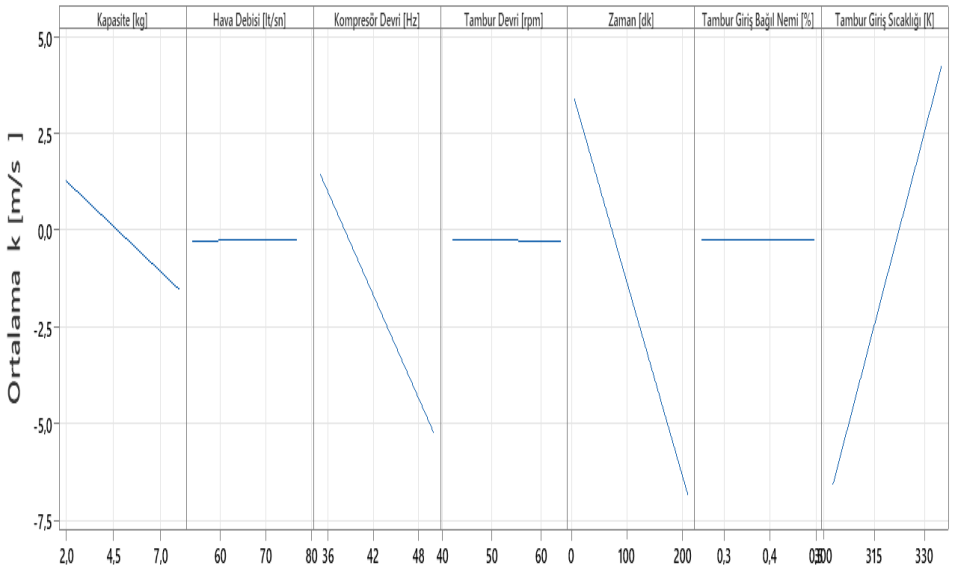
Kütle transfer katsayısına etki eden parametrelerin pareto şeması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Kütle Transfer Katsayısına Etki Eden Paremetrelerin Pareto Şeması

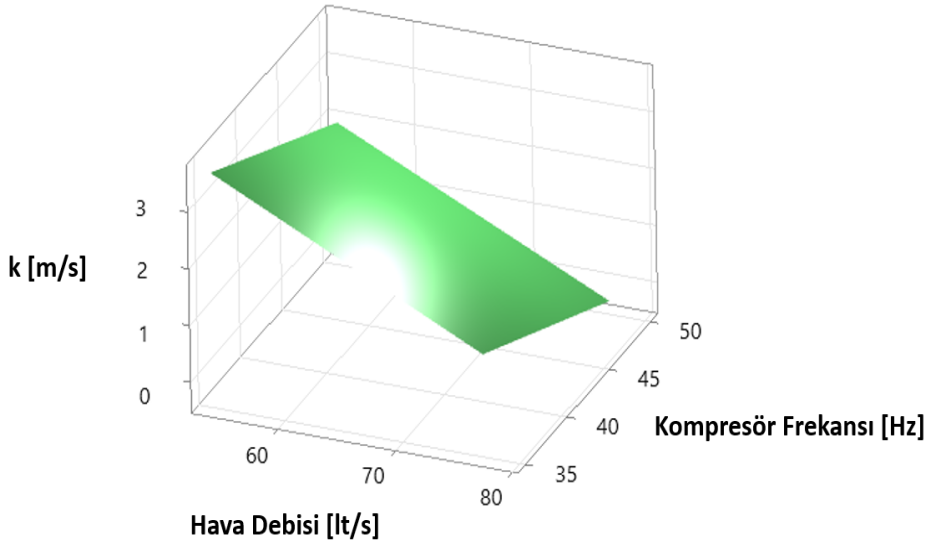
Isı pompalı kurutma makinelerinde tambur içi kütle transfer katsayısına etki eden en önemli üç faktör, hava debisi ve kompresör çalışma frekansının ikili etkileşimi, hava debisi ve program süresinin ikili etkileşimi, program süresi ve tambur giriş bağıl nemi olarak görülmektedir. Yapılan model sonucunda elde edilen yarı ampirik formül denklem 4.1'de gösterilmiştir.

$$k = 243.2 - 8.76 * m_{çamaşır} + 0.995 * Q_{hava} - 4.671 * f_{kompresor} - 0.1933 * d_{tambur} - 0.1978 * t - 645.8 * RH_{hava,g} - 0.521 * T_{hava,g} + 0.00339 * m_{çamaşır} * t + 6.80 * m_{çamaşır} * RH_{hava,g} + 0.01778 * m_{çamaşır} * T_{hava,g} + 0.03033 * Q_{hava} * f_{kompresor} + 0.002378 * Q_{hava} * t - 0.617 * Q_{hava} * RH_{hava,g} - 0.006678 * Q_{hava} * T_{hava,g} - 0.006731 * f_{kompresor} * t - 0.639 * f_{kompresor} * RH_{hava,g} + 0.00895 * f_{kompresor} * T_{hava,g} + 0.000279 * d_{tambur} * t + 0.5 * d_{tambur} * RH_{hava,g} - 0.8236 * t * RH_{hava,g} + 0.001531 * t * T_{hava,g} + 2.226 * RH_{hava,g} * T_{hava,g}$$
(4.1)



Şekil 4.3 Kütle Transfer Katsayısına Etki Eden Ana Parametreler

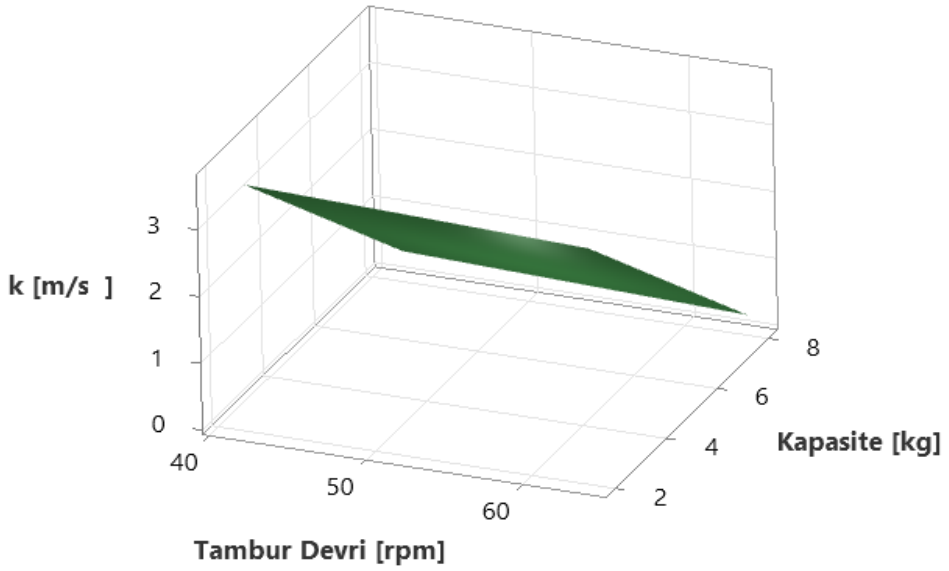
Şekil 4.3'te kütle transfer katsayısına etki eden ana parametreler gösterilmiştir. Kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi ve tambur giriş sıcaklığının kütle transfer katsayısına etkisi, hava debisi, tambur devri ve tambur girişindeki bağıl nem değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 Hava Debisi ve Kompresör Çalışma Frekansının Kütle Transfer Katsayısına Olan Etkisi, $m_{çamaşır} : 5kg, d_{tambur} : 52rpm, t : 77.dk, T_{hava,g} : 321K, RH_{hava,g}$:%33

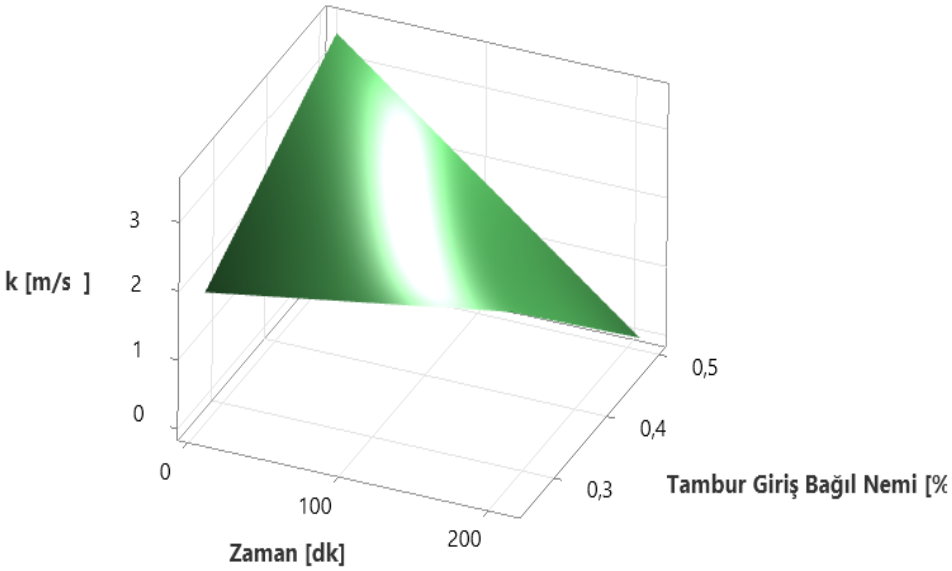
Şekil 4.4'te hava debisi ve kompresör çalışma frekansının kütle transfer katsayısına olan etkisinin yüzey grafiği gösterilmektedir. Grafiğin oluşturulması için kurutma kapasitesi 5kg, tambur devri 52 rpm, kurutma dakikası 77, tambur giriş bağıl nem değeri % 33, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur. Grafikte de görüldüğü üzere hava debisi arttıkça kütle transfer katsayısında azalma görülmektedir.

Kompresör çalışma frekansı değişiminde de kompresör çalışma frekansı azaldıkça kütle transfer katsayısı değerinde azalma görülmektedir.



Şekil 4.5 Tambur Devri ve Kurutma Kapasitesinin Kütle Transfer Katsayısına Olan Etkisi, Q_{hava} : $64 lt/s, f_{kompresor}$: $35 Hz, t$: $77.dk, T_{hava,g}$: $321 K, RH_{hava,g}$:%33

Şekil 4.5'te tambur devri ve kurutma kapasitesinin kütle transfer katsayısına olan etkisi yüzey grafiği ile gösterilmiştir. Grafiğin oluşturulması için hava debisi 64 lt/s, kompresör frekansı 35 Hz, kurutma dakikası 77, tambur giriş bağıl nem değeri % 33, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur. Tambur devri değişimi kütle transfer katsayısı üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmasa da kurutma kapasitesinin artmasıyla kütle transfer katsayısında anlamlı bir düşüş gözlemlenmektedir.

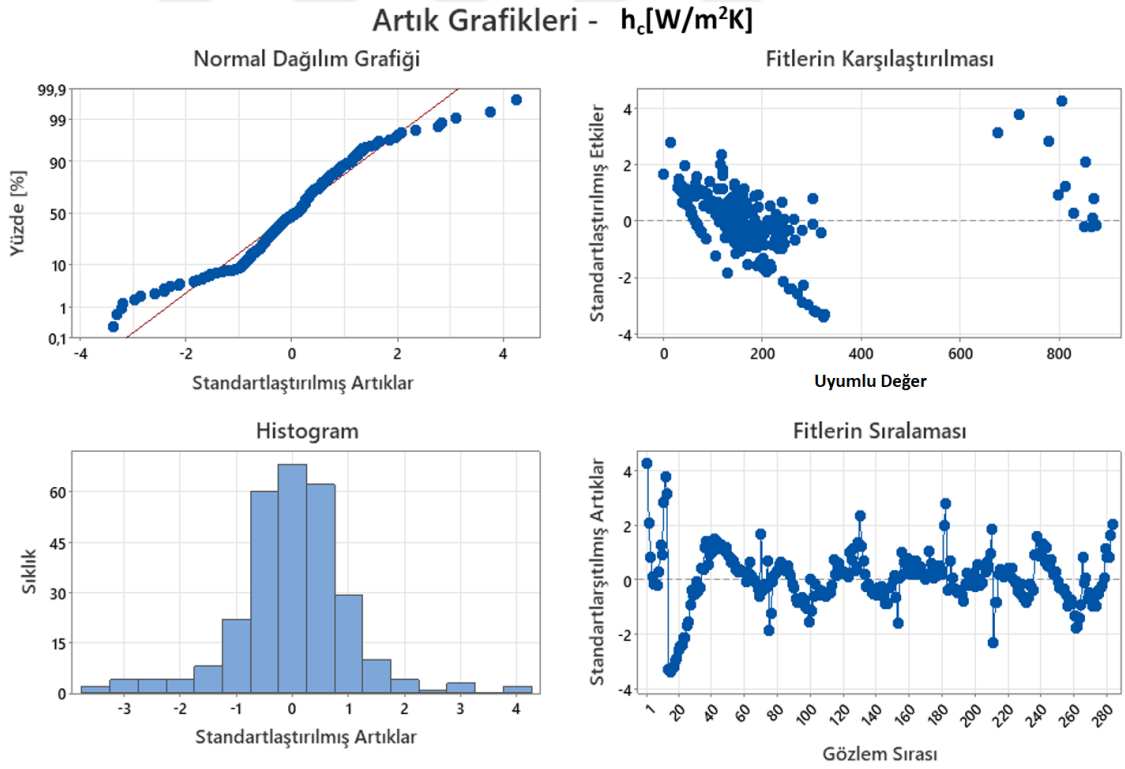


Şekil 4.6 Program Süresi ve Tambur Giriş Bağıl Nem Değerinin Kütle Transfer Katsayısına Olan Etkisi, Q_{hava} : $64 lt/s, f_{kompresor}$: $35 Hz, m_{çamaşır}$: $5 kg, d_{tambur}$: $52 rpm$

Şekil 4.6'da program süresi ve tambur giriş bağıl nem değerinin kütle transfer katsayısına olan etkisi yüzey grafiği ile gösterilmiştir. Grafiğin oluşturulması için hava debisi 64 lt/s, kurutma kapasitesi 5 kg, kompresör frekansı 35 Hz, tambur devri 52 rpm, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur. En yüksek kütle transferi katsayısına programın başlangıcında ve tambur giriş bağıl nem değerinin % 50 olduğu durumda görülmüştür. Tambur girişindeki bağıl nem değeri arttıkça kütle trasnfer katsayısının arttığı, program süresi değişiminde ise kütle transfer katsayısının benzer değerlerde kaldığı görülmüştür.

4.2 Taşınım Isı Transfer Katsayısının Yarı Ampirik Modelinin Oluşturulması

Isı pompalı kurutma sistemlerinde tambur içerisindeki taşınım ısı transfer katsayısına etki eden parametrelerin, etki oranlarının belirlenmesi ve kütle transfer katsayısının yarı ampirik modellenmesi için lineer regresyon modeli uygulanmıştır.



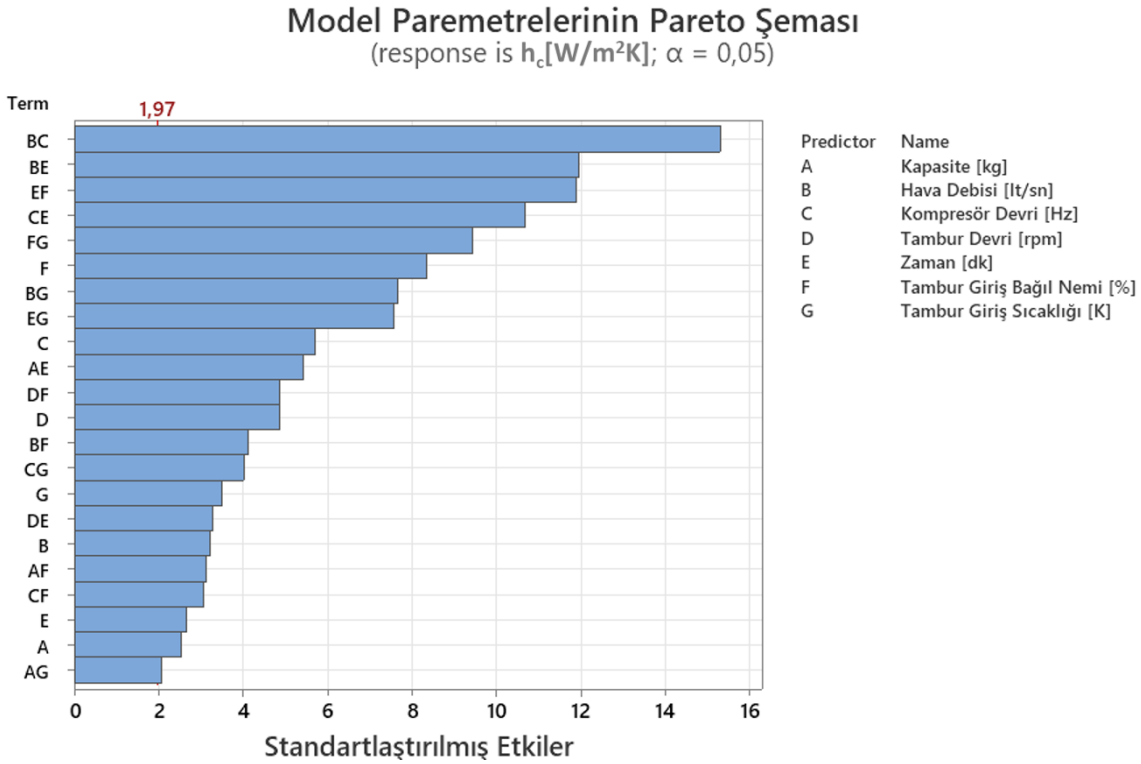
Şekil 4.7 Taşınım Isı Transferi Katsayısı Modeli Artık Grafikleri

Şekil 4.7'de taşınım ısı transfer katsayısı için oluşturulan modelin artık grafikleri gösterilmektedir. Normal dağılım grafiğinde p value değerinin 0.05 değerinden büyük olması ve standart artıkların dağılımı homojen olarak görüldüğü için kurulan modelin anlamlı olduğu görülmüştür.

Tablo 4.2 Modelin Doğruluğu

Standart Sapma	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
39.48	94.24%	93.76%	92.53%

Tablo 4.2'de modelin R kare değerinin %94.24, standart sapma değerinin ise 39,48 olduğu görülmektedir. Taşınım ısı transfer katsayısına etki eden parametrelerin pareto şeması Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



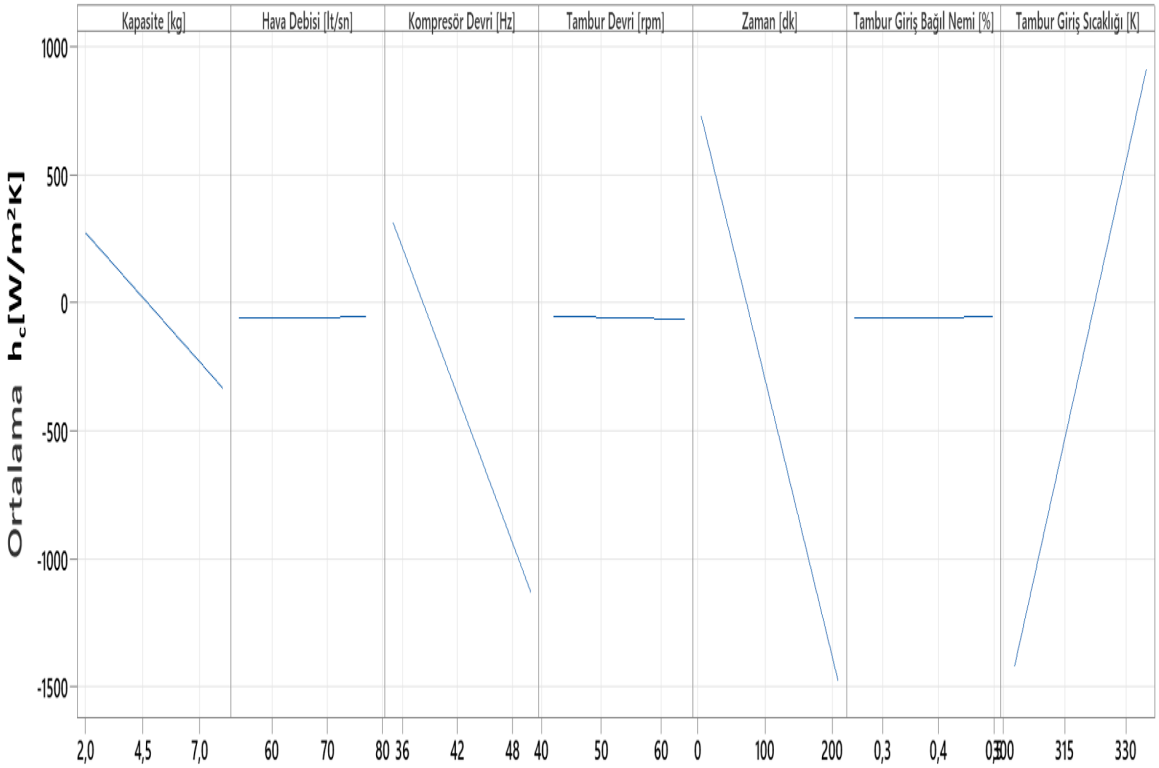
Şekil 4.8 Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etki Eden Paremetrelerin Pareto Şeması

Isı pompalı kurutma makinelerinde tambur içi taşınım ısı transfer katsayısına etki eden en önemli üç faktör, kütle transfer katsayısına paralel olarak, hava debisi ve kompresör çalışma frekansının iki etkileşimi, hava debisi ve program süresinin ikili etkileşimi, program süresi ve tambur giriş bağıl nemi olarak görülmektedir.

