T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL TİP KURUTUCUDA KURUTMA KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

AHMET ERHAN AKAN

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. DERYA BURCU ÖZKAN

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL TİP KURUTUCUDA KURUTMA KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

Ahmet Erhan AKAN tarafından hazırlanan tez çalışması 27/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Galip TEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ebru MANÇUHAN

Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Düriye BİLGE

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erhan BÖKE

İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmada; Tekstil mamullerinin sıcak hava ile kurutulmasını sağlayan bir ram makinesinin kurutma davranışı, Fick'in ikinci yasasından türetilen I.dereceden kinetik ve difüzyon modelleri ile teorik olarak modellenmiştir. Deneylerden elde edilen verilerden yararlanılarak, kurutucunun herbir kabinine ait ısı-kütle transfer katsayıları, boyutsuz nem oranları, kuruma hızı, değerleri hesaplanmıştır. Modelleme kısmında, I.dereceden kinetik ve efektif difüzyon katsayı değerleri ile aktivasyon enerjisi değerleri bulunmuş, matematiksel model ile deneysel veriler arasındaki uyum regresyon analizleri yardımı ile araştırılarak kullanılan modeller arasında karşılaştırılma yapılmıştır.

Doktora çalışmamda olumlu eleştirileri ve önerileri ile yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Derya Burcu Özkan'a, tez izleme komitesi hocalarım Prof. Dr. Galip Temir'e ve Doç. Dr. Ebru Mançuhan'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmamda, destek ve yardımlarını esirgemeyen dostlarım Öğr. Gör. Samet Nalbant, Dr. Öğr. Üyesi Fatih Ünal, Öğr. Gör. Burak Kürşad Başaran, Öğr. Gör. Gürkan Mutlu, Öğr. Gör. Malik Alkış ve kardeşim Arş. Gör. A. Perihan Akan'a deneyleri yapmamda yardımcı olan Has Grup Ar-Ge Müdürü Murat Sevilmiş ile Teknoloklar Yıldırım Kemal Şimşek ve Ahmet Göynük'e teşekkür ederim.

Son olarak maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan sevgili annem, babam ve kardeşime, çalışmalarım süresince karşılaştığım zorlukları aşmamda göstermiş olduğu pozitif yaklaşımlar ile bana moral veren ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim ve kızıma teşekkür ederim.

Aralık, 2018

Ahmet Erhan AKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xiv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 6
1.3 Hipotez 7

BÖLÜM 2

KURUTMA KAVRAMI 8

2.1 Tekstil Liflerinin Kuruma Davranışı 9
2.2 Tekstil Mamullerinin Kurutulması 11
2.3 Tekstil Kurutma Yöntemleri 12
2.3.1 Ön Kurutma 12
2.3.2 Esas kurutma 13
2.3.2.1 Konveksiyonel Kurutma 14
2.3.2.2 Konveksiyonel Kurutmada Hava Akımı 15
2.3.2.3 Ram Makinesi Çalışma Prensibi 17

BÖLÜM 3

DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYSEL YÖNTEM 20

3.1 Deney Düzeneği 20

3.2 Kumaş Özellikleri 23
3.3 Deneysel Yöntem 24
3.4 Kullanılan Ölçüm Cihazları 25
3.5 Elde Edilen Deneysel Veriler 29
3.6 Deneysel Bulgular 31
3.6.1 Kurutma Havası Sıcaklığının Kumaş Yüzey Sıcaklığına Etkisi 31
3.6.2 Kumaş İlerleme Hızının Kumaş Yüzey Sıcaklığına Etkisi 35
3.6.3 Kurutma Havası Sıcaklığının Bağıl Nem Değerlerine Etkisi 37
3.6.4 Kumaş İlerleme Hızının Bağıl Nem Değerlerine Etkisi 40

BÖLÜM 4

METOT 44

4.1 Kuruma Davranışı 44
4.1.1 Isı ve Kütle Transferi 44
4.1.2 Kuruma Miktarı 47
4.1.2.1 Kütlenin Korunumu Yasası 47
4.1.2.2 Buharlaşma Miktarı 48
4.1.3 Nem Oranı 49
4.1.4 Kuruma Hızı 49
4.2 Teorik Modeller 50
4.2.1 Birinci Dereceden Kinetik Model 50
4.2.2 Difüzyon Modeli 51
4.3 Aktivasyon Enerjisi 53
4.4 Regresyon Analizleri 54
4.4.1 Kolerasyon Katsayısı 54
4.4.2 Tahminin Standart Hatası 54
4.4.3 Ortalama Karesel Sapma 55
4.5 Belirsizlik Analizi 55

BÖLÜM 5

ANALİZ 56

5.1 Kabuller 56
5.2 Kuruma Davranışının Belirlenmesi 57
5.2.1 Isı ve Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi 57
5.2.2 Buharlaşma Miktarının Belirlenmesi 66
5.2.3 Nem Oranının Belirlenmesi 69
5.2.4 Kuruma Hızının Belirlenmesi 73
5.3 Teorik Modelleme 78
5.3.1 Birinci Dereceden Kinetik Model Çözümü 78
5.3.1.1 Kinetik Katsayının Belirlenmesi 78
5.3.1.2 Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi 80
5.3.1.3 Regresyon Analizleri 81
5.3.2 Difüzyon Modeli Çözümü 88
5.3.2.1 Efektif Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi 88
5.3.2.2 Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi 89

5.3.2.3 Regresyon Analizleri 90
5.3.3 Teorik Modellerin Karılaştırılması 96
5.4 Belirsizlik Analizi 96

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER 99

6.1 Kurutma Davranışı 99
6.1.1 Kumaş Yüzey Sıcaklığı 99
6.1.2 Kuruma Havası (Nemli Hava) Bağıl Nemi 100
6.1.3 Isı ve Kütle Transferi 100
6.1.4 Nem oranı 101
6.1.5 Kuruma Hızı 101
6.2 Teorik Modeller 102
6.2.1 I.Dereceden Kinetik Model 102
6.2.2 Difüzyon Modeli 102
6.2.3 Modellerin Karşılaştırılması 102
6.3 Öneriler 103

KAYNAKLAR 104

EK-A

BOYUTSUZ SAYILAR 109

EK-B

KULLANILAN PROGRAMLAR 116

B-1 Regresyon Analiz Programı 116
B-2 Su ve Buhar Özelikleri Hesaplama Programı 116
B-3 Hava Özelikleri Hesaplama Programı 117
B-4 Su Buharı Kısmi Basınç Hesaplama Programı 117
B-5 Psikrometrik Hesaplayıcı 117

ÖZGEÇMİŞ 119

SİMGE LİSTESİ

A	Alan [m^2], Kurutma havası hızı ile bağlantılı sabit değer
C	Derişim [mol/m^3]
c_p	Özgül ısı [kJ/kg°C]
Ç	Çevre [m]
D	Difüzyon katsayısı [m^2/s]
D_{AB}	Kütle yayılım katsayısı [m^2/s]
E_a	Aktivasyon enerjisi [kJ/mol]
$\bar{h}$	Taşınım ısı transfer katsayısı [W/m^2K]
h_x	Yerel taşınım ısı transfer katsayısı [W/m^2K]
h_m	Taşınım kütle transfer katsayısı [m/s]
k	Isı iletim katsayısı [W/mK], Kinetik katsayı sabiti
L	Kumaş uzunluğu [m]
L_c	Karakteristik uzunluk [m]
Le	Lewis sayısı [α/D_{AB}]
m	Kütle [kg], Anlık nem içeriği [kg]
$\dot{m}$	Kütlesel debi [kg/s]
m_y	Yaş malzeme kütlesi [kg]
m_k	Kuru malzeme kütlesi [kg]
M	Molarite [mol/L]
M_b	Buharlaşma miktarı [kg]
M_e	Denge nemi [kg]
$mr_{exp,i}$	Deneysel nem oranı [kg]
$mr_{exp,i}$	Tahmin edilen nem oranı [kg]
MR	Boyutsuz nem oranı
n	Sabit sayısı, Derece sabiti
n_o	Ölçüm sayısı
n_c	Parametre sayısı
Nu	Nusselt sayısı[hL/k]
P	Basınç [Pa]
Q	Isı enerjisi [kJ]
Pr	Prandtl sayısı [$\mu c_p/k$]
r	Kolerasyon katsayısı
R	Gaz sabiti [kJ/kgK], Bağımsız değişkenlerin fonksiyonu

R^2	Regresyon katsayısı
Re	Reynolds sayısı [$\rho V L_c/\mu$]
R_u	Üniversal gaz sabiti [kJ/molK]
Sc	Schmidt sayısı [ν/D_{AB}]
Sh	Sherwood sayısı [$h_m L/D_{AB}$]
T	Sıcaklık [^oC,K]
t	Zaman [s]
V	Hız [m/s]
w	Özgül nem [g/kg]
W_R	Bağıl hata [%]
X	Kuru baz nem oranı [kg nem/kg kuru madde]
Xy	Yaş baz nem oranı [kg nem/kg yaş madde]
0	Referans hali, İlk hali
A	Kurutma havası
b	Buhar
c	Kritik, Parametre sayısı
ç	Çıkan
eff	Efektif
f	Film (arayüzey)
g	Giren
h	Hava
ky	Kumaş yüzeyi
n	Normal
s	Yüzey
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
α	Isıl yayınım katsayısı [m^2/s]
μ	Dinamik viskozite [kg/ms]
ν	Kinematik viskozite [m^2/s]
Ø	Çap [m]
w	Bağımsız değişkenlerin belirsizliği
x	Bağımsız değişkenler
χ^2	Khi-kare (Ortalama karesel sapma)

KISALTMA LİSTESİ

HKF	Hata Kaynakları Fonksiyonu
KHS	Kurutma Havası Sıcaklığı
RMSE	Tahminin Standart Hatası
TAD	Mamulün İçinden Geçme (Through Air Drying)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Gözenekli bir maddede farklı gözenek türleri [31] 9
Şekil 2.2 Higroskopik ve higroskopik olmayan madde [31] 9
Şekil 2.3 Tekstil liflerinin tipik kuruma davranışı [31] 10
Şekil 2.4 Ram makinesi genel görünümü [41] 18
Şekil 3.1 Ram makinesi genel görünüşü 21
Şekil 3.2 Fular kısmı (Banyo ve mekanik kurutma) 21
Şekil 3.3 İğne ve zincir tertibatı (Kumaşın kabine girişi) 21
Şekil 3.4 Brülor ve alev dağıtım borusu [41] 22
Şekil 3.5 Fanlar 22
Şekil 3.6 Düze delikleri ve konumu 22
Şekil 3.7 Kontrol ekranı 23
Şekil 3.8 Gövde ve kapaklardaki yalıtım [41] 23
Şekil 3.9 Testo 350M/XL gaz analizörü 26
Şekil 3.10 Testo 870-2 termal kamera 26
Şekil 3.11 Kabin içinde hareketli kumaşın termal kamera görüntüleri 26
Şekil 3.12 Hygro Faster Ekv kumaş nem ölçümü 27
Şekil 3.13 Delta Ohm HD 2301 hava nem ölçümü 27
Şekil 3.14 Digitron ThermaPro 2 data logger 27
Şekil 3.15 K tipi probların kumaş üzerine konumlandırılması 28
Şekil 3.16 Desis THB 600 hassas terazi 28
Şekil 3.17 Siemens Ardoport İnfrared termometre 28
Şekil 3.18 Dairesel kumaş kesme şablonu 29
Şekil 3.19 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi 32
Şekil 3.20 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi 33
Şekil 3.21 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi 34
Şekil 3.22 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 110 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi 35
Şekil 3.23 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 130 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi 36

Şekil 3.24 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 150 °C kurutma havası sıcaklığında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi 37
Şekil 3.25 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi..... 38
Şekil 3.26 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi..... 39
Şekil 3.27 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi..... 40
Şekil 3.28 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 110 °C kurutma havası sıcaklığında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi..... 41
Şekil 3.29 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 130 °C kurutma havası sıcaklığında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi..... 42
Şekil 3.30 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 150 °C kurutma havası sıcaklığında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi..... 43
Şekil 4.1 Alt ve üst konumlandırılmış lüle dizisi..... 48
Şekil 5.1 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için ısı taşınım katsayısı 61
Şekil 5.2 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için ısı taşınım katsayısı 61
Şekil 5.3 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için ısı taşınım katsayısı 61
Şekil 5.4 110 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için ısı taşınım katsayısı 62
Şekil 5.5 130 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için ısı taşınım katsayısı 63
Şekil 5.6 150 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için ısı taşınım katsayısı 63
Şekil 5.7 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için kütle taşınım katsayısı 64
Şekil 5.8 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için kütle taşınım katsayısı 64
Şekil 5.9 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için kütle taşınım katsayısı 64
Şekil 5.10 110 °C kurutmma havası sıcaklığı ve üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için kütle taşınım katsayısı 65
Şekil 5.11 130 °C kurutmma havası sıcaklığı ve üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için kütle taşınım katsayısı 65
Şekil 5.12 150 °C kurutmma havası sıcaklığı ve üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için kütle taşınım katsayısı 65
Şekil 5.13 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı sıcaklık için yaş baz nem oranının zamanla değişimi..... 70
Şekil 5.14 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı sıcaklık için yaş baz nem oranının zamanla değişimi..... 71
Şekil 5.15 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı sıcaklık için yaş baz nem oranının zamanla değişimi..... 71

Şekil 5.16 110 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için yaş baz nem oranının zamanla değişimi 72
Şekil 5.17 130 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için yaş baz nem oranının zamanla değişimi 72
Şekil 5.18 150 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için yaş baz nem oranının zamanla değişimi 72
Şekil 5.19 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için kuruma hızının zamanla değişimi 74
Şekil 5.20 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için kuruma hızının zamanla değişimi 74
Şekil 5.21 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için kuruma hızının zamanla değişimi 74
Şekil 5.22 110 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için kuruma hızının zamanla değişimi 75
Şekil 5.23 130 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için kuruma hızının zamanla değişimi 76
Şekil 5.24 150 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için kuruma hızının zamanla değişimi 76
Şekil 5.25 0,167 m/s kumaş ilerleme hızı için kuruma hızı nem oranı değişimi 77
Şekil 5.26 0,333 m/s kumaş ilerleme hızı için kuruma hızı nem oranı değişimi 77
Şekil 5.27 0,500 m/s kumaş ilerleme hızı için kuruma hızı nem oranı değişimi 77
Şekil 5.28 110 ^{o}C kurutma havası sıcaklığı ve 0,167 m/s kumaş ilerleme hızı için ln(m/mo) – t(s) grafiği 79
Şekil 5.29 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için lnk – 1/T grafiği 80
Şekil 5.30 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi 83
Şekil 5.31 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi 84
Şekil 5.32 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi 85
Şekil 5.33 110 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızında model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi 86
Şekil 5.34 130 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızında model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi 87
Şekil 5.35 150 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızında model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi 87
Şekil 5.36 Sıcaklığın efektif difüzyon katsayısına etkisi 89
Şekil 5.37 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için difüzyon modeli ve deneysel yaş baz nem oranlarının zamanla değişimi ... 92
Şekil 5.37 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için difüzyon modeli ve deneysel yaş baz nem oranlarının zamanla değişimi ... 93
Şekil 5.38 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için difüzyon modeli ve deneysel yaş baz nem oranlarının zamanla değişimi ... 93
Şekil 5.39 110 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için difüzyon modeli ve deneysel yaşbaz nem oranının zamanla değişimi 94

Şekil 5.40 130 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için difüzyon modeli ve deneysel yaşbaz nem oranının zamanla değişimi 95
Şekil 5.41 150 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için difüzyon modeli ve deneysel yaşbaz nem oranının zamanla değişimi 95
Şekil 5.42 Kurutma kabini şematik resmi 97
Şekil 5.43 Ölçüm yapılan noktalar 97
Şekil B.1 Regresyon analizi (Microsoft Excel Sayfası) 116
Şekil B.2 Su buharı özelikleri hesaplayıcı 116
Şekil B.3 Havanın özelik hesaplayıcı 117
Şekil B.4 Su buharı kısmi basınç hesaplayıcı 117
Şekil B.5 Psikrometrik özelik hesaplayıcı 118

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Kumaş genişliği (m) 24
Çizelge 3.2 Ölçüm cihazları ve hassasiyetleri 25
Çizelge 3.3 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında elde edilen deneysel veriler 29
Çizelge 3.4 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında elde edilen deneysel veriler 30
Çizelge 3.5 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında elde edilen deneysel veriler 30
Çizelge 3.6 Kurutucu giriş ve çıkışında kumaşın bağıl nem değerleri 31
Çizelge 5.1 Referans çevrenin özellikleri 57
Çizelge 5.2 Taşınım ısı-kütle transfer katsayıları (0,167 m/s) 58
Çizelge 5.3 Taşınım ısı-kütle transfer katsayıları (0,333 m/s) 59
Çizelge 5.4 Taşınım ısı-kütle transfer katsayıları (0,500 m/s) 60
Çizelge 5.5 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında buharlaşma miktarları 66
Çizelge 5.6 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında buharlaşma miktarları 67
Çizelge 5.7 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında buharlaşma miktarları 68
Çizelge 5.8 Toplam buharlaşma miktarı 68
Çizelge 5.9 Tüm kurutma şartlarında deneysel yaş baz nem oranları 69
Çizelge 5.10 Tüm kurutma şartlarında deneysel kuru baz nem oranları 70
Çizelge 5.11 Tüm kurutma şartlarında deneysel kuruma hızı 73
Çizelge 5.12 Tüm kurutma şartları için ln(m/mo) değerleri 78
Çizelge 5.13 Tüm kurutma şartları için deneysel kinetik katsayı (k) değerleri 79
Çizelge 5.14 Tüm kurutma şartları için birinci derece kinetik model anlık nem içerikleri (m*) 80
Çizelge 5.15 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için aktivasyon enerjileri 81
Çizelge 5.16 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için regresyon istatistikleri 82
Çizelge 5.17 Tüm kurutma şartları için efektif difüzyon katsayı (D_{eff}) değerleri 88
Çizelge 5.18 Tüm kurutma şarları için difüzyon modeli anlık nem içerikleri (m*) 89
Çizelge 5.19 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için aktivasyon enerjileri 90
Çizelge 5.20 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için regresyon istatistikleri 91
Çizelge 5.21 Modellerin regresyon analizleri karşılaştırılması 96
Çizelge 5.22 Ölçüm parametreleri ve hassasiyetleri 98
Çizelge A.1 Boyutsuz sayılar (0,167 m/s kumaş hızı, 110 ^{O}C KHS) 110
Çizelge A.2 Boyutsuz sayılar (0,167 m/s kumaş hızı, 130-150 ^{O}C KHS) 111
Çizelge A.3 Boyutsuz sayılar (0,333 m/s kumaş hızı, 110 ^{O}C KHS) 112
Çizelge A.4 Boyutsuz sayılar (0,333 m/s kumaş hızı, 130-150 ^{O}C KHS) 113

Çizelge A.5 Boyutsuz sayılar (0,500 m/s kumaş hızı, 110 ^{O}C KHS) 114
Çizelge A.6 Boyutsuz sayılar (0,500 m/s kumaş hızı, 130-150 ^{O}C KHS) 115

ÖZET

ENDÜSTRİYEL TİP KURUTUCUDA KURUTMA KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

Ahmet Erhan AKAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

Tekstil endüstrisinde, sıcak hava püskürterek kurutma, oldukça sık kullanılan ve çok fazla enerji tüketen yöntemlerden biridir. Günümüzde giderek artan enerji ihtiyacı nedeniyle, mevcut enerji sistemlerinin optimizasyonu ve yeni tasarımların da daha verimli imal edilmesi, bir zorunluluk haline gelmiştir. Enerji sistemlerinin performansını belirleyen matematiksel modeller yardımı ile enerji tüketimi büyük oranda azaltılabilir.

Tekstil ürünleri kurutulurken yapısına zarar verilmemesi ayrıca istenilen en/boy ayarının yapılabilmesi açısından tekstil endüstrisinde en yaygın kullanılan konveksiyonel kurutma makineleri Ramöz de denilen Ram makineleridir. Ram makineleri, kumaşların makine içerisinde yatay bir şekilde hareket ettirildiği ve bu esnada kumaşa sıcak havanın gönderildiği, kumaş kurutma makineleridir. Ram makinelerinde kuruma karakteristiği incelendiğinde, kurutma şartlarının optimize edilmesine olanak sağlayan modeller vasıtası ile kurutma verimi büyük oranda arttırılabilir.

Bu çalışmada, 10 kabinli bir ram makinesinin kurutma karakteristiği deneysel olarak araştırılmış ve kurutma davranışı iki farklı teorik model aracılığı ile modellenmiştir. Deneyler üç farklı kurutma havası sıcaklığında (110-130-150 ^{o}C) ve üç farklı kumaş ilerleme hızında (0,167-0,333-0,500 m/s), %95 pamuk +%5 likra içerikli kumaş kullanılarak gerçek üretim şartları altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen

verilerden yararlanılarak, kurutucunun herbir kabininde gerçekleşen ısı-kütle transfer katsayısı, buharlaşma miktarı, nem oranı, kurutma hızı değerleri hesaplanmıştır.

Kuruma karakteristiğinin modellenmesinde ise, Fick'in ikinci yasasından türetilen I. Dereceden Kinetik model ve Difüzyon modeli olmak üzere iki farklı teorik modelden yararlanılmış ve bu modeller arasında karşılaştırılma yapılmıştır. Kullanılan modeller yardımı ile her bir kurutma şartı için I. dereceden kinetik katsayıları ile efektif difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjisi değerleri hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, gerçek üretim şartları altında 10 kabinli bir Ram makinasının kurutma karakteristiği iki farklı teorik model ile araştırılmıştır. Modeller ve deneysel veriler arasındaki uyum regresyon analizleri yardımı ile karşılaştırılarak, I. Dereceden kinetik model için, R^2, 0,9945 ile 0,9992 arasında, χ^2, 0,00005 ile 0,00122 arasında, RMSE, 0,0045 ile 0,0129 arasında ve r değerlerinin ise 0,9973 ile 0,9998 arasında değiştiği görülmüştür.

Difüzyon modeli için, R^2, 0,9812 ile 0,9961 arasında, χ^2, 0,00109 ile 0,00646 arasında RMSE, 0,0109 ile 0,0289 arasında ve r değerleri ise 0,9905 ile 0,9980 arasında değişmektedir. Bu değerlere göre ram makinesinde kurutma modelleme aracı olarak I. Dereceden kinetik modelinin kullanımının difüzyon modeline göre daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, ram makinesi, I.dereceden kinetik model, difüzyon modeli, kurutma karakteristiği.

ABSTRACT

DETERMINATION AND MODELLING OF DRYING CHARACTERISTIC IN INDUSTRIAL TYPE DRYER

Ahmet Erhan AKAN

Department of Mechanical Engineering

PhD Thesis

Adviser: Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

In the textile industry, hot air spray drying is one of the quite often used and too much energy consuming methods. Because of today's increasing energy demand, it has become a necessity to optimize existing energy systems and to manufacture new designs more efficiently. With the help of mathematical models that determine the performance of energy systems, energy consumption can be greatly reduced.

The most widely used convection drying machines in the textile industry are Ram machines, which are called Ramos, in order not to damage the structure while the textile products are dried and to adjust the desired width / length. Ram machines are cloth-drying machines in which fabrics are moved horizontally in the machine and in the meantime hot air spraying to the fabric. When the drying characteristic is examined in the Ram machines, the drying efficiency can be increased in large scale by means of the models, which allow optimization of drying conditions.

In this study, the drying characteristic of a 10-cabinet ram machine was experimentally investigated and the drying behavior was modeled through two different theoretical models. The experiments were carried out under real production conditions using three different drying air temperatures (110-130-150 ^{o}C) and three different fabric feed speed (0.167-0.333-0.500 m/s) and 95% cotton + 5% lycra content fabric. Using the data

obtained from the experiments, the heat-mass transfer coefficient, evaporation rate, humidity ratio, drying speed values were calculated for each cabinet of the dryer.

In the modeling of the drying characteristic, first order kinetic model and diffusion model, which two different theoretical models derived from Fick's second law, were used and comparison was made between these models. First order kinetic coefficients, effective diffusion coefficients and activation energy values were calculated for each drying condition with the help of the used models.

As a result, the drying characteristic of a 10 cabinet Ram machine was investigated with two different theoretical models under actual production conditions. The conformity of between the models and the experimental data were compared using regression analysis. For the first order kinetic model, it was observed that the R^2 value varied between 0.9945 and 0.9992, $\chi 2$ value varied between 0.00005 and 0.00122, RMSE value varied between 0.0045 and 0.0129, and r-value varied between 0.9973 and 0.9998. For the diffusion model, it was observed that the R^2 value varied between 0.9812 and 0.9961, $\chi 2$ value varied between 0.00109 and 0.00646, RMSE value varied between 0.0109 and 0.0289, and r-value varied between 0.9905 and 0.9980. According to these values, it was concluded that the use of first order kinetic model is more appropriate than the diffusion model as a drying modeling tool in the ram machine.

Keywords: Drying, ram machine, first order kinetic model, diffusion model, drying characteristic.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknoloji geliştikçe enerji tüketimi de artan bir ivme kazanmaktadır. Hızlı nüfus artışına paralel olarak fosil kaynaklı enerjilerin büyük bir hızla tükenmesi bilim insanlarını ve mühendisleri, bir yandan mevcut enerji potansiyelini daha etkin bir şekilde kullanmaya iterken diğer yandan da yeni enerji kaynakları aramaya zorlamaktadır. Enerjinin doğru ve ekonomik kullanmanın önemli bir aracı da, sosyal ve ekonomik büyüme hedeflerine engel olmayacak şekilde enerji tüketiminin azaltılması diğer bir deyişle enerji verimliliğin sağlanmasıyla mümkün olacaktır [1].

Tekstil terbiye işlemleri, diğer tekstil işlemlerine göre daha fazla enerji gerektiren işlemlerdir. Terbiye işlemlerinde kullanılan enerjinin çoğu ısı enerjisi olup bu enerjinin yarısına yakını da kurutma işlemlerinde tüketilmektedir. Kurutma proseslerinde tüketilen bu enerji kumaştan suyun buharlaştırılması ve kurutma havasının ısıtılması için kullanılmaktadır. Konveksiyonel kurutuculardа tüketilen ısı enerjisinin önemli bir kısmı, kurutucuların bacasından atık hava ile birlikte dışarıya atılmaktadır. Ram makineleri (Ramözler) tekstil terbiye işletmelerinde konveksiyonel kurutma makineleri arasında en çok kullanılan kurutma makineleridir. Bu makineler yalnız kurutma işlemlerinde değil, her türlü bitim işlemi sonrasında kondenzasyon veya termofiksaj amacıyla da kullanılmaktadır [2].

Tekstil endüstrisinde ürünlerin kurutulması, üründen nemin uzaklaştırılış şekline göre ön kurutma ve asıl kurutma olarak ikiye ayrılır. Ön kurutma işleminde, mekanik yöntemlerle kurutma yapılmakta olup bu yöntemde ilk yatırım ve işletme giderleri asıl kurutma yöntemine göre daha ekonomik olsa da üründen istenilen miktarda nem

alınamadığından asıl kurutma işlemine gerek duyulmaktadır. Mekanik kurutma yönteminin asıl amacı ısı enerjisi ile kurutmada, maliyeti azaltmaktır [3].

Tekstilde çeşitli proseslerle nem kazanmış ürünler, üretim aşamalarında kurutma işlemlerine gerek duymaktadırlar. Ancak ürün tipine göre kurutma işleminden sonra üründe bulunması gereken nem miktarının farklılık göstermesi ve genel olarak yüksek sıcaklıklığa maruz kalan kumaşta meydana gelebilecek yapısal bozuklukların oluşmaması için kurutmanın kontrollü bir şekilde sürdürülmesi ve istenen değerlere ulaşıldığında kurutmanın durdurulması gerekmektedir. Bu amaçla tekstil sektöründe en yaygın kullanılan kurutma makineleri gergefli kurutucular olarak da adlandırılan Ramözlerdir (Ram makineleri) [3].

Bu çalışmada; Çorlu'da bulunan bir fabrikada kurulu 10 kabinli bir ram makinesinin kurutma davranışı deneysel olarak araştırılmış ve kurutma davranışı iki farklı teorik model aracılığı ile modellenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

1930'lu yıllardan itibaren kurutma işlemini tanımlamıyı amaç edinen değişik teoriler geliştirilmeye başlanmıştır [4].

Bu teorilerin başında sıvı-difüzyon teorisi gelmektedir. Bu teoride kurutma için esas alınan olay, nemin sıvı yayılımı ile olan hareketidir. Bu konudaki ilk çalışma Sherwood tarafından 1931 yılında tuğla için difüzyon katsayılarının araştırılması ile yapılmıştır [5]. Bu teoride, nemin hareketi kurutmanın bütün safhalarında nem transferinin tek belirleyicisi olarak ele alınmış ve difüzyonun sabit sıcaklıkta meydana geldiği kabulü yapılarak kuruyan katı içindeki sıcaklık farklılıkları, büzüşme ve yüzey sertleşmesi ihmal edilmiştir [6].

Diğer bir yaklaşım ise, kapiler teoridir. Kapilerite (Kapiler ıslanabilirlik), kapiler basınç etkisinde sıvının makroskobik akışı olarak tanımlanır [7]. Bu teori ilk kez Buckingham tarafından, ''kapiler potansiyel'' kavramı olarak ileri sürülmüştür [8]. Kapiler potansiyel, kılcal bir yarıkta eğrisel olarak hava-su sınır tabakasında, hava ile su arasındaki basınç farkından meydana gelmekte olup suyun yüzey gerilimi, ara yüzeydeki eğriliğe sebeb olmaktadır. Kılcal sıvı akımı eşitliği literatürde Luikov denklemleri olarak bilinmektedir

[9-10]. Kapiler teori, kurutma işlemini difüzyon modeline kıyasla daha iyi tanımlasa bile modelin matematiksel ifadesi oldukça karışıktır [11]. Kurutma işleminin tanımlanmasında momentum transferinin etkisi yanında ısı transferi etkisinin de dikkate alınmasına yönelik ilk çalışmalar Krischer tarafından gerçekleştirilmiş ve literatürde Krischer teorisi olarak yerini almıştır. [12]. Krischer teorisinde, şimdiye kadar incelenen tüm etkenlerin (nem transferi, difüzyon etkisi, kapiler etki) içinde bulundurduğunu kabul etmiştir. Sıcaklık ve nem içeriği arasındaki lineer bağıntı yardımı ile sıcaklık ve nem yoğunluğunu zamanın fonksiyonu olarak tanımlamış, kuruma zamanı hesabı için kapiler geçirgenlik ve difüzyon katsayılarına doğru olarak tespit edilmesi gerektiğini belirtmiştir [10]. Whitaker, Krischer teorisini, gerekli katsayıların fazlalığı ve bu katsayıların deneysel olarak elde edilme zorluğu ayrıca teorinin hem sıcaklığın hemde nem yoğunluğunun fonksiyonu olması nedeniyle karmaşık ve yorucu hesaplamalara ihtiyaç duyulması, bu teorinin arzu edilmeyen taraflarını oluşturduğunu belirtmiştir. [13].

Gözenekli ortamda geçici rejimde gerçekleşen eş zamanlı ısı-kütle ve momentum transferi yukarıda bahsedilen tüm faktörlerle birleşerek şuan için genel geçerli tek bir kurutma teorisinin varlığına engel olmaktadır. Ayrıca günümüzde bir teorinin genelleştirilme olasılığı da oldukça küçük bir ihtimal dâhilindedir [14].

Literatürde tekstil kurutma işlemlerinin daha doğru tanımlanabilmesi ve matematiksel modellenmesi üzerine yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan bazı çalışmalara göre;

Baxi ve ark. [15], sebze ve kurutma havası arasında kütle ve nem denge denklemlerine dayanan yarı amprik bir modeli, döner tip kurutucular için Matlab-Simulink ortamında modifiye ederek geliştirmişlerdir. Denge denklemlerinde, kütle dengesi, nem dengesi ve kuruma hızını dikkate almışlardır. Bunlara uygun eşitlikleri, ram makinelerine uyarlayarak karşılaştırmışlardır. Tekstil malzemesinin kuruma hızına etki eden parametreler için ise, sıcak hava sıcaklığı, sıcak hava hızı, konveyör hızı parametrelerini değerlendirmişlerdir. Ram makinesinde kurutma işlemi sırasında, ısı ve kütle transferi arasındaki fark yüzünden geliştirilen modelin modifikasyona ihtiyacı olduğu sonucuna varmışlardır.

Ghali ve ark. [16], kumaşlarda kurutma işlemi sırasında ısı ve kütle transferini simüle etmek için sayılsal bir model ortaya koymuşlardır. Model, pamuk ve polipropilen olmak üzere iki farklı tip kumaş üzerine uygulanmıştır. Geliştirdikleri model, suyun kumaş numuneleri arasından geçerken iki farklı sıcaklık bölgesi oluşturduğunu göstermektedir.

Sousa ve ark. [17], ham pamuk kumaş kurutma prosesinin, iki farklı bakış açısı ile kuruma karakteristiğini belirlenmeyi amaçlamışlardır. Kurutma işleminde ısı ve kütle transferini kontrol ederek kurutma sıcaklığının artmasını sağlamışlar böylece daha yüksek buharlaşma oranına ulaşıldığını ve kuruma zamanın azaldığını kanıtlamışlardır.

Park ve Baik [18], ram makinesinde kurutulan bir kumaşın ısı ve kütle transferini analiz etmişlerdir. Sıcaklık ve nem içeriği dağılımını sonlu elemanlar metodu ile çözmüşler ve ramöz içerisindeki nem, sıcaklık, kumaşın başlangıç nemi gibi operasyon parametrelerinin etkileri ile ısı-kütle transfer katsayılarını modeli kullanılarak açıklamışlardır. Seçilen bir kumaşın kurutma özelliklerine uyan modelin, diğer kumaş türleri için de kullanılabilir olduğunu, model tahminleri ile kurutma koşullarının optimize edilmesi sonucu enerji tüketiminin azaltılabileceği sonucuna varmışlardır.

Etemoğlu ve ark. [19], kumaşların sürekli olarak hareket eden düz bir tabaka üzerinde kurutulması işleminin teorik ve deneysel bir incelemesini yapmışlar. Çarpan hava jetli kurutuculardа kumaşın ısı ve kütle transferi analizi için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Modelde, kumaşın kuruma süresince gözenekli bir ortam olduğu ve kurutma yüzeyinde buharlaşan sıvının buhar basıncının, sıvının sıcaklığına karşılık gelen hemen hemen doymuş bir değerde kaldığını kabul etmişlerdir. Kurutma havası hızındaki ve sıcaklığındaki değişikliklerin, deneysel kuruma süresine etkisi, teoriye dayanan tahminlerle karşılaştırılmıştır. Böylece çarpan hava jetleri ile kurutma işlemlerinin deneysel ve teorik araştırması gerçekleştirilerek, toplam kurutma zamanının deneysel veriler ile tahmin edilen teoriye çok yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Johann ve ark. [20], tekstil malzemelerinin Konvektif kuruma proseslerini temsil eden bir model geliştirmişlerdir. Matematiksel modelleme için Kartezyen koordinatlarda sonlu farklar metodu ile kütle ve enerji dengelerinden yararlanmışlardır. İstatistiksel analizde Shapiro-Wilk testini kullanarak elde ettikleri modelin R^2 değerlerini 0,997'in üzerinde bulduklarını belirtmişlerdir.

Prabhu ve Parajia [21], kontakt ve konveksiyon kurutucuların performanslarını karşılaştırmışlardır. Kumaş yüzeyine sıcak hava püskürterek 10-20 W/m^2K olan taşınımla ısı transfer katsayısının 100-200 W/m^2K seviyelerine yükseltilebileceğini, konveksiyon kurutucularda özgül buhar tüketiminin, düze (lüle dizisi) verimliliği ve atık hava miktarından önemli ölçüde etkilendiğini ifade etmişlerdir.

Labude ve Schirmer [22], kurutma ve termofiksaj uygulamalarında ısıtmalı plaka kullanarak ısı transfer katsayısının ölçülmesi ve buna bağlı olarak en uygun lüle dizisi (düze) geometrisinin belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yuvarlak geometrili düze ve yarıklı düzeleri karşılaştırdıklarında, yuvarlak delikli düzelerden daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edildiğini belirtmişlerdir.

Watzl ve Rückert [23], emme taburlu kurutucuların kurutma davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları deneye göre, kurutma havasının sıcaklığı ve hızı arttırılıp kumaş giriş neminin azaltılması durumunda, kurutma hızının arttığını ifade etmişlerdir. Emme tamburlu kurutucu ile ramözleri enerji açısından karşılaştırdıklarında, enerji kayıplarını emme tamburlu kurutucu için %15, ramözlerde ise %40 seviyelerinde olduğunu belirtmişlerdir.

Ramaswamy ve Cui [24], kurutma havasının kumaş eksenine dik olarak üflendiği durumdaki konveksiyon kurutma işlemini teorik olarak araştırmışlar ve bu durumda ısı-kütle transferi için üç model geliştirmişlerdir. Bu modellerin gerçek işletme verileriyle karşılaştırılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Kowalski [25], nemli kapiler ve gözenekli ortamlarda kurutmanın neden olduğu deformasyonları araştırmıştır. Kurutulan malzemenin mekanik davranışını belirten diferansiyel denklemi, sıvı-gaz karışımını içeren gözeneklerin içinde, uniform dağılı eş sıcaklıklı bir malzeme kabulü yaparak nem içeriği ve sıcaklık dağılımından, elde etmiştir.

Avcı ve ark. [26], ince film tabakası olarak kabul edilebilecek malzemelerin kurutulması sırasında gerçekleşen eşzamanlı ısı ve kütle transferi mekanizmalarını açıklamakta kullanılabilecek matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Modelde, kuruma sırasında solvent gözenekli ortam olarak kabul edilmiş ve kuruma yüzeyinden buharlaşan sıvının buhar basıncının sıvı sıcaklığına bağlı olarak sanki-doyma sıcaklığı için sabit kaldığı kabul edilmiştir. Modelden elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ile karşılaştırılarak modelin geçerliliği ispatlanmıştır.

Lee ve ark. [27], halı gibi kalın ve tüylü tekstil malzemelerinin sıcak hava ile kurutulmasını geçici rejimde tanımlayacak bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Gözenekli ortamda gerçekleşen eş zamanlı ısı ve kütle transferini inceleyebilmek için, ısıl ve kütlesel dirençleri elektrik direncine benzeterek, kuruyan ürün için kütlenin ve enerjinin korunumu denklemlerini yazmışlardır. Üç adet non-lineer diferansiyel denklemin oluşturduğu sonuç denklemini sonlu farklar metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Geliştirdikleri model ile deneysel veriler arasında büyük oranda yakınlık olduğunu tespit etmişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek enerji tasarrufunu sağlayıcı tekniklerin bulunması ve geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Özellikle gelişen teknolojide enerji tüketiminin en büyük kısmı endüstriyel tesislerde gerçekleşmektedir. Günümüzde birçok endüstriyel uygulamalarda ısı ve kütle transferi aynı anda gerçekleşen bir olaydır. Bu uygulamaların başında kurutma gelir. Özellikle tekstil endüstrisinde kurutma prosesleri çok yüksek miktarlarda enerji tüketen işlemlerdendir. En az enerji tüketimi ile kumaş kalitesine ve yapısına zarar vermeden kuruma süresini en aza indirecek şekilde kurutma proseslerinin ve bu doğrultuda kurutma metotlarının geliştirilmesi enerjiyi daha verimli kullanan proseslere ulaşılması için büyük önem arz etmektedir. Kurutma proseslerinin kuruma davranışını önceden tahmin edilmesine yardımcı olacak matematiksel modeller aracılığı ile enerji tüketiminin büyük oranda önüne geçilebilir.

Literatürde konveksiyonel kumaş kurutma üzerine yapılmış birçok araştırmaya rastlamak mümkün olsada ramözlerde kurumayı etkileyen çeşitli parametrenin bir arada göz önünde bulundurulduğu, kuruma davranışı ve modellemesi üzerine çok sınırlı sayıda çalışma yapılmış olması bu konu üzerinde daha kapsamlı, daha detaylı ve daha yoğun bir çalışma yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu tez çalışmasını diğer çalışmalardan ayıran başka bir özellik ise, gerçek işletim koşulları altında, üretimde kullanılan kumaşlar üzerinde yapılan deney verileri kullanılarak yapılmış olmasıdır. Bu bağlamda, literatürde çok az çalışılmış olan bir konuda bilgi ve veri eksikliğinin giderilmesi, konveksiyonel

kurutucunun kuruma davranışının belirlenmesi ve teorik olarak modellenmesi, bulunan model ve deneysel veriler arasındaki uyumun gösterilmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, endüstriyel tip konveksiyonel kurutucunun kurutma davranışı belirlenecek ve matematiksel modellemesi yapılacaktır. İncelenecek kurutucu tipi, tekstil endüstrisinde kumaş kurutmada sıklıkla kullanılan 10 kabinli bir ram makinesidir. Deneylerde, kurutma şartları olarak, üç farklı kurutma havası sıcaklığı (110-130-150 ^{o}C) ve üç farklı kumaş ilerleme hızı (0,167-0,333-0,500 m/s) seçilecek ve kurutucunun, kurutma davranışı deneysel olarak araştırılacaktır. Deneylerden elde edilen verilerden yararlanılarak herbir kurutma şartı için, herbir kabinde gerçekleşen kumaş kuruma hızı ve nem oranı değerleri hesaplanacak ve kuruma davranışı iki farklı teorik modelle modellenecektir. Modeller ve deneysel veriler arasındaki uyum regresyon analizleri ile karşılaştırılarak modelin geçerliliği araştırılacaktır.

Literatür taraması sonucunda elde edilen bilgilere göre, ram makinelerinde kurutma işlemi esnasında kurutulan kumaş cinsi ve üzerindeki nem miktarına bağlı olarak kumaş yüzey sıcaklığının, kurumanın ilerlediği son kabinlere doğru artacağı, kuruma hızının ise ilk kabinlerde daha yüksek ve son kabinlere doğru kurumanın zorlanmaya başlaması ile azalacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte literatürde ram makinelerinde kumaş kurutma üzerine yapılmış çalışmalar incelendiğinde gerçek üretim şartları altında yapılan çalışmaların eksikliği sebebiyle bu çalışmanın literatürde söz konusu bilgi ve veri eksikliğini gidereceği öngörülmektedir.

BÖLÜM 2

KURUTMA KAVRAMI

Tekstil ürünleri üretim sürecinde bir takım yaş işlemlere tabi tutulmakta ve bu nedenle değişik aşamalarda kurutulmaları gerekebilmektedir [3,28]. Tekstil mamüllerinin özeliklerini (görünüm, en/boy ayarı v.b.), kullanım yerine veya tüketici isteğine göre değiştirmek için uygulanan işlemlerin tamamı Tekstil Terbiye işlemleri olarak adlandırılır. Tekstil terbiyesi temel işlemlerinden biri ve sonuncusu kurutmadır. Kurutmadaki amaç, fazla miktardaki suyun kumaştan mekanik veya ısı enerjisi ile uzaklaştırılmasıdır. Başka bir deyişle kurutma, katı veya katı hale yakın durumdaki maddelerden uygun miktarda suyun/su buharının uzaklaştırılması işlemidir [29]. Genelde mekanik yöntemlerle ön kurutması yapılmış tekstil ürünleri, daha sonra higroskopik nemi korunarak istenilen nem değerine kadar esas kurutma ile kurutulmaktadırlar [28].

