

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İPLİK BOBİNİNİN KURUTULMASININ TEORİK İNCELENMESİ

Uğur AKYOL

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
TEZ DANIŞMANI: Prof. Dr. Ahmet CİHAN

2007
EDİRNE

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İPLİK BOBİNİNİN KURUTULMASININ TEORİK İNCELENMESİ

Uğur AKYOL

DOKTORA TEZİ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bu tez 15/03/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet CİHAN
Danışman

Prof. Dr. Ş. Erol OKAN

Doç. Dr. Rafayel SHALİYEV

Yrd. Doç. Dr. Kamil KAHVECİ

Yrd. Doç. Dr. Güler GAYGUSUZOĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

İplik Bobininin Kurutulmasının Teorik İncelenmesi

T.C.

Trakya Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Kurutma işlemi, tekstil endüstrisinde çoğu boyama ve/veya terbiye işlemlerinden sonra yüksek miktarda enerji gerektiren, pahalı ve zaman alıcı bir prosestir. Minimum enerji tüketimi ile malzemelerin kalitesini ve yapısını bozmadan, kuruma süresini en aza indirecek şekilde kuruma proseslerinin tasarlanması ve bu doğrultuda kurutma metotlarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Tekstil malzemelerinin kurutulması işleminde, ısı ve kütle transferi için oluşturulan modeller bu tip endüstriyel proseslerin optimizasyonu için oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, boyanmış iplik bobinlerinin sıcak hava ile kurutulması işlemine ait teorik bir çalışma yapılmıştır. İplik bobininin kurutulması prosesi için ortaya konulan matematiksel modele ait problemin çözümüne geçmeden önce, çözüm hassaslığına tesir edebilecek bazı faktörleri incelemek amacıyla bir invers ısı transferi problemi çözülmüştür. Daha sonra kurutulan yün iplik bobini için literatürden alınan deneysel sonuçlar kullanılarak, sonlu farklar şemasının kullanıldığı doğrudan yöntemle invers (ters) ısı transferi problemi çözülmüş, böylece iplik bobininin termofiziksel özellikleri belirlenmiştir. İnvers problemin çözümü sonucu belirlenen termofiziksel özelliklerin doğruluğu ise elde edilen model sıcaklıkları ile kontrol edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, İplik Bobini, Yün, İnvers Metot, Sonlu Farklar, Termofiziksel Özellikler.

ABSTRACT

Doctor of Philosophy Dissertation

Theoretical investigation for drying of yarn bobbins

Trakya University

Institute of Natural and Applied Sciences

Mechanical Engineering Main Science Department

Drying is a time consuming, energy intensive and expensive process required after most dyeing or/and finishing process in textile industry. It is important to develop drying methods for designing the drying process to preserve the quality of the products and shorten the drying time with minimum energy consumption. Accurate models developed for heat and mass transfer in drying process of textile materials are important for optimizing the industrial processes.

In this study, a theoretical study was performed to investigate drying of dyed textile bobbins. Before solving the problem for model of the drying process, an inverse heat transfer problem was solved to examine the influence of some factors which can effect the solution sensitivity. Then, in order to determine thermophysical properties for a hot air drying of a wool yarn bobbin, an inverse heat transfer problem was solved by using experimental temperature data taken from literature. For this aim the direct method with the finite difference scheme were used. For the verification of thermophysical properties, model temperatures were used.

Keywords: Drying, Textile bobbin, Wool, Inverse method, Finite difference, Thermophysical properties.

ÖNSÖZ

Tekstil sanayi ürünleri ülkemizin ihraç malları arasında önemli bir yere sahiptir. Tekstil sanayinin en önemli elemanları ve giderlerinden biri tekstil makineleridir. Ülkemizde üretilen tekstil makinelerinin bir kısmı, atölye düzeyinde ve patentsiz olarak yapılmaktadır. Bu üretilen makinelerin patentleri olmadığı için bu makineler yurtdışına satılamamaktadır. Yurt içi satışları da zor şartlar altında, sorunlu olarak yapılmaktadır. Rekabet ortamlarının kızıştığı, patent ve standartların her geçen gün artırıldığı dünyamızda durumun bu şekilde sürdürülemeyeceği çok açıktır. Bu nedenle bu konuyla ilgili hem teorik hem de üretime yönelik çalışmaların ülkemizde yapılarak, kendimize ait teknolojinin oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmanın, bu teknolojilerin geliştirilmesinde bir alt çalışma oluşturduğunu düşünüyorum. Umarım bu çalışmaların devamı, tekstil kurutma prosesine yenilikler getirir.

Doktora tezi danışmanlığımı üstlenerek gerek konu seçimi, gerekse çalışmalarımın yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet CİHAN'a, değerli katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Rafayel SHALİYEV'e, Yrd. Doç. Dr. Kamil KAHVECİ'ye ve Yrd. Doç. Dr. Güler AKGÜN'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SEMBOLLER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
TABLO LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURUTMA.....	3
2.1. Nem Oranı.....	3
2.2. Kuruma Süreci.....	4
2.2.1. Sabit hızda kuruma süreci.....	7
2.2.2. Azalan hızda kuruma süreci.....	8
2.2.2.1. Kapiler sıvı hareketi.....	8
2.2.2.2. Sıvı difüzyon hareketi.....	11
2.2.2.3. Buhar difüzyonu.....	12
2.3. Higroskopiklik.....	19
2.4. Sorpsiyon İzotermi.....	19
2.5. Gözenekli Malzemelerin Kuruma Davranışı.....	20
2.5.1. Higroskopik olmayan gözenekli malzemelerin kurutulması.....	20
2.5.2. Higroskopik tutum gösteren gözenekli malzemelerin kurutulması...	22

3. İPLİĞİN KURUTULMASI.....	25
3.1. Tekstil Lifleri.....	25
3.1.1. Tekstil liflerinin temel özellikleri.....	26
3.1.2. Tekstil sanayinde kullanılan lifler.....	26
3.1.2.1. Doğal lifler.....	27
3.1.2.2. Yapay lifler.....	28
3.2. İplik ve iplikte aranan özellikler.....	29
3.3. İplikte bulunan nemin durumu.....	30
3.4. Nemin iplik içerisindeki hareketi.....	31
4. İPLİK BOBİNİ KURUTMA YÖNTEMLERİ.....	33
4.1. Sıcak Hava ile Kurutma.....	33
4.2. Yüksek Frekanslı Kurutma.....	37
5. İPLİK BOBİNİNİN KURUTULMASINA TEORİK BİR YAKLAŞIM	39
5.1. Giriş.....	39
5.2. Teorik Yaklaşımlar.....	39
5.3. Matematiksel Model ve Problem Çözümü.....	51
5.3.1. Deney düzeneği.....	51
5.3.2. Deneysel verilerin grafik üzerinden alınması.....	53
5.3.4. İnvers problem çözüm yöntemi.....	62
5.3.4.1. İnvers problemin çözüm hassaslığına etki edebilecek faktörler	67
5.3.4.1. Problemin çözümü.....	73
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	87
7. KAYNAKLAR.....	89

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Yüzey alanı, [m ²]
C _v	: Birim hacmin ısınma ısısı, [J/(m ³ K)]
C	: Konsantrasyon, [kg/m ³]
c	: Özgül ısı, [J/kg]
C _K , Λ _K	: Polinom katsayıları,
D	: Difüzyon katsayısı, [m ² /s]
d	: Çap, [m]
h	: Uzay adımı ağ parametresi, [m]
h'	: Kütle transferi katsayısı, [m/s]
h _{sb}	: Buharlaşma gizli ısısı, [J/kg]
i, j	: Ağ koordinatları,
k	: Isı iletim katsayısı, [W/(mK)]
k _p	: Transport katsayısı,
L	: Kalınlık, [m]
ℓ	: Sıcaklık aralığı numarası,
m	: Kütleli debi, [kg/s]
M	: Moleküler ağırlık, [kg/kmol]
n	: Ölçüm sayısı,
P	: Basınç, [Pa]
Q	: Isı transferi miktarı, [W]
q	: Isı akısı, [W/m ²]
r	: Radyal doğrultu, [m]
R	: Yarıçap, [m]
R _{cr}	: Korelasyon katsayısı,
R _b	: Su buharının gaz sabiti, [J/(kgK)]
R̄	: Üniversal gaz sabiti, [J/(kmolK)]
s	: Difüzyon yolu, [m]
T	: Sıcaklık, [°C]

X	: Nem içeriği, [kg nem/kg kuru madde]
h	: Isı taşınım katsayısı, [W/(m ² K)]
ε	: Faz dönüşüm faktörü,
ε_s	: Standart sapma
μ	: Dinamik viskozite [Ns/m ²]
v	: Özgöl hacim, [m ³ /kg]
σ	: Yüzey gerilmesi, [N/m ²]
θ	: Menisk kenar açısı,
ρ	: Yoğunluk, [kg/m ³]
γ	: Özgöl ağırlık, [N/m ³]
τ	: Zaman, [s]
$\delta\tau$	: Zaman adımı ağ parametresi, [s]
z	: Sıcaklık aralığına düşen düğüm noktalarının sayısı.

Alt indisler

b	: Su buharı
$buğ$	: Buğulaşma
d	: Deneysel; Doyma
e	: Efektif
h	: Hava
k	: Kuru
m	: Model
o	: Ortalama
s	: Su
y	: Yüzey; Yaş
∞	: Akışkan

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1.	Nem oranının zamanla değişimi.....	5
Şekil 2.2.	Kuruma hızının zamana göre değişimi.....	6
Şekil 2.3.	Kuruma hızının nem oranına göre değişimi.....	6
Şekil 2.4.	Farklı çaplara sahip kılcallar.....	9
Şekil 2.5.	Kapiler bir boru içerisinde sıvının yükselmesi.....	10
Şekil 2.6.	Buharın çift yönlü difüzyonu.....	12
Şekil 2.7.	Gözenek içerisinde tek yönlü difüzyon.....	16
Şekil 2.8.	Higroskopik bir malzemenin sorpsiyon davranışı.....	19
Şekil 2.9.	Higroskopik olmayan malzemede nem dağılımı.....	21
Şekil 2.10.	Higroskopik olmayan malzemelerde kuruma hızının zamanla değişimi.....	21
Şekil 2.11.	Higroskopik malzemede nem dağılımı.....	22
Şekil 2.12.	Higroskopik malzemelerde kuruma hızının zamanla değişimi.....	23
Şekil 3.1.	İplik bobinlerine ait fotoğraflar.....	29
Şekil 3.2.	Gözenekli malzemelerin kuruması sırasında, katı içerisindeki nemin çeşitli aşamalardaki durumu.....	31
Şekil 4.1.	İplik kurutma makinesine ait fotoğraflar.....	34
Şekil 4.2.	İplik kurutma makinelerinde taşıyıcının değiştirilmesi sayesinde, çeşitli tür ipliklerin paket formlarında kurutulması.....	34
Şekil 4.3.	Aynı makine içinde, değişik taşıyıcılar üzerinde bulunabilen bobin, elyaf ve tops halindeki tekstil ürünleri.....	35
Şekil 4.4.	İplik bobini kurutma makinesinin üstten görünüşü.....	35
Şekil 4.5.	Sıcak hava ile kurutma prensibine göre çalışan iplik kurutma makinesinin şematik görünümü.....	36
Şekil 4.6.	Yüksek frekanslı bobin kurutma makinesinin şematik görünümü.....	37
Şekil 4.7.	Yüksek frekanslı bobin kurutma makinesi.....	38
Şekil 5.1.	(a) İplik bobini, (b) Rüzgar tüneli içerisinde paralel sıcak hava akımına maruz bırakılmış iplik bobininin şematik gösterimi.....	40
Şekil 5.2.	Çalışmanın ikinci bölümü için basınçlı ve içten dışa doğru sirkülasyonlu hava akımının kullanıldığı deney düzeneğinin şematik görünümü (Ribeiro ve Ventura, 1995).....	41

Şekil 5.3.	(a)-Tambur kurutucu, (b)-Hareketli sınırların oluşumunu gösteren fiziksel model (Nastaj, 2000).....	42
Şekil 5.4.	Bir iplik parçasının kuruma şeklinin şematik gösterimi (Lee, vd., 2002).....	44
Şekil 5.5.	İpliğin kesit görünüşünde ısı ve kütle transferinin şematik gösterimi...	45
Şekil 5.6.	Sonsuz silindir için hareketli ara yüzey modelinin şematik gösterimi (Smith ve Farid, 2004).....	48
Şekil 5.7.	İplik bobini içerisinde sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar.....	52
Şekil 5.8.	Deneylerde kurutulan iplik bobininin şematik gösterimi.....	56
Şekil 5.9.	Silindirik koordinatlarda, radyal doğrultuda birim hacim elemanı için enerji dengesinin şematik gösterimi.....	57
Şekil 5.10.	Düz problemin ısı şeması.....	68
Şekil 5.11.	Farklı noktalardaki sıcaklıkların zamanla değişimi.....	69
Şekil 5.12.	Az alaşımlı çelik için ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi. (1 Düz problemin çözümünde kullanılan ve literatürden alınmış $k(T)$ eğrisi, 2-5 farklı durumlar için invers problemin çözümünden elde edilen $k(T)$ eğrileri).....	70
Şekil 5.13.	Az alaşımlı çelik için birim hacmin ısınma ısıısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi (1 Düz problemin çözümünde kullanılan ve literatürden alınmış $C_v(T)$ eğrisi, 2-5 farklı durumlar için invers problemin çözümünden elde edilen $C_v(T)$ eğrileri).....	71
Şekil 5.14.	Yün iplik bobini için birim hacmin efektif ısınma ısıısının sıcaklıkla değişimi.....	76
Şekil 5.15.	Yün iplik bobinine ait efektif ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi	77
Şekil 5.16.	Bobin iç yüzeyindeki 1 numaralı ve bobin dış yüzeyindeki 7 numaralı sıcaklık ölçüm noktaları için deneysel sıcaklık verileri.....	78
Şekil 5.17.	(2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.18.	(3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.19.	(4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	83
Şekil 5.20.	(5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	83
Şekil 5.21.	(6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	84

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1.	Bobin içerisinde farklı noktalardaki sıcaklıklar ve bobinin nem içeriğinin zamanla değişimi	54
Tablo 5.2.	İplik bobini için birim hacmin efektif ısınma ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi	75
Tablo 5.3.	İplik bobini için ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi	76
Tablo 5.4.	Modelden elde edilen sıcaklıklar	80
Tablo 5.5.	İplik bobini içerisinde farklı noktalar için belirlenen korelasyon katsayıları	85

1. GİRİŞ

Tekstil sanayinde, boyama işlemlerinden sonra iplik bobinlerinin kurutulması gerekmektedir. Kurutma işlemi, tekstil endüstrisinin temel bileşenlerinden olan iplikçilik ve dokumacılık sektöründe, çoğu boyama ve/veya terbiye işlemlerinden sonra yüksek miktarda enerji gerektiren, pahalı ve zaman alıcı bir prosestir. Kurutmanın amacı bobin içindeki nemin bobinden uzaklaştırılmasıdır. Bobin içindeki suyun bir kısmı ön kurutma yardımı ile bobinden atılır. Mekanik olarak yapılan bu işlem, bobin içerisindeki suyun tamamının atılması için yeterli değildir. Mekanik kurutmayı takiben genelde sıcak hava yardımı ile kurutma işlemi yapılmaktadır.

Kurutmanın, sıcak havanın kurutulacak olan malzeme yüzeyi üzerinden geçirilerek yapıldığı cihazlarda, sıcak hava akımı, ısının malzemeye taşınım yoluyla geçmesini sağlarken, buharlaşan suyu da ortamdan uzaklaştırır. Bu işlem, kurutma havasının sıcaklığı ve nemine bağlı olarak bobin içerisinde denge nemi oluşuncaya kadar devam eder. Kuruma süresi ve hızı, kurutulan malzemenin yapısına, yüzey alanına, kurutma havasının sıcaklığına, hızına ve nemine bağlıdır. Son yıllarda enerji maliyetlerinin iyice artması ile birlikte bu tür faktörlerin kuruma hızına etkisinin matematiksel modeller yardımı ile belirlenmesi ve minimum enerji tüketimi ile malzemelerin kalitesini ve yapısını bozmadan, kuruma süresini en aza indirecek şekilde optimum kuruma proseslerinin tasarlanarak kurutma metotlarının geliştirilmesi büyük önem kazanmıştır.

Kurutma problemleri malzemenin nem içeriğine ve sıcaklığına bağlı kısmi diferansiyel denklemler (enerji ve kütle transferi denklemleri) yardımıyla ifade edilir. Bu denklemler ise literatürde yok sayılacak kadar az olan termofiziksel özellikler ve difüzyon katsayıları gibi birçok katsayıyı içermektedir. Kuruma prosesi malzemeye ait termofiziksel özellikleri büyük ölçüde etkiler. İnvers çözüm yöntemi ile kurutulan malzemenin termofiziksel özelliklerini belirlemek mümkündür. Bunun için malzemeye ait kuruma şartlarının bilinmesi gerekir. Bu çalışmada, Ribeiro ve Ventura (1995) tarafından yapılan deney sonuçları kullanılarak kurutulan yün iplik bobinine ait termofiziksel özellikler belirlenmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasının amacı ve içerdiği yenilikler kısaca aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

Amaç:

- ✓ İplik bobininin sıcak hava yardımı ile kurutulması işlemine ait matematiksel bir modelin ortaya konması,
- ✓ Problemi çözmeden önce, invers problem çözüm yönteminde, çözüm hassaslığına etki edebilecek faktörlerin incelenmesi,
- ✓ Çözüm hassaslığı etkileyen bu faktörler göz önünde bulundurularak, problemi çözebilmek için kurutulan yün iplik bobinine ait termofiziksel özelliklerin invers problem çözüm yöntemi ile belirlenmesi,
- ✓ Termofiziksel özellikleri belirledikten sonra, düz problemin uygun denklem, başlangıç ve sınır şartlarıyla çözülerek; ortaya konan matematiksel modelin, çözüm yönteminin ve termofiziksel özelliklerin doğruluklarının kontrol edilmesi.

Yenilik:

- ✓ Literatürde, iplik bobinlerinin kurutulması işlemiyle ilgili olarak çok az çalışılmış olan bir konuda bilgi eksikliğinin giderilmesine katkıda bulunmak,
- ✓ İplik bobininin sıcak hava yardımı ile kurutulması işlemine ait matematiksel bir modelin oluşturulması,
- ✓ Yeni bir yaklaşımda bulunarak, matematiksel model içerisindeki temel denklemin, iplik bobinine ait efektif termofiziksel özellikler yardımı ile yeniden ifade edilmesi,
- ✓ İnvers problem çözüm yönteminin ilk defa iplik bobininin kurutulması işlemi için uygulanması,
- ✓ İplik bobini için termofiziksel özelliklerin belirlenmesi,
- ✓ Bulunan model sıcaklıkları ile deney sıcaklıkları arasında elde edilen uyumlu sonuçlar neticesinde, kurutma ve benzeri faz dönüşüm prosesleri için invers çözüm yönteminin iyi sonuçlar verebileceğinin gösterilmesi.

2. KURUTMA

Nemli bir malzemedan sıvının alınması işlemine kurutma denir. Teknikte, malzemedeki sıvı tek bir işlemle alınabildiği gibi, bir kaç işlemden sonra malzemedan sıvının alındığı da görülmektedir. Örneğin süt tozu ve hazır çorba üretiminde olduğu gibi, bir çözeltinin sıcak bir gaz akımı içerisine damlacıklar halinde püskürtülmesi ve sıvının buharlaştırılarak alınması, bir işlemle gerçekleştirilen kurutma yöntemidir. Tekstil sanayinde kullanılan elyafların nemlerinin bir kısmı önce bir preste veya santrifüjde çıkarıldıktan sonra, kalan nemin bir kısmı da sıcak hava ile alınmaktadır.

2.1. Nem Oranı

Islak bir malzemenin nem oranı, yaş ve kuru baza göre iki şekilde tanımlanır. Malzeme içerisindeki nem kütlesinin toplam malzeme kütlesine oranına yaş baza göre nem oranı denir.

$$X_y = \frac{m_s}{m_y} \quad (2.1)$$

Burada;

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, malzemenin kuru kütlesine oranına kuru baza göre nem oranı denir.

$$X = \frac{m_s}{m_k} \quad (2.2)$$

Burada,

X : Malzemenin kuru baza göre nem oranı, kg nem/kg kuru madde

m_k : Malzemenin kuru kütlesidir, kg.

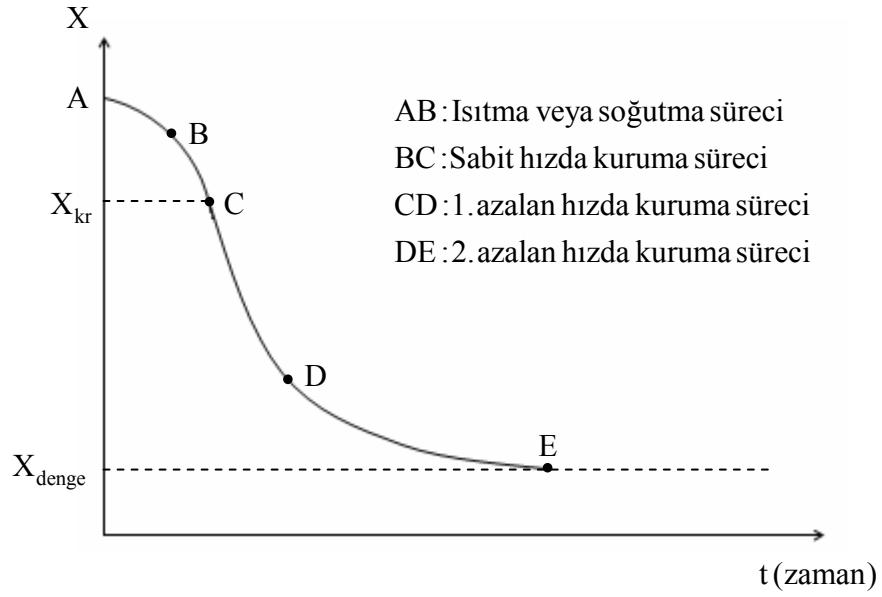
$m_s = m_y - m_k$ olduğundan, kuru baza göre nem oranı ile yaş baza göre nem oranı arasında aşağıdaki bağıntı vardır.

$$X = \frac{X_y}{1 - X_y} \quad (2.3)$$

2.2. Kuruma Süreci

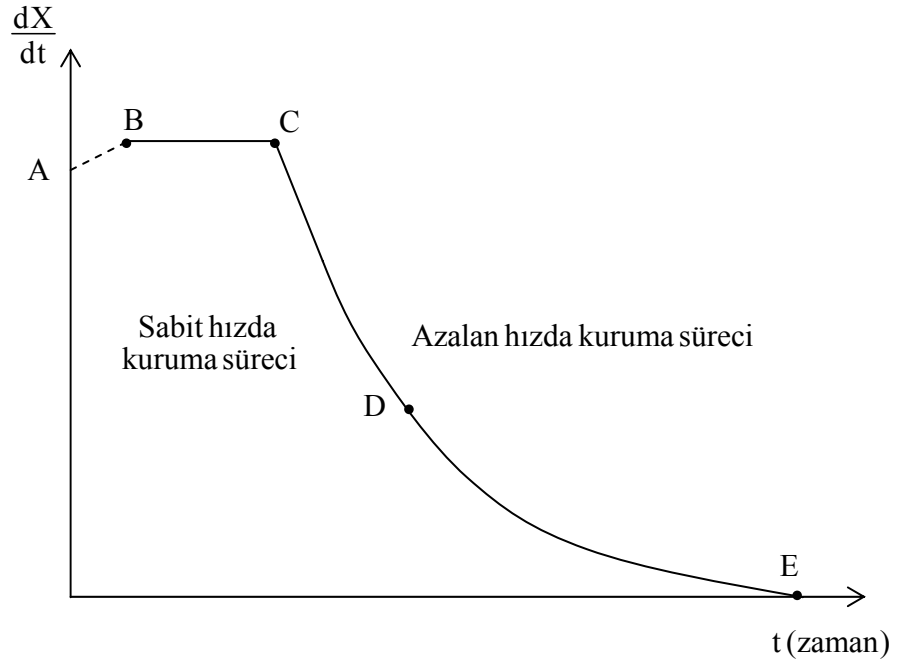
Kurutma işlemine tabi tutulan nemli bir malzemenin belli bir nem seviyesine kadar kuruma hızının sabit kaldığı, yani kurutma şartları değişmediği sürece, birim zamanda malzemedan alınan nemin sabit kaldığı görülmektedir. Bu sürece sabit hızda kuruma süreci denir. Bu süreçten sonra kuruma hızı azalmaya başlar, kuruma hızının azalmaya başladığı bu noktadaki nem oranına kritik nem oranı denir.

Kritik nem seviyesinden daha az nem içeren malzemelerde, kuruma zamanı ilerledikçe malzemedan sürekli azalan miktarda nem alınır. Bu sürece de azalan hızda kuruma süreci adı verilir. Bazı malzemelerde azalan hızda kuruma süreci birkaç süreçte gerçekleşir. Bu süreçler 1. azalan hız süreci, 2. azalan hız süreci gibi adlandırılmaktadır.

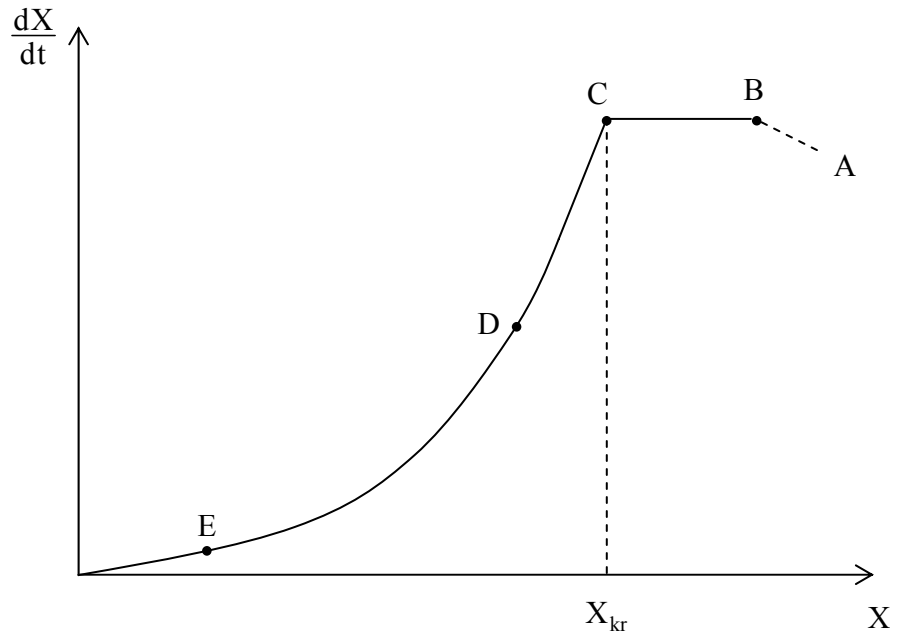


Şekil 2.1. Nem oranının zamanla değişimi.