Yapılan model sonucunda elde edilen yarı ampirik formül denklem 4.2'de gösterilmiştir.

$$h_c = 52511 - 1890 * m_{\text{çamaşır}} + 214.9 * Q_{\text{hava}} - 1009 * f_{\text{kompresor}} - 41.73 * d_{\text{tambur}} - 42.7 * t - 139438 * RH_{\text{hava,g}} - 112.5 * T_{\text{hava,g}} + 0.732 m_{\text{çamaşır}} * t + 1469 m_{\text{çamaşır}} * RH_{\text{hava,g}} + 3.84 m_{\text{çamaşır}} * T_{\text{hava,g}} + 6.549 Q_{\text{hava}} * f_{\text{kompresor}} + 0.5135 Q_{\text{hava}} * t - 133.3 Q_{\text{hava}} * RH_{\text{hava,g}} - 1.442 Q_{\text{hava}} * T_{\text{hava,g}} - 1.453 * f_{\text{kompresor}} * t - 138.0 * f_{\text{kompresor}} * RH_{\text{hava,g}} + 1.932 * f_{\text{kompresor}} * T_{\text{hava,g}} + 0.0602 * d_{\text{tambur}} * t + 107.9 * d_{\text{tambur}} * RH_{\text{hava,g}} - 177.8 * t * RH_{\text{hava,g}} + 0.3305 * t * T_{\text{hava,g}} + 480.7 * RH_{\text{hava,g}} * T_{\text{hava,g}} \quad (4.2)$$

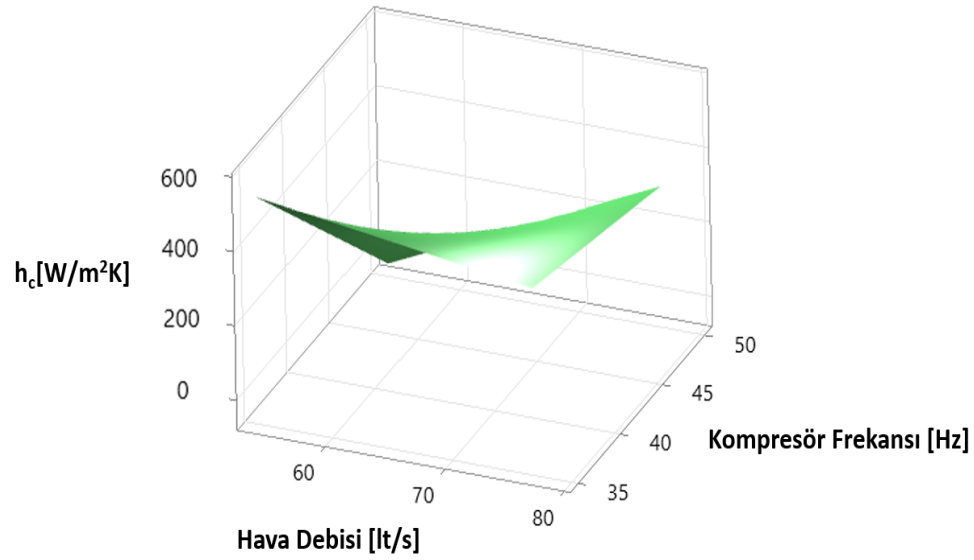
Şekil 4.9'da kütle transfer katsayısına etki eden ana parametreler gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Taşınım Isı Transfer Katsayısına Etki Eden Paremetrelerin Ana Etki Grafiği

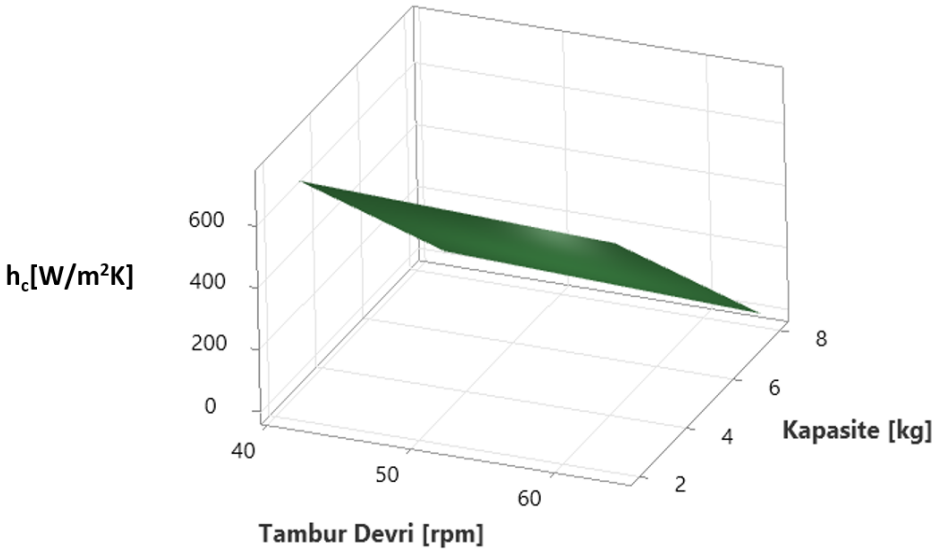
Kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi ve tambur giriş sıcaklığının kütle transfer katsayısına etkisi, hava debisi, tambur devri ve tambur girişindeki bağıl nem değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 4.10'de hava debisi ve kompresör çalışma frekansının taşınım ısı transfer katsayısına olan etkisinin yüzey grafiği gösterilmektedir. Grafiğin oluşturulması için kurutma kapasitesi 5 kg, tambur devri 52 rpm, kurutma süresi dakikası 77, tambur giriş bağıl nem değeri %33, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 4.10 Hava Debisi ve Kompresör Çalışma Frekansının Taşınım Isı Transfer Katsayısına Olan Etkisi,
$m_{çamaşır} : 5kg, d_{tambur} : 52rpm, t : 77.dk, T_{hava,g} : 321K, RH_{hava,g}$:%33

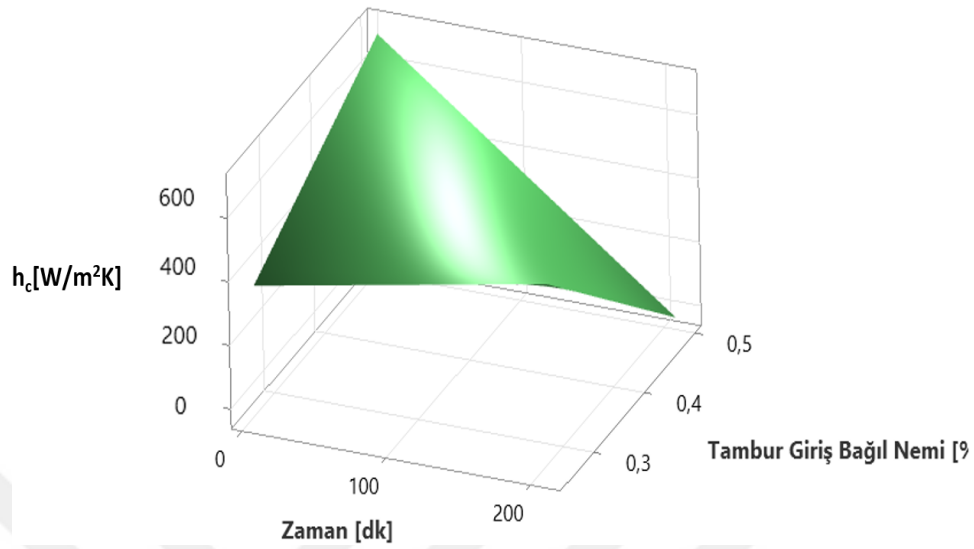
Grafikte de görüldüğü üzere hava debisi arttıkça ısı transfer katsayısında azalma görülmektedir. Kompresör çalışma frekansı değişiminde de kompresör çalışma frekansı azaldıkça ısı transfer katsayısı değerinde azalma görülmektedir.



Şekil 4.11 Tambur Devri ve Kurutma Kapasitesinin Taşınım Isı Transfer Katsayısına Olan Etkisi, $Q_{hava} : 66lt/s, f_{kompresor} : 35Hz, t : 77.dk, T_{hava,g} : 321K, RH_{hava,g}$:%33

Şekil 4.11'da tambur devri ve kurutma kapasitesinin taşınım ısı transfer katsayısına olan etkisi yüzey grafiği ile gösterilmiştir. Grafiğin oluşturulması için hava debisi 66 lt/s, kompresör çalışma frekansı 35 Hz, kurutma süresi dakikası 77, tambur giriş bağıl nem değeri %33, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur. Tambur devri

değişimi ısı transfer katsayısı üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmasa da kurutma kapasitesinin artmasıyla ısı transfer katsayısında anlamlı bir düşüş gözlemlenmektedir.

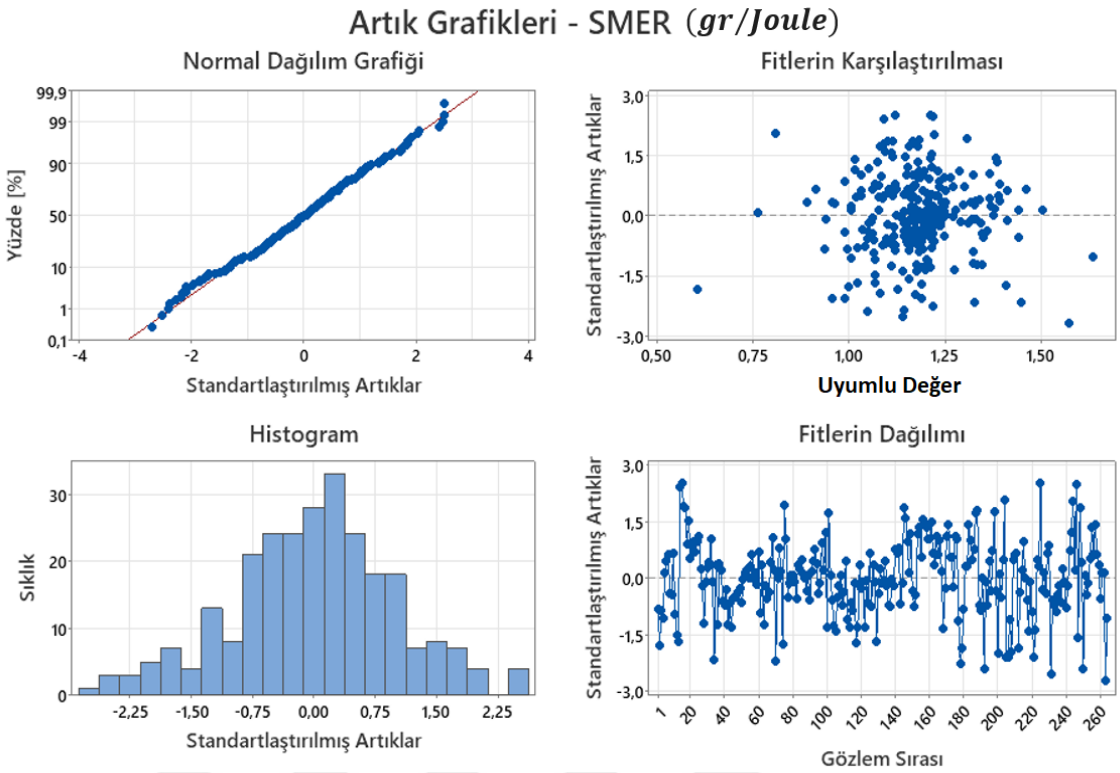


Şekil 4.12 Program Süresi ve Tambur Giriş Bağıl Nem Değerinin Taşınım Isı Transfer Katsayısına Olan Etkisi, Q_{hava} : $66 lt/s, f_{kompresor}$: $35 Hz, m_{çamaşır}$: $5 kg, d_{tambur}$: $52 rpm$

Şekil 4.12'de program süresi ve tambur giriş bağıl nem değerinin kütle transfer katsayısına olan etkisi yüzey grafiği ile gösterilmiştir. Grafiğin oluşturulması için kurutma kapasitesi 5 kg, hava debisi 66 lt/s, kompresör çalışma frekansı 35 Hz, tambur devri 52 rpm, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur. En yüksek ısı transferi katsayısına programın başlangıcında ve tambur giriş bağıl nem değerinin % 50 olduğu durumda görülmüştür. Tambur girişindeki bağıl nem değeri arttıkça ısı transfer katsayısının arttığı, program süresi değişiminde ise ısı transfer katsayısının benzer değerlerde kaldığı görülmüştür.

4.3 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Değerinin Yarı Ampirik Modelinin Oluşturulması

Isı pompalı kurutma sistemlerinde tambur içerisindeki spesifik nem alma oranı (SMER) değerinin modellenmesinde parametrelerin, etki oranlarının belirlenmesi ve spesifik nem alma oranının yarı ampirik modellenmesi için lineer regresyon modeli uygulanmıştır.



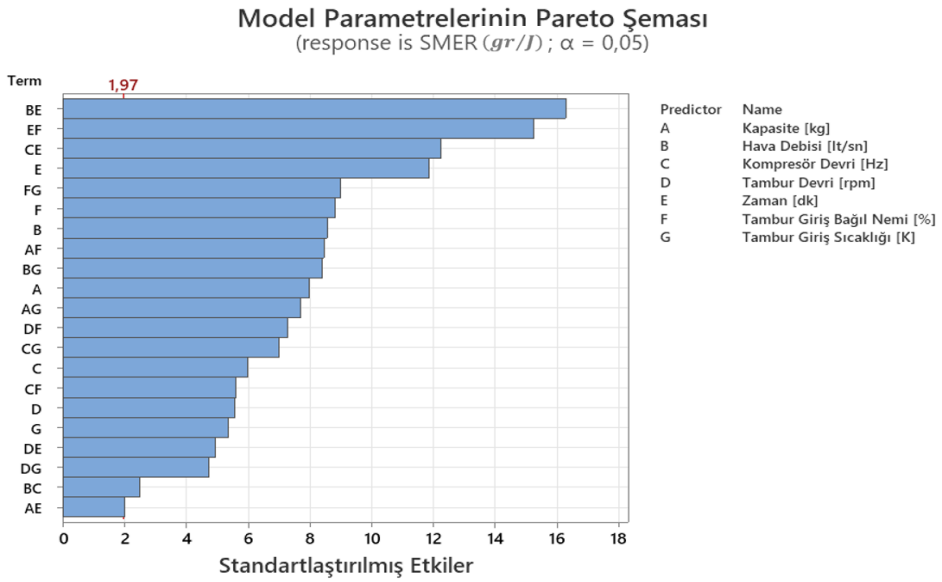
Şekil 4.13 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Modeli Artık Grafikleri

Şekil 4.13'te spesifik nem alma hızı için oluşturulan modelin artık grafikleri gösterilmektedir. Normal dağılım grafiğinde p value değerinin 0.05 değerinden büyük olması ve standart artıkların dağılımı homojen olarak görüldüğü için kurulan modelin anlamlı olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3 Modelin Doğruluğu

Standart Sapma	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.054	86.96 %	86%	84.18%

Tablo 4.3'te modelin R kare değerinin %86.96, standart sapma değerinin ise 0,05 olduğu görülmektedir. Spesifik nem alma hızına etki eden parametrelerin pareto şeması Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

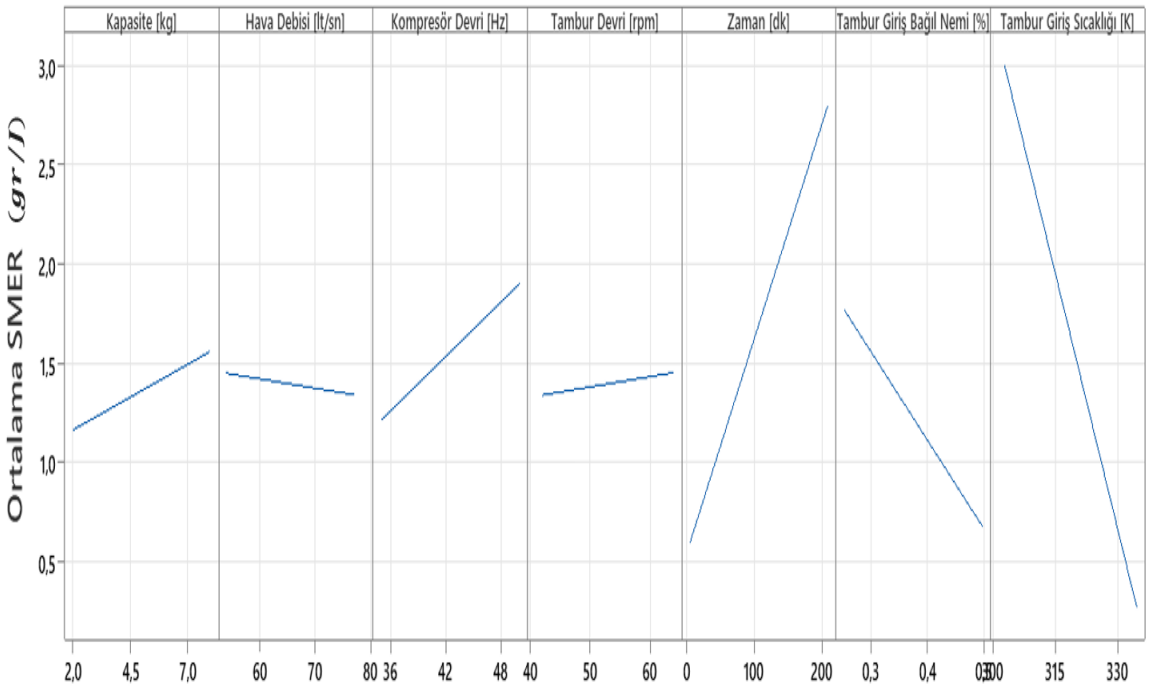


Şekil 4.14 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Modeline Etki Eden Parametrelerin Pareto Şeması

Isı pompalı kurutma makinelerinde spesifik nem alma oranına etki eden en önemli üç faktör, hava debisi ve program süresinin ikili etkileşimi, tambur giriş bağıl nem değeri ve program süresinin ikili etkileşimi, program süresi ve kompresör çalışma frekansının ikili etkileşimi olarak görülmektedir.

Yapılan model sonucunda elde edilen yarı ampirik formül denklem 4.3'te gösterilmiştir.

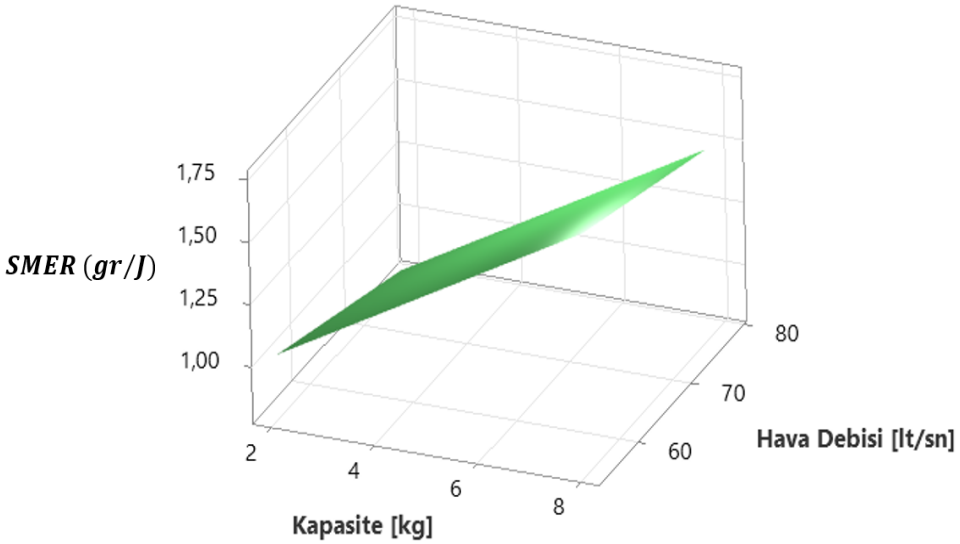
$$\text{SMER} = \text{-50} + 6.56 * \text{m}_{\text{çamaşır}} - 0.4993 * Q_{\text{hava}} + 1.144 * f_{\text{kompresor}} - 0.4463 * d_{\text{tambur}} - 0.09605 * t + 161.6 * RH_{\text{hava,g}} + 0.1691 * T_{\text{hava,g}} - 4.445 * m_{\text{çamaşır}} * RH_{\text{hava,g}} - 0.01547 * m_{\text{çamaşır}} * T_{\text{hava,g}} + 0.001270 * Q_{\text{hava}} * f_{\text{kompresor}} - 0.000739 * Q_{\text{hava}} * t + 0.001565 * Q_{\text{hava}} * T_{\text{hava,g}} + 0.001777 * f_{\text{kompresor}} * t - 0.2360 * f_{\text{kompresor}} * RH_{\text{hava,g}} - 0.003907 * f_{\text{kompresor}} * T_{\text{hava,g}} + 0.1979 * d_{\text{tambur}} * RH_{\text{hava,g}} + 0.001189 * d_{\text{tambur}} * T_{\text{hava,g}} + 0.2549t * RH_{\text{hava,g}} - 0.5064 * RH_{\text{hava,g}} * T_{\text{hava,g}} \quad (4.3)$$



Şekil 4.15 Spesifik Nem Alma Hızına Etki Eden Paremetrelerin Ana Etki Grafiği

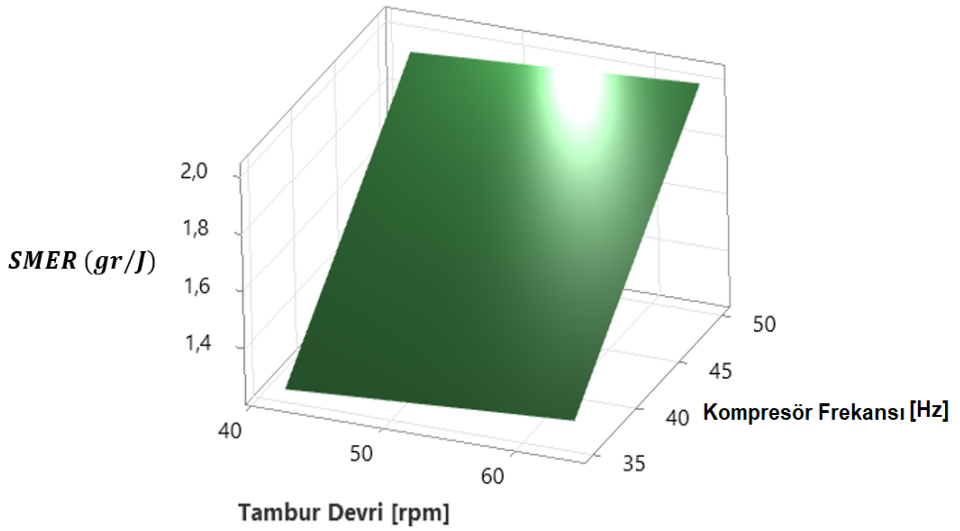
Şekil 4.15'te spesifik nem alma hızına etki eden ana parametreler gösterilmiştir.

Kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi, tambur girişi havanın bağıl nemi ve tambur giriş sıcaklığının spesifik nem alma oranına etkisi, hava debisi, tambur devri etkisinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16 Kurutma Kapasitesi ve Hava Debisi Değerinin Spesifik Nem Alma Hızına Olan Etkisi, $m_{\text{çamaşır}} : 5kg, d_{\text{tambur}} : 52rpm, t : 77.dk, T_{\text{hava,g}} : 321K, RH_{\text{hava,g}}$:%33

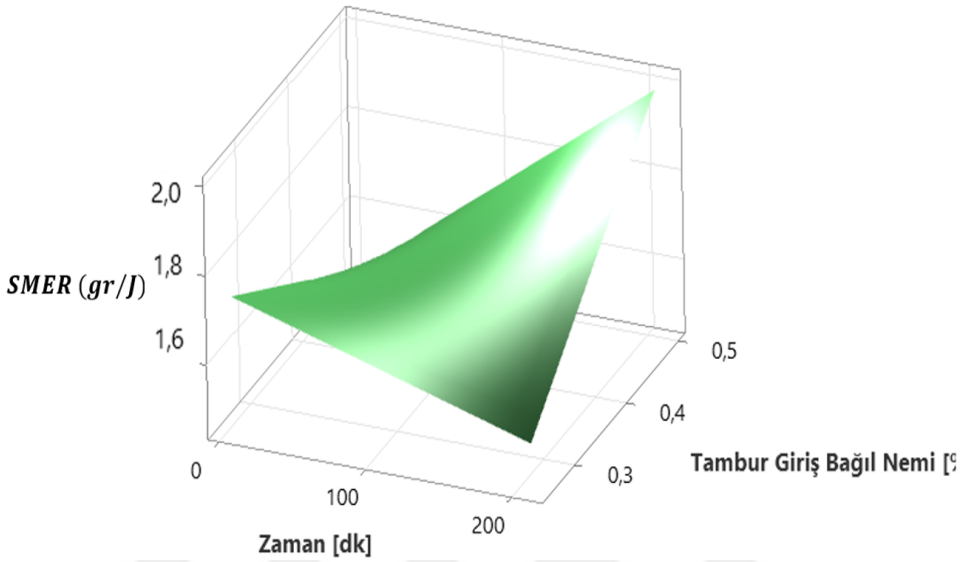
Şekil 4.16'da kurutma kapasitesi ve hava debisinin spesifik nem alma hızına olan etkisinin yüzey grafiği gösterilmektedir. Grafiğin oluşturulması için kompresör çalışma frekansı 35 Hz, tambur devri 52 rpm, kurutma süresi 77. dakika, tambur giriş bağıl nem değeri % 33, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur. Grafikte de görüldüğü üzere kurutma kapasitesi arttıkça spesifik nem alma oranı değeri artmaktadır. Hava debisi değişiminin etkisi ise kurutma kapasitesi değeri değişimine oranla daha az etki ettiği görülmektedir.



Şekil 4.17 Tambur Devri ve Kompresör Çalışma Frekansının Spesifik Nem Alma Hızına Olan Etkisi, $Q_{\text{hava}} : 66lt/s, t : 77.dk, T_{\text{hava,g}} : 321K, RH_{\text{hava,g}}$:%33

Şekil 4.17'de tambur devri ve kompresör çalışma frekansının spesifik nem alma hızına olan etkisinin yüzey grafiği gösterilmektedir. Grafiğin oluşturulması için kurutma

kapasitesi 5 kg, hava debisi 66 lt/s, kurutma süresi 77. dakika, tambur giriş bağıl nem değeri % 33, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur. Grafikte de görüldüğü üzere kompresör arttıkça spesifik nem alma oranı değeri artmaktadır. Tambur devri değişiminin etkisi ise kompresör devir değeri değişimine oranla daha az etki ettiği görülmektedir.



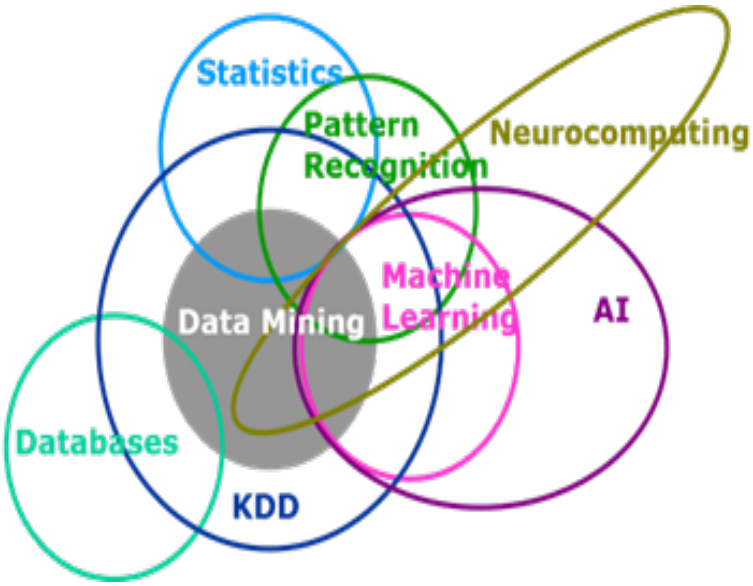
Şekil 4.18 Program Süresi ve Tambur Girişindeki Havanın Bağıl Neminin Spesifik Nem Alma Hızına Olan Etkisi,
$Q_{hava} : 66 lt/s, f_{kompresor} : 35 Hz, m_{çamaşır} : 5 kg, d_{tambur} : 52 rpm$

Şekil 4.18'de program süresi ve tambur girişindeki havanın bağıl neminin spesifik nem alma oranına olan etkisinin yüzey grafiği gösterilmektedir. Grafiğin oluşturulması için kurutma kapasitesi 5 kg, hava debisi 66 lt/s, kompresör çalışma frekansı 35 Hz, tambur devri 52 rpm, tambur giriş sıcaklığı 321 K olarak sabit tutulmuştur. Grafikte de görüldüğü program süresi arttıkça spesifik nem alma oranı değeri azalmaktadır. Tambur girişindeki havanın bağıl nemi arttıkça spesifik nem alma oranı değerinin de arttığı görülmektedir.

5
MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYON MODELİ OLUŞTURULMASI

Veri madenciliği “kullanıcılara yeni yöntemlerle anlaşılabilir ve faydalı olan verileri özetlemek ve aralarındaki beklenmeyen ilişkileri bulmak için genellikle büyük gözlemsel veri kümelerinin analiz edilmesi” olarak tanımlanmaktadır [27]. Veri madenciliği, gerçekleştirilen işlemin doğası gereği toplanan verilerle ilgilidir. Veri madenciliğinde uygulanan modelleme teknikleri tahmin etmeye ve tanımlamaya yönelik modeller olarak iki kategoriye ayrılır. Tahmin edici modeller, sonucu bilinen verilerden hareketle sonucu bilinmeyen veriler üzerinde tahmin üretmeyi amaçlarken tanımlayıcı modeller ise veri tabanındaki verinin genel özelliklerini tanımlarlar. Veri madenciliği uygulamalarında öncelikle incelenen sistemle ilgili problem tanımlanır. Tanımlanan probleme ilişkin veri madenciliği veri tabanının oluşturulması için birçok farklı kaynaktan toplanan verilerin bir araya getirilmesi gerekmektedir. Verilerin, analize uygun hale getirilmesi, eksiklerinin ya da hatalarının araştırılarak giderilmesi için veri temizleme, veri bütünleştirme, veri dönüşümü ve veri azaltma gibi ön hazırlık süreçleri uygulanır. Verinin özelliklerinin anlaşılması ve uygun veri analiz tekniğinin seçilmesinde özet istatistikler ve görselleştirme tekniklerinden faydalanılır. Veri madenciliği farklı görevleri yerine getirmek amacıyla pek çok farklı algoritmayı kullanır. Algoritmalar, veriyi inceler ve verinin özelliklerine en uygun modeli belirler. Veri madenciliğinde geliştirilen modeller, sınıflama, kümeleme, birliktelik kuralları oluşturma, örüntü tanımlama gibi görevlerin yerine getirilmesinde kullanılır. Yukarıda detaylı olarak açıklanan veri madenciliğinin yapısı ve diğer kavramlar ile ilişkisi Şekil 5.1’de yer almaktadır.

Veri madenciliğinin etrafında veri tabanı, istatistik, yapay zeka ve makine öğrenmesi gibi kavramlar bulunmaktadır. Bazı kavramlar birbiri ile kesişirken bazıları ise tamamen ayrılmaktadır. Örneğin, istatistik ve makine öğrenmesinde benzer hedefe ulaşmak amaçlansa da farklı yöntemler uygulamaktadır. İstatistiksel öğrenme, modellere ve modellerin yorumlarına odaklanmakla birlikte tutarlılık ve belirsizlik gibi kavramlara da ağırlık vermektedir. İstatistiksel öğrenme modelleri varsayımlara



Şekil 5.1 Veri Madenciliğinin Genel Yapısı

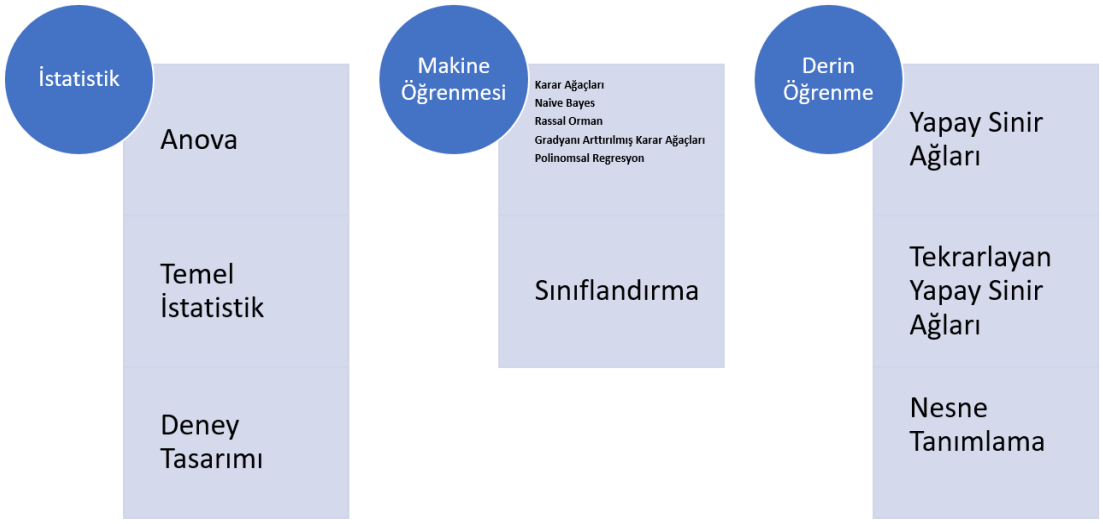
ve varsayımların kontrollerine muhtaçtır. İdeal durumlarda dahi yorumlama kısımlarında bir takım varsayımlar yapılır. Gerçek dünyada doğrusal modellerin varsayımlarını sağlamak oldukça güçtür. Eksik gözlem, aykırı gözlem gibi durumların çok fazla önemi vardır. Bu tip durumlarda veri kalitesi ve veri ön işleme çok önemli hale gelir. Makine öğrenmesi ağırlıklı olarak büyük ölçekli uygulamalarda kullanılır ve aykırı gözlem, eksik gözlem gibi durumlardan daha az etkilenir. Bunun sebebi veri içerisindeki yapıyı temsil etmek için oluşturulan fonksiyonların esnek yapıda olmasıdır. Makine öğrenmesi yaklaşımlarında varsayımlar daha azdır ve modellerin kullanımı daha kolaydır. Sonuç olarak, istatistik öğrenmede kontrollü olarak hazırlanan veriler ile varsayımın doğrulanması amaçlanmaktadır. Makine öğrenmesinde ise elde edilen verilerden öğrenme ve sonrasında tahmin etme ön plana çıkmaktadır.

Şekil 5.2' de istatistik, makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi kavramlar ve bu kavramları oluşturan yöntemler yer almaktadır.

5.1 Nicel Çıktılar İçin Makine Öğrenmesi Tanımları

Langley [28], makine öğrenmesinin yapay bilim olduğunu ve bu alandaki temel performansını deneyimlere dayalı bir biçimde artıran algoritmalar olduğunu belirtmiştir.

Literatürde seçilen bir problemi makine öğrenmesi algoritmasından faydalanılarak çözebilmek için birbirine yakın bazı yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımların çoğunluğunda makine öğrenmesi modelinin uygulanması için gerekli adımları beş ana başlıkta oluşturulmuştur.



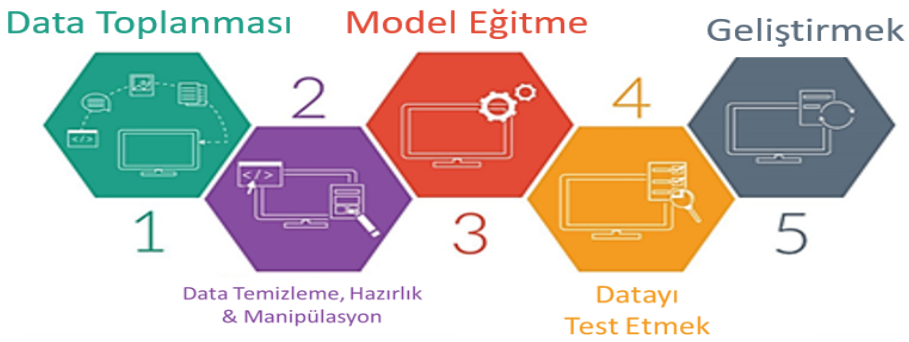
Şekil 5.2 İstatistik, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Genel Yapısı

Bu adımlar:

- Veri toplama
- Veri ön-işleme
- Veriyi eğitim ve test kümelerine ayırma
- Eğitim verisi üzerinde modelin kurulması
- Test verisi üzerinde modelin değerlendirilmesi
- Performans tatmin edici bulunduğu takdirde gerçek uygulamaya geçilmesi

Brownlee'ye göre ise makine öğrenmesi problemlerinin adım adım çözümünde kullanılabilecek uygulamalı makine öğrenmesi süreci adımları olan: problem tanımı, veri hazırlama, veri analizi, algoritma değerlendirme, sonuçların geliştirilmesi ve sonuçların sunumudur. Şekil 5.3'te makine öğrenmesi adımları gösterilmiştir.

Isı pompalı kurutma sistemlerinde spesifik nem alma oranı, tambur içerisindeki ısı ve kütle transfer katsayıları nicel bir çıktı olmasından dolayı, kullanılan makine öğrenme yöntemlerinde regresyona uyumlu makine öğrenmesi yöntemlerinden sırasıyla karar ağacı, rassal orman, gradyanı iyileştirilmiş ağaçlar, polinomsal regression ve çok katmanlı algılayıcı modelleri incelenmiştir. Bu modeller arasından özellikle 2020 yılı ve sonrasında nicel girdi ve çıktıları modelleyen, bu model ile elde edilen R^2 değeri ve ortalama standart sapma değerleri ile en yüksek olduğu bilinen gradyanı iyileştirilmiş ağaçlar algoritması ile optimizasyon modeli kurulmuştur.

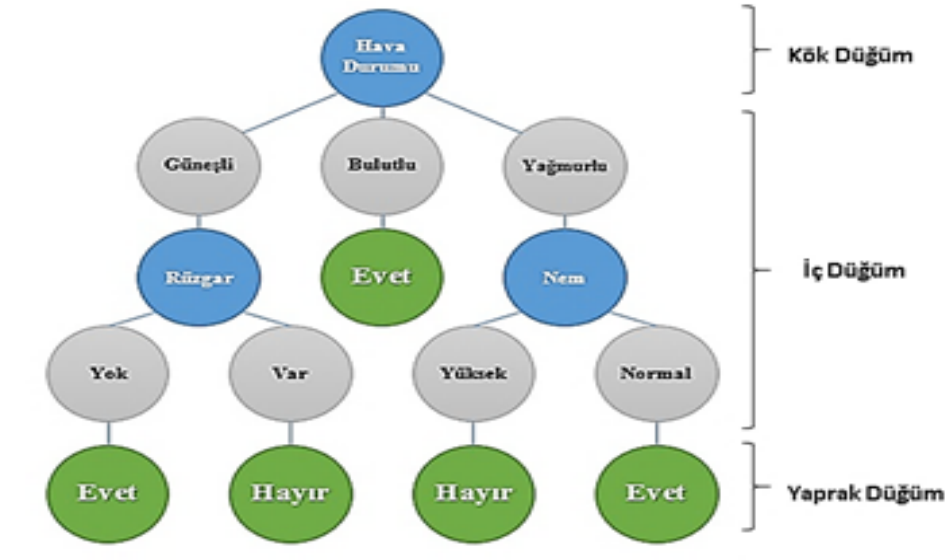


Şekil 5.3 Makine Öğrenmesi Süreci Adımları

5.1.1 Karar Ağaçları Algoritması

Karar ağacı, hem sınıflandırma hem de regresyon için kullanılan bir modeldir. Bağımlı değişken (çıktı) üzerindeki farklılıkların (girdiler) maksimize edilmesi amacıyla veri setinin sıralı bölünmesiyle elde edilir. "Böl ve yönet" stratejisi uygulanarak karar ağaçları yöntemindeki veriler saf alt sınıflara ayrılmaya çalışılır.

Quinlan [29], karar ağaçlarını akış şemalarına benzeyen yapılar olarak tanımlamaktadır. Her bir nitelik (girdi sınıfı) bir düğüm tarafından temsil edilir. En son yapı yaprak, en üst yapı kök ve bunların arasında kalan yapılar ise dal olarak isimlendirilir. Kısaca karar ağacı işlemi kök düğümden başlayarak, yukarıdan aşağıya doğru ardışık düğümler takip edilerek yaprağa ulaşıncaya kadar devam eden bir süreçtir. Şekil 5.4'te basit bir karar ağacı şeması gösterilmektedir.



Şekil 5.4 Hava Durumuna Bağlı Olarak Karar Veren Örnek Bir Karar Ağacı

Karar ağacı oluşturulurken en önemli adımlardan birisi hangi kökten itibaren bölünmenin gerçekleştirileceğinin bulunması yani dallanmanın hangi girdi değerine

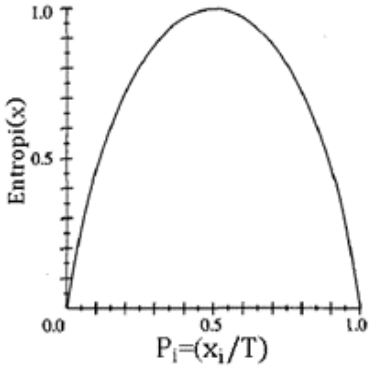
göre yapılacağıdır. Literatürde bu problemin çözümü için farklı yaklaşımlar vardır. Bunlardan en önemlileri ve en yaygın kullanılanları entropi ve gini indeksidir. Entropi bir sistemdeki düzensizliğin ya da belirsizliğin ölçüsüdür. Dunham [30]'a göre entropi, bir veri setindeki belirsizlik veya rastgele olma durumunu ölçmek için kullanılır. Entropi değerinin azalması, belirsizliğin de azalması anlamına gelmektedir.

Eğitim örneklerinin ne kadar iyi ayrıldığını ölçmek için entropi ve bilgi kazancı kavramlarından faydalanılmaktadır. Karar ağacı oluşturulurken bölme işlemi x niteliği (girdi) kullanılarak yapıldığında ne kadarlık bir bilgi kazancının elde edileceği bulunur. Yüksek bilgi kazancı sağlayan girdi ayrımın yapılacağı en tepedeki başlangıç niteliği olarak belirlenmektedir.[31]

$x = x_1, x_2, \ldots, x_n$ bir veri seti olsun, x_i sınıfının gerçekleşme olasılığı P_i'dir. Veri tabanındaki her bir veri için olasılık değeri $P_i = (x_i/T)$ ile hesaplanır. T, veri setindeki tüm dataların toplam adedidir. Olasılık değeri ile oluşturulan $P = P_1, P_2, \ldots P_n$ şeklinde ifade edilen olasılık dağılımına sahip x veri setinin entropisi Entropi(x) ifade edilir. Sınıflara ait entropi değeri hesabı Denklem 5.1'de gösterilmiştir.

$$\text{Entropi (x)} = -\sum_{i=1}^{n} \mathrm{P_i} \log_2 (\mathrm{P_i}) \tag{5.1}$$

Örneğin, iki farklı kümeden oluşan veri seti incelendiğinde, yukarıdaki denkleme göre entropi değeri 0 ile 1 arasında değişecektir. Eğer verideki tüm üyeler aynı sınıfa aitse entropi değeri 0 olacaktır. Ek olarak eşit sayıda üye sayısı varsa entropi değeri 1 olacaktır. Belirtilen durumların dışında entropi 0 ve 1 haricinde değerler alacaktır [32]. Şekil 5.5'te olasılık entropi değişim eğrisi yer almaktadır.