Kurutulacak malzemeler içyapılarına göre;

1. Gözenekli (heterojen) malzemeler

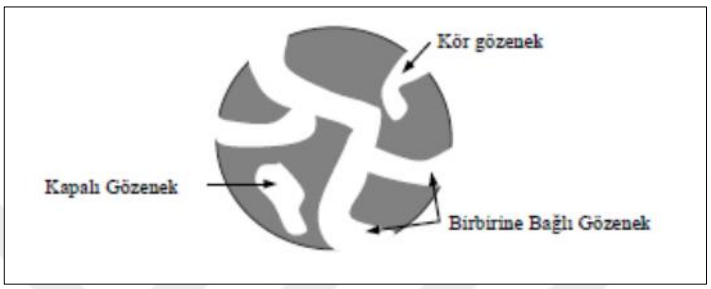
- Higroskopik (ince kılcallı)

- Higroskopik olmayan (kaba kılcallı)

2. Gözeneksiz (homojen) malzemeler

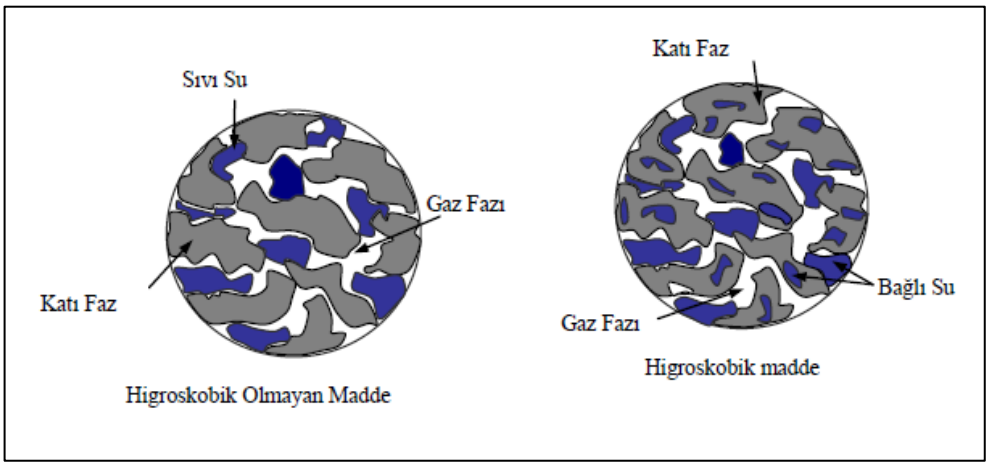
olmak üzere iki sınıfta toplanabilirler. Gözenekli malzemelere örnek olarak; kumaş (ince kılcallı), ağaç (kaba kılcallı) gibi malzemeler; gözeneksiz malzemelere örnek olarak da sabun gibi homojen malzemeler verilebilir [29,30].

Kumaş gibi gözenekli malzemelerde ısı ve kütle transferi mekanizmalarının anlaşılması için gözenekli ortamın içyapısının bilinmesi gerekir. Kumaşların yapı taşları tekstil lifleridir ve yapıları kuruma davranışını büyük ölçüde etkiler. Gözenekli maddeler bir katı faz ve gözenekleri dolduran bir veya daha fazla akışkan fazından oluşur [31,32]. Ayrıca gözenekleri birbirlerine bağlayan boğazlar mevcuttur. Gözenek ve boğazlar (Şekil 2.1), gözenekli maddeler içerisinde rastgele dağılı bulunurlar ve düzensiz şekillere sahiptirler [32] .



Şekil 2.1 Gözenekli bir maddede farklı gözenek türleri [31]

Tekstil lifleri higroskopik bir yapıya sahiptir. Higroskopik olmayan maddeler doymuş halde ise su ile dolu, tam kuru halde ise hava ile doludurlar. Higroskopik maddeler ise oldukça önemli miktarlarda bağlı su içerirler (Şekil 2.2).

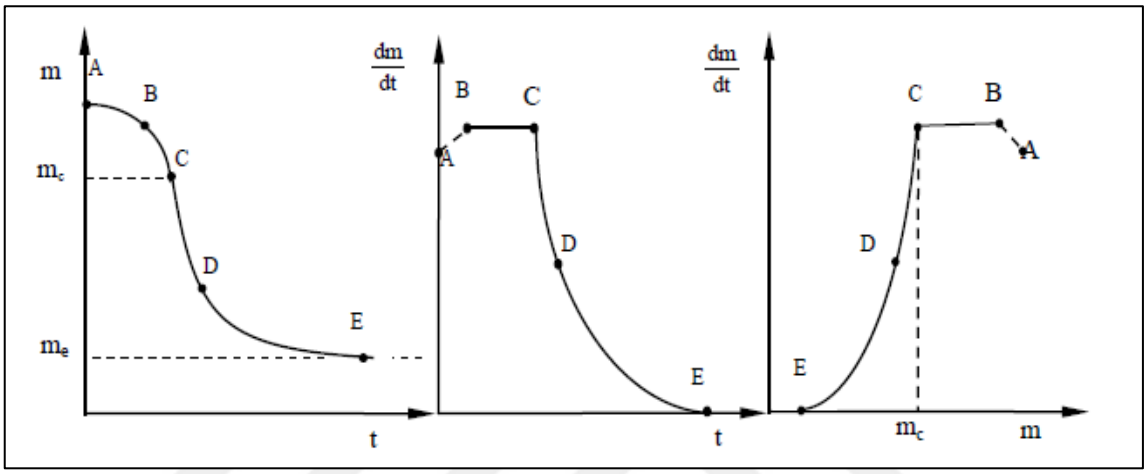


Şekil 2.2 Higroskopik ve higroskopik olmayan madde [31]

2.1 Tekstil Liflerinin Kuruma Davranışı

Tekstil lifleri gibi gözenekli higroskopik maddelerin Şekil 2.3'den de anlaşılacağı gibi tipik bir kuruma davranışı sergiledikleri görülür. Kurumanın değişik safhalarında genellikle farklı kuruma davranışları ile karşılaşılır. Kurumanın ilk evrelerinde kuruma hızının sabit

kaldığı ve sabit hızda kuruma süreci adı verilen bir kuruma periyodu söz konusudur. Bu genellikle nem oranının çok yüksek olduğu durumlarda görülen bir olaydır. Bu periyodun sonundaki nem içeriğine kritik nem içeriği adı verilir. Madde kritik nem içeriğinden daha düşük bir nem içeriğine sahip ise kuruma süresince kuruma hızında bir azalma söz konusu olacaktır. Bu kuruma periyodu ise azalan hızda kuruma periyodu olarak adlandırılır. Pek çok madde bu periyotta değişik aşamalara sahiptir ve "birinci azalan hızda", "ikinci azalan hızda", ... Periyodu şeklinde tanımlanırlar. [31,32].



Şekil 2.3 Tekstil liflerinin tipik kuruma davranışı [31]

Şekil 2.3'deki grafiklerde;

AB: Isıtma veya soğutma sürecini,

BC: Sabit hızda kuruma sürecini,

CD: 1. Azalan hızda kuruma sürecini,

DE: 2. Azalan hızda kuruma sürecini

göstermektedir. Nem oranının zamanla değişimi incelendiğinde, ilk olarak sıcaklık yükselmesi (AB) ardından çoğu durumda da belli bir zaman süresince sabit hızda kuruma gerçekleşir (BC). Bu durumda, malzemede buhar veya su şeklinde oluşan kütle transferi yüzeydeki doygunluk sebebi ile buharlaşma hızını etkilememektedir. Bu durum ''Sabit Hızda Kuruma Süreci'' olarak isimlendirilmektedir. Bu süreç, malzeme iç kısmından dış yüzeyine buharlaşma meydana getirecek kadar nem kalıncaya kadar devam eder. Nemli malzemelerin dış yüzeyinde, doymuş bir sınır tabaka oluşur. Maddenin yüzey sıcaklığı,

film sınır tabaka mevcut durumda iken temasta bulunduğu havanın yaş termometre sıcaklığına eşittir [34].

Kurumanın ilerleyen evrelerinde, malzeme bünyesindeki nem miktarında sürekli olarak azalma meydana gelir. Sürecin devamında malzeme iç kısmından yüzeye nem transferini sağlayacak nem miktarı olması gerekenden daha da azalmıştır. Bu anda malzeme yüzeyinde ilk kuru noktanın görülmesi ile sabit hızda kuruma sürecinin sona erdiği anlaşılmış olur. Bu andaki nem içeriği (C) kritik nem olarak adlandırılır. Kritik nem kurutulacak malzemenin, kuruma kabiliyeti, kuruma hızı, cinsi ve şekline bağlıdır. Sabit kuruma hızı sürecini, buharlaşma hızının sürekli olarak değiştiği ''Azalan Hızda Kuruma Süreci'' (CD, I. Azalan hızda kuruma) takip eder. Bu süreçte kuruma hızı, malzemenin gözenek yapısı ve içerisindeki nemin yüzeye akış modeline bağlıdır ve kurutma havasının özelliklerinden daha az oranda etkilenir [34]. D noktasından itibaren (II. Azalan hızda kuruma süreci) oluşan kuru noktalar artmaya ve genişlemeye başlar ve en dış yüzeyde kuru bir katman oluşur. Isı geçirgenliği az olan kuru katmanın oluşması ve yüzeye taşınacak sıvı katmanın difüzyon kabiliyetinin azalması ile kuruma hızı D noktasından itibaren sürekli bir düşüş gösterir. Bu D noktasına ''İkinci Kritik Nem İçeriği'' noktası denir. DE boyunca, kurutma hızı, iç katmanlardan yüzeye difüzyonla taşınan nemin, difüzyon hızına bağlıdır ve E noktasına ulaşıldığında, kurutma havasındaki buhar basıncı, kurutulan malzemenin buhar basıncına eşitlendiğinden kuruma tamamlanır [35,36].

2.2 Tekstil Mamullerinin Kurutulması

Tekstil mamulünün kabiliyetine göre, yaş işlem görmüş veya yıkanmış bir tekstil ürünü üzerinde ağırlığının %150-700'ü arasında değişebilen miktarda su barındırabilmektedir. Bu su mamul bünyesinde farklı durumlarda ve bağ yapısıyla yerini almaktadır. Mamul içindeki su için aşağıdaki ayrım yapılabilir [4].

1. Damlayan su:

Liflere hiçbir şekilde bağlı değildir. Yerçekimi etkisinde kendi ağırlığı ile aşağı doğru akar ve mamulün altından damlar. Bu su genellikle mekanik yöntemlerle ön kurutma aşamasında kolaylıkla uzaklaştırılabilir.

2. Yüzey suyu:

İpliklerin yüzeyine adhezyon kuvveti ile bağlı bulunan sudur. Bu suyun tamamının uzaklaştırılabilmesi için kuvvetli mekanik işlemlere ihtiyaç duyulur.

3. Kapiler su:

İpliklerin içinde, liflerin yüzeyine adhezyon kuvvetiyle tutunan sudur. Ön kurutma ile ancak bir kısmı uzaklaştırılabilmektedir.

4. Şişme suyu:

Liflerin içerisine girerek liflerin şişmesine sebeb olan sudur. Lif moleküllerine dipol kuvvetlerle bağlanır. Bu suyu mekanik kuvvetlerle uzaklaştırmak mümkün değildir. Ancak ısı enerjili kurutma sistemleri ile uzaklaştırabilir.

5. Kristal suyu (Higroskopik nem):

Şişme suyu gibi liflerin içerisinde bulunur. Bu su normal şartlarda tekstil ürünü üzerinde bulunması gereken nemdir. Bu nedenle higroskopik nemin, kurutma sırasında mamul kalitesine zarar verilmemesi için uzaklaştırılması istenmez. Özellikle yünlü malzemelerde uzaklaştırılan higroskopik nemin tekrar telafisi olmayacağından bu malzemelerin kurutulmasında dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur.

2.3 Tekstil Kurutma Yöntemleri

Kurutma tekstil endüstrisindeki en önemli proseslerden biri olup iki bölümde incelenmektedir. Bunlardan ilki mekanik kuvvet prensibine dayalı ön kurutma, ikincisi ise ısı enerjisi ile yapılan esas (asıl) kurutmadır. Mekanik kuvvetler yardımı ile kurutma, ısı enerjili kurutma ile karşılaştırıldığında oldukça ekonomik bir yöntemdir [33]. Bu nedenle mekanik kuvvetlerle mümkün olan en yüksek miktarda suyun bu aşamada alınması gereklidir.

2.3.1 Ön Kurutma

Tekstil sektöründe ön kurutma, sıkma, santrifüjleme ve emme olmak üzere üç yöntemle yapılmaktadır.

Sıkma, nemli tekstil mamulünün belirli bir basınç altında dönen merdaneler arasından geçirilmesiyle yapılır. En çok uygulanan ön kurutma yöntemidir. Bu yöntemde sıkma verimliliği önemlidir. Sıkma sonucu kumaş üzerinde kalan suyun miktarı, merdane yüzeyinin sertliği, mamuldeki suyun ısısı, kumaş geçiş hızı, merdane çapıdır [37].

Santrifüjleme, nemli tekstil mamulündeki yüzey suyu ve kapilar suyunun merkezkaç kuvveti yardımı ile giderilmesidir. Bu yöntem sıkma yöntemine göre daha etkilidir [28].

Emme ile kurutma, nemli tekstil mamulüne vakum uygulanarak kurutulduğu ön kurutma yöntemidir. Kırışıklık istenmeyen ve basınca karşı hassas malzemelerde bu yöntemden faydalanılır [28].

2.3.2 Esas kurutma

Esas kurutma işlemleri için başlıca beş yöntemden yararlanılır.

1. Konveksiyon (Taşınım) Kurutma:

Gaz fazında bulunan akışkanın (Hava) kurutulacak nemli tekstil mamulü üzerine gönderilmesi ile gerçekleşen ısı-kütle transferi prensibine dayanır [38].

2. Kontakt (İletim) Kurutma:

Kurutulacak ürünün kızgın yağ veya buhar ile ısıtılmış silindir ya da levha yüzeylerine teması sonucu ürün bünyesindeki suyun buharlaşması ile gerçekleşen kurutma yöntemidir. Ürünün aşırı ısınması ve sıcaklığın eşit yayılmasının zorluğu nedeniyle dikkat gerektirir. Bu kurutma yöntemi, yüksek yatırım maliyeti, kuruma hızının düşük olması, yüzey sıcaklığı kontrol problemleri gibi dezavantajlara sahiptir.

3. Işınım (Radyasyon) Kurutma:

Nemli tekstil mamulüne, ısının elektromanyetik dalgalar şeklinde transferi ile gerçekleşen kurutma yöntemidir. Kuruma, malzemelerin yüzeyine yakın bölgelerinde gerçekleştiğinden ince yapılı malzemelerin kurutulması için uygundur. Kurutulacak malzemenin cinsine bağlı olarak mamul sıcaklığı 500 ^{o}C'ye kadar çıkabildiğinden, ürünün zarar görmemesi için, tamamen kurutulan esas kurutma yerine, mamul üzerinde kalan su miktarının %25-35'e kadar düşürüldüğü kurutmalar tercih edilmelidir [39].

4. Yüksek Frekansla (Mikro Dalgalarla Kurutma):

Bu yöntemde kurutulacak ürüne dışarıdan ısı transferi yapılmamaktadır. Ürünün yüksek frekanslı alternatif akıma bağlı iki kondansatör levha arasından geçirilerek yapılan kurutma yöntemidir. Kondansatör levhalarındaki yük sürekli değiştiğinden ürün içindeki su molekülleri de sürekli yer değiştirmektedir. Bu durum su moleküllerinin birbirine sürtünmesini ve bu sürtünme sonucu çıkan ısı suyun buharlaşmasını sağlamaktadır. Dielektrik kurutma (10-100 MHz) ve mikrodalga kurutma (1000-3000 MHz) olmak üzere iki şekilde kullanılmaktadır [40].

5. Yakarak Kurutma:

Kurutulacak malzemenin bünyesinde yanıcı sıvı bulunması durumunda, bu sıvının buharını yakarak doğrudan kurutulacak malzeme çevresinde ısı enerjisinin oluşmasını sağlayan yöntemdir. Sadece tekstil yüzeylerinde kullanılabilir ve pek tercih edilen bir yöntem değildir.

Bu yöntemlerden, ışınım ve yüksek frekansla kurutma enerji maliyetleri yüzünden kontakt kurutma ise sadece tekstil mamulünün yüzeyinde uygulandığından endüstride kısıtlı bir uygulama alanı bulmuş yöntemlerdendir. Tekstil ürünlerinin kurutulmasında en çok tercih edilen yöntem, konveksiyonla kurutma yöntemidir [33].

Bu tez çalışması, endüstride en çok tercih edilen kurutma yöntemi olan konveksiyonel kurutma yöntemi prensibine göre çalışan bir ramözde gerçekleştirilmiştir.

2.3.2.1 Konveksiyonel Kurutma

Konveksiyon kurutma sırasında eş zamanlı ısı ve kütle transferi gerçekleşir. Kurutmanın başlarında, kurutulan malzemede bulunan suyun bir kısmı malzeme yüzeyinden uzakta ve tekstil liflerine adhezyon kuvvetleri ile bağlı bulunduğundan ısı ve kütle transferinin hızı kurutma süresi boyunca değişmektedir. Bu nedenle kurutma 3 adımda incelenir.

1. Adım:

Kurumanın ilk evresinde, kumaş yüzeyinde yeterli miktarda nem bulunduğu sürece, kurutma havası sıcaklık değeri ne olursa olsun tekstil malzemesinin sıcaklığı, yüzeydeki

su-buharı hava karışımının yaş termometre sıcaklığında sabit kalmaktadır. Bu adımda buharlaşma yüzeyde meydana geldiğinden, ısı-kütle transferi için yüzeydeki hava-su buharı ara yüzeyinin aşılması yeterli olmaktadır. Kurutma hızı kurutucunun çalışma şartlarına bağlı olduğundan kurutulan malzeme özelliklerinden bağımsızdır. Kurutmanın en hızlı olduğu evredir [2].

2. Adım:

Kurumanın ilerleyen evrelerinde, geniş kılcal boruları takiben ince kılcal borulardaki su emilip yüzeye taşınarak buharlaşma gerçekleşir. Zamanla kılcal borulardaki sürtünmenin artması yüzeye taşınan su miktarını azaltır. Böylece buharlaşma yüzeyde değil malzemenin iç kısımlarından difüzyon yolu ile yüzeye taşınması ile gerçekleşir. Bu durumda ısı ve kütle transferi için yüzeydeki sınır tabakaya ek olarak mamulün kuruyan kısmının da aşılması gerekmektedir. Bu durum kuruma hızının 1. Adıma göre azalmasına sebeb olur. Bu adımda kurutucunun çalışma şartlarına ek olarak tekstil malzemesinin özellikleri de kurutma hızında etkili olmaktadır [2].

3. Adım:

Kılcal suyun buharlaşması tamamlandıktan sonra şişme suyu ve higroskopik nem uzaklaşmaktadır. Bu adımda liflerin içinde bulunan suyun önce lif yüzeyine, oradan da mamul yüzeyine difüzyonu söz konusudur ve bu nedenle kurutmanın en yavaş ve zor adımı budur. Ayrıca kumaştaki su miktarı da oldukça azalmış olduğundan, kumaş sıcaklığı da kurutma havasının sıcaklığına yaklaşmaktadır. Hem kumaşın ısınması hem de suyun uzaklaşmasının yavaş olması nedeniyle, liflerde kalan bu son nem kısmının (higroskopik nem) uzaklaştırılması (aşırı kurutma), malzeme kalitesinin yanında enerji verimliliğini de olumsuz etkilemektedir [33].

2.3.2.2 Konveksiyonel Kurutmada Hava Akımı

Konveksiyonel kurutmada, kurutma gazı (hava) hareketli fakat kurutulacak malzeme hareketli veya hareketsiz olabilir. Kurutma havasının mamule teması iki yolla meydana gelmektedir.

a) Yüzeysel Temas

Kurutucudan üflenen hava, tekstil malzemesinin yüzeyine paralel veya yüzeyine dik şekillde hareketlendirilir. Kurutma havasını, kurutulacak malzemeye paralel şekilde gönderen kurutucular Hot-Flue tipi kurutuculardır. Bu tür kurutma makinelerinde kurutma havası, tekstil mamulünün yönüne göre aynı veya zıt yönde gönderilebilmektedir. Böylece, doğru ve ters akım olmak üzere iki prensip ortaya çıkmaktadır [4].

1. Doğru akım prensibi:

Bu prensip, kurutma havası ve kumaşın aynı yönde hareket etmesine dayanır. Kurutma başlangıcında, kurutma kabiliyeti yüksek olan en sıcak ve en kuru hava, en ıslak kumaş yüzeyi ile karşılaştığında kurutma hızı yüksektir fakat kurutmanın ilerleyen zamanlarında kurutma havasının soğuması ve nemlenmesinden dolayı kurutma hızı oldukça düşer. Bu durum, yöntemin dezavantajını oluşturur. Bu prensibin asıl amacı aşırı kurutmanın önüne geçilmesidir.

2. Ters akım prensibi:

Bu prensip, kurutma havası ve kumaşın ters yönde hareketine dayanır. Kurutucu çıkışında en sıcak ve en kuru hava ile karşılaşan kumaşın aşırı kuruma tehlikesi vardır.

Yukarıda bahsedilen her iki tip prensip için fark etmeksizin, kurutma havasının kumaş yüzeyine paralel gönderilmesi sonucu kumaş yüzeyinde oluşan su buharı-hava sınır tabakası kalınlığı artmakta ve bu da kurumayı zorlaştırmaktadır. Bu yüzden konveksiyonel tekstil kurutmada kurutma havasının kurutulacak malzeme üzerine dik olarak gönderildiği kurutucular daha çok kullanılmaktadır.

Günümüzde, en fazla tercih edilen prensip, kurutma havasının lüle (düze, nozul) denilen yuvarlak deliklerden veya yarıklardan kumaşa dik olarak püskürtülmesidir. 40 m/s' ye ulaşabilen hızlarda delik veya yarıklardan gönderilen kurutma havası, mamul yüzeyi ile karşılaştığında, yüzeye dik akım hızı sıfıra düşer (durgunluk nokatası) ve hava akımı 90^{o}' lik bir açıyla dönerek yüzeye paralel bir akım haline dönüşür. Bu nedenle lüleli sistemlerde kurutma havasının kumaşın içerisine ulaşması ve iç kısımlardaki liflere teması optimal değildir. Özellikle mamul kalınlığının artması ile bu durum daha çok

kendini belli eder. Hava akımının kumaş yüzeyine peralel olarak püskürtüldüğü hot-flue sistemlerde 25-50 W/m^{2}K olan ısı taşınım katsayısı (h), kurutma havasının kumaşın alt ve üst yüzeylerine dik bir şekilde üflendiği gergefli (ramöz, gergili) kurutucu tiplerinde 175-290 W/m^{2}K değerlerine kadar çıkmaktadr. Bu nedenle hot-flue tipli kurutucularda 35-60 s olan kurutma süresi, ramözlerde 5-20 s'ye kadar düşmektedir [33].

b) Mamulün İçinden Geçme (Through Air Drying – TAD)

Bu prensibe göre çalışmakta olan konveksiyonel kurutucularda, bir taraftan basınçlı kurutma havası gönderilerek veya diğer tarftan vakum yapılarak, kurutma havasının gözenekli yapıdaki tekstil mamulünün içinden geçmesi sağlanmaktadır. Bu uygulamada tekstil mamulünün deforme olmaması için, mamul kurutucu içinde destekler üzerinde tutulur. Düz tipli olanlarda bu destek, delikli bant veya levha olurken, en sık kullanılan yuvarlak tiplerde ise destek delikli tamburdur. Bu tip çalışma şeklinde ısı taşınım katsayısı (h), 290-470 W/m^{2}K değerlerine kadar ulaşmakta ve kuruma 1-3 s içinde tamamlanmaktadır. Bu değer ramözlerden 10, hot-flue tip kurutuculardan 30 kat daha kısadır [33].

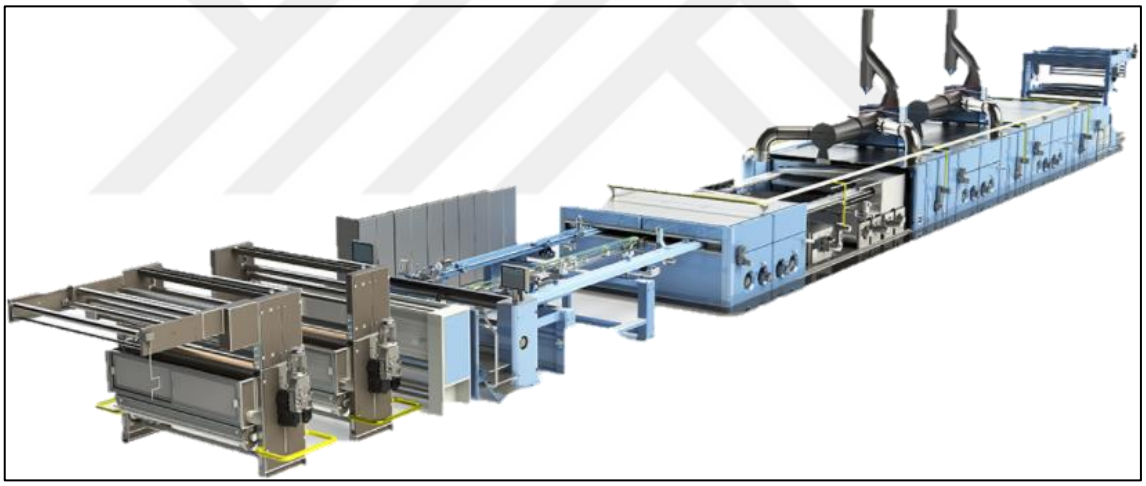
Konveksiyon prensibine göre çalışan pek çok kurutucu olmasına rağmen, tekstil terbiye işlemlerinde en çok tercih edilen endüstriyel tip kurutucular ramözlerdir. Ramözlerin ilk yatırım maliyetleri diğerlerine göre daha yüksek olmasına rağmen, kumaşlarda kurutma, termofiksaj ve en/boy ayarı gibi işlemlerin yapılmasına imkan vermesi bu makinaların kullanım alanını ve sıklığını arttırmaktadır.

2.3.2.3 Ram Makinesi Çalışma Prensibi

Ram makineleri (Ramözler, Gergefli kurutucular), kurutulacak kumaşların iğne veya paletler tarafından kenarlarından tutturularak, makine içerisinde enine bir şekilde hareket ettirildiği, bir çift yürüyen zincir mekanizması ile kumaşa, istenilen hızda hareket sağlandığı ve bu esnada kumaşa kurutma havasının gönderildiği kurutma makinalarıdır. Ramözlerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri diğer kurutuculara göre yüksek olmasına rağmen, tekstil ürünlerinin boyutsal formunun kontrol edilebilmesi ve kurutma, kondenzasyon ve termofiksaj işlemlerinde de kullanılabilmesi nedeniyle en çok tercih edilen kurutma makinalarıdır. Ramözlerde kumaşa istenilen en ve boy ayarı

verilebilmekte, kumaştaki kırışıklıklar giderilebilmekte ve kumaş kenarındaki tutucular dışında hiçbir yere değmeden kumaş geçişi sağlanabilmektedir [37]. Şekil 2.4'de bu tip bir makinanın detayı verilmiştir. Şekilde, kumaşın üzerinde bağlı olamayan nemi, makineye girmeden önce mekanik olarak ön kurutma işlemine tabii tutacak fular kısmı, kumaşın enine açık bir şekilde makineye sevkedilmesini sağlayan iğne ve zincir tertibatı ile ihtiyaç sayısınca kamaraların bulunduğu görülmektedir.

Kumaşın alt ve üst yüzeylerine düzeler (lüle dizisi) vasıtasıyla gönderilen basınçlı sıcak hava ile yaş kumaşta bulunan su, buhar haline geçmekte ve nemli hava, özel bir emme tertibatı ile kumaştan uzaklaştırılmakta ve böylece kumaş, istenilen oranda kurutulmuş olarak makinayı terk etmektedir. Ramözün çıkışında kurutulmuş tekstil mamülünün kurutma sonrası aşırı kurumasını önlemek için soğumasını sağlayan soğutma düzeneği ve katlama donanımları da bulunmaktadır [3].



Şekil 2.4 Ram makinesi genel görünümü [41]

Ramözlerde, uzunlukları 1,5-3 m arasında değişen, mamül cinsine bağlı olarak sayıları belirlenebilen kabinler (bölmeler) bulunmaktadır. İlk kabinde kumaş çok hızlı ısıtılmakta, orta kabinlerde sıcaklık sabit tutulmakta ve son kabinlerde ise daha düşük sıcaklıkta çalışılmaktadır. Kabinler içerisinde kumaş, sadece kenarlarından tutularak hiçbir yere temas etmeden hava yastığı ile taşınmakta ve düzelerden kumaş yüzeyine basınçlı sıcak hava püskürtülmektedir. Kurutma sırasında basınçlı hava etkisiyle kumaştan ayrılan elyaf uçuntuları ve tozlar, özel elekli emici tertibatla ortamdan uzaklaştırılmaktadır [42].

Yün ve yünlü mamüllerin kurutulmasında, liflerin deforme olmaması için düşük sıcaklıklarda ve yavaş hava akımı ile kurutma yapılması gerektiğinden, kurutucu konstrüksiyonuna göre kumaşın bir veya birkaç kez yön değiştirdiği ve giriş kısmından çıktığı çok katlı ramözler de geliştirilmiştir. Örme mamüller ise taşıma bantlı ramözlerde kurutulmakta, bu şekilde mamüle istenilen tuşe (tutum) kazandırılabilmektedir. Örme ürünlerde mamül tutumunun hassas olması nedeniyle dikey zincir konstrüksiyonuna sahip ramözler kullanılmakta olup, kurutma ve fikse işlemlerinde 140 m/dak çalışma hızıyla en iyi tutum verilebilmektedir [3].

Ramözler, tekstil endüstrisinde genel olarak bitim işlemleri sonrası fiksaj işlemlerinde, sentetik kumaşların termofiksajında, boyama-baskı sonrası kumaşların kurutulmasında ve fiksajında ve diğer terbiye işlemleri sonrası kurutmada yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

BÖLÜM 3

DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYSEL YÖNTEM

3.1 Deney Düzeneği

Deneysel çalışma, RAM – X serisi olarak adlandırılan 10 kabinli bir ram makinesinde (Şekil 3.1), Çorlu'da kurulu bir tekstil üretim fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Makine yeni olup işletme şartlarına yeni uyarlanmıştır. Ram makinesinde; kumaşın kurutma kabinlerine girmeden önce, kumaşa banyo işleminin yaptırılarak üzerinde bulunabilecek istenmeyen maddelerden arındıran ve kumaşın ön kurutmasının gerçekleştiği fular kısmı (Şekil 3.2) ve hemen sonra kumaşın gerilmesiz bir şekilde kabin içerisinde hareketini sağlayan iğne ve zincir tertibatı bulunmaktadır (Şekil 3.3). Her kabinde bir adet 350 kW'lık otomatik kontrollü brülör (Şekil 3.4), dört adet 4kW'lık çapraz konumlandırılmış otomatik kontrollü fanlar (Şekil 3.5) ve sekiz adet alt ve üst konumlandırılmış düze çifti (Şekil 3.6) bulunmaktadır. Kabinler 3m uzunlukta olup, kurutma havası sıcaklık değerleri 100-200 ^{o}C arasında kontrol edilebilmektedir. Kurutma havası sıcaklığı, kumaş ilerleme hızı, fan kapasiteleri, atık hava bacası klape açıklık değeri ve kabin sıcaklık değerlerinin ayarlandığı ve anlık olarak görülebildiği kontrol ekranı (Şekil 3.7) mevcuttur. Hareketli ve açılır kabin kapaklarında 160 mm, sabit gövde brülör ve fan çevresinde 210 mm kalınlıkta izolasyon malzemesi (Şekil 3.8) kullanılmıştır.



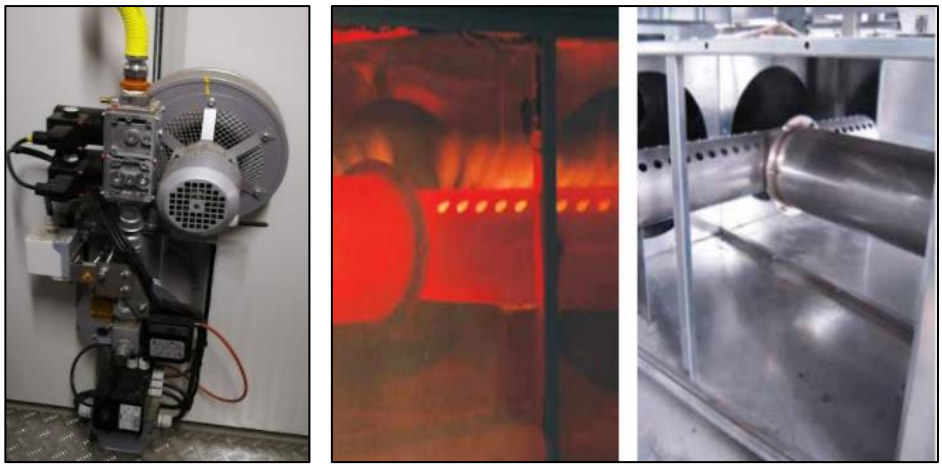
Şekil 3.1 Ram makinesi genel görünüşü



Şekil 3.2 Fular kısmı (Banyo ve mekanik kurutma)



Şekil 3.3 İğne ve zincir tertibatı (Kumaşın kabine girişi)



Şekil 3.4 Brülor ve alev dağıtım borusu [41]



Şekil 3.5 Fanlar



Şekil 3.6 Düze delikleri ve konumu



Şekil 3.7 Kontrol ekranı



Şekil 3.8 Gövde ve kapaklardaki yalıtım [41]

3.2 Kumaş Özellikleri

Deneylerde kullanılan kumaşlar, işletmenin üretim sürecinde kullandığı kumaşlar olup, gerçek üretim koşullarında deneyler yapılmıştır. Deneyler sırasında kullanılan kumaş, %95 Pamuk ve %5 Likra içerikli, 30/1 Kompakt Süprem örgü yapısında imal edilmiş kumaştır. Kumaşın kuru ağırlığı, standart atmosfer koşullarında (20 ^{0}C' de, %65 bağıl nemde) 24 saat etüvde bekletildikten sonra alınan 100 cm^2'lik 5 adet numunenin hassas terazi ile ölçümünden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak 133 g/m^2 olarak belirlenmiştir. Kumaş kalınlığı ise 0,77 mm olarak tespit edilmiştir. Kumaş kurutucuya girmeden önce 1,45 m genişliğindedir. İşletme kumaşa, kurutma işleminden sonra uygulayacağı boya işlemi için kumaşın makine çıkışında genişliğinin 1,92 m

olmasını istediğinden, kumaşın kabin içerisinde ilerlemesi sırasında en ölçüleri yaklaşık 10 cm arttırılarak 7. Kabinde istenilen ölçüye ulaşılmıştır. Kumaşın kurutma kabinleri içinde ilerlemesi esnasında ulaştığı genişlik ölçüleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Kumaş genişliği (m)

1. Kabin	2. Kabin	3. Kabin	4. Kabin	5. Kabin	6. Kabin	7. Kabin	8. Kabin	9. Kabin	10. Kabin
1,45	1,53	1,64	1,71	1,81	1,91	1,92	1,92	1,92	1,92

Deneylerde kullanılan kumaşlar kurutucu kabinlere alınmadan önce fular kısmında banyo işlemine tabi tutularak, üstlerinde bulunabilecek olan istenmeyen maddelerden uzaklaştırılmıştır. Banyo işleminden çıkan kumaş fular kısmında merdaneler arasında ön kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Ön kurutma işleminden sonra kumaşın birinci kabine girmeden önceki bağıl nem değeri %60 ve yüzey sıcaklığı 34,5-35 ^{o}C olarak ölçülmüştür. %60 bağıl nemli kumaşın yaş ağırlığı, hassas terazi ile 338 g/m^2 olarak, kurutucu çıkışında ise kumaş %10 bağıl nem değerinde iken kumaş ağırlığı 143-151 g/m^2 olarak tespit edilmiştir. Hesaplamalarda bu değerlerin aritmetik ortalamasından yararlanılmıştır.

3.3 Deneysel Yöntem

Deneyler sırasında ortam sıcaklığının 27,6 ^{o}C ve bağıl nemin %60 olduğu belirlenmiştir. Deneylere başlamadan önce kurutma havası sıcaklık değerleri makinenin kontrol ekranında set edildikten sonra sistemin dengeye ulaşması için 10 dakika beklenmiştir. Bu süre sonunda, her kabinde bulunan 8 çift düze üzerindeki hava çıkış lülelerinden kurutma havası çıkış hızı ve debisi ölçülmüştür. Buna göre; 110 ^{o}C sıcaklıktaki kurutma havası için, kurutma havası hızı ortalama 21,85 m/s ve debisi 0,0194 kg/s, 130 ^{o}C sıcaklıktaki kurutma havası için, kurutma havası hızı 24,45 m/s ve debisi 0,206 kg/s, 150 ^{o}C sıcaklıktaki kurutma havası için, kurutma havası hızı 33,4 m/s ve debisi 0,268 kg/s olarak tespit edilmiştir.

3.4 Kullanılan Ölçüm Cihazları

Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ve hassasiyetleri, Çizelge 3.2'de, bunlara ait resimler ise sırasıyla Şekil 3.9-3.18 arasında verilmiştir. Kabin içinde ilerleyen kumaşın termal kamera görüntüleri ise Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Ölçüm cihazları ve hassasiyetleri

Ölçüm cihazları	Hassasiyetleri	Şekil Numarası
Testo 350M/XL, Portatif gaz analizörü (Hava hızı ölçümü)	% 5	Şekil 3.9
Testo 870-2 Termal kamera	±% 2 ^{o}C	Şekil 3.10
Hygro Faster Ekv (Kumaş nem ölçümü)	% 0,8	Şekil 3.12
Delta Ohm HD 2301 (Hava nem ölçümü)	±% 0,1RH	Şekil 3.13
Digitron ThermaPro 2 data logger (K tipi probe, kumaş yüzey sıcaklığı)	% 0,5	Şekil 3.14 Şekil 3.15
Desis THB 600 (Hassas terazi)	0,01 g	Şekil 3.16
Siemens Ardoport İnfrared Termometre	0,1 K	Şekil 3.17
Dairesel Kumaş Kesme Şablonu	100 cm^2	Şekil 3.18



Şekil 3.9 Testo 350M/XL gaz analizörü



Şekil 3.10 Testo 870-2 termal kamera



Şekil 3.11 Kabin içinde hareketli kumaşın termal kamera görüntüleri



Şekil 3.12 Hygro Faster Ekv kumaş nem ölçümü



Şekil 3.13 Delta Ohm HD 2301 hava nem ölçümü



Şekil 3.14 Digitron ThermaPro 2 data logger



Şekil 3.15 K tipi probların kumaş üzerine konumlandırılması



Şekil 3.16 Desis THB 600 hassas terazi



Şekil 3.17 Siemens Ardoport İnfrared termometre



Şekil 3.18 Dairesel kumaş kesme şablonu

3.5 Elde Edilen Deneysel Veriler

Kurutma işlemi sırasında kumaşın, kabin giriş ve çıkış noktalarındaki yüzey sıcaklıkları ve sınır tabakası civarındaki havanın bağıl nemi ile sıcaklık değerleri, Çizelge 3.3-3.4 ve Çizelge 3.5'de verilmiştir. Kurutma işlemi sonunda kurutucudan çıkan kumaşın bağıl nem değerleri ölçülmüş ve elde edilen veriler Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında elde edilen deneysel veriler

Kumaş Hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı		110 °C			130 °C			150 °C		
	Kabin Numarası	Zaman (s)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)
0,167	Giriş	-	35	-	-	35	-	-	35	-	-
	1. Kabin	18	58	66,3	57	74	68.3	56	74	72	52
	2. Kabin	36	70	49,6	59	84	51	58	82	54,5	53
	3. Kabin	54	85	36,3	62	110	37	61	112	41,7	55
	4. Kabin	72	91	26,2	65	118	27,6	63	120	30	58
	5. Kabin	90	96	16,6	71	122	18,1	68	132	21,2	61
	6. Kabin	108	100	12,3	73	122	13,6	70	139	15	65
	7. Kabin	126	102	8,2	79	123	9,6	74	142	10,8	69
	8. Kabin	144	102	7,2	81	124	8,1	77	143	8,7	73
	9. Kabin	162	103	6,4	83	125	7	79	144	7,6	75
	10. Kabin	180	100	6,3	82	119	6,9	79	142	7	76
	Çıkış	-	68	-	-	93	-	-	111	-	-

Çizelge 3.4 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında elde edilen deneysel veriler

Kumaş Hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı		110 °C			130 °C			150 °C		
	Kabin Numarası	Zaman (s)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)
0,333	Giriş	-	35	-	-	35	-	-	35	-	-
	1. Kabin	9	58	60,4	70	67	62,2	69	73	67,2	64
	2. Kabin	18	67	45	72	78	46,3	71	79	48,1	66
	3. Kabin	27	71	32,5	75	82	33	74	84	34,8	69
	4. Kabin	36	77	23,8	77	96	25,5	5	93	26,6	69
	5. Kabin	45	84	15,1	82	107	16,5	79	125	18,9	72
	6. Kabin	54	86	11,6	83	111	12,8	80	133	13,4	75
	7. Kabin	63	98	7,9	88	116	8,9	84	138	10,2	77
	8. Kabin	72	102	6,9	90	120	7,3	87	141	8,5	80
	9. Kabin	81	103	6,4	91	124	6	90	142	7	83
	10. Kabin	90	102	6,2	91	119	5,7	91	135	5,8	86
	Çıkış	-	85	-	-	100	-	-	113	-	-

Çizelge 3.5 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında elde edilen deneysel veriler

Kumaş Hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı		110 °C			130 °C			150 °C		
	Kabin Numarası	Zaman (s)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)
0,500	Giriş	-	35	-	-	35	-	-	35	-	-
	1. Kabin	6	56	56,8	78	64	58,5	77	72	62,9	72
	2. Kabin	12	65	44,1	79	72	45,7	78	76	45,6	74
	3. Kabin	18	68	30,6	83	77	32,9	80	80	34,1	75
	4. Kabin	24	72	21,3	86	88	21,6	85	87	23,1	77
	5. Kabin	30	81	14,4	90	97	14,6	88	103	16,5	80
	6. Kabin	36	86	10,2	93	105	10,9	90	118	11,5	84
	7. Kabin	42	96	6,9	99	113	8,1	93	128	9,4	85
	8. Kabin	48	102	6,1	100	118	6,5	97	140	7,4	89
	9. Kabin	54	103	5,7	101	123	5,5	100	141	6,5	91
	10. Kabin	60	94	5,5	101	115	5,1	102	132	5,2	95
	Çıkış	-	89	-	-	112	-	-	120	-	-

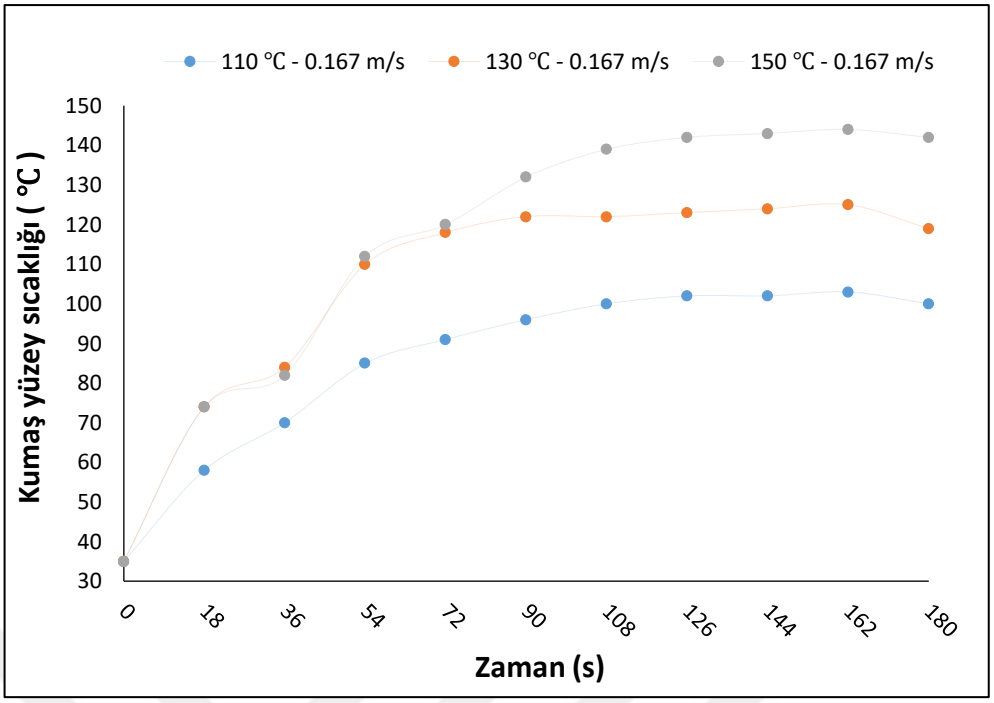
Çizelge 3.6 Kurutucu giriş ve çıkışında kumaşın bağıl nem değerleri

Kurutma havası sıcaklığı	Kumaş İlerleme hızı (m/s)	Kumaş giriş bağıl nemi (%) RH	Kumaş çıkış ortalama bağıl nemi. (%) RH
110 ^{0}C	0,167	60	6,42
	0,333	60	10,85
	0,500	60	13,35
130 ^{0}C	0,167	60	4,96
	0,333	60	8,62
	0,500	60	10,95
150 ^{0}C	0,167	60	3,27
	0,333	60	5,96
	0,500	60	9,30