Nem oranının zamanla değişimi Şekil 2.1.'de gösterilmektedir. Bir ilk sıcaklık yükselmesini (AB) takiben pek çok durumda belli bir zaman süresince sabit hızda buharlaşma gerçekleşir (BC). Bu kademede, malzeme içerisindeki buhar veya sıvı şeklinde oluşan kütle transferi yüzeyi sıvıca doymun tutmak için yeterli olmakta ve buharlaşma işleminin hızını etkilememektedir. Bu mekanizma “Sabit Hızda Kuruma Süreci” olarak adlandırılmaktadır. Sabit hızda kuruma süreci, madde yüzeyinden buharlaşmayı sağlayacak miktarda nemin, iç kısımlardan madde yüzeyine transferi gerçekleştiği sürece devam eder. Nemli malzemelerin dış yüzeylerinde, bütün sıvı yüzeylerinde olduğu gibi, bir doymuş hava filmi oluşur. Madde yüzeyinin sıcaklığı, film mevcut iken temas ettiği havanın yaş termometre sıcaklığına eşittir.



Şekil 2.2. Kuruma hızının zamana göre değişimi.



Şekil 2.3. Kuruma hızının nem oranına göre değişimi.

Kuruma ilerledikçe katı içerisindeki nem miktarında devamlı olarak azalma meydana gelir. Sonuçta madde içerisinde yüzeye nem transferi, sabit kuruma sürecinin devam etmesini sağlayacak değerin altına iner. Yüzeyde ilk kuru noktanın görülmesi sabit kuruma hızı sürecinin sonunu belirler. Bu andaki nem içeriği (C) kritik nem olarak adlandırılır. Kritik nem; kurutulan malzemenin cinsine, boyutlarına, şekline ve kuruma hızına bağlıdır. Sabit kuruma hızı sürecini, buharlaşma hızının sürekli olarak değiştiği “Azalan Hızda Kuruma Süreci” (CD) takip eder. Azalan hızda kuruma sürecinde kuruma hızını, katı maddenin iç gözenek yapısı ve içerisindeki nemin yüzeye akış modeli belirlemektedir. Kurutma havasının özelliklerinin kuruma hızı üzerine etkisi sabit hızda kuruma sürecine göre daha az olur.

2.2.1. Sabit hızda kuruma süreci

Nemli malzemenin dış yüzeyinde, bütün sıvı yüzeylerinde olduğu gibi bir doymuş hava filmi olur. Bu doymuş havanın sıcaklığı, havanın yaş termometre sıcaklığıdır. Doymuş hava içerisindeki su buharının kısmi basıncı P_{bo} , dış hava içindeki (malzemeyi kurutan) su buharının kısmi basıncı da $P_{b\infty}$ olsun. Birim malzeme yüzeyinden, birim zamanda buharlaşan nem miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\dot{m}_b \cong \frac{h'}{R_b T} (P_{bo} - P_{b\infty}) \quad (2.4)$$

Burada;

h' : Kütle transferi katsayısı olup

$$h' = \frac{D}{\delta} \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Burada,

δ : Derişiklik sınır tabaka kalınlığı, m

D: Difüzyon katsayısıdır, m^2/s .

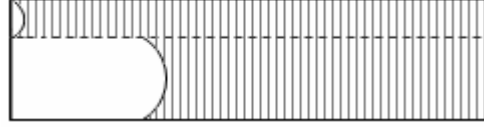
Dış şartlar sabit kaldığı sürece, buna bağılı olarak P_{b0} , $P_{b\infty}$ sabit kalır ve kuruma sabit bir hızda devam eder. Malzeme yüzeyine gelen sıvı beslemesi azalmaya başladığı an azalan hızda kuruma süreci başlar.

2.2.2. Azalan hızda kuruma süreci

Azalan hızda kuruma süreci, sabit hızda kuruma sürecinin ardından ortaya çıkar. Kritik nem oranı bu iki süreç arasında meydana gelir. Malzemenin nem oranı kritik nem oranından daha düşük olduğundan, kuruma azalan hızda kuruma sürecinde gerçekleşmektedir. Azalan hızda kuruma süreci geniş ölçüde malzeme tarafından kontrol edilmektedir. Kurutmada amaç malzeme içerisindeki nemin uzaklaştırılması olduğuna göre, malzemedeki nemin hangi şekil ve koşullarda hareket ettiğinin bilinmesi önem kazanmaktadır. Nemin iç hareketini kontrol eden mekanizmaların en önemlileri kapiler sıvı hareketi, sıvı difüzyon hareketi ve buhar difüzyonudur.

2.2.2.1. Kapiler sıvı hareketi

Sıvı hareketinde itici kuvvet kapiler çekme kuvvetidir. Bu kuvvet, gözenek içerisindeki katı yapı ile sıvı gaz boşluğu arasındaki sınır yüzeylerin gerilmesinden doğan bir iç kuvvettir. Gözenek ne kadar küçük olursa sıvıdaki çekme kuvveti o oranda büyük olur. Kılcalların çapları Şekil 2.4’de gösterildiği gibi birbirinden farklı olsun.



Şekil 2.4. Farklı çaplara sahip kılcallar.

Sabit kuruma hızı sürecinin bitiminde gözeneklerdeki sıvı seviyeleri Şekil 2.4’de görüldüğü gibi olur. Her iki kılcalda menisk oluşur ve çapı çok küçük olan kılcalın çekme kuvveti, büyük olan kılcalın çekme kuvvetinden daha büyük olur. Şayet iki kılcal arasında bir bağlantı varsa, kaba kılcaldaki sıvı ince kılcal tarafından emilir. Bu harekete kapiler sıvı hareketi denir.

Kapiler sıvı hareketini formüle etmek için, hareket eden sıvı içerisindeki basınç dağılımının bilinmesi gerekir. Ancak malzeme gözenekleri arasında hareket eden sıvı içerisindeki basıncın ölçülmesi mümkün değildir. Kapiler sıvı hareketinin sonucu olarak genellikle bir nem gradyanı meydana gelir. Bu nem değişiminin ölçülmesi mümkündür. Bu nedenle kapiler sıvı hareketini formüle ederken basınç değişimi yerine nem değişimini kullanmak daha uygun olur.

$$\dot{m}_s = -k_x \rho \frac{dX}{dz} \quad (2.6)$$

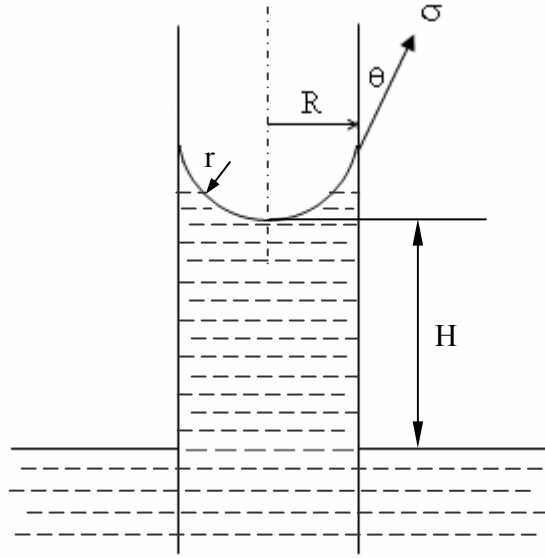
Burada;

k_x : X ’e bağlı sabit bir katsayı,

X : Nem oranı, kg nem/kg kuru madde

ρ : Yoğunluk, kg/m^3

Kapiler çekme kuvveti:



Şekil 2.5. Kapiler bir boru içerisinde sıvının yükselmesi

Yarıçapı R olan kapiler bir boru sıvı içerisine daldırılınca, sıvının boru içerisinde H yüksekliğine kadar yükseldiği görülür (Şekil 2.5). Sıvının yüzeyinde buğulaşma ve atmosfer basıncı ihmal edilirse H yüksekliği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$H\gamma_o = 2\sigma \frac{\cos \theta}{R} \quad (2.7)$$

Burada

σ : Sıvının yüzey gerilmesi, N/m

θ : Menisk kenar açısı,

γ_o : Özgül ağırlıktır, N/m^3

Sıvının kapiler boru içinde yükselmesinin, sıvı yüzeyinde negatif bir basıncın etkisi sonucunda gerçekleştiği düşünülebilir. Kapiler basınç olarak adlandırılan bu basınç aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$P_k = H\gamma = 2\sigma \frac{\cos \theta}{R} \quad (2.8)$$

Burada,

P_k : Kapiler basınçtır.

2.2.2.2. Sıvı difüzyon hareketi

Sıvı difüzyonu; katının iç kısımlarında yüksek olan nem konsantrasyonu ile katı yüzeyinde daha düşük olan nem konsantrasyonu arasındaki farktan dolayı meydana gelir. Bu fark kuruma sırasında yüzeyde oluşur. Nem içeren gözeneksiz malzemeler ve gıda maddelerinin büyük çoğunluğunun kuruma davranışı sıvı difüzyon hareketine dayanır. Bu mekanizmaya ait nem hareketi, tek fazlı katı çözeltilerin nemle birlikte bulunduğu sabun, tutkal ve jelatin gibi gözeneksiz malzemelerle ve suyun son kısmının kurumasında olduğu gibi bağlı nemin kurutulduğu kil, un, tekstil ürünleri, kağıt ve ağaç gibi belirli durumlarla sınırlıdır.

1. Fick kanunu:

Bir yüzeyden birim zamanda, bu yüzeye dik olarak alınan x yönünde akan madde miktarı $\dot{m}$ [kg/s], 1. Fick kanununa göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{m} = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.9)$$

Burada,

A : Alan, m^2

C : Konsantrasyon (derişiklik), kg nem/ m^3

D : Difüzyon katsayısıdır, m^2/s

2. Fick kanunu:

Belirli bir hacim içerisindeki konsantrasyonun zamanla değişimi 2. Fick kanunu ile aşağıdaki gibi ifade edilir;

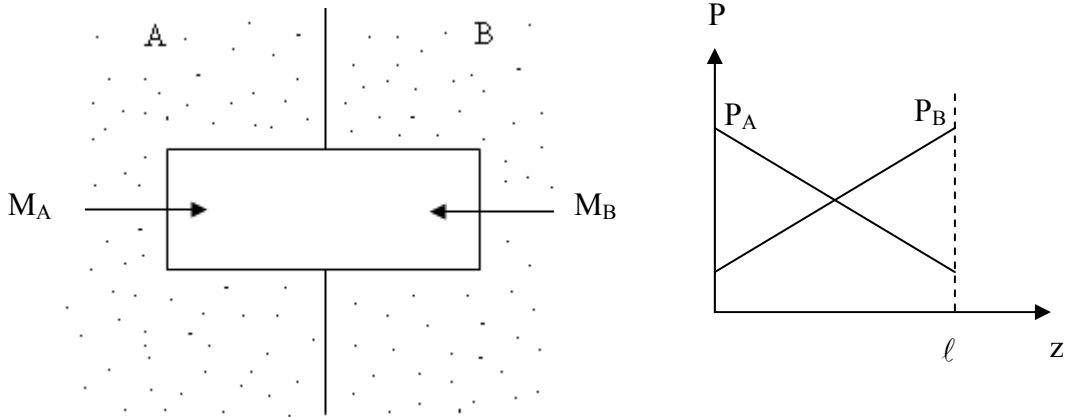
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.10)$$

2.2.2.3. Buhar difüzyonu

Kısmi basınç farkının veya konsantrasyon farkının sebep olduğu moleküler harekete buhar difüzyonu denmektedir. Buhar difüzyonuna neden olan itici kuvvet malzeme içerisindeki suyun buhar basıncı ile ortam havası içerisindeki su buharının kısmi basıncı arasındaki farktır.

a) Buharın çift yönlü difüzyonu

Aynı sıcaklık ve basınçta bulunan A ve B gazları bir duvarla ayrılmış olsun (Şekil 2.6). Duvarda kesit alanı a ve uzunluğu ℓ olan bir irtibat borusu bulunsun.



Şekil 2.6. Buharın çift yönlü difüzyonu.

Gazların akış hızı v_A ve v_B olsun. Stefan'a göre karşılıklı hareket eden moleküller arası çekici kuvvet, bağıl hız $(v_A - v_B)$, molar yoğunluk ρ_A/M_A , ρ_B/M_B ile gazların özelliklerini içeren C_{AB} sabiti ile orantılı olacaktır. Ayrıca gazların hareket edebilmesi için itici kuvvet olan kısmi basınç gradyanlarının moleküller arası çekici kuvveti yenmesi gerekir. Toplam basınç $P = P_A + P_B$ olursa, kısmi basınç gradyanları için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$-\frac{dP_A}{d\ell} = \frac{dP_B}{d\ell} \quad (2.11)$$

Stefan'ın moleküller arası kuvvet ifadesine uygun olarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$-\frac{dP_A}{d\ell} = \frac{dP_B}{d\ell} = C_{AB} \frac{\rho_A}{M_A} \frac{\rho_B}{M_B} (v_A - v_B) \quad (2.12)$$

Avagadro kanununa göre sabit sıcaklık ve basınçta belirli bir hacmi dolduran gazların mol sayıları eşit olur. O halde A ve B hacimlerinde basıncın değişmemesi için irtibat borusu vasıtasıyla A'dan B'ye geçen mol sayısı, B'den A'ya geçen mol sayısına eşit olmalıdır. Başka bir ifade ile her iki gazdan irtibat borusu vasıtasıyla birim zamanda geçen molekül sayısı eşit olmalıdır.

$$\frac{v_A \rho_A}{M_A} = -\frac{v_B \rho_B}{M_B} \quad (2.13)$$

Bu eşitlikten yararlanarak, yukarıdaki bağıntıyı aşağıdaki gibi yazabiliriz;

$$\frac{dP_A}{d\ell} = -C_{AB} v_A \frac{\rho_A}{M_A} \left[\frac{\rho_B}{M_B} + \frac{\rho_A}{M_A} \right] \quad (2.14)$$

$$\frac{dP_B}{d\ell} = C_{AB} v_B \frac{\rho_B}{M_B} \left[\frac{\rho_B}{M_B} + \frac{\rho_A}{M_A} \right] \quad (2.15)$$

İdeal gaz kanununa göre;

$$\rho_A = \frac{P_A}{R_A T}, \quad \rho_B = \frac{P_B}{R_B T}$$

(2.12) ifadesine üniversal gaz sabiti $\bar{R}$ yerleştirilirse;

$$\frac{dP_A}{d\ell} = -C_{AB} v_A \frac{\rho_A}{M_A} \left[\frac{P_A}{\bar{R}T} + \frac{P_B}{\bar{R}T} \right]$$

$$M_A = \frac{\bar{R}}{R_A}, \quad M_B = \frac{\bar{R}}{R_B}$$

$$\frac{dP_A}{d\ell} = -C_{AB} v_A \frac{\rho_A}{M_A \bar{R}T} (P_A + P_B) = -C_{AB} v_A \frac{\rho_A P}{M_A \bar{R}T}$$

$$\frac{dP_B}{d\ell} = C_{AB} v_B \frac{\rho_B}{M_B} \left[\frac{\rho_B P}{M_B \bar{R}T} \right] \quad (2.16)$$

Boru içinde difüzyonla A'dan B'ye ve B'den A'ya geçen gaz debileri akışkanların süreklilik kanununa göre;

$$\dot{m}_A = a v_A \rho_A = -a M_A \frac{\bar{R}T}{C_{AB} P} \frac{dP_A}{d\ell}$$

$$\dot{m}_B = a v_B \rho_B = a M_B \frac{\bar{R}}{C_{AB} P} \frac{dP_B}{d\ell}$$

Burada; $M_A = \frac{\bar{R}}{R_A}$, $M_B = \frac{\bar{R}}{R_B}$ ifadeleri yerlerine yazılacak olursa, gaz debilerini veren bağıntılar elde edilir.

$$\dot{m}_A = -a \frac{1}{R_A T} \frac{(\bar{R}T)^2}{C_{AB} P} \frac{dP_A}{d\ell} \quad (2.17)$$

$$\dot{m}_B = a \frac{1}{R_B T} \frac{(\bar{R}T)^2}{C_{AB} P} \frac{dP_B}{d\ell} \quad (2.18)$$

Burada;

- P_A : A gazının kısmi basıncı, Pa
- P_B : B gazının kısmi basıncı, Pa
- P : Toplam basınç, Pa
- R_A : A gazının gaz sabiti, J/(kgK)
- R_B : B gazının gaz sabiti, J/(kgK)
- C_{AB} : Gazlarla ilgili bir katsayıdır.

Her iki gazın akış bağıntılarındaki ortak büyüklük $(\bar{R}T)^2 / (C_{AB} P)$ difüzyon katsayısı (D , m²/s) olarak adlandırılır.

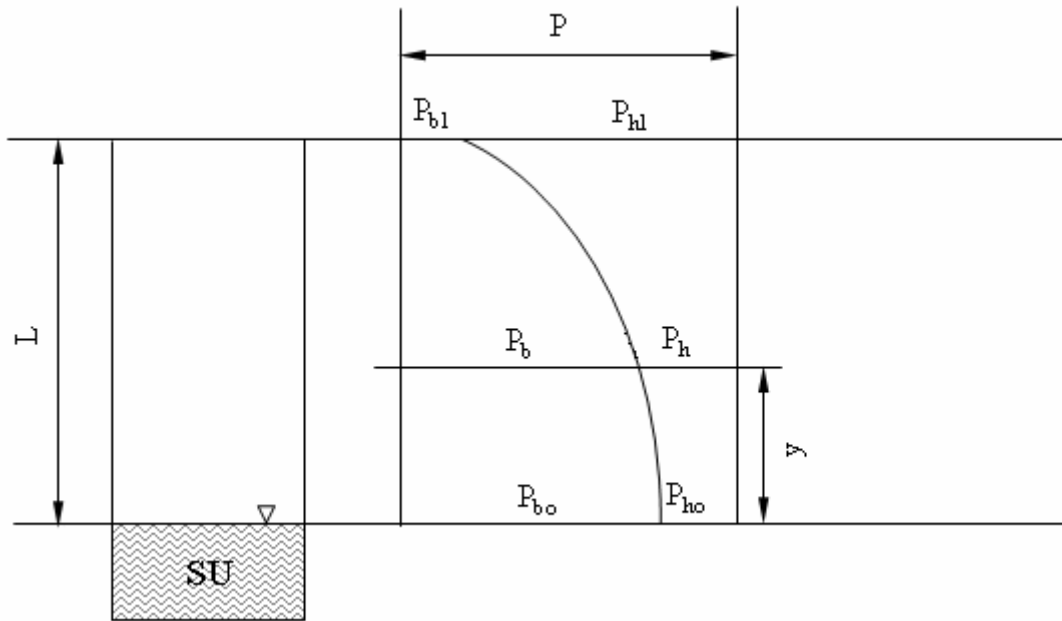
$$D = \frac{(\bar{R}T)^2}{C_{AB} P} \quad (2.19)$$

$$\dot{m}_A = -a \frac{D}{R_A T} \frac{dP_A}{d\ell} \quad (2.20)$$

$$\dot{m}_B = a \frac{D}{R_B T} \frac{dP_B}{d\ell} \quad (2.21)$$

b) Buharın tek yönlü difüzyonu

Buharın sıvı yüzeyinden difüzyonla sıvı üzerindeki bir gaza taşınmasına buğulaşma denir. Buğulaşmanın buharlaşmadan farkı, buğulaşmada sıvı üzerindeki buharın gazla karışım halinde bulunmasıdır. Bu koşullarda buhar basıncı, karışım toplam basıncından daha küçüktür. Buharlaşmada ise sıvı üzerinde yalnızca sıvının kendi buharı bulunur ve buhar basıncı toplam basınca eşittir.



Şekil 2.7. Gözenek içerisinde tek yönlü difüzyon.

Nemli bir malzemeyi göz önüne alalım. Malzemeyi herhangi bir yöntemle ısıtacak olursak, malzemedeki sıvı buharlaşarak malzeme yüzeyinden havaya karışacaktır. Malzeme yüzeyini, sıvı buharı ile hava arasında bir sınır olarak düşünürsek, bu sınırdan

sıvı buharlaşarak havaya karışmaktadır. Ancak malzeme içine doğru hava akımı yoktur. Sadece buharın havaya doğru akışı söz konusudur. Yani sıvı buharı havaya difüzyon vasıtasıyla karışmaktadır. Bu nedenle tek yönlü gaz (sıvı buharının) difüzyonu söz konusudur. Hava için h ve buhar için b indisleri kullanılarak, Stefan'ın çift yönlü difüzyon bağıntısı buğulaşmaya uygulanacak olursa aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\frac{dP_b}{dy} = C_{bh} \frac{\rho_b}{M_b} \frac{\rho_h}{M_h} v_b \quad (2.22)$$

Buradan da a kesitinden birim zamanda difüzyonla geçen buhar kütlelerini veren bağıntı bulunur.

$$m_b a v_b \rho_b = -a \frac{M_b}{C_{bh}} \frac{M_h}{\rho_h} \frac{dP_b}{dy} \quad (2.23)$$

İdeal gaz kanununa göre;

$$\rho_h = \frac{P_h}{R_h T} \quad \text{ve} \quad \bar{R} \text{ üniversal gaz sabiti kullanılırsa;}$$

$$m_b = -a \frac{1}{R_b T} \frac{(\bar{R} T)^2}{C_{bh} P_h} \frac{dP_b}{dy} \quad (2.24)$$

$P_h = P - P_b$ şeklinde idi. Buğulaşma hızı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$m_b = -a \frac{D}{R_b T} \frac{P}{P - P_b} \frac{dP_b}{dy} \quad (2.25)$$

$P = P_b$ halinde $b_{buğ} \rightarrow \infty$ olur ve olay bir buhar akışına dönüşür.

Herhangi bir gözenekli malzemenin bir gözeneğinden tek yönlü difüzyonla kurumayı (buğulaşma) düşünürsek, Şekil 2.7'deki gibi gözenek içerisinde bir kısmi buhar basıncı oluşur.

(2.25) bağıntısını bu sistem için yazıp integre edersek;

$$m_b \int_0^L dy = -a \frac{D}{R_b T} P \int_{P_{bo}}^{P_{bl}} \frac{dP_b}{P - P_b} = -a \frac{DP}{R_b T} \ln(P - P_b) \Big|_{P_{bo}}^{P_{bl}}$$

$$m_b L = a \frac{D}{R_b T} P \cdot \ln \frac{P - P_{bl}}{P - P_{bo}} \quad (2.26)$$

bağıntısı elde edilir.

Burada;

P_{bo} : L mesafesinde hava içindeki su buharının kısmi basıncı, Pa

P_{bl} : L mesafesinde hava içindeki kuru havanın kısmi basıncıdır, Pa.

$$\frac{P - P_{bl}}{P - P_{bo}} = S \quad \text{dersek};$$

$$\ln S \cong S - 1, \quad \frac{P - P_{bl}}{P - P_{bo}} - 1 = \frac{P_{bo} - P_{bl}}{P - P_{bo}} \quad \text{olur.}$$

$$P_{bo} \ll P \quad \text{olduğundan, } \ln S = \frac{P_{bo} - P_{bl}}{P} \quad \text{olur.}$$

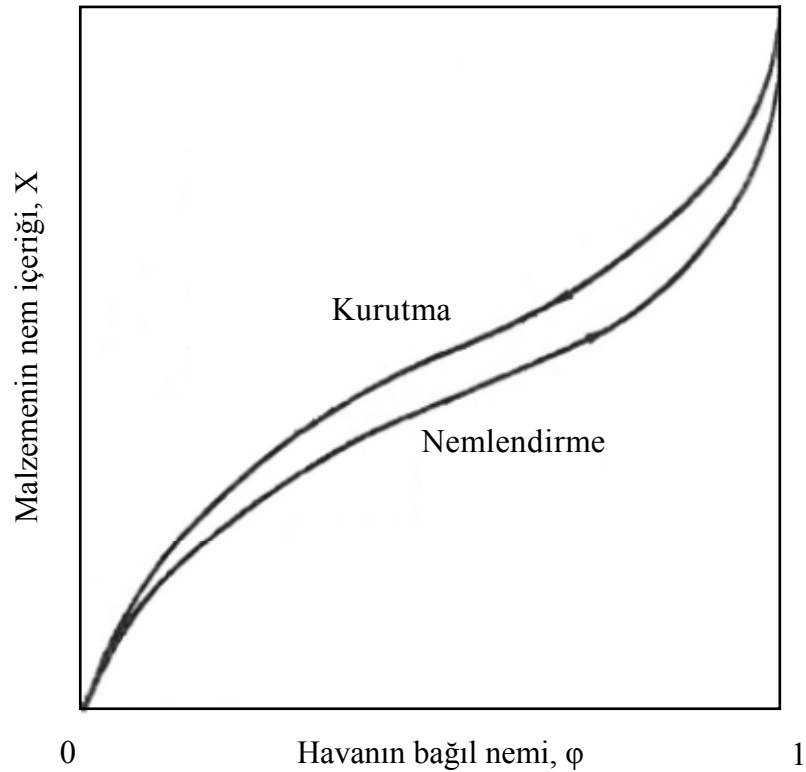
$$m_b = a \frac{D}{L} \frac{1}{R_b T} (P_{bo} - P_{bl}) \quad (2.27)$$

2.3. Higroskopiklik

Tekstil malzemelerde tekstil liflerinin büyük bir kısmı belli bir dereceye kadar nem absorbe etme (kendiliğinden nem tutabilme) kabiliyetine sahiptir. Buna higroskopiklik özelliği adı verilmektedir. Bir başka ifade ile higroskopiklik; bir malzemenin kendi nem içeriğini, lifleri vasıtasıyla ortam havasındaki nem durumuna göre dengeye ulaştıracak şekilde nem absorpsiyonu (nem tutma) veya desorpsiyonu (nemi bırakma) yardımı ile ayarlayabilme kabiliyetidir.