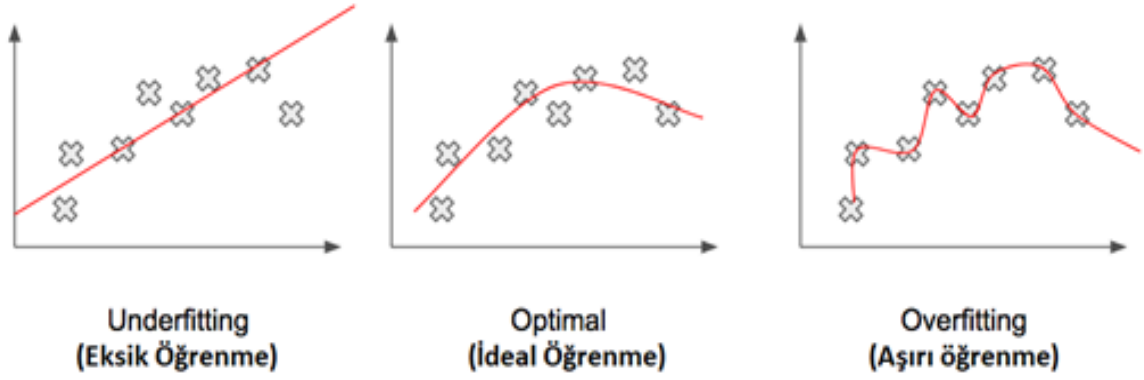


Şekil 5.5 Olasılık-Entropi Değişim Eğrisi

Dallanmanın hangi nitelikten başlayacağının belirlenmesi için her niteliğin yani girdinin bilgi kazanç değeri Denklem 5.2'de gösterilen formül ile hesaplanır. Kazanç değeri hesaplanırken yukarıda bahsettiğimiz entropi değerinden yararlanılır.

$$\text{Bilgi Kazancı}\,(B,T) = \text{Entropi}(T) - \text{Entropi}(T,x) = \text{Entropi}(T) - \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i}{T} \log_2 (\,T_i) \tag{5.2}$$

Karar ağacı oluşumunda diğer önemli konu ise ağaç yapısının budanması yani daha bodur bir ağaç elde edilmesidir. Budama ile ağaç yapısının sadeleştirilmesi ve işlem karmaşıklığının azaltılması sağlanır. İdeal öğrenmeyi sağlamak için, oluşturulan ağaç üzerinde yeni bir operasyon yapmak gerekmektedir. Bu operasyona budama denilmektedir. Yapılan budama sonrası ağaçların boyutları küçülürken, modelin sınıflama hata oranı da azalmaktadır. Şekil 5.6'da kırmızı çizgi makine öğrenmesi algoritması ile tahmin sonuçları olup, çarpı işareti ile gösterilen datalar bir deneyin sonuçlarını göstermektedir. Giuseppe [33]'ye göre eksik öğrenme durumu modelin test sonuçlarına uzak tahminlerde bulunmasıdır. Aşırı öğrenme durumu ise model bilinen tüm girdilere karşılık gelen çıktı değerlerini neredeyse mükemmel bir şekilde tahmin eder ancak bilinmeyen bir girdi sunulduğunda, ilgili tahmin hatası çok yüksek olabilir.

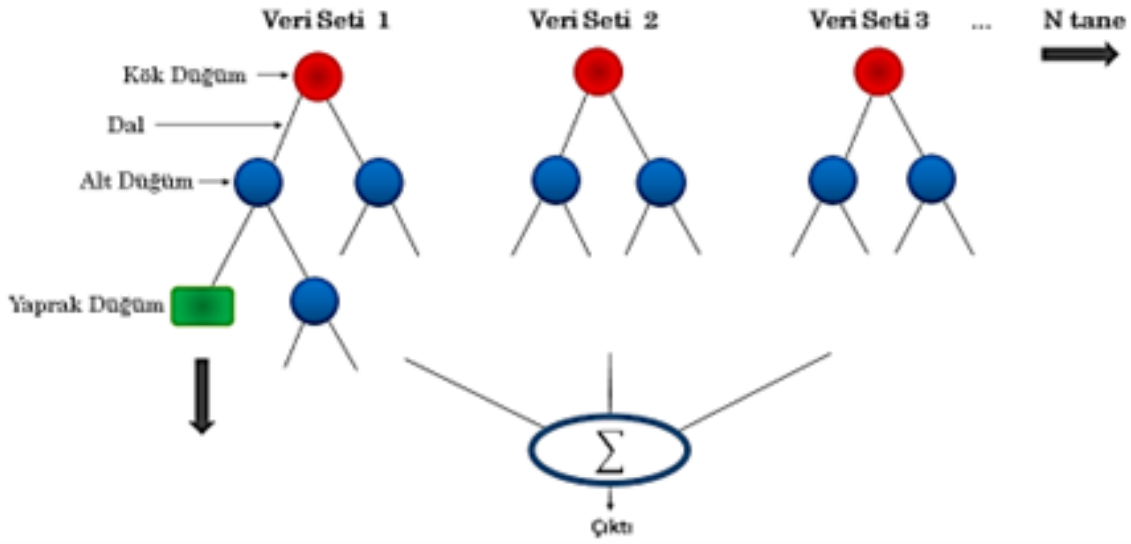


Şekil 5.6 Model Oluşturulması Sırasında Karşılaşılan Farklı Öğrenme Tipleri

5.1.2 Rassal Orman Yöntemi

Bir topluluk öğrenme yöntemi olan Rassal Orman, Breiman [34] tarafından geliştirilmiştir. Birbirinden farklı kurulan sınıflandırma ve regresyon karar ağaçları, karar ormanı topluluğunu oluşturur. Karar ormanı oluşumu sırasında elde edilen sonuçlar bir araya getirilerek çoğunluk oylamasıyla son tahmin elde edilir.

Rassal Orman yöntemi ile veri setinden yer değiştirmeli olarak yeni bir veri seti elde edilir. Bu yöntem ile birçok sınıflandırılmış ağaç geliştirilir. Bu geliştirilen ağaçlar karar ağaçlarının aksine budanmaz. Random forest algoritmasında, budama olmadan en büyük boyutta ağaç geliştirmek için CART (Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları) algoritmasını kullanmaktadır [34]. Budama yapılmamasının sebebi maksimum



Şekil 5.7 Rassal Orman Yönteminin Ağaç Yapısı

boyutta ağaç geliştirmektir. Rassal orman yönteminde bölünme işlemlerinde homojen sınıf dağılımına sahip düğümler tercih edilir. Düğüm homojenliği ölçümünde Denklem 5.3'te gösterilen Gini indeksi kullanılmaktadır.

$$\mathrm{GINI(T)} = 1 - \sum_{i=1}^{n} P_i^2 \tag{5.3}$$

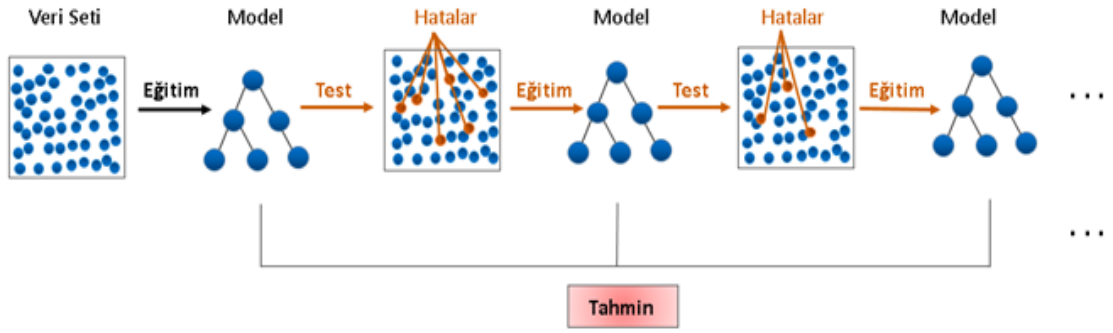
Gini ölçümleriyle, en küçük gini katsayısına sahip olan bölünme pozisyonu belirlenir. Gini katsayısı büyüdükçe sınıf heterojenliği artarken, gini katsayısı azaldıkça sınıf homojenliği artar. Bir alt düğümün gini katsayısı, bir üst düğümün gini katsayısından daha az olduğunda o dal başarılıdır. Gini katsayısı sıfıra ulaştığında yani her bir yaprak düğümde bir sınıf kalınca ağaç dallanma işlemi sonlanır.

5.1.3 Gradyanı Arttırılmış Karar Ağaçları Yöntemi

Gradyanı iyileştirilmiş karar ağaçları, regresyon ve sınıflandırma problemleri için kullanılan bir makine öğrenme yöntemidir. Bu yöntem ile zayıf tahminsel modellerin güçlendirilerek karar ağaçlarının bir topluluğu biçiminde tahmin modelinin oluşturulması hedeflenir. ağaçlarının bir topluluğu biçiminde tahmin modelinin oluşturulması hedeflenir.

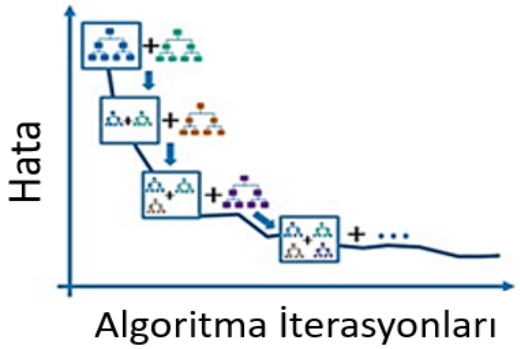
Freidman [35] regresyon ağaçlarını kullanarak gradyan azaltma metoduna dayalı türevlenebilir bir kayıp fonksiyonunu tanımlamıştır. Gradyanı iyileştirilmiş karar ağaçları yöntemi, her bir iterasyon adımında en küçük kareler metodu ile bu kayıp fonksiyonunu hesaplar. Hesap sonucunda elde edilen artıkları kullanarak iteratif bir

regresyon modeli oluşturur. İteratif model ile hata azaltma yöntemi Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Gradyanı İyileştirilmiş Karar Ağaçları Yöntemi Ağaç Yapısı

Gradyanı iyileştirilmiş karar ağaçları yöntemi sıralı, iteratif bir yöntemdir. Birçok zayıf öğreniciyi bir araya getirerek güçlü öğrenici oluşturur. Gradyanı arttırılmış karar ağaçları yönteminde her iterasyon adımında bir önceki iterasyondaki hata tahmin edilmeye çalışılır. Hatadan öğrenmek gradyanın tersi yönde ilerlemeye denk gelir.



Şekil 5.9 Gradyanı İyileştirilmiş Karar Ağaçları Yönteminde Hatanın Azaltılması

Giuseppe B. [33]'ye göre ardışık eğitim yaparak her iterasyon adımında hataları indirgeyen gradyanı arttırılmış karar ağaçları yönteminin algoritma adımları aşağıdaki gibidir. Veri setindeki modele alınan girdiler x, bu girdilere bağımlı olan model çıktısı y ise tahmin değerini ifade etmektedir.

- Verilerden yararlanarak ilk karar ağacı $F_1(x) = y$ oluşturulur.
- Bir sonraki karar ağacını oluşturulurken ilk karar ağacının artıkları (residuals) kullanılır: $h_1(x) = y - F_1(x)$
- Oluşturulan bu yeni karar ağacı algoritmasında işleme alınır: $F_2(x) = F_1(x) * h_1(x)$

- F2'nin artıklarıyla yeni ağaç bir ağaç daha oluşturulur: $h_2(x) = y - F_2(x)$
- Aynı işlem prosesine hata minimum değere ininceye kadar devam edilir.

5.1.4 Polinomsal Regresyon Yöntemi

Veri setinde bulunan değişkenler arasında bir ilişki bulunup bulunmadığını, eğer var ise bu bağlantının derecesinin saptanması, istatistiksel çözümlemelerde sık sık karşılaşan bir problemdir. X bağımsız değişkeni (girdi sınıfı) ile y bağımlı değişkeni (çıktı sınıfı) arasındaki ilişki polinomsal yani eğrisel ifadesi Denklem 5.4'te gösterilmiştir.

$$y_i = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \ldots + a_n X_n \tag{5.4}$$

Polinom regresyon denkleminde $a_1, a_2, \ldots, a_n$ regresyon katsayıları olup, bu katsayılar en küçük kareler yöntemiyle hesaplanır. Değişken olan $a_1, a_2, \ldots, a_n$ regresyon katsayıları, fonksiyonun tahmin değerleri ile gerçek değerleri arasındaki farkların kareleri toplamı en küçük olacak şekilde seçilmelidir. Yani hataların kareleri toplamı olan bu ifade Denklem 5.5'teki gibi bulunmaktadır.

$$S_r = \sum_{i=1}^{m} \left(y_i - a_0 - a_1 X_i - a_2 X_i^2 - \ldots - a_n X_i^n \right)^2 \tag{5.5}$$

Denklem 5.5'teki yayılımın minimum olması için her katsayıya göre türevinin sıfır olması şartından:

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = 0 \rightarrow a_0 n + a_1 \sum X_i + a_2 \sum X_i^2 + \ldots + a_n \sum X_i^n = \sum y_i \tag{5.6}$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = 0 \rightarrow a_0 \sum X_i + a_1 \sum X_i^2 + a_2 \sum X_i^3 + \ldots + a_n \sum X_i^{n+1} = \sum X_i y_i \tag{5.7}$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_2} = 0 \rightarrow a_0 \sum X_i^2 + a_1 \sum X_i^3 + a_2 \sum X_i^4 + \ldots + a_n \sum X_i^{n+2} = \sum X_i^2 y_i \tag{5.8}$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_n} = 0 \rightarrow a_0 \sum X_i^n + a_1 \sum X_i^{n+1} + a_2 \sum X_i^{n+2} + \ldots + a_n \sum X_i^{2n} = \sum X_i^n y_i \tag{5.9}$$

denklemleri oluşturulur. Yukarıdaki n+1 lineer denklem çözülerek, n+1 bilinmeyen ve $a_0, a_1 \ldots, a_n$ regresyon katsayıları hesaplanır.

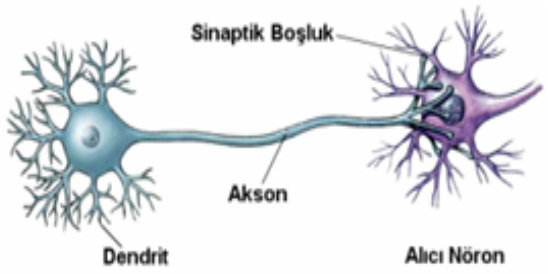
5.1.5 Yapay Sinir Ağı - Çok Katmanlı Algılayıcı Yöntemi

Yapay sinir ağının bir türü olan çok katmanlı algılayıcı, deneysel bilgiyi toplamak, depolamak ve kullanıma hazır hale getirmek için basit işlem birimlerinden oluşan ve çok sayıda paralel analiz yapabilen bir işlemcidir.

Tablo 5.1 Yapay Sinir Ağları ve Biyolojik Sinir Sistemi Arasındaki Bağlantı

Biyolojik Sinir Sistemi	Yapay Sinir Sistemi
Nöron	İşlemci eleman
Dentrit	Toplama fonksiyonu
Hücre gövdesi	Transfer fonksiyonu
Aksonlar	Yapay nöron çıkışı
Sinapslar	Ağırlıklar

Yapay sinir ağları biyolojik sinir sistemi hücresinde yer alan dentrit (toplama işlemi), hücre gövdesi (etkinlik işlemi), akson (çıkış ve sinapslar) ve ağırlıklar olarak yapay sinir hücresinde temsil edilir. İki sistem arasındaki benzerlik Şekil5.10'da gösterilmiştir.

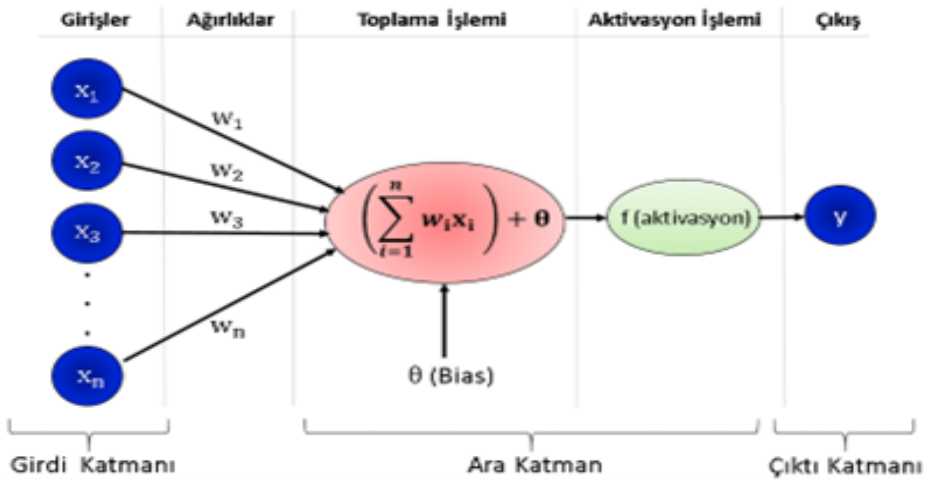


Şekil 5.10 Biyolojik Sinir Hücresi

Giuseppe [33]'e göre yapay sinir ağları biyolojik hücreye karşılık gelen ve yapay sinir hücresi, düğüm, birim, işlem elemanı gibi isimler verilen yapılar ve bunların aralarındaki yoğun bağlantılardan meydana gelmektedir.

Katmanlardaki ifadelerin tanımları Haykin [36] tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

Şekil 5.11'de tek katmanlı yapay sinir ağı modeli gösterilmektedir. Tek katmanlı yapay sinir ağı modelinde gösterilen tek katmanlı algılayıcı modelinde, bir girdi katmanı bir ara katman ve bir adet çıkış katmanı bulunmaktadır. Katmanlardaki ifadelerin tanımları aşağıdaki gibidir [36].



Şekil 5.11 Tek Katmanlı Yapay Sinir Ağı Modeli

Girişler $(x_1, x_2, \ldots, x_i)$: Giriş katmanındaki hücreler kullanıcı tarafından örnekler ile oluşturulmuş veri kümesidir. Girdi katmanında, dış dünyadan gelen bilgi ve veri hiçbir işleme tabi tutulmadan ara katmana iletilir.

Ağırlıklar $(w_1, w_2, \ldots, w_i)$: Ara katmanda bulunan ağırlıklar giriş verilerinin algılayıcı model hücresine etkisini yansıtan katsayılardır.

Toplama işlemi: Ağırlıklı toplam fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon, bir hücreye gelen net girdiyi hesaplar. Toplam fonksiyonu formülü Denklem 5.10'da gösterilmiştir.

$$\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + \theta \tag{5.10}$$

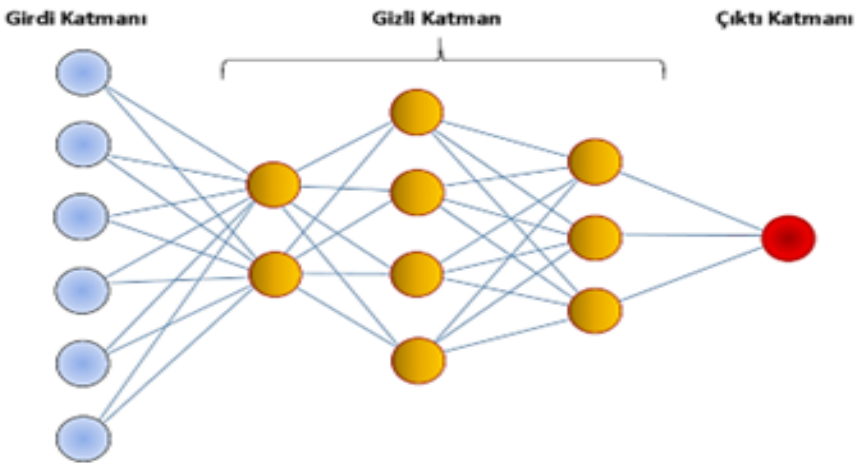
Eşik değeri (Bias, θ) : Eşik değeri bu tip ağlarda nöron elemanlarının değerlerinin ve ağın çıktısının 0 olmasını önler.

Aktivasyon fonksiyonu: Hücrenin toplama işlemi adımından gelen net girdi değerine karşılık üretilecek çıktı değerinin hesaplanmasında kullanılır. Aktivasyon fonksiyonu türevlenebilir fonksiyonlardan oluşur. En yaygın kullanılanı Sigmoid fonksiyonudur. Bu fonksiyon girdi değerlerinin her biri için 0 ile 1 arasında bir değer üretilir.

$$\mathrm{f(NET)} = \frac{1}{1 + \mathrm{e}^{-\mathrm{NET}}} \tag{5.11}$$

Çıkış Katmanı (y) : Aktivasyon fonksiyonu sayesinde belirlenen değerdir. Elde edilen çıktı değeri başka bir sistemde işlenmek için ya da algoritma çıktısı olarak kullanılabilir.

Şekil 5.11'de gösterilen tek katmalı algılayıcıdan farklı olarak birçok alt gizli katmanı

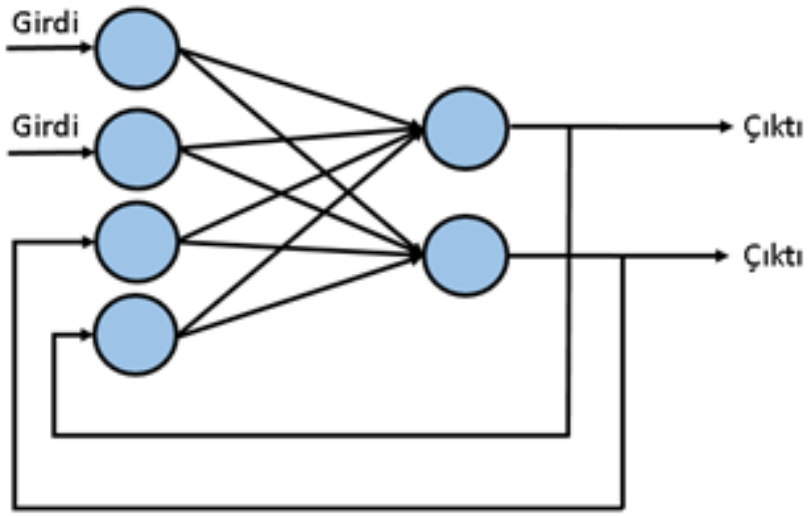


Şekil 5.12 Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı Model Yapısı

olan çok katmanlı algılayıcı model yapısı Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Yapay sinir ağları olan çok katmanlı algılayıcılar temel olarak iki grupta toplanmaktadır.