3.6 Deneysel Bulgular

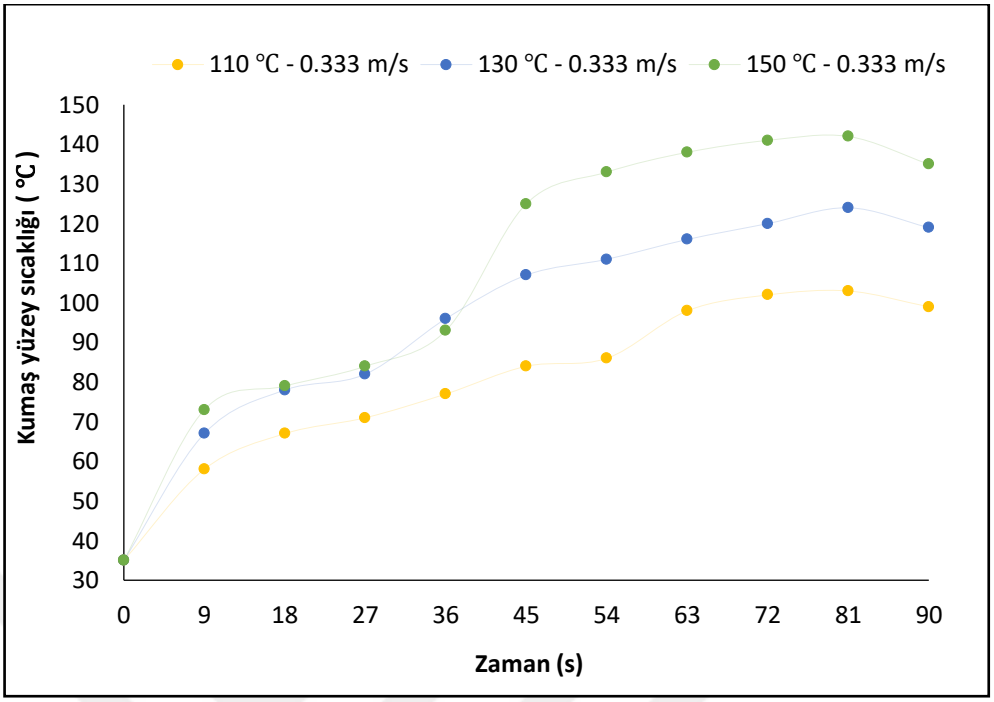
3.6.1 Kurutma Havası Sıcaklığının Kumaş Yüzey Sıcaklığına Etkisi

Çizelge 3.4-3.6 incelendiğinde, tüm kurutma şartları için, fular kısmından yıkanarak çıkan kumaşın, ortalama 35 ^{0}C'de kurutucuya girdiği görülmektedir. Yine aynı çizelgeler yardımı ile kumaşın yüzey sıcaklığının, tüm kurutma şartlarında, kumaş yüzeyindeki nem miktarına bağlı olarak, ilk iki kabinde 84 ^{0}C'yi aşamadığı görülmektedir. Bu değerler daha önce yapılan çalışmaları destekler niteliktedir. ''Kurumanın ilk evresinde, kumaş yüzeyinde yeterli miktarda nem bulunduğu sürece, kurutma havası sıcaklık değeri ne olursa olsun tekstil malzemesinin sıcaklığı, yüzeydeki su-buharı hava karışımının yaş termometre sıcaklığında sabit kalmaktadır'' [2]. Kurumanın ilerleyen zamanlarında, özellikle 6. Kabinden sonra azalan nem miktarının etkisi ile kumaş yüzey sıcaklığının, kurutma havası sıcaklığına yaklaşmakta olduğu görülmektedir. Ayrıca 10. Kabinde kumaş yüzey sıcaklığının düşmeye başlaması kabin çıkışında bulunan açıklıktan olan ısı transferi nedeniyledir. Kabin sıcaklıklarına bakıldığında 9. Kabine göre 10. Kabinde 9-14 ^{0}C'lik sıcaklık düşüşü olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle kumaş hızına bağlı olarak kumaş yüzeyinde sıcaklık düşüşü oluşmaktadır. Bu değerlerin daha ayrıntılı olarak görülebilmesi için, tüm kurutma şartlarında oluşan kumaş yüzey sıcaklığı-zaman grafikleri Şekil 3.19–3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.19 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

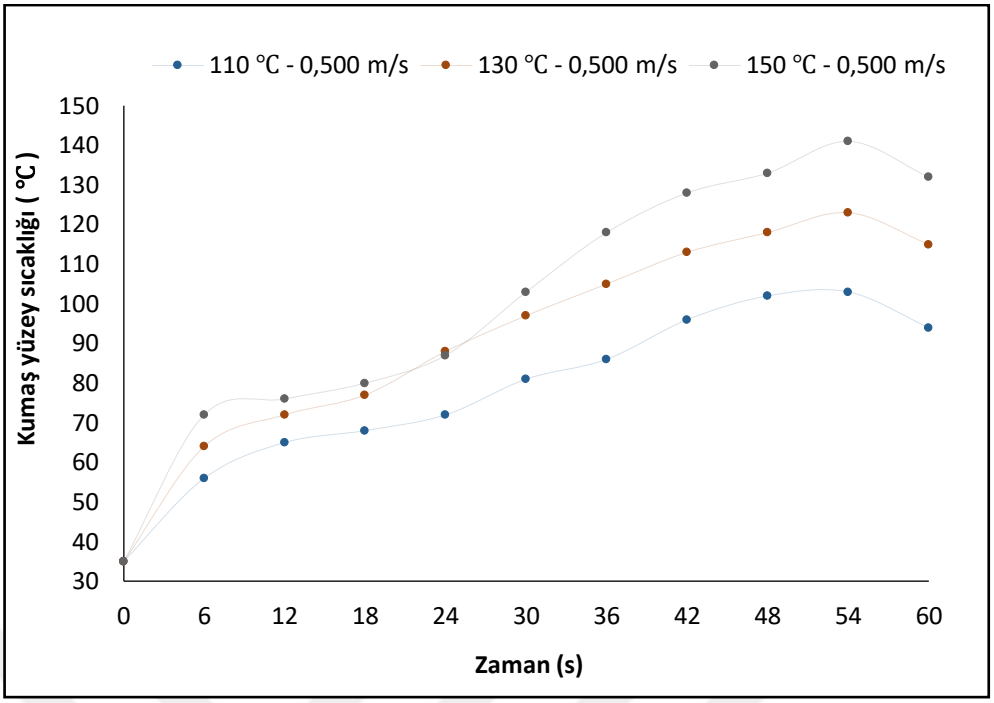
Şekil 3.19'da görüldüğü üzere, 0,167 m/s (10 m/dak) kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığında yapılan kurutma deneylerinde, kumaş yüzey sıcaklıklarının 54. s'ye (3. Kabine) kadar hızla arttığı ve sonrasında daha yavaş bir artış sergileyerek kurutma işlemi sonlarına doğru kurutma havası sıcaklığına yaklaştığı görülmektedir. Kurutmanın ilk evrelerinde (İlk iki kabin), kumaş bünyesindeki nem miktarına bağlı olarak yüzey sıcaklık değerlerinin, 110 °C'lik kurutma şartı için 70 °C'ye, 130 °C'lik kurutma şartları için 84 °C'ye ulaştığı ve 150 °C'lik kurutma şartları için 82 °C'ye ulaştığı görülebilir. Kumaştaki nem miktarının azalması, kurutma enerjisin daha büyük bir kısmının kumaşa aktarılmasına sebep olurken kurumayı zorlaştırmaktadır. Buna göre, özellikle 72. s'ye (4. Kabine) kadar kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin, 130 ve 150 °C'lik kurutma şartları için yaklaşık aynı değerlerde (sırasıyla 118-120 °C), 110 °C'lik kurutma şartı için ise diğer iki kurutma şartına göre yaklaşık 20 °C (91 °C) daha düşük olduğu görülmektedir. 72. s'den sonra üç farklı kurutma şartı için kumaş yüzey sıcaklık değerleri arasındaki fark açıkça görülmeye başlamaktadır. Kurutmanın son aşamalarında ise kumaş yüzey sıcaklıklarının, kurutucu çıkışındaki açıklık nedeniyle son kabinde yaklaşık 2-6 °C kadar düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 3.20 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil 3.20'de, 0,333 m/s (20 m/dak) kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığında yapılan kurutma deneylerinden elde edilen kumaş yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi görülmektedir. Şekil 3.20, Şekil 3.19 ile karşılaştırıldığında, aynı kurutma havası sıcaklık değerlerinde, kumaş ilerleme hızının 10 m/dak arttırılması, ilk iki kabinde (18.s'ye kadar), kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin yaklaşık 2-6 ^{o}C azalmasına neden olduğu görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızından elde edilen kumaş yüzey sıcaklık değerlerine, 0,333 m/s kumaş ilerleme hızından elde edilen kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin hemen hemen bir kabin sonrasında ulaşabildiği görülmektedir.

Şekil 3.20'de, üç farklı kurutma şartı için, kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin 4. Kabine (36. s'ye) kadar benzer değerlerde artış gösterdiği, 45.s'den sonra kumaş nem miktarının azalması ile kumaş yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Ayrıca, tüm kurutma şartları için, kurutucu çıkışındaki açıklık sebebi ile son kabindeki kumaş yüzey sıcaklığındaki düşüşün yaklaşık 1-7 ^{o}C arasında değiştiği görülmektedir.



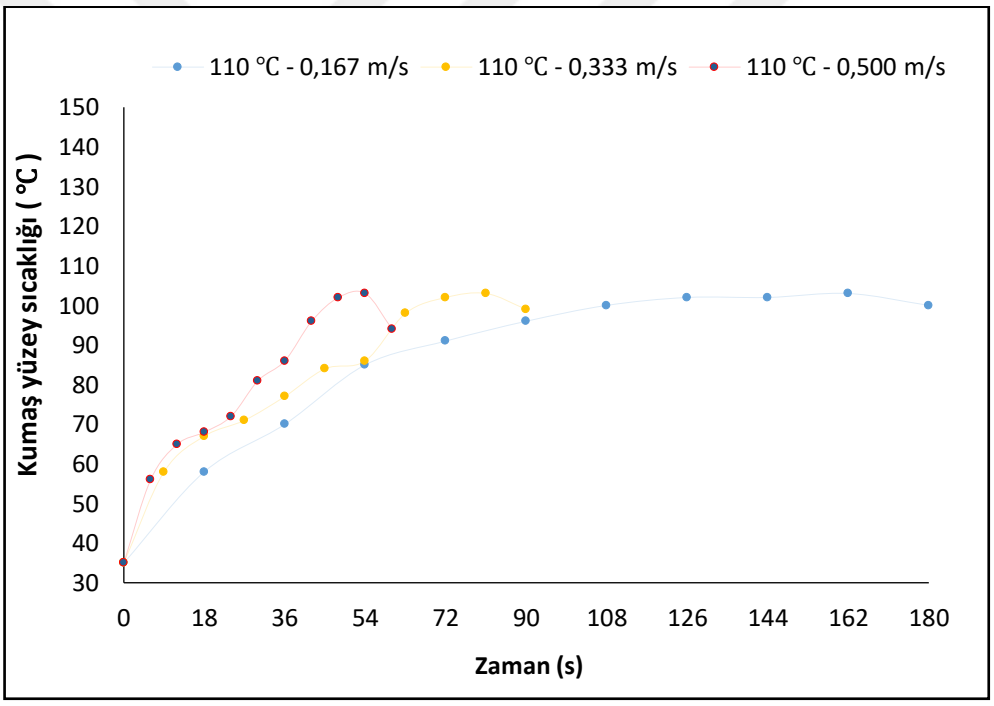
Şekil 3.21 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil 3.21'de, 0,500 m/s (30 m/dak) kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığında yapılan kurutma deneylerinden elde edilen kumaş yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi görülmektedir. Şekil 3.19 – 3.21 beraber incelendiğinde, 0,500 m/s'lik kumaş ilerleme hızında elde edilen kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin, diğer kurutma koşullarına göre azaldığı görülmektedir. Artan kumaş hızı ile kumaşın kabin içinde kalma süresi kısaldığından kumaşa transfer edilen kurutma enerjisinin azalması ve kumaş bünyesindeki nem miktarı bu değerlerin oluşmasında etkili olmaktadır.

Şekil 3.21'de, 24. s'ye (4. Kabine) kadar kurutma havası sıcaklığına bağlı olarak, kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin, 72-88 ^{o}C arasında değiştiği, ilerleyen süre içerisinde ise kurutma havası sıcaklığına yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca, tüm kurutma şartları için, kurutucu çıkışındaki açıklık sebebi ile son kabindeki kumaş yüzey sıcaklığındaki düşüşün yaklaşık 7-8 ^{o}C arasında olduğu görülmektedir.

3.6.2 Kumaş İlerleme Hızının Kumaş Yüzey Sıcaklığına Etkisi

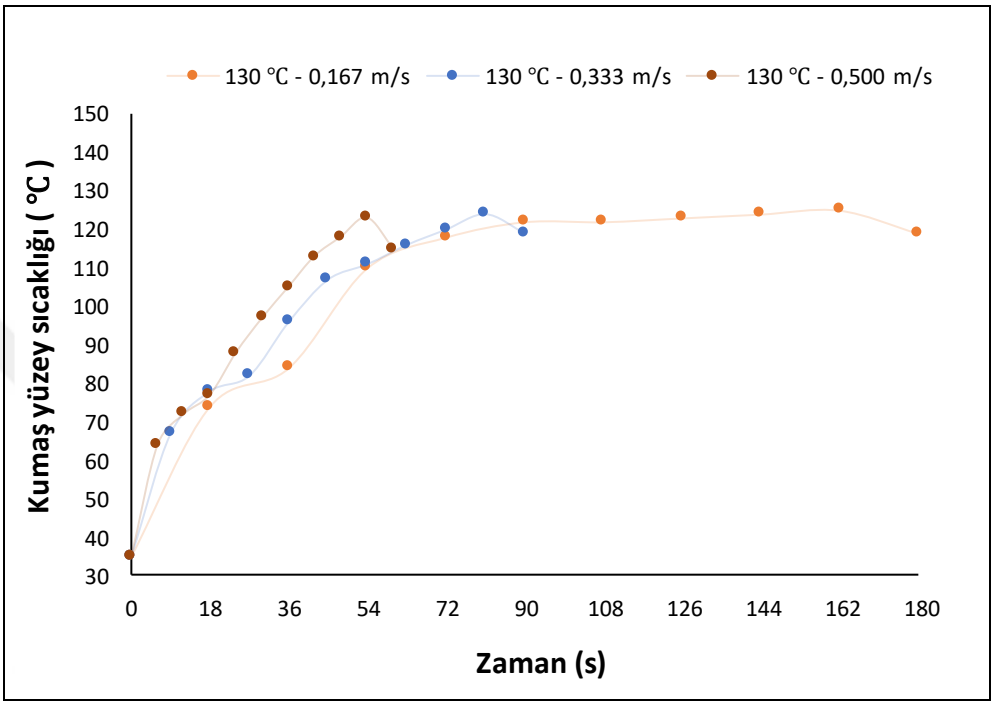
Şekil 3.22 – 3.24'de Aynı kurutma havası sıcaklığında, üç farklı kumaş ilerleme hızına göre çizilen grafikler sunulmuştur. Şekillerden, aynı kurutma havası sıcaklında, kumaş ilerleme hızının artması ile kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin azaldığı tespit edilebilir. Kurutmanın başladığı ilk evrelerden itibaren kumaş bünyesinde bulunan nem miktarına ve kumaş ilerleme hızına bağlı olarak, kumaş yüzey sıcaklıklarındaki değişimi genel olarak özetlemek mümkünkür. Buna göre, 130 ve 150 °C'lik kurutma şartları için, ilk dört kabindeki kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin arasında yaklaşık 2°C' lik bir fark oduğu, 110 °C' lik kurutma şartına göre ise diğer iki kurutma şartına kıyasla yaklaşık 10 °C' lik bir fark olduğu görülebilmektedir. Bu değerler, kumaştaki nem miktarının azalması ile dördüncü kabinden sonra artarak devam etmektedir.



Şekil 3.22 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 110 °C kurutma havası sıcaklığında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil 3.22 incelendiğinde, üç farklı kurutma şartı için, ilk kabinden sonra kumaş yüzey sıcaklıklarının yaklaşık aynı değerlerde (56-58 °C) olduğu ve kumaş ilerleme hızının 10 m/dak artması ile kumaş yüzey sıcaklıklarının daha az oranda artarak devam ettiği görülmektedir. Bu durumdan, kumaş ilerleme hızının artmasının, kumaş yüzey sıcaklığının düşmesine sebeb olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle 6. Kabine kadar kumaş

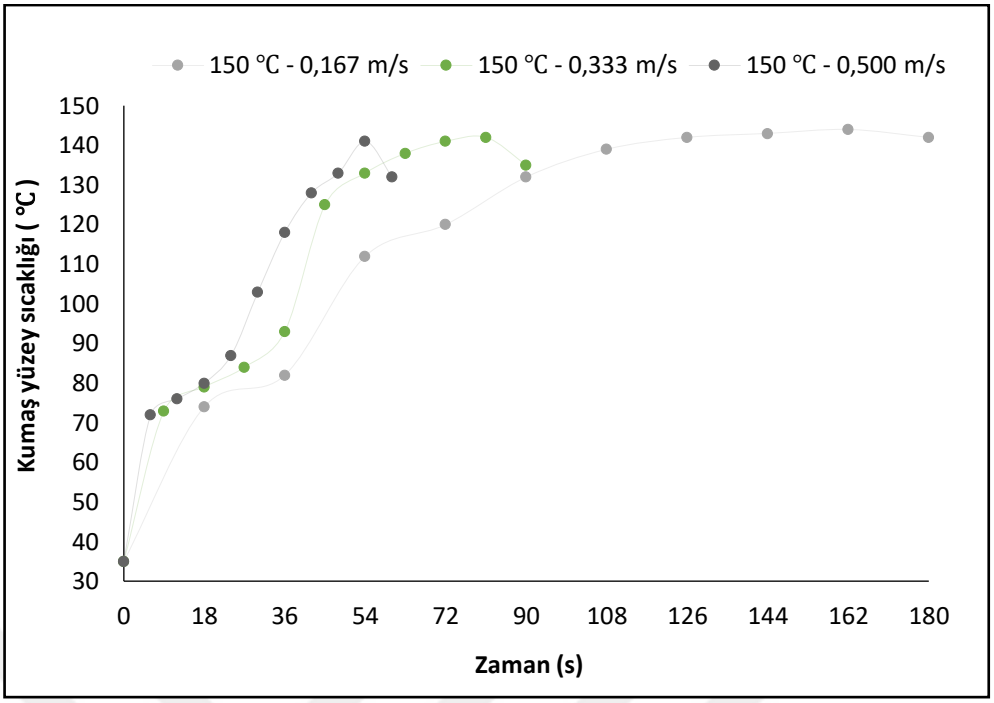
yüzey sıcaklık değerlerinin daha hızlı arttığı, 8. Kabinde sıcaklık değerlerinin üç farklı kurutma şartı için neredeyse aynı değerlere ulaştığı ve 9. Kabinde her üç kurutma şartı için kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin 103 °C olduğu görülmektedir. 10. Kabinde en çok sıcaklık düşünün 9 °C ile 0,500 m/s kumaş ilerleme hızı olan kurutma şartında gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.23 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 130 °C kurutma havası sıcaklığında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil 3.22 ve 3.23 beraber incelendiğinde, 110 °C'lik kurutma şartına kıyasla, kurutma havası sıcaklığının 130 °C'ye çıkması durumunda, aynı kumaş ilerleme hızı için, kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır.

Şekil 3.23'de, ilk kabin çıkışında kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin kumaş ilerleme hızına göre, 64-74 °C'ye ulaştığı, bu artış hızının 4. Kabine kadar artarak devam ettiği ve 5. Kabinden sonra kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin birbirine yakın seyrettiği görülmektedir. Ayrıca, 130 °C'lik kurutma şartı için kumaş yüzeyinin ulaştığı maksimum sıcaklık 125 °C ile 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında olduğu görülmektedir.



Şekil 3.24 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 150 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında, kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

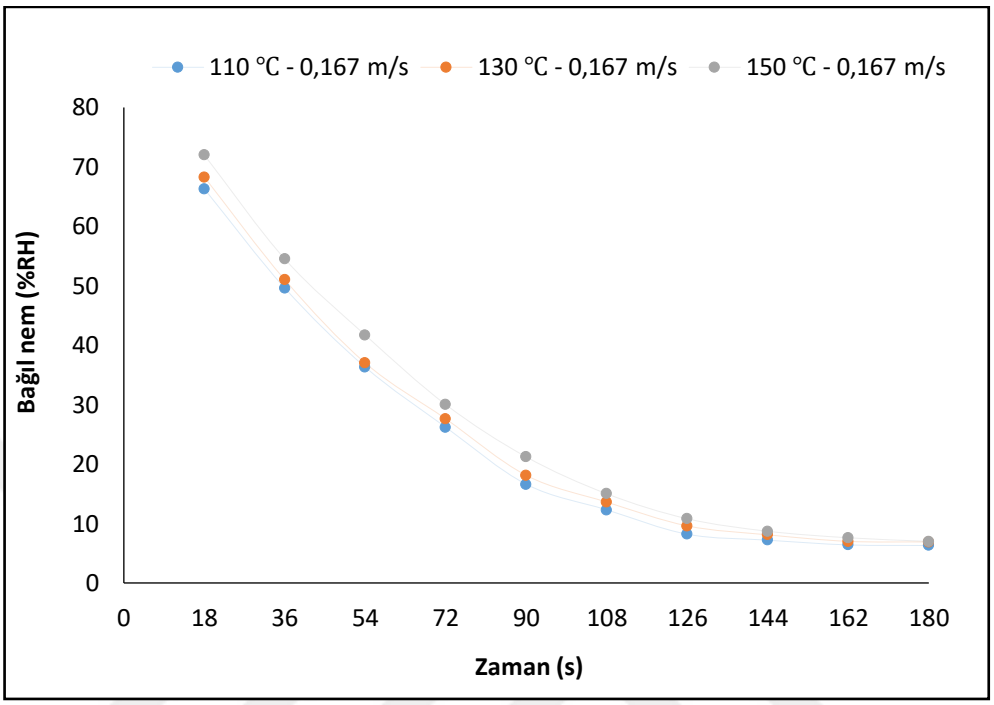
Şekil 3.24'de 150 ^{o}C'lik kurutma havası sıcaklığında ve üç farklı kumaş ilerleme hızında gerçekleşen deneylerden elde edilen kumaş yüzey sıcaklık değerlerinin oluşturduğu grafikler görülmektedir. Buna göre, birinci kabin çıkışında her üç kurutma şartı için, kumaş yüzey sıcaklığının 72-74 ^{o}C arasında değiştiği, kumaş yüzey sıcaklıklarının 6. Kabine kadar artarak devam ettiği görülebilir. 6. Kabinden sonra kumaşta bulunan nem miktarının azalmasına paralel olarak 0,167 m/s'lik kumaş ilerleme hızında, kumaş yüzey sıcaklığının 144 ^{o}C'ye kadar çıktığı Şekil 3.24'den anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, aynı kurutma havası sıcaklık değerlerinde, kumaş ilerleme hızının artması, kumaş yüzey sıcaklık değerlerini azalttığı tespit edilmiştir.

3.6.3 Kurutma Havası Sıcaklığının Bağıl Nem Değerlerine Etkisi

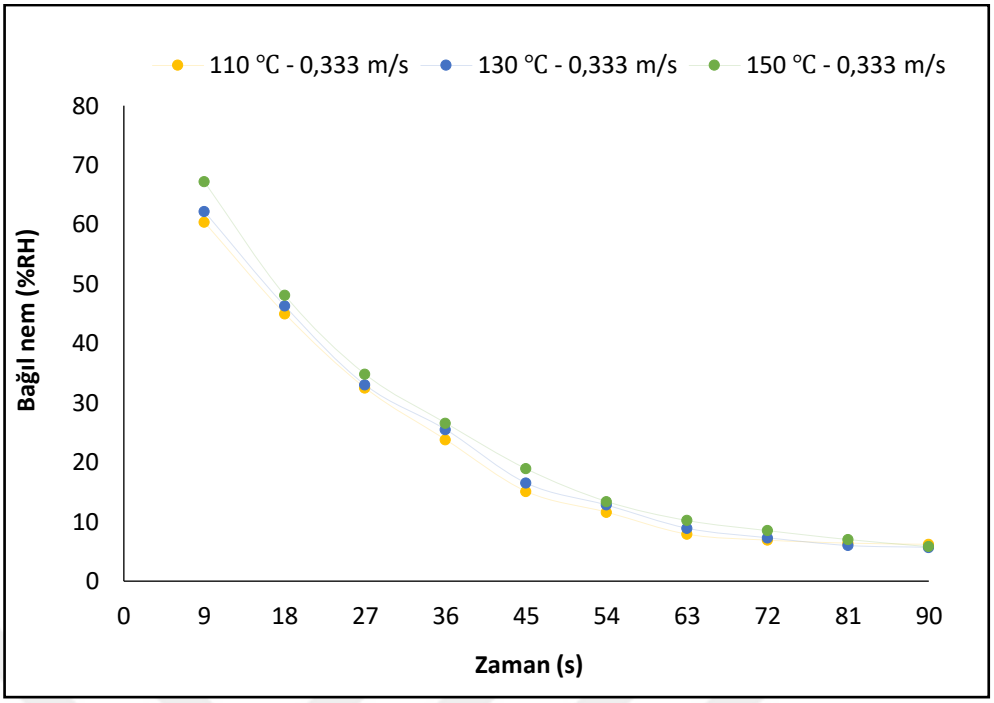
Şekil 3.25-3.27'de, kurutma havası sıcaklık değerlerinin, nemli hava bağıl nem değerleri üzerine etkisinin gösterildiği grafikler sunulmuştur. Şekillerden genel olarak, nemli hava kurutma havası sıcaklık değerlerinin aynı olduğu, kurutma şartları için, kumaş hızı arttıkça, kumaş yüzeyindeki sınır tabaka civarında ölçülen bağıl nem değerlerinin azaldığı sonucuna varılabilir. Kurumanın ilerleyen zamanlarında, kumaş yüzeyindeki nem

miktarının azalması, kurumanın difizyon ile gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bu durum özellikle 6. Kabinden sonra sınır tabaka civarında ölçülen nemli hava bağıl nem değerlerinin birbirine yaklaşması ile açıkça görülmektedir.



Şekil 3.25 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi

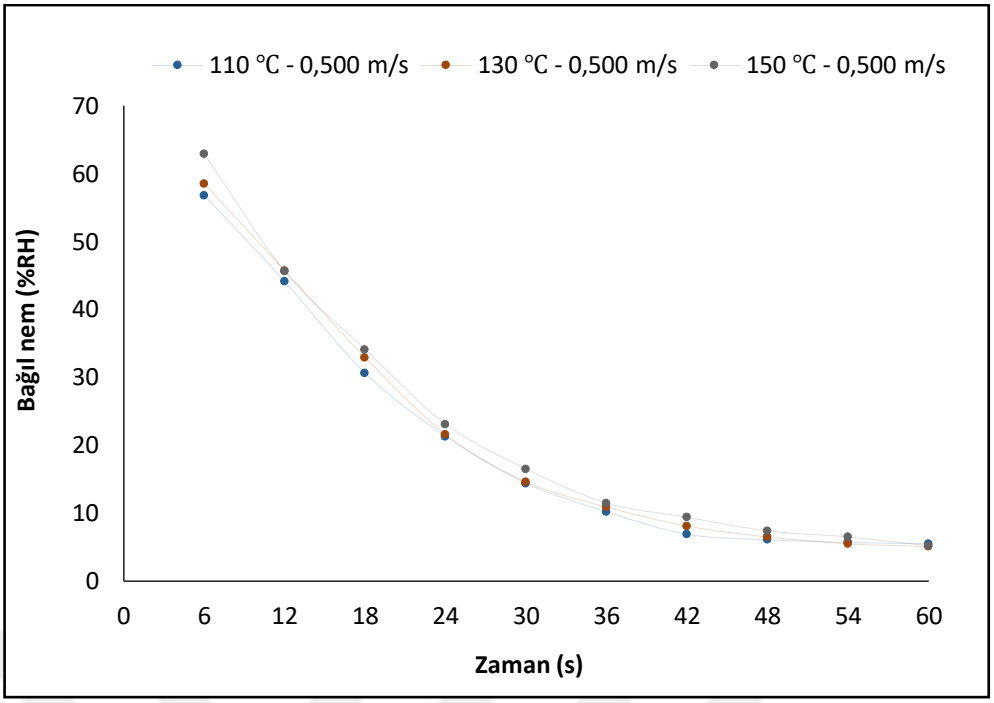
Şekil 3.25'de görülen, 0,167 m/s (10 m/dak) kumaş ilerleme hızında, üç farklı kurutma havası sıcaklığında ölçülen nemli hava bağıl nem değerlerinin oluşturduğu grafikler incelendiğinde, kurutma havası sıcaklık değerlerinin artması ile nemli hava bağıl nem değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı şekilden, 150 ^{o}C'lik kurutma şartında %72 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %7'ye düştüğü, 130 ^{o}C'lik kurutma şartında %68,3 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %6,9'a düştüğü, 110 ^{o}C'lik kurutma şartında ise %66,3 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %6,3'e düştüğü görülebilir. Ayrıca grafiklerin eğimleri incelendiğinde, kurutma işlemi süresince kumaşta sürekli nem kaybının olduğu, kurumanın ilerleyen zamanlarında, kumaştan uzaklaşan nem miktarının sürekli azalması sebebi ile kurutma işleminin azalan hız periyodunda gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.26 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 3.26 incelendiğinde, 150 ^{o}C'lik kurutma şartında %67,2 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %5,8'ye düştüğü, 130 ^{o}C'lik kurutma şartında %62,2 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %5,7'ye düştüğü, 110 ^{o}C'lik kurutma şartında ise %60,4 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %6,2'ye düştüğü görülebilir. Bu durum, aynı kumaş ilerleme hızında, kurutma havası sıcaklık değerinin artması ile buharlaşma miktarının arttığını göstermektedir.

Şekil 3.26'nın, Şekil 3.25 ile aynı kurutma havası sıcaklık değerlerine karşılık gelecek şekilde karşılaştırılması ile kumaş ilerleme hızında yapılan 10 m/dak'lık bir artışın, nemli hava bağıl nem değerlerinde yaklaşık %4-5 oranında bir azalmaya sebep olduğu görülebilir. Bu durum, aynı kurutma havası sıcaklığında yapılan kurutma işlemlerinde, kumaş ilerleme hızının artması ile nemli hava bağıl nem değerlerinin azaldığını göstermektedir.

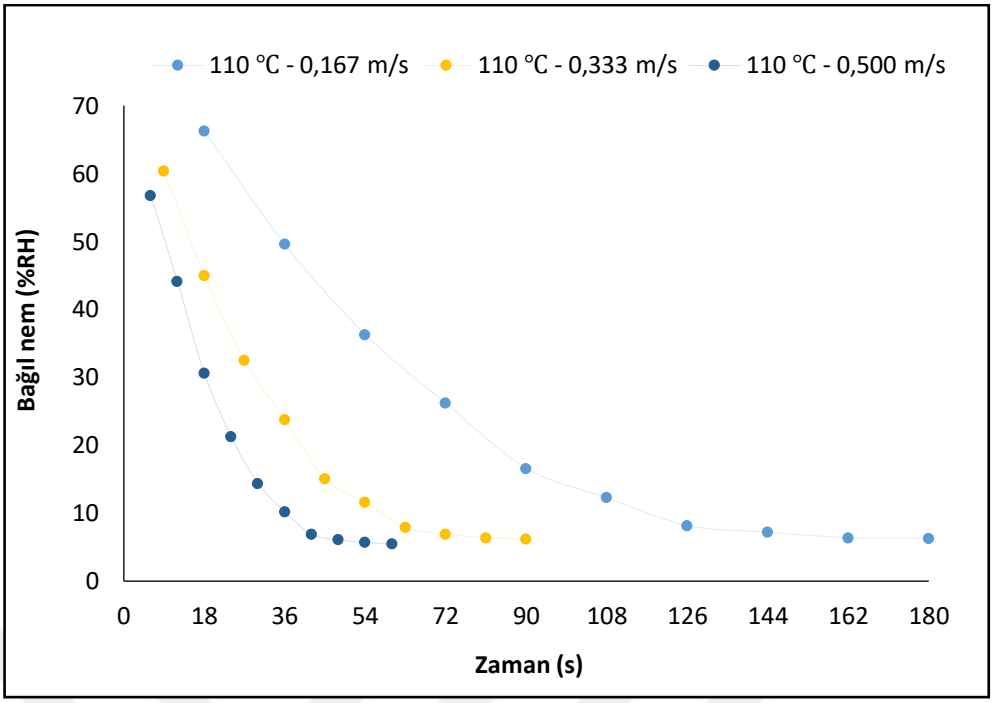


Şekil 3.27 Üç farklı kurutma havası sıcaklığında, 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 3.27 incelendiğinde, 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında gerçekleştirilen üç farklı kurutma işleminden elde edilen grafik eğimlerinin, diğer kurutma şartlarında gerçekleşen grafiklerin eğimleri ile benzerlik göstermekte olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.27'de, 150 ^{o}C'lik kurutma şartında %62,9 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %5,2'ye düştüğü, 130 ^{o}C'lik kurutma şartında %58,5 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %5,1'e düştüğü, 110 ^{o}C'lik kurutma şartında ise %56,8 ile başlayan bağıl nem değerlerinin %5,5'e düştüğü görülebilir.

3.6.4 Kumaş İlerleme Hızının Bağıl Nem Değerlerine Etkisi

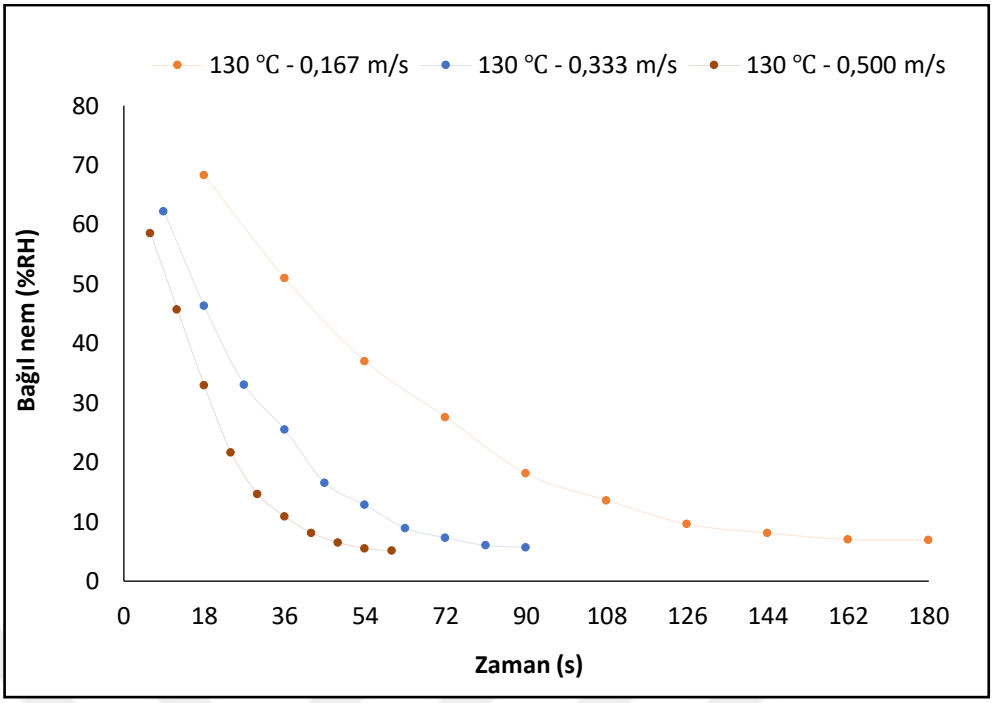
Kumaş ilerleme hızının, nemli hava bağıl nem değerlerinde meydana getirdiği değişimler Şekil 3.28-3.30'da verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, aynı kumaş ilerleme hızında, kurutma havası sıcaklığının artması ile kumaş yüzeyindeki sınır tabaka civarında ölçülen nemli havanın bağıl nem değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca kurutma havasının sıcaklığının 20 ^{0}C artmasıyla, birinci kabinde bağıl nem değerlerinin yaklaşık %0,5 oranında arttığı, kumaştaki nem miktarının azalmasına paralel olarak kurumanın ilerleyen zamanlarında bağıl nem miktarlarının birbirine yaklaşmakta olduğu görülmektedir.



Şekil 3.28 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 110 ºC kurutma havası sıcaklığında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi

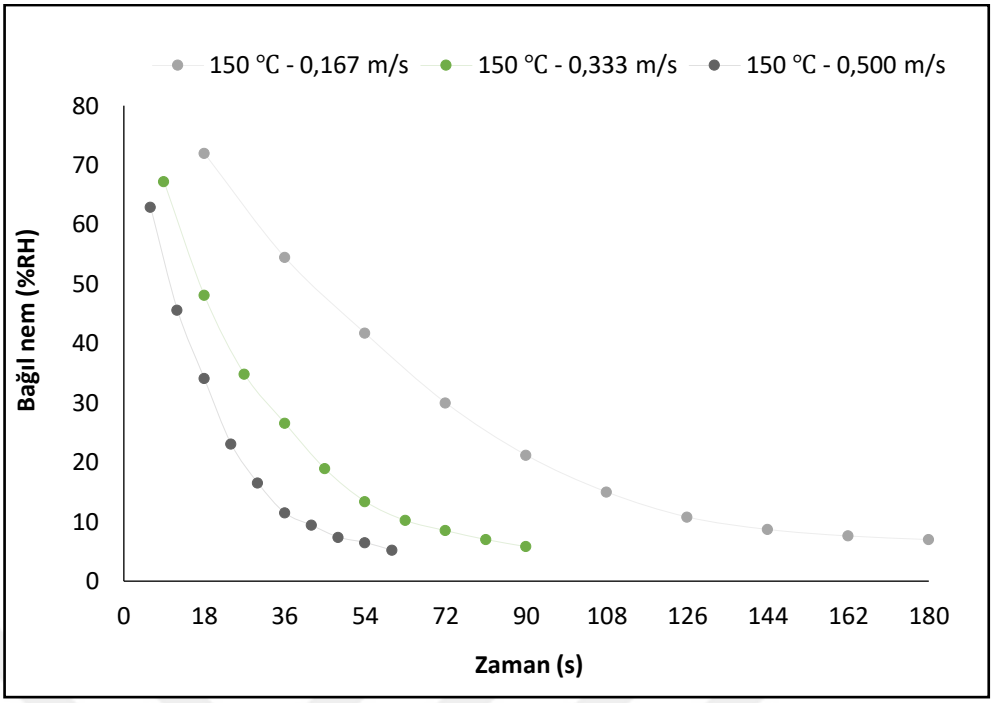
Şekil 3.28'de 110 ºC'lik kurutma havası sıcaklığında, üç farklı kumaş ilerleme hızından elde edilen nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Şekilde, grafik eğimlerinin birbirine paralellik gösterdiği, kumaş ilerleme hızının artması ile nemli havada ölçülen nem değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 3.28 incelendiğinde, nemli hava bağıl nem değerlerinin, kumaş ilerleme hızına göre sırasıyla, 0,167 m/s'de, %66,3-6,3 arasında, 0,333 m/s'de, %60,4-6,2 arasında, 0,500 m/s'de, %56,8-5,5 arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerlerden, düşük kumaş ilerleme hızına sahip kurutma şartlarında, kumaşın kabin içinde bulunduğu sürenin de daha fazla olması sebebiyle, daha fazla nem difüzyonunun meydana geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.29 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 130 ºC kurutma havası sıcaklığında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 3.29'da 130 ºC'lik kurutma havası sıcaklığında, üç farklı kumaş ilerleme hızından elde edilen nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Şekil 3.29 incelendiğinde, nemli hava bağıl nem değerlerinin, kumaş ilerleme hızına göre sırasıyla, 0,167 m/s'de, %68,3-6,9 arasında, 0,333 m/s'de, %62,2-5,7 arasında, 0,500 m/s'de, %58,5-5,1 arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerlerin 110 ºC'lik kurutma şartları ile karşılaştırılması durumunda, nemli hava bağıl nem değerlerinde, yaklaşık %2 kadar bir artış olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.30 Üç farklı kumaş ilerleme hızında, 150 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında, nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 3.30'da 150 ^{o}C'lik kurutma havası sıcaklığında, üç farklı kumaş ilerleme hızından elde edilen nemli hava bağıl nem değerlerinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Şekil 3.30'a göre, nemli hava bağıl nem değerlerinin, kumaş ilerleme hızına göre sırasıyla, 0,167 m/s'de, %72-7 arasında, 0,333 m/s'de, %67,2-5,8 arasında, 0,500 m/s'de, %62,9-5,2 arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerlerin 130 ^{o}C'lik kurutma şartları ile karşılaştırılması durumunda, nemli hava bağıl nem değerlerinde, yaklaşık %4 kadar bir artış olduğu anlaşılmaktadır.

BÖLÜM 4

METOT

4.1 Kuruma Davranışı

4.1.1 Isı ve Kütle Transferi

Kurutma proseslerinde, tekstil mamulü yüzeyindeki ısı ve kütle taşınım katsayıları önemli parametrelerdendir [43]. Kurutma işlemi, eş zamanlı ısı ve kütle transferi içeren bir olaydır ve bu tür problemlerin çözümü, eş zamanlı ısı ve kütle transferinin dikkate alınıp çözümlenmesini gerektirir [44]. Bu yaklaşım, ince kalınlığa sahip gözenekli mamullerin ramözler gibi çarpan hava jetleri ile yapılan kurutma proseslerini ifade etmede temel teşkil etmiştir.

Kararlı halde, sınır tabaka boyunca, Q transfer edilen ısı miktarı, $\bar{h}$ ortalama ısı taşınım katsayısı, A_s yüzey alanı, T_A kurutma havası sıcaklığı ve T_s yüzey sıcaklığı olmak üzere;

$$Q = \bar{h}\, A_s\, (T_A - T_s) \tag{4.1}$$

olarak ifade edilir. Ortalama ısı taşınım katsayısı $\bar{h}$ ise bölgesel ısı taşınım katsayısı h_x ve durgunluk noktasından olan uzaklığa L bağlı olup aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\bar{h} = \frac{1}{L}\int_0^L h_x\, dx \tag{4.2}$$

Kurutma yüzeyinden gaza kütle geçişi Newton'un Soğuma Kanununa benzer, kütlesel debi $\dot{m}$ (kg/s), kütle transfer katsayısı h_m (m/s), yüzey alanı A_s, mol kütlesi M ise,

$$\dot{m} = h_m\, A_s M(C_s - C_A) \tag{4.3}$$

olarak yazılabilir. Burada C_s (mol/m^3) kurutulacak yüzey üzerindeki su buharı konsantrasyonu ve C_A (mol/m^3) kurutucu hava jeti bünyesindeki buhar derişimidir. Kurutma yüzeyindeki buhar konsantrasyonu buharın kısmi basıncına göre, ideal gaz denkleminden yararlanılarak,

$$C = \frac{P_b}{R_u T} \tag{4.4}$$

Denklem 4.4 ile hesaplanabilir. Burada, P_b buharın kısmi basıncı olup yüzeyde sıvının doyma sıcaklığından, kurutma gazında ise mutlak neme bağlı olarak elde edilir. Çözeltideki akışkanın doyma basıncı, sıcaklık ilişkisi P = f (T)'in bilinmesi gerekir. R_u üniversal gaz sabiti ve T, hava-buhar karışım sıcaklığıdır. Kütle transfer katsayısı h_m, Chilton – Colburn benzeşimi (Pr ≠ Sc ≠ 1) kullanılarak,

Isı transferi için

$$Nu = CRe^m Pr^n = \frac{hL}{k} \tag{4.5}$$

Kütle transferi için

$$Sh = CRe^m Sc^n = \frac{h_m L}{D_{AB}} \tag{4.6}$$

eşitlikleri yazılarak, bunlar birbirine oranlandığında,

$$\frac{Nu}{Sh} = \frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB}} \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \tag{4.7}$$

bulunur. Bu aşamada, toplam değişken sayısını azaltmak ve ana denklemleri aynı boyutta yazabilmek (boyutsuzlaştırmak) için geliştirilen boyutsuz sayılara ihtiyaç duyulur. Bunlar sırasıyla Eş. 4.7'de kullanıldığında,

Isıl yayılım katsayısı

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

$$\frac{h}{h_m} = \frac{\alpha \rho c_p}{D_{AB}} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \tag{4.8}$$

şeklini alır. Prandtl sayısı Pr = $\frac{\nu}{\alpha}$ ve Schmidt sayısı Sc = $\frac{\nu}{D_{AB}}$ tanımlı olup, $\frac{Pr}{Sc}$ = $\frac{D_{AB}}{\alpha}$ halini alır.

$$\frac{h}{h_m} = \frac{\rho c_p}{\left(\frac{Pr}{Sc}\right)} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n = \frac{\rho c_p}{\left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{1-n}} \tag{4.9}$$

$$Le = \frac{Sc}{Pr}$$

Şeklinde tanımlanmış olan Lewis sayısı yerine yazıldığında,

$$\frac{h}{h_m} = \rho c_p Le^{1-n} \tag{4.10}$$

elde edilir. Yüksek hızlı çarpan hava jetleri altında kurutma söz konusu olduğunda, zorlanmış dış taşınımda n=1/3 alınabilir. Burada ρ gaz yoğunluğu, h yüzeydeki ortalama taşınım katsayısıdır. Bu eşitlik aracılığıyla akışkana ve gaza ait özellikler bilindiğinde belli taşınım katsayıları için kütle transferi katsayıları hesaplanabilir [4,45].