2.4. Sorpsiyon İzotermi

Malzeme nem içeriği X ile malzeme üzerindeki havanın bağıl nemi ϕ arasındaki ilişkiyi gösteren eğriye sorpsiyon izotermi denir.



Şekil 2.8. Higroskopik bir malzemenin sorpsiyon davranışı.

Malzemenin iç yapısına bağlı olarak kapiler yapı içerisinde meydana gelen buharlaşma ve yoğuşma olayları tersinmez olduğundan, bu malzemeye ait sorpsiyon izotermi de farklı olur. Bu eğriler ancak deneysel olarak elde edilebilir. Ayrıca malzemenin çevreden nem alması (absorpsiyon) veya kurutmada olduğu gibi sıvının çekilmesi (desorpsiyon) hali için elde edilen $X=f(\varphi)$ sorpsiyon eğrileri de farklı olur. Bunun nedeni gözeneklerde sıvının artması veya azalmasına göre kapiler sıvı hareketinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Sıcaklığın artması sorpsiyon izoterm eğrilerinin aşağı doğru kaymasına neden olur (Şekil 2.8).

2.5. Gözenekli Malzemelerin Kuruma Davranışı

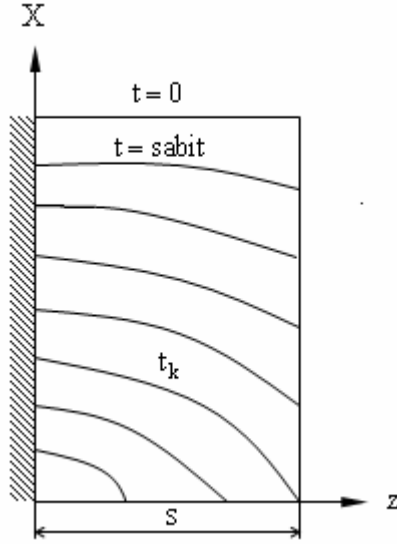
Malzemelerin birçoğunun içerisinde, birbirlerine bağlı boşluklar bulunur. Bu boşluklar sadece hava ile veya hem hava hem de su ile dolu olabilir. Malzemenin gözenekli olması durumunda, kapilarite kanunları kurutma davranışında önemli rol oynar.

Gözenekli malzemeler arasındaki ayırım gözenek boyutuna bağlı olarak da tarif edilebilmektedir. 10^{-7} m ve bu değerden daha büyük gözenek çapına sahip malzemeler gözenekli malzemeler olarak tanımlanırken, gözenek çapları 10^{-7} m'den daha küçük malzemeler kapiler gözenekli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Mujumdar, 1995). Bu tanıma uygun kapiler olmayan gözenekli malzemelere örnek olarak; silika jel, alüminyum oksit ve zeolitler gösterilebilir. Ağaç, kil, bazı seramik malzemeleri, tekstil ürünleri ile kum ve yiyecek malzemelerinin birçoğu ise kapiler gözenekli malzemeler arasında sayılabilir.

2.5.1. Higroskopik olmayan gözenekli malzemelerin kurutulması

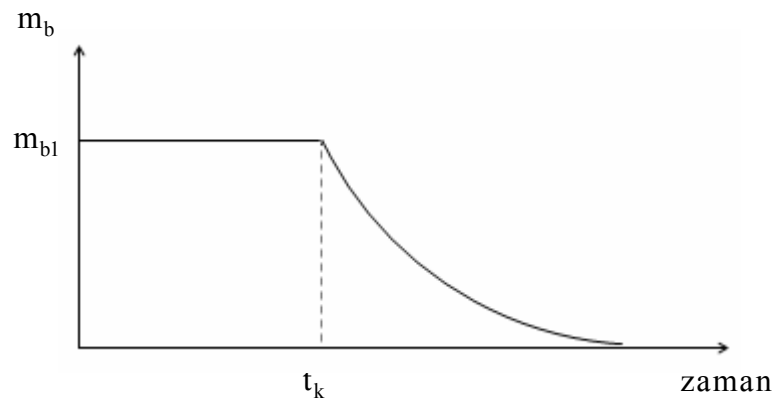
Nemli bir malzemenin birim miktarından, birim zamanda uzaklaşan nem miktarına kuruma hızı denmektedir. Kapiler gözenekli yaş malzemelerin kurutulması sırasında genellikle başlangıçta kuruma hızı bir süre sabit kalır (Şekil 2.10). Bu süreye

kurumanın birinci aşaması denir (A-B). Bu aşama süresince yalnızca malzeme içerisindeki sıvı dağılımı değişir. Şekil 2.9'da higroskopik olmayan malzeme içerisindeki nem dağılımının zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 2.9. Higroskopik olmayan malzemede nem dağılımı.

Kurutma başlangıcındaki buharlaşma hızına ve kapiler kuvvetlerin şiddetine bağlı olarak belirli bir t_k anında malzeme yüzeyindeki sıvı miktarı sıfır olur. Bu noktaya kritik nokta denir. Kurumanın birinci aşaması bu noktada sona erer. Bu noktadan sonra malzeme içindeki kapiler akış hareketi yavaşlar ve kuruma hızı azalmaya başlar (B-C).



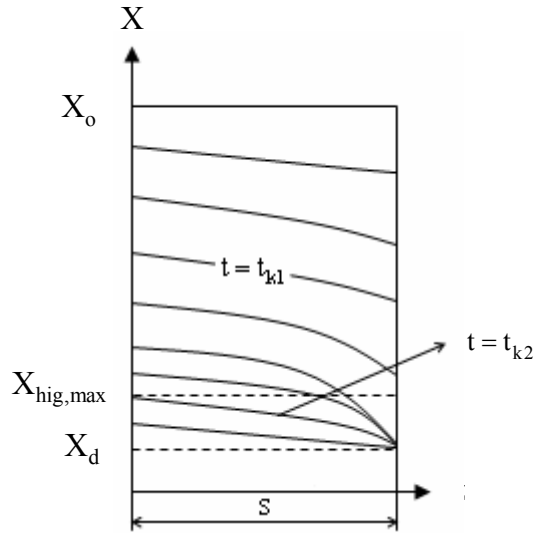
Şekil 2.10. Higroskopik olmayan malzemelerde kuruma hızının zamanla değişimi.

Eğer kurutma her iki yüzeyden de yapılıyorsa, buharlaşan son sıvı birimi malzemenin ortasında, eğer kurutma tek yüzeyden yapılıyorsa, buharlaşan son sıvı birimi malzemenin alt yüzeyinde bulunur.

Sonuç olarak sabit dış koşullarda kurutma olayı; kuruma hızını yalnız dış koşulların etkilediği ve kuruma hızının sabit olduğu kurumanın birinci aşaması ve bunun sonunda ulaşılan kritik noktadan sonra kuruma hızını yalnız malzemenin kapiler yapısının etkilediği ve kuruma hızının azaldığı II. aşamadan oluşur.

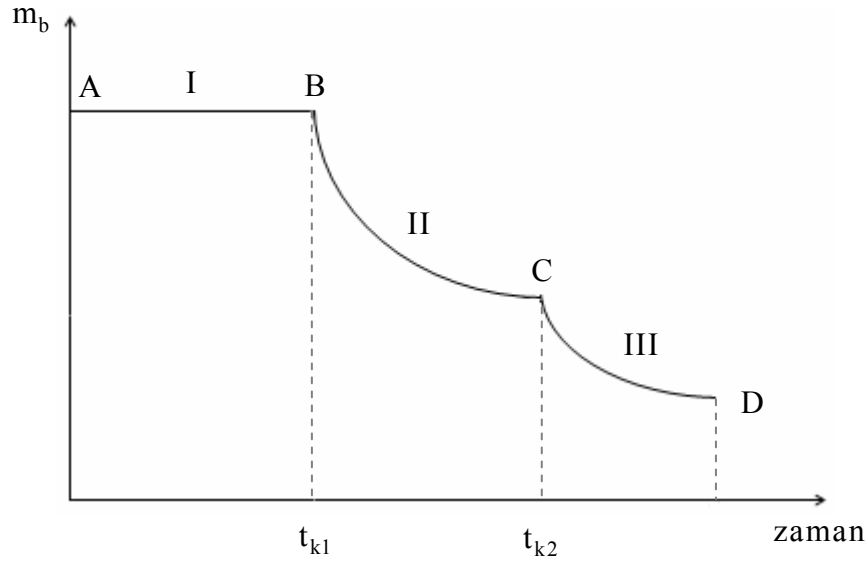
2.5.2. Higroskopik tutum gösteren gözenekli malzemelerin kurutulması

Bu malzemelerin kuruma karakteristikleri higroskopik olmayan malzemelerin kuruma karakteristiğinden farklı olur. Bunun nedeni higroskopik malzemenin sıfır nem içeriğine kadar kurutulamayacağıdır. Bu tip malzemeler ancak denge nemi olarak adlandırılan nem miktarına kadar kurutulabilirler. Şekil 2.11’de higroskopik bir malzeme içerisindeki nemin zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 2.11. Higroskopik malzemede nem dağılımı.

Kuruma prosesinin ilerlemesiyle birlikte malzemenin nem içeriği, daha fazla miktarda buharlaşmanın devam edemediği ve kritik nem içeriği olarak adlandırılan bir seviyeye kadar düşer. Yüzeyde ilk kuru noktanın görülmesi, sabit hızda kuruma sürecinin sonunu belirler. Bu durum azalan hızda kuruma sürecinin başlangıcıdır (B). Azalan hızda kuruma sürecinde nemin yüzeye doğru akışı, yüzeydeki nem doygunluğunun sürdürebilmesi bakımından yetersiz kalır. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi, bu süreç ise kendi arasında birinci (B-C) ve ikinci (C-D) azalan hızda kuruma süreci şeklinde iki kısma ayrılır.



Şekil 2.12. Higroskopik malzemelerde kuruma hızının zamanla değişimi.

Higroskopik gözenekli malzemenin kurutulmasında, kritik nokta, malzeme yüzeyinde nem miktarı $X=0$ olmadan daha önce malzemenin nem içeriği, kısmen maksimum nem içeriği $X_{hig,max}$ değerinin altına düşüncü meydana gelir. 1. kritik nokta olarak adlandırılan bu noktadan (t_{k1}) sonra, malzeme içerisinde belirli bir derinliğe kadar higroskopik nem bulunurken, malzemenin diğer kısmında bulunan nem ise higroskopik nem üstü durumundadır. Malzemenin alt yüzeyindeki nem miktarı maksimum higroskopik nem içeriğine eşit olunca, 2. kritik nokta meydana gelir (t_{k2}) ve

kurumanın III. aşaması başlar. Bu aşamada malzemenin nem içeriği denge nemine eşit olunca kuruma olayı son bulur (D).

Sabit hızda kuruma sürecinde hava akımının nemi, sıcaklığı ve hızı gibi dış etkenler belirleyici iken, ikinci azalan hızda kuruma sürecinde ise, malzeme yapısı ve malzeme içerisindeki nem ve enerji aktarımı gibi faktörler etkilidir. Suyun büyük bir kısmı sabit hızda kuruma sürecinde uzaklaştırılır. Fakat malzeme içerisindeki nemin istenen seviyeye kadar düşürülebilmesi için gerekli olan zaman azalan hızda kuruma sürecine bağlıdır. Kurutma sonunda malzeme içerisinde hedeflenen nem miktarı büyük bir oranda kritik nem miktarından düşük ise azalan hızda kuruma sürecindeki kuruma hızı önem kazanır.

3. İPLİĞİN KURUTULMASI

3.1. Tekstil Lifleri

Belirli uzunluğu, inceliği ve mukavemeti olan, eğrilme ve bükülme kabiliyetine sahip, boyanabilen ve tekstil endüstrisinde kullanılmaya uygun materyallere lif denmektedir. Liflerin çoğuluna ise elyaf adı verilmektedir. Tekstil ürünleri elyaf adı verilen bu hammaddeden elde edilmektedir. Tekstil ise, elyafın elde edilmesinden, iplik ve kumaş haline getirilmesine, elde edilen bu ürünlerin boyanmasına, baskı ile renklendirilmesine ve tüketicinin istediği özelliklere sahip bir ürün haline getirilmesine kadar geçirmiş olduğu tüm aşamaları kapsayan bir kavramdır. İnsanların giyinmek ve barınak yerlerini oluşturmak için kullandıkları materyaller tekstil ürünlerinden oluşan materyalleridir.

Birbirleri üzerine sarılarak bükülmeleri suretiyle iplikleri oluşturan elyaf lifleri çok büyük uzunluk-çap oranlarına sahiptir. Pamuk liflerinin uzunlukları 25 ile 75 mm arasında değişirken, yün lifleri 100 mm değerinin üzerinde değişen uzunluklarda bulunur. Keten liflerinin uzunlukları ise 1 m'ye kadar çıkabilmektedir. Tekstil liflerinin çapları ise 3 ile 500 μm arasında değişmektedir. Liflerin kesit alanları, hem doğal lifler için hem de suni olarak elde edilmiş olan yapay lifler için farklılıklar gösterebilmektedir. Yün lifleri genellikle yuvarlak kesit alanına sahipken, pamuk lifleri eliptik kesit alanına sahiptir. Erime büküm yöntemi ile elde edilen sentetik lifler ise istenilen kesit şeklinde biçimlendirilebilirler. Liflerin sahip oldukları kesit şekilleri, liflerin bir dokuma malzemesi içerisinde bir arada bulunma durumlarını da etkiler. Örneğin üçgen şeklinde kesit alanına sahip olmaları nedeniyle ipek lifleri bir araya getirildiğinde daha küçük çapa sahip, fakat daha yoğun olan ipliği oluşturur. Pamuk ve yün lifleri doğal olarak helisel kıvrımlara sahiptir.

3.1.1. Tekstil liflerinin temel özellikleri

Tekstil endüstrisinde kullanılmaya elverişli materyallerin değeri bu materyallerin sahip olduğu özelliklere bağlıdır. Bir tekstil lifinde veya hammaddesinde lifin ince oluşu, esneme kabiliyeti, boya çekme yeteneği, kullanım kolaylığı, nem çekme özelliği, ışığa karşı duyarlılık gibi özellikleri o tekstil materyalinin değerini artırır.

Kaliteli bir tekstil materyalinin aşağıdaki şu özelliklere sahip olması gerekir;

- İncelik
- Uzunluk
- Parlaklık
- Eğrilme yeteneği
- Dayanıklılık
- Uzama ve esneme kabiliyeti
- Yoğunluk
- Nem çekme yeteneği
- Isıdan etkilenme özelliği
- Işıktan etkilenme özelliği
- Kimyasallardan etkilenme özelliği
- Elektriksel özelliği

3.1.2. Tekstil sanayinde kullanılan lifler

Tekstil sanayinde kullanılan lifler elde edildikleri kaynaklara ve yapılarına göre farklılıklar gösterirler. Lifler doğal lifler ve yapay lifler olmak üzere iki kısma ayrılırlar.

3.1.2.1. Doğal Lifler

Doğal lifler bitkilerden elde edilen ve doğrudan tekstilde kullanılabilen liflerdir. Doğada var olan bu lifler en çok tüketilen liflerdir. Bu liflerin ana maddesi selülozdur. Selüloz, doğada bitkilerin sentez yoluyla oluşturdukları organik bir madde olup kağıt ve giyecek üretiminde kullanılır. Odun ve pamuğun ana maddesi selülozdur. Pamuk hemen hemen saf selülozdan oluşmaktadır. Odundaki selüloz miktarı %50 civarındadır ve 150°C'ye kadar olan sıcaklıklardan etkilenmez. Doğal liflerin en önemlisi ve en çok bulunanı, pamuk bitkisinden elde edilen pamuk elyafıdır. Üretilen doğal liflerin %90'ını pamuk, %8'ini ise yün ve ipek oluşturmaktadır. Doğal lifler üçe ayrılmaktadır. Bunlar;

- Bitkisel lifler,
- Hayvansal lifler,
- Anorganik liflerdir.

a) Bitkisel Lifler: Bu lifler bitkilerden elde edilir. Yapılarında %60-90 arasında selüloz bulunur. Bitkilerin tohumundan, gövdesinden ve yapraklarından lif elde edilir. Bitkisel liflerin en önemlisi pamuktur. Bitkisel lifler dörde ayrılır;

- Bitki tohumdan elde edilen lifler: Bu lifler bitki tohumunun üzerinde bulunur. Bunlarda tek bir lifçik bir tek hücreden ibarettir. Bu bakımdan “tek hücreli elyaf” olarak da isimlendirilir. (Pamuk, kapok).

- Bitki gövdesinden elde edilen lifler: Bir tek lif, birkaç bitki hücresinden oluşmuş bir demettir. Bu yüzden bu liflere “çok hücreli elyaf” da denilmektedir. (Keten, kenevir, ramî, jüt).

- Bitki yaprağından elde edilen lifler: Geniş yapraklı tropikal bitkilerden elde edilir. (Sisal kendiri, Manila keneviri, Yeni Zelanda keteni).

- Meyveden elde edilen lifler: Hindistan cevizi meyvesinden koko elyafı elde edilir.

b) Hayvansal lifler: Kimyasal olarak protein yapısında olduklarından “protein elyaf” olarak da isimlendirilirler. Hayvanlardan elde edilen lifler ikiye ayrılır. Bunlar;

- Yün lifleri: Bu sınıftan olan hayvan türleri kollarının kullanımı çok eskilere dayanır. (Koyundan yün, tiftik keçisinden elde edilen moher, kaşmir, angora, alpaka, deve tüyü v.b.).

- Salgı lifleri: İpek böceğinden elde edilen doğal ipek, hayvanın salgısından elde edilir.

c) Anorganik lifler: Doğada bitkisel ve hayvansal kökenli organik yapıdaki lifler dışında ayrıca anorganik yapıda ve lif şeklinde kristal yapıya sahip maddeler de vardır. Asbest veya amiyant adı verilen materyal bu sınıftandır.

3.1.2.2. Yapay Lifler

Cam lifi veya cam yünü gibi kimyasal işlemler sonucu elde edilen lifler, yapay lifler olarak adlandırılır. Yapay lifler ikiye ayrılmaktadır. Bunlar;

- Rejenere lifler: Genelde kumaş/giysi kesilip biçilirken çıkan firelerin ki bunlara kırpıntı (clips) denir, toplanıp, renklerine göre gruplanıp, harmanlanıp, dört/altı tamburlu büyük makinelerde tekrar lif/elyaf haline getirilmesi ile yapılırlar. (Viskoz lifleri, selüloz nitrat lifleri, bakır amonyum lifleri, selüloz asetat lifleri).

- Sentetik lifler: Sentetik lifler doğada, lif halinde bulunmayan bileşiklerden meydana getirilmişlerdir. Sentetik liflerin temel maddeleri kömür, petrol, su, azot gibi son derecede basit maddelerdir. Bu basit maddeler kimyasal olarak değişik şekillerde birleştirilerek lif haline dönüştürülürler. (Polyester lifi, poliamid, poliüretan, polivinil lifleri).

3.2. İplik ve İplikte Aranan Özellikler

Tekstil liflerinin onlarcasının veya yüzlercesinin bir araya getirilip bükülerek, birbirleri üzerlerine sarılarak tutturulmaları sonucunda iplikler oluşturulur. Delikli içi boş silindirik veya konik şeklindeki malzemeler üzerine ipliklerin belirli bir sarım sıklığı ile sarılmasıyla oluşturulan materyallere iplik bobini denmektedir. Şekil 3.1’de iplik bobinlerine ait bazı fotoğraflar görülmektedir.

İpliklerin özellikleri, üretilecek tekstil yüzeyine, boyamaya ve giyecek ürününe büyük etki yapar. İyi bir iplikte bulunması gereken özellikler aşağıda verilmiştir.

- Düzgünlük: Düzgünlük, ancak ince ve uzun liflerin kullanımı ile elde edilir,
- Sağlamlık: Kullanılan liflerin uzunluğuna bağlıdır. Büküm ile artırılabilir. Kısa olan lifleri birbirine tutturmak için çok büküm verilir. Bu da ipliğin sert olmasına neden olur. Sertlik ise istenmeyen bir sonuçtur. Uzun liflere az büküm verilir. Bu sayede yumuşak olurlar.
- Sertlik: İpliğin sertliği kumaşın kalitesini etkiler
- Esneklik: İpliğin esneme kabiliyeti, kullanım rahatlığı sağlar. İpliğin bu özelliği kullanım alanlarının seçiminde çok önemlidir.



Şekil 3.1. İplik bobinlerine ait fotoğraflar.

3.3. İplikte Bulunan Nemin Durumu

Bir tekstil ürünü, ağırlığının yaklaşık olarak %150-300'ü kadar su tutabilir. Yaş bir tekstil ürününün üzerindeki suyun hepsi aynı durumda bulunmayıp, bulunduğu yere ve tekstil ürünüyle arasındaki bağ durumuna göre şu ayrım yapılabilir.

a) Damlayan su: Liflere hiçbir şekilde bağlı olmayan bu su kısmı, kendi ağırlığının etkisiyle aşağıya doğru akar ve tekstil ürününün alt tarafından damlar. Bu suyun mekanik yollarla uzaklaştırılması kolaylıkla mümkündür.

b) Yüzey suyu: İpliklerin yüzeyine adezyon kuvvetleriyle bağlı olan bu su kısmının uzaklaştırılması için daha yoğun mekanik kuvvetlere gerek vardır. Fakat genellikle bu suyun da tamamı ön kurutma sırasında uzaklaştırılabilir.

c) Kapiler su: İpliklerin içerisinde liflerin yüzeyine adezyon kuvvetleriyle bağlı olan bu suyun ön kurutma sonucu ancak bir kısmı uzaklaştırılabilir.

d) Şişme suyu: Liflerin içerisinde miseller arasında bulunan bu su kısmı, lif kesitlerinin şişmesine yol açmaktadır. Lif moleküllerine dipol kuvvetleriyle bağlı olan bu su kısmının mekaniksel kuvvetlerle uzaklaştırılması mümkün değildir. Şişme suyu liflerden ancak ısı enerjisi yardımıyla uzaklaştırılabilir.

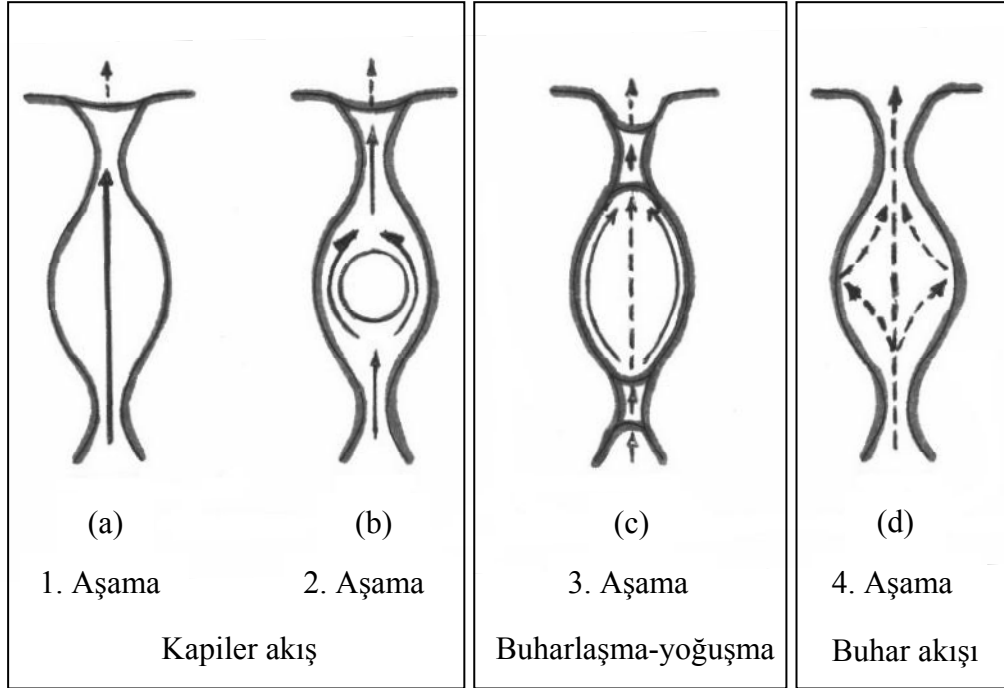
e) Higroskopik su: Şişme suyu gibi liflerin içerisinde miseller arasında bulunan bu su, normal kuru bir tekstil mamulünde bulunması gereken nemdir. Bu nedenle, iyi bir kurutmanın sonunda, bu su kısmının liflerde kalması sağlanmalıdır. Higroskopik nemi uzaklaştırılan bir ürünün tutumu bozulur ve bu su bir kere uzaklaştırıldıktan sonra, lifler tarafından higroskopik olarak bir daha aynı miktarda alınamaz.

Tekstil mamullerinin kurutulmaları sırasında unutulmaması gereken önemli bir nokta, suyun ısı enerjisi yardımıyla uzaklaştırılmasının, mekanik kuvvetler yardımıyla uzaklaştırmaya nazaran çok daha pahalı olduğu konusudur. Bu nedenle suyun mümkün

olan kısmı mekanik yolla uzaklaştırılmalı ve ancak bu şekilde uzaklaştırılamayan kapiler suyunun diğer kısmı ile şişme suyu ısı enerjisi yoluyla uzaklaştırılmalıdır.

3.4. Nemin İplik İçerisindeki Hareketi

Hiçbir teori tek başına nemin gözenekli bir katı içerisindeki hareketini tam olarak tanımlamayabilmek için yeterli değildir. Bununla birlikte bu olayı kavrayabilmek için bu teorilerden birinin kabul edilmesi gerekir. Gözenekli katılar kurumaya başlayınca nem hareketine ait dört aşama gözlenir.



Şekil 3.2. Gözenekli malzemelerin kuruması sırasında, katı içerisindeki nemin çeşitli aşamalardaki durumu (Keey, 1972).