- İleri beslemeli algılayıcı
- Geri beslemeli algılayıcı

Geri besleme olması durumunda hücre kendi üzerinden besleme yapar, yani kendi çıktı değerini giriş değeri olarak kullanılmaktadır. Geri beslemeli yapay sinir ağı modeli Şekil 5.13' de gösterilmiştir.



Şekil 5.13 Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağı Modeli

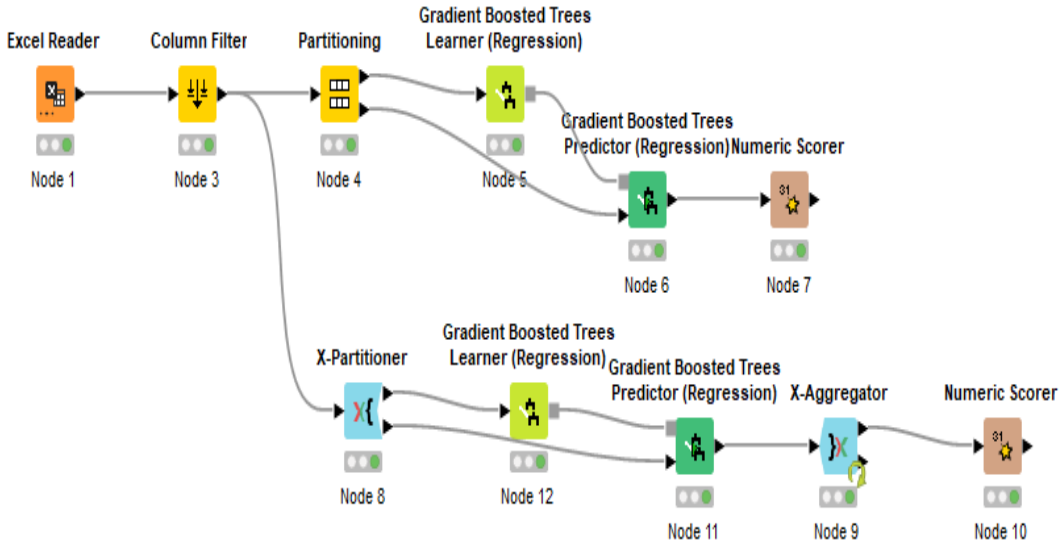
Han ve Kamber [31]'e göre, geri yayılma işleminde yapay sinir ağı modeli, her bir bağ için tahmin değerini gerçek hedef değeriyle karşılaştırarak, eğitim veri kümesini yinelemeli olarak işleyerek öğrenir. Hedef değer, eğitim kümesinde bilinen sınıf etiketi (sınıflandırma problemleri için) veya sürekli bir değer (sayısal tahmin için) olabilir. Her eğitim dizisi için ağırlıklar, ağ tahmini ile gerçek hedef değeri arasındaki ortalama kare hatasını en aza indirecek şekilde değiştirilir.Sonuç olarak geri beslemeli modelde, her bir iterasyon adımında öğrenme modelindeki ağırlık katsayısı ($w_1, w_2, \ldots, w_i$) yinelenerek elde edilen çıktı gerçek hedef değerine yaklaştırılır ve hata fonksiyonu minimize edilir. Dunham [30]'e göre geri beslemeli ağlarda bağlantılar kapalı çevrimler oluşturur. Herhangi bir nörondan alınan çıkış, aynı katmandaki veya bir önceki katmandaki nöronlara giriş olarak verilebilir. Bu yöntem ile ağdaki ağırlıklar değiştirilerek hızlı öğrenme ve test süreci elde edilir. Haykin [36]'nin tanımına göre ise geri yayılım algoritması, en hızlı gradyan azaltma ile hesaplanan ağırlık uzayındaki yörüngeye bir yaklaşım sağlar. Öğrenme parametresi ne kadar küçük yapılırsa, ağdaki sinaptik ağırlıktaki değişiklikler bir sonraki iterasyonda o kadar küçük olur.

5.2 Makine Öğrenmesi Yöntemiyle Isı Pompalı Kurutma Sistemleri Optimizasyon Modelinin Kurulması

Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde sistem parametreleri optimazsyon modelini kurmak için, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Optimizasyon modeli Knime programı kullanılarak oluşturulmuştur. Modeli kurmak için yapılan tüm testlerin anlık dataları toplanmış, toplanan yaklaşık 70642 data ile spesifik nem alma hızı, kütle ve taşınım ısı transfer katsayılarının makine öğrenme modelleri kurulmuştur.

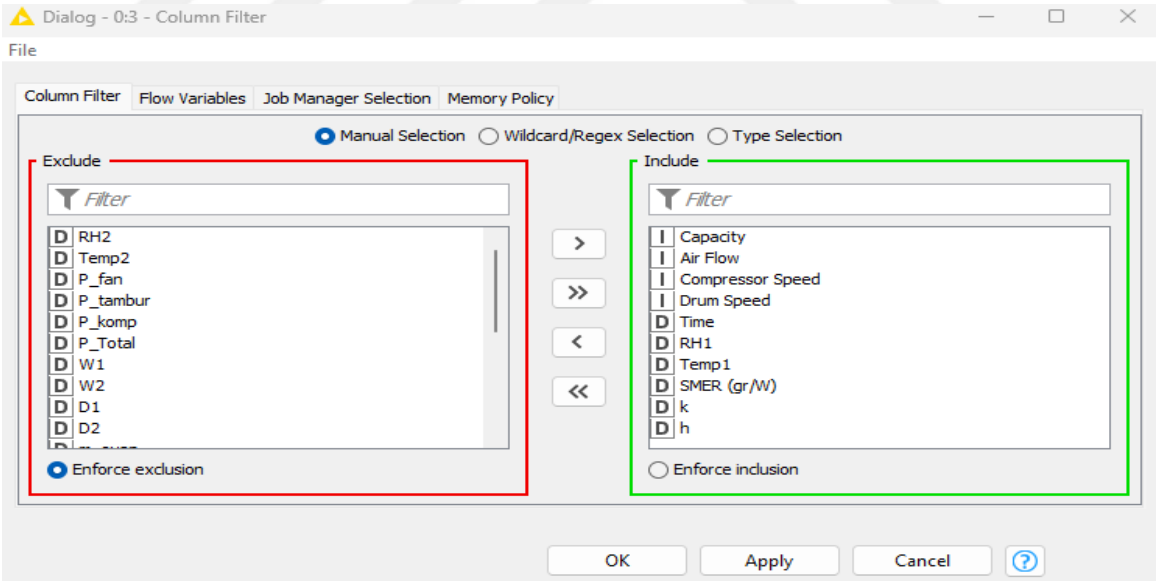
5.2.1 Knime Programı İle Modelin Kurulması

Isı pompalı çamaşır kurutma sistemlerinde spesifik nem alma hızı, kütle ve taşınım transfer katsayısı değerlerinin makine öğrenme yöntemiyle modellenmesi için toplanan datalara bir excel tablosuna girdi olarak işlenmiştir. Şekil 5.14'te optimizasyon modeli için kurulan sistem şeması gösterilmektedir.



Şekil 5.14 Optimizasyon Modeli İçin Kurulan Sistem Şeması

Knime programında her bir node yapısı kendi içerisinde verilen parametreler doğrultusunda modifiye edilebilmektedir. Excel reader node yapısında, dataların bulunduğu dosya knime platformuna aktarılır. Column filter yapısında modelde istenen parametreler excel tablosu içerisinden belirlenerek modele girdi sağlayacak parametreler seçilir.



Şekil 5.15 Sütun Filtreleme Ekranı

Şekil 5.15'te görüldüğü üzere modele girdi sağlayan excel veri setinde kapasite, hava debisi, kompresör çalışma frekansı, tambur devri, program süresi, tambur girişindeki havanın bağıl nem değeri, tambur girişindeki havanın sıcaklığı, spesifik nem alma hızı, kütle ve taşınım ısı transfer katsayı değerleri seçilerek datalar filtrelenmiştir.

Makine öğrenme modellerinde, modelin doğruluğunu etkileyen en büyük parametre

dataların aşırı öğrenme eğiliminin kontrolüdür. Geleneksel makine öğrenme yöntemlerinde modele girdi sağlayan veri seti rassal bir şekilde %70 oranında öğrenmek, %30 oranında ise tahmin etmek için ayrıştırılır. Kullanılacak olan model veri setinin %70'i ile öğrenir, geri kalan %30 kısımdaki veri setinde, tahmin edilmek istenen çıktı değerleri test edilerek modelin doğruluğu belirlenir. Sadece bu yapı kurgulanarak oluşturulan modellerde aşırı öğrenme problemi yaşanabilir. Bu sebeple literatürde k katlamalı çapraz validasyon yöntemi olarak bilinen araç ile modelin aşırı öğrenme yapıp yapmadığı kontrol edilmektedir.

K katlamalı çapraz validasyon yönteminde veri seti eşit parçalara bölünür, bölünen parçaların %90'ı modelin öğrenmesi için girdi olarak modele aktarılır, kalan %10'luk kısım ise tahmin etmek için kullanır. Bu veri setleri rassal olarak bölünen parça sayısında yer değiştirerek bu tahminleme tekrarlanır. Bu çalışma sonucunda elde edilen modelin doğruluğu, geleneksel bölme yönteminin doğruluğu ile kıyaslanır. Her iki yöntemin R kare değerinin birbirine yakın olması modelin aşırı öğrenmeye uğramadan doğru bir şekilde oluşturulduğunu gösterir.

Isı pompalı kurutma sistemlerinde spesifik nem alma hızı, kütle ve taşınım ısı transfer katsayılarının makine öğrenme modeli için k katlamalı çapraz validasyon yöntemi ve geleneksel bölme yöntemi ile modeller kurularak her iki modelin R kare değeri karşılaştırılmıştır.

K katlamalı çapraz validasyon yönteminde toplam veri seti 10 eşit parçaya bölünmüştür. Nicel girdi ve nicel çıktılarda en iyi sonuçları verdiği bilinen gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi kullanılarak modeller oluşturulmuştur.

Her bir model için girdi ve çıktıların birbirleri ile etkileşimi korelasyon matrisleri oluşturularak gösterilmiştir.

Kütle, taşınım ısı transfer katsayısı ve spesifik nem alma hızının knime programı kullanılarak, makine öğrenmesi algoritmaları ile modellerinin oluşturulmasından önce farklı makine öğrenme algoritmalarının doğruluk oranları incelenmiştir.

Tablo 5.2 Farklı Makine Öğrenme Algoritmalarının Model Doğruluk Oranları

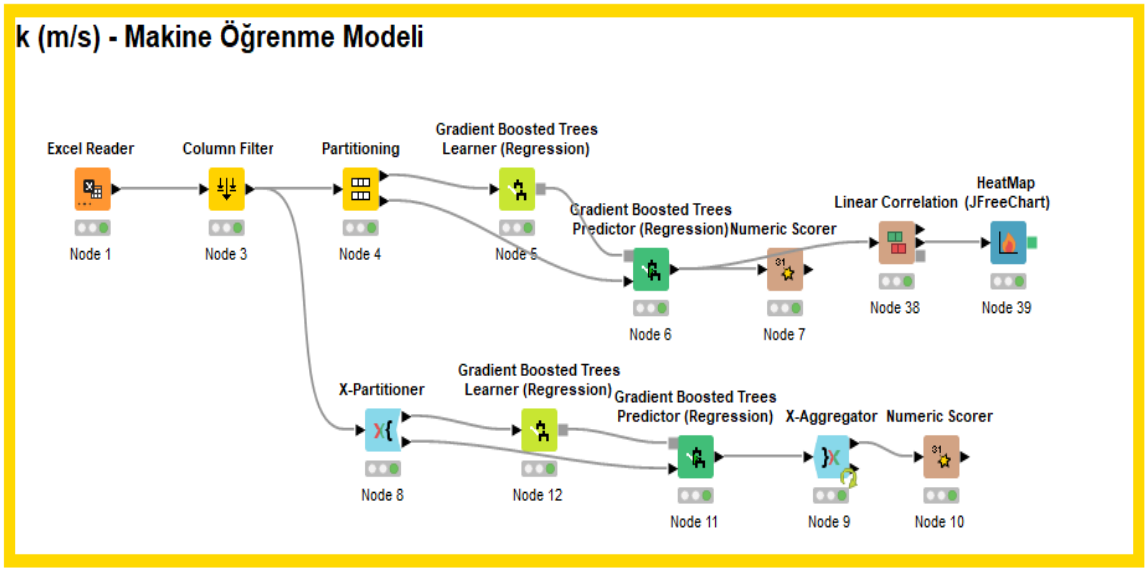
Model	**Polinomsal Regresyon Algoritması Doğruluk Oranı [%]**	**Karar Ağaçları Algoritması Doğruluk Oranı [%]**	**Rassal Orman Algoritması Doğruluk Oranı [%]**	**Gradyanı Arttırılmış Karar Ağaçları Algoritması Doğruluk Oranı [%]**
k $[m/s]$	%68.1	%75.4	%82.1	%98.9
h_c $[W/m^2K]$	%68,1	%75.4	%82.1	%98.9
SMER $[gr/Joule]$	%56.4	%64.2	%70.5	%90.2

Bölüm 5.1.3'te de açıklandığı gibi gradyanı iyileştirilmiş karar ağaçları yöntemi sıralı/iteratif bir yöntemdir. Birçok zayıf öğreniciyi bir araya getirerek güçlü öğrenici oluşturur. Gradyanı arttırılmış karar ağaçları yönteminde her iterasyon adımında bir önceki iterasyondaki hata tahmin edilmeye çalışılır. Hatadan öğrenmek gradyanın tersi yönde ilerlemeye denk gelir. Günümüzde nicel girdi nicel çıktı sağlayan makine öğrenme modellerinde, hatalarından öğrenerek doğruluk oranını arttırdığı için en çok kullanılan makine öğrenme algoritmasıdır.

Bu doktora tezi çalışmaları kapsamında spesifik nem alma hızı (SMER), kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı, gradyanı arttırılmış karar ağacı algoritması kullanarak makine öğrenme modeli oluşturulmuştur.

5.2.2 Knime Programı İle Kütle Transfer Katsayısı Modelinin Kurulması

Isı pompalı kurutma makinalarında tambur içi kütle transfer katsayısının gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile modellenmesi için KNIME programında oluşturulan makine öğrenme modelinin şeması Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16 Kütle Transfer Katsayısı - Makine Öğrenmesi Şeması

Kurulan model hem geleneksel bölme hem de k katlamalı çapraz validasyon yöntemleri ile öğrenme gerçekleştirilerek modelin doğruluk oranı ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

Row ID	D Prediction (k) - Geleneksel Bölme
R^2	0.992
mean absolut...	0.025
mean square...	0.005
root mean sq...	0.07
mean signed ...	-0.002
mean absolut...	0.024
adjusted R^2	0.992

Şekil 5.17 Kütle Transfer Katsayısı - Geleneksel Bölme Yöntemi Doğruluk Oranı

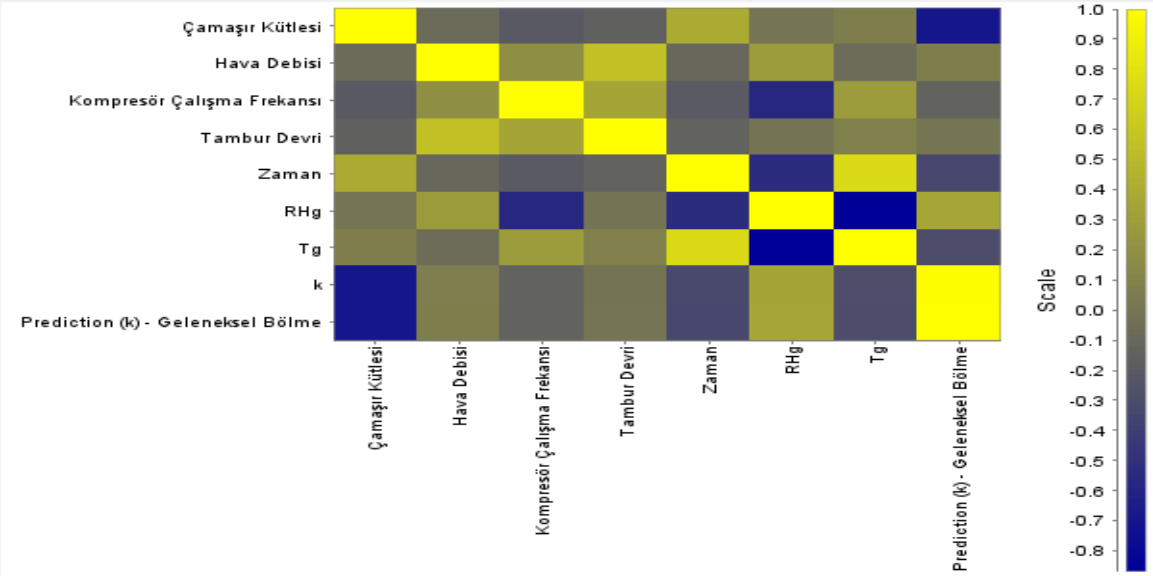
Şekil 5.17'de geleneksel bölme yöntemi ile ayrılan veri setinin gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile kurulan modelinin R kare değeri ve standart sapması gösterilmektedir. Model %99.2 doğruluk, 0.07 standart sapma değeri ile kütle transfer katsayısını modelleyebilmektedir.

Row ID	D Prediction (k) - K katlamalı Çapraz Validasyon
R^2	0.991
mean absolut...	0.025
mean square...	0.006
root mean sq...	0.076
mean signed ...	-0.003
mean absolut...	0.024
adjusted R^2	0.991

Şekil 5.18 Kütle Transfer Katsayısı - K katlamalı Çapraz Validasyon Doğruluk Oranı

Aşırı öğrenme kontrolü yapmak amacıyla k katlamalı çapraz validasyon yöntemi ve gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile kurulan modelin R kare değeri ve standart sapması Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Model doğruluk oranı %99.1 ve standart sapma değeri 0.076 olarak hesaplanmıştır. Geleneksel bölme yöntemi ve k katlamalı çapraz validasyon yöntemleri ile eğitilen gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile modellenen kütle transfer katsayısı makine öğrenme modeli her iki yöntemdeki doğruluk ve standart sapma değerleri birbirine çok yakın olduğu için makine öğrenme modelinin aşırı öğrenme eğilimine girmeden, girdi sağlanan veri kümesi ile modellenebildiği görülmüştür.

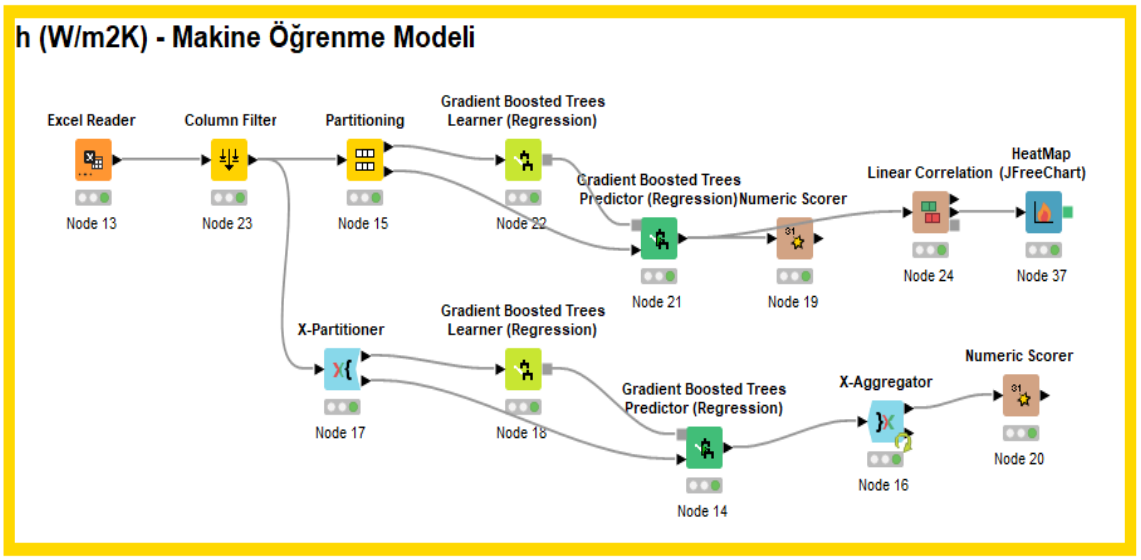
Şekil 5.19'da kütle transfer katsayısı için oluşturulan modele etki eden girdilerin korelasyon matrisi gösterilmektedir. İstatiksel yöntemler ile paralel olarak kütle transfer katsayısına en çok etki eden parametrelerin, kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi ve tambur giriş sıcaklığının olduğu görülmektedir.