Tez çalışmasında, herbir kabinde gerçekleşen ısı ve kütle transfer katsayılarının bulunabilmesi için;

1- Kurutuma işlemi sırasında, kurutma havası ile kumaş yüzeyi arasında oluşan sınır tabakadaki film sıcaklığı 4.11 numaralı eşitlik kullanılarak tespit edilmiş

$$T_f = \frac{T_h - T_{ky}}{2} \tag{4.11}$$

2- Film sıcaklığındaki havanın termodinamiksel özellikleri bulunmuştur. (ρ, Cp, k, α, DAB, μ, ν, Pr). Bulunan termodinamiksel özellikler yardımı ile boyutsuz sayılar hesaplanmıştır. Bu değerler Ek-A'da sunulmuştur.

3- Kurutulacak kumaşa, düz plaka kabulü yapılarak, düz plaka üzerinde Reynolds sayısı araştırılmıştır (Eş. 4.12). Düz plaka üzerinde Laminar akışta, kritik Reynolds sayısı $5x10^5$

olduğundan, bulunan Reynolds sayılarına göre, kurutma süresince, akışın tüm tüm plaka üzerinde türbülanslı olduğu anlaşılmıştır.

$$Re = \frac{VL_c}{\nu} > 5x10^5 \tag{4.12}$$

4- Buna göre; zorlanmış dış taşınımda türbülanslı akış için ($5x10^5<Re<10^7$) geliştirilen ortalama Nusselt ve Sherwood sayıları ile ısı taşınım ve kütle taşınım katsayıları tespit edilmiştir Eş (4.13-4.14).

Isı transferi için

$$Nu = 0{,}037{Re_L}^{0,8}Pr^{1/3} = \frac{hL}{k} \tag{4.13}$$

Kütle transferi için

$$Sh = 0{,}037{Re_L}^{0,8}Sc^{1/3} = \frac{h_m L}{D_{AB}} \tag{4.14}$$

4.1.2 Kuruma Miktarı

4.1.2.1 Kütlenin Korunumu Yasası

Kontrol hacmi veya açık sistem için kütlenin korunumu ifadesi;

$$\begin{pmatrix} Kontrol\ hacmine \\ giren\ toplam \\ kütle \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Kontrol\ hacminden \\ çıkan\ toplam \\ kütle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Kontrol\ hacmindeki \\ toplam\ kütle \\ değişimi \end{pmatrix} \tag{4.15}$$

veya,

$$\Sigma\dot{m}_g - \Sigma\dot{m}_ç = \Sigma\Delta\dot{m}_{Kontrol\ hacmi} \tag{4.16}$$

şeklinde gösterilir. Bu yasa genel bir kontrol hacmi için kütlenin korunumu yasasının ifadesidir [46].

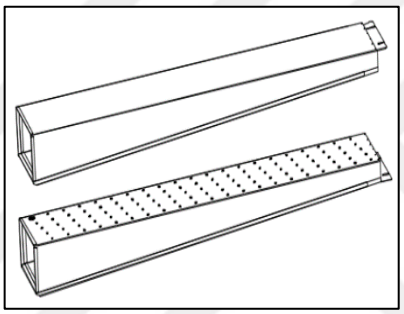
Bir kesitten birim zamanda akan kütle miktarına kütlesel debi denir ve $\dot{m}$ ile gösterilir.

Buna göre bir boru veya kanalın tüm kesitinden geçen kütlesel debi;

$$\dot{m} = \int_A \rho V_n \, dA \quad \text{(kg/s)} \tag{4.17}$$

4.1.2.2 Buharlaşma Miktarı

Her kabinde Şekil 4.1'de görüldüğü gibi üzerinde 105 adet (Ø=7mm) lüle bulunan toplam 8 çift (alt + üst) lüle dizisi (düze) bulunmaktadır. Kumaş üzerinden alınan nem miktarı, kumaşın kabinlerde kaldığı süre içerisinde, düzelerden kumaş üzerine üflenen kurutma havası debisinin alabildiği nem miktarına eşit kabulü yapılarak hesaplanmıştır. Bu nedenle her bir lüle dizisine ait kurutma havası debisi hesaplanmış ve nemli hava özgül nem değerleri ile kurutma havası özgül nem değerinden yararlanılarak buharlaşma miktarına ulaşılmıştır.



Şekil 4.1 Alt ve üst konumlandırılmış lüle dizisi

Bunagöre;

Tek bir lüle için kurutma havası debisi,

$$\dot{m}_{htek} = \rho.V.A_{lüle} \tag{4.18}$$

Lüle dizisi (düze) için kurutma havası debisi,

$$\dot{m}_{dizi} = 210.\dot{m}_{htek} \tag{4.19}$$

Buharlaşma miktarı,

$$M_b = \dot{m}_{hdizi}\,(\omega_{\text{nemli hava}} - \omega_{\text{kurutma havası}}).t \tag{4.20}$$

Eşitlik 4.20'de, ω özgül nem (g/kg), t kumaşın kabin içinde kaldığı süredir (s).

4.1.3 Nem Oranı

Islak bir malzemenin nem oranı yaş ve kuru baza göre iki şekilde tanımlanmaktadır. Malzeme içerisindeki nem kütlesinin toplam malzeme kütlesine oranı yaş baza göre nem oranı olarak ifade edilmektedir [34].

$$X_y = \frac{m_s}{m_y} \tag{4.21}$$

Eşitlik 4.21'de X_y Malzemenin yaş baza göre nem oranı (kg nem/kg yaş madde), m_s malzemenin içerdiği su kütlesi (kg), m_y yaş malzemenin kütlesidir (kg).

Malzeme içerisindeki nem kütlesinin, malzeme kuru kütlesine oranına kuru baza göre nem oranı denir.

$$X = \frac{m_s}{m_k} \tag{4.22}$$

Burada, X malzemenin kuru baza göre nem oranı (kg nem/kg kuru madde), m_k malzemenin kuru kütlesidir.

$m_s = m_y - m_k$ olduğundan, kuru baza göre nem oranı ile yaş baza göre nem oranı arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı kurulabilir.

$$X = \frac{X_s}{1 - X_y} \tag{4.23}$$

4.1.4 Kuruma Hızı

Kuruma hızı, Δt zaman aralığında kumaştan uzaklaşan nem miktarını ifade etmektedir ve aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanır [47].

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta_t} \tag{4.24}$$

Denklemde;

$\frac{\Delta M}{\Delta t}$: Kuruma hızı (kg su/kg kuru madde *saniye),

$M_{t+\Delta t}$: t+Δt anındaki nem içeriği (kg su/kg kuru madde),

M_t : t anındaki nem içeriği (kg su/kg kuru madde),

t *ve* Δt : süre (saniye)

olarak ifade edilmektedir.

4.2 Teorik Modeller

4.2.1 Birinci Dereceden Kinetik Model

Birinci dereceden kinetik modelde, kumaş içindeki suyun buharlaşması, su moleküllerinin kinetik reaksiyon hareketi ile gerçekleşebileceği kabulüne dayanır. Reaksiyon hızı, azalan kuruma periyodunda kuruma süresince kumaş nemindeki azalma olarak değerlendirilir. Böylece suyun buharlaşma oranı nem içeriği ile ilişkilendirilir. Birinci dereceden kinetik modelin denklemi şu şekildedir [48].

$$-\frac{dm}{dt} = km^n \tag{4.25}$$

Eşitlik 4.25'de, m anlık nem içeriği, n ise derece sabiti, birinci dereceden kinetik model için n = 1 dir. Kuruma periyodunun başlangıcında kumaş nem içeriği m_o ise, diferansiyel formdaki Eşitlik 4.25'in integrasyonu sonucu Eşitlik 4.26 elde edilir.

$$\frac{m}{m_0} = e^{-kt} \tag{4.26}$$

Burada k, kinetik katsayısıdır. Eşitlik 4.26'da anlık ve başlangıç nem içeriği oranlarının kinetik katsayısı k ile üstel bir ilişki oluşturduğu görülmektedir. Eşitliğin her iki tarafına doğal logaritma uygulandığında bu üstel ilişki doğrusal bir ilişkiye dönüşür ve Eşitlik 4.27 elde edilir.

$$ln\frac{m}{m_0} = -kt \tag{4.27}$$

Bu durumda, $\ln(m/m_0)$ – kuruma süresi (t) grafiğinin eğimi kinetik katsayı k'yı verecektir.

Kinetik katsayı k'yı belirlemenin diğer bir yolu ise Arrhenius ilişkisini kullanarak eşitlik 4.26'yı değiştirmektir [49]. Arrhenius eşitliği kinetik sabit k ve kurutma havası mutlak sıcaklığı T (K) bakımından aşağıdaki gibidir;

$$k = Ae^{-E_a/RT} \tag{4.28}$$

E_a aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R, üniversal gaz sabitidir (8,314x10^{-3} kJ/molK).

Aktivasyon enerjisi, ürün içinde nem transferi olduğunda, enerji engelini geçen su molekülleri olarak ifade edilir. Aktivasyon enerjisinin düşük değerleri kuruma işleminde daha fazla nem difüzyonu olduğu anlamına gelmektedir. Bir prosesin aktivasyon enerjisindeki azalma, su moleküllerinin ortalama enerjilerindeki artışla mümkün olmaktadır [50].

Eşitlik 4.28'deki Arrhenius eşitliğinden k'nın hesaplanması için regresyon denklemi, eşitliğin doğal logaritması alınarak bulunabilir [48].

$$lnk = \frac{-E_a}{R}\frac{1}{T} + lnA \tag{4.29}$$

Burada, A, kurutma modellerinde kurutma havası hızı ile bağlantılı sabit bir değerdir.

Aktivasyon enerjisinin ve A sabitini hesaplanması için lnk – 1/T grafiğinden yararlanılır. Çizilen grafikle düz bir çizgi elde edileceğinden bu çizginin eğimi ve kesişim noktası eşitlik 4.29'un çözümünde kullanılır.

4.2.2 Difüzyon Modeli

İnce tabaka malzemelerin kurutma işlemlerinde kuruma davranışını belirlemede sıklıkla kullanılan teorik modellerden biri de difüzyon modelidir. Bu modelde kurutulucak malzemede bulunan ayrılabilir nemin yüzeye difüzyon yolu ile taşındığı ve hava ile etkileşimi sonrasında yüzeyden buhar fazında uzaklaştığı kabul edilir.

Modelde, diğer kuruma mekanizmaları etkilerinin difüzyon katsayısının içinde olduğu kabul edilir. Böylece modelde yer alan difüzyon katsayısı efektif difüzyon katsayısı halini almış olur [51].

Difüzyon modeli Fick'in II. Yasasının çözümüne dayanır. Farklı malzemelerin kurutulması esnasında tek boyutlu kütle transferindeki izotropik difüzyon aşağıda verilen Fick'in II. Yasası ile ifade edilir [52].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{k\partial M}{x\partial x}\right) \tag{4.30}$$

Bu eşitlikte, M nem içeriği, t süre (s), D_{eff} efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), yassı düz levha için k=0, silindir için k=1 ve küre için k=2 olarak alınır [53].

Diferansiyel formda olan bu eşitliğin çözümü için,

- Nem içeriği yerine boyutsuz nem oranının alındığı,
- Kütle transferinde dış direncin iç dirence kıyasla ihmal edilebilir olduğu,
- Metaryel içerisinde su yayılımının homojen olduğu,
- Kuruma etkisi ile metaryelde büzüşmenin olmadığı,
- Metaryelin tüm noktalarında sıcaklığın eşit olduğu,

kabulleri yapılarak yassı düz bir plaka için Eşitlik 4.31 elde edilir.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)}exp\left[-\frac{(2n-1)^2\,\pi^2\,D_{eff}\,t}{4L^2}\right] \tag{4.31}$$

Burada MR boyutsuz nem oranı, M_e denge nem içeriği, L tabaka yarı kalınlığıdır. Kurutma alt ve üst paralel yüzeylerden meydana geldiğinde L, tabaka kalınlığının yarısı, tek bir yüzeyden meydana geldiğinde ise toplam tabaka kalınlığı olarak alınır [53].

Eşitlik 4.31 gözenekli kumaşlar gibi uzun sürede kuruyan metaryellere uygulandığında, kumaş sonsuz ince bir plak kabul edilir ve sadece eşitliğin sağ tarafındaki birinci terim gözönüne alınır. Böylece Eşittlik 4.32 elde edilir.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2}\,exp\left[-\frac{\pi^2\,D_{eff}\,t}{4L^2}\right] \tag{4.32}$$

Difüzyon tipi kurutmada su buharının yüzeyden aktarımına direnç çok küçüktür. Kurutma hızı materyal içindeki difüzyona bağlıdır. Bu durumda yüzeydeki nem içeriği

denge nem değeri M_e'ye eşittir. Buda yüzeydeki nem içeriğinin sıfır olduğu anlamına gelmektedir [54].

Denge nem içeriği M_e'nin sıfır olduğu kabulü ile, eşitlik 4.32'de verilen boyutsuz nem oranı MR aşağıdaki forma indirgenebilir.

$$MR = \frac{M}{M_0} = \frac{8}{\pi^2}\ exp\left[-\frac{\pi^2\ D_{eff}\ t}{4L^2}\right] \tag{4.33}$$

Difüzyon denklemi birinci dereceden kinetik model denklemine (Eş.4.26) benzer. İki model denklem arasındaki tek fark difüzyon modelinde bulunan kumaş kalınlığı L dir [48]. Efektif difüzyon katsayısının değeri Eşitlik 4.33'de verilen ifadenin logaritmik forma çevrilmesiyle (Eş. 4.34) ln MR değerlerinin kurutma süresine karşı grafiğe çevrilerek elde edilen düz çizginin eğiminden hesaplanabileceği gibi eşitlik 4.36'nın çözümünden de bulunabilir.

$$lnMR = ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2\ D_{eff}\ t}{4L^2} \tag{4.34}$$

lnMR – kurutma süresi grafiği eğiminden;

$$E = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \tag{4.35}$$

$$lnMR = -\left(\frac{\pi^2\ D_{eff}}{4L^2}\right)t - 0{,}210 \tag{4.36}$$

Burada; t kuruma süresi (s), L kumaş kalınlığıdır.

4.3 Aktivasyon Enerjisi

Efektif difüzyon katsayısnın sıcaklık ile değişimi Arrhenius tipi üstel bir fonksiyonla açıklanmaktadır [55].

$$D_{eff} = D_0\ exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{4.37}$$

Eşitlik 4.37'de D_{eff} efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), D_o sonsuz sıcaklıkta difüziviteye eşdeğer sabit (m^2/s), E_a aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R üniversal gaz sabiti (8,314 kJ/molK), T kurutma havası mutlak sıcaklığıdır (K). Efektif difüzyon katsayısı – sıcaklık grafiğinin eğimi aktivasyon enerjisini verir [52].

4.4 Regresyon Analizleri

Regresyon analizlerinde Microsoft Excel programından yararlanılmıştır. Regresyon katsayısı (R^2), kuruma eğrilerini tanımlayan denklem seçiminde ana ölçüt olarak alınmıştır. Regresyon katsayısına ek olarak ortalama karesel sapma khi-kare (χ^2), tahminin standart hatası (RMSE) ve kolerasyon katsayısı (r) değerleriyle de kullanılan denklemin uyumu araştırılmıştır [55-56].

4.4.1 Kolerasyon Katsayısı

Kolerasyon katsayısı tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki uygunluğu gösterir. Pearson katsayısı olarak da bilinir ve ''r'' ile gösterilir. Kolerasyon katsayısı -1 ile 1 arasında değişen değerler alabilir. Kolerasyon katsayısının 0'a (sıfır) yakın ya da 0 olması demek tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasında hiçbir bağıntının olmadığı anlamını taşır. Genel olarak r>0,90 olduğunda tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasında bir uygunluk olduğu söylenebilir. Ayrıca kolerasyon katsayısı hangi modelde 1'e daha yakın ise aynı zamanda standart hata ve ortalama karesel sapma da en küçük değerleri alacaktır. Bu ifade aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır [57-58].

$$r = \frac{n_0 \sum_{i=1}^{n_0} mr_{pre,i} mr_{exp,i} - \sum_{i=1}^{n_0} mr_{pre,i} \sum_{i=1}^{n_0} mr_{exp,i}}{\sqrt{n_0 \sum_{i=1}^{n_0} \left(mr_{pre,i}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n_0} mr_{pre,i}\right)^2} - \sqrt{n_0 \sum_{i=1}^{n_0} \left(mr_{exp,i}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n_0} mr_{exp,i}\right)^2}} \quad (4.38)$$

Burada; $mr_{pre,i}$ tahmin edilen nem oranını, $mr_{exp,i}$ deneysel nem oranını, n_0 ölçüm sayısını ifade etmektedir.

4.4.2 Tahminin Standart Hatası

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} \left(mr_{pre,i} - mr_{exp,i}\right)^2}{n_0}} \quad (4.39)$$

4.4.3 Ortalama Karesel Sapma

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0}\left(mr_{pre,i} - mr_{exp,i}\right)^2}{n_0 - n_c} \tag{4.40}$$

Burada n_c kurutma denklemindeki parametre sayısını ifade etmektedir.

4.5 Belirsizlik Analizi

Deneysel verilerin doğruluklarını bir takım hatalar etkiler. Bu hatalar temelde iki şekilde sınıflandırılır. Bunlardan birincisi deney seti ve ölçüm cihazları, diğeri ise ölçüm yapan kişiden kaynaklanan hatalardır. Birinci tür hataların telafileri, deneyde kullanılan araç ve gereçlerin yapısı gereği her zaman mümkün olmayabilir. Bu hatalı genliklerin genellikle belli olmaması nedeniyle literatürde hata diye adlandırılmaktadır [59]. Deney seti ve ölçüm cihazlarından kaynaklanan hataları da üç ana gurupta toplamak mümkündür. Bunlardan ilki; deneylerde kullanılan ölçüm araç ve gereçlerin üretim hatası, ikincisi; deney tekrarı sırasında ortaya çıkan ve sebebi bilinemeyen sabit hatalar, üçüncüsü ise; elektronik, sürütünme, rüzgar gibi etkilerin sebeb olduğu rastgele hatalardır. Çoğu zaman sabit hatalar ile rastgele hataları birbirinden ayırt etmek zordur [60]. Ölçüm aletinde üretim hatası olmadığı varsayımı yapılırsa, sabit ve rastgele hataları belirleyerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulması için hata analizi yapılmalıdır [61,62]. Literatürde, deneysel çalışmaların çok fazla yer almasına rağmen, bu çalışmalarda hata analizine yer vermiş olan çok az sayıda çalışmaya rastlanmaktadır [62-67].

Belirsizlik analizinde, sabit hatalar, rastgele hatalar ve imalat hataları nedeniyle ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata hesabı Eş.4.41'de verilen denklem yardımı ile elde edilebilir [60,62].

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1}w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2}w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n}w_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{4.41}$$

Burada R, x_1, x_2, … x_n bağımsız değişkenlerinin verilen bir fonksiyonudur. w_1, w_2, …, w_n ise bağımsız değişkenlerin belirsizliğidir.

BÖLÜM 5

ANALİZ

Kuruma olayının tam olarak modellenmesi genellikle kurutulan malzemenin yapısının karmaşıklığı ve kurumanın birçok farklı mekanizma ile gerçekleşmesi nedeniyle oldukça güç ve karmaşıktır. Bu nedenle literatürde kurumayı tanımlamak üzere geliştirilmiş birçok kurutma modeli mevcuttur. Bunların bir kısmı kuruma olayının fiziğini dikkate alan teorik modeller bir kısmı ise kuruma zamanı ve nem oranı arasında bağlantı kuran ampirik ve yarı-ampirik modellerdir.

Bu tez çalışmasında; tekstil endüstirisinde oldukça sık kullanılan bir ram makinesinin kurutma davranışı araştırılmış ve modellenmiştir. Teorik modelleme aracı olarak Fick'in ikinci yasasından türetilen birinci dereceden kinetik model ve difüzyon modeli olmak üzere iki farklı teorik modelden yararlanılmış ve bu modellerin deneysel veriler ile aralarındaki uyumluluk araştırılmıştır.

5.1 Kabuller

1- İncelenen sistemler üretimde kullanılan gerçek sistemlerdir.

2- Sistem sürekli akışlı açık sistem modeline uymaktadır.

3- Akışkan özellikleri sabittir.

4- Kurutma prosesi kararlı haldedir. Kimyasal reaksiyonlar yoktur.

5- Sabit özgül ısı ile birlikte hava ideal gaz kabul edilmiştir ($20^{o}C$ ve 1 atm).

6- Gözenekli ortamda nem üretimi veya tüketimi yoktur.

7- Kumaşla temas eden kurutma havası sürekli yenilendiğinden kurutma havasının nem ve sıcaklığı, kumaşın ısı ve nem değişiminden etkilenmemiştir.

8- Kumaşın ihmal edilebilir kalınlığı nedeniyle kumaş düzlemine dik yönde difüzyon direnci dikkate alınmamıştır.

9- Gözenekli ortam doymuş haldedir.

10- Kurutucu adyabatiktir.

11- Hava akışı lüle orta düzlemine göre simetriktir.

12- Gözenekli malzeme homojen ve rijittir.

13- Kurutucuda ilerleyen kumaş, düz plaka olarak kabul edilmiştir.

14- Referans Çevrenin özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Referans çevrenin özellikleri

$(C_p)_h$	Havanın özgül ısısı	1,004 kJ/kg^{o}C
$(C_p)_b$	Su buharının özgül ısısı	1,872 kJ/kg^{o}C
R_h	Havanın gaz sabiti	0,287 kJ/kg^{o}C
R_b	Su buharının gaz sabiti	0,4615 kJ/kg^{o}C
T_o	Çevre sıcaklığı	26,7^{o}C
P_o	Atmosfer basıncı	101,3 kPa

5.2 Kuruma Davranışının Belirlenmesi

5.2.1 Isı ve Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi

Üç farklı kurutma havası sıcaklığı ve üç farklı kumaş ilerleme hızı için yapılan deneylerde, kurutucunun herbir kabin giriş ve çıkış noktalarında oluşan ısı-kütle taşınım katsayılarının belirlenebilmesi için, Çizelge 3.3-3.4 ve 3.5'de verilen değerlerden ve Bölüm 4'te verilen eşitliklerde yararlanılmıştır. Elde edilen veriler Ek-A ve Çizelge 5.2-5.3 ve 5.4'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2 Taşınım ısı-kütle transfer katsayıları (0,167 m/s)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı T_h (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı T_y (K)	Ara yüzey sıcaklığı $(T_h+T_y)/2$ (K)	Taşınım ısı transferi katsayısı h (W/m^2K)	Taşınım kütle transferi katsayısı h_m (m/s)
0,167 (110 °C)	GİRİŞ	383	308	345,5	65,319	0,0576
	18	383	331	357	64,473	0,0584
	36	383	343	363	65,979	0,0606
	54	383	358	370,5	67,089	0,0628
	72	383	364	373,5	68,405	0,0644
	90	383	369	376	70,101	0,0663
	108	383	373	378	71,125	0,0668
	126	383	375	379	70,935	0,0676
	144	383	375	379	70,935	0,0676
	162	383	376	379,5	70,825	0,0676
	180	383	373	378	71,222	0,0669
	ÇIKIŞ	383	341	362	72,786	0,0667
0,167 (130 °C)	GİRİŞ	403	308	355,5	70,658	0,0638
	18	403	347	375	68,569	0,0647
	36	403	357	380	70,311	0,0671
	54	403	383	393	70,997	0,0697
	72	403	391	397	72,303	0,0716
	90	403	395	399	74,111	0,0737
	108	403	395	399	75,194	0,0748
	126	403	396	399,5	75,186	0,0749
	144	403	397	400	75,076	0,0750
	162	403	398	400,5	74,967	0,0750
	180	403	392	397,5	75,407	0,0748
	ÇIKIŞ	403	366	384,5	76,894	0,0742
0,167 (150 °C)	GİRİŞ	423	308	365,5	89,272	0,0825
	18	423	347	385	86,702	0,0837
	36	423	355	389	89,002	0,0866
	54	423	385	404	89,717	0,0902
	72	423	393	408	91,384	0,0926
	90	423	405	414	93,150	0,0956
	108	423	412	417,5	93,983	0,0972
	126	423	415	419	93,981	0,0974
	144	423	416	419,5	93,851	0,0975
	162	423	417	420	93,722	0,0976
	180	423	415	419	93,981	0,0974
	ÇIKIŞ	423	384	403,5	96,000	0,0965

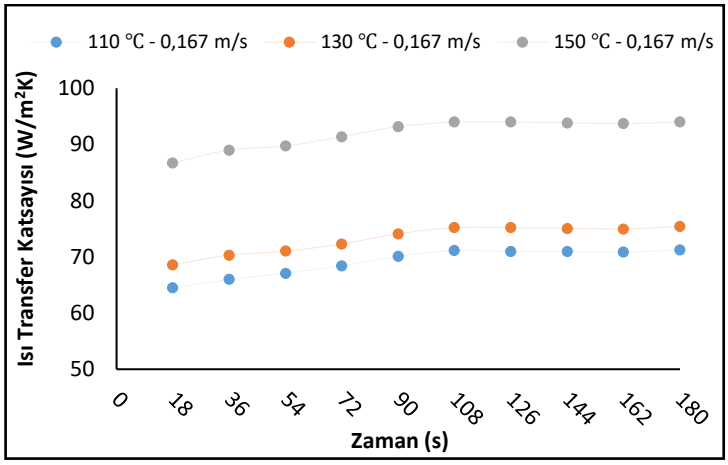
Çizelge 5.3 Taşınım ısı-kütle transfer katsayıları (0,333 m/s)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı T_h (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı T_y (K)	Ara yüzey sıcaklığı $(T_h+T_y)/2$ (K)	Taşınım ısı transferi katsayısı h (W/m^2K)	Taşınım kütle transferi katsayısı h_m (m/s)
0,333 (110 °C)	GİRİŞ	383	308	345,5	65,636	0,0579
	9	383	331	357	64,473	0,0584
	18	383	340	361,5	66,043	0,0605
	27	383	344	363,5	67,846	0,0624
	36	383	350	366,5	69,170	0,0641
	45	383	357	370	70,770	0,0660
	54	383	359	371	71,690	0,0671
	63	383	371	377	71,110	0,0674
	72	383	375	379	70,935	0,0676
	81	383	376	379,5	70,825	0,0676
	90	383	375	379	70,715	0,0676
	ÇIKIŞ	383	358	370,5	71,788	0,0672
0,333 (130 °C)	GİRİŞ	403	308	355,5	70,658	0,0638
	9	403	340	371,5	68,895	0,0646
	18	403	351	377	70,595	0,0669
	27	403	355	379	72,532	0,0691
	36	403	369	386	73,507	0,0711
	45	403	380	391,5	74,885	0,0734
	54	403	384	393,5	75,752	0,0745
	63	403	389	396	75,631	0,0747
	72	403	393	398	75,407	0,0748
	81	403	397	400	75,186	0,0749
	90	403	392	397,5	75,519	0,0748
	ÇIKIŞ	403	373	388	76,544	0,0743
0,333 (150 °C)	GİRİŞ	423	308	365,5	89,272	0,0825
	9	423	346	384,5	86,702	0,0837
	18	423	352	387,5	89,137	0,0866
	27	423	357	390	91,532	0,0893
	36	423	366	394,5	93,071	0,0918
	45	423	398	410,5	93,545	0,0954
	54	423	406	414,5	94,378	0,0970
	63	423	411	417	94,243	0,0973
	72	423	414	418,5	93,981	0,0974
	81	423	415	419	93,851	0,0975
	90	423	408	415,5	94,375	0,0972
	ÇIKIŞ	423	386	404,5	95,861	0,0965

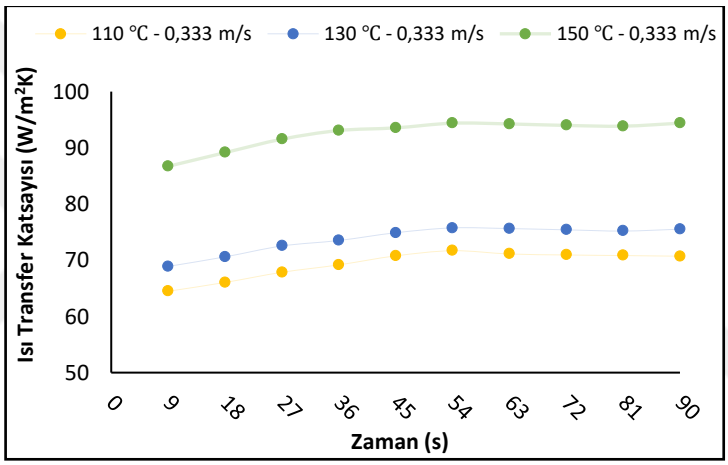
Çizelge 5.4 Taşınım ısı-kütle transfer katsayıları (0,500 m/s)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı T_h (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı T_y (K)	Ara yüzey sıcaklığı $(T_h+T_y)/2$ (K)	Taşınım ısı transferi katsayısı h (W/m^2K)	Taşınım kütle transferi katsayısı h_m (m/s)
0,500 (110 °C)	GİRİŞ	383	308	345,5	65,636	0,0579
	6	383	329	356	64,580	0,0583
	12	383	338	360,5	66,151	0,0605
	18	383	341	362	68,022	0,0623
	24	383	345	364	69,846	0,0624
	30	383	354	368,5	70,882	0,0660
	36	383	359	371	71,690	0,0671
	42	383	369	376	71,110	0,0674
	48	383	375	379	70,935	0,0676
	54	383	376	379,5	70,825	0,0676
	60	383	367	375	71,335	0,0673
	ÇIKIŞ	383	362	372,5	71,561	0,0672
0,500 (130 °C)	GİRİŞ	403	308	355,5	70,658	0,0638
	6	403	337	370	69,113	0,0645
	12	403	345	374	70,930	0,0668
	18	403	350	376,5	72,711	0,0689
	24	403	361	382	74,360	0,0709
	30	403	370	386,5	75,453	0,0731
	36	403	378	390,5	76,093	0,0744
	42	403	386	394,5	75,743	0,0747
	48	403	391	397	75,519	0,0748
	54	403	396	399,5	75,186	0,0749
	60	403	388	395,5	75,631	0,0747
	ÇIKIŞ	403	385	394	75,856	0,0746
0,500 (150 °C)	GİRİŞ	423	308	365,5	89,272	0,0825
	6	423	345	384	86,836	0,0836
	12	423	349	386	89,409	0,0865
	18	423	353	388	91,809	0,0892
	24	423	360	391,5	93,489	0,0916
	30	423	376	399,5	94,977	0,0947
	36	423	391	407	95,455	0,0965
	42	423	401	412	94,907	0,0970
	48	423	413	418	94,112	0,0974
	54	423	414	418,5	93,981	0,0974
	60	423	405	414	94,640	0,0971
	ÇIKIŞ	423	393	408	95,449	0,0967

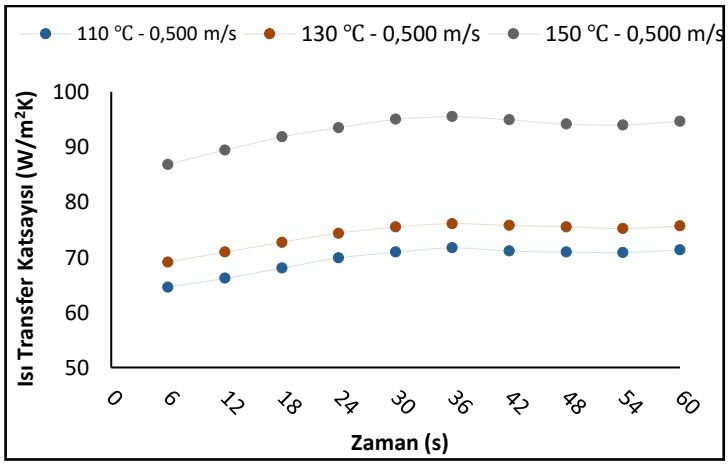
Çizelge 5.2-5.4'de verilen değerlerin kumaş ilerleme hızı ve kurutma havası sıcaklığına göre oluşturdukları grafikler Şekil 5.1-5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için ısı taşınım katsayısı



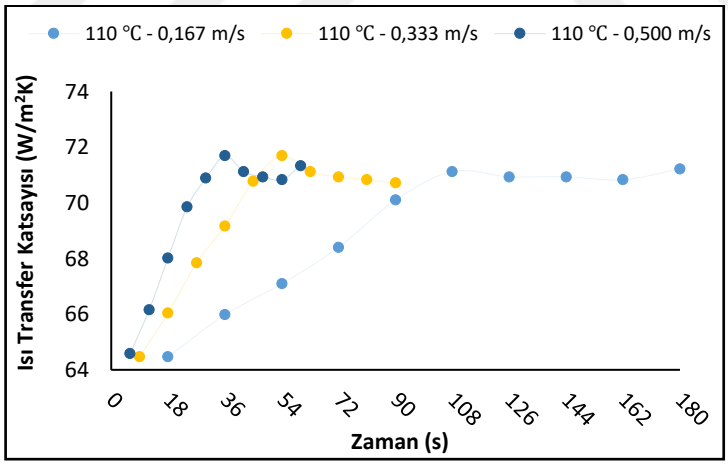
Şekil 5.2 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için ısı taşınım katsayısı



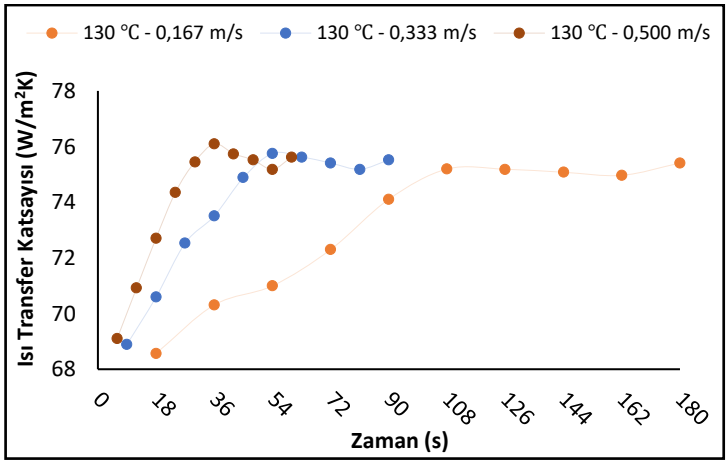
Şekil 5.3 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için ısı taşınım katsayısı

Şekil 5.1-5.3 incelendiğinde, aynı kumaş ilerleme hızında, üç farklı kurutma havası sıcaklığında, her kabinin giriş ve çıkış noktalarındaki ısı taşınım katsayılarının zamana göre değişimi görülmektedir. Her üç grafikte, kumaş yüzeyindeki nem miktarına bağlı olarak, kumaş yüzey sıcaklığının, sınır tabaka (film) sıcaklığına yaklaşması ile ısı taşınım katsayısının arttığı, kurutma havası değerlerine yaklaşması durumunda ise azalmaya başladığı görülmektedir. Aynı kumaş ilerleme hızında kurutma havası sıcaklığının 110 ^{o}C'den 130 ^{o}C'ye çıkarılması durumunda, ısı taşınım katsayısında yaklaşık %4-5 oranında bir artış, 130 ^{o}C'den 150 ^{o}C'ye çıkarılması durumunda yaklaşık %15-23 oranında bir artış meydana gelmektedir. Isı transferindeki artışa, kurutma havası sıcak değerinin, ayarlanmasını sağlayan hava hızı da etkili olmaktadır. Deneyler sırasında, 110 ^{o}C sıcaklıktaki kurutma havası için, kurutma havası hızı ortalama 21,85 m/s, 130 ^{o}C sıcaklıktaki kurutma havası için, kurutma havası hızı 24,45 m/s, 150 ^{o}C sıcaklıktaki kurutma havası için, kurutma havası hızı 33,4 m/s olarak tespit edilmiştir. Hızlar arasındaki oran, yaklaşık olarak bunu doğrular niteliktedir.

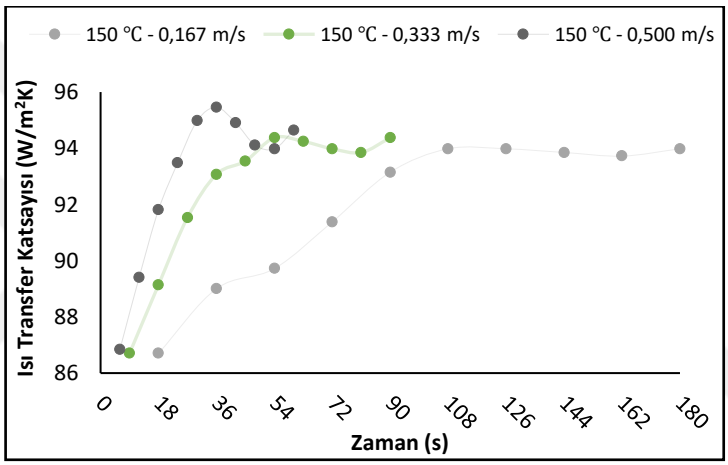
Aynı kurtma havası sıcaklığı ve üç farklı kumaş ilerleme hızı için oluşturulan grafikler Şekil 5.4-5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.4 110 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için ısı taşınım katsayısı



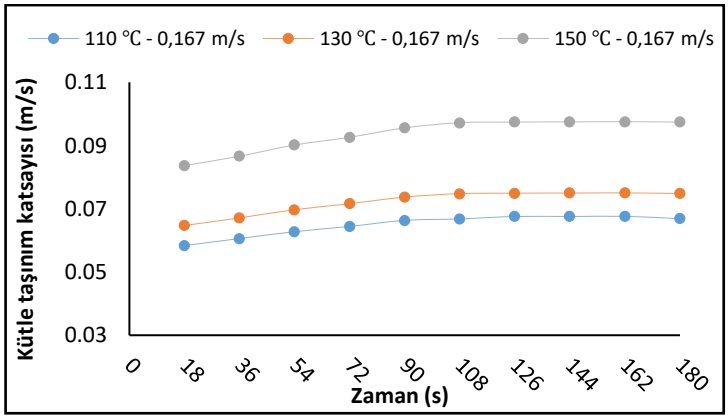
Şekil 5.5 130 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için ısı taşınım katsayısı



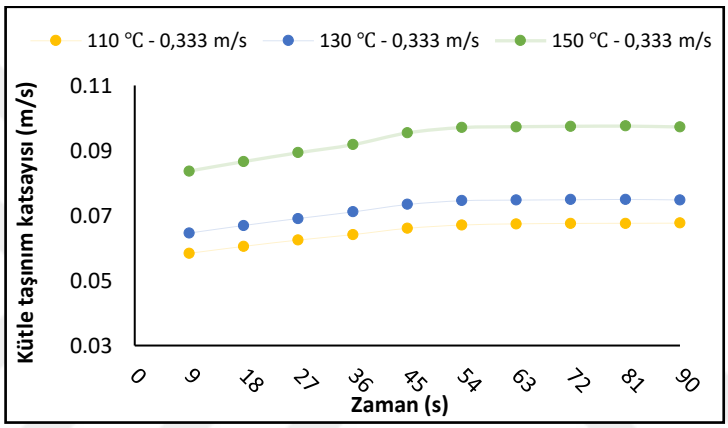
Şekil 5.6 150 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için ısı taşınım katsayısı

Şekil 5.4-5.6 incelendiğinde, tüm grafikler kendi aralarında hemen hemen aynı değerde ısı taşınım katsayılarınıra sahipken, kurutma havası sıcaklığının artması ile ısı taşınım katsayısı değerlerinin arttığı görülmektedir.

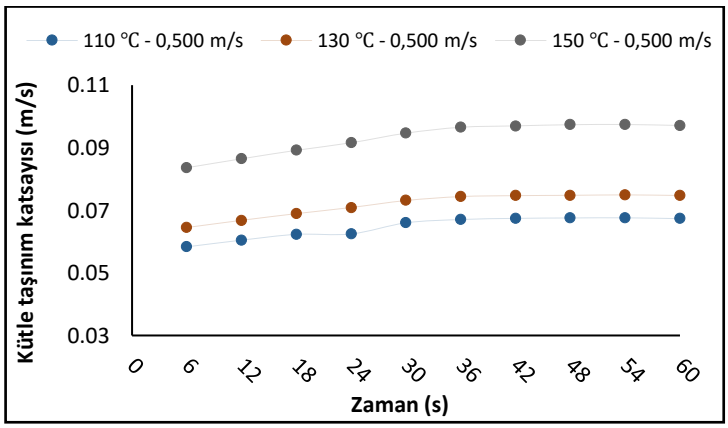
Benzer şekilde, kütle taşınım katsayısının zamanla değişimi (Şekil 5.7-5.9) incelendiğinde, Kumaştaki nem miktarına bağlı olarak, ısı transfer katsayısı arttıkça, kütle transfer katsayısı artmakta, kumaş yüzey sıcaklığı kurutma havası sıcaklığına yaklaşmaya başladığında ise ısı transfer katsayısı azalmakta buna karşılık kütle transfer katsayısının sabit değerlere ulaşmakta olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, kütle ve ısı taşınım katsayıları değerlerinde önemli olan etkenin, kurutma havası sıcaklığı ve hızı olduğu, kumaş ilerleme hızının bu değerlerde çok az miktarlarda değişiklik yaptığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.7 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için kütle taşınım katsayısı

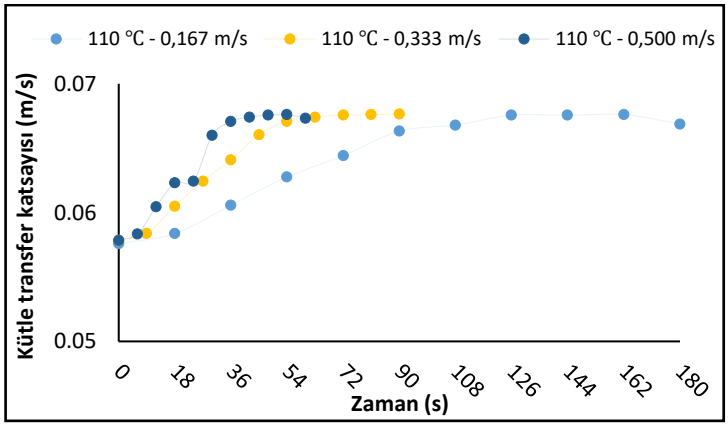


Şekil 5.8 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için kütle taşınım katsayısı

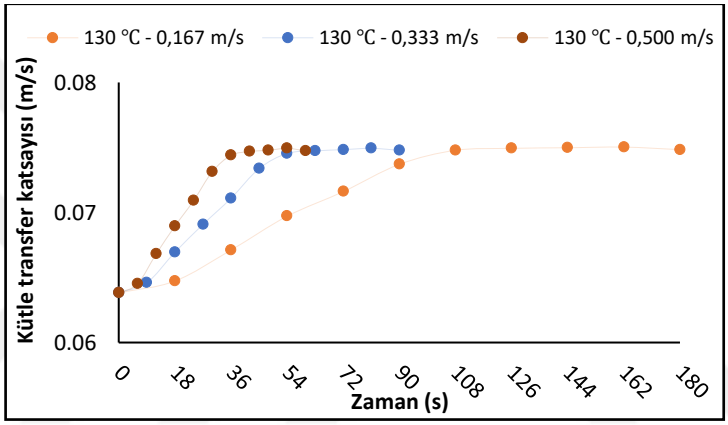


Şekil 5.9 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklık değerleri için kütle taşınım katsayısı

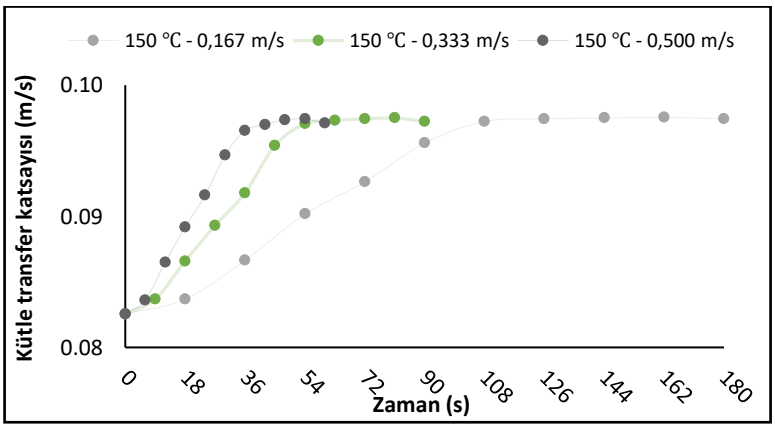
Aynı kurutma havası sıcaklık değerlerine karşın, üç farklı kumaş ilerleme hızına ait kütle taşınım katsayılarının değişim grafikleri Şekil 5.10-5.12'de sunulmuştur.