- İlk safhada, hidrolik gradyan altındaki nem sıvı şeklinde akmaktadır. Başlangıçta gözenekler doludur fakat yavaş yavaş, nemin terk ettiği yerleri hava cepleri doldurmaya başlar (Şekil 3.2a).

- İkinci aşamada nem, gözeneklerin orta kısımlarından kenarlara doğru çekilmeye başlar. Nem, kapiler yüzey boyunca hem kayarak, hem de oluşan sıvı köprüleri arasında birbirini takip eden buharlaşma ve yoğuşma prosesleri neticesinde ilerler. Bu proses sıvı-destekli buhar transferi olarak da tanımlanmaktadır (Şekil 3.2b).

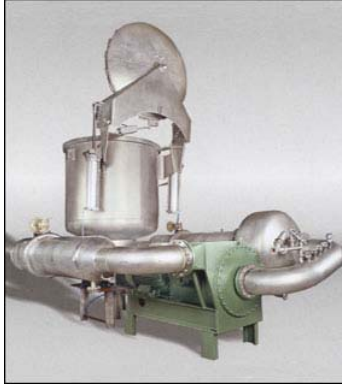
- Kurumanın üçüncü safhasında ise, bu sıvı köprüleri sadece yüzeyde absorbe edilmiş (tutulmuş) olan nemi geride bırakarak tamamen buharlaşır. Nem, buharın bu engellenemez difüzyonu vasıtasıyla ilerler (Şekil 3.2c).

- Dördüncü ve son aşama ise desorpsiyon ve absorpsiyon (kuruma ve nemlenme) şeklinde gerçekleşir. Buharlaşan nem yoğuşur. Bu aşamadan sonra cisim artık çevresiyle higrotermal (nem bakımından) dengededir (Şekil 3.2d) (Keey, 1972).

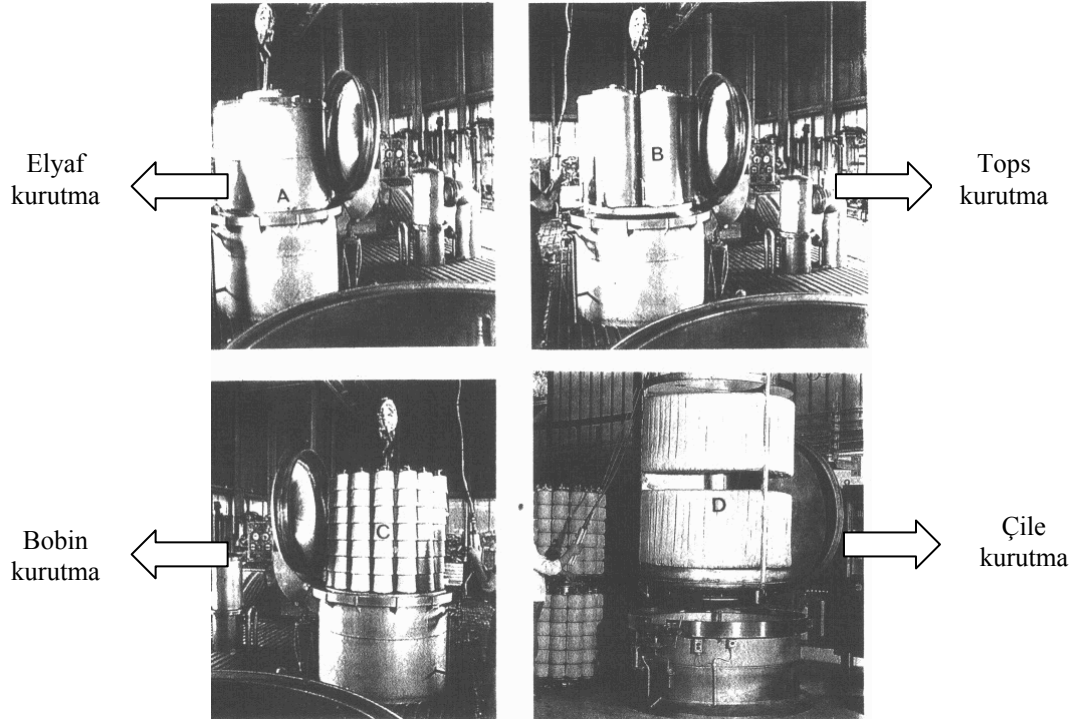
4. İPLİK BOBİNİ KURUTMA YÖNTEMLERİ

4.1. Sıcak Hava ile Kurutma

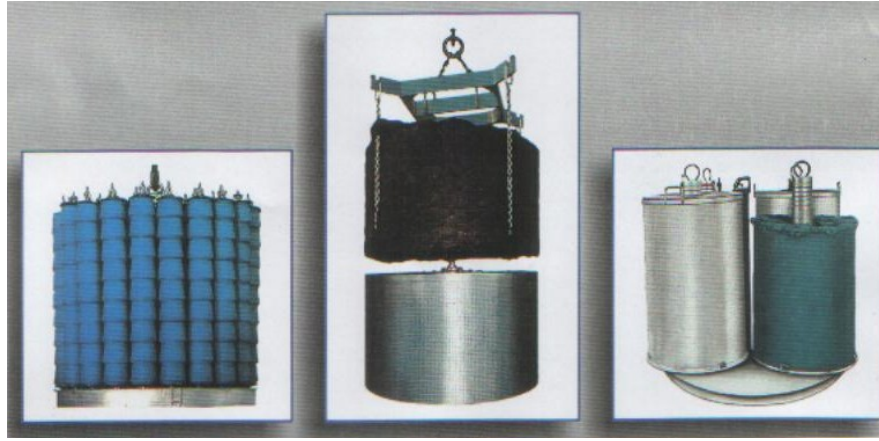
Kurutmanın sıcak hava ile yapıldığı iplik kurutma makineleri, günümüz teknolojisine göre her türlü iplik bobini, elyaf ve tops gibi tekstil materyallerini boya makinesinden sonra aynı taşıyıcıları kullanarak ek bir santrifüj makinesine ihtiyaç duymadan, ön sıkma işlemi ile tekstil ürünlerinin formunu bozmadan iç ve dış nem farkı olmaksızın sıkma ve kurutma için dizayn edilmiş makinelerdir. Şekil 4.1’de bu tip iplik kurutma makinelerine ait bazı fotoğraflar görülmektedir. İplik bobinleri kurutulurken, makinede belli bir basınç ve sıcaklıktaki hava, bir süre bobinlerin dışından içine doğru, bir müddet sonra içinden dışına doğru geçirilerek, bobinlerin dengeli bir şekilde kuruması sağlanır. Bobin kurutma ünitesinden çıkan nemli hava bir soğutma eşanjöründe belli bir sıcaklığa kadar soğutulmak suretiyle içindeki nem yoğunlaştırılarak havadan ayrıştırılır, akabinde bir serpantinden geçirilerek hava fanına gelir. Hava fanı, havayı belirli bir basınç değerine kadar çıkartarak, havanın tekrar ısınması için buharla çalışan ısıtma eşanjörüne gönderir. Isıtma eşanjöründe ısınan hava tekrar bobin kurutma ünitesine gider. Kurutma havasının özgül nemi belli bir süre sonra oldukça artar. Özgül nemi belli bir seviyeye gelen kurutma havası deşarj edilir ve makineye yeniden taze hava alınır. Bobinlerin başlangıç nem oranları %65-70 civarındadır. Bobin kurutma makinesinde ısıtma, kurutma, soğutma işlemleri yapılmaktadır. Aynı makine içine değişik taşıyıcılar konarak elyaf, tops ve diğer materyallerin ön sıkma ve kurutulma işlemleri mümkündür (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Bu kurutma yönteminde düşük enerji sarfıyatı sistemin en avantajlı yönüdür. Ayrıca beyaz ve açık renk boyanmış materyallerde, düşük sıcaklıkta kurutma yapıldığı için sararma tehlikesi, koyu renklerde ise migrasyon tehlikesi oluşmaz. Migrasyon, tekstil materyalinin boyanması ile kuruması arasında oluşan, istenmeyen boyarmadde göçüdür.



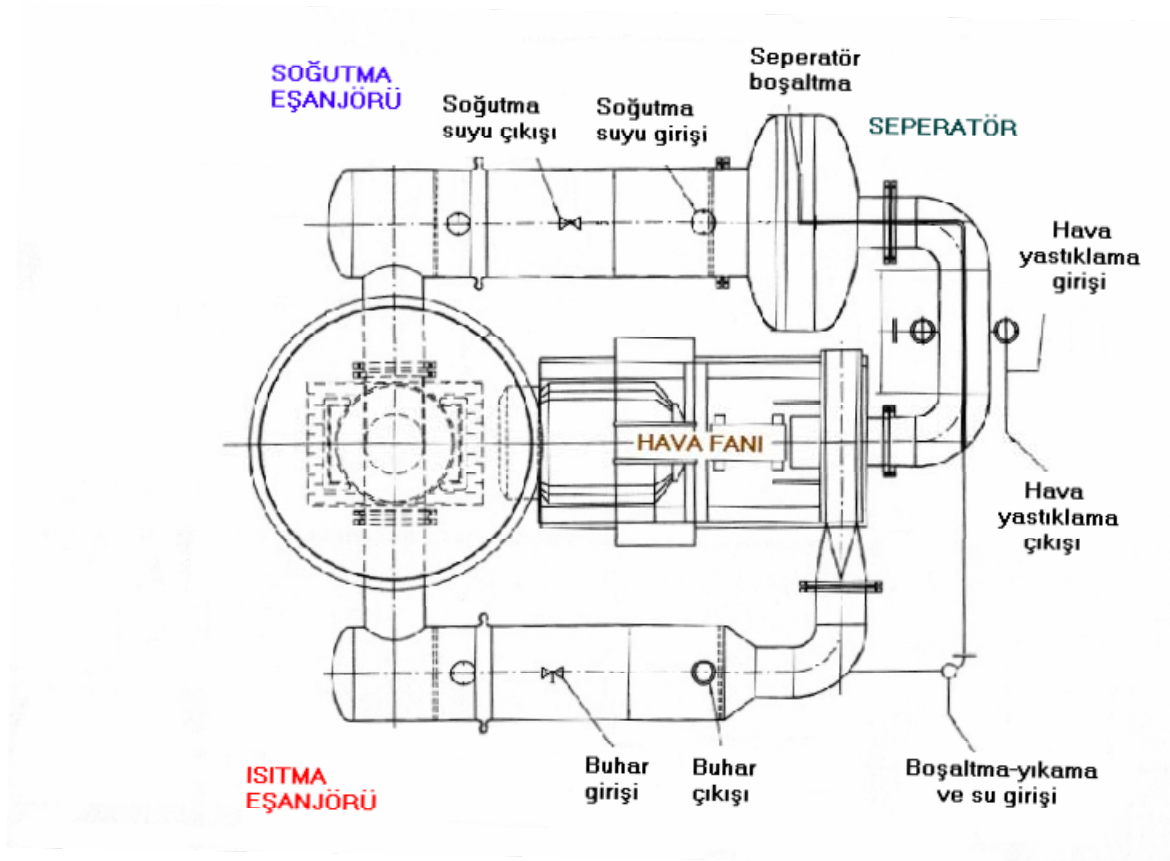
Şekil 4.1. İplik kurutma makinesine ait fotoğraflar.



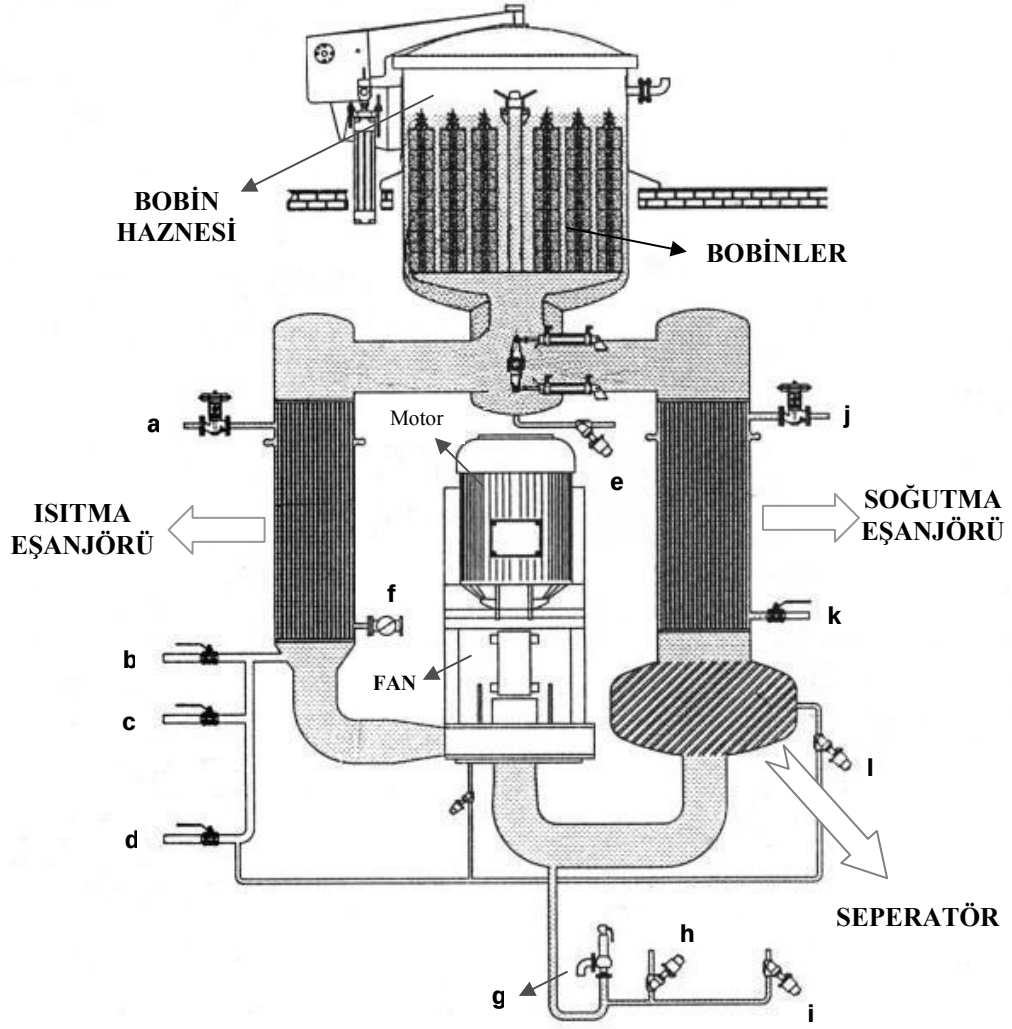
Şekil 4.2. İplik kurutma makinelerinde taşıyıcının değiştirilmesi sayesinde, çeşitli tür ipliklerin paket formlarında kurutulması.



Şekil 4.3. Aynı makine içinde, değişik taşıyıcılar üzerinde bulunabilen bobin, elyaf ve tops halindeki tekstil ürünleri.



Şekil 4.4. İplik bobini kurutma makinesinin üstten görünüşü.



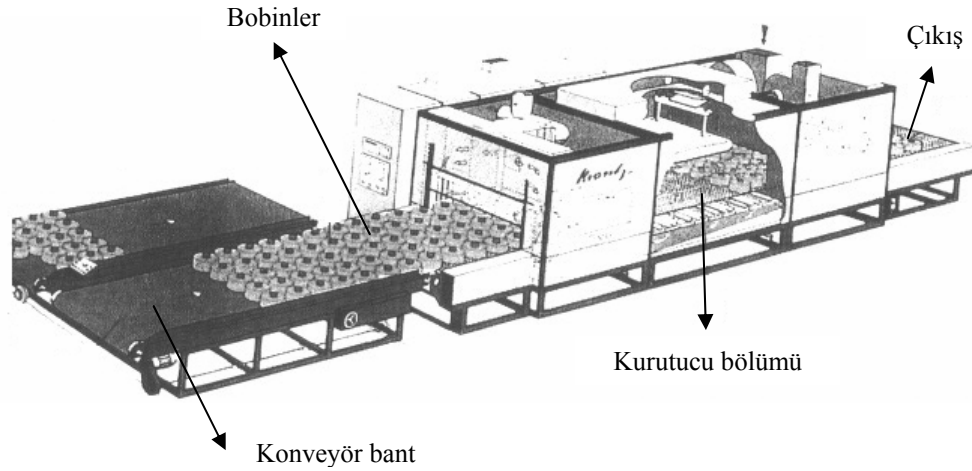
Şekil 4.5. Sıcak hava ile kurutma prensibine göre çalışan
ipplik kurutma makinesinin şematik görünümü.

- (a) Buhar girişi, (b) Su girişi, (c) Basınçlı hava girişi,
(d) Yıkama-boşaltma, (e) Hazne boşaltma, (f) Buhar çıkışı,
(g) Emniyet ventili, (h) Hava yastıklama çıkış, (i) Hava yastıklama giriş,
(j) Soğutma suyu çıkışı, (k) Soğutma suyu girişi, (l) Seperatör boşaltma.

4.2. Yüksek Frekanslı Kurutma

Yüksek frekanslı kurutma makineleri, tekstil materyallerinin iç kısımları ile yüzeylerinin eşit derecede hızlı bir şekilde kurumasını sağlayan makinelerdir.

Yüksek frekanslı kurutma makinelerinin çalışma prensibi, tekstil materyalinin yüksek frekanslı alternatif akıma bağlı iki kondansatör levhası arasına konulmasına, su moleküllerinin bu levhaların + ve – yük durumuna göre dipol oluşturarak belirli bir yerleşme şekli almalarına dayanmaktadır. Levhalarının yükü devamlı olarak (saniyede milyonlarca kez) değiştirildiğinden su moleküllerinin yerleşme şekli de değişmekte, bu sırada moleküllerin sürtünmesinden açığa çıkan ısı, suyun buharlaşmasını sağlamaktadır. Bu tip makinelerde santrifüjden çıkan bobinler taşıma çubukları ile alınır ve ray üzerinde sürekli olarak makineye girer ve kurutucudan çıkar. Bu sistemin bantlı kurutuculara nazaran bazı avantajları vardır. Bunlar; materyalin kirlenmemesi, yer gereksiniminin az olması, materyalin yerleştirilmesinin kolaylığı ve daha az zaman almasıdır.



Şekil 4.6. Yüksek frekanslı bobin kurutma makinesinin şematik görünümü.



Şekil 4.7. Yüksek frekanslı bobin kurutma makinesi.

5. İPLİK BOBİNİNİN KURUTULMASINA TEORİK BİR YAKLAŞIM

5.1. Giriş

Mühendislikte fiziksel olaylar incelenirken, fiziksel olaya etki eden faktörleri belirlemek üzere genellikle teorik ve deneysel yaklaşımlar izlenir. Teorik bir analizin olaya ait büyüklüklerin hangilerinin etken ve hakim olduğunun, bunlar arasındaki dengenin ve olayın ölçeklerinin belirlenmesindeki önemi tartışılmaz. Bu teorik yaklaşımların ne ölçüde gerçeğe yakın olduğunu görmek için de deneysel çalışmaların yapılarak teorik yaklaşımın desteklenmesi gerekir.

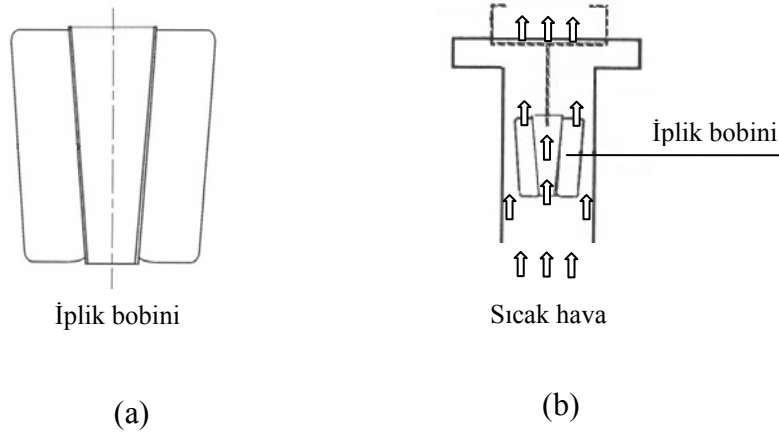
5.2. Teorik Yaklaşımlar

İplik gibi gözenekli higroskopik malzemelerin kurutulması, eşzamanlı ısı ve kütle transferini ihtiva eden karmaşık bir prosestir. Yapılmış olan çalışmaların birçoğunda, kuruyan malzeme içerisinde ve bu malzeme ile malzemenin etrafını çevreleyen kurutma havası arasında meydana gelen ısı ve kütle aktarım prosesleri genellikle enerji ve kütle transferi denklemleri yardımı ile ifade edilmektedir.

Araştırmacılar, malzemenin geometrisi, fiziksel yapısı ve kuruma olayı hakkında değişik kabuller yaparak modeller ortaya koymuşlardır. Bu yaklaşımlardan birisi, gözenekli malzemelerin kurutulması sırasında, malzeme içerisinde faz değişiminin meydana geldiği ve bu durum için ısı ve kütle transferinin hareketli bir buharlaşma ara yüzeyi ile ifade edildiği hareketli sınır modelidir. Bu düşünceye göre gözenekli, katı malzemelerin kurutulması sırasında kurumaya bağlı olarak suyun malzeme yüzeyinden, malzemenin iç kısımlarına doğru geri çekilmekte olan hareketli bir ara yüzey üzerinde buharlaştığı göz önünde bulundurulmaktadır. Bu yöntemle göre oluşturulan modeller daha sonra uygun başlangıç ve sınır koşulları yardımıyla analitik olarak veya sayısal teknikler kullanılarak çözülebilmektedir.

Ribeiro ve Ventura (1995), yün iplik bobinlerinin paralel hava sirkülasyonu ve içten dışa doğru hava sirkülasyonu yardımıyla olmak üzere iki şekilde kurutulmasıyla ilgili olarak iki ayrı bölümden oluşan deneysel bir çalışma yapmışlardır.

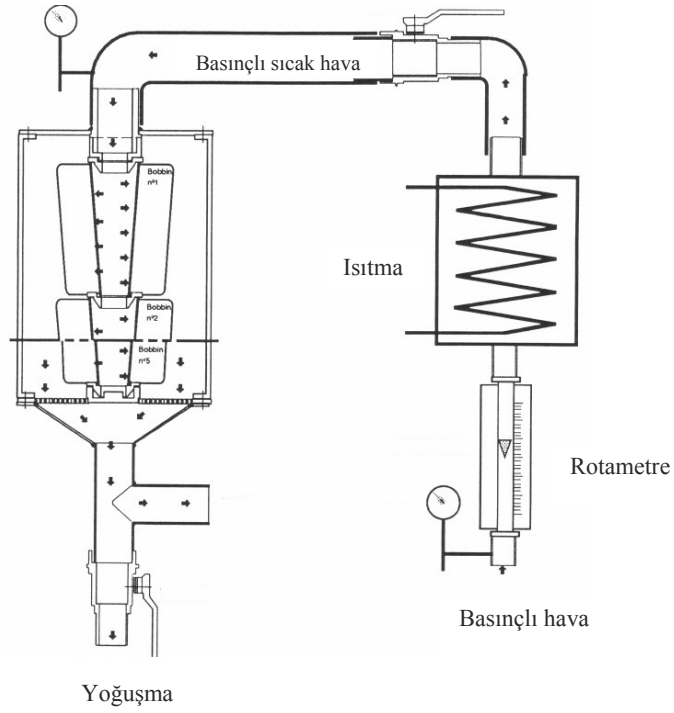
Birinci bölümde bir adet yün iplik bobini sıcak hava ile kurutulmuştur. Ortam havası bir fan vasıtası ile rüzgar tüneli içerisine alınarak burada bir elektrikli ısıtıcı yardımı ile ısıtılmakta ve bobin üzerinden geçirilmektedir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, sıcak hava bobin eksenine paralel şekilde, aynı anda bobinin hem içinden hem de dışından geçmektedir. Deneylerde kurutma havası sıcaklıkları 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C, hava hızları 2, 3 ve 4 m/s olarak seçilmiştir.



Şekil 5.1. (a) İplik bobini, (b) Rüzgar tüneli içerisinde paralel sıcak hava akımına maruz bırakılmış iplik bobininin şematik gösterimi.

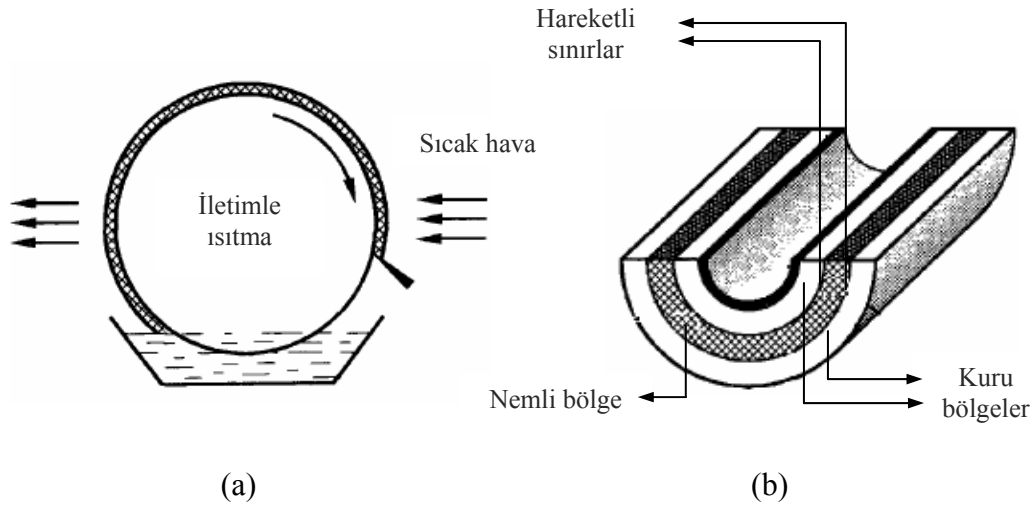
Kurumanın başlamasıyla birlikte bobin içerisinde iki adet hareketli buharlaşma sınırı meydana gelmektedir. Bu sınırlar kuru bölge ile nemli bölgeyi ayıran, kuruma ilerledikçe birbirlerine doğru yaklaşan ve kuruma sonunda birbirleri üzerine çakışarak ortadan kaybolan hareketli buharlaşma sınır çizgileridir.