Şekil 5.19 Kütle Transfer Katsayısı - Korelasyon Matrisi

5.2.3 Knime Programı İle Taşınım Isı Transfer Katsayısı Modelinin Kurulması

Isı pompalı kurutma makinalarında tambur içi taşınım ısı transfer katsayısının gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile modellenmesi için KNIME programında oluşturulan makine öğrenme modelinin şeması Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



Şekil 5.20 Taşınım Isı Transfer Katsayısı - Makine Öğrenmesi Şeması

Kütle transfer katsayısı modeline paralel olarak, kurulan model hem geleneksel bölme hem de k katlamalı çapraz validasyon yöntemleri ile öğrenme gerçekleştirilerek modelin doğruluk oranı ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

Row ID	D Prediction (h) - Geleneksel bölme
R^2	0.989
mean absolut...	5.45
mean square...	294.602
root mean sq...	17.164
mean signed ...	-0.663
mean absolut...	0.024
adjusted R^2	0.989

Şekil 5.21 Taşınım Isı Transfer Katsayısı - Geleneksel Bölme Yöntemi Doğruluk Oranı

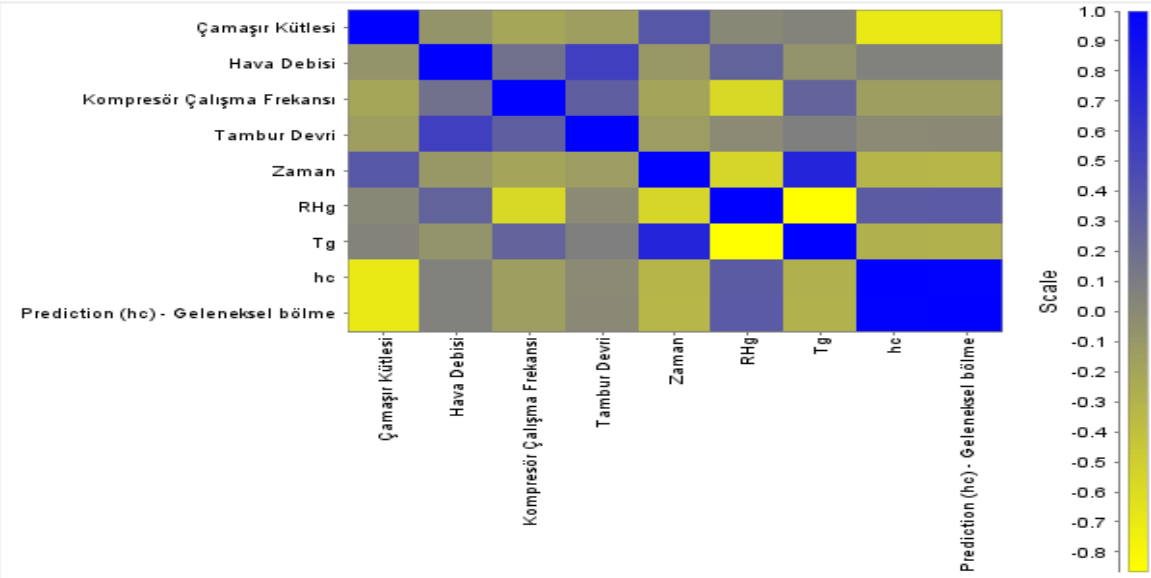
Şekil 5.21'de geleneksel bölme yöntemi ve ayrılan veri setinin gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile kurulan modelinin R kare değeri ve standart sapması gösterilmektedir. Model %98.9 doğruluk, 17.164 standart sapma değeri ile taşınım ısı transfer katsayısını modelleyebilmektedir.

Row ID	D Prediction (h) - K katlamalı çapraz validasyon
R^2	0.991
mean absolut...	5.371
mean square...	267.249
root mean sq...	16.348
mean signed ...	-0.61
mean absolut...	0.024
adjusted R^2	0.991

Şekil 5.22 Taşınım Isı Transfer Katsayısı - K Katlamalı Çapraz Validasyon Doğruluk Oranı

Aşırı öğrenme kontrolü yapmak amacıyla k katlamalı çapraz validasyon yöntemi ve gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile kurulan modelin R kare değeri ve standart sapması Şekil 5.22'de gösterilmiştir. Model doğruluk oranı %99.1 ve standart sapma değeri 16.348 olarak hesaplanmıştır. Geleneksel bölme yöntemi ve k katlamalı çapraz validasyon yöntemleri ile eğitilen gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile modellenen ısı transfer katsayısı makine öğrenme modeli her iki yöntemdeki doğruluk ve standart sapma değerleri birbirine çok yakın olduğu için makine öğrenme modelinin aşırı öğrenme eğilimine girmeden, girdi sağlanan veri kümesi ile modellenebildiği görülmüştür.

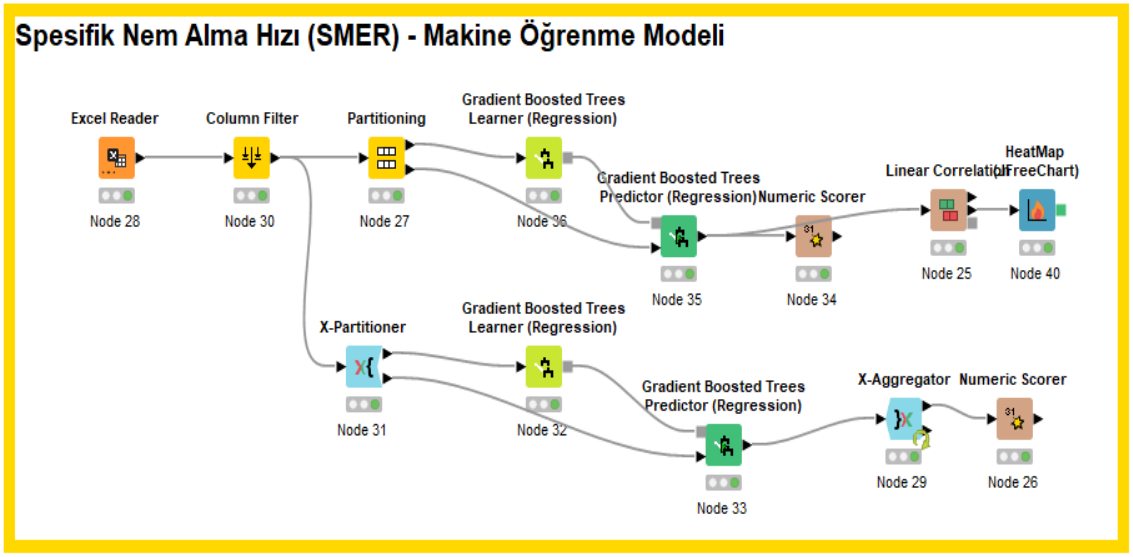
Şekil 5.23'te taşınım ısı transfer katsayısı için oluşturulan modele etki eden girdilerin korelasyon matrisi gösterilmektedir. İstatiksel yöntemler ile paralel olarak kütle transfer katsayısına en çok etki eden parametrelerin, kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi ve tambur giriş sıcaklığı olduğu görülmektedir.



Şekil 5.23 Taşınım Isı Transfer Katsayısı - Korelasyon Matrisi

5.2.4 Knime Programı ile Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Modelinin Kurulması

Isı pompalı kurutma makinalarında spesifik nem alma hızının, gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile modellenmesi için KNIME programında oluşturulan makine öğrenme modelinin şeması Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) - Makine Öğrenmesi Şeması

Kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı modellerine paralel olarak, kurulan model hem geleneksel bölme hem de k katlamalı çapraz validasyon yöntemleri ile öğrenme gerçekleştirilerek modelin doğruluk oranı ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

Row ID	Prediction (SMER) - Geleneksel Bölme
R^2	0.902
mean absolut...	0.029
mean square...	0.002
root mean sq...	0.042
mean signed ...	0.001
mean absolut...	0.026
adjusted R^2	0.902

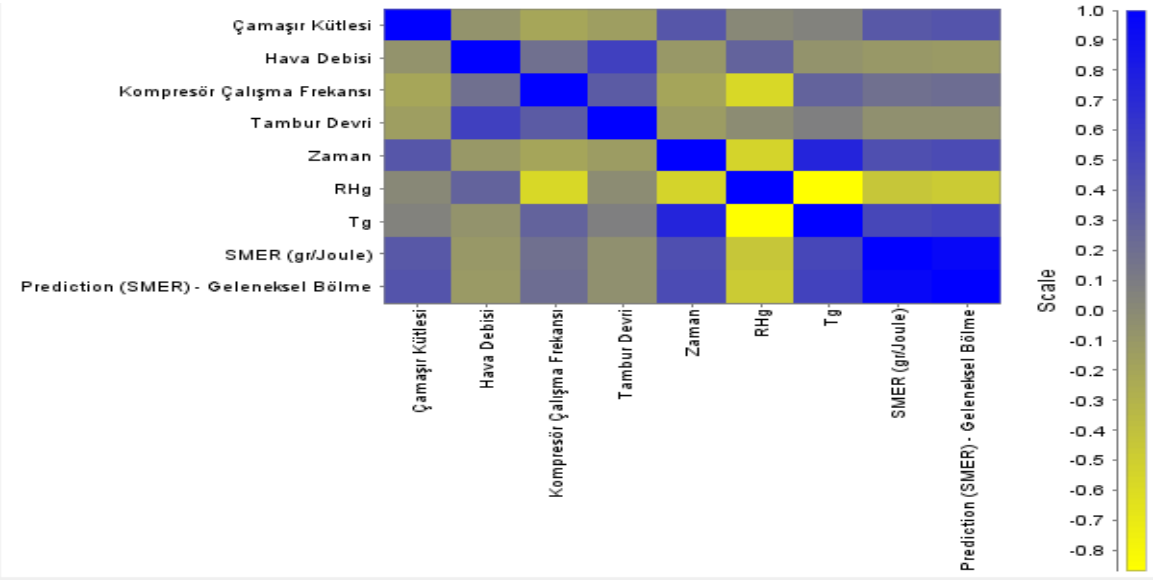
Şekil 5.25 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) - Geleneksel Bölme Yöntemi Doğruluk oranı

Şekil 5.25'te geleneksel bölme yöntemi ile ayrılan veri setinin gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile kurulan modelinin R kare değeri ve standart sapması gösterilmektedir. Model %90.2 doğruluk, 0.042 standart sapma değeri ile spesifik nem alma oranını modelleyebilmektedir.

Row ID	Prediction (SMER) - k katlamalı çapraz validasyon
R^2	0.902
mean absolut...	0.029
mean square...	0.002
root mean sq...	0.042
mean signed ...	0.001
mean absolut...	0.026
adjusted R^2	0.902

Şekil 5.26 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) - K katlamalı Çapraz Validasyon Doğruluk Oranı

Aşırı öğrenme kontrolü yapmak amacıyla k katlamalı çapraz validasyon yöntemi ve gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile kurulan modelin R kare değeri ve standart sapması Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Model doğruluk oranı %90.2 ve standart sapma değeri 0.042 olarak hesaplanmıştır. Geleneksel bölme yöntemi ve k katlamalı çapraz validasyon yöntemleri ile eğitilen gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile modellenen spesifik nem alma oranı makine öğrenme modeli her iki yöntemdeki doğruluk ve standart sapma değerleri birbirine çok yakın olduğu için makine öğrenme modelinin aşırı öğrenme eğilimine girmeden, girdi sağlanan veri kümesi ile modellenebildiği görülmüştür.



Şekil 5.27 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) - Korelasyon Matrisi

Şekil 5.27'de spesifik nem alma hızı için oluşturulan modele etki eden girdilerin korelasyon matrisi gösterilmektedir. İstatiksel yöntemler ile paralel olarak spesifik nem alma hızına en çok etki eden parametrelerin, kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi, tambur girişi havanın bağıl nemi ve tambur giriş sıcaklığının olduğu görülmektedir.

6
SİSTEM TASARIM PARAMETRELERİ OPTİMİZASYON MODELİ ÇIKTILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1 Sistem Tasarım Parametreleri Optimizasyon Modeli Doğruluk Oranlarının İncelenmesi

Bu doktora tezinde, ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde sistem tasarım parametreleri optimizasyon modeli oluşturma çalışmaları kapsamında istatistiksel analiz yöntemleri ve makine öğrenmesi analiz yöntemleri ile ilgili modeller kurulmuştur. Oluşturulan bu modellerin doğruluk oranları, kurutma çevrimi içerisinde farklı zaman aralıkları için değerlendirilmiştir.

Tablo 6.1'de ısı pompalı çamaşır kurutma sistemlerinde tambur içi kütle transfer katsayısı için oluşturulan modellerin doğruluk oranları paylaşılmıştır. İstatistiksel analiz yöntemlerinin doğruluğu ortalama %5.35, gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması kullanılarak yapılan makine öğrenme modeli doğruluk oranı ortalama %1.85 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6.1 Kütle Transfer Katsayısı Model Doğruluk Oranları

Anlık Süre $[dk]$	**Kurutma Kapasitesi** $[kg]$	**Hava Debisi** $[lt/s]$	**Tambur Devri** $[rpm]$	**Kompresör Frekansı** $[Hz]$	**Deneysel k** $[m/s]$	**İstatiksel Modelleme Yöntemi k** $[m/s]$	**Makine Öğrenmesi Modeli k** $[m/s]$	**İstatistiksel Model Hata Oranı** [%]	**Makine Öğrenmesi Modeli Hata Oranı** [%]
20. dk	2	66	42	35	4.16	3.87	4.05	7.0%	2.6%
60. dk	5	66	52	35	2.87	2.94	2.91	-2.4%	-1.4%
80. dk	8	66	52	35	0.96	0.89	0.95	7.3%	1.0%
100. dk	8	66	52	35	0.85	0.81	0.83	4.7%	2.4%

Tablo 6.2'de ısı pompalı çamaşır kurutma sistemlerinde tambur içi taşınım ısı transfer katsayısı için oluşturulan modellerin doğruluk oranları paylaşılmıştır. İstatistiksel analiz yöntemlerinin doğruluğu ortalama %3.9, gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması kullanılarak yapılan makine öğrenme modeli doğruluk oranı ortalama %2.35 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6.2 Isı Transfer Katsayısı Model Doğruluk Oranları

Anlık Süre $[dk]$	**Kurutma Kapasitesi** $[kg]$	**Hava Debisi** $[lt/s]$	**Tambur Devri** $[rpm]$	**Kompresör Frekansı** $[Hz]$	**Deneysel h** $[W/m^2K]$	**İstatiksel Modelleme Yöntemi h** $[W/m^2K]$	**Makine Öğrenmesi Modeli h** $[W/m^2K]$	**İstatistiksel Model Hata Oranı** [%]	**Makine Öğrenmesi Modeli Hata Oranı** [%]
20. dk	2	66	42	35	897.24	885.65	890.24	1.3%	0.8%
60. dk	5	66	42	35	160.62	164.35	162.35	-2.3%	-1.1%
80. dk	8	66	42	35	75.03	79.25	77.89	-5.6%	-3.8%
100. dk	8	66	42	35	74.22	74.28	72.25	-6.5%	-3.7%

Tablo 6.3'te ısı pompalı çamaşır kurutma sistemlerinde spesifik nem alma hızı için oluşturulan modellerin doğruluk oranları paylaşılmıştır. İstatistiksel analiz yöntemlerinin doğruluğu ortalama %3.7, gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması kullanılarak yapılan makine öğrenme modeli doğruluk oranı ortalama %0.98 olarak hesaplanmıştır.

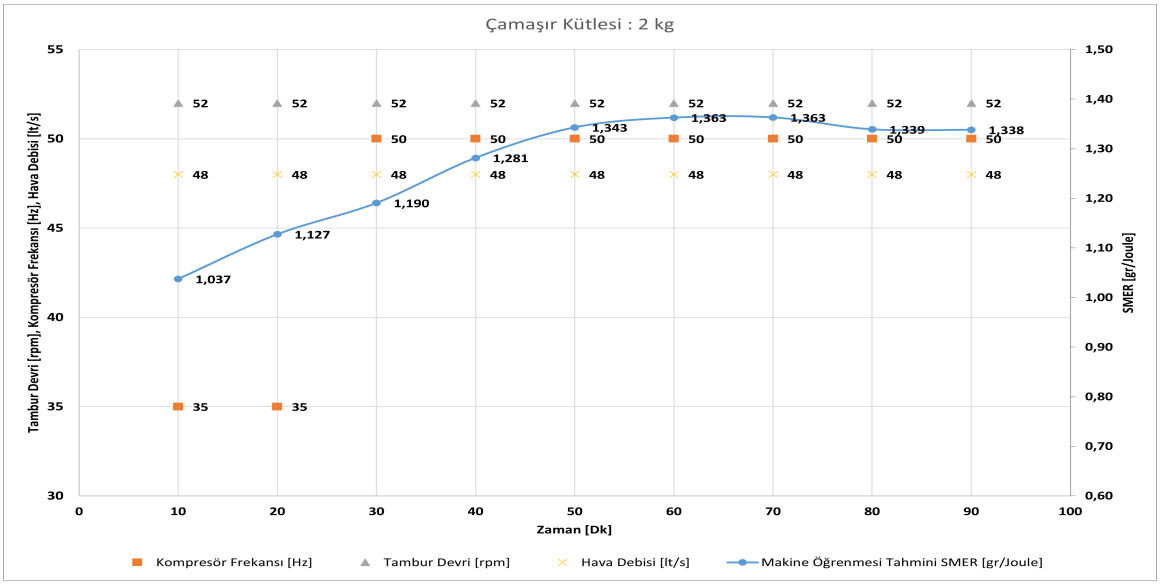
Tablo 6.3 Spesifik Nem Alma Hızı (SMER) Model Doğruluk Oranları

Anlık Süre $[dk]$	**Kurutma Kapasitesi** $[kg]$	**Hava Debisi** $[lt/s]$	**Tambur Devri** $[rpm]$	**Kompresör Frekansı** $[Hz]$	**Deneysel SMER** $[gr/Joule]$	**İstatiksel Modelleme Yöntemi SMER** $[gr/Joule]$	**Makine Öğrenmesi Modeli h** $[gr/Joule]$	**İstatistiksel Model Hata Oranı** [%]	**Makine Öğrenmesi Modeli Hata Oranı** [%]
20. dk	2	66	42	35	0.960	0.922	0.945	4.0%	1.6%
60. dk	5	66	52	35	1.288	1.330	1.295	-3.3%	-0.5%
80. dk	8	66	52	35	1.195	1.256	1.202	-5.1%	-0.6%
100. dk	8	66	52	35	1.260	1.292	1.275	-2.5%	-1.2%

6.2 Sistem Tasarım Parametrelerinin Optimizasyon Modeli Algoritma Önerilerinin İncelenmesi

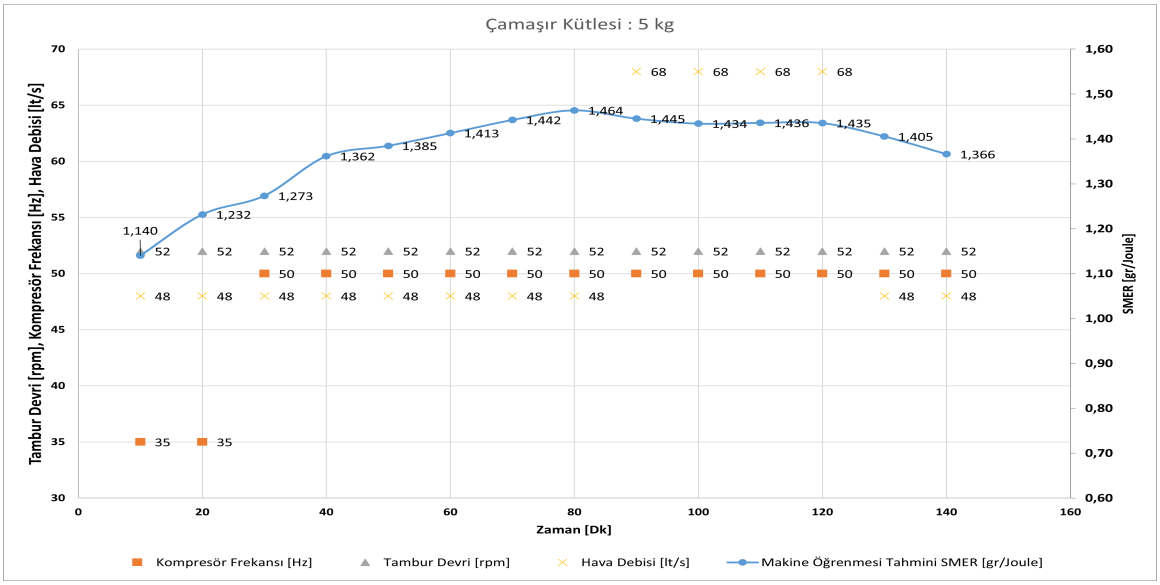
Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde enerji tüketimini azaltmak için birim harcanan iş başına çamaşır üzerinden kaldırılan nem miktarı en önemli parametredir. Bu parametre literatürde SMER olarak bilinmektedir. Bu doktora tez çalışmasında da ilgili parametre hem istatiksel analiz yöntemleri hem de makine öğrenme algoritmaları kullanılarak modellenmiştir.

Makine öğrenme algoritmalarından olan gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması ile oluşturulan optimizasyon modelinde 2 kg, 5 kg ve 8 kg çamaşır kütleleri için maksimum SMER değerini sağlayan optimum sistem parametreleri aşağıdaki grafiklerde paylaşılmıştır.