Şekil 5.10 110 °C kurutmma havası sıcaklığı ve üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için kütle taşınım katsayısı



Şekil 5.11 130 °C kurutmma havası sıcaklığı ve üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için kütle taşınım katsayısı



Şekil 5.12 150 °C kurutmma havası sıcaklığı ve üç farklı kumaş ilerleme hızı değerleri için kütle taşınım katsayısı

Şekil 5.10-5.12 incelendiğinde, aynı kumaş ilerleme hızlarında, kurutma havası sıcaklık değerinin artması ile kütle transfer katsayılarının oluşturdukları grafikler benzer

özellikleler göstermekle birlikte kurutma havası sıcaklık değerlerinin artması ile kütle transfer katsayılarının da arttığı açıkça görülmektedir.

5.2.2 Buharlaşma Miktarının Belirlenmesi

Tüm kurutma şartları için, kurutucu kabinlerinin giriş ve çıkış noktalarında meydana gelen buharlaşma miktarları Çizelge 3.4-3.5'deki veriler ve Bölüm 4.1.2.2'de verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmış, elde edilen veriler Çizelge 5.5-5.7'de sunulmuştur.

Çizelge 5.5 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında buharlaşma miktarları

Hız (m/s)	Kabin	Süre (Saniye)	Kabin içi nemli hava nem değerleri (%RH)	Kumaş giriş nemi (%RH)	Kumaş giriş ağırlığı kg	Kuru kumaş ağırlığı kg	Kumaş nem ağırlığı (m) kg	Buharlaşma miktarı kg	Kumaş çıkış birim ağırlığı kg /m^2	Kumaş çıkış ağırlığı kg
110 °C	Kab. Giriş	0	64,1	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	18	66,3	60,00	1,510	0,594	0,915	0,229	0,287	1,281
	2.Kabin	36	49,6	53,64	1,281	0,594	0,687	0,174	0,248	1,107
	3.Kabin	54	36,3	46,34	1,107	0,594	0,513	0,136	0,217	0,971
	4.Kabin	72	26,2	38,82	0,971	0,594	0,377	0,101	0,195	0,870
	5.Kabin	90	16,6	31,69	0,870	0,594	0,276	0,073	0,178	0,796
	6.Kabin	108	12,3	25,40	0,796	0,594	0,202	0,049	0,167	0,748
	7.Kabin	126	8,2	20,56	0,748	0,594	0,154	0,034	0,160	0,714
	8.Kabin	144	7,2	16,79	0,714	0,594	0,120	0,030	0,153	0,684
	9.Kabin	162	6,4	13,13	0,684	0,594	0,090	0,027	0,147	0,657
	10.Kabin	180	6,3	9,58	0,657	0,594	0,063	0,023	0,142	0,634
	Kab. Çıkış	ÇIKIŞ	6,2	6,34	0,634	0,594	0,040	0,021	0,137	0,613
130 °C	Kab. Giriş	0	72,1	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	18	74,6	60,00	1,510	0,594	0,915	0,238	0,285	1,272
	2.Kabin	36	58,4	53,30	1,272	0,594	0,678	0,181	0,244	1,091
	3.Kabin	54	44,2	45,55	1,091	0,594	0,497	0,139	0,213	0,952
	4.Kabin	72	33,2	37,62	0,952	0,594	0,358	0,102	0,190	0,850
	5.Kabin	90	22,8	30,13	0,850	0,594	0,256	0,072	0,174	0,779
	6.Kabin	108	15,6	23,71	0,779	0,594	0,185	0,049	0,163	0,730
	7.Kabin	126	10,2	18,58	0,730	0,594	0,136	0,032	0,156	0,698
	8.Kabin	144	8,8	14,84	0,698	0,594	0,104	0,028	0,150	0,670
	9.Kabin	162	7,4	11,33	0,670	0,594	0,076	0,023	0,145	0,647
	10.Kabin	180	6,9	8,14	0,647	0,594	0,053	0,022	0,140	0,625
	Kab. Çıkış	ÇIKIŞ	6,4	4,96	0,625	0,594	0,031	0,020	0,135	0,605
150 °C	Kab.Giriş	0	87,8	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	18	84,2	60,00	1,510	0,594	0,915	0,255	0,281	1,255
	2.Kabin	36	63,1	52,67	1,255	0,594	0,661	0,183	0,240	1,072
	3.Kabin	54	48,8	44,59	1,072	0,594	0,478	0,141	0,208	0,931
	4.Kabin	72	35,1	36,20	0,931	0,594	0,337	0,103	0,185	0,828
	5.Kabin	90	24,1	28,26	0,828	0,594	0,234	0,070	0,170	0,758
	6.Kabin	108	16,4	21,63	0,758	0,594	0,164	0,048	0,159	0,710
	7.Kabin	126	10,5	16,31	0,710	0,594	0,116	0,031	0,152	0,679
	8.Kabin	144	9,1	12,51	0,679	0,594	0,085	0,027	0,146	0,652
	9.Kabin	162	7,4	8,93	0,652	0,594	0,058	0,022	0,141	0,630
	10.Kabin	180	6,1	5,79	0,630	0,594	0,036	0,018	0,137	0,613
	Kab.Çıkış	ÇIKIŞ	5,7	3,03	0,613	0,594	0,019	0,017	0,133	0,596

Çizelge 5.6 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında buharlaşma miktarları

Hız (m/s)	Kabin	Süre (Saniye)	Kabin içi nemli hava nem değerleri (%RH)	Kumaş giriş nemi (%RH)	Kumaş giriş ağırlığı kg	Kuru kumaş ağırlığı kg	Kumaş nem ağırlığı (m) kg	Buharlaşma miktarı kg	Kumaş çıkış birim ağırlığı kg /m^2	Kumaş çıkış ağırlığı kg
110 °C	Kab. Giriş	0	63,1	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	9	62,1	60,00	1,510	0,594	0,915	0,224	0,288	1,286
	2.Kabin	18	46,5	53,81	1,286	0,594	0,692	0,169	0,250	1,117
	3.Kabin	27	35,4	46,82	1,117	0,594	0,523	0,129	0,221	0,988
	4.Kabin	36	25,8	39,87	0,988	0,594	0,394	0,094	0,200	0,894
	5.Kabin	45	18,2	33,54	0,894	0,594	0,300	0,066	0,185	0,827
	6.Kabin	54	12,6	28,20	0,827	0,594	0,233	0,046	0,175	0,781
	7.Kabin	63	9,4	23,98	0,781	0,594	0,187	0,034	0,167	0,747
	8.Kabin	72	8,2	20,49	0,747	0,594	0,153	0,030	0,160	0,717
	9.Kabin	81	7,6	17,17	0,717	0,594	0,123	0,028	0,154	0,689
	10.Kabin	90	7,2	13,84	0,689	0,594	0,095	0,026	0,148	0,663
	Kab. Çıkış	ÇIKIŞ	6,7	10,43	0,663	0,594	0,069	0,024	0,143	0,639
130 °C	Kab. Giriş	GİRİŞ	72,4	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	9	70,7	60,00	1,510	0,594	0,915	0,233	0,286	1,277
	2.Kabin	18	53,1	53,48	1,277	0,594	0,683	0,176	0,246	1,101
	3.Kabin	27	39,4	46,05	1,101	0,594	0,507	0,132	0,217	0,969
	4.Kabin	36	29,3	38,73	0,969	0,594	0,375	0,098	0,195	0,872
	5.Kabin	45	19,8	31,85	0,872	0,594	0,278	0,066	0,180	0,805
	6.Kabin	54	14,2	26,25	0,805	0,594	0,211	0,047	0,170	0,758
	7.Kabin	63	9,7	21,64	0,758	0,594	0,164	0,032	0,162	0,726
	8.Kabin	72	8,5	18,14	0,726	0,594	0,132	0,028	0,156	0,697
	9.Kabin	81	7,2	14,80	0,697	0,594	0,103	0,024	0,151	0,673
	10.Kabin	90	7,1	11,76	0,673	0,594	0,079	0,024	0,145	0,649
	Kab. Çıkış	ÇIKIŞ	6,5	8,54	0,649	0,594	0,055	0,022	0,140	0,628
150 °C	Kab. Giriş	GİRİŞ	87,7	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	9	79,4	60,00	1,510	0,594	0,915	0,249	0,282	1,261
	2.Kabin	18	57,3	52,89	1,261	0,594	0,667	0,179	0,242	1,082
	3.Kabin	27	42,6	45,10	1,082	0,594	0,488	0,138	0,211	0,944
	4.Kabin	36	28,7	37,08	0,944	0,594	0,350	0,094	0,190	0,850
	5.Kabin	45	20,4	30,12	0,850	0,594	0,256	0,068	0,175	0,782
	6.Kabin	54	14,8	24,04	0,782	0,594	0,188	0,047	0,164	0,735
	7.Kabin	63	10,1	19,16	0,735	0,594	0,141	0,032	0,157	0,703
	8.Kabin	72	8,9	15,46	0,703	0,594	0,109	0,028	0,151	0,674
	9.Kabin	81	7,5	11,90	0,674	0,594	0,080	0,024	0,145	0,650
	10.Kabin	90	6,3	8,66	0,650	0,594	0,056	0,020	0,141	0,630
	Kab. Çıkış	ÇIKIŞ	6,1	5,75	0,630	0,594	0,036	0,019	0,137	0,611

Çizelge 5.7 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında buharlaşma miktarları

Hız (m/s)	Kabin	Süre (Saniye)	Kabin içi nemli hava nem değerleri (%RH)	Kumaş giriş nemi (%RH)	Kumaş giriş ağırlığı kg	Kuru kumaş ağırlığı kg	Kumaş nem ağırlığı (m) kg	Buharlaşma miktarı kg	Kumaş çıkış birim ağırlığı kg /m^2	Kumaş çıkış ağırlığı kg
110 °C	Kab. Giriş	0	60	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	6	58,6	60,00	1,510	0,594	0,915	0,219	0,289	1,291
	2.Kabin	12	41,9	53,99	1,291	0,594	0,697	0,163	0,252	1,128
	3.Kabin	18	31,6	47,35	1,128	0,594	0,534	0,123	0,225	1,006
	4.Kabin	24	22,8	40,93	1,006	0,594	0,412	0,089	0,205	0,917
	5.Kabin	30	16,5	35,22	0,917	0,594	0,323	0,064	0,191	0,853
	6.Kabin	36	11,8	30,36	0,853	0,594	0,259	0,046	0,181	0,807
	7.Kabin	42	9	26,40	0,807	0,594	0,213	0,035	0,173	0,772
	8.Kabin	48	8,1	23,07	0,772	0,594	0,178	0,031	0,166	0,741
	9.Kabin	54	7,4	19,80	0,741	0,594	0,147	0,029	0,159	0,712
	10.Kabin	60	7,3	16,57	0,712	0,594	0,118	0,028	0,153	0,684
	Kab. Çıkış	ÇIKIŞ	6,7	13,11	0,684	0,594	0,090	0,026	0,147	0,658
130 °C	Kab. Giriş	0	70,8	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	6	66,4	60,00	1,510	0,594	0,915	0,228	0,287	1,282
	2.Kabin	12	47,5	53,67	1,282	0,594	0,688	0,171	0,249	1,111
	3.Kabin	18	34,2	46,54	1,111	0,594	0,517	0,123	0,221	0,988
	4.Kabin	24	25,4	39,87	0,988	0,594	0,394	0,091	0,201	0,896
	5.Kabin	30	17,3	33,74	0,896	0,594	0,302	0,062	0,187	0,834
	6.Kabin	36	12,6	28,79	0,834	0,594	0,240	0,045	0,176	0,789
	7.Kabin	42	9,4	24,70	0,789	0,594	0,195	0,034	0,169	0,755
	8.Kabin	48	8,3	21,32	0,755	0,594	0,161	0,030	0,162	0,725
	9.Kabin	54	7,6	18,08	0,725	0,594	0,131	0,027	0,156	0,698
	10.Kabin	60	7,7	14,87	0,698	0,594	0,104	0,028	0,150	0,670
	Kab. Çıkış	ÇIKIŞ	6,9	11,35	0,670	0,594	0,076	0,025	0,144	0,645
150 °C	Kab. Giriş	0	84	60,00	1,510	0,594	0,915	-	0,338	1,510
	1.Kabin	6	74,3	60,00	1,510	0,594	0,915	0,245	0,283	1,265
	2.Kabin	12	50,7	53,04	1,265	0,594	0,671	0,177	0,243	1,088
	3.Kabin	18	36,5	45,40	1,088	0,594	0,494	0,127	0,215	0,961
	4.Kabin	24	23,8	38,19	0,961	0,594	0,367	0,083	0,196	0,878
	5.Kabin	30	17,7	32,37	0,878	0,594	0,284	0,062	0,183	0,817
	6.Kabin	36	12,9	27,27	0,817	0,594	0,223	0,045	0,173	0,772
	7.Kabin	42	9,7	23,04	0,772	0,594	0,178	0,034	0,165	0,738
	8.Kabin	48	8,4	19,52	0,738	0,594	0,144	0,029	0,159	0,709
	9.Kabin	54	7,6	16,20	0,709	0,594	0,115	0,026	0,153	0,682
	10.Kabin	60	6,5	12,96	0,682	0,594	0,088	0,023	0,148	0,660
	Kab. Çıkış	ÇIKIŞ	6,3	9,97	0,660	0,594	0,066	0,022	0,143	0,638

Çizelge 5.8 Toplam buharlaşma miktarı

Kurutma havası sıcaklığı	Kumaş hızı	Kumaş giriş nemi (%RH)	Buharlaşma toplam miktarı (kg)	Kumaş çıkış ort. nemi (Yaş baz)
110 °C	0,167 m/s	60	0,876	Deneysel % 6,42 (Teorik % 6,20)
	0,333 m/s	60	0,847	Deneysel % 10,85 (Teorik % 10,40)
	0,500 m/s	60	0,826	Deneysel % 13,35 (Teorik % 13,00)
130 °C	0,167 m/s	60	0,885	Deneysel % 4,96 (Teorik % 4,7)
	0,333 m/s	60	0,861	Deneysel % 8,62 (Teorik % 8,30)
	0,500 m/s	60	0,840	Deneysel % 10,95 (Teorik % 11,30)
150 °C	0,167 m/s	60	0,897	Deneysel % 3,27 (Teorik % 3,00)
	0,333 m/s	60	0,880	Deneysel % 5,96 (Teorik % 5,80)
	0,500 m/s	60	0,850	Deneysel % 9,30 (Teorik % 9,90)

Çizelge 5.8'de tüm kurutma şartlarında, kurutma süresince buharlaşan nem miktarı ile kumaş çıkış ortalama nem değerlerinin teorik ve deneysel sonuçları görülmektedir. Buharlaşma miktarındaki çok küçük değişiklikler, kumaş nemini büyük ölçüde etkilemektedir. 4,7 m^{2}'lik bir kumaşta 0,029 kg nem kaybının, kumaş çıkış nemini (yaş baza göre) yaklaşık %4 etkilediği görülmektedir.

5.2.3 Nem Oranının Belirlenmesi

Tüm kurutma şartları için, kurutucu kabinlerinin giriş ve çıkış noktalarında, kumaşın sahip olduğu nem oranları (nem içeriği) Çizelge 3.3-3.5'deki veriler ve Eş. 4.21 ve 4.22'de verilen formüller kullanılarak, yaş baz ve kuru baz olmak üzere iki farklı şekilde hesaplanarak, elde edilen veriler Çizelge 5.9-5.10'de sunulmuştur.

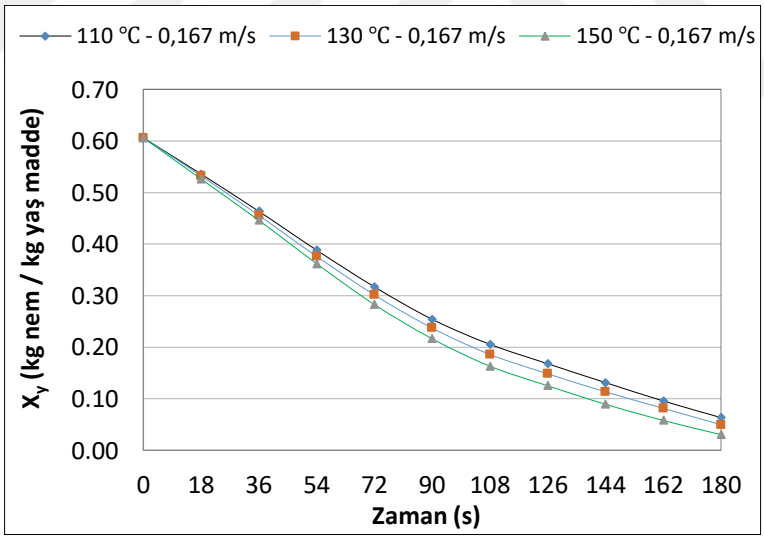
Çizelge 5.9 Tüm kurutma şartlarında deneysel yaş baz nem oranları

Kumaş İlerleme Hızı					Kumaş İlerleme Hızı					Kumaş İlerleme Hızı				
10 m/dak (0,167 m/s)					20 m/dak (0,333 m/s)					30 m/dak (0,500 m/s)				
Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)		
		110	130	150			110	130	150			110	130	150
Giriş	0	0,61	0,61	0,61	Giriş	0	0,61	0,61	0,61	Giriş	0	0,61	0,61	0,61
1	18	0,54	0,53	0,53	1	9	0,54	0,53	0,53	1	6	0,54	0,54	0,53
2	36	0,46	0,46	0,45	2	18	0,47	0,46	0,45	2	12	0,47	0,47	0,45
3	54	0,39	0,38	0,36	3	27	0,40	0,39	0,37	3	18	0,41	0,40	0,38
4	72	0,32	0,30	0,28	4	36	0,34	0,32	0,30	4	24	0,35	0,34	0,32
5	90	0,25	0,24	0,22	5	45	0,28	0,26	0,24	5	30	0,30	0,29	0,27
6	108	0,21	0,19	0,16	6	54	0,24	0,22	0,19	6	36	0,26	0,25	0,23
7	126	0,17	0,15	0,13	7	63	0,20	0,18	0,15	7	42	0,23	0,21	0,20
8	144	0,13	0,11	0,09	8	72	0,17	0,15	0,12	8	48	0,20	0,18	0,16
9	162	0,10	0,08	0,06	9	81	0,14	0,12	0,09	9	54	0,17	0,15	0,13
10	180	0,06	0,05	0,03	10	90	0,10	0,09	0,06	10	60	0,13	0,11	0,10

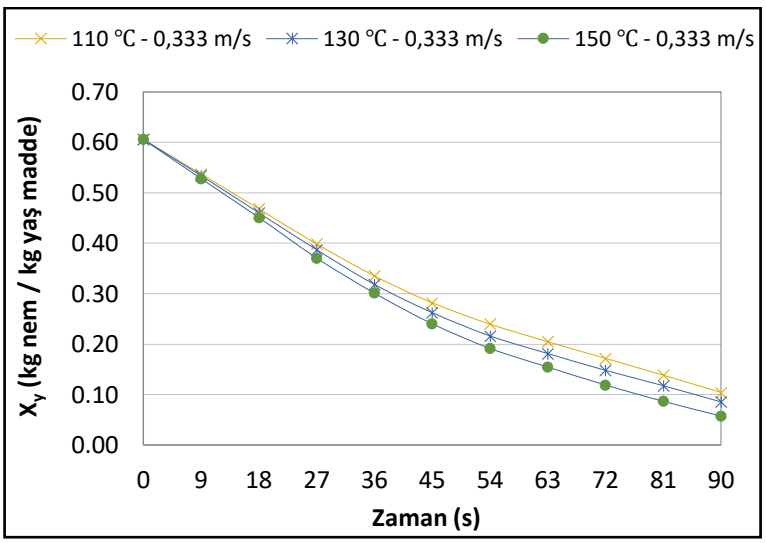
Çizelge 5.10 Tüm kurutma şartlarında deneysel kuru baz nem oranları

Kumaş İlerleme Hızı					Kumaş İlerleme Hızı					Kumaş İlerleme Hızı				
10 m/dak (0,167 m/s)					20 m/dak (0,333 m/s)					30 m/dak (0,500 m/s)				
Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)		
		110	130	150			110	130	150			110	130	150
Giriş	0	1,54	1,54	1,54	Giriş	0	1,54	1,54	1,54	Giriş	0	1,54	1,54	1,54
1	18	1,16	1,14	1,11	1	9	1,16	1,15	1,12	1	6	1,17	1,16	1,13
2	36	0,86	0,84	0,80	2	18	0,88	0,85	0,82	2	12	0,90	0,87	0,83
3	54	0,63	0,60	0,57	3	27	0,66	0,63	0,59	3	18	0,69	0,66	0,62
4	72	0,46	0,43	0,39	4	36	0,50	0,47	0,43	4	24	0,54	0,51	0,48
5	90	0,34	0,31	0,28	5	45	0,39	0,36	0,32	5	30	0,44	0,40	0,37
6	108	0,26	0,23	0,19	6	54	0,32	0,28	0,24	6	36	0,36	0,33	0,30
7	126	0,20	0,17	0,14	7	63	0,26	0,22	0,18	7	42	0,30	0,27	0,24
8	144	0,15	0,13	0,10	8	72	0,21	0,17	0,14	8	48	0,25	0,22	0,19
9	162	0,11	0,09	0,06	9	81	0,16	0,13	0,09	9	54	0,20	0,17	0,15
10	180	0,07	0,05	0,03	10	90	0,12	0,09	0,06	10	60	0,15	0,13	0,11

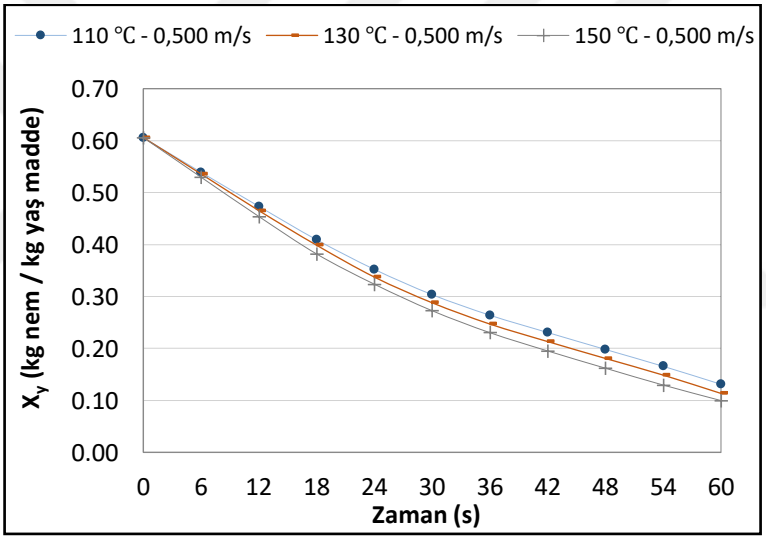
Çizelge 5.9-5.10'da verilen değerlerin kumaş ilerleme hızı ve kurutma havası sıcaklığına göre oluşturdukları grafikler Şekil 5.13-5.18'de gösterilmiştir.



Şekil 5.13 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı sıcaklık için yaş baz nem oranının zamanla değişimi

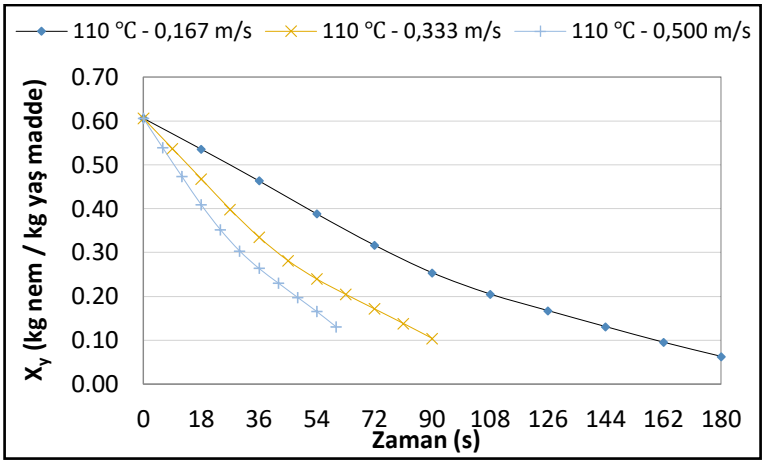


Şekil 5.14 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı sıcaklık için yaş baz nem oranının zamanla değişimi

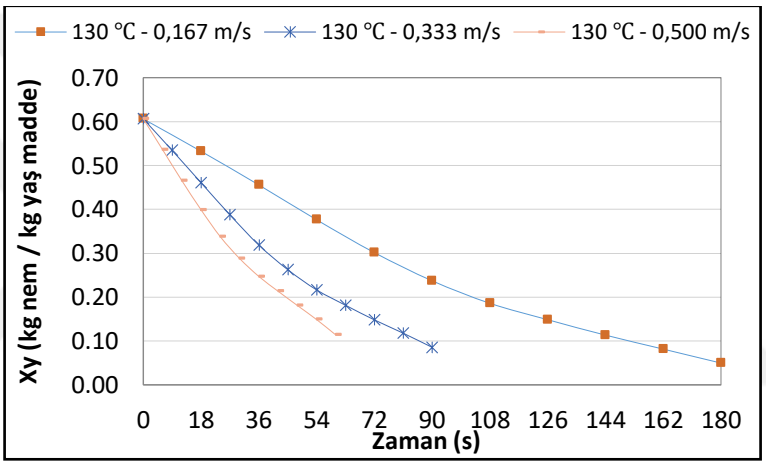


Şekil 5.15 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı sıcaklık için yaş baz nem oranının zamanla değişimi

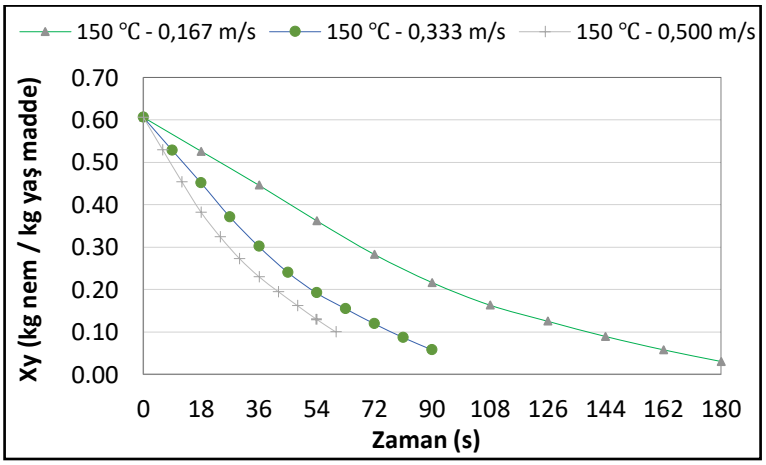
Şekil 5.13-5.15'de aynı kumaş ilerleme hızı için üç farklı kurutma havası sıcaklığına göre, yaş baz nem oranının zamanla değişimi görülmektedir. Buna göre; her üç grafikte de kurutma havası sıcaklığının artması ile buharlaşma miktarının arttığı görülmektedir. En fazla buharlaşma, %3 kumaş kalan nem oranı ile 0,167 m/s (10 m/dak) kumaş ilerleme hızında ve 150 °C kurutma havası sıcaklığında gerçekleşmiştir. En az buharlaşma ise %13 kumaş kalan nem oranında 0,500 m/s (30 m/dak) kumaş ilerleme hızında ve 110 °C kurutma havası sıcaklığında gerçekleşmiştir. Artan kurutma havası sıcaklığında ve düşük kumaş ilerleme hızında buharlaşmanın daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16 110 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için yaş baz nem oranının zamanla değişimi



Şekil 5.17 130 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için yaş baz nem oranının zamanla değişimi



Şekil 5.18 150 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için yaş baz nem oranının zamanla değişimi

Şekil 5.16-5.18 incelendiğinde, aynı kumaş ilerleme hız değerlerine göre, kurutma havası sıcaklığının artması, buharlaşma miktarını yükseltmektedir. Buharlaşma miktarının değişiminde, kurutma havası sıcaklığının, kumaş ilerleme hızından daha etkili olduğu, ayrıca zamanla nem oranının azaldığı tespit edilmiştir.

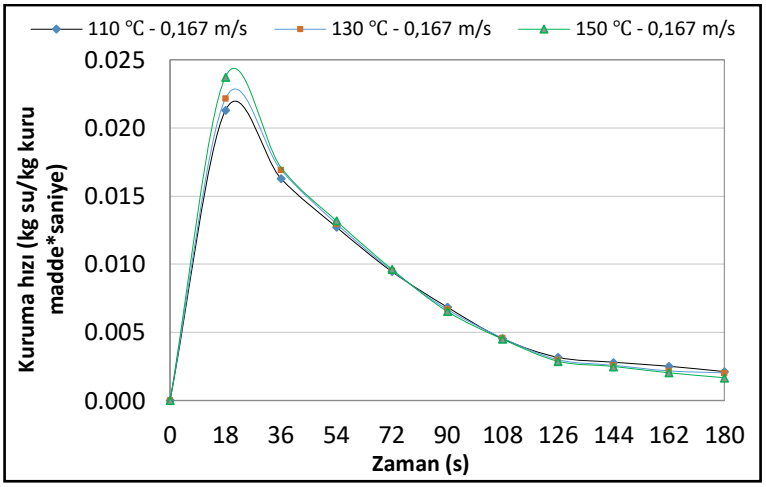
5.2.4 Kuruma Hızının Belirlenmesi

Kuruma hızının belirlenmesinde, Eş. 4.24'de verilen kuruma hızı formülü ve Bölüm 3'te verilen Çizelge 3.3-3.5'deki veriler kullanılmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 5.11'de sunulmuştur.

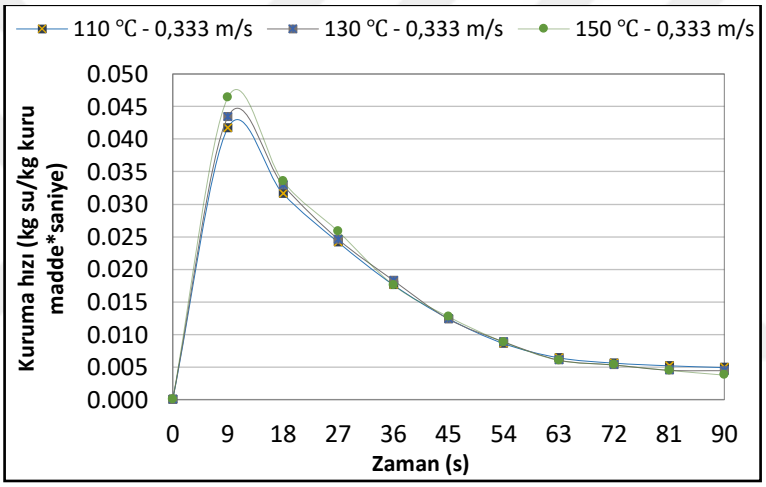
Çizelge 5.11 Tüm kurutma şartlarında deneysel kuruma hızı

Kumaş İlerleme Hızı					Kumaş İlerleme Hızı					Kumaş İlerleme Hızı				
10 m/dak (0,167 m/s)					20 m/dak (0,333 m/s)					30 m/dak (0,500 m/s)				
Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)		
		110	130	150			110	130	150			110	130	150
Giriş	0	0,000	0,000	0,000	Giriş	0	0,000	0,000	0,000	Giriş	0	0,000	0,000	0,000
1	18	0,021	0,022	0,024	1	9	0,042	0,043	0,046	1	6	0,061	0,064	0,068
2	36	0,016	0,017	0,017	2	18	0,032	0,033	0,033	2	12	0,046	0,048	0,050
3	54	0,013	0,013	0,013	3	27	0,024	0,025	0,026	3	18	0,034	0,035	0,036
4	72	0,009	0,010	0,010	4	36	0,018	0,018	0,018	4	24	0,025	0,026	0,023
5	90	0,007	0,007	0,007	5	45	0,012	0,012	0,013	5	30	0,018	0,017	0,017
6	108	0,005	0,005	0,005	6	54	0,009	0,009	0,009	6	36	0,013	0,013	0,013
7	126	0,003	0,003	0,003	7	63	0,006	0,006	0,006	7	42	0,010	0,009	0,009
8	144	0,003	0,003	0,002	8	72	0,006	0,005	0,005	8	48	0,009	0,008	0,008
9	162	0,003	0,002	0,002	9	81	0,005	0,004	0,004	9	54	0,008	0,008	0,007
10	180	0,002	0,002	0,002	10	90	0,005	0,004	0,004	10	60	0,008	0,008	0,006

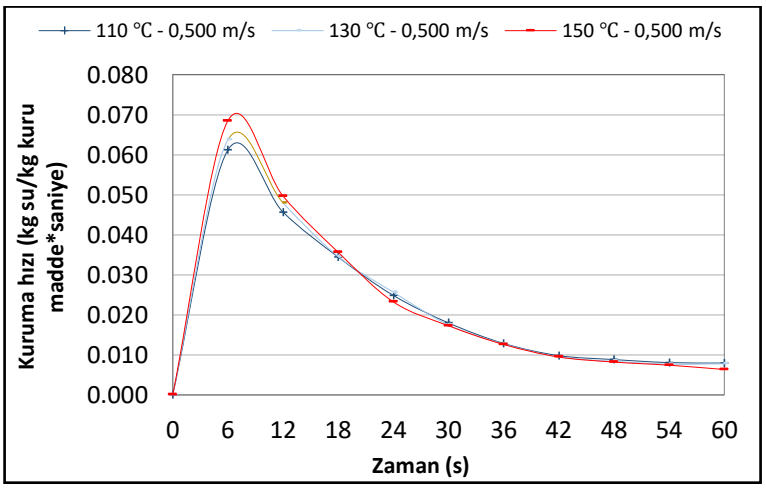
Kuruma hızı hesabı, kuru baz nem oranına göre yapılmıştır. Kuruma hızının, kumaş ilerleme hızı ve kurutma havası sıcaklığına göre gösterdiği değişim, Şekil 5.19-5.24'de gösterilmiştir. Ayrıca kuruma hızı ve nem oranı arasındaki değişimlerin görülebilmesi için Şekil 5.25-5.27'den yararlanılmıştır.



Şekil 5.19 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için kuruma hızının zamanla değişimi



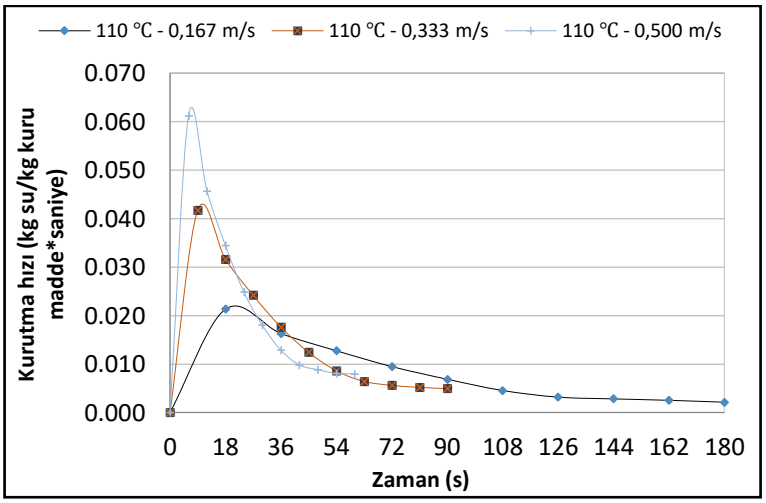
Şekil 5.20 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için kuruma hızının zamanla değişimi



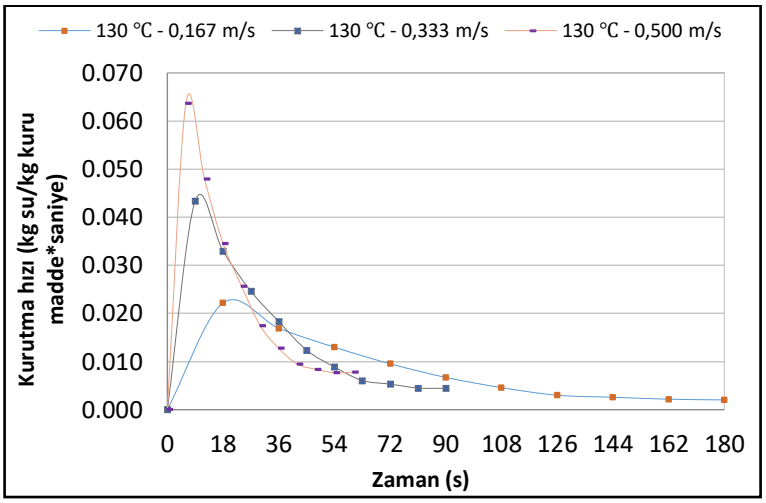
Şekil 5.21 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için kuruma hızının zamanla değişimi

Şekil 5.19 ve 5.21'de, aynı kumaş ilerleme hızında, üç farklı kurutma havası sıcaklığı için, kuruma hızı-zaman grafikleri görülmektedir. Kumaş ilerleme hızılarının aynı olduğu kurutma şartlarında, kurutma havası sıcaklığının artması ile kuruma hızının arttığı gözlenmektedir. Ayrıca aynı kumaş ilerleme hızında artan kurutma havası sıcaklığı ile kurutma havasının bağıl nemi değerlerinin düşmesi sonucu daha yüksek kurutma potansiyeline ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Kuruma hızının en yüksek olduğu çalışma koşulu olarak, 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında ve 150 ^{o}C kurutma sıcaklığında gerçekleştiği belirlenmiştir. Grafiklerden, tüm kurutma şartları için, kurumanın azalan hız periyodunda gerçekleştiği, grafiklerde oluşan eğimden açıkça görülebilir. Özellikle ilk altı kabinde gerçekleşen kurutma I. Azalan hız periyodunda, yedinci kabin ve daha sonraki kabinlerde, II. Azalan hız periyodunda kuruma gerçekleşmektedir. Kumaş hızının artması ile kuruma hızının artmasında, kumaş yüzeyinde oluşan su buharının (doymuş sınır tabaka) daha hızlı dağılması önemli rol oynamaktadır. Kumaş hızının artması, kuruma hızının artmasına sebep olurken, kurumanın hangi mertebede gerçekleştiğinin de araştırılması gerekir. Bunun için kuruma hızı-nem oranı grafiklerinden yararlanılmış ve oluşan grafikler Şekil 5.25-5.27'de gösterilmiştir.

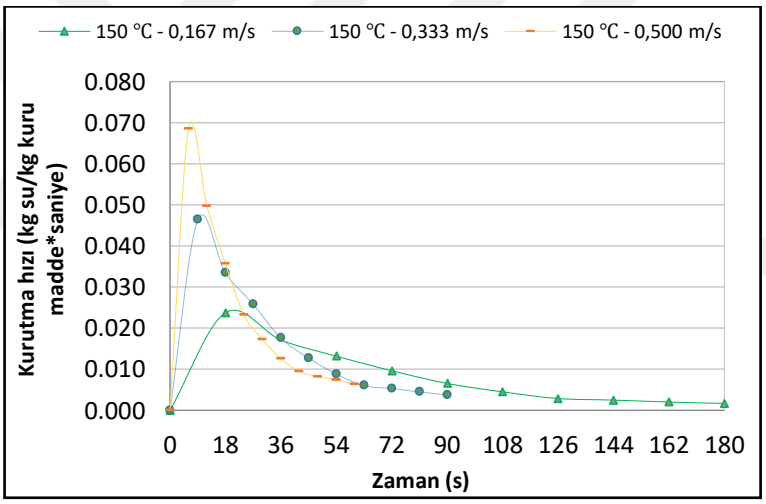
Kurutma havasının aynı, kumaş ilerleme hızının üç farklı değerleri için çizilen grafikler Şekil 5.22-5.24'de sunulmuştur.



Şekil 5.22 110 ^{o}C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için kuruma hızının zamanla değişimi



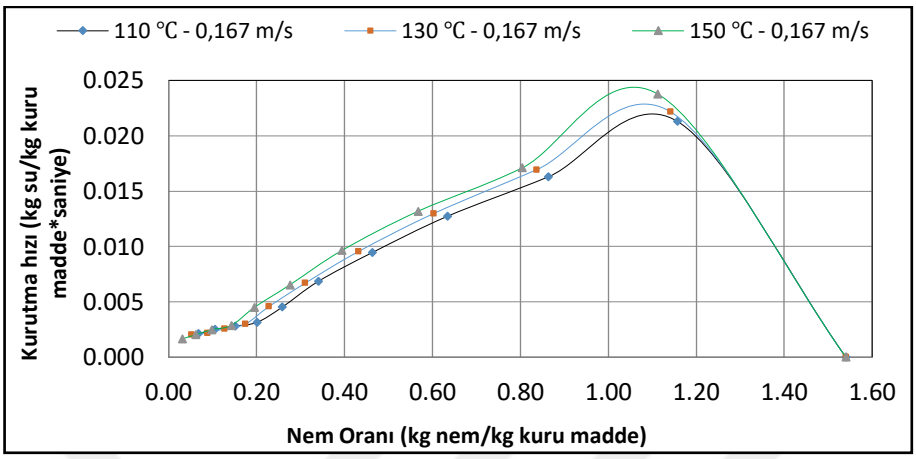
Şekil 5.23 130 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için kuruma hızının zamanla değişimi



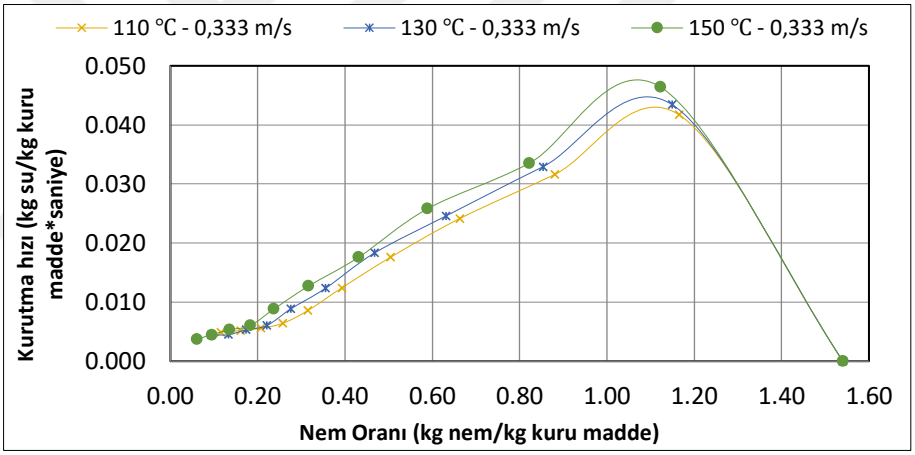
Şekil 5.24 150 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için kuruma hızının zamanla değişimi

Şekil 5.22-5.24'de gösterilen grafikler incelendiğinde, kuruma hızının en düşük olduğu durum, kumaş ilerleme hızının 0,167 m/s hıza sahip kurutma şartında gerçekleştiği ayrıca kumaş ilerleme hızının artması ile kuruma hızının da arttığı görülmektedir. Kuruma işleminin tümü değerlendirildiğinde, kumaşın kabin içinde kaldığı sürede göz önünde bulundurulduğunda, buharlaşmanın en fazla olduğu koşullar sırasıyla, 0,167-0,333-0,500 m/s kumaş ilerleme hızlarında gerçekleştiği görülmektedir. Dolayısı ile kumaş ilerleme hızının artması toplam buharlaşma miktarını azaltmaktadır. Kumaşların kurutucu çıkışında sahip olması gereken nem miktarının %4-5 oranında olması gerektiğinden,

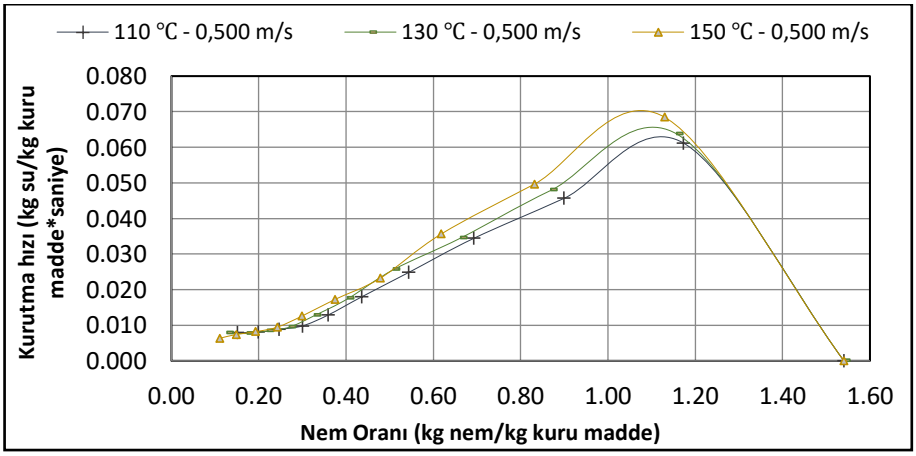
kuruma hızı 0,500 m/s'de daha hızlı olmasına rağmen istenilen nem oranları, bu koşullarda sağlanamadığından, bu hızda yapılan kurutma işlemleri ideal kurutma şartı olmaktan uzaklaşmaktadır.