Çalışmanın ikinci bölümünde Şekil 5.2’de görüldüğü gibi üst üste beş adet iplik bobininin yerleştirilmiş olduğu, basınçlı havanın kullanıldığı ve bu havanın bobinin içerisinden, radyal doğrultuda bobinin iç kısmından dışına doğru geçirildiği bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu durumda bobinlerin iç kısmından dış kısmına doğru hareket eden sadece bir adet hareketli buharlaşma sınırı meydana geldiği göz önünde bulundurulmuştur. Bu düzenekte bobinlerin sahip oldukları toplam nem içerik değerleri, kurutucuya giren hava ile kurutucudan çıkan havanın sahip olduğu nem miktarları arasındaki farkın ölçülmesiyle tespit edilmiştir



Şekil 5.2. Çalışmanın ikinci bölümü için basınçlı ve içten dışa doğru sirkülasyonlu hava akımının kullanıldığı deney düzeneğinin şematik görünümü (Ribeiro ve Ventura, 1995).

Çözeltilerin vakumlu ortamda kurutulmasıyla ilgili olarak yapılan bir çalışmada (Nastaj, 2000), ısı ve kütle transferi, silindirik geometri için radyal doğrultuda bir boyutlu olarak ele alınmış ve göz önünde bulundurulmuş iki bölge, parabolik, hareketli sınır değer problemi sayısal olarak çözülmüştür. Silikajel ve sülfamerazin çözeltilerinin kurutulduğu döner tamburlu silindirik bir kurutucu üzerinde yeni bir nümerik model geliştirilmiştir.



Şekil 5.3. (a)-Tambur kurutucu, (b)-Hareketli buharlaşma sınırlarının oluşumunu gösteren fiziksel model (Nastaj, 2000).

Çalışmada tambur kurutucuların, ısıya duyarlı ürünleri yüksek sıcaklıklarda kısa bir süre içerisinde kurutmak için uygun olduğu ifade edilmiştir. Silindir şeklindeki tambur iç kısmından ısıtılmakta, dış yüzeyi doğrudan çözelti ile temas etmekte ve burada çözelti ile tambur arasında iletimle ısı transferi meydana gelmektedir. Çözeltinin diğer tarafı da üzerinden sıcak hava akımı geçirilmek suretiyle zorlanmış taşınım ile ısı transferine maruz kalmaktadır. Ortaya konan problem silindirik geometride iki bölge, parabolik, hareketli sınır koşuluna sahip sınır değer problemi olarak nitelendirilmiştir.

Çalışmada aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

- Isı ve kütle transferi radyal doğrultudadır,
- Buharlaşma sadece hareketli sınırlar üzerinde meydana gelmektedir,
- Kuru bölgeler üniform olup, sabit termofiziksel özelliklere sahiptir,
- İdeal bir yalıtım yapıldığı varsayılmıştır.

Fiziksel model oluşturulurken öncelikle uygun diferansiyel denklemler ve sınır şartları belirlenmiştir. Kuruma sırasında iç ve dış taraflarda iki adet kuru bölge ve bunların arasında kalan bir nemli bölge oluşmaktadır. Hareketli sınırlar üzerinde aşağıdaki eşitlik yazılmıştır.

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = -(X_i - X_d) \rho h_v \frac{dR}{dt} \quad (5.1)$$

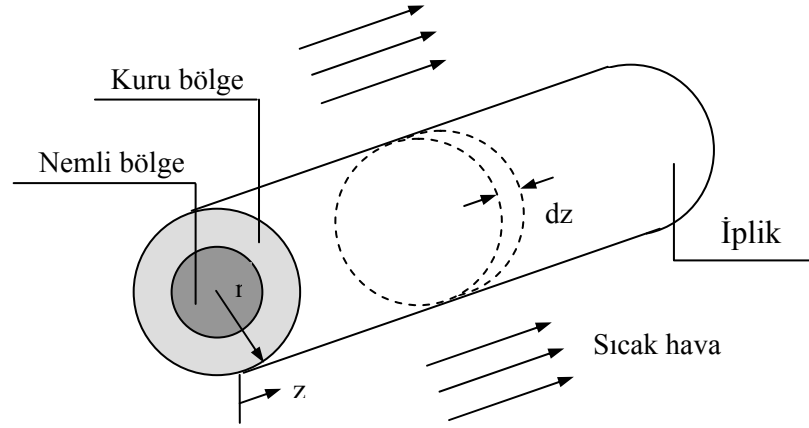
Burada;

- k : Isı iletim katsayısı, W/(mK)
T : Sıcaklık, K
r : Radyal doğrultu, m
R : Hareketli sınır konumu, m
X_i : Başlangıç durumundaki nem içeriği, kg nem/kg kuru madde
X_d : Denge durumundaki nem içeriği, kg nem/kg kuru madde
ρ : Yoğunluk, kg/m³
t : Zaman, s
h_v : Buharlaşma gizli ısıdır, J/kg

Bütün bu bölgeleri ayıran sınırlar için sınır şartları yazıldıktan sonra ifadeler boyutsuzlaştırılarak problem integral transform tekniği ile çözülmüştür.

Lee, vd., (2000) tarafından yapılan bir araştırmada boyanmış halı ipliklerinin kurutulmasıyla ilgili iki boyutlu matematiksel bir model geliştirilmiştir. Gözenekli

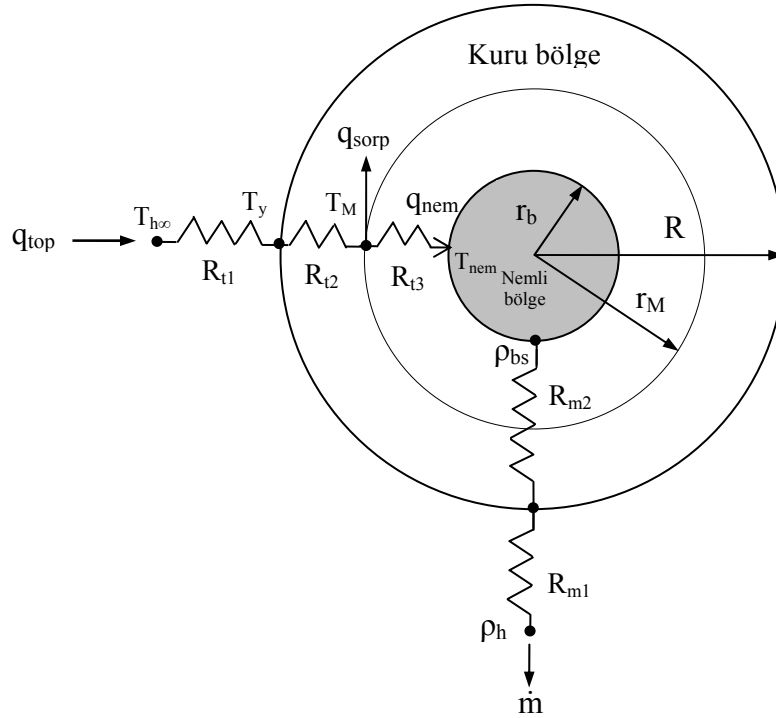
silindirik ortam üzerinden eksene paralel şekilde sıcak hava geçirilmiş, ortamın enerji ve kütle korunumu göz önünde bulundurularak, ısı ve kütle transferi hesaplanmıştır.



Şekil 5.4. Bir iplik parçasının kuruma şeklinin şematik gösterimi (Lee, vd., 2002).

Model oluşturulurken, elde edilen üç adet non-lineer diferansiyel denklemler sistemi sonlu farklar metodu yardımı ile sayısal olarak çözülmüştür. Oluşturulan bu modeli doğrulamak amacıyla deneysel olarak iki ayrı tipte deneysel yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birisi manyetik görüntüleme sistemi, diğeri ise bir laboratuvar ortamında kurulmuş bir deney düzeneğidir. Çalışmada her ikisinden elde edilen sonuçlarla, nümerik yöntemle elde edilen model sonuçlarının uyum içerisinde oldukları görülmüştür. İplikler, deney düzeneğinde kurutulmadan önce vakumlanmış ve sahip oldukları nem içerikleri kurumaya başlamadan önce %50 değerine kadar düşürülmüştür. Manyetik görüntüleme sisteminin kullanıldığı düzenekte halı iplikleri hava akımına paralel bir şekilde yerleştirilmiştir. Bunun için 1,5 mm yarıçapında, 19 mm uzunluğunda ve 2 mm yarıçapında, 11,7 mm uzunluğunda silindirik geometriye sahip iki tür halı iplik parçası kullanılmıştır. Sistemde kurutma havası elektrikli bir ısıtıcı ile ısıtılmış; iplikler ise, deney düzeneği içerisine birbirlerine paralel duracak şekilde bir arada küme halinde kurumaya maruz bırakılmıştır. Halı ipliği içerisindeki nem, manyetik rezonans görüntüleme vasıtası ile iki boyutlu olarak görüntülenmiştir.

Kurumanın ilerlemesiyle nemin iplik merkezine doğru çekilmekte olduğu varsayılararak, sistem Şekil 5.5’de görüldüğü gibi modellenmiştir.



Şekil 5.5. İpliğin kesit görünüşünde ısı ve kütle transferinin şematik gösterimi.

Laboratuvar ortamında hazırlanmış olan ve çalışmanın ikinci bölümünü oluşturan deney düzeneğinde ise, kuruma sırasında iplikler tartılmış ve nem içeriğinin zamanla değişimi belirlenmiştir. Deneyler, farklı çap ve uzunluklara sahip iki tür halı ipliği üzerinde yapılmıştır. Deneylerde hava hızı 20 m/dk ve 30 m/dk, hava sıcaklığı ise 80°C ve 116°C olarak alınmıştır. Kuruma işlemlerinin en fazla 180 ile 190 s kadar sürdüğü bu çalışmada, ipliklerdeki toplam nem içeriği %5 değerinin altına düştüğünde ipliğin tamamen kuruduğu kabul edilmiştir.

Model oluşturulurken, iplik kesitinde kuruma sırasında oluşan nemli ve kuru bölgelere ait ısı ve kütle transferi göz önünde bulundurmuş, ısı ve kütle transferinin sadece radyal doğrultuda gerçekleştiği varsayılmıştır. Matematiksel modelleme

yapılırken iplik için ayrı bir model, iplik üzerinden geçen hava akımı için de ayrı bir model oluşturulmuştur. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi ipliğin kuruma prosesi modellenirken ısı ve kütle dirençleri kullanılmıştır. İpliğin kuruması sırasında, dış kısımdan ipliğin iç kısmına doğru hareket eden ve kuruma sonunda iplik merkezinde kaybolan hareketli bir buharlaşma sınırı göz önünde bulundurulur, bu durum için iplik içerisindeki enerji dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$q_{top} = \dot{m}h_v + \left[\left(\frac{r_b^2}{R^2} \right) m_k c_{pk} + m_n c_{pn} \right] \frac{\partial T_n}{\partial t} + \left(1 - \frac{r_b^2}{R^2} \right) m_k c_{pk} \frac{\partial T_M}{\partial t} \quad (5.2)$$

Burada,

q_{top} : Toplam enerji, W

h_v : Buharlaşma gizli ısı, J/kg

m_k : Kuru haldeki lif kütlesi, kg

m_n : Sıvı haldeki suyun kütlesi, kg

r_f : Buharlaşma sınırının konumu, m

c_{pk} : Kuru kısmın özgül ısı, J/(kgK)

c_{pn} : Nemli kısmın özgül ısı, J/(kgK)

T_n : Nemli kısımdaki sıcaklık, K

T_M ise kuru bölgenin ortalama sıcaklığı olup aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$T_M = T_{nem} + \frac{\ln(r_M / r_f)}{2\pi k dz} q_{nem} \quad (5.3)$$

Çalışmada, hava akımı içerisindeki ısı ve kütle transferi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\left[\rho_{h\infty} \frac{\partial Y}{\partial t} + j_{h\infty} \frac{\partial Y}{\partial z} \right] dz = \dot{m} \quad (5.4)$$

$$(c_{ph} + Yc_{pb}) \left(\rho_{h\infty} \frac{\partial T_{h\infty}}{\partial t} + j_{h\infty} \frac{\partial T_{h\infty}}{\partial z} \right) dz = q_{top} \quad (5.5)$$

Burada,

$\rho_{h\infty}$: Havanın yoğunluğu, kg/m^3

Y : Havanın nem oranı, $kg\ nem/kg\ kuru\ hava$

$j_{h\infty}$: Havanın kütle akısı, kg/s

t : Zaman, s

z : z doğrultusu, m

c_{ph} : Kuru havanın özgül ısınma ısısı, $J/(kgK)$

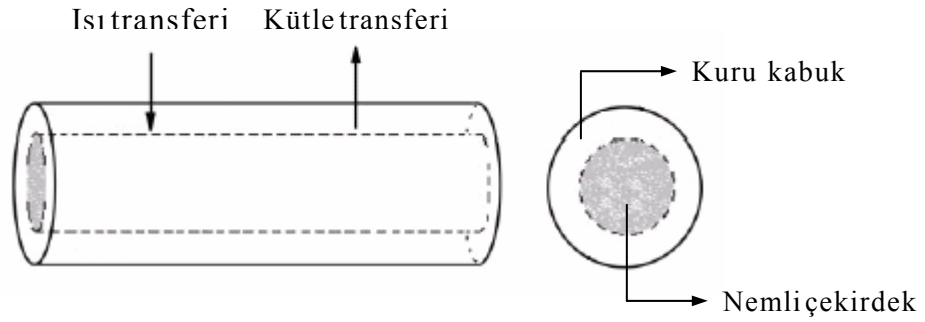
c_{pb} : Hava içerisindeki buharın özgül ısınma ısısı, $J/(kgK)$

$T_{h\infty}$: Havanın sıcaklığıdır, K

Havanın nem oranı ve sıcaklığı için başlangıç şartları belirlenmiş, daha sonra bu denklemler sonlu farklar yöntemi ile çözülmüştür. Basitleştirilmiş bu matematiksel model yardımı ile halı ipliklerinin kuruma miktarları ve kuruma süreleri tespit edilebilmektedir.

Smith ve Farid (2004), deneysel çalışmalarında silindirik geometriler için hareketli sınır teorisini göz önünde bulundurarak malzemelere ait kuruma sürelerinin tespit edilmesine olanak sağlayan bağıntılar elde etmişlerdir. Bu çalışmalarında kuruma sırasında malzemenin kuru hale gelen kısımlarının düşük ısı iletkenliğe sahip olduğu ve bu nedenle kurumuş olan bu kısımların ısı ve kütle transferine karşı yüksek direnç gösterdiği varsayılmıştır. Göz önünde bulundurdıkları modelde (Şekil 5.6), silindirik malzeme içerisinde nemli bir çekirdek bölge, bu bölgeyi çevreleyen kuru bir kabuk bölge ve bu iki bölgeyi birbirinden ayıran hareketli bir buharlaşma sınır bölgesi mevcuttur. Bu hareketli sınır bölgesinin sıcaklığı yaş termometre sıcaklığındadır. Burada kuruma düzeni üç aşama ile karakterize edilmektedir. Bunlar sırasıyla ilk olarak nemli malzemenin duyulur ısısı, bunu takip eden ve faz değişimi ile ilgili olan gizli ısı ve son olarak da malzemenin kuruyan kısmının duyulur ısısıdır. Bu kuruma düzenine göre malzemenin herhangi bir noktasındaki sıcaklık ani bir şekilde kritik sıcaklığa

yükselmekte ve bu noktadaki suyun tamamı buharlaşana kadar bu kritik sıcaklık değerinde sabit olarak kalmaktadır. Bu noktadaki suyun tamamı buharlaştıktan sonra ise kuru noktanın sıcaklığı ısıtma havasının sıcaklığına doğru yaklaşmaktadır. Kuruma sırasında nemli bölge içerisindeki duyulur ısı uygulamaların birçoğunda ihmal edilebilmektedir. Kurumuş olan bölgede ise duyulur ısı buharlaşma gizli ısısına nazaran oldukça düşüktür.



Şekil 5.6. Sonsuz silindir için hareketli ara yüzey modelinin şematik gösterimi (Smith ve Farid, 2004).

Hussain ve Dinçer tarafından yapılmış olan bir çalışmada, sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak silindirik bir cismin kurutulması sırasındaki ısı ve nem transferine ait iki boyutlu sayısal bir analiz yapılmıştır. Farklı zaman periyotları için nemli cisim içerisinde sıcaklık ve nem dağılımları elde edilmiştir. Kuruma simülasyonunu ortaya koymak için kullanılan matematiksel model, ısı iletimi ile ilgili olarak iki boyutlu Fourier kanunu ve kütle difüzyonu ile ilgili olarak iki boyutlu Fick kanunları üzerine kurulmuştur. Fick denklemi, ısı iletimi için kullanılan Fourier denklemine benzemektedir. Sadece Fourier denklemi içerisindeki sıcaklık ve ısı difüzivite ifadelerinin yerini, Fick denkleminde sırasıyla nem içeriği ve nem difüzivitesi almaktadır.

Çalışmada, ısı ve nem transferi için sırasıyla aşağıdaki denklemler yazılmıştır.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5.6)$$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (5.7)$$

Burada;

X : Nem içeriği, kg nem/kg kuru madde

D : Difüzyon katsayısıdır, m²/s

Dietl vd. (1998), küresel, silindirik ve düz levha şeklindeki geometrilere sahip, kapiler gözenekli higroskopik malzemelerin kuruma davranışlarını tespit etmek amacıyla sayısal bir model geliştirmişler, invers prosedür yardımıyla iletkenlik ve buhar difüzyon direnç katsayılarını belirlemişlerdir. Model, diferansiyel bir kontrol hacmi için sıvı ve buhar hallerindeki enerji ve kütle dengesi üzerine kurulmuştur. Malzeme içerisinde meydana gelen ısı transferi için gözenekler içerisinde buhar hareketinin başlattığı hava akışı ve ısı difüzyon ihmal edilmiş, malzeme içerisinde ısı üretiminin veya kimyasal reaksiyonun olmadığı göz önünde bulundurulmuş ve problem tek boyutlu hale getirilmiştir. Enerji ve kütle dengesi, malzemenin nem içeriği ve sıcaklığı için bir dizi kısmi diferansiyel denklemin yazılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu model denklemleri, konu ile ilgili bütün katsayılar bilindiğinde sayısal olarak çözülebilmektedir.

Literatürde çeşitli tekstil lifleri veya tekstil malzemelerindeki ısı ve kütle transferi mekanizmalarının anlaşılmasına ve açıklanmaya çalışıldığı, bunlara ait matematiksel modellerin sunulduğu, ayrıca bazı faktörlerin ısı ve kütle transferi üzerine olan etkilerinin araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Bu çalışmalardan bazılarında malzeme kalınlığı, gözeneklilik miktarı, gözenek boyut dağılımı ve lif çapı gibi faktörlerin gözenekli tekstil malzemelerinde meydana gelen ısı ve nem transferi üzerine olan etkileri incelenmiş ve bunlara uygun modeller geliştirilmiştir (Zhu ve Li, 2003, Li, vd., 2002).

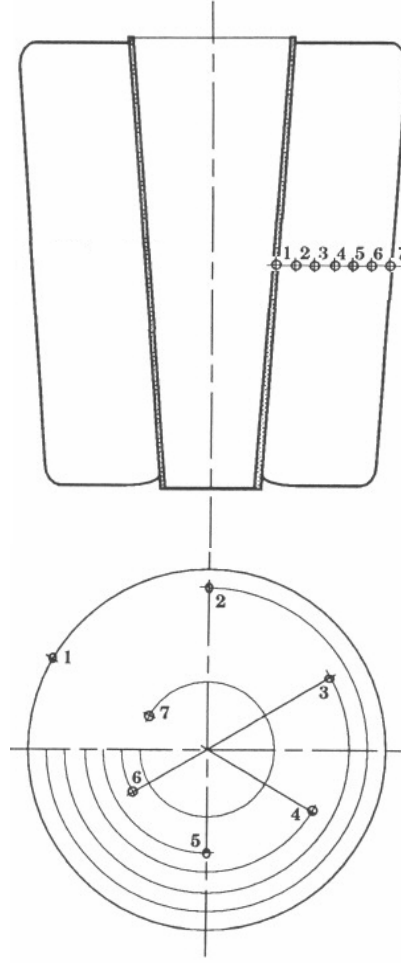
Atmosfer şartlarının dokumalar içerisinde meydana gelen ısı, su ve gaz transferi üzerine olan etkisinin araştırıldığı bir çalışmada eşzamanlı ısı ve kütle transferi için dinamik bir model ortaya konmuştur (Zhongxuan, vd., 2004). Yn dokuma malzemesi için nem difüzyonu ve ısı transferinin ele alındığı başka bir çalışmada ise matematiksel bir simülasyon geliştirilerek bu model sonlu farklar yardımı ile nümerik olarak çözülmüştür (Li ve Zhongxuan, 1999).

5.3. Matematiksel Model ve Problem Çözümü

Bu çalışmada, boyanmış iplik bobinlerinin sıcak hava ile kurutulması işlemine ait teorik bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla literatürden alınan deneysel sonuçlardan yararlanılarak yün iplik bobinine ait termofiziksel özellikler belirlenmiştir. Daha sonra matematiksel bir model oluşturulmuş ve uygun sınır koşulları yardımıyla problem çözülmüştür.

5.3.1. Deney düzeneği

Ribeiro ve Ventura (1995) yaptıkları deneyde, yün iplik bobinini sıcak hava ile kurutmuşlardır. Deneyler 20°C sıcaklığında, %60 bağıl neme sahip bir ortamda yapılmıştır. Ortam havası bir fan vasıtası ile rüzgar tüneli içerisine alınarak burada bir elektrikli ısıtıcı yardımı ile ısıtılmış ve asılı halde bulunan iplik bobininin üzerinden geçirilmiştir. Sıcak hava bobin eksenine paralel olarak akmakta, aynı anda hem bobinin iç kısmından, hem de bobinin dış yüzeyinden geçmektedir. Kurutma havası sıcaklığı 90°C, hızı ise 4 m/s'dir. Kuruma başlangıcında nemli bobinin her tarafının sıcaklığının 17°C olduğu kabul edilmiştir. Deneylerde kullanılan yün iplik bobininin kuru haldeki ağırlığı yaklaşık olarak 500 gramdır. Konik şekle sahip iplik bobininin iç çapı 35 mm ile 60 mm arasında, dış çapı ise 130 mm ile 160 mm arasında değişmektedir. Bobin 150 mm uzunluğunda olup, iplik, üzerinde delikler bulunan polietilen malzeme üzerine sarılıdır.



Şekil 5.7. İplik bobini içerisinde sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar.

Sıcaklık ölçümlerini yapmak için Şekil 5.7’de görüldüğü gibi iplik bobininin içerisine radyal yönde eşit aralıklarla, bobinin alt ve üst tarafından eşit uzaklıklarda ve farklı açılarda 7 adet bakır konstantan termokupl bağlanmıştır. Yapılan deneyler, bobin uzunluğu boyunca meydana gelen sıcaklık farklarının önemli olmadığını göstermiştir. Bu da prosesin matematiksel modelinin silindirik koordinatlarda radyal doğrultuda bir boyutlu şekilde ifade edilebileceğini ortaya koymaktadır. Kuruma sırasında malzeme içerisindeki toplam nem içeriği deney süresince bobinlerin ağırlıklarının tartılması ile tespit edilmiştir.

5.3.2. Deneysel verilerin grafik üzerinden alınması

Yün iplik bobinine ait termofiziksel özellikleri belirlemek amacıyla Ribeiro ve Ventura'nın (1995) çalışmasındaki grafikten, iplik bobinine ait sıcaklık ve nem değerleri alınmıştır. Bu verileri doğru bir şekilde belirlemek için bir bilgisayar paket programı (GetData ver. 2.21) kullanılmıştır. Bu programda öncelikle grafik üzerinde bir ölçek oluşturulmakta, daha sonra veri noktaları tek tek işaretlenmek suretiyle değerler hassas ve doğru bir şekilde tespit edilebilmektedir. İşaretlenen noktaların doğrulukları grafik üzerinde zaman aralıkları yardımıyla işaretleme sırasında kontrol edilmiştir. Zira grafikte bu eksen üzerindeki verilerin 10'ar dakikalık zaman aralıklarıyla gösterildiği bilinmektedir. Ayrıca kullanılan paket programı, işaretleme sırasında işaretlenmek istenen verinin bulunduğu bölgeyi büyüterek daha detaylı bir şekilde göstermekte, böylece hatalı işaretleme olasılığını ortadan kaldırmaktadır.

İplik bobininin sıcak hava ile kurutulması deneyine ait literatürdeki grafik üzerinden elde edilmiş sıcaklık ve nem içerik verilerine ait değerler Tablo 5.1'de verilmiştir. Tablo 5.1'de görüldüğü gibi deneyler sırasında iplik bobini içerisinde ölçüm yapılan 7 ayrı noktada (iç yüzeyden dış yüzeye doğru, $r_1, r_2, \dots, r_7$) elde edilen sıcaklık ölçümleri ile kuruma sırasında bobin ağırlığının tartılmasıyla belirlenen nem içerik ölçümlerine ait değerler, verilerin alındığı grafik üzerinde toplam 600 dakikalık bir süreç içerisinde 10'ar dakikalık zaman aralıklarıyla gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Bobin içerisinde farklı noktalardaki sıcaklıklar ve bobinin nem içeriğinin zamanla değişimi.