Şekil 6.1 2 kg Çamaşır Kütlesini Kurutmak İçin Sistem Parametreleri Değişimi

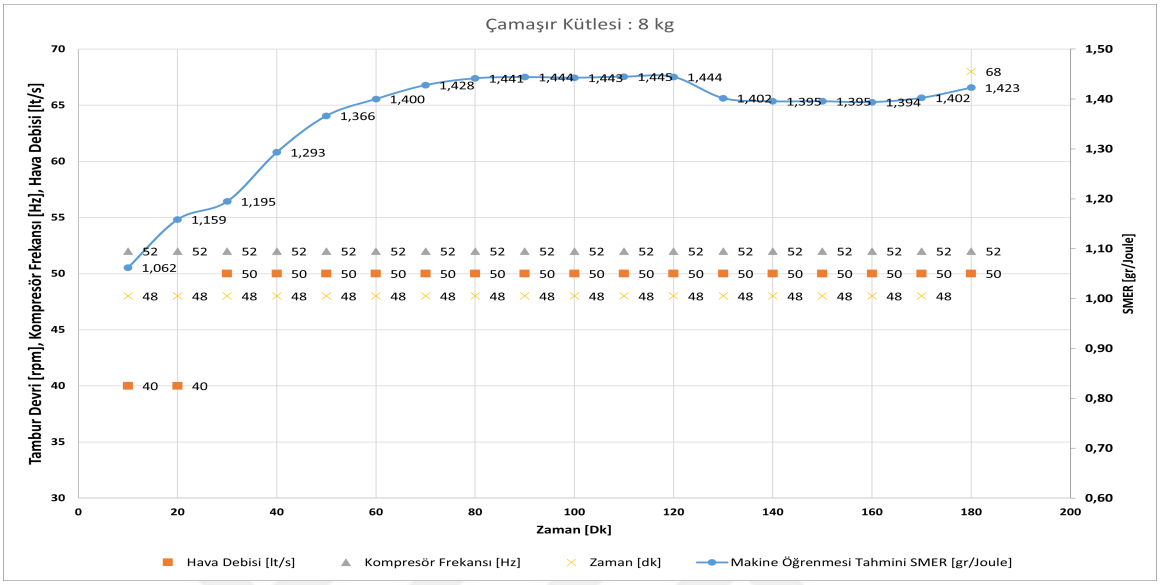
Şekil 6.1'de 2 kg çamaşır kütlesi için maksimum SMER değerini sağlayan sistem parametreleri paylaşılmıştır. Tüm kurutma çevrimi boyunca tambur devri 52 rpm, hava debisi ise 48 lt/s sabit kalmıştır. Kompresör frekansı ise kurutmanın ilk 20 dakikasında 35 Hz, 20. dakika sonrasında ise 50 Hz olarak model tarafından önerilmiştir. Kurutuma çevrimi boyunca ortalama spesifik nem alma hızı 1.265 gr/Joule olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.2 5 kg Çamaşır Kütlesini Kurutmak İçin Sistem Parametreleri Değişimi

Şekil 6.2'de 5 kg çamaşır kütlesi için maksimum SMER değerini sağlayan sistem parametreleri paylaşılmıştır. Tüm kurutma çevrimi boyunca tambur devri 52 rpm olarak sabit kalmıştır. Hava debisi ise kurutma çevriminin ilk 80 dakikasında 48 lt/s, 90-120 dakikalar arasında 68 lt/s, 120. dakikadan çevrim sonuna kadar 48 lt/s

debi değerleri için maksimum SMER değerine ulaşmıştır. Kompresör frekansı ise 2 kg çamaşır kütlesini kurutan algoritmaya paralel olarak kurutmanın ilk 20 dakikasında 35 Hz, 20. dakika sonrasında ise 50 Hz olarak model tarafından önerilmiştir. Kurutuma çevrimi boyunca ortalama spesifik nem alma hızı 1.374 gr/Joule olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.3 8 kg Çamaşır Kütlesini Kurutmak İçin Sistem Parametreleri Değişimi

Şekil 6.3'de 8 kg çamaşır kütlesi için maksimum SMER değerini sağlayan sistem parametreleri paylaşılmıştır. Tüm kurutma çevrimi boyunca tambur devri 52 rpm olarak sabit kalmıştır. Hava debisi ise kurutma çevriminin ilk 180 dakikasında 48 lt/s, 180. dakikadan çevrim sonuna kadar 68 lt/s debi değerleri için maksimum SMER değerine ulaşılmıştır. Kompresör frekansı ise kurutma çevriminin ilk 20 dakikasında 40 Hz, 20. dakika sonrasında ise 50 Hz olarak model tarafından önerilmiştir. Kurutuma çevrimi boyunca ortalama spesifik nem alma hızı 1.363 gr/Joule olarak hesaplanmıştır.

Isı pompalı çamaşır kurutma makinalarında genellikle tambur dönüşü ve hava debisi tek motor üzerinden bir kasnak vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda enerji verimli ürünler üretmek için bu motorlar değişken devirli olarak kullanılmaktadır. 48 lt/s hava debisi ve 52 rpm tambur devrini aynı anda sağlamak için yeni bir kasnak üretimi gerçekleştirilerek, makine öğrenme yöntemi ile elde edilen algoritma, 8 kg çamaşır kütlesi için test edilmiştir.

Tablo 6.4 Makine Öğrenme Yöntemi ile Oluşturulan Algoritmanın Enerji Tüketim Değeri Değişimi

Algoritma	Program Süresi [dk]	Kurutma Sonu Nem Oranı [%]	Enerji Tüketimi [kWh]	Enerji Tüketimi Değişimi [%]
Referans Algoritma	235	1.9	1.058	-
Makine Öğrenme Yöntemi ile Elde Edilen Yeni Algoritma	240	1.9	1.005	-5.0%

Tablo 6.4'te ilgili algoritmanın sonuçları paylaşılmıştır. Referans algoritmaya göre enerji tüketiminde %5 bir azalma görülmüştür. İlgili sonuçlar 3 tekrarlı testler sonucunda elde edilmiştir.

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Bu doktora tezinde, ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde yük kapasitesi, tambur devri, hava debisi ve kompresör çalışma frekansının tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayılarına ve spesifik nem alma hızına olan etkisi araştırılmıştır. Kurutma sistemine etki eden tüm parametrelerin detaylı olarak analizi gerçekleştirilmiştir. Taşınım ısı transfer katsayısı, kütle transfer katsayısı ve SMER değerleri yarı ampirik olarak modellenmiştir. Bu modellere ek olarak günümüzde kullanımı gittikçe artan makine öğrenme yöntemleri incelenmiş, nicel girdi ve nicel çıktı bulunan sistemlerde en çok kullanılan gradyanı arttırılmış karar ağaçları yöntemi ile taşınım ısı transfer katsayısı, kütle transfer katsayısı ve spesifik nem alma hızı makine öğrenmesi modeli kurulmuştur.

Literatür araştırması sonucunda kurutma makinalarında farklı tambur devri, yük kapasitesi, hava debi değeri değişimlerinin kurutma performansına olan etkisinin incelendiği görülmüştür. Yuhui Wei ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı çalışmada [5] bacalı kurutma makinalarında kurutulan çamaşırların poroz yapı içerisindeki ısı ve kütle transferi incelenmiştir. Yuhui Wei ve arkadaşları 2019 yılında gerçekleştirdiği çalışmada ise [6] farklı tekstil tiplerinin, kurutma makinesi tambur içerisindeki hareketinin kurutma performansına etkisi incelenmiştir. Bing-Hung Lee ve arkadaşlarının 2019 yılında yayınladığı çalışmada [8] ısı pompası kurutma makinalarının sistem matematiksel modeli oluşturulmuş, sistemin zamana bağlı SMER ve COP değeri değişimi modellenmiştir. Xinchen Yu ve arkadaşlarının 2021 yılında yayınladığı çalışmada [9] kurutma makinalarında tekstil hareketinin kurutma performansına olan etkisi araştırılmıştır. Novak ve arkadaşlarının 2019 yılında yayınladığı çalışmada [14], kurutma yükü kapasitesi ve tambur hızının kurutma performansına olan etkisi incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, kurutma makinalarında farklı tambur devri, yük kapasitesi, hava debi değeri değişimlerinin kurutma performansına olan etkisinin

incelendiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar genellikle kurutma süresi, enerji tüketimi değişimleri üzerine odaklanmıştır. Bu incelemeler içerisinde kütle ve ısı transferi üzerine yaklaşımlarda bulunulmuş fakat tambur içerisindeki taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayısı ve kütle transfer katsayısının kurutma çevrimi boyunca anlık olarak değişiminin incelenmediği görülmüştür. Buna ek olarak son yıllarda enerji verimli ürünlerin artmasına bağlı olarak kurutma makinaları sistemlerinde değişken devirli kompresörlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. İlgili literatür araştırmasında değişken devirli kompresör uygulamalarının olmadığı görülmüştür.

Bu doktora tezinde ise tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısının, çamaşır kütlesi, hava debisi, tambur devri ve kompresör çalışma frekansı değişimine göre anlık olarak değişimi incelenmiş, ilgili parametre değişimlerinin spesifik nem alma hızına olan etkisi değerlendirilmiştir. Tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı ve spesifik nem alma hızının istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak yarı ampirik denklemleri oluşturulmuş, sistem tasarım parametrelerinin optimizasyon modeli için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır.

Kurulan deney düzeneğinde literatürde ilk defa kurutma makinalarında hava debisi çevrim boyunca anlık olarak ölçülmüştür. Isı Pompalı kurutma makinalarında literatürde ilk defa, tambur devri, hava debisi, kurutma kapasitesi ve kompresör çalışma frekansı değişimi ile tambur içi kütle ve taşınım ısı transfer katsayısı değişimi yarı ampirik model ile oluşturulmuş, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak sistem tasarım parametrelerinin optimizasyon modeli oluşturulmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda,

- Hava debisi değişiminin tambur içindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısına etkisi incelenmiş, tambur içerisine aktarılan havanın debisi arttıkça kütle transfer katsayısının da arttığı görülmüştür. Çevrimin başlangıcında çamaşırlar içeridikleri yüksek nem seviyesi sebebiyle tambur içerisinde kapladığı yüzey alanının düşük olduğu gözlemlenmiştir.Ancak kurutmanın 60. dakikasından itibaren çamaşırlar yüzeyindeki nemi kaybederek ağırlığını kaybetmiş, bunun sonucunda da yüzeyleri tambur içerisinde daha da açılarak havanın geçtiği yüzey alanı azaltmıştır. Yapılan testler sonucunda kütle transfer katsayısı üç farklı hava debisi koşulu için de kurutmanın 60. dakikasından itibaren lineer bir seviyeye ulaşmıştır. Bununla birlikte çevrimin sonuna kadar hava debisine bağlı olarak kütle transfer katsayısının değişimi ayırt edilebilmektedir. En yüksek kütle transfer katsayısına 68 lt/s hava debisinde ulaşılmıştır. Kütle transfer katsayısı değişimine paralel olarak taşınım ısı transfer katsayısı değişiminde de hava debisinin artması, taşınım ısı transfer katsayısının da artmasına neden

olmuştur.

- Kompresör çalışma frekansı değişiminin tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transferine etkisi incelenmiş, kurutma fazının ilk 10 dakikasında en yüksek kütle transfer katsayısına, kompresör çalışma frekansı 50 Hz olduğunda ulaşılmıştır. Çevrimin 10. dakikasından itibaren ise tambur içerisindeki kütle transfer katsayısı en yüksek olduğu değerlere kompresör çalışma frekansının 35 Hz olduğu koşulda ulaşılmıştır. En düşük kütle transfer katasayısına ise kompresör çalışma frekansı değeri 40 Hz olduğu koşulda ulaşılmıştır. Kütle transfer katsayısına paralel olarak kurutma çevriminin ilk 10 dakikasında en yüksek taşınım ısı transfer katsayısı değerine kompresör çalışma frekansının 50 Hz olduğu koşulda ulaşılmış, 10. dakikadan sonra ise en yüksek kütle transfer katsayısı değerine kompresör çalışma frekansı 35 Hz olduğu test koşulunda ulaşılmıştır. En düşük taşınım ısı transfer katsayısı değerine ise kompresör çalışma frekansının 40 Hz olduğu koşulda ulaşılmıştır.

- Tambur devir değişiminin tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısın etkisi incelenmiş, 42 rpm, 52 rpm ve 62 rpm olarak oluşturulan 3 farklı tambur devri için kütle transfer katsayıları birbirine yakın olsa da en yüksek kütle transfer katsayısına 62 rpm tambur devrinde ulaşılmıştır. Tambur devri, çamaşırların kurutma makinası içerisindeki dağılımına doğrudan etki etmektedir. Düşük tambur devirlerinde çamaşırlar literatürde de paylaşıldığı gibi kayma hareketini gerçekleştirir. Bu hareket içerisinde çamaşırların tambur içerisindeki hareketi sınırlıdır. Bunun sonucunda da tambur içerisindeki kütle transfer katsayısı en düşük seviyeye 42 rpm tambur devrinde ulaşmıştır. Kütle transfer katsayısına benzer olarak en yüksek taşınım ısı transfer katsayısına 62 rpm tambur devrinde ulaşılmıştır. Kurutma çevriminin 60 ile 140. dakikaları arasında taşınım ısı transfer katsayıları her üç tambur devri içinde birbirine çok yakındır.

- Kurutma kapsitesi değişiminin tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayısına etkisi incelenmiş, kurutma kapasitesinin kütle transfer katsayısına doğrudan etki ettiği görülmüştür. En yüksek kütle transfer katsayısına kurutma kapasitesi 2 kg olduğu durumda ulaşılmıştır. Birim tambur hacmi içerisinde kurutulacak çamaşırların kapasitesinin değişimi kütle ve taşınım ısı transfer katsayısına doğrudan etki etmektedir. Kurutma hava debisi düşük kurutma kapasitelerinde tekstil yüzeyine daha çok nüfuz ettiği için birim zamanda tekstil üzerindeki etkileşimi daha fazla olmaktadır. Kurutma kapasitesi arttıkça kütle transfer katsayısının da radikal olarak azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük kütle transfer katsayısı değerine 8 kg kurutma kapasitesinde ulaşılmıştır. Kütle transfer katsayısına paralel olarak kurutma kapasitesinin 2 kg olduğu durumda

tambur içerisindeki taşınım ısı transfer katsayısı değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. En düşük taşınım ısı transfer katsayısına ise 8 kg kurutma kapasitesinde ulaşılmıştır.

- Hava debisi değişiminin spesifik nem alma hızına etkisi incelenmiş, kurutma çevriminin başlangıcından bitişine kadar geçen sürede hava debisinin 48 lt/s olduğu koşulda en iyi SMER değerine ulaşılmıştır. Kurutmanın ilk 60 dakikalık periyodunda hava debisine bağlı olarak SMER değeri %30 farklılık gösterirken, 60. dakika sonrasında SMER değerinin hava debisine bağlı olarak değişimi 3 farklı koşul için de benzerdir. Kurutmanın son fazında (120. dk ve sonrası) 68 lt/s hava debisi değerinde SMER değerinin ciddi azalış gösterdiği görülmektedir. Kurutma çevrim sonlarında tekstilin iç yüzeyindeki nemin uzaklaştırılması sırasında hava debisinin yarattığı etki, hava debisini oluşturmak için harcanan fan gücüne kıyasla daha az olması sebebiyle SMER değerinde düşüş gözlemlenmiştir.

- Kompresör devir değişiminin spesifik nem alma hızına etkisi incelenmiş, kurutma çevriminin 90 dakikalık periyodu içerisinde en yüksek SMER değerine kompresör çalışma frekansının 50 Hz olduğu koşulda ulaşılmıştır. 35 Hz ve 40 Hz kompresör frekans değerlerinde benzer SMER değerleri elde edilmiştir. Yüksek kompresör çalışma frekanslarında sistem fazla güç tüketimi gerçekleştirse de birim nem alma hızındaki pozitif etkisi en yüksek SMER değerine 50 Hz'de ulaşılmasına sebep olmuştur.

- Tambur devir değişiminin spesifik nem alma hızına etkisi incelenmiş, kurutma çevriminin tüm fazlarında en yüksek SMER değerine tambur devri 52 rpm olduğunda ulaşılmıştır. 42 rpm ve 62 rpm tambur devirlerinde SMER değerleri benzer olarak görülmektedir.

- Kurutma kapsitesi değişiminin spesifik nem alma hızına etkisi incelenmiş, Yapılan deneyler sonucunda en yüksek SMER değerine kurutma kapasitesinin 5 kg olduğu durumda ulaşılmıştır. En düşük SMER değeri ise 2 kg kurutma kapasitesinde görülmüştür.

- Deneyler sonucunda ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinin istatistiksel analiz yöntemleri ile optimizasyon modeli oluşturulmuştur.

- Kütle transfer katsayısı modeli için R kare değerinin %94.24, standart sapma değerinin ise 0,183 olduğu görülmektedir. Model doğrultusunda kütle transfer katsayısı için yarı ampirik formül oluşturulmuştur.

- Taşınım ısı transfer katsayısı modeli için R kare değerinin %94.24, standart sapma değerinin ise 39,48 olduğu görülmektedir. Model doğrultusunda taşınım ısı transfer katsayısı için yarı ampirik formül oluşturulmuştur.

- Spesifik nem alma hızı modeli için R kare değerinin %86.96, standart sapma değerinin ise 0,05 olduğu görülmektedir. Model doğrultusunda spesifik nem alma oranı için yarı ampirik formül oluşturulmuştur.

- İstatistiksel analiz yöntemlerine ek olarak ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde kütle transfer katsayısı, taşınım ısı transfer katsayısı ve spesifik nem alma hızının gradyanı arttırılmış karar ağaaçları yöntemi kullanılarak makine öğrenme modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller, aşırı öğrenme eğiliminin kontrolü ile gerçekleştirilmiştir.

- Kütle transfer katsayısı için oluşturulan makine öğrenme modeli doğruluk oranı %99.1 ve standart sapma değeri 0.076 olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan korelasyon matrislerinde, istatiksel yöntemler ile paralel olarak kütle transfer katsayısına en çok etki eden parametrelerin, kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi ve tambur giriş sıcaklığının olduğu görülmektedir.

- Taşınım ısı transfer katsayısı için oluşturulan makine öğrenme modeli %98.9 doğruluk, 17.164 standart sapma değeri ile taşınım ısı transfer katsayısını modelleyebilmektedir. İstatiksel yöntemler ile paralel olarak kütle transfer katsayısına en çok etki eden parametrelerin, Kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi ve tambur giriş sıcaklığı olduğu görülmektedir.

- Spesifik nem alma hızı için oluşturulan makine öğrenme modeli %90.2 doğruluk, 0.042 standart sapma değeri ile spesifik nem alma oranını modelleyebilmektedir. İstatiksel yöntemler ile paralel olarak spesifik nem alma hızına en çok etki eden parametrelerin, kurutma kapasitesi, kompresör çalışma frekansı, program süresi, tambur girişi havanın bağıl nemi ve tambur giriş sıcaklığının olduğu görülmektedir.

- Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde sistem tasarım parametreleri optimizasyon modeli oluşturma çalışmaları kapsamında istatistiksel analiz yöntemleri ve makine öğrenmesi analiz yöntemleri ile ilgili modeller kurulmuştur. Oluşturulan bu modellerin doğruluk oranları kurutma çevrimi içerisinde farklı zaman aralıkları için değerlendirilmiştir.

- Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde tambur içi kütle transfer katsayısı için oluşturulan modellerin doğruluk oranları, istatistiksel analiz yöntemi için

ortalama %5.35, gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması kullanılarak yapılan makine öğrenme modeli için ise doğruluk oranı ortalama %1.85 olarak hesaplanmıştır.

- Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde tambur içi taşınım ısı transfer katsayısı için oluşturulan modellerin doğruluk oranları, istatistiksel analiz yöntemi için ortalama %3.9, gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması kullanılarak yapılan makine öğrenme modeli için ise doğruluk oranı ortalama %2.35 olarak hesaplanmıştır.

- Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde spesifik nem alma hızı için oluşturulan modellerin doğruluk oranları, istatistiksel analiz yöntemi için ortalama %3.7, gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması kullanılarak yapılan makine öğrenme modeli için ise doğruluk oranı ortalama %0.98 olarak hesaplanmıştır.

- Isı pompalı çamaşır kurutma makinelerinde enerji tüketimini azaltmak için birim harcanan iş başına çamaşır üzerinden kaldırılan nem miktarı en önemli parametredir. Bu parametre literatürde SMER olarak bilinmektedir. Makine öğrenme algoritmalarından olan gradyanı arttırılmış karar ağaçları algoritması ile oluşturulan optimizasyon modelinde 2 kg, 5 kg ve 8 kg çamaşır kütleleri için maksimum SMER değerini sağlayan optimum sistem parametreleri belirlenmiştir.

- Isı pompalı çamaşır kurutma makinalarında genellikle tambur dönüşü ve hava debisi tek motor üzerinden bir kasnak vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda enerji verimli ürünler üretmek için bu motorlar değişken devirli olarak kullanılmaktadır. 48 lt/s hava debisi ve 52 rpm tambur devrini aynı anda sağlamak için yeni bir kasnak üretimi gerçekleştirilerek, makine öğrenme yöntemi ile elde edilen algoritma, 8 kg çamaşır kütlesi için test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda referans algoritmaya göre enerji tüketiminde %5 bir azalma görülmüştür. İlgili sonuçlar 3 tekrarlı testler sonucunda elde edilmiştir.

7.2 Öneriler

Yürütülen çalışmanın literatüre ve uygulama alanına yaptığı katkının iyileştirilmesi ve pekiştirilmesi amacıyla aşağıda sunulan çalışmaların yapılmasının faydalı olacağı önerilmektedir:

- AB'nin farklı regülasyonlarla, küresel ısınma potansiyeli olan soğutkanların kullanımını kısıtladığı bilinmektedir. Buna ek olarak firmaların küresel ısınma

potansiyeli düşük, daha verimli soğutkanlar üzerine çalışmalar yaptığı takip edilmektedir. Bu nedenle, alternatif soğutkanlar için de bu çalışmaların yürütülmesi bu çalışmaya ek katkı sağlayacaktır.