Şekil 5.25 0,167 m/s kumaş ilerleme hızı için kuruma hızı nem oranı değişimi



Şekil 5.26 0,333 m/s kumaş ilerleme hızı için kuruma hızı nem oranı değişimi



Şekil 5.27 0,500 m/s kumaş ilerleme hızı için kuruma hızı nem oranı değişimi

Şekil 5.25-527'de gösterilen kuruma hızı-nem oranı grafikleri incelendiğinde, kumaşlardaki nem miktarına bağlı olarak, kuruma hızının ilk kabinlerde kumaş hızına bağlı olarak değiştiği, nem miktarının azalmaya, kurumanın difüzyonla gerçekleşmeye başlaması ile kuruma hızı değerlerinin birbirine yaklaşmaya başladığı görülmektedir. Yine aynı grafikler üzerinde nem oranları araştırıldığında, ilk altı kabinde nem oranı değişiminin hemen hemen aynı değerlerde olduğu, altıncı kabinden sonra kumaş hızına bağlı olarak, artan kumaş hızında, azalan nem oranı olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Sonuç olarak, difüzyon ile kurumanın gerçekleşitiği kabinlerde, kumaş hızının artması kurumanın istenilen oranda gerçekleşmesini engellemektedir.

5.3 Teorik Modelleme

5.3.1 Birinci Dereceden Kinetik Model Çözümü

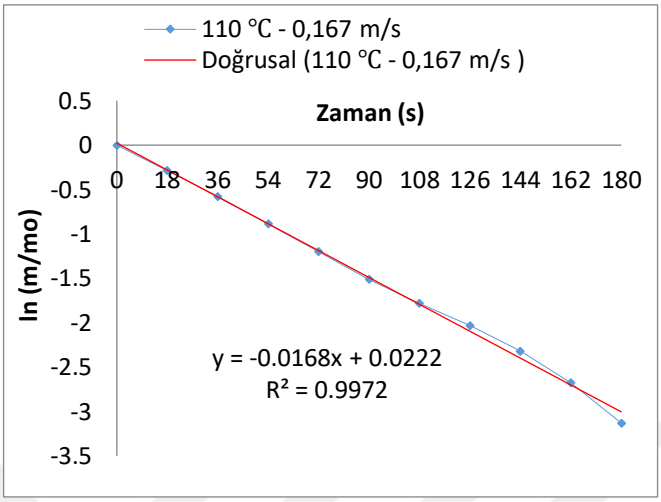
5.3.1.1 Kinetik Katsayının Belirlenmesi

Kinetik katsayı k'nın belirlenmesi için, Çizelge 5.5-5.7'de verilen anlık nem içeriği (m) ile başlangıç nem içeriği m_o değerlerinden ve eşitlik 4.27'de verilen formülden yararlanılmıştır. Eş. 4.27'ye göre, ln(m/mo) – kuruma süresi (t) grafiğinin eğimi kinetik katsayı k'yı verecektir. Çizelge 5.12'de herbir kurutma şartı için hesaplanan ln(m/mo) değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.12 Tüm kurutma şartları için ln(m/mo) değerleri

Kumaş İlerleme Hızı					Kumaş İlerleme Hızı					Kumaş İlerleme Hızı				
10 m/dak (0,167 m/s)					20 m/dak (0,333 m/s)					30 m/dak (0,500 m/s)				
Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)		
		110	130	150			110	130	150			110	130	150
Giriş	0	0	0	0	Giriş	0	0	0	0	Giriş	0	0	0	0
1	18	-0,288	-0,300	-0,325	1	9	-0,279	-0,292	-0,316	1	6	-0,272	-0,285	-0,310
2	36	-0,579	-0,610	-0,649	2	18	-0,559	-0,590	-0,629	2	12	-0,539	-0,571	-0,616
3	54	-0,887	-0,938	-0,999	3	27	-0,843	-0,892	-0,961	3	18	-0,798	-0,843	-0,914
4	72	-1,199	-1,274	-1,364	4	36	-1,115	-1,191	-1,274	4	24	-1,041	-1,108	-1,170
5	90	-1,511	-1,599	-1,719	5	45	-1,368	-1,467	-1,582	5	30	-1,262	-1,338	-1,412
6	108	-1,782	-1,906	-2,065	6	54	-1,588	-1,719	-1,870	6	36	-1,458	-1,546	-1,637
7	126	-2,031	-2,175	-2,376	7	63	-1,788	-1,936	-2,128	7	42	-1,637	-1,738	-1,849
8	144	-2,319	-2,488	-2,758	8	72	-2,007	-2,184	-2,437	8	48	-1,828	-1,944	-2,074
9	162	-2,676	-2,849	-3,235	9	81	-2,265	-2,449	-2,794	9	54	-2,048	-2,175	-2,342
10	180	-3,130	-3,385	-3,874	10	90	-2,585	-2,812	-3,235	10	60	-2,319	-2,488	-2,629

Şekil 5.28'de, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızı ve 110 °C kurutma havası sıcaklığı için ln (m/mo) – t (s) grafiği çizilerek k kinetik katsayısına ulaşılmıştır. Diğer kurutma şartları için de aynı işlemler tekrarlanarak bulunan değerler Çizelge 5.13'de gösterilmiştir.



Şekil 5.28 110 °C kurutma havası sıcaklığı ve 0,167 m/s kumaş ilerleme hızı için ln(m/mo) – t(s) grafiği

Şekil 4.16'da;

Bulunan doğru denklemi : y = -0,0168x + 0,0222

Doğrunun eğimi (k) : k = 0,0168

Regresyon katsayısı (R^2) : 0,9972

olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.13 Tüm kurutma şartları için deneysel kinetik katsayı (k) değerleri

Kumaş ilerleme hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı (°C)	Deneysel kinetik katsayı k	Doğru denklemi	Regresyon katsayısı (R^2)
0,167 (10 m/dak)	110	0,0168	y = -0,0168x + 0,0222	0,9972
	130	0,0181	y = -0,0181x + 0,0369	0,9964
	150	0,0206	y = -0,0206x + 0,0939	0,9925
0,333 (20 m/dak)	110	0,0279	y = -0,0279x - 0,0555	0,9973
	130	0,0304	y = -0,0304x - 0,0447	0,9979
	150	0,0348	y = -0,0348x - 0,0005	0,9980
0,500 (30 m/dak)	110	0,0374	y = -0,0374x - 0,0791	0,9958
	130	0,0399	y = -0,0399x - 0,0785	0,9959
	150	0,0424	y = -0,0424x - 0,0874	0,9966

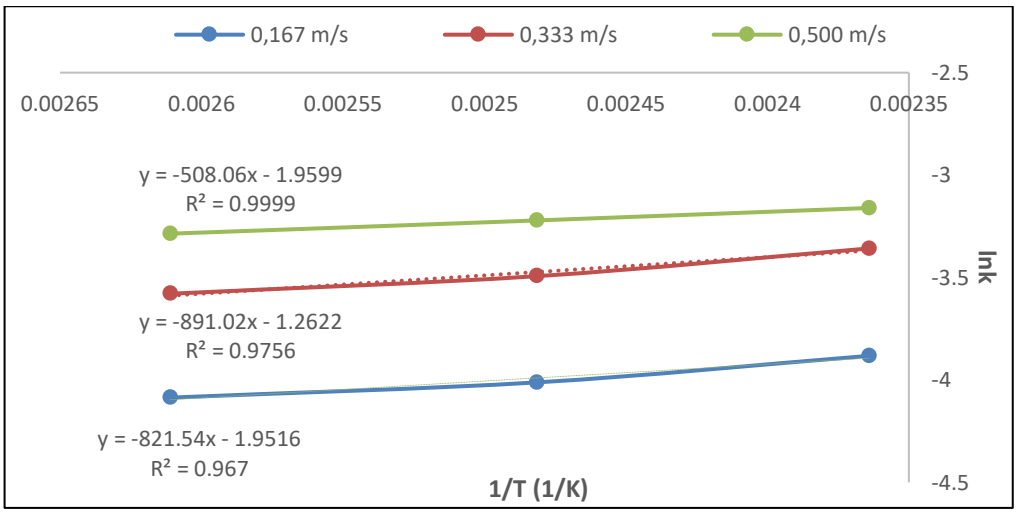
Herbir kurutma şartı için, birinci derece kinetik modelin anlık nem içerikleri, Çizelge 5.13'de verilen deneysel kinetik katsayı (k) ve Eşitlik 4.26'da verilen formül kullanılarak hesaplanmış, elde edilen değerler Çizelge 5.14'de verilmiştir.

Çizelge 5.14 Tüm kurutma şartları için birinci derece kinetik model anlık nem içerikleri (m*)

Kumaş İlerleme Hızı 10 m/dak (0,167 m/s)					Kumaş İlerleme Hızı 20 m/dak (0,333 m/s)					Kumaş İlerleme Hızı 30 m/dak (0,500 m/s)				
Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)		
		110	130	150			110	130	150			110	130	150
Giriş	0	0,915	0,915	0,915	Giriş	0	0,915	0,915	0,915	Giriş	0	0,915	0,915	0,915
1	18	0,676	0,661	0,632	1	9	0,712	0,696	0,669	1	6	0,731	0,720	0,709
2	36	0,500	0,477	0,436	2	18	0,554	0,529	0,489	2	12	0,584	0,567	0,555
3	54	0,369	0,344	0,301	3	27	0,431	0,403	0,358	3	18	0,467	0,446	0,427
4	72	0,273	0,249	0,208	4	36	0,335	0,306	0,261	4	24	0,373	0,351	0,331
5	90	0,202	0,179	0,143	5	45	0,261	0,233	0,191	5	30	0,298	0,276	0,256
6	108	0,149	0,130	0,099	6	54	0,203	0,177	0,140	6	36	0,238	0,218	0,199
7	126	0,110	0,094	0,068	7	63	0,158	0,135	0,102	7	42	0,190	0,171	0,154
8	144	0,081	0,068	0,047	8	72	0,123	0,103	0,075	8	48	0,152	0,135	0,120
9	162	0,060	0,049	0,033	9	81	0,095	0,078	0,055	9	54	0,121	0,106	0,093
10	180	0,044	0,035	0,022	10	90	0,074	0,059	0,040	10	60	0,097	0,084	0,072

5.3.1.2 Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi

Aktivasyon enerjisinin ve A sabitinin hesaplanması için (Şekil 5.29) lnk – 1/T grafiğinden yararlanılarak, elde edilen düz çizginin eğimi ve kesişim noktası eşitlik 4.29'un çözümünde kullanılmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 5.15'de verilmiştir.



Şekil 5.29 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için lnk – 1/T grafiği

Çizelge 5.15 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için aktivasyon enerjileri

Kumaş ilerleme hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı (K)	Deneysel kinetik katsayı k	Doğru denklemi	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)
0,167 (10 m/dak)	383	0,0168	y = -821,54x + 1.9516	6,8300
	403	0,0181		
	423	0,0206		
0,333 (20 m/dak)	383	0,0279	y = -891,02x - 1,2622	7,2475
	403	0,0304		
	423	0,0348		
0,500 (30 m/dak)	383	0,0374	y = -508,06x - 1,9599	4,2239
	403	0,0399		
	423	0,0424		

Şekil 5.29 yardımı ile oluşturulan Çizelge 5.15 incelendiğinde, aynı kumaş ilerleme hızı için kurutma havası sıcaklığının artması ile I. Dereceden kinetik katsayı sabiti k'nın arttığı görülmektedir. Bu durum yüksek sıcaklık değerlerinde kumaş içerisindeki suyun daha kolay buharlaşması ve kuruma hızının artması ile açıklanabilir.

Farklı kumaş ilerleme hızları için değerlendirme yapıldığında, kumaş hızının artması ile tüm kurutma havası sıcaklık değerlerine karşılık I.dereceden kinetik katsayı sabiti k'nın arttığı buna karşılık aktivasyon enerjisinin azaldığı görülmektedir.

Aktivasyon enerjisi, ürün içindeki su moleküllerinin enerji engelini geçme potansiyelinin bir göstergesi olduğundan, artan kumaş hızı ile kurutma işleminde daha fazla nem difüzyonu olduğu Tablo 5.15 yardımı ile görülmektedir. Kurutma işleminin tümü ele alındığında artan kumaş hızı, kumaşın kabin içinde bulunma süresini azalttığından buharlaşma hızının yüksek değerlerine karşılık istenilen oranda buharlaşmanın gerçekleşmesine engel olmaktadır.

5.3.1.3 Regresyon Analizleri

Regresyon analizleri, model ve deneysel veriler için bulunan anlık nem içeriklerinden faydalanılarak, Eşitlik 4.38-4.40'da verilen formüller yardımıyla bulunmuş ve bulunan değerler Çizelge 5.16'da verilmiştir. Regresyon analiz değerlerinin belirlenmesinde kullanılan Microsoft Excel Programı örnek sayfası Ek-B'de sunulmuştur.

Çizelge 5.16 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için regresyon istatistikleri

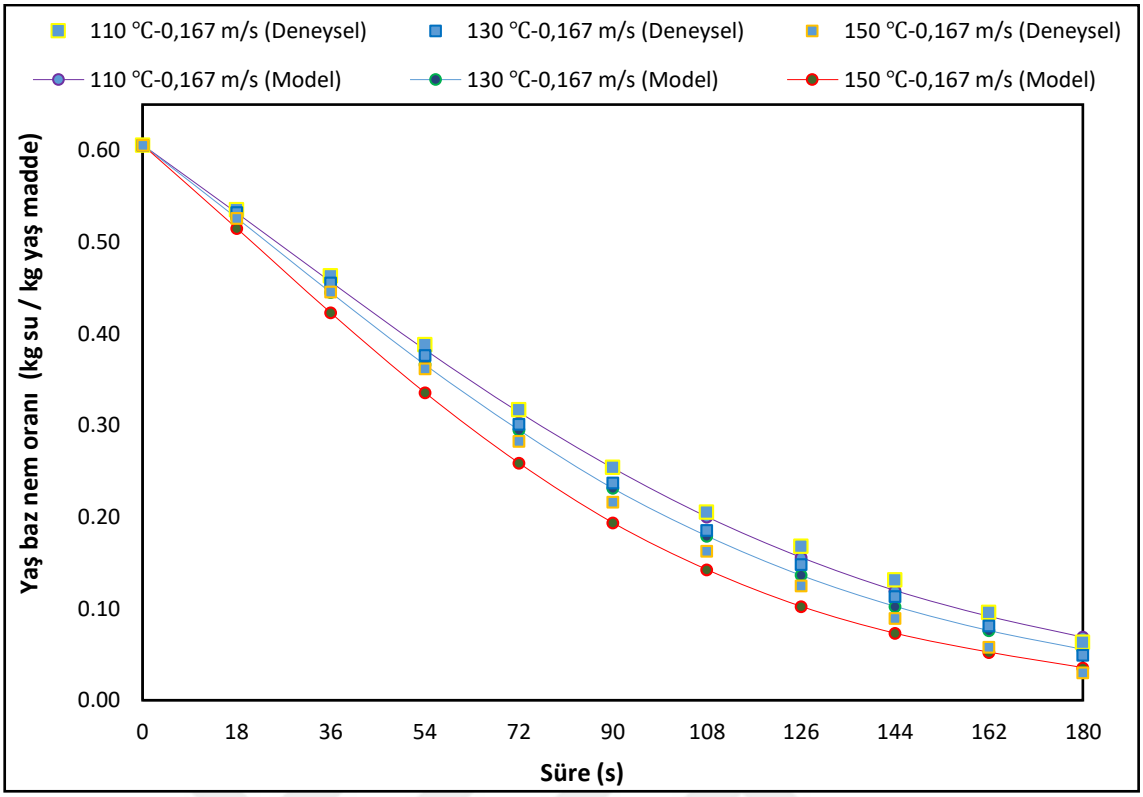
Kumaş ilerleme hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı (°C)	Regresyon istatistikleri			
		R^2	χ^2	RMSE	r
0.167	110	0,9992	0,00011	0,0052	0,9996
	130	0,9992	0,00017	0,0055	0,9996
	150	0,9970	0,00091	0,0113	0,9998
0,333	110	0,9968	0,00053	0,0099	0,9984
	130	0,9978	0,00035	0,0084	0,9989
	150	0,9994	0,00005	0,0045	0,9997
0,500	110	0,9945	0,00107	0,0122	0,9972
	130	0,9948	0,00104	0,0123	0,9974
	150	0,9946	0,00122	0,0129	0,9973

Birinci dereceden kinetik model için hesaplanan regresyon analiz değerleri Çizelge 5.16'da verilmektedir. Model uyumunda yüksek R^2 ve r, düşük χ^2 ve RMSE değerlerine bakılır.

Tahminin standart hatası (RMSE), modelden elde edilen tahmini değerler ile deneylerden elde edilen gerçek değerler arasındaki sapmayı göstermektedir. Ayrıca χ^2 değerinin azalması ile uyumun arttığı belirtilmektedir [68].

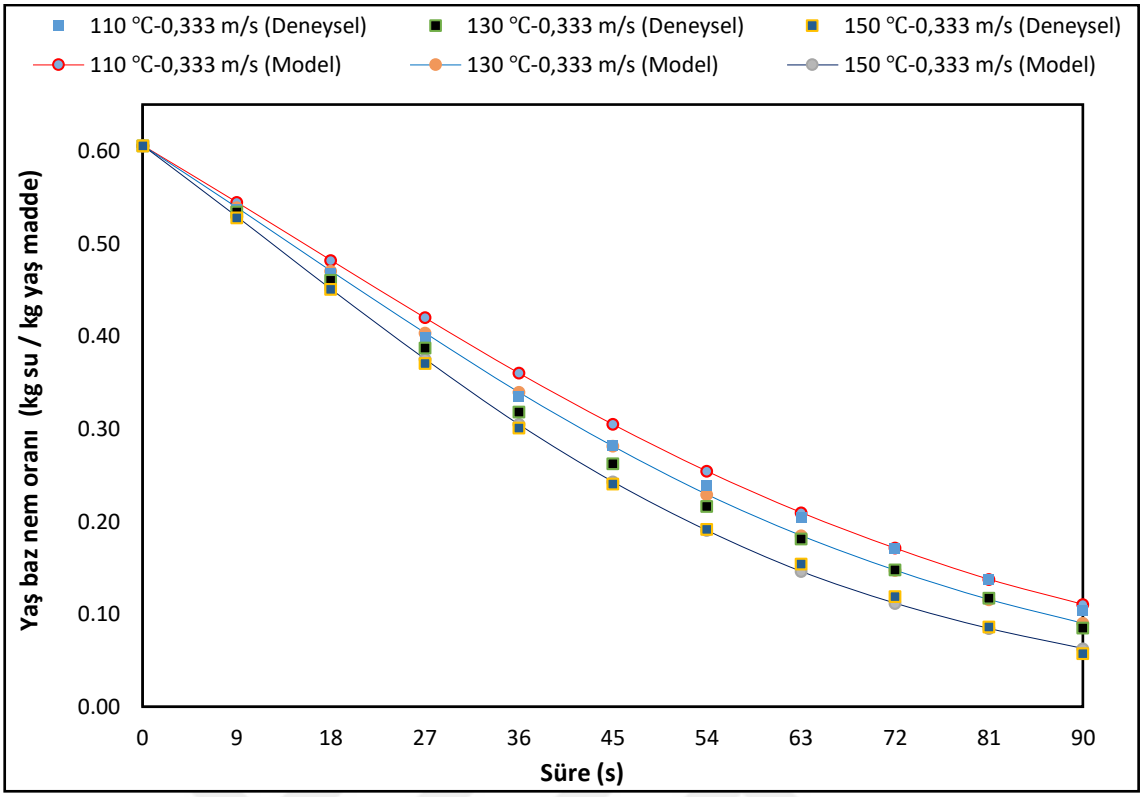
Çizelge 5.16'da görüldüğü gibi, tüm kurutma şartları için tahminin R^2 değerleri, 0,9945 ile 0,9992 arasında χ^2 değerleri, 0,00005 ile 0,00122 arasında RMSE değerleri, 0,0045 ile 0,0129 arasında ve r değerleri ise 0,9973 ile 0,9998 arasında değişmektedir. Bu değerler Ram makinesinde kurutma modellemede, azalan hız periyodunda gerçekleşen kurutma işlemlerinde, modelleme aracı olarak, I. dereceden kinetik modelin kullanımının oldukça uygun olduğunu göstermektedir.

Birinci dereceden kinetik model ile elde edilen anlık nem değerlerine (m*) ulaşıldıktan sonra, herbir kurutma şartı için, birinci dereceden kinetik model anlık nem oranları ile deneylerden elde edilen anlık nem oranlarının oluşturduğu grafikler Şekil 5.30 – 5.32'de verilerek, değerler arasındaki uyum gösterilmeye çalışılmıştır.



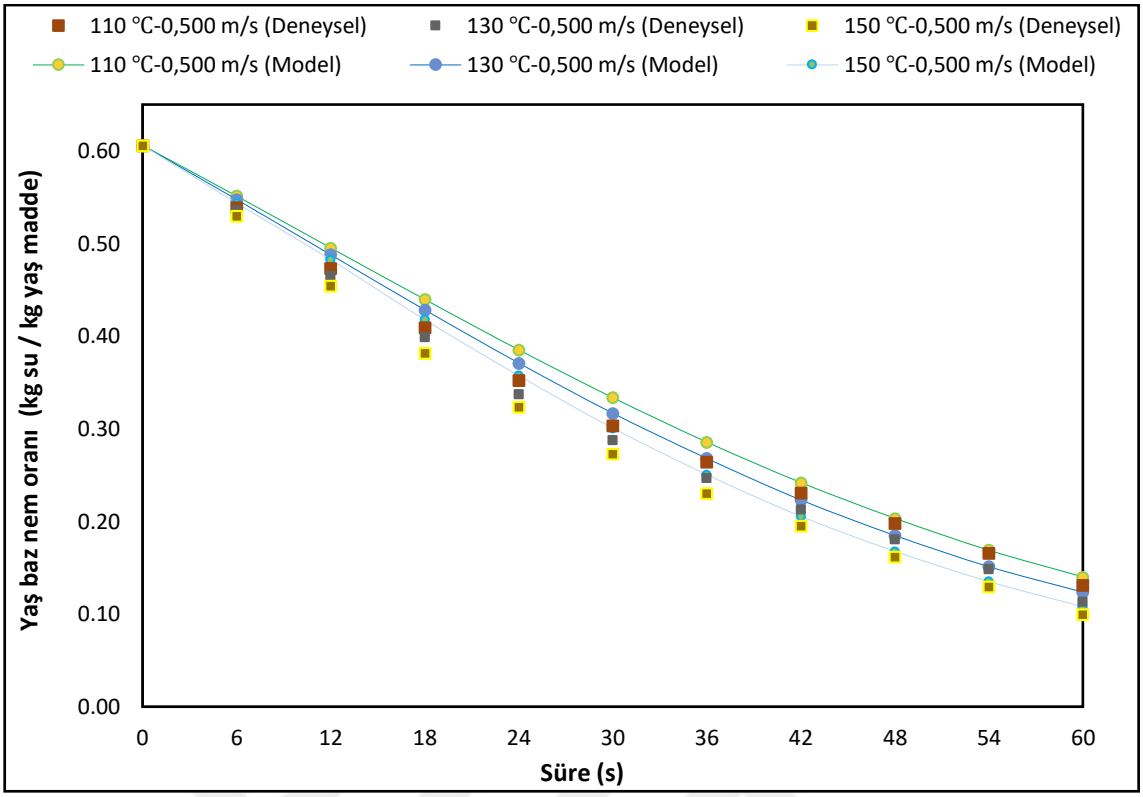
Şekil 5.30 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi

Şekil 5.30'da, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında gerçekleştirilen her bir deneyden elde edilen yaş baz nem oranı değerleri ile I. Dereceden kinetik model kullanılarak elde edilen yaş baz model nem oranı değerlerinin kuruma zamanı ile degişimini içeren grafik sunulmuştur. 0,167 m/s kumaş ilerleme hızı ve sırasıyla 110-130 ve 150 °C kurutma havası sıcaklıkları için deneysel ve model yaş baz nem oranı regresyon analiz değerleri incelendiğinde, 110 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9992 ve χ^2 değerinin 0,00011, 130 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9992 ve χ^2 değerinin 0,00017, 150 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9970 ve χ^2 değerinin 0,00091 olduğu belirlenmiştir. Buna göre, 150 °C'lik kurutma işlemi regresyon analiz değerinin diğer kurutma işlemlerine göre daha düşük değerde çıkmasında, 150 °C'lik kurutma havası sıcaklık değerinin elde edilmesi için düzelerden üflenen kurutma havası hızının diğer kurutma işlemlerine göre oldukça fazla olması etkili olmaktadır.



Şekil 5.31 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi

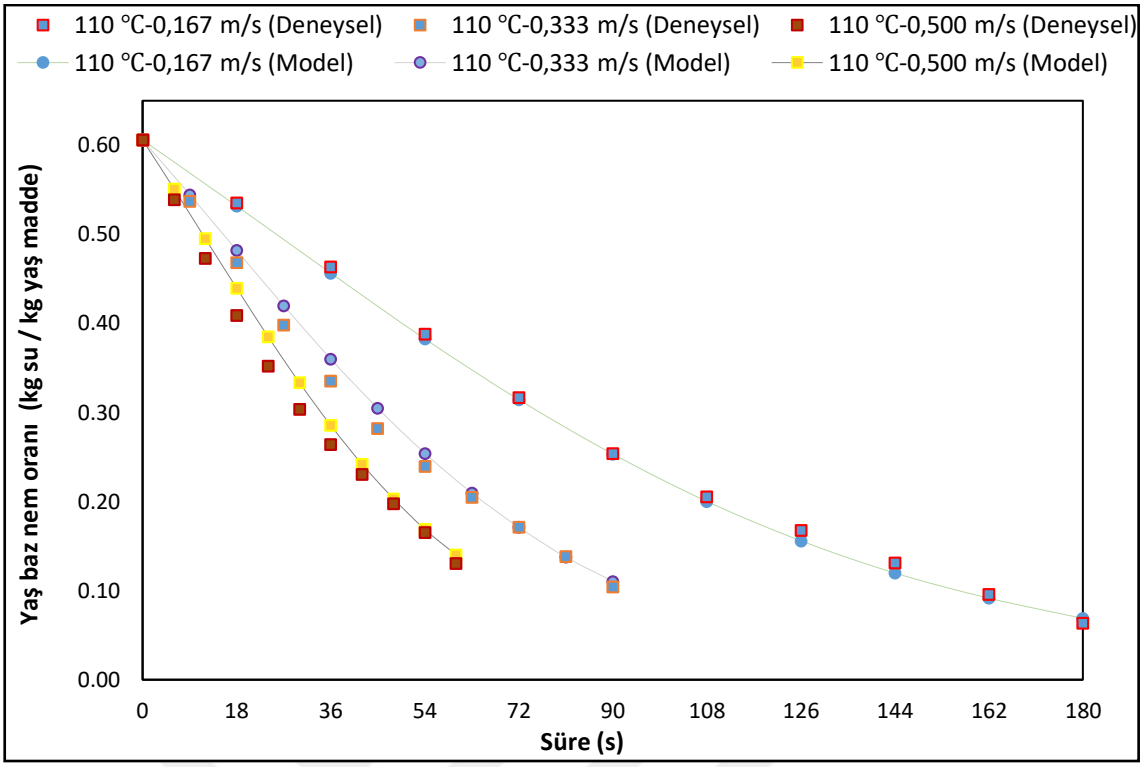
Şekil 5.31'de verilen 0,333 m/s kumaş ilerleme hızı ve sırasıyla 110-130 ve 150 °C kurutma havası sıcaklıkları için deneysel ve model yaş baz nem oranlarının, regresyon analiz değerleri incelendiğinde, 110 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9968, 130 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9978, 150 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9994 olduğu belirlenmiştir. 0,333 m/s kumaş ilerleme hızı için, kurutma havası sıcaklığının ve buna paralel olarak hızının artması ile model ve deneysel yaş baz nem oranları arasındaki uyumun arttığı, regresyon analiz değerlerinden ve grafik üzerindeki verilerin gösterdiği uyumdan anlaşılmaktadır.



Şekil 5.32 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi

Şekil 5.32'de verilen 0,500 m/s kumaş ilerleme hızı ve sırasıyla 110-130 ve 150 °C kurutma havası sıcaklıkları için deneysel ve model yaş baz nem oranlarının, regresyon analiz değerleri incelendiğinde, 110 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9945, 130 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9948, 150 °C kurutma havası için R^2 değerinin 0,9946 olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerin diğer kurutma şartlarına göre daha düşük çıkmasında, kumaş hızının artması ile kumaşta meydana gelen dalgalanma hareketinin yanısıra, kumaş üzerinden buharlaşan nemli hava tabakasının çok daha hızlı dağılması etkilidir.

Kurutma havası sıcaklığının aynı değerde, kumaş ilerleme hız değerlerinin ise değiştiği durumlar için çizilen grafikler Şekil 5.33-5.35'de gösterilmiştir.

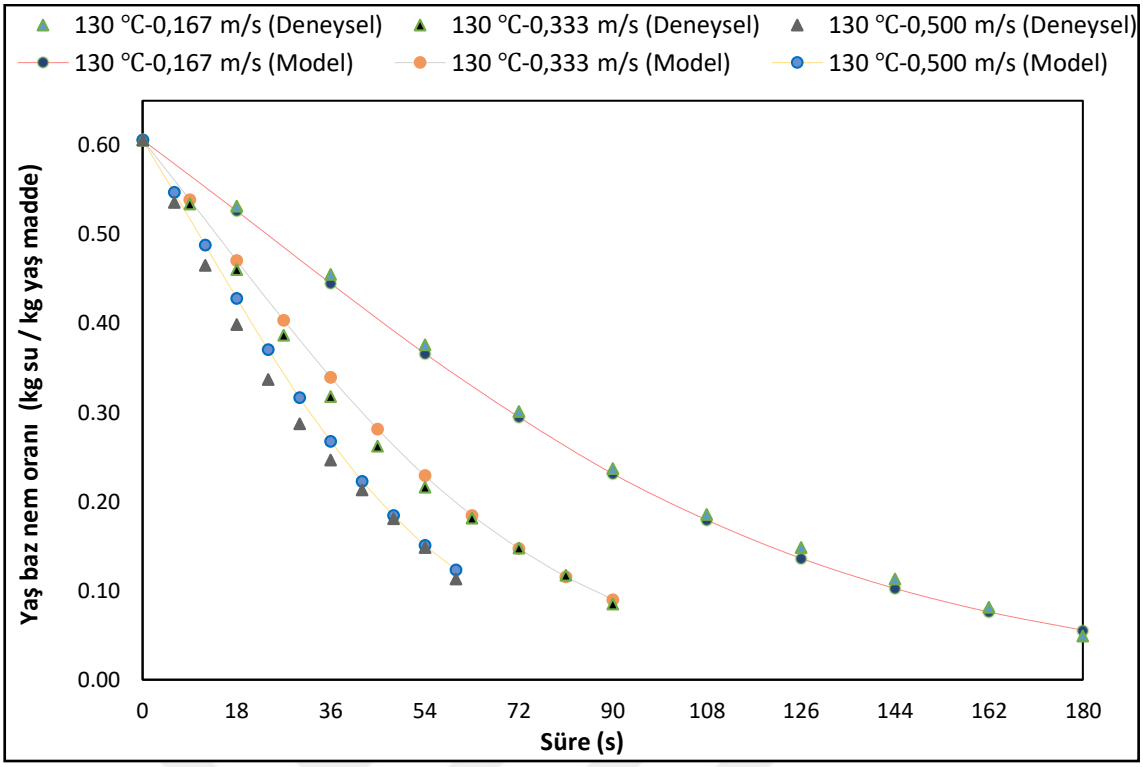


Şekil 5.33 110 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızında model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi

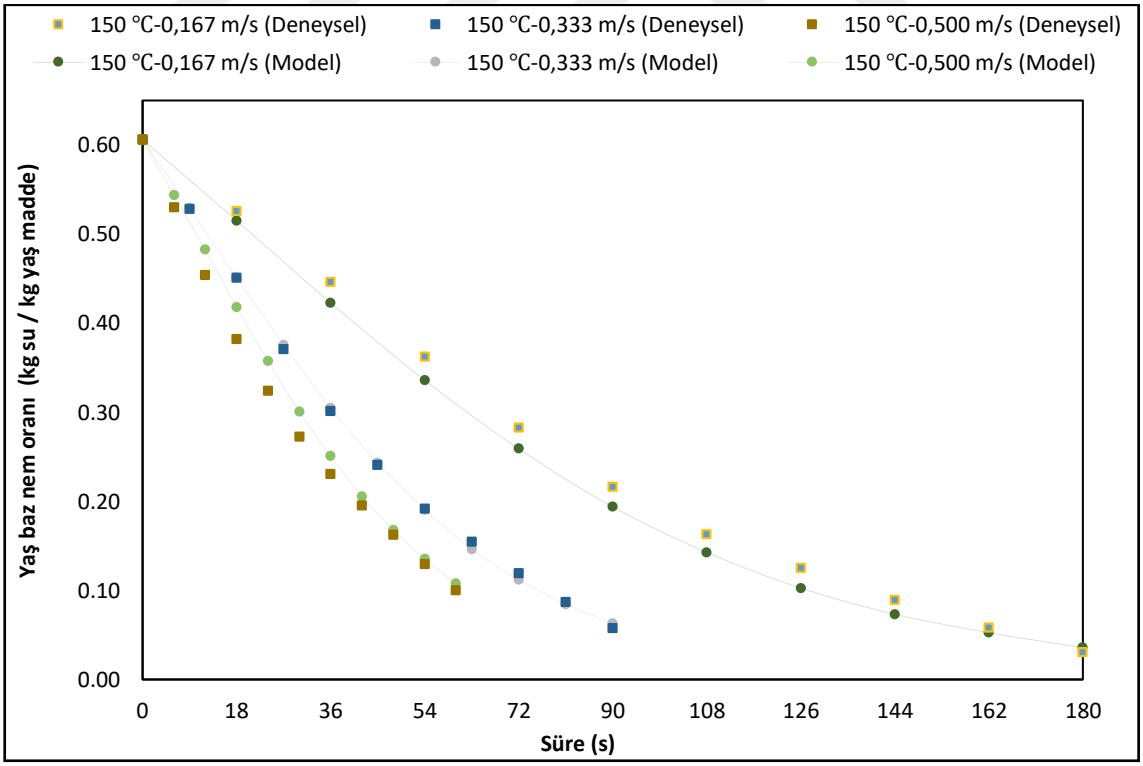
Şekil 5.33 incelendiğinde, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızındaki kurutma işleminde 6. Kabinden sonra, 0,333 m/s kumaş ilerleme hızındaki kurutma işleminde ilk beş kabinde ve 0,500 m/s kumaş ilerleme hızındaki kurutma işleminde ilk altı kabinde gösterilen model ve deneysel yaş baz nem oranları arasındaki uyum ilişkisinin birbirlerinden uzaklaştıkları görülmektedir. Bu duruma artan kumaş ilerleme hızı ile kumaşta meydana gelen dalgalanma hareketi ve buharlaşan nemli havanın sınır tabakayı daha hızlı terk etmesinin etkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.34'de 130 °C kurutma havası sıcaklığında ve üç farklı kumaş ilerleme hızında sunulan model ve deneysel yaş baz nem oranlarının zamanla değişimini gösteren grafikler ile Şekil 5.33'de gösterilen grafiklerin benzer özellikler gösterdiği görülebilir.

Şekil 5.35'de ise 150 °C kurutma havası sıcaklığı ve 0,167 m/s kumaş ilerleme hızına ait model ve deneysel yaş baz nem oranı arasındaki ilişkinin diğer kurutma şartlarına göre daha kötü olduğu, ayrıca Çizelge 5.16 yardımı ile tüm kurutma işlemleri arasında en düşük regresyon analiz değerine sahip olduğu görülebilir. Bu duruma, kumaş, kurutma havası hızı ve kuruma süresinin artmasının etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.34 130 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızında model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi



Şekil 5.35 150 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızında model ve deneysel yaş baz nem oranının zamanla değişimi

Şekil 5.33-5.35'de verilen grafiklerden de görüldüğü üzere azalan hız periyodunda gerçekleşen kurutma işlemlerinin modellenmesinde, I.dereceden kinetik model kullanımı, 0,9945-0,9994 R^2 hassasiyeti ile oldukça elverişlidir.

5.3.2 Difüzyon Modeli Çözümü

5.3.2.1 Efektif Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi

Difüzyon modelinin, I. Dereceden kinetik modelden farkı daha önce Bölüm 4'de de bahsedilği gibi malzeme kalınlığı ''L'' dir. Efektif difüzyon katsayısının belirlenmesinde Eş. 4.35'den yararlanılmıştır. lnMR = ln (m/mo) değerleri daha önce Çizelge 5.12'de verilmiştir. Buna göre herbir kurutma şartı için bulunan efektif difüzyon katsayıları sırasıyla aşağıdaki Çizelge 5.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.17 Tüm kurutma şartları için efektif difüzyon katsayı (D_{eff}) değerleri

Kumaş ilerleme hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı (°C)	Efektif difüzyon katsayı D_{eff} (m^2/s)	Doğru denklemi	Regresyon katsayısı (R^2)
0,167 (10 m/dak)	110	$1,009 \times 10^{-9}$	y = -0,0168x + 0,0222	0,9972
	130	$1,087 \times 10^{-9}$	y = -0,0181x + 0,0369	0,9964
	150	$1,238 \times 10^{-9}$	y = -0,0206x + 0,0939	0,9925
0,333 (20 m/dak)	110	$1,676 \times 10^{-9}$	y = -0,0279x - 0,0555	0,9973
	130	$1,826 \times 10^{-9}$	y = -0,0304x - 0,0447	0,9979
	150	$2,091 \times 10^{-9}$	y = -0,0348x - 0,0005	0,9980
0,500 (30 m/dak)	110	$2,247 \times 10^{-9}$	y = -0,0374x - 0,0791	0,9958
	130	$2,397 \times 10^{-9}$	y = -0,0399x - 0,0785	0,9959
	150	$2,547 \times 10^{-9}$	y = -0,0424x - 0,0874	0,9966

Çizelge 5.17 incelendiğinde, aynı kumaş ilerleme hızı için kurutma havası sıcaklığının artması ile efektif difüzyon katsayısı D_{eff}'in arttığı görülmektedir. Bu durum I. dereceden kinetik modelde olduğu gibi yüksek sıcaklık değerlerinde kumaş içerisindeki suyun daha kolay buharlaşması ve kuruma hızının artması ile açıklanabilmektedir.

Farklı kumaş ilerleme hızları için değerlendirme yapıldığında, kumaş hızının artması ile tüm kurutma havası sıcaklık değerlerine karşılık efektif difüzyon katsayısının arttığı görülmektedir.

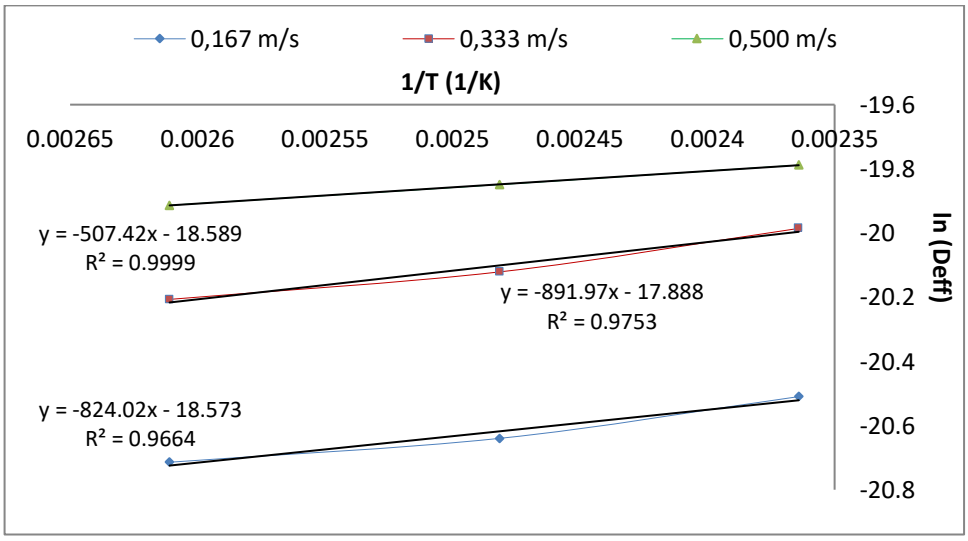
Herbir kurutma şartı için, difüzyon modelinin anlık nem içerikleri, Çizelge 5.17'de verilen efektif difüzyon katsayı (D_{eff}), Eşitlik 4.34'de verilen formül kullanılarak hesaplanmış elde edilen değerler Çizelge 5.18'de verilmiştir.