<i>SÜRE</i> (dakika)	DENEYSEL SICAKLIKLAR (T _d , °C)							<i>TOPLAM NEM İÇERİĞİ</i>
	r ₁ (cm) 2,57	r ₂ (cm) 3,25	r ₃ (cm) 3,93	r ₄ (cm) 4,61	r ₅ (cm) 5,29	r ₆ (cm) 5,97	r ₇ (cm) 6,65	<i>kg nem</i> <i>kg kuru bobin</i>
0	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	0.50
10	41.99	24.09	19.22	18.09	19.51	27.15	77.26	0.47
20	51.32	33.83	27.50	25.90	28.67	34.64	82.55	0.45
30	56.98	36.51	33.02	32.60	33.70	39.65	83.89	0.43
40	61.25	38.47	37.61	37.48	38.32	42.87	84.47	0.42
50	64.34	41.44	40.18	39.86	41.25	45.13	85.00	0.41
60	66.49	44.71	41.54	41.18	41.68	46.31	85.34	0.39
70	68.12	47.18	41.92	41.90	42.57	47.39	85.69	0.38
80	69.25	47.47	43.10	42.29	43.28	50.01	85.85	0.37
90	70.09	47.60	43.34	42.45	43.36	52.08	86.01	0.36
100	70.93	47.69	43.37	42.48	43.58	53.89	86.24	0.35
110	71.57	47.72	43.43	42.51	43.63	55.41	86.30	0.34
120	72.04	47.78	43.45	42.54	43.65	56.91	86.39	0.32
130	72.57	47.82	43.48	42.56	43.67	58.12	86.50	0.31
140	72.99	47.91	43.52	42.58	43.69	59.20	86.51	0.30
150	73.29	48.39	43.54	42.59	43.71	60.22	86.53	0.30
160	73.58	48.97	43.56	42.63	43.75	61.27	86.72	0.29
170	73.92	49.50	43.60	42.68	43.76	62.17	86.77	0.28
180	74.11	50.05	43.64	42.73	43.80	62.80	86.79	0.27
190	74.66	50.55	43.68	42.83	43.82	63.70	86.80	0.26
200	74.77	51.27	43.72	42.99	43.85	64.70	86.81	0.25
210	74.80	51.77	43.74	43.01	43.92	65.01	86.83	0.25
220	74.83	51.98	43.76	43.04	43.99	65.10	86.85	0.24
230	75.15	52.61	43.78	43.06	44.34	65.94	86.86	0.23
240	75.34	53.04	43.81	43.07	44.97	66.52	86.88	0.22
250	75.58	53.57	43.83	43.09	45.58	67.07	86.89	0.22
260	75.64	53.91	43.85	43.14	46.34	67.55	86.90	0.21
270	75.72	54.31	43.90	43.18	47.06	68.02	86.91	0.20
280	75.93	54.63	43.96	43.22	47.69	68.45	86.92	0.20
290	76.04	55.10	44.00	43.26	48.32	68.84	86.93	0.19
300	76.10	55.31	44.40	43.30	48.95	69.32	86.95	0.18

Tablo 5.1. (devamı)

<i>SÜRE</i> (dakika)	DENEYSEL SICAKLIKLAR (T _d , °C)							<i>TOPLAM NEM İÇERİĞİ</i>
	r ₁ (cm) 2,57	r ₂ (cm) 3,25	r ₃ (cm) 3,93	r ₄ (cm) 4,61	r ₅ (cm) 5,29	r ₆ (cm) 5,97	r ₇ (cm) 6,65	<i>kg nem</i> <i>kg kuru bobin</i>
310	76.29	55.82	44.44	43.34	49.61	69.64	86.99	0.18
320	76.37	56.11	44.48	43.38	50.09	70.09	87.00	0.17
330	76.38	56.38	44.52	43.42	50.77	70.38	87.01	0.17
340	76.40	56.51	44.56	43.46	51.33	70.41	87.02	0.16
350	76.41	56.91	44.58	43.50	51.78	70.89	87.04	0.15
360	76.60	57.12	44.62	43.54	52.38	71.13	87.06	0.15
370	76.71	57.39	44.64	43.58	52.83	71.52	87.07	0.14
380	76.76	57.68	44.68	43.62	53.41	71.84	87.08	0.14
390	76.92	57.92	44.70	43.66	53.91	72.21	87.10	0.13
400	76.93	58.08	44.74	43.70	54.42	72.35	87.11	0.13
410	77.14	58.40	44.76	43.74	54.97	72.75	87.12	0.12
420	77.15	58.61	44.78	43.78	55.63	72.98	87.13	0.12
430	77.20	58.77	44.80	43.82	56.00	73.17	87.14	0.11
440	77.22	58.96	44.84	43.86	56.45	73.44	87.15	0.11
450	77.37	59.07	44.90	44.54	56.98	73.65	87.18	0.11
460	77.39	59.28	44.96	45.62	57.35	73.87	87.19	0.10
470	77.41	59.55	45.15	46.83	57.85	74.18	87.20	0.10
480	77.42	59.61	46.49	47.98	58.38	74.37	87.21	0.09
490	77.44	59.63	47.70	49.40	59.22	74.59	87.22	0.09
500	77.47	59.70	49.07	50.95	59.70	74.72	87.23	0.09
510	77.50	59.75	50.67	52.60	60.69	75.09	87.24	0.08
520	77.53	60.04	52.16	54.13	61.77	75.41	87.25	0.08
530	77.56	60.62	53.82	55.70	62.85	75.62	87.28	0.08
540	77.72	61.31	55.45	57.25	63.88	76.05	87.29	0.07
550	78.12	62.28	57.10	58.91	64.93	76.58	87.30	0.07
560	78.33	63.20	58.67	60.40	66.11	76.92	87.31	0.07
570	78.60	64.31	60.25	62.08	67.16	77.37	87.32	0.07
580	79.02	65.31	61.90	63.71	68.29	77.85	87.33	0.06
590	79.39	66.41	63.66	65.15	69.50	78.27	87.35	0.06
600	79.87	67.57	65.11	66.83	70.63	78.87	87.49	0.06

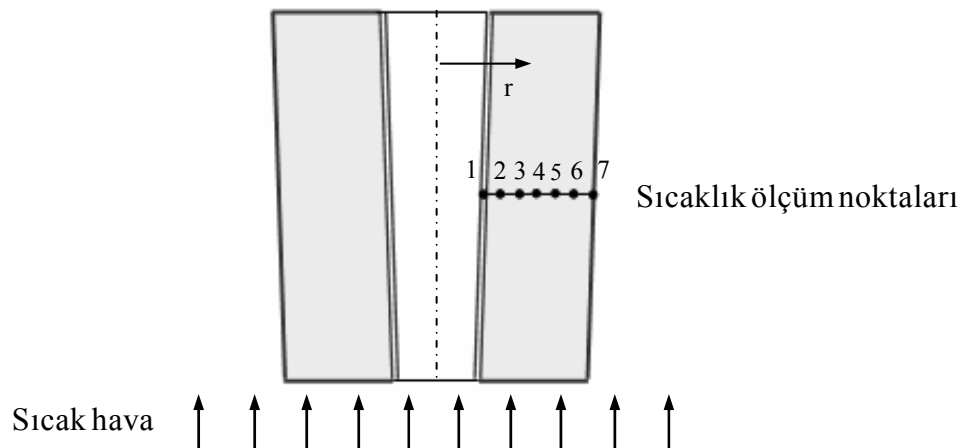
5.3.3. Matematiksel model

Isı ve kütle transferi problemleri genellikle lineer olmayan problemlerdir. Özellikle ısı transferi problemlerinin çözümü, sistemde sıcaklığın zamana bağlı olarak değişimini bulmaktan ibarettir. Sıcaklık değişiminin bulunması için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir.

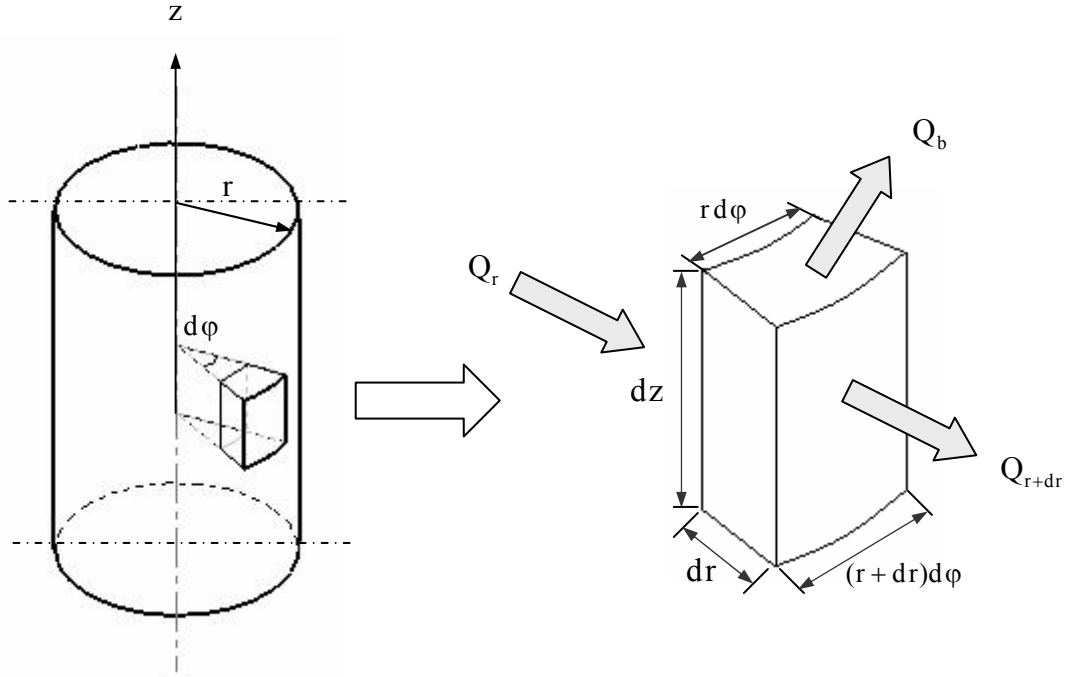
- a) Sıcaklık değişiminin deneysel olarak bulunması,
- b) Matematiksel modelleme yöntemi.

Sistem üzerinde yapılan deneyler, diğer yöntemlerle bulunan sonuçların doğruluklarını ispatlayan en iyi yöntemlerdir. Fakat kurulacak deneysel düzeneklerin çok masraflı olması, zaman ve malzeme sarfiyatları bu yöntemin kullanımını sınırlamaktadır.

Matematiksel modelleme ise iki kısımdan ibarettir. Araştırılan ısıl prosesin matematiksel modelinin kurulması (sınır ve başlangıç koşulları dahil) ve bu problemin çözülmesi. Bu çalışmada iplik bobininin kurutulması prosesinin teorik olarak incelenmesi için ilk etapta matematiksel bir model ortaya konmuş ve daha sonra problem çözülmüştür.

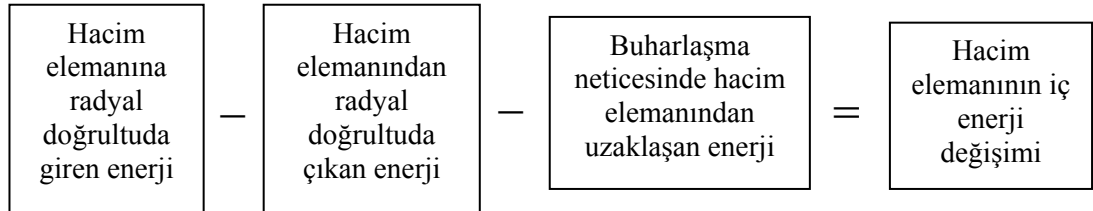


Şekil 5.8. Deneylerde kurutulan iplik bobininin şematik gösterimi.



Şekil 5.9. Silindirik koordinatlarda, radyal doğrultuda birim hacim elemanı için enerji dengesinin şematik gösterimi.

Bobin geometrisine uygun olarak silindirik koordinatlarda, Şekil 5.9’da görülen birim hacim elemanı için enerji denge ifadesini yazmak uygun olacaktır.



Radyal doğrultuda hacim elemanına birim zamanda giren ısı enerjisini Q_r , hacim elemanından birim zamanda uzaklaşan ısı enerjisini Q_{r+dr} , buharlaşma neticesinde hacim elemanından birim zamanda uzaklaşan enerjiyi Q_b ile, hacim elemanın iç enerji değişimini ise Q_d ile ifade edecek olursak, sadece radyal doğrultudaki enerji geçişinin göz önünde bulundurulduğu durumda, hacim elemanı için enerji dengesini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz;

$$Q_r - Q_{r+dr} - Q_b = Q_d \quad (5.8)$$

Birim zamanda, radyal doğrultuda, $r d\phi dz$ yüzeyinden giren ısı enerjisi için Fourier yasasını aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$Q_r = -k(r d\phi dz) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5.9)$$

Radyal doğrultuda hacim elemanından birim zamanda çıkan ısı enerjisi ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$Q_{r+dr} = Q_r + \frac{\partial}{\partial r}(Q_r) dr$$

$$Q_{r+dr} = Q_r + \frac{\partial}{\partial r} \left[-k(r d\phi dz) \frac{\partial T}{\partial r} \right] dr$$

$$Q_{r+dr} = Q_r - d\phi dz dr \frac{\partial}{\partial r} \left[kr \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (5.10)$$

$$Q_d = C_v dV \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$Q_d = C_v (r d\phi dr dz) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.11)$$

Buharlaşma neticesinde, hacim elemanından birim zamanda uzaklaşan enerji miktarı; hacim elemanından birim zamanda buharlaşan su miktarı ($\dot{m}_b$) ile suyun buharlaşma gizli ısısının (h_{sb}) çarpımına eşittir. Bu durumda hacim elemanından uzaklaşan enerji miktarı aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$Q_b = \dot{m}_b h_{sb} \quad (5.12)$$

Birim zamanda hacim elemanından buharlaşan su miktarı ise, faz dönüşüm faktörünün, kuru kütle miktarının ve hacim elemanının içerisindeki nem miktarının zamanla değişiminin birbirleriyle çarpımına eşittir. Bu durumda hacim elemanından birim zamanda buharlaşan su miktarı aşağıdaki bağıntı yardımıyla ifade edilebilir.

$$\dot{m}_b = \varepsilon m_{\text{kuru}} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.13)$$

Burada ε , faz dönüşüm faktörü olup, göz önünde bulundurulan birim hacim elemanından buharlaşma vasıtasıyla uzaklaşan nem miktarının, birim hacim elemanı içerisinde bulunan toplam nem miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır.

(5.13) ifadesini, (5.12) denklemini içerisinde yazdığımızda aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz;

$$Q_b = \varepsilon m_{\text{kuru}} h_{\text{sb}} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.14)$$

Hacim elemanının kuru kütlesi, hacim elemanının kuru haldeki yoğunluğu ile hacim elemanının sahip olduğu $r dr d\phi dz$ hacminin çarpımına eşittir.

$$m_{\text{kuru}} = \rho_o r dr d\phi dz \quad (5.15)$$

(5.15) ifadesi, (5.14) bağıntısı içerisinde yerine yazıldığında, buharlaşma neticesinde, birim zamanda hacim elemanından uzaklaşan enerji için aşağıdaki eşitlik elde edilmiş olur.

$$Q_b = \varepsilon \rho_o r dr d\phi dz h_{\text{sb}} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.16)$$

Elde ettiğimiz ifadeleri (5.8) denkleminde yerlerine yazarsak;

$$\begin{aligned}
& Q_r - \left[Q_r - d\phi dz dr \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] - \varepsilon \rho_o r dr d\phi dz h_{sb} \frac{\partial X}{\partial t} \\
& = C_v (r d\phi dr dz) \frac{\partial T}{\partial t}
\end{aligned} \tag{5.17}$$

İfadeyi sadeleştirdiğimizde aşağıdaki bağıntı elde edilir;

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \varepsilon \rho_o r h_{sb} \frac{\partial X}{\partial t} = C_v r \frac{\partial T}{\partial t} \tag{5.18}$$

Hacim elemanı içerisinde açısal ve eksenel doğrultularda sıcaklık değişimlerinin çok küçük olduğu ve buna bağlı olarak da bu doğrultulardaki ısı transferinin ihmal edilebileceği göz önünde bulundurulduğunda, silindirik koordinatlarda radyal doğrultuda ısı ve kütle transferini içeren matematiksel modelin genel denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \varepsilon \rho_o h_{sb} \frac{\partial X}{\partial t} \tag{5.19}$$

Burada;

C_v : Islak bobin için birim hacmin ısınma ısısı, J/(m³K)

k : Islak bobinin ısı iletim katsayısı, W/(mK)

t : Zaman, s

T : Sıcaklık, °C

r : Radyal koordinat, m

X : Nem içeriği, kg nem/kg (kuru bobin kütlesi)

ε : Faz dönüşüm faktörü,

ρ_o : İplik bobininin kuru kütlesinin yoğunluğu, kg/m³

h_{sb} : T sıcaklığında suyun buharlaşma gizli ısısıdır, J/kg

(5.19) ifadesi görüldüğü gibi silindirik koordinatlarda radyal doğrultu için yazılmış kısmi diferansiyel terimleri ve sıcaklıkla değişen termofiziksel özellikleri içerisinde barındıran, lineer olmayan zamana bağlı bir denklemdir. Lokal nem içeriği ölçümleri malzemeler için pratikte kolaylıkla gerçekleştirilemez. Ayrıca denklemin içerdiği birçok katsayının değeri çok düşük hassalıklarla bilinebilmektedir.

Bu durumda, iplik bobininin kurutulması problemini çözebilmek için yeni bir yaklaşımda bulunarak; (5.19) denklemi yerine; faz dönüşümünü içerisinde barındıran birim hacmin efektif ısınma ısısı ile kütle taşınımını ve ısı iletimini içeren efektif ısı iletim katsayısı (k_e) niceliklerini kullanmak suretiyle, ısı transferi prosesini ifade eden denklemi aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$C_{ve} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_e \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.20)$$

Burada;

C_{ve} : Islak bobin için birim hacmin efektif ısınma ısısı, J/(m³K)

k_e : Islak bobinin efektif ısı iletim katsayısı, W/(mK)

τ : Zaman, s

T : Sıcaklık, °C

r : Radyal koordinattır, m

Bu aşamadan sonra problem çözümü için kullanılan invers problem çözüm yöntemi açıklanmış ve çözüm hassaslığına etki edebilecek bir kısım faktörlerin etkisi incelenmiştir. Daha sonra bu faktörler göz önünde bulundurularak invers çözüm yöntemi ile kurutulan yün iplik bobinine ait bilinmeyen termofiziksel özellikler (C_{ve} ve k_e) belirlenmiştir. Bulunan termofiziksel özelliklerin doğruluğu ise, iplik bobininin kurutulma prosesi için ortaya konan matematiksel modele ait düz bir problem çözülerek kontrol edilmiştir.

5.3.4. İners problemin çözüm yöntemi

Literatürde, doğanın bilinen esas kanunlarının, ısı ve kütle transferi proseslerine uygulanması sırasında prosesleri ifade eden nicelikler, sebep ve sonuç olmak üzere iki kısma ayrılırken, problemler de sebep sonuç ilişkisinden yola çıkılmak suretiyle düz ve ters (iners) problemler olmak üzere iki ayrı kısma ayrılmaktadır. Isı transferi problemlerinde tek çözümlülük koşullarına (başlangıç ve sınır koşulları, termofiziksel özellikler, hacimsel ve yüzeysel ısı kaynakları, geometrik ölçüler, vb.) sebepler (A_i) adı verilmektedir. A_i sebeplerine bağlı olan sıcaklıklar ise sonuç (T) olarak adlandırılmaktadır. Verilen sebeplere göre sonucun belirlendiği problemler düz problemler, sonuca göre sebebin bulunması problemleri ise iners problemlerdir. Sıcaklık değerlerinin hassas bir şekilde belirlenebilmesi, matematik modellendirmede tek çözümlülük koşullarının içerdiği niceliklerin hassas değerlerinin bilinmesini gerektirir. Bu nedenle çalışmalar iners ısı transferi problemlerinin (İİTP) çözümleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. İİTP’de deneylerden elde edilen sıcaklıklara ($T_d(x, t)$) göre tek çözümlülük koşullarından biri veya birkaç tanesi belirlenebilir. Yani T_d ’nin sonucuna göre A_i sebepleri bulunur.

İners problemlerin çözüm yöntemleri, çözüm işlemi sırasında deneysel sıcaklık değerlerinin denklemde kullanıldıkları yerlere bağlı olarak doğrudan yöntemler ve ekstremal yöntemler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Doğrudan yöntemlerde; deneysel olarak elde edilen sıcaklık değerleri $T_d(x, \tau)$, matematiksel modelin temel denkleminde doğrudan yerine konularak $A = F^{-1}(T_d)$ sebepleri bulunur. Ekstremal yöntemlerde ise, deneysel olarak elde edilmiş olan T_d sıcaklıkları, $\delta = T_M - T_d$ sapmalarının minimumunun bulunmasında kullanılır. Ekstremal yöntemlerin doğrudan yöntemlerden farkı, çözüm prosesinin $\Phi(\delta)$ sapma fonksiyonunun minimumunu bulmak için kullanılmasıdır.

İners problemlerin çözümünde kullandığımız doğrudan yöntemin kısa bir tasvirini ısı iletim katsayısı $k(T)$ ve birim hacmin ısınma ısıısının $C_v(T)$ sıcaklığa

bağılılığının belirlenmesi durumu için ele alalım. Uygun başlangıç ve sınır koşulları için bir boyutlu zamana bağlı yarı-lineer ısı iletim denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (k(T) \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (5.21)$$

(5.21) denklemi h ve $\delta \tau$ uzay ve zaman adımlarına sahip ağda sonlu farklar şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_{vi}^j \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\delta \tau} = k_i^j \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h^2} - k_{i-1}^j \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{h^2} \quad (5.22)$$

$$0 < x_i < L; \quad 0 < \tau^j < \tau_m; \quad x_i = ih; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n; \quad \tau^j = j\delta \tau; \quad j = 1, 2, \dots, m$$

İnvers problemi çözmek için aranan k_i^j ve C_{vi}^j termofiziksel özelliklerine göre (5.22) denklemini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$C_{vi}^j D_i^j = k_i^j E_i^j - k_{i-1}^j E_{i-1}^j \quad (5.23)$$

$$D_i^j = \frac{T_{i,d}^j - T_{i,d}^{j-1}}{\delta \tau}, \quad E_i^j = \frac{T_{i+1,d}^j - T_{i,d}^j}{h^2} \quad (5.24)$$

Burada; D_i^j , E_i^j ve E_{i-1}^j ifadeleri ağ düğüm noktalarında deneylerden elde edilmiş olan sıcaklıkları içeren ifadelerdir. Deneysel sıcaklıklar temel denklem içerisinde doğrudan kullanıldığı için çözüm yöntemi burada, doğrudan yöntem olarak adlandırılmaktadır. Her bir τ^j zamanında ve her bir düğüm noktası için (5.23) denkleminde olduğu gibi matematiksel ifadeler yazılabilir. $x - \tau$ ağ bölgesinde $m(n-1)$ sayıda (5.23) şeklinde matematiksel denklemler elde edilir. Her denklemde iki bilinmeyen bulunduğundan (k_i^j ve C_{vi}^j), bilinmeyenlerin sayısı denklemlerin sayısından iki kat fazladır. İnvers problemin tek değerli çözümü bu şekilde mümkün değildir. Bununla birlikte ısı iletim katsayısının ve birim hacmin ısınma ısısının sıcaklığa bağlı

olarak değişimi polinom şeklinde ifade edilebiliyorsa invers problemin çözümü mümkündür.

$$k(T) = \sum_{K=0}^N \Lambda_K T^K, \quad C_v(T) = \sum_{K=0}^N C_K T^K$$

$$k(T) = \Lambda_0 + \Lambda_1 T, \quad C_v(T) = C_0 + C_1 T \quad (5.25)$$

Burada, $N=1$ olarak alınmıştır.

Geniş sıcaklık aralıklarında malzemelerin $k(T)$ ve $C_v(T)$ termofiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlılığı lineer olmayıp karmaşık bir eğri karakterine sahiptir. Bundan dolayı çözümde (5.25) eşitliğinin kullanılması büyük hatalara neden olur. Fakat çok küçük sıcaklık aralıklarında eğri büyük bir hassaslıkla doğru parçaları yardımıyla ifade edilebilir. Bu nedenle sıcaklık aralığının tamamı M sayıda küçük sıcaklık aralıklarına bölünerek her bir ℓ ($\ell=1, 2, \dots, M$) küçük sıcaklık aralığında, $k(T)$ ve $C_v(T)$ nicelikleri aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$k_i^j = \Lambda_0^\ell + \Lambda_1^\ell (T_{i,k}^j - T_{1,k}^\ell), \quad C_{vi}^j = C_0^\ell + C_1^\ell (T_{i,C_v}^j - T_{1,C_v}^\ell) \quad (5.26)$$

Burada; Λ_0^ℓ ve C_0^ℓ , ℓ . sıcaklık aralığının başlangıç sıcaklığındaki ($T_{1,k}^\ell$ ve T_{1,C_v}^ℓ 'deki) ısı iletim katsayısının ve birim hacmin ısınma ısısının değerleridir. Λ_1^ℓ ve C_1^ℓ aranan katsayılar olup, $k(T)$ ve $C_v(T)$ lineer bağıntılarının ℓ . sıcaklık aralığındaki eğimlerini karakterize ederler.

$$T_{i,k} = \frac{T_i^j + T_{i+1}^j}{2}, \quad T_{i,C_v} = \frac{T_i^j + T_i^{j-1}}{2} \text{ şeklinde belirlenir ve uygun olarak } k_i^j \text{ ve } C_{vi}^j$$

ayrık değerlerine karşılık gelen sıcaklıklardır. (5.26) ifadeleri (5.23) denkleminde yerine yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\begin{aligned} & \left[C_o^\ell + C_l^\ell \left(T_{i,C_v}^j - T_{l,C_v}^\ell \right) \right] D_i^j \\ & = \left[\Lambda_o^\ell + \Lambda_l^\ell \left(T_{i,k}^j - T_{l,k}^\ell \right) \right] E_i^j - \left[\Lambda_o^\ell + \Lambda_l^\ell \left(T_{i-1}^\ell - T_{l,k}^\ell \right) \right] E_{i-1}^j \end{aligned} \quad (5.27)$$

$x - \tau$ ağının ℓ . sıcaklık aralığına düşen bütün düğüm noktalarının sayısı z olsun. Bu noktalar için (5.27) şeklinde matematiksel denklemler yazılabilir. Böylece dört tane bilinmeyenden meydana gelen $(C_o^\ell, C_l^\ell, \Lambda_o^\ell, \Lambda_l^\ell)$ matematiksel bir denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sistemini ise aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$Ax = b \quad (5.28)$$

Burada; A , katsayılar matrisi; x , aranan nicelikler vektörü, b ise sağ taraf vektörüdür.