- Son dönemde 3 boyutlu analizlerin uzun sürmesi ve tambur içerisindeki çamaşır hareketinin modellenmesinin yüksek verimli bilgisayarlarda bile kompleks yapı oluşturması sebebiyle 1 ve 2 boyutlu analiz programlarının kullanımı artmıştır. Bu çalışmada oluşturulan tambur içerisindeki kütle ve taşınım ısı transfer katsayılırının yarı ampirik modelleri 1 veya 2 boyutlu analiz programlarında tambur içerisindeki davranışı simüle etmesi mümkündür. Bu modellere ilgili formüllerin eklenerek daha yüksek doğruluk oranları ile ısı pompalı çamaşır makineleri için 1 veya 2 boyutlu modeller geliştirilebilir.
- Bu çalışmada kurutma kapasitesi, hava debisi, tambur devri ve kompresör çalışma frekansının etkisi incelenmiştir. Daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek için bu parametrelere ek olarak, farklı eşanjör tipleri, farklı kapileri boylarında bu çalışmalar zenginleştirilebilir.

Kaynakça

[1] S. Erdem, "The effects of fin-and-tube evaporator geometry on heat pump performance under dehumidifying conditions," *International Journal of Refrigeration*, vol. 57, pp. 35–45, 2015.

[2] C.-C. Wang, J.-S. Liaw, B.-C. Yang, "Airside performance of herringbone wavy fin-and-tube heat exchangers–data with larger diameter tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 5-6, pp. 1024–1029, 2011.

[3] S. Sanaye B. Niroomand, "Thermal-economic modeling and optimization of vertical ground-coupled heat pump," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 4, pp. 1136–1147, 2009.

[4] U. Akyol, A. Erhan Akan, A. Durak, "Simulation and thermodynamic analysis of a hot-air textile drying process," *The Journal of the Textile Institute*, vol. 106, no. 3, pp. 260–274, 2015.

[5] Y. Wei, J. Hua, X. Ding, "A mathematical model for simulating heat and moisture transfer within porous cotton fabric drying inside the domestic air-vented drum dryer," *The Journal of The Textile Institute*, vol. 108, no. 6, pp. 1074–1084, 2017.

[6] Y. Wei, Z. Su, Y. Zhang, P. Li, H. Yuan, "The effect of fabric movement on drying performance of the domestic drum dryer," *The Journal of The Textile Institute*, vol. 110, no. 7, pp. 1059–1071, 2019.

[7] Y. Wei, R. H. Gong, L. Ning, X. Ding, "Enhancing the energy efficiency of domestic dryer by drying process optimization," *Drying Technology*, vol. 36, no. 7, pp. 790–803, 2018.

[8] B.-H. Lee, R. A. Sian, C.-C. Wang, "A rationally based model applicable for heat pump tumble dryer," *Drying Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 691–706, 2019.

[9] X. Yu X. Ding, "The transverse motion of fabrics in domestic tumble dryers under different drying conditions," *Drying Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 35–51, 2021.

[10] L. Novak, B. Širok, M. Hočevar, P. Gatarić, "Influence of load mass and drum speed on fabric motion and performance of a heat pump tumble dryer," *Drying Technology*, vol. 39, no. 7, pp. 950–964, 2021.

[11] X. Yu, W. Cao, X. Ding, "The effects of fabric's mechanical properties on its motion and drying performance in a domestic tumble dryer," *Drying Technology*, vol. 39, no. 4, pp. 528–547, 2021.

[12] W. Bao, J. Shen, X. Ding, "The influence of mechanical action on felting shrinkage of wool fabric in the tumble dryer," *Textile Research Journal*, vol. 90, no. 21-22, pp. 2367–2375, 2020.

[13] P. Gatarić, B. Širok, M. Hočevar, L. Novak, "Modeling of heat pump tumble dryer energy consumption and drying time," *Drying technology*, vol. 37, no. 11, pp. 1396–1404, 2019.

[14] L. Novak, P. Gatarić, B. Širok, "Influence of drum inlet air conditions on drying process in a domestic tumble dryer," *Drying technology*, vol. 37, no. 6, pp. 781–792, 2019.

[15] A. Singh, J. Sarkar, R. Sahoo, "Energetic and exergetic performance simulation of open-type heat pump dryer with next-generation refrigerants," *Drying Technology*, vol. 38, no. 8, pp. 1011–1023, 2019.

[16] P. Boudreaux, K. R. Gluesenkamp, V. K. Patel, B. Shen, "Measurement and analysis of clothes dryer air leakage," *Drying Technology*, pp. 1–13, 2020.

[17] K. R. Gluesenkamp, P. Boudreaux, V. K. Patel, D. Goodman, B. Shen, "An efficient correlation for heat and mass transfer effectiveness in tumble-type clothes dryer drums," *Energy*, vol. 172, pp. 1225–1242, 2019.

[18] V. Yadav C. Moon, "Fabric-drying process in domestic dryers," *Applied energy*, vol. 85, no. 2-3, pp. 143–158, 2008.

[19] A. M. Bassily G. M. Colver, "Correlation of the area-mass transfer coefficient inside the drum of a clothes dryer," *Drying Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 919–944, 2003.

[20] J. Deans, "The modelling of a domestic tumbler dryer," *Applied thermal engineering*, vol. 21, no. 9, pp. 977–990, 2001.

[21] S. Prasertsan, P. Saen-Saby, P. Ngamsritrakul, G. Prateepchaikul, "Heat pump dryer part 1: Simulation of the models," *International Journal of Energy Research*, vol. 20, no. 12, pp. 1067–1079, 1996.

[22] S. Prasertsan, P. Saen-Saby, P. Ngamsritrakul, G. Prateepchaikul, "Heat pump dryer part 2: Results of the simulation," *International Journal of Energy Research*, vol. 21, no. 1, pp. 1–20, 1997.

[23] S. Prasertsan, P. Saen-Saby, P. Ngamsritrakul, G. Prateepchaikul, "Heat pump dryer part 3: Experimental verification of the simulation," *International journal of energy research*, vol. 21, no. 8, pp. 707–722, 1997.

[24] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, *et al.*, *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley New York, 1996, vol. 6.

[25] A. Lambert, F. Spruit, J. Claus, "Modelling as a tool for evaluating the effects of energy-saving measures. case study: A tumbler drier," *Applied Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 33–47, 1991.

[26] D. C. Montgomery G. C. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons, New York, 2010, vol. 5.

[27] D. Hand, H. Mannila, P. Smyth, *Principles of Data Mining* (Adaptive Computation and Machine Learning series). MIT Press, 2001, ISBN: 9780262082907. [Online]. Available: `https://books.google.com.tr/books?id=NtSMEAAAQBAJ`.

[28] P. Langley, *Elements of machine learning*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 1996, vol. 1.

[29] J. R. Quinlan, *Chapter 2 - Constructing Decision Trees*, J. R. Quinlan, Ed. San Francisco (CA): Morgan Kaufmann, 1993, pp. 17–26, ISBN: 978-0-08-050058-4. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050058-4.50007-3.

[30] M. Dunham, *Data Mining: Introductory And Advanced Topics*. Pearson Education, 2006, ISBN: 9788177587852. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=O6F9iwsqZQwC.

[31] J. Han, J. Pei, M. Kamber, *Data Mining: Concepts and Techniques* (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems). Elsevier Science, 2011, ISBN: 9780123814807. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=pQws07tdpjoC.

[32] T. Mitchell, *Machine Learning* (McGraw-Hill series in Computer Science). McGraw-Hill Education (India) Private Limited, 1997, ISBN: 9781259096952. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=ifdcswEACAAJ.

[33] G. Bonaccorso, *Machine Learning Algorithms: Reference Guide for Popular Algorithms for Data Science and Machine Learning*. Packt Publishing, 2017, ISBN: 9781523112210. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=knugtAEACAAJ.

[34] L. Breiman, "Statistical modeling: The two cultures (with comments and a rejoinder by the author)," *Statistical science*, vol. 16, no. 3, pp. 199–231, 2001.

[35] J. H. Friedman, "Greedy function approximation: A gradient boosting machine," *Annals of statistics*, pp. 1189–1232, 2001.

[36] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson India Education Services Pvt. Limited, 2016, ISBN: 9789332570313. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=jiCXtQEACAAJ.

A İSTATİSTİKSEL ANALİZ MODEL VERİLERİ

A.1 Kütle Transfer Katsayısı Model Verileri

Varyansların Analizi

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	22	142,340	6,47001	193,53
Kapasite [kg]	1	0,212	0,21170	6,33
Hava Debisi [lt/sn]	1	0,347	0,34672	10,37
Kompresör Devri [Hz]	1	1,088	1,08774	32,54
Tambur Devri [rpm]	1	0,786	0,78599	23,51
Zaman [dk]	1	0,236	0,23585	7,05
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	2,329	2,32851	69,65
Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,411	0,41105	12,30
Kapasite [kg]*Zaman [dk]	1	0,981	0,98121	29,35
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,326	0,32562	9,74
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,143	0,14265	4,27
Hava Debisi [lt/sn]*Kompresör Devri [Hz]	1	7,817	7,81688	233,82
Hava Debisi [lt/sn]*Zaman [dk]	1	4,771	4,77086	142,71
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,566	0,56615	16,93
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	1,965	1,96541	58,79
Kompresör Devri [Hz]*Zaman [dk]	1	3,809	3,80869	113,93
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,312	0,31232	9,34
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,537	0,53696	16,06
Tambur Devri [rpm]*Zaman [dk]	1	0,357	0,35682	10,67
Tambur Devri [rpm]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,789	0,78852	23,59
Zaman [dk]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	4,723	4,72342	141,29
Zaman [dk]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	1,918	1,91780	57,37
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	2,976	2,97645	89,03
Error	260	8,692	0,03343	
Total	282	151,032		

Source	P-Value
Regression	0,000
Kapasite [kg]	0,012
Hava Debisi [lt/sn]	0,001
Kompresör Devri [Hz]	0,000
Tambur Devri [rpm]	0,000
Zaman [dk]	0,008
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,001
Kapasite [kg]*Zaman [dk]	0,000
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,002
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,040
Hava Debisi [lt/sn]*Kompresör Devri [Hz]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]*Zaman [dk]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Kompresör Devri [Hz]*Zaman [dk]	0,000
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,002
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Tambur Devri [rpm]*Zaman [dk]	0,001
Tambur Devri [rpm]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Zaman [dk]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Zaman [dk]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Error	
Total	

A.2 Isı Transfer Katsayısı Model Verileri

Varyansların Analizi

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	22	6636227	301647	193,53
Kapasite [kg]	1	9870	9870	6,33
Hava Debisi [lt/sn]	1	16165	16165	10,37
Kompresör Devri [Hz]	1	50713	50713	32,54
Tambur Devri [rpm]	1	36644	36644	23,51
Zaman [dk]	1	10996	10996	7,05
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	108561	108561	69,65
Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	19164	19164	12,30
Kapasite [kg]*Zaman [dk]	1	45746	45746	29,35
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	15181	15181	9,74
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	6651	6651	4,27
Hava Debisi [lt/sn]*Kompresör Devri [Hz]	1	364441	364441	233,82
Hava Debisi [lt/sn]*Zaman [dk]	1	222429	222429	142,71
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	26395	26395	16,93
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	91632	91632	58,79
Kompresör Devri [Hz]*Zaman [dk]	1	177570	177570	113,93
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	14561	14561	9,34
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	25034	25034	16,06
Tambur Devri [rpm]*Zaman [dk]	1	16636	16636	10,67
Tambur Devri [rpm]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	36763	36763	23,59
Zaman [dk]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	220217	220217	141,29
Zaman [dk]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	89412	89412	57,37
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	138769	138769	89,03
Error	260	405247	1559	
Total	282	7041474		

Source	P-Value
Regression	0,000
Kapasite [kg]	0,012
Hava Debisi [lt/sn]	0,001
Kompresör Devri [Hz]	0,000
Tambur Devri [rpm]	0,000
Zaman [dk]	0,008
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,001
Kapasite [kg]*Zaman [dk]	0,000
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,002
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,040
Hava Debisi [lt/sn]*Kompresör Devri [Hz]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]*Zaman [dk]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Kompresör Devri [Hz]*Zaman [dk]	0,000
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,002
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Tambur Devri [rpm]*Zaman [dk]	0,001
Tambur Devri [rpm]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Zaman [dk]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Zaman [dk]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Error	
Total	

A.3 Spesifik Nem Alma Oranı Model Verileri

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	19	4,69371	0,247037	89,88
Kapasite [kg]	1	0,11336	0,113363	41,25
Hava Debisi [lt/sn]	1	0,16544	0,165439	60,19
Kompresör Devri [Hz]	1	0,08666	0,086656	31,53
Tambur Devri [rpm]	1	0,15973	0,159734	58,12
Zaman [dk]	1	0,28559	0,285588	103,91
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,14187	0,141872	51,62
Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,04659	0,046594	16,95
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,15551	0,155507	56,58
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,10177	0,101765	37,03
Hava Debisi [lt/sn]*Kompresör Devri [Hz]	1	0,01651	0,016506	6,01
Hava Debisi [lt/sn]*Zaman [dk]	1	0,55047	0,550469	200,28
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,14300	0,142999	52,03
Kompresör Devri [Hz]*Zaman [dk]	1	0,30343	0,303426	110,40
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,04445	0,044451	16,17
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,12660	0,126601	46,06
Tambur Devri [rpm]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,12400	0,123999	45,12
Tambur Devri [rpm]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,16399	0,163990	59,67
Zaman [dk]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	1	0,45330	0,453298	164,93
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	1	0,15050	0,150497	54,76
Error	256	0,70362	0,002748	
Total	275	5,39732		

Source	P-Value
Regression	0,000
Kapasite [kg]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]	0,000
Kompresör Devri [Hz]	0,000
Tambur Devri [rpm]	0,000
Zaman [dk]	0,000
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Kapasite [kg]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]*Kompresör Devri [Hz]	0,015
Hava Debisi [lt/sn]*Zaman [dk]	0,000
Hava Debisi [lt/sn]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Kompresör Devri [Hz]*Zaman [dk]	0,000
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Kompresör Devri [Hz]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Tambur Devri [rpm]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Tambur Devri [rpm]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Zaman [dk]*Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]	0,000
Tambur Giriş Bağıl Nemi [%]*Tambur Giriş Sıcaklığı [K]	0,000
Error	
Total	

B
PYTHON PROGRAM KODLARI

B.1 Python Programında Yazılan Kodlar

```
from __future__ import unicode_literals
from PyQt5.QtWidgets import *
from PyQt5.uic import loadUi
from matplotlib.backends.backend_qt5agg import (NavigationToolbar2QT as NavigationToolbar)
import pandas as pd
import CoolProp
import matplotlib.pyplot as plt
import CoolProp.Plots
from CoolProp.Plots import PropertyPlot
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
from CoolProp.Plots import SimpleCompressionCycle
import numpy as np
import datetime
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import mplcursors
from xlwt import Workbook
import xlrd
import io
from tkinter import Tk
from tkinter.filedialog import askopenfilename
from CoolProp.HumidAirProp import HAPropsSI
import os
import CoolProp
from CoolProp.Plots import PropertyPlot
from CoolProp.Plots import SimpleCompressionCycle
from matplotlib.widgets import Slider, Button, RadioButtons
from matplotlib.gridspec import GridSpec
import plotly.express as px
```

```
import plotly.graph_objects as go
import plotly.graph_objects as go
from plotly.subplots import make_subplots
#DATA READ - FAN MOTOR KOMPRESOR OZGUL NEM
nem=pd.read_excel("Test-290.xlsx")
fan=pd.read_excel("Test_fan_290.xlsx")
tambur=pd.read_excel("Test_tambur_290.xlsx")
komp=pd.read_excel("Test_komp_290.xlsx")
nem
nem.iloc[:, 2]=round(nem.iloc[:, 2],2)
## Columns Name Changer
fan=fan.rename(columns={'Süre(sn)':"Time"})
tambur=tambur.rename(columns={'Süre(sn)':"Time"})
komp=komp.rename(columns={'Süre(sn)':"Time"})
fan.iloc[:,0]/=60
tambur.iloc[:,0]/=60
komp.iloc[:,0]/=60
fan.iloc[:,0]=round(fan.iloc[:, 0],2)
tambur.iloc[:,0]=round(tambur.iloc[:, 0],2)
komp.iloc[:,0]=round(komp.iloc[:, 0],2)
nem = nem.drop(columns={"step","timex"})
fan = fan.drop(columns=['Gerilim(V)', 'Akım(A)' , 'Enerji(WH)', 'Kapi',
    'Ortam', 'Ortam1', 'C4', 'C5', 'C6', 'C7', 'C8', 'C9', 'C10'])
komp=komp.drop(columns=['Gerilim(V)', 'Akım(A)' , 'Enerji(WH)', 'C3',
    'ortam', 'C2', 'C4', 'C5', 'C6', 'C7', 'C8', 'C9', 'C10'])
tambur=tambur.drop(columns=['Gerilim(V)', 'Akım(A)', 'Enerji(WH)', 'eva-cikis',
    'kond-giris', 'kond-cikis', 'eva-giris', 'kond-orta', 'eva-8p',
    "eva-11p", "komp-kafa", "tambur-giris", "kapi"])
fan=fan.rename(columns={'Güç(W)':"P_fan"})
tambur=tambur.rename(columns={'Güç(W)':"P_tambur"})
komp=komp.rename(columns={'Güç(W)':"P_komp"})
```

```
nem = nem.join(fan.set_index('Time'), on='Time')
nem = nem.join(tambur.set_index('Time'), on='Time')
nem = nem.join(komp.set_index('Time'), on='Time')
nem.dropna()
##Filtering
nem_filter = (nem["RH1"] <= 60)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["RH1"] >= 25)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["Time"] <= 209)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["Temp2"] <= 90)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["Temp2"] >= 23)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["Temp1"] <= 90)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["Temp1"] >= 23)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["RH2"] <= 100)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["RH2"] >= 25)
nem = nem[nem_filter]
plt.plot(nem["Temp1"])
plt.show()
plt.plot(nem["Temp2"])
plt.show()
plt.plot(nem["RH1"])
plt.show()
plt.plot(nem["RH2"])
plt.show()
```

```
col_list = list(nem.columns)
nem[col_list[1:4]] = (nem[col_list[1:4]]).astype('float64')
nem[col_list[2]] += 273.15
nem[col_list[4]] += 273.15
nem[col_list[1]] /= 100
nem[col_list[3]] /= 100
##Specific Humidity of Humid Air
W2 = HAPropsSI("W","T",nem["Temp2"].to_numpy(),"P",101325,"R",nem["RH2"].to_numpy())
W1 = HAPropsSI("W","T",nem["Temp1"].to_numpy(),"P",101325,"R",nem["RH1"].to_numpy())
nem["W1"] = W1
nem["W2"] = W2
##Density of Humid Air
density1=PropsSI('D', 'T', nem["Temp1"].to_numpy(), 'P', 101325, 'Air')
density2=PropsSI('D', 'T', nem["Temp2"].to_numpy(), 'P', 101325, 'Air')
nem["D1"] = density1
nem["D2"] = density2
#airflowrate
air_flow=48/1000
#evaporation rate
m_evap=air_flow*((nem["D2"]*nem["W2"])-(nem["D1"]*nem["W1"]))*1000
nem["m_evap"]=m_evap
sum(nem["m_evap"])
nem_filter = (nem["m_evap"] <= 2)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["m_evap"] >= 0)
nem = nem[nem_filter]
plt.plot(nem["m_evap"])
plt.show()
#Total dehumidification of humid air
m_total= 5050
air_flow=(m_total/sum(nem["m_evap"]))*air_flow
```

```
m_evap=air_flow*((nem["D2"]*nem["W2"])-(nem["D1"]*nem["W1"]))*1000
nem["m_evap"]=m_evap
sum(nem["m_evap"])
nem["m_total"]=m_total
nem["m_azalan"]=0
for i in range(len(nem)):
   nem.iloc[i, 14] = nem.iloc[i,13] - np.trapz(nem.iloc[i:, 12])
m_deg=nem["m_total"]-nem["m_azalan"]
nem["m_deg"]=m_deg
X_con=(nem.iloc[:,15]/nem.iloc[:,13])*0.6
nem["X_con"]=X_con
##Textile Proporties
nem["textile_surface"] = 26.169  #kapasiteye bağlı değişecek
nem["beta"]=18.00
nem["lamda"]=2.00
nem["teta"]=30.00
alfa= 1 - ((nem["beta"]*nem["X_con"])+nem["lamda"])/(1+(nem["lamda"])**((nem["teta"])-
nem["X_con"]))
nem["alfa"]=alfa
Vhumid = HAPropsSI("Vha","T",nem["Temp2"].to_numpy(),"P",101325,"R",nem["RH2"].to_numpy())
Vdry =   HAPropsSI("V","T",nem["Temp2"].to_numpy(),"P",101325,"R",nem["RH2"].to_numpy())
ro_humid=1/Vhumid
ro_dry=1/Vdry
ro_v=ro_humid-ro_dry
ro_vv=ro_v/0.622
nem["(ro_vv/0.622)"]=ro_vv
alfa_win=((nem["alfa"]*nem["W1"])-((nem["W1"]+nem["W2"])/2))
nem["alfa_win"]=alfa_win
mass_co = -
1*(nem["m_evap"]*0.001)/(nem["textile_surface"]*nem["(ro_vv/0.622)"]*nem["alfa_win"])
nem["mass_co"] = mass_co
plt.plot(nem["mass_co"])
```

```
plt.show()
nem_filter = (nem["mass_co"] <= 100)
nem = nem[nem_filter]
nem_filter = (nem["mass_co"] >= 0)
nem = nem[nem_filter]
plt.plot(nem["mass_co"])
plt.show()
nem.to_excel('data.xlsx')
```

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgileri: gokhan.sir@arcelik.com

Makale

1. Theoretical and Experimental Investigation of Mass and Heat Transfer in the Drum in Household Heat Pump Laundry Dryers, Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (JFFHMT), ISSN: 2368-6111

Konferans Bildirisi

1. 7th International Conference on Experimental and Numerical Flow and Heat Transfer (ENFHT'22) - Theoretical and Experimental Investigation of Mass and Heat Transfer in the Drum in Household Heat Pump Laundry Dryers