Çizelge 5.18 Tüm kurutma şarları için difüzyon modeli anlık nem içerikleri (m*)

Kumaş İlerleme Hızı 10 m/dak (0,167 m/s)					Kumaş İlerleme Hızı 20 m/dak (0,333 m/s)					Kumaş İlerleme Hızı 30 m/dak (0,500 m/s)				
Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)			Kabin No	Süre (s)	Kurutma Havası Sıcaklığı (°C)		
		110	130	150			110	130	150			110	130	150
Giriş	0	0,915	0,915	0,915	Giriş	0	0,915	0,915	0,915	Giriş	0	0,915	0,915	0,915
1	18	0,548	0,535	0,512	1	9	0,577	0,564	0,542	1	6	0,593	0,584	0,575
2	36	0,405	0,387	0,353	2	18	0,449	0,429	0,396	2	12	0,473	0,459	0,446
3	54	0,299	0,279	0,244	3	27	0,349	0,326	0,290	3	18	0,378	0,362	0,346
4	72	0,221	0,201	0,168	4	36	0,272	0,248	0,212	4	24	0,302	0,285	0,268
5	90	0,164	0,145	0,116	5	45	0,211	0,189	0,155	5	30	0,242	0,224	0,208
6	108	0,121	0,105	0,121	6	54	0,164	0,144	0,113	6	36	0,193	0,176	0,161
7	126	0,089	0,076	0,055	7	63	0,128	0,109	0,083	7	42	0,154	0,139	0,125
8	144	0,066	0,055	0,038	8	72	0,099	0,083	0,061	8	48	0,123	0,109	0,097
9	162	0,049	0,040	0,026	9	81	0,077	0,063	0,044	9	54	0,098	0,086	0,075
10	180	0,036	0,029	0,018	10	90	0,060	0,048	0,032	10	60	0,079	0,068	0,058

5.3.2.2 Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi

Aktivasyon enerji değerleri, ln(D_{eff}) ile mutlak sıcaklığın tersine (1/T) göre çizilen grafik (Şekil 5.36) yardımıyla, Eş. 4.37'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.36 Sıcaklığın efektif difüzyon katsayısına etkisi

Çizelge 5.19 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için aktivasyon enerjileri

Kumaş ilerleme hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı (K)	Efektif difüzyon katsayısı (m^2/s)	Doğru denklemi	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)
0,167 (10 m/dak)	383	$1,009 \times 10^{-9}$	y = -824,02x + 18,573	6,8500
	403	$1,087 \times 10^{-9}$		
	423	$1,238 \times 10^{-9}$		
0,333 (20 m/dak)	383	$1,676 \times 10^{-9}$	y = -891,97x – 17,888	7,4158
	403	$1,826 \times 10^{-9}$		
	423	$2,091 \times 10^{-9}$		
0,500 (30 m/dak)	383	$2,247 \times 10^{-9}$	y = -507,42x – 18,589	4,2186
	403	$2,397 \times 10^{-9}$		
	423	$2,547 \times 10^{-9}$		

Kurutma havası sıcaklığının artmasıyla efektif difüzyon katsayısı değerlerinin artması, ürün içindeki nemin daha kolay buharlaşması ve kuruma hızının artması ile açıklanabilir. Artan kumaş hızı ile kurutma işleminde daha fazla nem difüzyonu olduğu Şekil 5.36 yardımı ile düşen aktivasyon enerjisinden anlaşılmaktadır. Kurutma işleminin tümü ele alındığında artan kumaş hızı ile düşen aktivasyon enerjisine rağmen kumaşın kabin içinde bulunma süresinin azalması buharlaşma için gerekli enerjinin kumaşa geçişini engellemekte ve istenilen oranda buharlaşmanın önüne geçmektedir.

5.3.2.3 Regresyon Analizleri

Regresyon analizleri, difüzyon modeli ve deneysel veriler için bulunan anlık nem içeriklerinden faydalanılarak, Eş. 4.38-4.40'da verilen formüller yardımıyla bulunmuş ve bulunan değerler Çizelge 5.20'de verilmiştir.

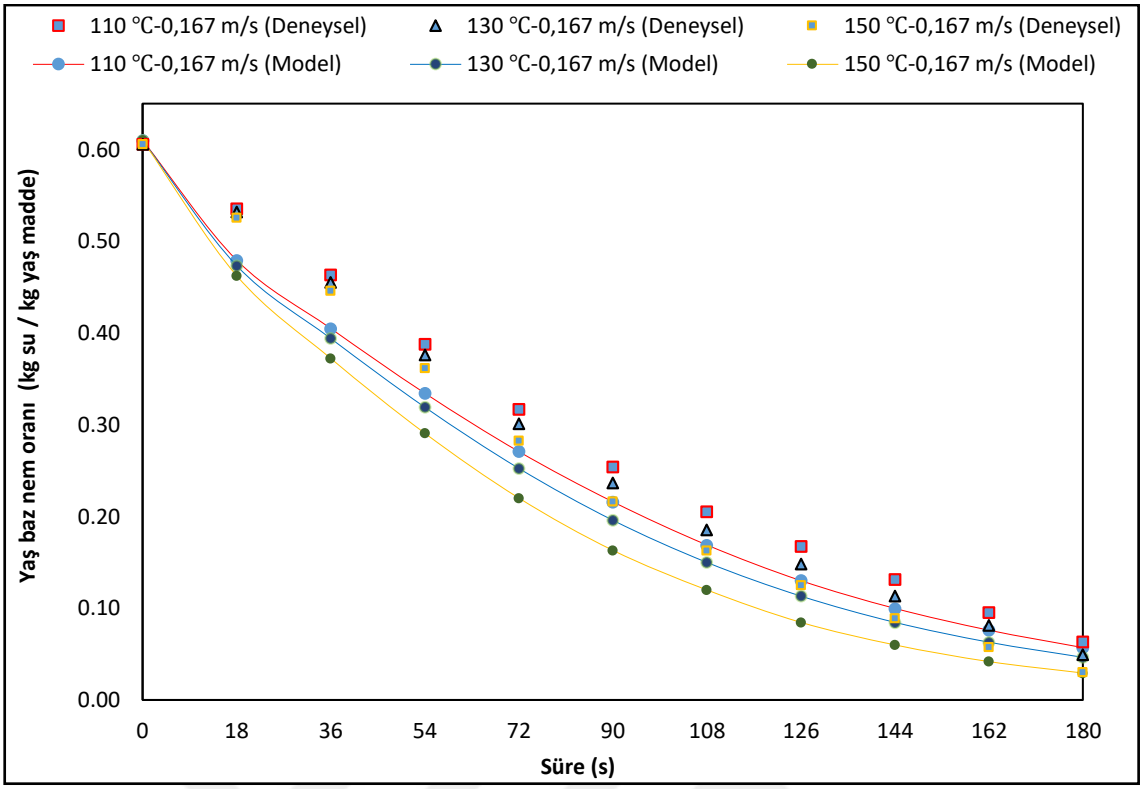
Çizelge 5.20 Üç farklı kumaş ilerleme hızı için regresyon istatistikleri

Kumaş ilerleme hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı (°C)	Regresyon istatistikleri			
		R^2	χ^2	RMSE	r
0.667	110	0,9881	0,00430	0,0211	0,9940
	130	0,9869	0,00456	0,0228	0,9934
	150	0,9812	0,00646	0,0284	0,9905
0,333	110	0,9941	0,00203	0,0134	0,9970
	130	0,9937	0,00214	0,0146	0,9968
	150	0,9912	0,00322	0,0183	0,9955
0,500	110	0,9949	0,00148	0,0116	0,9974
	130	0,9951	0,00139	0,0120	0,9975
	150	0,9961	0,00109	0,0109	0,9980

Difüzyon modeli için hesaplanan regresyon analiz değerleri Çizelge 5.20'de verilmiştir. Model uyumunda yüksek R^2 ve r, düşük χ^2 ve RMSE değerlerine bakılır.

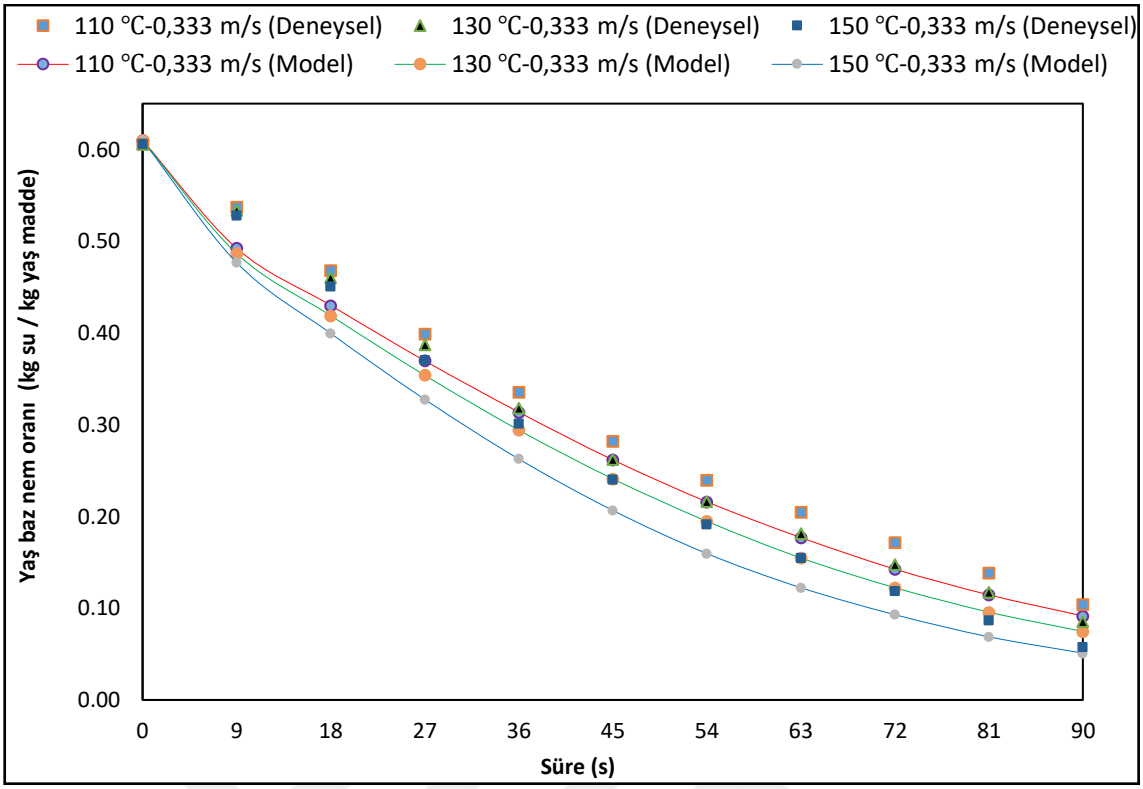
Çizelge 5.20'de görüldüğü gibi, tüm kurutma şartları için tahminin R^2 değerleri, 0,9812 ile 0,9961 arasında χ^2 değerleri, 0,00109 ile 0,00646 arasında RMSE değerleri, 0,0109 ile 0,0289 arasında ve r değerleri ise 0,9905 ile 0,9980 arasında değişmektedir. Bu değerler Ram makinesinde kurutma modelleme aracı olarak, azalan hız periyodunda gerçekleşen kurutma işlemleri için, difüzyon modelinin kullanımının oldukça uygun olduğunu göstermektedir.

Herbir kurutma şartı için, difüzyon modelden elde edilen anlık nem oranları ile deneylerden elde edilen anlık nem oranlarının zamanla değişimi Şekil 5.37-5.39'da verilmiştir.

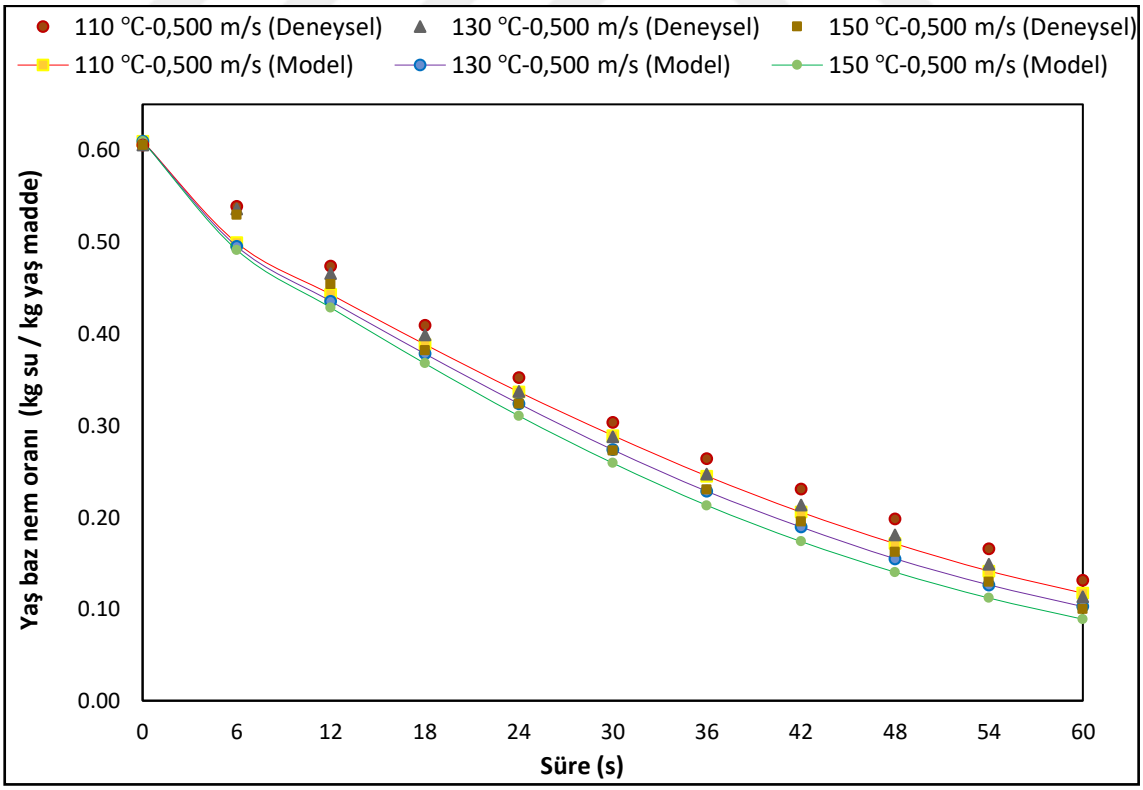


Şekil 5.37 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için difüzyon modeli ve deneysel yaş baz nem oranlarının zamanla değişimi

Şekil 5.37'de, 0,167 m/s kumaş ilerleme hızında gerçekleştirilen her bir deneyden elde edilen yaş baz nem oranı değerleri ile difüzyon modeli kullanılarak elde edilen yaş baz model nem oranı değerlerinin kuruma zamanı ile degişimini içeren grafik sunulmuştur. Bu yöntemle elde edilen veriler, I. Dereceden kinetik modelle elde edilen veriler ile karşılaştırıldığında, grafikler üzerindeki yaş baz nem oranı değerlerinin oluşturduğu grafik eğimlerinin birbirlerine benzer fakat difüzyon modelinde biraz daha birbirlerinden uzaklaştıları görülür. Bunun başlıca sebebi, difüzyon modelinde, I. Derece kinetik modelden farklı olarak, kurutulan malzeme kalınlığının da hesaplamalarda kullanılmasıdır. Kurutma işlemlerinin özelliklerine göre değişen buharlaşma miktarları, kumaş kalınlığını etkilemektedir. I. Dereceden kinetik model ve difüzyon modeline ait şekiller incelendiğinde, grafik eğimlerinin birbirine benzer fakat regresyon analiz değerleri ile aktivasyon enerji değerlerinin birbirlerinden farklı olması sebebi ile, gösterdikleri uyum ilişkileri arasında farklılık bulunduğu görülür.



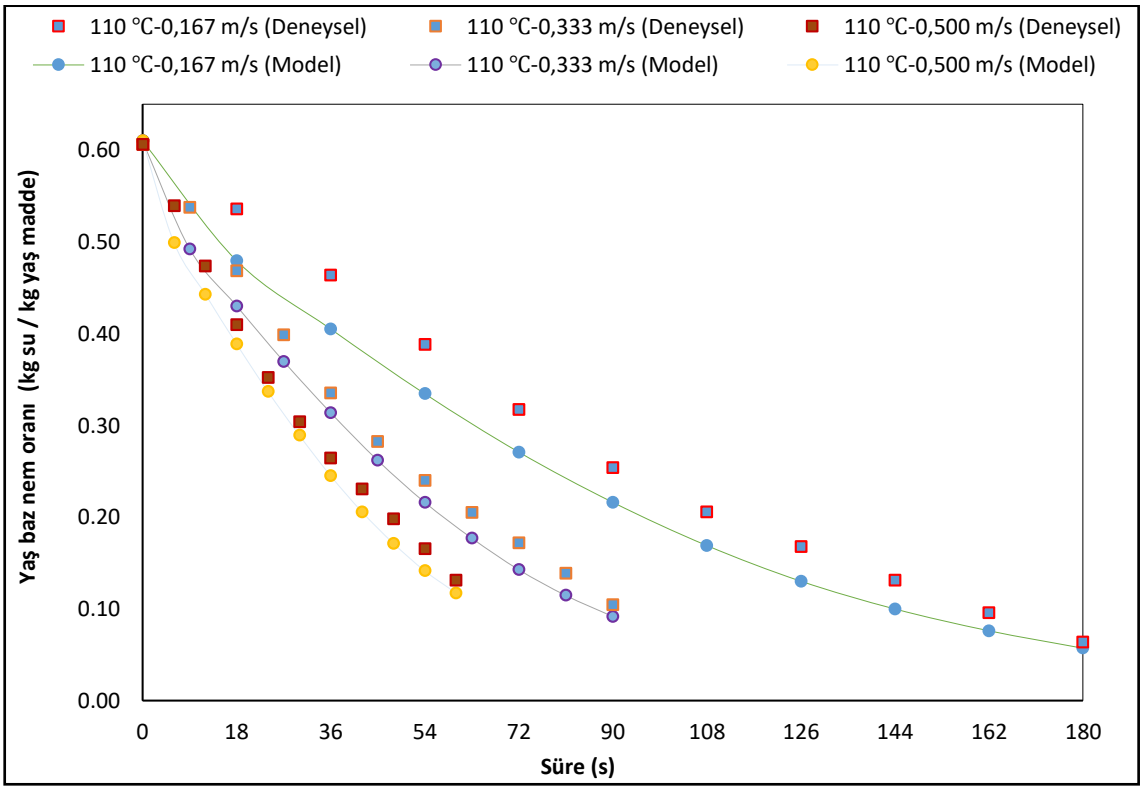
Şekil 5.37 0,333 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için difüzyon modeli ve deneysel yaş baz nem oranlarının zamanla değişimi



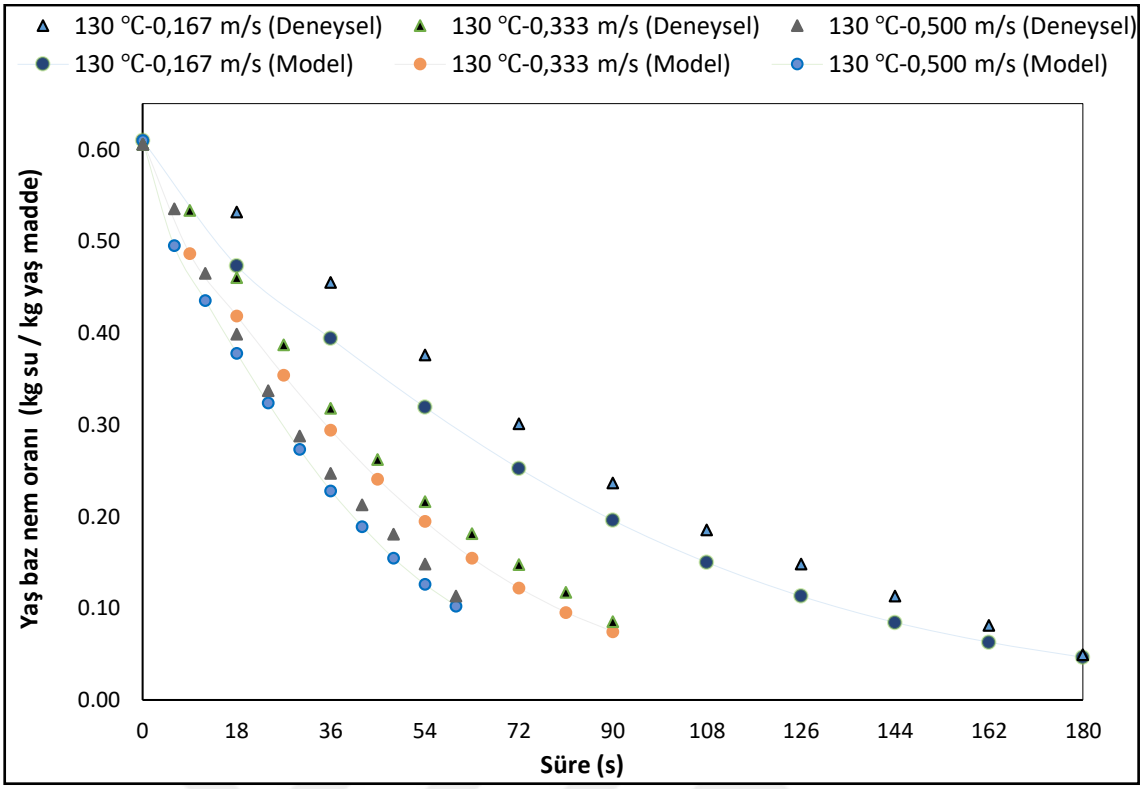
Şekil 5.38 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için difüzyon modeli ve deneysel yaş baz nem oranlarının zamanla değişimi

Şekil 5.36 ve 5.38'deki grafikler, aynı kumaş ilerleme hızında üç farklı kurutma havası sıcaklığı için, deneylerden ve difüzyon modeliyle elde edilen yaş baza göre nem oranlarının uyumunu göstermektedir. Bulunan model verileri ile deneysel veriler arasındaki uyum açıkça görülmektedir.

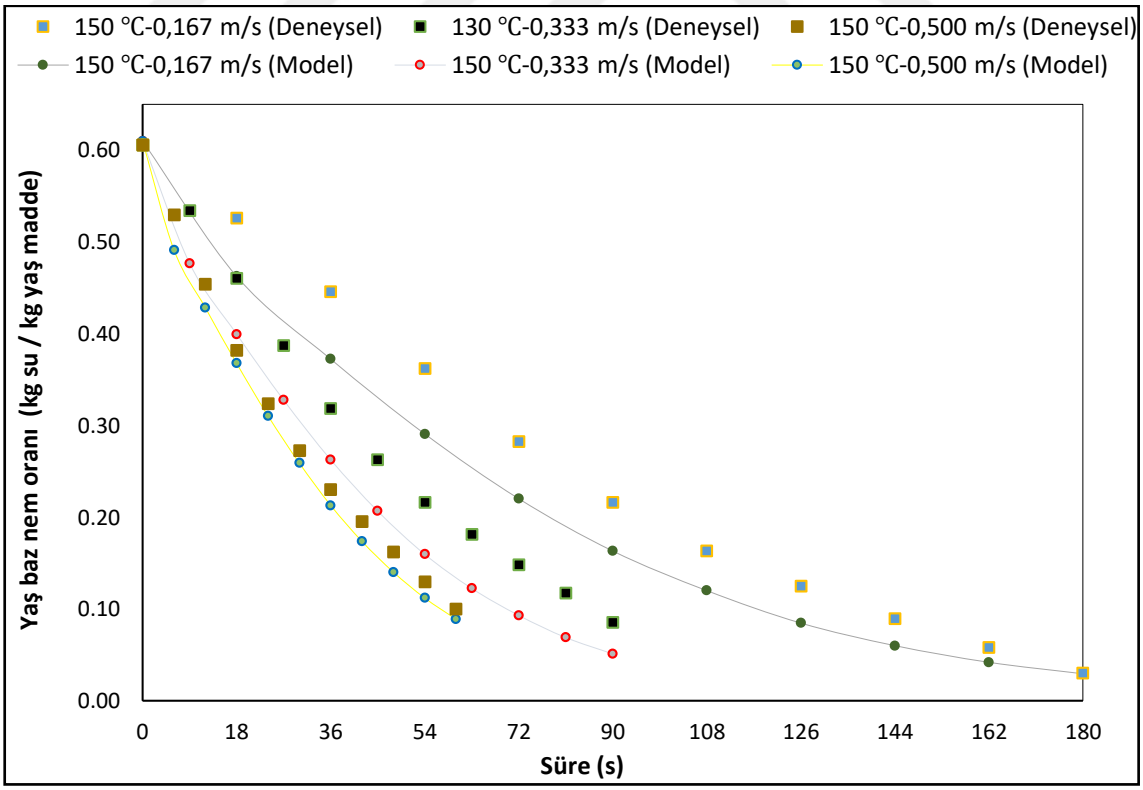
Kurutma havası sıcaklığının sabit, kumaş ilerleme hızının değiştiği durumlar için bu uyum Şekil 5.39-5.41'de çizilen grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 5.39 110 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için difüzyon modeli ve deneysel yaşbaz nem oranının zamanla değişimi



Şekil 5.40 130 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için difüzyon modeli ve deneysel yaşbaz nem oranının zamanla değişimi



Şekil 5.41 150 °C kurutma havası sıcaklığında üç farklı kumaş ilerleme hızı için difüzyon modeli ve deneysel yaşbaz nem oranının zamanla değişimi

5.3.3 Teorik Modellerin Karılaştırılması

Kullanılan teorik modeller arasındaki uygunluk regresyon analizlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile yapılmıştır. Buna göre, birinci dereceden kinetik model ve difüzyon model regresyon analizlerinin karşılaştırması Çizelge 5.21'de verilmiştir.

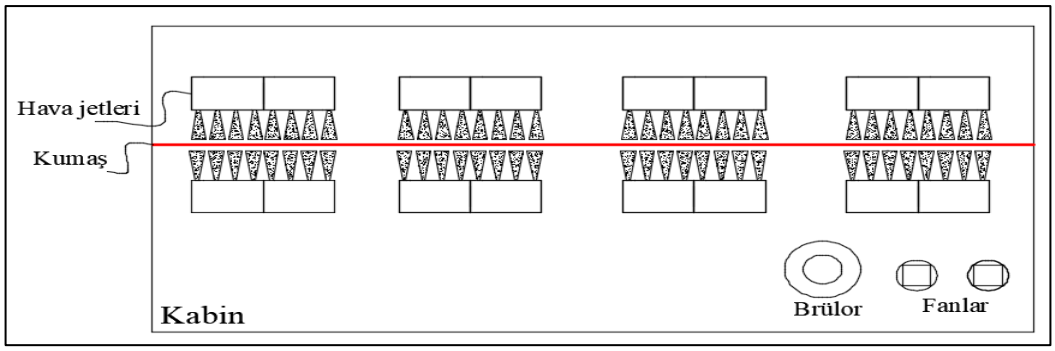
Çizelge 5.21 Modellerin regresyon analizleri karşılaştırılması

Kumaş ilerleme hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı (°C)	Regresyon istatistikleri							
		R^2		χ^2		RMSE		r	
		I. Dereceden kinetik model	Difüzyon modeli	I. Dereceden kinetik model	Difüzyon modeli	I. Dereceden kinetik model	Difüzyon modeli	I. Dereceden kinetik model	Difüzyon modeli
0.667	110	0,9992	0,9881	0,00011	0,0043	0,0052	0,0211	0,9996	0,994
	130	0,9992	0,9869	0,00017	0,00456	0,0055	0,0228	0,9996	0,9934
	150	0,997	0,9812	0,00091	0,00646	0,0113	0,0284	0,9998	0,9905
0,333	110	0,9968	0,9941	0,00053	0,00203	0,0099	0,0134	0,9984	0,997
	130	0,9978	0,9937	0,00035	0,00214	0,0084	0,0146	0,9989	0,9968
	150	0,9994	0,9912	0,00005	0,00322	0,0045	0,0183	0,9997	0,9955
0,5	110	0,9945	0,9949	0,00107	0,00148	0,0122	0,0116	0,9972	0,9974
	130	0,9948	0,9951	0,00104	0,00139	0,0123	0,012	0,9974	0,9975
	150	0,9946	0,9961	0,00122	0,00109	0,0129	0,0109	0,9973	0,998

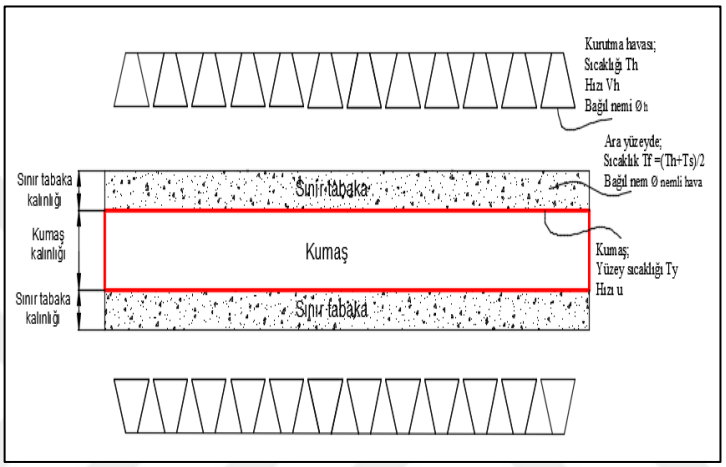
Çizelge 5.21'de, tüm kurutma şartları için oluşturulan modellere ait regresyon analizleri görülmektedir. Regresyon analizlerinde uyum koşulu olarak R^2 ve r değerlerinin 1'e, χ^2 ve RMSE değerlerinin 0'a (sıfır) yakın olması şartı aranır. Buna göre I. dereceden kinetik model ve difüzyon modeli karşılaştırıldığında, I. dereceden kinetik modelin difüzyon modeline göre daha uyumlu olduğu görülmektedir.

5.4 Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi ile toplam hatanın hesaplanmasında, Eş.4.41'de verilen denklemden faydalanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 5.42'de, ölçüm yapılan noktaların şematik resmi ise Şekil 5.43'de verilmektedir.



Şekil 5.42 Kurutma kabini şematik resmi



Şekil 5.43 Ölçüm yapılan noktalar

Yapılan deneylerde, kurutma havası hızı, kumaş ilerleme hızı, kumaş yüzey sıcaklığı, kurutma havası sıcaklığı, nemli hava sıcaklığı, çevre hava sıcaklığı, çevre hava bağıl nemi, kumaşın kabin girişi ve çıkışında bağıl nemi, kurutucu giriş ve çıkışında kumaşın ağırlığı ve zaman ölçülmüştür.

Bu durumda hata kaynakları fonksiyonu (HKF);

$$HKF = f\,[v_{hava\ hızı}, v_{kumaş}, T_{kumaş}, T_{hava}, T_{nemli\ hava}, T_{ortam}, \Phi_{çevre\ hava}, Nem_{kumaş}, m_{kumaş}, t] \quad (5.1)$$

Olarak yazılabilir. Bu durumda hata,

$$Hata = \left(\left(\frac{\Delta v_{hava}}{v_{hava}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v_{kumaş}}{v_{kumaş}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{kumaş}}{T_{kumaş}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{hava}}{T_{hava}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{nemli\ hava}}{T_{nemli\ hava}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{ortam}}{T_{ortam}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \emptyset_{ortam}}{\emptyset_{ortam}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \emptyset_{nemli\ hava}}{\emptyset_{nemli\ hava}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta nem_{kumaş}}{nem_{kumaş}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_{kumaş}}{m_{kumaş}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyetleri Bölüm 3'de sunulmuştur. Buna göre, hata analizinde kullanılacak ölçüm parametreleri ve hassasiyet değerleri Çizelge 5.22'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.22 Ölçüm parametreleri ve hassasiyetleri

Parametre		Birim	Hassasiyet	Ölçülen Min.-Max. Değerler	Ölçülen Ortalama Değer
Hız	Hava	m/s	0,05	21,85-33,4	27
	Kumaş		0,015	0,167-0,500	0,333
Sıcaklık	Kumaş	°C	0,005	35-144	89,5
	Kurutma Havası		0,01	108-152	130
	Nemli hava		0,01	52-102	77
	Ortam (çevre)		0,01	26,3-28,9	27,6
Bağıl Nem	Nemli hava	%RH	0,001	59-61	60
	Ortam (çevre)		0,001	5,1-72	38,55
Nem İçeriği	Kumaş	%RH	0,008	3,27-60	31,6
Ağırlık	Kumaş	gr	0,01	132-339	235,5
Zaman	Kumaş	s	0,5	60-180	120

Çizelge 5.22'deki verileri kullanarak yapılan hesaplamalar sonucunda, deneysel hata oranı %4,59 olarak bulunmuştur. Bu hata literatürde kabul edilen değerler arasındadır.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; tekstil edüstrisinde kurutma işlemlerinde oldukça sık kullanılan ve tekstil mamullerinin sıcak hava ile kurutulmasını sağlayan 10 kabinli bir ram makinesinin kurutma davranışı, Fick'in ikinci yasasından türetilen I. dereceden kinetik ve difüzyon modelleri ile teorik olarak modellenmiştir. Deneyler %95 pamuk + %5 likra içerikli kumaşlar kullanılarak, 110-130-150 ^{o}C kurutma havası ve 0,167-0,333-0,500 m/s kumaş ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen verilerden yararlanılarak, kurutucunun herbir kabinine ait ısı-kütle transfer katsayıları, boyutsuz nem oranları, kuruma hızı gibi kuruma davranışını belirleyen değerler hesaplanmıştır. Modelleme kısmında, I.dereceden kinetik ve efektif difüzyon katsayı değerleri ile aktivasyon enerjisi değerleri bulunmuş, matematiksel model ile deneysel veriler arasındaki uyum regresyon analizleri yardımı ile araştırılarak kullanılan modeller arasında karşılaştırılma yapılmıştır. Deneylerden elde edilen verilerin doğruluğu belirsizlik analizi ile %4,59 hata oranı olarak hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar sırasıyla sunulmuştur.

6.1 Kurutma Davranışı

6.1.1 Kumaş Yüzey Sıcaklığı

Tüm kurutma şartları için, fular kısmından yıkanarak çıkan kumaş, ortalama 35 ^{0}C yüzey sıcaklığında kurutucuya girmiştir. Kurumanın ilk evrelerinde, kumaş yüzeyinde yeterli miktarda nem bulunduğu sürece, kurutma havası sıcaklık değeri ne olursa olsun tekstil malzemesinin sıcaklığı, yüzeydeki su-buharı hava karışımının yaş termometre sıcaklığını

geçememiştir. Kumaş yüzey sıcaklığının, tüm kurutma şartlarında, kumaş yüzeyindeki nem miktarına bağlı olarak, ilk iki kabinde 84 ^{0}C'yi aşamadığı görülmüştür. Kurumanın ilerleyen zamanlarında, özellikle 6.kabinden sonra, yüzeydeki serbest nem miktarının ortadan kalkması (difüzyon ile kuruma aşaması) ile kumaş yüzey sıcaklığının, kurutma havası sıcaklığına yaklaşmakta olduğu görülmüştür. Kurutucu çıkışında, kumaş çıkış açıklığından, kumaş yüzey sıcaklığında (kumaşın ilerleme hızına bağlı olarak), yaklaşık 9-14 ^{o}C'lik bir düşüşe neden olan ısı transferi olduğu tespit edilmiştir. Kumaş ilerleme hızının, kumaş yüzey sıcaklığına etkisi incelendiğinde, aynı kurutma havası sıcaklığında, kumaş ilerleme hızının artması ile kumaş yüzey sıcaklığının azaldığı görülmüştür.

6.1.2 Kuruma Havası (Nemli Hava) Bağıl Nemi

Kurutma havası sıcaklığının, kuruma havası bağıl nemine etkisi incelendiğinde, sabit kumaş ilerleme hızında, kurutma havası sıcaklığının artması ile kumaş yüzeyindeki sınır tabaka civarında ölçülen nemli havanın bağıl nem değerlerinin arttığı görülmüştür. Kurutma havasının sıcaklığının 20 ^{0}C artmasıyla, birinci kabinde bağıl nem değerlerinin yaklaşık %0,5 oranında arttığı, kumaştaki nem miktarının azalmasına paralel olarak kurumanın ilerleyen zamanlarında bağıl nem miktarlarının birbirine yaklaşmakta olduğu görülmüştür. Kumaş ilerleme hızının etkisi incelendiğinde, kumaş hızı arttıkça, kumaş yüzeyindeki sınır tabaka civarında ölçülen bağıl nem değerlerinin azaldığı görülmüştür.

6.1.3 Isı ve Kütle Transferi

Aynı kumaş ilerleme hızında, kurutma havası sıcaklığının artması ile kumaş yüzeyindeki nem miktarına bağlı olarak, kumaş yüzey sıcaklığının, sınır tabaka (film) sıcaklığına yaklaşması sonucu ısı taşınım katsayısının arttığı, kurutma havası değerlerine yaklaşması durumunda ise azalmaya başladığı görülmüştür. Aynı kumaş ilerleme hızında, kurutma havası sıcaklığının 110 ^{o}C'den 130 ^{o}C'ye çıkarılması durumunda, ısı taşınım katsayısında yaklaşık %4-5 oranında bir artış, 130 ^{o}C'den 150 ^{o}C'ye çıkarılması durumunda yaklaşık %15-23 oranında bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Isı transferindeki artışa, kurutma havası sıcaklığının, ayarlanmasını sağlayan hava hızının da etkili olduğu belirlenmiştir.

Kumaştaki nem miktarına bağlı olarak, ısı transfer katsayısı arttıkça, kütle transfer katsayısı artmakta, kumaş yüzey sıcaklığı kurutma havası sıcaklığına yaklaşmaya başladığında ise ısı transfer katsayısı azalmakta buna karşılık kütle transfer katsayısının sabit değerlerde seyrettiği görülmüştür. Sonuç olarak, kütle ve ısı taşınım katsayıları değerlerinde önemli olan etkenin, kurutma havası sıcaklığı ve hızı olduğu, kumaş ilerleme hızının bu değerlerde çok az miktarlarda değişiklik yaptığı tespit edilmiştir.

6.1.4 Nem oranı

Nem oranı (nem içeriği) değişiminde, kumaş ilerleme hızının sabit, kurutma havası sıcaklık değerlerinin arttığı durumlarda, buharlaşma miktarının arttığı görülmüştür. Yüksek sıcaklık, düşük ilerleme hızında en fazla buharlaşma elde edilmiştir. Buharlaşama miktarının değişiminde, kurutma havası sıcaklığının, kumaş ilerleme hızından daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

6.1.5 Kuruma Hızı

Kumaş ilerleme hızının aynı olduğu kurutma işlemlerinde, kurutma havası sıcaklık değerinin artması ile kuruma hızının arttığı görülmüştür. Kuruma hızının en yüksek olduğu çalışma koşulu olarak kumaş ilerleme hızının en yüksek (0,500 m/s), ve kurutma havası sıcaklığının 150 ^{o}C olduğu çalışma koşulu olarak tespit edilmiştir. Kumaş hızının artması ile kuruma hızının artmasında, kumaş yüzeyinde oluşan su buharının (doymuş sınır tabaka) daha hızlı dağılması önemli rol oynamaktadır. Bölüm 5'te verilen kuruma hızı-zaman grafiklerden, ilk altı kabinde gerçekleşen kurumanın, I. Azalan hız periyodunda, altıncı kabinden sonraki kurumanın ise II. Azalan hız periyodunda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kumaş hızı ile kuruma hızının artmasına rağmen, kumaşın kabin içinde kaldığı süre kısaldığından, istenilen oranda buharlaşmanın meydana gelemediği belirlenmiştir.

6.2 Teorik Modeller

6.2.1 I.Dereceden Kinetik Model

Yüksek sıcaklık değerlerinde, kumaştaki suyun daha kolay buharlaşması ve kuruma hızının artması sebebiyle, aynı kumaş ilerleme hızı için kurutma havası sıcaklığının artması ile I. Derece kinetik katsayı sabiti k değerinin arttığı tespit edilmiştir. Kinetik katsayı sabiti k, farklı kumaş ilerleme hızları için değerlendirildiğinde, kumaş hızının artması ile tüm kurutma şartlarında atttığı buna paralel olarak aktivasyon enerjisi değerlerinin azaldığı görülmüştür. Aktivasyon enerjisi, ürün bünyesindeki su moleküllerinin enerji engelini geçme potansiyeli olduğundan, kumaş hızının artması ile kuruma hızının artması ve bu sebeple daha fazla nem difüzyonu olduğu yapılan hesaplamalar ile görülmüştür.

6.2.2 Difüzyon Modeli

Aynı kumaş ilerleme hızı için kurutma havası sıcaklığının artması ile efektif difüzyon katsayısı D_{eff}'in arttığı görülmüştür. Bu durum I. dereceden kinetik modelde olduğu gibi yüksek sıcaklık değerlerinde kumaş içerisindeki suyun daha kolay buharlaşması ve kuruma hızının artması ile açıklanabilmektedir. Artan kumaş hızı ile kurutma işleminde daha fazla nem difüzyonu olduğu Bölüm 5'te verilen Çizelge 5.36 yardımı ile düşen aktivasyon enerjisinden anlaşılmaktadır. Kurutma işleminin tümü ele alındığında artan kumaş hızı ile düşen aktivasyon enerjisine rağmen kumaşın kabin içinde bulunma süresinin azalması buharlaşma için gerekli enerjinin kumaşa geçişini engellemekte ve istenilen oranda buharlaşmanın önüne geçmektedir.

6.2.3 Modellerin Karşılaştırılması

Yapılan regresyon analiz değerlerine göre;

I.Dereceden Kinetik Model için, R^2 değerlerinin, 0,9945 ile 0,9992 arasında χ^2 değerlerinin, 0,00005 ile 0,00122 arasında RMSE değerlerinin, 0,0045 ile 0,0129 arasında ve r değerlerinin ise 0,9973 ile 0,9998 arasında değiştiği,

Difüzyon Modeli için, R^2 değerlerinin 0,9812 ile 0,9961 arasında χ^2 değerlerinin, 0,00109 ile 0,00646 arasında RMSE değerlerinin, 0,0109 ile 0,0289 arasında ve r değerlerinin ise 0,9905 ile 0,9980 arasında değişmekte olduğu belirlenmiştir.

Buna göre I. dereceden kinetik model ve difüzyon modeli karşılaştırıldığında, I. dereceden kinetik modelin difüzyon modeline göre daha uyumlu olduğu görülmektedir.

6.3 Öneriler

1- İncelenen teorik modeller ile çok geniş bir kullanım alanında, ince gözenekli malzemelerin kurutulması ve modellenmesi üzerine çok çeşitli çalışmalar yapılabilir.

2- Sunulan sonuçlar, gerek akademik araştırmacılara gerekse endüstriyel araştırmacılara, ram makinesinde kurutulan kumaşların kuruma davranışı üzerine açıklayıcı fikirler verecektir.

3- Kumaş gibi yapısı homojen olmayan malzemeleri kurutan kurutucuların kurutma davranışının daha genel bir formda oluşturulabilmesi için farklı fiziksel özelliklere sahip kumaşların kurutumasından elde edilen verilerin de analiz edilmesi, kurutma modellerin genelleştirilmesinde yararlı olacaktır.

4- Kurutma modelleri yardımı ile kurutulacak malzeme davranışlarının önceden bilinmesi, özellikle endüstriyel kuruluşlar gibi enerji tüketiminde en önemli paya sahip sektörlerde, enerji verimini arttırmaya ve optimize etmeye olanak sağlayacaktır.

5- Kurutma davranışı bilinen bir kurutucuda, enerji kayıplarının tespit edilmesi ve daha verimli sistemlerin tasarımı, bu konuda çalışan araştırmacıların işini kolaylaştıracaktır.

KAYNAKLAR

[1] Karakoç, T.H., Karakoç, N., Erbay, B. ve Aras, H., (2012). Enerji Analizi, Anadolu Üniversitesi Yayını, 171, Eskişehir.

[2] Karaaslan, M.A., (2006). Ramöz Atık Havasından Isı Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

[3] Oğulata R.T., Kadem F.D. ve Koç E., (1999). "Tekstilde Kurutma Yöntem ve Makineleri'', 4. Ulusal Tesisat Mühendisliği Dergisi ve Sergisi, 4-7 Kasım 1999, İzmir, 803-813.

[4] Etemoğlu A.B., (2003). Eşzamanlı Isı ve Kütle Transferinin Heterojen Malzemelerde Geçici Rejimde Matematik Modellenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[5] Sherwood T.K., (1931). ''Application of Theoretical Diffusion Equations to the Drying of Solids'', AIChE Journal, 27: 190-202.

[6] Keey R.B., (1980). ''Theoretical Foundations of Drying Technology'', Advances in Drying, 1: 1-22.

[7] Aksoy A. ve Kaplan S., (2011). ''Tekstil Materyallerinde Sıvı Transfer Mekanizmaları ve Ölçüm Yöntemleri'', Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5 (2): 51-67.

[8] Hougen O.A., McCauley H.J. ve Marshall M.R., (1940). ''Limitations of Diffusion Equations in Drying'', Transactions of the American Institute of Chemical Engineers, 36: 183-210.

[9] Luikov A.V., (1964). ''Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies'', Advances in Heat Transfer, 1: 123-184.

[10] Luikov A.V., (1980). Heat and Mass Transfer, First Edition, Mir Publishers, Moscow.

[11] Kısakürek B., (1979). ''Kurutma Modelleri'', Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 2: 37-40.

[12] Tien C.L. ve Vafai K., (1990). ''Convective and Radiative Heat Transfer in Porous Media'', Advances in Applied Mechanics, 27: 225-279.

[13] Whitaker S., (1977). ''Simultaneous Heat Mass and Momentum Transfer in Porous Media. A Theory of Drying'', Advances in Heat Transfer, 13: 119-203.

[14] Mujumdar A.R. ve Dinçer İ., (2000). ''Short Course Notes on Industrial Drying Technology'', Principles and Applications, 2000, İzmir.

[15] Baxi H., Patel A. ve Barve J., (2015). ''Modelling and Simulation of Dryer System'', International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), College of Engineering Pune, 28-30 May 2015, India.