(5.27) veya (5.28) denklemler sisteminin tek değerli bir çözümünün olabilmesi için $z \geq 3$ olmak koşulu ile verilmiş ℓ . sıcaklık aralığında herhangi bir sıcaklıktaki ısı iletim katsayısının veya birim hacmin ısınma ısısının bir değerinin verilmesi gerekir.

1. sıcaklık aralığının başlangıç değerinde ($T_{l,k}^1$ 'de), ısı iletim katsayısının başlangıç değerinin $k_b = \Lambda_o^1$ olarak verildiğini varsayalım. Bu durumda (5.28) denklem sisteminde üç tane bilinmeyen olduğu $(C_o^1, C_l^1, \Lambda_l^1)$ görülür. (5.28) denkleminin ifade ettiği sistemin çözümünün olabilmesi için birinci sıcaklık aralığında $(T_{l,k}^2 - T_{l,k}^1)$, en azından üç tane iç düğüm noktası bulunmalıdır. İç düğümlerin sayısının üçten fazla olması çözümün hassaslığını artırır. (5.28) şeklinde ifade edilebilen bu tür matematiksel denklemler sisteminin çözümü, en küçük kareler yöntemi ile elde edilebilir. (5.28) denkleminin içerdiği deneysel sıcaklıkların ölçülmesi sırasında meydana gelen sistematik hatalar bazen büyük değerlere kadar varabilir. Bu denklemin çözümünden elde edilen k ve C_v 'nin değerleri gerçek değerlerinden çok farklı olabilir. Bundan dolayı çözüm işleminin yürütülmesi için aşağıdaki gibi bir iterasyon prosedürü uygulanır.

Aranan C_1^ℓ katsayısına bir başlangıç değeri verilerek bu değer ℓ . sıcaklık aralığı için (5.23) denkleminde yerine konularak k_g 'lerin ($g = 1, 2, 3, \dots, z$) ayrıık değerleri bulunur ve aşağıdaki nicelikler hesaplanır;

$$\varepsilon_s = \sqrt{\xi/(z-1)}, \quad \xi = \sum_{g=2}^z \rho_g \left[k_g - \Lambda_o^\ell - \Lambda_1^\ell (T_{g,k}^j - T_{1,k}^\ell) \right]^2 \quad (5.29)$$

ε_s niceliğı, verilmiş olan C_1^ℓ değeriinde bulunan ayrıık k_g değerlerinin, $k(T) = \Lambda_o^\ell + \Lambda_1^\ell (T_{g,k}^j - T_{1,k}^\ell)$ doğrusundan olan sapmalarının orta karesini karakterize eder. ξ niceliğinin minimumluk koşulundan yola çıkarak, Λ_1^ℓ için aşağıdaki ifade bulunur;

$$\Lambda_1^\ell = \left[\sum_{g=2}^z \rho_g (k_g^j - \Lambda_o^\ell) (T_{g,k}^j - T_{1,k}^\ell) \right] / \left[\sum_{g=2}^z \rho_g (T_{g,k}^j - T_{1,k}^\ell)^2 \right] \quad (5.30)$$

C_1^ℓ katsayısı değıştirilerek, C_1^ℓ 'nin farklı değeri için ε^ℓ nicelikleri hesaplanır ve ε_s^ℓ 'yi minimum yapan C_1^ℓ değeri bulunur. Böylece (5.26) eşitliğı şeklinde aranan $k(T)$ ve $C_v(T)$ bağıntılarının bulunması $\varepsilon_s^\ell = f(C_1^\ell)$ fonksiyonunu minimum yapan katsayıların bulunmasına indirgenir.

İnvers problemlerin çözümünde deneysel verilerden yararlanıldığına göre, İİTP çözümünde kullanılan bu veya başka algoritmalar natürel deneylerin yapılması üzerine belirli şartlar ortaya çıkarır. İnvers problemlerin çözümü, hassas sonuçlara ulaşılabilir deneylerin bir program haline getirilmesini mümkün kılar ve deneyler sırasında sonuca keskin etki yapabilecek faktörlerin dikkate alınması gerektiğini ortaya koyar. İİTP 'lerin genel şeması aşağıdaki gibi verilebilir;

- Verilmiş tek değerlilik koşullarında düz ısı transferi probleminin çözülmesi,
- Düz ısı transferi probleminden bulunan $T_m(x_i, \tau)$ sıcaklıklarının, T_d deneysel sıcaklıklar gibi alınarak invers problemin çözülmesi,
- İvers problemin çözümünden elde edilen niceliklerin düz problemin çözümünde kullanılan niceliklerle karşılaştırılması.

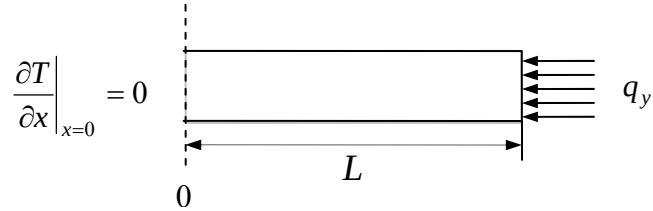
5.3.4.1. İvers problemin çözüm hassaslığına etki edebilecek faktörler

İvers problemin çözüm hassaslığına etki edebilecek faktörler arasında aşağıda verilmiş olan muhtemel hataları sayabiliriz;

- Deneyle ilgili hatalar: Sıcaklık veya ısı akısını ölçen deneysel cihazlardan kaynaklanan hatalar, termociftlerin yerleştirildiği noktaların koordinatlarının belirlenmesindeki hatalar;
- Reel fizik prosesi tam olarak içermeyen matematik modelin seçilmesinden dolayı oluşan hatalar: Matematik modelin kısmen veya tam olarak lineerleştirilmesinden dolayı oluşan hatalar, incelenen cismin boyutunun küçültülmesinden dolayı meydana gelen hatalar;
- İvers problemlerin sayısal çözümünde yardımcı yöntem gibi kullanılan algoritmalarındaki, uzay ve zaman adımlarından dolayı oluşan hatalar. İvers problemin çözümünde kullanılan temel yöntemin kendisine ve algoritmasına özgü olan hatalar; $k(T)$ ve $C_v(T)$ sıcaklığa bağlılığı karmaşık olan invers ısı transferi problemlerinin geniş sıcaklık aralıklarında aranan çözümlerinin lineer yaklaşım şeklinde aranmasından dolayı oluşan hatalar;

İplik bobininin termofiziksel özelliklerini belirlemeye geçmeden önce, burada invers problemlerin çözüm hassaslığına tesir edebilecek bazı faktörlerin etkilerini incelemek için metodolojik bir ısı transferi problemi ele alınmıştır. Bu amaçla uygun başlangıç ve sınır koşullarında düz bir ısı transferi problemi çözülmüştür. Bulunan model sıcaklıkları $(T_m(x_i, \tau^j))$, deneysel sıcaklıklar gibi $(T_d(x_i, \tau^j))$ alınarak, $k(T)$ ve

$C_v(T)$ 'nin sıcaklığa bağlı olarak değişimi doğrudan yöntemle belirlenmiştir. Her bir İİTP 'nin çözümü düz ısı probleminin çözümünde olduğu gibi, fizik prosesinin ısı şemasının verilmesi ile başlar. Prosesin bir boyutlu ısı şeması Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Düz problemin ısı şeması.

Kalınlığı $2L=20\text{ mm}$ olan az alaşımlı çelik levha simetrik olarak gücü $q_y=4 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ olan sabit yüzey ısı kaynağı ile ısıtılmaktadır. Düz problemin matematik modeli (5.21) denklemi ile, başlangıç ve sınır koşulları ise (5.31) ve (5.32) eşitlikleri ile verilmektedir.

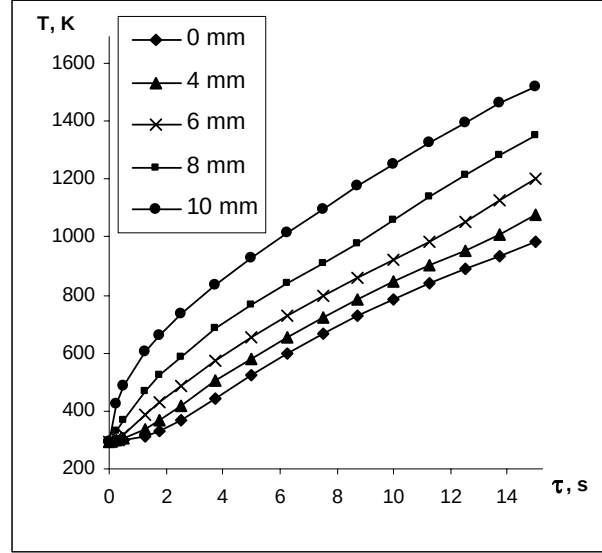
$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad 0 < x < \pm L, \quad 0 < \tau < \tau_m \quad (5.21)$$

$$T(x, 0) = T_0 = 293 \text{ K} = \text{sabit} \quad (5.31)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm L} = q_y, \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (5.32)$$

Düz problem, verilen başlangıç ve sınır koşullarında literatürden alınan (Mehrabov ve Shaliyev, 1983), bilinen termofiziksel özelliklerinde ($k(T)$, $C_v(T)$) sonlu farklar yönteminin örtülü şeması ile çözülmüştür. Burada non-lineerlik, iterasyon şeması ile dikkate alınmıştır. Çözüm hassaslığına etki eden faktörlerden biri ağ parametreleri olan uzay ve zaman adımlarıdır. Bunlarda oluşan hataları minimuma indirmek için Runge prensibi kullanılmıştır. Buna göre yoğunluğu düşük olan ağda elde edilen çözüm, yoğunluğu gittikçe artan ağlarda elde edilen çözümlerle

karşılaştırılmıştır. Uzay adımı (h) ile zaman adımından ($\delta\tau$) kaynaklanan bağıl hatalar prosesin başlangıcında çok küçük bir zaman aralığında ($\tau=0\div5\delta\tau$, $\delta\tau=0,25$ s) %0,8 civarında olup, zamanla azalarak %0,1'e kadar düşmektedir. Ağ düğümlerinde sıcaklığın zamana bağlı olarak değişimi Şekil 5.11'de görülmektedir.



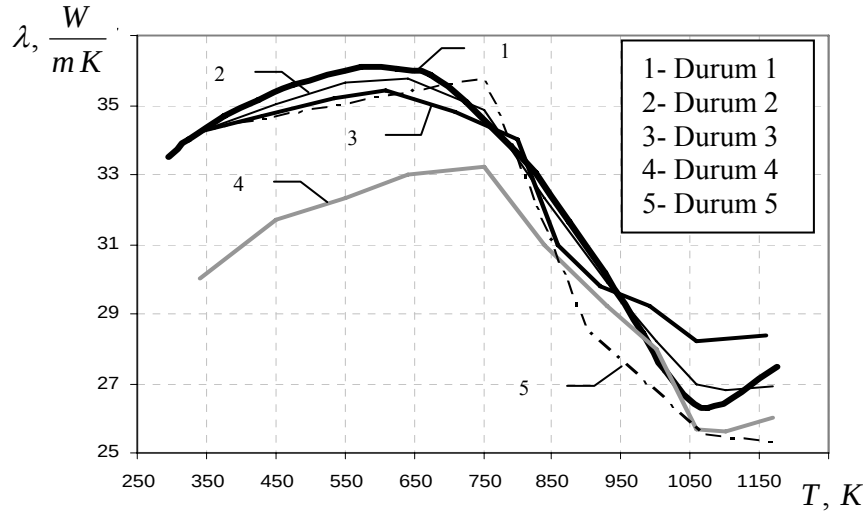
Şekil 5.11. Farklı noktalardaki sıcaklıkların zamanla değişimi.

Matematiksel modellendirmeden elde edilen $T_m(x_i, \tau^j)$ model sıcaklıkları, deneylerden elde edilen hassas sıcaklıklar gibi alınarak, (5.23) denkleminde kullanılmak suretiyle invers problem yukarıda anlatılan yöntemle aşağıdaki durumlar için çözülmüştür:

- Durum 1: Hassas değerler olarak, düz problemin çözümünde kullanılan ve literatürden alınmış $k(T)$ ve $C_v(T)$ değerleri kullanılmıştır (Şekil 5.12, 5.13 - eğri 1).
- Durum 2: İvers problemin çözümünde kullanılan deneysel sıcaklıklar yerine model sıcaklıkları ($T_d(x_i, \tau^j) = T_m(x_i, \tau^j)$) ve malzemenin ısı iletim katsayısının başlangıç değeri için $T=340$ K sıcaklığında $\Lambda_0^1 = 34,25$ W/(mK) olan gerçek değeri alınmıştır. Ayrıca bu durum için sıcaklık aralığı sayısı $M=11$ olarak alınmıştır. Bu

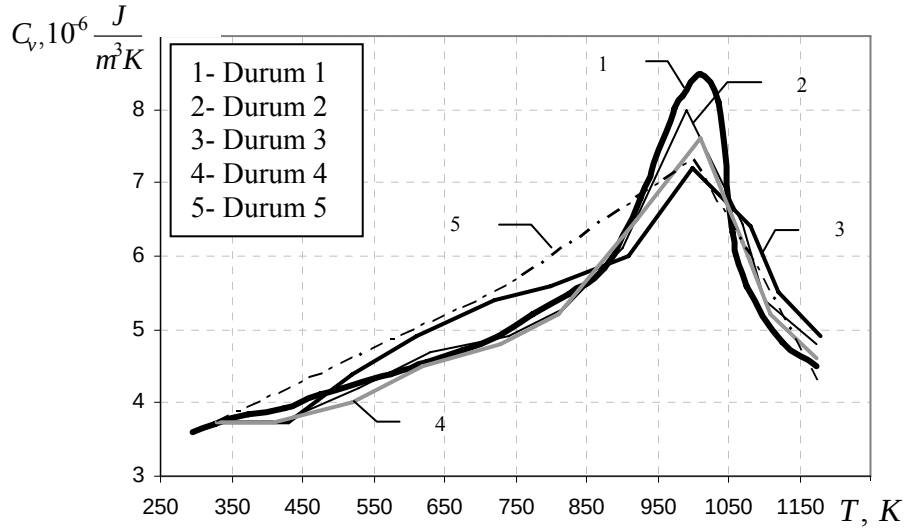
durumda çözülen invers problem için alınan termofiziksel katsayılar Şekil 5.12 ve 5.13'deki 2 eğrisi ile gösterilmektedir.

- Durum 3: Durum 2'den farklı olarak $T_d = T_m$ sıcaklığına, yapay olarak ΔT_d hatası yapılmıştır. ($T_d(x_i, \tau^j) = T_m(x_i, \tau^j) + \Delta T_d$).
- Durum 4: Durum 2'den farklı, $T = 340$ K sıcaklığında farklı olarak alınan tahmini $\Lambda_o^1 = 30$ W/(mK) değeridir (Şekil 5.12, 5.13 - eğri 4).
- Durum 5: Durum 2'den farklı olarak sıcaklık aralığı sayısı için $M=4$ değeri alınmıştır (Şekil 5.12, 5.13 - eğri 5).



Şekil 5.12. Az alaşımlı çelik için ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi. (1 Düz problemin çözümünde kullanılan ve literatürden alınmış $k(T)$ eğrisi, 2-5 farklı durumlar için invers problemin çözümünden elde edilen $k(T)$ eğrileri.

Böylece bu durumlar için $k(T)$ ve $C_v(T)$ 'nin sıcaklığa bağlılıkları elde edilmiş ve bilinen $k(T)$ ve $C_v(T)$ eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Durum 1 ile Durum 2'nin karşılaştırılması çözüm algoritmasından dolayı oluşan hataları göstermektedir. Şekil 5.12 ile Şekil 5.13'deki 1 ve 2 eğrilerinin karşılaştırılmasından görüldüğü gibi çözüm algoritmasından kaynaklanan maksimum bağıl hatalar $k(T)$ ve $C_v(T)$ 'nin keskin bir şekilde değiştiği sıcaklık bölgelerinde gözlenmekte olup bu değerler $k(T)$ için %1,2 ve $C_v(T)$ için %4 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.13. Az alaşımlı çelik için birim hacmin ısınma ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi (1 Düz problemin çözümünde kullanılan ve literatürden alınmış $C_v(T)$ eğrisi, 2-5 farklı durumlar için invers problemin çözümünden elde edilen $C_v(T)$ eğrileri).

İnvers problemlerde kullanılan deneysel sıcaklıkların ölçülmesi sırasında oluşan ΔT_d hatalarının invers problemin çözümüne etkisini incelemek için Durum 1 ile Durum 3 karşılaştırılmıştır. Burada hassas sıcaklık olan $T_d = T_m$ sıcaklığına yapay olarak $\Delta T = 10 \div 12$ K hatası yapılmıştır. Bu değerler ele alınan sıcaklık aralığında termokupllar için karakteristik olan değerlerdir. Bu şekilde seçilmiş olan T_d giriş sıcaklıkları için invers problemin çözümünden elde edilen $k(T)$ ve $C_v(T)$ bağılılıkları Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de 3 eğrileri ile gösterilmiştir. Bu sonuçların bilinen $k(T)$ ve $C_v(T)$ bağılılıkları ile karşılaştırılmasından (1 ve 3 eğrileri) dolayı ortaya çıkan maksimum bağıl hatalar $k(T)$ ve $C_v(T)$ ’nin keskin bir şekilde değiştiği bölgelerde bulunur ve değerleri $k(T)$ için $\delta \approx \%9$; $C_v(T)$ için $\delta \approx \%15$ civarındadır. ΔT ’nin büyük değerlerinde, $k(T)$ ve $C_v(T)$ ’nin gerçek değerlerinden çok farklı değerler elde edilir.

İnvers problemlerin çözüm hassaslığına etki eden faktörlerden biri de aranan termofiziksel katsayılarından birinin başlangıç değeridir. Durum 1 ile Durum 4'ün karşılaştırılmasından görüldüğü gibi, k_b değerinin tahmini olarak seçilmesinden dolayı oluşan hatalar, $k(T)$ ve $C_v(T)$ bağıntıları eğrilerini, yanlış seçilmiş k_b tarafına doğru kaydırmaktadır. Bu faktörün etkisi ile oluşan hatalar zamanla azalmaktadır. Şekil 5.12 ve 5.13'den görüldüğü gibi (1 ve 4 eğrileri) bu tür problemlerin çözümünde herhangi bir sıcaklıkta bir k_b veya C_{vb} gerçek değerinin bilinmesi, çözüm hassaslığını keskin bir şekilde artırmaktadır.

$k(T)$ ve $C_v(T)$ bağılılıklarının karmaşık olduğu durumlarda bu yöntemin çözüm hassaslığına etki eden faktörlerden biri de $k(T)$ ve $C_v(T)$ 'nin değiştiği geniş sıcaklık aralığının ($293 \div 1200$ K) bölündüğü küçük sıcaklık aralıklarının sayısıdır (M). Durum 1, 2 ve 5'in karşılaştırılmasından görüldüğü gibi (Şekil 5.12, 5.13'deki 1, 2 ve 5 eğrileri) $k(T)$ ve $C_v(T)$ 'nin lineer şekilde yaklaşım yapılan sıcaklık aralıklarının boyunun küçük olması (M 'nin büyük olması) çözüm hassaslığını artırmaktadır. İncelemeler, $k(T)$ ve $C_v(T)$ bağılılıklarının karmaşık olduğu durumlarda sıcaklık aralıklarının boyunun olabildiğince küçük ve bu aralıkta yeterli sayıda ağ düğümleri olacak şekilde seçilmesi gerektiğini göstermektedir. İnvers problemin çözümünde gereken işlemlerden birisi de sıcaklık aralıklarının başlangıç ve son değerlerinin ($T_{1,k}^\ell, T_{1,C_v}^\ell$) seçimidir. Bu parametreler seçilmeden önce $T_d(x_i, \tau^j)$ sıcaklık alanı incelenmeli ve $\partial T_{di} / \partial \tau$ niceliği değerlendirilmelidir. ($i=1, 2, 3, \dots, n$ termoçiftlerin sayısıdır). $C_v(T)$ 'nin keskin olarak değiştiği sıcaklık bölgesinde $\partial T_{di} / \partial \tau$ niceliği yeterince azalmaktadır. Bu tür sıcaklık bölgelerinde sıcaklık aralıklarından birinin başlangıcının (T_{1,C_v}^ℓ) yerleşmesi gerekmektedir. İnvers ısı transferinin farklı durumlar için incelenmesi; ΔT_d sıcaklık ölçüm hatasının, k_b başlangıç değerinin ve M sıcaklık aralığı sayısının çözüm hassaslığına etkisinin büyük olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, invers ısı transferi problemleri çözülürken, metodolojik problemler çözülerek hassaslığı etkileyecek niceliklerin hatayı minimuma indirgeyecek değerleri bulunmalıdır.

5.3.4.2. Problemin çözümü

İplik bobininin kurutulması prosesi için (5.20) denklemini daha önce aşağıdaki şekilde elde etmiştik;

$$C_{ve} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_e \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.20)$$

(5.20) denklemi, h ve $\delta\tau$ uzay ve zaman adımlarına sahip kafeste sonlu farklar şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_{ve,i}^j \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\delta\tau} = \frac{1}{r_i h} \left[\left(r_i + \frac{h}{2} \right) k_{e,i}^j \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h} - \left(r_i - \frac{h}{2} \right) k_{e,i-1}^j \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{h} \right] \quad (5.33)$$

$$r_1 < r < r_7; \quad 0 < \tau^j < \tau_m$$

$$r_i = ih; \quad i = 2, 3, \dots, n-1; \quad \tau^j = j\delta\tau; \quad j = 1, 2, \dots, m$$

Burada;

h : Uzay adımı ağ parametresi, m

τ : Zaman, s

$\delta\tau$: Zaman adımı ağ parametresi, s

i, j : Ağ koordinatlarıdır.

İnvers problemi çözmek için aranan $k_{e,i}^j$ ve $C_{ve,i}^j$ termofiziksel özelliklerine göre (5.33) denklemini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$C_{ve,i}^j D_i^j = k_{e,i}^j E_i^j - k_{e,i-1}^j E_{i-1}^j \quad (5.34)$$

$$D_i^j = \frac{T_{i,d}^j - T_{i,d}^{j-1}}{\delta\tau}; \quad E_i^j = \left(r_i + \frac{h}{2}\right) \frac{T_{i+1,d}^j - T_{i,d}^j}{r_i h^2} \quad (5.35)$$

Burada T_d deneysel sıcaklıklardır. D_i^j , E_i^j ve E_{i-1}^j ifadeleri ise ağ düğüm noktalarında deneylerden elde edilmiş olan sıcaklıkları içeren katsayılarıdır.

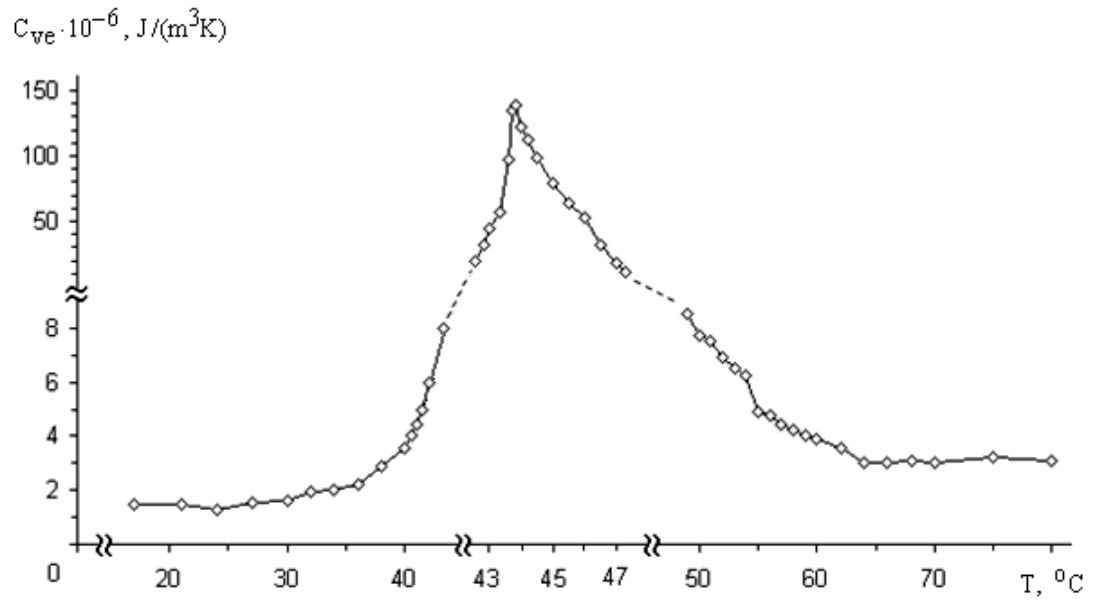
İplik bobininin kurutulmasına ait problem, çözüm şekli daha önce yukarıda “invers problemin çözüm yöntemi” konusunda anlatıldığı gibi, invers problemin çözümünde, çözüm hassaslığına tesir eden faktörlerin etkileri göz önünde bulundurularak, sonlu farklar şemasının kullanıldığı doğrudan yöntemle çözülmüştür. Invers problemin çözümünde yardımcı yöntemler olarak sonlu farklar ve en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 5.2. İplik bobini için birim hacmin efektif ısınma ısıısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi.