[16] Ghali K., Jones B. ve Tracy J., (1995). ''Modeling Heat and Mass Transfer in Fabrics'', International Journal of Heat and Mass Transfer, 38, (1): 13-21.

[17] Sousa L.H.C.D., Lima O.C.M ve Pereira N.C., (2006). ''Analysis of Drying Kinetics and Moisture Distribution in Convective Textile Fabric Drying'', Drying Technology, 24: 485-497.

[18] Park I.S. ve Baik D.H., (1997). ''Heat and Mass Transfer Analysis of Fabric in the Tenter Frame'', Textile Research Journal, 67 (5): 311-316.

[19] Etemoğlu A.B., Ulcay Y., Can M. ve Avcı A., (2009). ''Mathematical Modelling of Combined Diffusion of Heat and Mass Transfer Through Fabrics'', Fibers and Polymers, 10 (2): 252-259.

[20] Johann G. ve Silva E.A., (2014). ''Motta Lima O.C., Pereira N.C., Mathematical Modeling of a Convective Textile Drying Process'', Brazilian Journal of Chemical Engineering, 31 (4): 959-965.

[21] Prabhu M.R. ve Parajia J.S., (1982). ''Performance Relations and Norms for Textile Contact and Convection Dyer'', Hemisphere Publishing Corporation, 1982, Washington, 233-238.

[22] Labude J. ve Schirmer U., (1992). ''Die Messung Konvektiver Wärmeübergangskoeffizienten an Spann, Trocken, und Fixiermaschinen'', Textil Praxis International, 47 (4): 352-355.

[23] Waltz A. ve Rückert M., (1998). ''Industrial Through-Air Drying of Nonwoven and Paper Basic Principles and Applications'', Drying Technology, 16(6):1027 – 1045.

[24] Ramaswamy S. ve Cui Y., (1999). ''Analyzing Convective Heat and Mass Transfer in Through-Air Drying of Fabrics'', Textile Research Journal, 69: 776 –781.

[25] Kowalski S.J., (2000). ''Toward a Thermodynamics and Mechanics of Drying Processes'', Chemical Engineering Science, 55 (7): 1289 – 1304.

[26] Avcı A., Can M. ve Etemoğlu A.B., (2001). ''A Theoretical Approach to Drying Process of Thin Layers'', Applied Thermal Engineering, 21: 465-479.

[27] Lee H.S., Carr, W.W., Bechham H.W. ve Leisen J., (2002). ''A Model of Through Air Drying of Tufted Textile Materials'', International Journal of Heat and Mass Transfer, 45: 357-366.

[28] Üçgül İ., Akarslan F. ve Elibüyük U., (2014). ‘’Kabin Kurutucu İçerisindeki Dokuma Kumaşların Kuruma Periyotları ve Kuruma Performanslarının Tespiti’’, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 18(3): 30-35.

[29] Sönmez H., (2010). Tekstil Ürünlerinde Zorlanmış Kütle Geçişine Etki Eden Parametrelerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[30] Coşkun S., (1993). Kurutma İşlemlerinde Isı Pompası ile Enerji Tasarrufu Sağlanmasının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[31] Akal D., (2011). İplik Bobinlerinin Kuruma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi ve Kurumanın Modellenmesi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

[32] Kahveci K. ve Cihan A., (2008). Drying of Food Materials: Transport Phenomena, First Edititon, Nova Science, New York.

[33] Tarakçıoğlu I., (1984). Tekstil Terbiye İşletmelerinde Enerji Tüketimi ve Tasarrufu, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa.

[34] Akyol U., (2007). İplik Bobinin Kurutulmasının Teorik İncelenmesi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

[35] Bani A., (2014). Kızılcığın İnfrarred Isısı ile Kurutulmasında Kütle Transfer Katsayılarının ve Vitamin Kayıplarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

[36] Doymaz İ., (1998). Üzüm ve Kahramanmaraş Biberinin Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[37] Tarakçıoğlu, I., (1996). Tekstil Terbiyesi ve Makinaları, Ege Üniversitesi Tekstil Fakültesi Yayınları, İzmir.

[38] Oğulata R.T., Koç E. ve Doba F., (1998). ‘’Tekstilde Kurutma ve Yaygın Kullanılan Kurutma Teknikleri’’, Termodinamik Dergisi, 72: 71-75.

[39] Güngör A. ve Özbalta N., (1997). ‘’Endüstriyel Kurutma Sistemleri’’, III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 20-23 Kasım 1997, İzmir, 737-747.

[40] Tarakçıoğlu I., (1979). Tekstil Terbiyesi ve Makinaları’’, Tekstil Terbiyesinde Temel İşlemler ve Selüloz Liflerinin Terbiyesi, Ege Üniversitesi, Tekstil Fakültesi Yayını, İzmir.

[41] Has Grup Makine Endüstri AŞ., RAM-X Sersi Katoloğu, http://textile.has-group.com/tr/teknik-tekstil/ram-makinesi-ram-x-series, 15 Kasım 2017.

[42] Yakartepe Z. ve Yakartepe M., (1995). Tekstil Terbiye Teknolojisi: Kasardan Apreye, Cilt 4, Tekstil ve Kofeksiyon Araştırma Merkezi Yayınları, İstanbul.

[43] Haghi A.K., (2004). ‘’Transport Phenomena in Porous Media: A Review’’, Theoretical Founations of Chemical Engineering, 40 (1): 14-26.

[44] Çengel Y.A. ve Ghajar A.J, (2015). Isı ve Kütle Transferi Esaslar ve Uygulamalar, 4. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.

[45] Incropera F.P. ve Dewitt D.P., (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fourth Edition, John Wiley and Sons, 886, New York.

[46] Çengel Y.A. ve Boles M.A., (1996). Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Seventh Edition, McGraw- Hill, İstanbul.

[47] Doymaz, İ., (2006).''Thin-Layer Drying Behaviour of Mint Leaves'', Journal of Food Engineering, 74: 370-375.

[48] Ip R.W.L. ve Wan E.I.C., (2012). The New Use of Dİffusion Theories for the Design of Heat Setting Process in Fabric Drying, INTECH, Chapter 7, http://dx.doi.org./10.5772/48484.

[49] Roberts J.S. ve Srikiatden J., (2005). ''Moisture Loss Kinetics of Apple During Convective Hot Air and Isothermal Drying'', International Journal of Food Properties, 8 (3): 493-512.

[50] Devahastin, S., (2000). Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying, Exergex Corporation, 187, Canada.

[51] Dinçer A., (2011). İplik Bobinlerinin Kuruma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi ve Kurumanın Modellenmesi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

[52] Mengeş H. O. ve Ertekin C., (2006). ''Havucun İnce Tabaka Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi'', Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 2(4): 353-362.

[53] Efremov G. ve Kudra T., (2004). ''Calculation of the Effective Diffusion Coefficients by Applying a Quasi-Stationary Equation for Drying Kinetics'', Drying Technology, 22: 2273-2279.

[54] Geankoplis C.j., (2003). Transport Processes and Separation Process Principles, Fourth Edition, Prentice Hall, Çeviren: Yapıcı, S., (2011). Taşıma Süreçleri ve Ayırma Süreci İlkeleri, Güven Kitapevi, İzmir.

[55] Sobukola O.P., Dairo O.U. ve Odunewu A.V., (2008).''Convective Hot Air Drying of Blanched Yam Slices'', International Journal of Food Sicence and Technology, 43: 1233-1238.

[56] Sacilik K. ve Elicin A.K., (2006).''The Thin Layer Drying Characteristics of Organic Apple Slices'', Journal of Food Engineering, 73: 281:289.

[57] Akyol E., (2011). Yün İplik Bobinlerinin Kuruma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

[58] Korkmaz C., (2007). Mısırın Kuruma Davranışının Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Değişik Modellerle Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

[59] Midilli A., (2001). Doğal Vakum Tekniği ile Atık Suların Damıtılmsı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

[60] Holman J.P., (1971). Experimental Methods for Engineers, Eighth Edition, McGrawHill Book Company, New York.

[61] Akpınar E.K., (2002). Tarımsal Ürünler İçin Siklon Tipi Bir Kurutucunun Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[62] Akpınar E.K, (2005). ''Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneylerindeki Hata Analizi'', Mühendis ve Makina, 46:540.

[63] Moffat R.J., (1982). ''Contributions to the Theory of Single Sample Uncertainty Analysis'', Journal of Fluids Engineering, 104: 250-260.

[64] Moffat R.J., (1985). 'Using Uncertainty Analysis in The Planning of an Experiment'', Journal of Fluids Engineering, 107: 173-178.

[65] Moffat R.J., (1988). 'Describing the Uncertainties in Experimental Results'', Experimental Thermal and Fluid Science, 1: 3-17.

[66] Coleman H.W. ve Steele W.G., (1995). ''Engineering Application of Experimental Uncertainty Analysis'', AIAA Journal, 33 (10): 1888-1896.

[67] Hepbaşlı A. ve Akdemir O., (2004). ''Energy and Exegry Analysis of a Ground Source (Geothermal) Heat Pump System'', Energy Conversion and Management, 45: 737-753.

[68] Mengeş H.O. ve Ertekin C., (2007). "Vişne Kurutmada Kurumanın Çeşitli Modellerle Açıklanması", Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 21 (42): 4-10.

EK-A

BOYUTSUZ SAYILAR

Çizelge A.1 Boyutsuz sayılar (0,167 m/s kumaş hızı, 110 ^{O}C KHS)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı Th (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı Ty (K)	Ara yüzey sıcaklığı (Th+Ty)/2 (K)	Ara yüzeyde su buharı yoğunluğu ρ (kg/m³)	Sabit basınçta özgül ısı cp (kJ/kgK)	Isıl yayınım katsayısı α (m²/s) x10⁻⁷	Su buharı - Hava kütle yayınım katsayısı D_{AB} (m²/s) x10⁻⁶	Lewis sayısı Le (α /D_{AB})	Isıl iletim katsayısı k (W/mK) x10⁻³	Dinamik vizkozite μ (kg/ms) x10⁻⁶	Kinematik vizkozite ν (m²/s) x10⁻⁶	Prandtl sayısı Pr	Hava hızı (m/s)	Reynolds sayısı Re	Akış tipi	Nusselt sayısı Nu	Schmidt sayısı Sc	Sherwood sayısı Sh
0,167 - (110 °C)	GİRİŞ	383	308	345,5	1,023	1,011	284,759	33,900	0,840	29,446	20,657	20,189	0,709	21,850	1072380	Türb.	2201,386	0,595	2076,502
	18	383	331	357	0,989	1,013	302,462	36,389	0,831	30,283	21,174	21,414	0,708	21,850	1016264	Türb.	2107,745	0,588	1981,763
	36	383	343	363	0,972	1,014	311,465	37,668	0,827	30,698	21,413	22,021	0,707	21,850	1028966	Türb.	2127,792	0,585	1997,145
	54	383	358	370,5	0,951	1,015	323,656	39,408	0,821	31,252	21,771	22,882	0,707	21,850	1027450	Türb.	2125,283	0,581	1990,291
	72	383	364	373,5	0,944	1,015	328,259	40,071	0,819	31,457	21,904	23,208	0,707	21,850	1044111	Türb.	2152,809	0,579	2014,345
	90	383	369	376	0,939	1,016	331,314	40,516	0,818	31,591	21,990	23,424	0,707	21,850	1065936	Türb.	2188,734	0,578	2046,132
	108	383	373	378	0,934	1,016	334,381	40,964	0,816	31,725	22,045	23,607	0,706	21,850	1090454	Türb.	2228,917	0,572	2076,692
	126	383	375	379	0,931	1,016	335,919	41,189	0,816	31,792	22,088	23,716	0,706	21,850	1078869	Türb.	2208,912	0,576	2063,776
	144	383	375	379	0,931	1,016	335,919	41,189	0,816	31,792	22,088	23,716	0,706	21,850	1078869	Türb.	2208,912	0,576	2063,776
	162	383	376	379,5	0,929	1,016	337,461	41,415	0,815	31,859	22,131	23,825	0,706	21,850	1073941	Türb.	2200,836	0,575	2055,627
	180	383	373	378	0,934	1,016	334,381	40,964	0,816	31,725	22,045	23,607	0,706	21,850	1092319	Türb.	2231,967	0,572	2079,534
	ÇIKIŞ	383	341	362	0,975	1,013	309,956	37,453	0,828	30,629	21,399	21,945	0,708	21,850	1165935	Türb.	2352,623	0,586	2208,805

Çizelge A.2 Boyutsuz sayılar (0,167 m/s kumaş hızı, 130-150 ^{O}C KHS)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı Th (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı Ty (K)	Ara yüzey sıcaklığı (Th+Ty)/2 (K)	Ara yüzeyde su buharı yoğunluğu ρ (kg/m^3)	Sabit basınçta özgül ısı cp (kJ/kgK)	Isıl yayınım katsayısı α (m^2/s) x10^{-7}	Su buharı - Hava kütle yayınım katsayısı D_{AB} (m^2/s) x10^{-6}	Lewis sayısı Le (α /D_{AB})	Isıl iletim katsayısı k (W/mK) x10^{-3}	Dinamik vizkozite μ (kg/ms) x10^{-6}	Kinematik vizkozite ν (m^2/s) x10^{-6}	Prandtl sayısı Pr	Hava hızı (m/s)	Reynolds sayısı Re	Akış tipi	Nusselt sayısı Nu	Schmidt sayısı Sc	Sherwood sayısı Sh
0,167 - (130 °C)	GİRİŞ	403	308	355,5	0,994	1,012	299,488	35,968	0,833	30,144	21,084	21,204	0,708	24,450	1142818	Türb.	2315,232	0,589	2177,485
	18	403	347	375	0,941	1,016	329,785	40,293	0,818	31,524	21,947	23,316	0,707	24,450	1044451	Türb.	2153,370	0,579	2014,269
	36	403	357	380	0,929	1,016	337,461	41,415	0,815	31,859	22,131	23,825	0,706	24,450	1064216	Türb.	2184,877	0,575	2040,721
	54	403	383	393	0,898	1,018	357,789	44,404	0,806	32,730	22,688	25,260	0,706	24,450	1041500	Türb.	2147,488	0,569	1998,322
	72	403	391	397	0,889	1,019	364,151	45,346	0,803	32,998	22,859	25,709	0,706	24,450	1054688	Türb.	2169,214	0,567	2016,282
	90	403	395	399	0,885	1,019	367,351	45,820	0,802	33,132	22,944	25,935	0,706	24,450	1082268	Türb.	2214,476	0,566	2057,212
	108	403	395	399	0,885	1,019	367,351	45,820	0,802	33,132	22,944	25,935	0,706	24,450	1102065	Türb.	2246,825	0,566	2087,263
	126	403	396	399,5	0,882	1,020	368,956	46,059	0,801	33,199	22,987	26,048	0,706	24,450	1099150	Türb.	2242,068	0,566	2082,269
	144	403	397	400	0,880	1,020	370,564	46,297	0,800	33,266	23,029	26,162	0,706	24,450	1094381	Türb.	2234,282	0,565	2074,467
	162	403	398	400,5	0,878	1,020	372,174	46,537	0,800	33,333	23,072	26,276	0,706	24,450	1089644	Türb.	2226,542	0,565	2066,714
	180	403	392	397,5	0,887	1,019	365,750	45,583	0,802	33,065	22,902	25,822	0,706	24,450	1108785	Türb.	2257,777	0,566	2098,018
	ÇIKIŞ	403	366	384,5	0,917	1,017	345,216	42,552	0,811	32,194	22,346	24,372	0,706	24,450	1174735	Türb.	2364,587	0,573	2205,364
0,167- (150 °C)	GİRİŞ	423	308	365,5	0,964	1,014	316,012	38,315	0,825	30,906	21,548	22,342	0,707	33,400	1488960	Türb.	2859,661	0,583	2681,787
	18	423	347	385	0,917	1,017	345,216	42,552	0,811	32,194	22,346	24,372	0,706	33,400	1364929	Türb.	2666,192	0,573	2486,659
	36	423	355	389	0,907	1,018	351,477	43,473	0,809	32,462	22,517	24,814	0,706	33,400	1395800	Türb.	2714,325	0,571	2528,649
	54	423	385	404	0,874	1,020	375,406	47,018	0,798	33,467	23,124	26,466	0,705	33,400	1357903	Türb.	2653,952	0,563	2462,099
	72	423	393	408	0,865	1,021	381,906	47,988	0,796	33,735	23,294	26,924	0,705	33,400	1375729	Türb.	2681,787	0,561	2485,230
	90	423	405	414	0,853	1,022	391,749	49,461	0,792	34,137	23,548	27,618	0,705	33,400	1388326	Türb.	2701,414	0,558	2499,415
	108	423	412	417,5	0,846	1,023	396,713	50,207	0,790	34,338	23,675	27,968	0,705	33,400	1390214	Türb.	2704,354	0,557	2499,504
	126	423	415	419	0,842	1,023	400,037	50,707	0,789	34,472	23,759	28,203	0,705	33,400	1386801	Türb.	2699,040	0,556	2493,942
	144	423	416	419,5	0,840	1,023	401,704	50,958	0,788	34,539	23,802	28,320	0,705	33,400	1381046	Türb.	2690,076	0,556	2485,013
	162	423	417	420	0,838	1,023	403,374	51,210	0,788	34,606	23,844	28,438	0,705	33,400	1375328	Türb.	2681,163	0,555	2476,136
	180	423	415	419	0,842	1,023	400,037	50,707	0,789	34,472	23,759	28,203	0,705	33,400	1386801	Türb.	2699,040	0,556	2493,942
	ÇIKIŞ	423	384	403,5	0,874	1,020	375,406	47,018	0,798	33,467	23,124	26,466	0,705	33,400	1477792	Türb.	2839,807	0,563	2634,518

Çizelge A.3 Boyutsuz sayılar (0,333 m/s kumaş hızı, 110 ^{O}C KHS)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı Th (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı Ty (K)	Ara yüzey sıcaklığı (Th+Ty)/2 (K)	Ara yüzeyde su buharı yoğunluğu ρ (kg/m^3)	Sabit basınçta özgül ısı cp (kJ/kgK)	Isıl yayınım katsayısı α (m^2/s) x10^{-7}	Su buharı - Hava kütle yayınım katsayısı D_{AB} (m^2/s) x10^{-6}	Lewis sayısı Le (α /D_{AB})	Isıl iletim katsayısı k (W/mK) x10^{-3}	Dinamik vizkozite μ (kg/ms) x10^{-6}	Kinematik vizkozite ν (m^2/s) x10^{-6}	Prandtl sayısı Pr	Hava hızı (m/s)	Reynolds sayısı Re	Akış tipi	Nusselt sayısı Nu	Schmidt sayısı Sc	Sherwood sayısı Sh
0,333 - (110 °c)	GİRİŞ	383	308	345,5	1,023	1,011	284,759	33,900	0,840	29,446	20,657	20,189	0,709	21,850	1072380	Türb.	2201,386	0,595	2076,502
	9	383	331	357	0,989	1,013	302,462	36,389	0,831	30,283	21,174	21,414	0,708	21,850	1016264	Türb.	2107,745	0,588	1981,763
	18	383	340	361,5	0,978	1,013	308,451	37,239	0,828	30,560	21,354	21,838	0,708	21,850	1032515	Türb.	2134,666	0,586	2004,171
	27	383	344	363,5	0,970	1,014	312,977	37,883	0,826	30,767	21,458	22,128	0,707	21,850	1062506	Türb.	2183,098	0,584	2048,470
	36	383	350	366,5	0,962	1,014	317,534	38,533	0,824	30,975	21,592	22,450	0,707	21,850	1079377	Türb.	2210,787	0,583	2072,687
	45	383	357	370	0,954	1,015	322,121	39,188	0,822	31,182	21,727	22,774	0,707	21,850	1101427	Türb.	2246,843	0,581	2104,716
	54	383	359	371	0,951	1,015	323,656	39,408	0,821	31,252	21,771	22,882	0,707	21,850	1116254	Türb.	2271,007	0,581	2126,759
	63	383	371	377	0,936	1,016	332,846	40,740	0,817	31,658	22,033	23,532	0,707	21,850	1087292	Türb.	2223,745	0,578	2078,862
	72	383	375	379	0,931	1,016	335,919	41,189	0,816	31,792	22,088	23,716	0,706	21,850	1078869	Türb.	2208,912	0,576	2063,776
	81	383	376	379,5	0,929	1,016	337,461	41,415	0,815	31,859	22,131	23,825	0,706	21,850	1073941	Türb.	2200,836	0,575	2055,627
	90	383	375	379	0,926	1,016	339,005	41,641	0,814	31,926	22,174	23,934	0,706	21,850	1078869	Türb.	2208,912	0,576	2063,776
	ÇIKIŞ	383	358	370,5	0,954	1,015	322,121	39,188	0,822	31,182	21,727	22,774	0,707	21,850	1118164	Türb.	2274,115	0,581	2129,669

Çizelge A.4 Boyutsuz sayılar (0,333 m/s kumaş hızı, 130-150 ^{O}C KHS)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı Th (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı Ty (K)	Ara yüzey sıcaklığı (Th+Ty)/2 (K)	Ara yüzeyde su buharı yoğunluğu ρ (kg/m^3)	Sabit basınçta özgül ısı cp (kJ/kgK)	Isıl yayınım katsayısı α (m^2/s) x10^{-7}	Su buharı - Hava kütle yayınım katsayısı D_{AB} (m^2/s) x10^{-6}	Lewis sayısı Le (α /D_{AB})	Isıl iletim katsayısı k (W/mK) x10^{-3}	Dinamik vizkozite μ (kg/ms) x10^{-6}	Kinematik vizkozite ν (m^2/s) x10^{-6}	Prandtl sayısı Pr	Hava hızı (m/s)	Reynolds sayısı Re	Akış tipi	Nusselt sayısı Nu	Schmidt sayısı Sc	Sherwood sayısı Sh
0,333 - (130 °C)	GİRİŞ	403	308	355,5	0,992	1,012	300,973	36,178	0,832	30,214	21,129	21,309	0,708	24,450	1142818	Türb.	2315,232	0,589	2177,485
	9	403	340	371,5	0,949	1,015	325,195	39,628	0,821	31,321	21,816	22,991	0,707	24,450	1059193	Türb.	2177,652	0,580	2038,766
	18	403	351	377	0,936	1,016	332,846	40,740	0,817	31,658	22,033	23,532	0,707	24,450	1077445	Türb.	2207,621	0,578	2063,788
	27	403	355	379	0,931	1,016	335,919	41,189	0,816	31,792	22,088	23,716	0,706	24,450	1109307	Türb.	2258,627	0,576	2110,225
	36	403	369	386	0,914	1,017	346,777	42,781	0,811	32,261	22,389	24,482	0,706	24,450	1107531	Türb.	2255,735	0,572	2103,235
	45	403	380	391,5	0,900	1,018	356,206	44,170	0,806	32,663	22,645	25,148	0,706	24,450	1116129	Türb.	2269,733	0,569	2112,671
	54	403	384	393,5	0,896	1,019	359,375	44,639	0,805	32,797	22,731	25,372	0,706	24,450	1126525	Türb.	2286,631	0,568	2127,202
	63	403	389	396	0,891	1,019	362,556	45,109	0,804	32,931	22,816	25,596	0,706	24,450	1118552	Türb.	2273,674	0,567	2113,965
	72	403	393	398	0,887	1,019	365,750	45,583	0,802	33,065	22,902	25,822	0,706	24,450	1108785	Türb.	2257,777	0,566	2098,018
	81	403	397	400	0,882	1,020	368,956	46,059	0,801	33,199	22,987	26,048	0,706	24,450	1099150	Türb.	2242,068	0,566	2082,269
	90	403	392	397,5	0,887	1,019	365,750	45,583	0,802	33,065	22,902	25,822	0,706	24,450	1113652	Türb.	2265,702	0,567	2105,967
	ÇIKIŞ	403	373	388	0,910	1,018	349,907	43,242	0,809	32,395	22,474	24,703	0,706	24,450	1158986	Türb.	2339,192	0,571	2179,799
0,333- (150 °C)	GİRİŞ	423	308	365,5	0,964	1,014	316,012	38,315	0,825	30,906	21,548	22,342	0,707	33,400	1488960	Türb.	2859,661	0,583	2681,787
	9	423	346	384,5	0,917	1,017	345,216	42,552	0,811	32,194	22,346	24,372	0,706	33,400	1364929	Türb.	2666,192	0,573	2486,659
	18	423	352	387,5	0,910	1,018	349,907	43,242	0,809	32,395	22,474	24,703	0,706	33,400	1402063	Türb.	2724,064	0,571	2538,447
	27	423	357	390	0,905	1,018	353,050	43,705	0,808	32,529	22,560	24,925	0,706	33,400	1441840	Türb.	2785,717	0,570	2594,419
	36	423	366	394,5	0,894	1,019	360,964	44,874	0,804	32,864	22,774	25,484	0,706	33,400	1453482	Türb.	2803,696	0,568	2607,486
	45	423	398	410,5	0,859	1,022	386,813	48,722	0,794	33,936	23,421	27,270	0,705	33,400	1406041	Türb.	2728,955	0,560	2526,909
	54	423	406	414,5	0,851	1,022	393,400	49,709	0,791	34,204	23,590	27,735	0,705	33,400	1407787	Türb.	2731,667	0,558	2526,738
	63	423	411	417	0,846	1,023	396,713	50,207	0,790	34,338	23,675	27,968	0,705	33,400	1398422	Türb.	2717,120	0,557	2511,961
	72	423	414	418,5	0,842	1,023	400,037	50,707	0,789	34,472	23,759	28,203	0,705	33,400	1386801	Türb.	2699,040	0,556	2493,942
	81	423	415	419	0,840	1,023	401,704	50,958	0,788	34,539	23,802	28,320	0,705	33,400	1381046	Türb.	2690,076	0,556	2485,013
	90	423	408	415,5	0,849	1,022	395,055	49,958	0,791	34,271	23,633	27,851	0,705	33,400	1404290	Türb.	2726,237	0,557	2521,051
	ÇIKIŞ	423	386	404,5	0,872	1,020	377,026	47,259	0,798	33,534	23,167	26,580	0,705	33,400	1471441	Türb.	2830,039	0,562	2624,743

Çizelge A.5 Boyutsuz sayılar (0,500 m/s kumaş hızı, 110 ^{O}C KHS)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı Th (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı Ty (K)	Ara yüzey sıcaklığı (Th+Ty)/2 (K)	Ara yüzeyde su buharı yoğunluğu ρ (kg/m³)	Sabit basınçta özgül ısı cp (kJ/kgK)	Isıl yayınım katsayısı α (m²/s) x10⁻⁷	Su buharı - Hava kütle yayınım katsayısı D_{AB} (m²/s) x10⁻⁶	Lewis sayısı Le (α /D_{AB})	Isıl iletim katsayısı k (W/mK) x10⁻³	Dinamik vizkozite μ (kg/ms) x10⁻⁶	Kinematik vizkozite ν (m²/s) x10⁻⁶	Prandtl sayısı Pr	Hava hızı (m/s)	Reynolds sayısı Re	Akış tipi	Nusselt sayısı Nu	Schmidt sayısı Sc	Sherwood sayısı Sh
0,500 - (110 °C)	GİRİŞ	383	308	345,5	1,020	1,011	286,230	34,104	0,839	29,518	20,704	20,294	0,709	21,850	1072380	Türb.	2201,386	0,595	2076,502
	6	383	329	356	0,992	1,012	300,973	36,178	0,832	30,214	21,129	21,309	0,708	21,850	1021291	Türb.	2116,082	0,589	1990,184
	12	383	338	360,5	0,978	1,013	308,451	37,239	0,828	30,560	21,354	21,838	0,708	21,850	1037555	Türb.	2142,997	0,586	2012,572
	18	383	341	362	0,975	1,013	309,956	37,453	0,828	30,629	21,399	21,945	0,708	21,850	1071346	Türb.	2198,653	0,586	2064,247
	24	383	345	364	0,970	1,014	312,977	37,883	0,826	30,767	21,458	22,128	0,707	21,850	1062506	Türb.	2183,098	0,584	2048,470
	30	383	354	368,5	0,957	1,015	320,588	38,969	0,823	31,113	21,682	22,666	0,707	21,850	1106690	Türb.	2255,429	0,582	2113,351
	36	383	359	371	0,951	1,015	323,656	39,408	0,821	31,252	21,771	22,882	0,707	21,850	1116254	Türb.	2271,007	0,581	2126,759
	42	383	369	376	0,939	1,016	331,314	40,516	0,818	31,591	21,990	23,424	0,707	21,850	1087292	Türb.	2223,745	0,578	2078,862
	48	383	375	379	0,931	1,016	335,919	41,189	0,816	31,792	22,088	23,716	0,706	21,850	1078869	Türb.	2208,912	0,576	2063,776
	54	383	376	379,5	0,929	1,016	337,461	41,415	0,815	31,859	22,131	23,825	0,706	21,850	1073941	Türb.	2200,836	0,575	2055,627
	60	383	367	375	0,941	1,016	329,785	40,293	0,818	31,524	21,947	23,316	0,707	21,850	1097383	Türb.	2240,241	0,579	2095,528
	ÇIKIŞ	383	362	372,5	0,946	1,015	326,737	39,849	0,820	31,390	21,861	23,100	0,707	21,850	1107620	Türb.	2256,945	0,580	2112,416

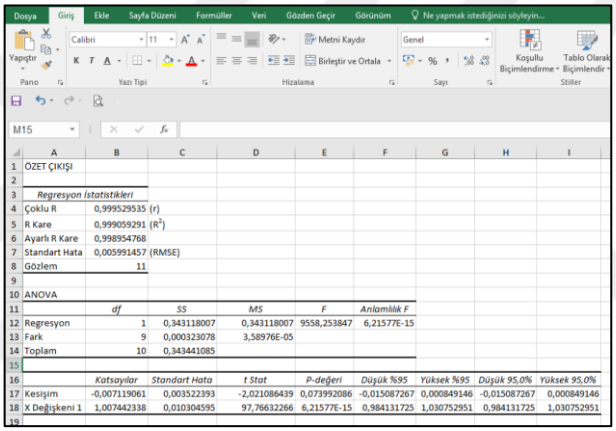
Çizelge A.6 Boyutsuz sayılar (0,500 m/s kumaş hızı, 130-150 ^{O}C KHS)

Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı Th (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı Ty (K)	Ara yüzey sıcaklığı (Th+Ty)/2 (K)	Ara yüzeyde su buharı yoğunluğu ρ (kg/m³)	Sabit basınçta özgül ısı cp (kJ/kgK)	Isıl yayınım katsayısı α (m²/s) x10⁻⁷	Su buharı - Hava kütle yayınım katsayısı D_{AB} (m²/s) x10⁻⁶	Lewis sayısı Le (α /D_{AB})	Isıl iletim katsayısı k (W/mK) x10⁻³	Dinamik vizkozite μ (kg/ms) x10⁻⁶	Kinematik vizkozite ν (m²/s) x10⁻⁶	Prandtl sayısı Pr	Hava hızı (m/s)	Reynolds sayısı Re	Akış tipi	Nusselt sayısı Nu	Schmidt sayısı Sc	Sherwood sayısı Sh
0,500 - (130 °C)	GİRİŞ	403	308	355,5	0,992	1,012	300,973	36,178	0,832	30,214	21,129	21,309	0,708	24,450	1142818	Türb.	2315,232	0,589	2177,485
	6	403	337	370	0,954	1,015	322,121	39,188	0,822	31,182	21,727	22,774	0,707	24,450	1069302	Türb.	2194,262	0,581	2055,462
	12	403	345	374	0,944	1,015	328,259	40,071	0,819	31,457	21,904	23,208	0,707	24,450	1092500	Türb.	2232,262	0,579	2088,688
	18	403	350	376,5	0,936	1,016	332,846	40,740	0,817	31,658	22,033	23,532	0,707	24,450	1117967	Türb.	2273,795	0,578	2125,651
	24	403	361	382	0,924	1,017	340,553	41,867	0,813	31,993	22,217	24,043	0,706	24,450	1127770	Türb.	2288,652	0,574	2136,400
	30	403	370	386,5	0,912	1,017	348,340	43,011	0,810	32,328	22,431	24,593	0,706	24,450	1141333	Türb.	2310,644	0,572	2153,814
	36	403	378	390,5	0,903	1,018	354,627	43,937	0,807	32,596	22,603	25,037	0,706	24,450	1141608	Türb.	2311,090	0,570	2151,775
	42	403	386	394,5	0,894	1,019	360,964	44,874	0,804	32,864	22,774	25,484	0,706	24,450	1123485	Türb.	2281,693	0,568	2122,014
	48	403	391	397	0,889	1,019	364,151	45,346	0,803	32,998	22,859	25,709	0,706	24,450	1113652	Türb.	2265,702	0,567	2105,967
	54	403	396	399,5	0,882	1,020	368,956	46,059	0,801	33,199	22,987	26,048	0,706	24,450	1099150	Türb.	2242,068	0,566	2082,269
	60	403	388	395,5	0,882	1,020	368,956	46,059	0,801	33,199	22,987	26,048	0,706	24,450	1118552	Türb.	2273,674	0,567	2113,965
	ÇIKIŞ	403	385	394	0,896	1,019	359,375	44,639	0,805	32,797	22,731	25,372	0,706	24,450	1128453	Türb.	2289,760	0,568	2130,113
0,500- (150 °C)	GİRİŞ	423	308	365,5	0,964	1,014	316,012	38,315	0,825	30,906	21,548	22,342	0,707	33,400	1488960	Türb.	2859,661	0,583	2681,787
	6	423	345	384	0,919	1,017	343,659	42,323	0,812	32,127	22,303	24,262	0,706	33,400	1371115	Türb.	2675,854	0,573	2496,392
	12	423	349	386	0,914	1,017	346,777	42,781	0,811	32,261	22,389	24,482	0,706	33,400	1414721	Türb.	2743,721	0,572	2558,230
	18	423	353	388	0,910	1,018	349,907	43,242	0,809	32,395	22,474	24,703	0,706	33,400	1454793	Türb.	2805,719	0,571	2614,537
	24	423	360	391,5	0,900	1,018	356,206	44,170	0,806	32,663	22,645	25,148	0,706	33,400	1472894	Türb.	2833,613	0,569	2637,532
	30	423	376	399,5	0,882	1,020	368,956	46,059	0,801	33,199	22,987	26,048	0,706	33,400	1472005	Türb.	2832,245	0,566	2630,383
	36	423	391	407	0,867	1,021	380,276	47,744	0,796	33,668	23,252	26,809	0,705	33,400	1456374	Türb.	2806,832	0,562	2601,811
	42	423	401	412	0,857	1,022	388,455	48,968	0,793	34,003	23,463	27,386	0,705	33,400	1428148	Türb.	2763,227	0,559	2557,962
	48	423	413	418	0,844	1,023	398,373	50,457	0,790	34,405	23,717	28,085	0,705	33,400	1392593	Türb.	2708,054	0,557	2502,925
	54	423	414	418,5	0,842	1,023	400,037	50,707	0,789	34,472	23,759	28,203	0,705	33,400	1386801	Türb.	2699,040	0,556	2493,942
	60	423	405	414	0,853	1,022	391,749	49,461	0,792	34,137	23,548	27,618	0,705	33,400	1416141	Türb.	2744,626	0,558	2539,396
	ÇIKIŞ	423	393	408	0,865	1,021	381,906	47,988	0,796	33,735	23,294	26,924	0,705	33,400	1452641	Türb.	2801,074	0,561	2595,774

EK-B

KULLANILAN PROGRAMLAR

B-1 Regresyon Analiz Programı



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ÖZET ÇIKIŞI								
2									
3	*Regresyon İstatistikleri*								
4	Çoklu R	0,999529535 (r)							
5	R Kare	0,999059291 (R^2)							
6	Ayarlı R Kare	0,998954768							
7	Standart Hata	0,005991457 (RMSE)							
8	Gözlem	11							
9									
10	ANOVA								
11		*df*	*SS*	*MS*	*F*	*Anlamlılık F*			
12	Regresyon	1	0,343118007	0,343118007	9558,253847	6,21577E-15			
13	Fark	9	0,000323078	3,58976E-05					
14	Toplam	10	0,343441085						
15									
16		*Katsayılar*	*Standart Hata*	*t Stat*	*P-değeri*	*Düşük %95*	*Yüksek %95*	*Düşük 95,0%*	*Yüksek 95,0%*
17	Kesişim	-0,007119061	0,003522393	-2,021086439	0,073992086	-0,015087267	0,000849146	-0,015087267	0,000849146
18	X Değişkeni 1	1,007442338	0,010304595	97,76632266	6,21577E-15	0,984131725	1,030752951	0,984131725	1,030752951
19									

Şekil B.1 Regresyon analizi (Microsoft Excel Sayfası)

B-2 Su ve Buhar Özelikleri Hesaplama Programı

Calc Steam, http://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html.

Property	Value	Unit
medium :	overheated steam	
pressure :	1	[bar]
temperature :	110	[Celsius]
density :	0.57312522778064	[kg / m^3]
dynamic viscosity :	1.2644379772378E-5	[Pa s]
kinematic viscosity :	22.062158773471	[10^{-6} m^2 / s]
specific inner energy :	2521.8393753991	[kJ / kg]
specific enthalpy :	2696.3213125967	[kJ / kg]
specific entropy :	7.4153583041662	[kJ / kg K]
specific isobar heat capacity : cp	2.0399207134203	[kJ / kg K]
specific isochor heat capacity : cv	1.5280897745514	[kJ / kg K]
isentropic exponent : kappa	1.3165	

Şekil B.2 Su buharı özelikleri hesaplayıcı

B-3 Hava Özelikleri Hesaplama Programı

Peace Software, www.peacesfotware.de/einigewerte/luft_e.html.

Property	Value	Unit
Medium :	**Air**	
Pressure :	1	[bar]
Temperature :	110	[Celsius]
Density :	0.91084	[kg / m^3]
Specific Enthalpy :	384.36	[kJ / kg]
Specific Entropy :	7.1176	[kJ / kg K]
Specific isobar heat capacity : cp	1.0132	[kJ / kg K]
Isobar coefficient of thermal expansion :	2.6194	[10^{-3} (1 / K)]
Heat conductance	32.06	[10^{-3} (W / m * K)]
Dynamic viscosity :	22.366	[10^{-6} (Pa s)]
Kinematic viscosity :	24.555355496026	[10^{-6} m^2 / s]
Thermal diffusivity :	349.06	[10^{-7} m^2 / s]
Prandtl-Number :	0.70662	

Şekil B.3 Havanın özelik hesaplayıcı

B-4 Su Buharı Kısmi Basınç Hesaplama Programı

ENDMEMO, http://www.endmemo.com/chem/vaporpressurewater.php.

Vapor Pressure of Water Calculator

Water Temperature : 110 Celsius

Calculate Reset

Vapor Pressure : 143.3766 KPa

Vapor Pressure of Water calculator Formula:

$P = 10^{A-B/(C+T)}$

Where:

P: Vapor Pressure of Water

T: Water Temperature, in Celsius

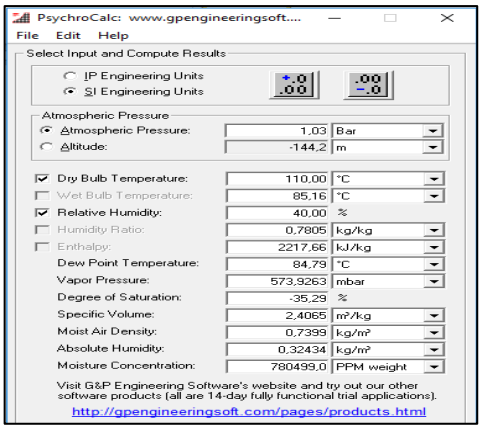
A,B,C: Antoine Constants for Water. When water temperature in the range of 1 - 100 Celsius A=8.07131, B=1730.63, C= 233.426; when the temperature in the range of 99 - 374 degree Celsius, A=8.14019, B=1810.94 and C=244.485.

Şekil B.4 Su buharı kısmi basınç hesaplayıcı

B-5 Psikrometrik Hesaplayıcı

G&P engineering,

http://gpengineeringsoft.com/pages/psychrometric_table_humid_air.html



Şekil B.5 Psikrometrik özelik hesaplayıcı

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet Erhan AKAN

Doğum Tarihi ve Yeri : 12.06.1980 / İstanbul

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : aeakan@nku.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	Makine Müh.	Namık Kemal Üniv	2012
Lisans	Makine Müh.	Süleyman Demirel Üniv.	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2010-	Namık Kemal Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2009-2010	Mardin Artuklu Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2004-2009	Sönmez Mühendislik	Mühendis

YAYINLARI

Makale

[1] Akan, A.E. ve Özkan, D.B., (2018). ''Determination of Heat and Mass Transfer Coefficients During Drying by Using High Velocity Multiplier Air Jets'', International Journal of Scientific and Technological Research, 4(2): 35-45.

[2] Akan, A.E. ve Özkan, D.B., (2018). ''Determination of drying behaviour in industrial type convectional dryer and mathematical modelling'', Thermal Science, https://doi.org/10.2298/tsci180315244a.

[3] Akan, A.P. ve Akan, A.E., (2018). ''Potential of reduction in carbon dioxide equivalent emissions via energy efficiency for a textile factory'', Journal of Energy Systems, 2(2): 57-69.

[4] Ünal, F. ve Akan, A.E, (2017). ''Thermodynamic Analysis of Heating with Solar Assisted Vertical Type Ground Source Heat Pump: Mardin Case Study'', International Journal of Scientific and Technological Research, 3(2): 1-8.

[5] Akan, A.E. ve Özkan, D.B., (2019) ''Ram makinesinde kurutma prosesinin enerji verimliliği analizi'', Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, ''(baskıda)''.

[6] Akyol, U., Akan, A.E. ve Durak, A., (2014). ''Simulation and thermodynamic analysis of a hot-air textile drying process'', The Journal of The Textile Institute, 106: 260-274.

[7] Işık, N.O. ve Akan, A.E., (2018). '' Bir Kürk – Süet Üretim Fabrikasının Spesifik Enerji Tüketim Yöntemi İle Enerji Tasarruf Potansiyelinin Araştırılması, European Journal of Science and Technology, 11: 22-26.

Bildiri

[1] Akan, A.E. ve ÖZKAN, D.B, (2018). ''Endüstriyel Tip Konveksiyonel Kurutucuda Kurutma Prosesinin Enerji Verimliliği Analizi'', 4. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, AES2018, 18-20 Nisan 2018, Edirne.

[2] Ünal F, Akan, A.E. ve Temir, G., (2017). ''Thermoeconomic Analysis of Vertical Ground Source Heat Pump for Cooling Season'', IMESET'17, 27-29 Ekim 2017, Bitlis.

[3] Akan, A.E., Özkan, D.B. ve Ünal, F., (2015). ''Kızgın Yağ Isıtmalı Konveksiyon Kurutucunun Enerji ve Ekserji Analizi'', 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi 2-5 Eylül 2015, Balıkesir.

[4] Ünal, F., Özkan, D.B. ve Akan, A.E., (2015). ''Tunçbilek Termik Santralinin İkinci Yasa Analizi ile Verimliliğinin Araştırılması'', 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi 2-5 Eylül 2015, Balıkesir.

[5] Akan A.E. ve Akyol U., (2013). ''Exergy Analysis of a Hot Air Drying Process'', 5th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering, 17-19 Mayıs 2013, Ruse.

[6] Akyol, U., Cihan, A. ve Akan, A.E., (2013). ''Effect of Drying Conditions on a Bobbin Drying Process'', 5th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering, 17-19 Mayıs 2013, Ruse.

[7] Akan A.E. ve Akyol, U., (2013). ''Polyester İplik Kurutma İşleminin Enerji ve Ekserji Analizi'', 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 9-11 Eylül 2013, Samsun.

[8] Ünal, F., Ayanoğlu, A., İlgin Beyazıt, N. ve Akan A.E., (2018). ''An Economic Analysis Of A Single Effect Natural Gas Driven Absorption Heat Pump System'', 2nd International Congress On Vocational And Technical Sciences, 10-13 Mayıs 2018, Batum.

[9] Ünal, F., Zan, H., İlgin Beyazıt, N. ve Akan, A.E., (2018). ''Mardin İlinde Bulunan Güneş Enerjisi Destekli Jeotermal Isı Pompasının Yapay Sinir Ağı ile Performans Tahmini'', GAPYENEV, 10-12 Mayıs 2018, Şanlıurfa.

[10] Ünal, F., Ayanoğlu, A., İlgin Beyazıt, N. ve Akan A.E., (2018). ''Thermodynamic Analysis of A Single Effect Natural Gas Driven Absorption Heat Pump System for Heating Season, 2nd International Congress On Vocational And Technical Sciences, 10-13 Mayıs 2018, Batum.