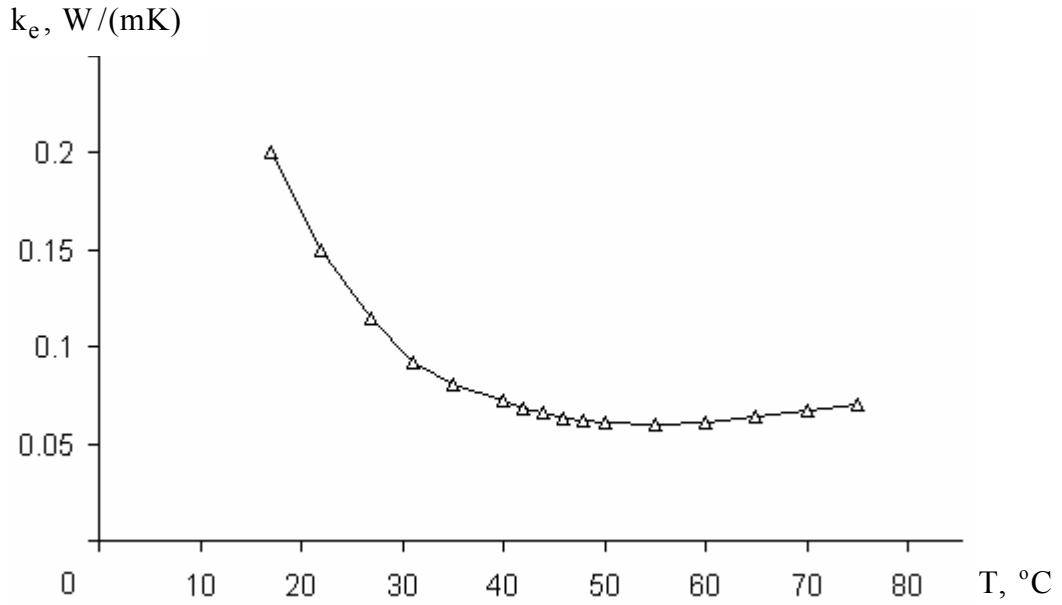
T (°C)	$C_{ve} \cdot 10^{-6}$ (J/m ³ K)	T (°C)	$C_{ve} \cdot 10^{-6}$ (J/m ³ K)	T (°C)	$C_{ve} \cdot 10^{-6}$ (J/m ³ K)
17,00	1,50	43,00	44,46	51,00	7,50
21,00	1,45	43,30	57,00	52,00	6,90
24,00	1,25	43,60	96,90	53,00	6,50
27,00	1,55	43,70	134,90	54,00	6,30
30,00	1,60	43,80	138,70	55,00	4,90
32,00	1,95	44,00	121,60	56,00	4,80
34,00	2,00	44,20	112,10	57,00	4,50
36,00	2,20	44,50	98,80	58,00	4,30
38,00	2,90	45,00	79,04	59,00	4,10
40,00	3,55	45,50	64,22	60,00	3,90
40,50	4,00	46,00	52,44	62,00	3,60
41,00	4,40	46,50	31,92	64,00	3,00
41,50	5,00	47,00	18,62	66,00	3,10
42,00	6,00	47,30	11,59	68,00	3,10
42,40	8,00	48,50	9,20	70,00	3,10
42,50	19,00	49,00	8,50	75,00	3,20
42,80	31,54	50,00	7,70	80,00	3,10

Tablo 5.3. İplik bobini için ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi.

T (°C)	k_e (W/mK)	T (°C)	k_e (W/mK)
17,00	0,200	46,00	0,063
22,00	0,150	48,00	0,062
27,00	0,115	50,00	0,061
31,00	0,092	55,00	0,060
35,00	0,081	60,00	0,061
40,00	0,072	65,00	0,064
42,00	0,068	70,00	0,067
44,00	0,066	75,00	0,070



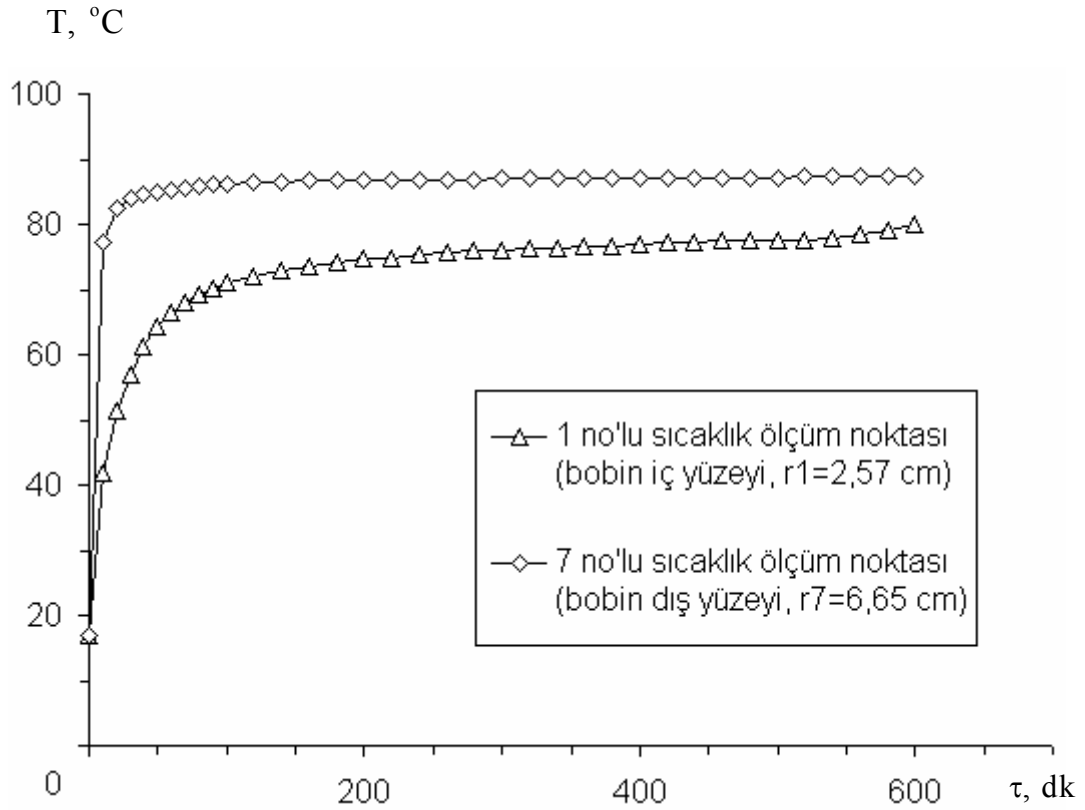
Şekil 5.14. Yün iplik bobini için birim hacmin efektif ısınma ısıısının sıcaklıkla değişimi.



Şekil 5.15. Yün iplik bobinine ait efektif ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi.

İnvers problemin çözümü sonucunda kurumakta olan yün iplik bobini için elde edilen birim hacmin efektif ısınma ısıısı ($C_{ve}(T)$) ve ısı iletim katsayısının ($k_e(T)$) sıcaklığa bağlı olarak değişimleri sırasıyla Şekil 5.14 ve 5.15’de verilmiştir.

C_{ve} - T grafiğinden görüldüğü gibi, buharlaşmanın yoğun olduğu sıcaklık aralığı 42-48°C’dir. Termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bu şekilde bağlı olması, aslında yün iplik bobininin nem içeriğinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır. Yün ipliğinin sahip olduğu su içeriğinin, ipliğin neme doyma değerinin üzerinde olduğu yerlerde sıvı haldeki su dokuma malzemesinin yapısındaki kılcal kanallar içerisinde bulunur. Buradaki nem alışverişi bir buharlaşma prosesinden dolayı meydana gelmektedir. Bu durum C_{ve} - T grafiğinde görülmektedir.



Şekil 5.16. Bobin iç yüzeyindeki 1 numaralı ve bobin dış yüzeyindeki 7 numaralı sıcaklık ölçüm noktaları için deneysel sıcaklık verileri.

İnvers problemin çözümü neticesinde belirlenen termofiziksel özelliklerin doğruluğunu kontrol etmek için bir düz problem çözülmüştür. Düz problemin matematiksel ifadesi (5.20) denklemi ve aşağıdaki gibi başlangıç koşulu (5.36) ve sınır koşulu (5.37) ile verilmektedir. Sınır koşulu, cismi sınırlayan yüzeylerin sıcaklığıdır. İplik bobininin yüzeylerinde deneyden elde edilmiş sıcaklıklar (Şekil 5.16), sınır koşulu olarak alınmıştır.

$$C_{ve} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.20)$$

$$T(r_i, 0) = T_o = 17^{\circ}\text{C} = \text{sabit} \quad (5.36)$$

$$i = 2, 3, \dots, n-1$$

$$T(r_{i\dot{c}}, \tau) = f_1(\tau), \quad T(r_{dış}, \tau) = f_2(\tau) \quad (5.37)$$

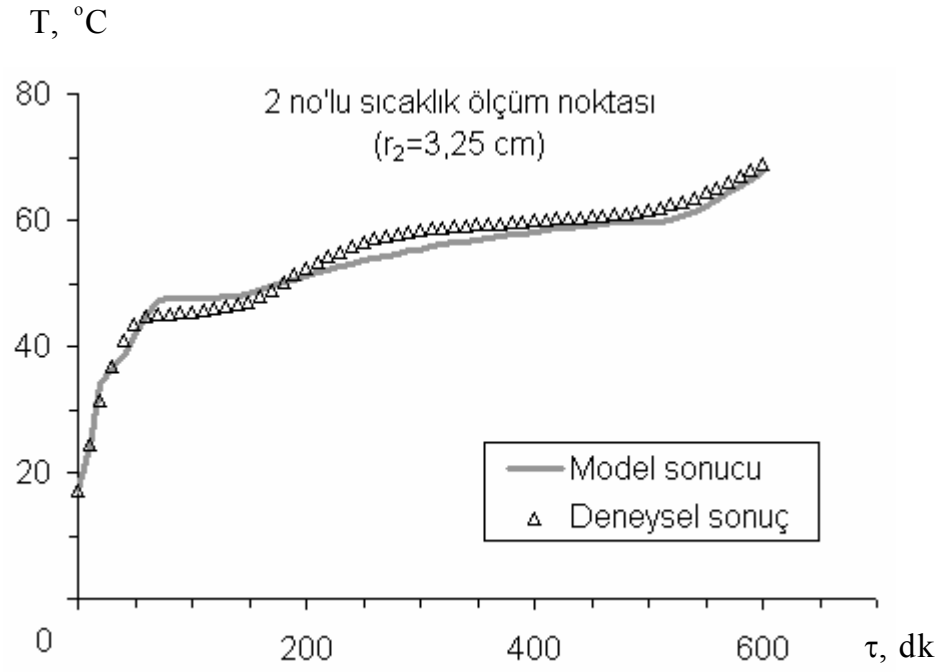
Burada; $r_{i\dot{c}}$ ve $r_{dış}$ sırasıyla iplik bobininin iç ve dış yarıçaplarıdır. Düz problem, örtülü şemanın kullanıldığı sonlu farklar yöntemi ile çözülmüştür. Matematiksel modelden bulunan sıcaklıklar, Ribeiro ve Ventura (1995) tarafından yapılmış olan deneysel sıcaklıklarla karşılaştırılmıştır. Tablo 5.4’de, yün iplik bobini üzerindeki ara noktalar için ($r_i=2, 3, \dots, 6$) modelden elde edilen sıcaklıklar görülmektedir.

Tablo 5.4. Modelden elde edilen sıcaklıklar.

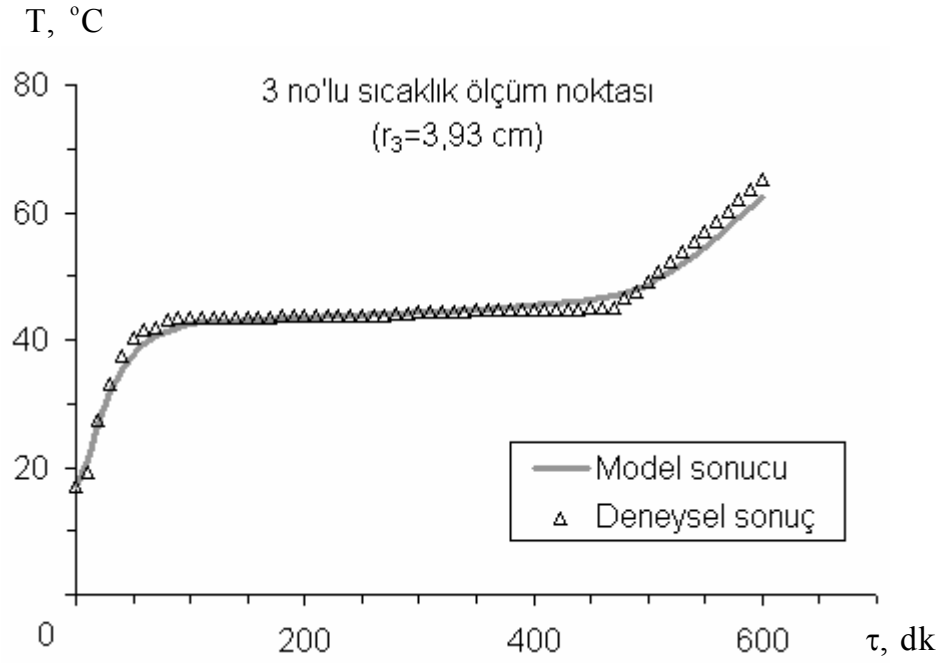
SÜRE (dakika)	SICAKLIK ÖLÇÜM NOKTALARI				
	2	3	4	5	6
	T_{m2} (°C) $r_2=3,25$ cm	T_{m3} (°C) $r_3=3,93$ cm	T_{m4} (°C) $r_4=4,61$ cm	T_{m5} (°C) $r_5=5,29$ cm	T_{m6} (°C) $r_6=5,97$ cm
0	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00
10	24.57	20.97	20.79	23.27	31.37
20	31.42	26.66	26.76	31.07	43.39
30	36.89	31.77	31.87	36.44	49.70
40	40.88	35.19	35.08	39.37	50.40
50	43.51	37.68	37.43	41.56	52.97
60	44.89	39.50	39.29	43.31	55.49
70	44.99	40.60	40.47	44.04	58.03
80	45.16	41.40	41.27	44.13	60.55
90	45.34	41.97	41.83	44.25	62.66
100	45.55	42.40	42.24	44.38	64.35
110	45.78	42.72	42.56	44.53	65.70
120	46.04	42.84	42.77	44.69	66.64
130	46.32	42.92	42.84	44.87	67.29
140	46.66	42.99	42.91	45.07	67.73
150	47.12	43.06	42.97	45.28	68.05
160	47.78	43.14	43.03	45.51	68.32
170	48.90	43.22	43.08	45.77	68.55
180	50.08	43.32	43.14	46.04	68.74
190	51.29	43.42	43.20	46.34	68.91
200	52.40	43.51	43.27	46.70	69.07
210	53.40	43.60	43.33	46.98	69.25
220	54.28	43.68	43.41	47.33	69.49
230	55.06	43.75	43.48	47.64	69.82
240	55.81	43.81	43.56	48.27	70.22
250	56.48	43.88	43.65	48.88	70.67
260	57.02	43.95	43.73	49.64	71.12
270	57.46	44.02	43.79	50.36	71.56
280	57.84	44.10	43.86	50.99	71.99
290	58.16	44.18	43.94	51.62	72.40
300	58.41	44.27	44.03	52.25	72.80

Tablo 5.4. (devamı)

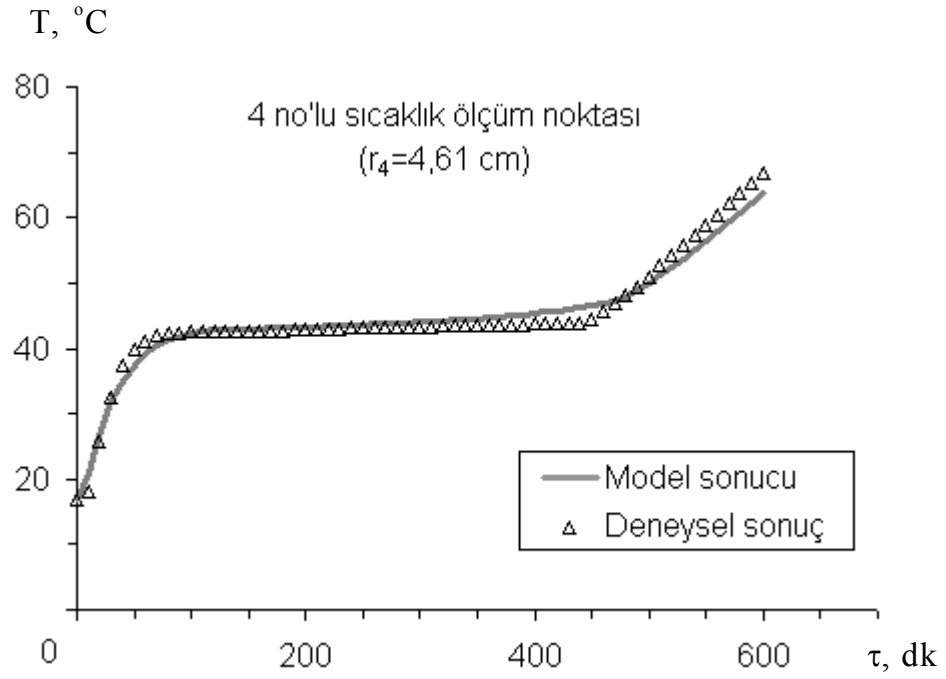
SÜRE (dakika)	SICAKLIK ÖLÇÜM NOKTALARI				
	2	3	4	5	6
	T_{m2} (°C) $r_2=3,25$ cm	T_{m3} (°C) $r_3=3,93$ cm	T_{m4} (°C) $r_4=4,61$ cm	T_{m5} (°C) $r_5=5,29$ cm	T_{m6} (°C) $r_6=5,97$ cm
310	58.64	44.36	44.12	52.91	73.18
320	58.84	44.46	44.22	53.39	73.52
330	59.00	44.56	44.33	54.07	73.82
340	59.14	44.66	44.45	54.63	74.09
350	59.26	44.77	44.58	55.08	74.33
360	59.39	44.88	44.71	55.68	74.54
370	59.52	45.00	44.86	56.13	74.73
380	59.65	45.13	45.01	56.71	74.89
390	59.78	45.26	45.18	57.21	75.03
400	59.90	45.40	45.35	57.72	75.16
410	60.05	45.56	45.54	58.27	75.27
420	60.18	45.72	45.75	58.85	75.38
430	60.31	45.89	45.97	59.10	75.47
440	60.43	46.07	46.21	59.75	75.57
450	60.58	46.27	46.48	60.28	75.66
460	60.72	46.50	46.81	60.65	75.75
470	60.88	46.78	47.26	61.15	75.84
480	61.05	47.16	47.95	61.68	75.95
490	61.27	47.72	48.97	62.52	76.07
500	61.58	48.65	50.09	63.00	76.22
510	61.98	49.69	51.30	64.03	76.40
520	62.45	50.85	52.52	64.91	76.61
530	62.99	52.06	53.78	65.53	76.85
540	63.61	53.29	55.04	66.18	77.10
550	64.33	54.58	56.39	66.86	77.37
560	65.12	55.91	57.85	67.57	77.66
570	65.96	57.49	59.32	68.32	77.96
580	66.86	59.08	60.79	69.08	78.28
590	67.79	60.67	62.24	69.87	78.61
600	68.76	62.24	63.68	70.68	78.98



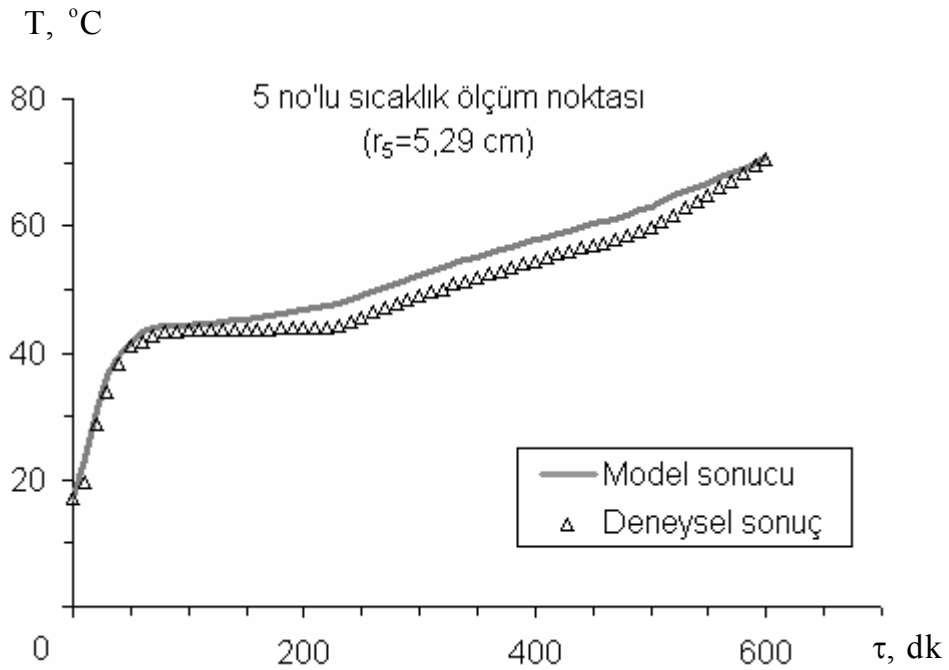
Şekil 5.17. (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.



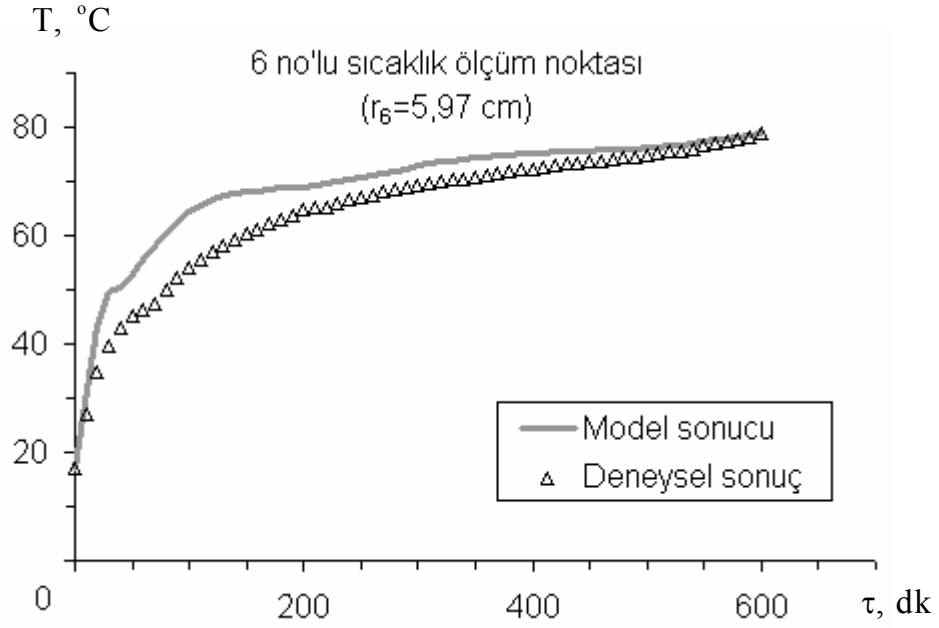
Şekil 5.18. (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 5.19. (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 5.20. (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 5.21. (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.

Deneysel olarak elde edilen sıcaklıkları incelediğimizde, yün iplik bobininin iç ve dış yüzeylerine yakın olan bölgelerde buharlaşmanın yoğun olarak $45-46^{\circ}\text{C}$ civarında meydana geldiği görülmektedir. İç noktalarda ise buharlaşmanın meydana geldiği sıcaklık $43,8^{\circ}\text{C}$ civarındadır. $42-48^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında C_{ve} 'nin yüksek değerlere sahip olması, kuruma prosesi sırasında C_{ve} 'nin içerisinde ihtiva ettiği buharlaşma gizli ısısından kaynaklanmaktadır. Yani, C_{ve} 'nin şekli, $43,8^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta faz dönüşümünün olduğunu göstermektedir.

İplik bobini içerisindeki farklı sıcaklık ölçüm noktaları için korelasyon katsayılarının hesaplanması, modelden elde edilen sıcaklıkların deneysel sıcaklıklarla olan uyumunu göstermesi bakımından önemlidir. Korelasyon katsayılarının hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılmıştır (Chapra and Canale, 1989).

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n T_{m,i} T_{d,i} - \sum_{i=1}^n T_{m,i} \sum_{i=1}^n T_{d,i}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n (T_{m,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n T_{m,i} \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n (T_{d,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n T_{d,i} \right)^2}} \quad (5.39)$$

Burada;

T_m : Modelden elde edilen sıcaklık,

T_d : Deneyden elde edilen sıcaklık,

n : Yapılan ölçüm sayısıdır.

Tablo 5.5. İplik bobini içerisinde farklı noktalar için belirlenen korelasyon katsayıları.

Sıcaklık ölçüm noktaları					
	2	3	4	5	6
	$r_2=3,25$ cm	$r_3=3,93$ cm	$r_4=4,61$ cm	$r_5=5,29$ cm	$r_6=5,97$ cm
R_{cr}	0,9870	0,9880	0,9878	0,9844	0,9805

Tablo 5.5. incelendiğinde, iplik bobini içerisinde 5 farklı nokta için belirlenen korelasyon katsayılarının tamamının 1 değerine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum deney sıcaklıkları ile modelden elde edilen sıcaklıklar arasındaki uyumun genelde iyi olduğunu göstermektedir. Sıcaklık ölçümlerinin alındığı 5 nokta karşılaştırıldığında en yüksek korelasyon katsayısının $R_{cr}=0,988$ değeri ile 3 no'lu sıcaklık ölçüm noktasında, en düşük korelasyon katsayısının ise $R_{cr}=0,9805$ değeri ile 6 numaralı sıcaklık ölçüm noktasında elde edildiği görülmektedir. Bu durumda en iyi uyumun 3 ve 4 no'lu sıcaklık ölçüm noktaları için sağlandığı söylenebilir.

Deneyisel sıcaklıklarla model sıcaklıkları karşılaştırıldığında, sıcaklıklar arasındaki en büyük farkın, dış yüzeye yakın bölgelerde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 ve 5.21). Bununla birlikte bu fark zamanla azalmaktadır.

Şekil 5.17’de görüldüğü gibi, modelden bulunan sıcaklıklarla deneyisel sıcaklıklar arasındaki en büyük fark, 6 no’lu sıcaklık ölçüm noktasında $\Delta T=10,6^{\circ}\text{C}$ (%11,82) şeklinde meydana gelmiştir. 6. noktada oluşan bu yüksek farkın, deneylerde kullanılan termokuplların bobin içerisine yerleştirilmesi sırasında yapılan hatadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.17’de görüldüğü gibi bobinin iç yüzeyine en yakın nokta olan 2 no’lu noktada ise en büyük fark $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ (%2,2) olarak meydana gelmiştir.

Orta noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, maksimum sapmaların %0,8-%1,8 arasında olduğu görülmektedir (Şekil 5.18, 5.19 ve 5.20). Bu farklar ise termokuplların hassaslığından, diğer deneyisel ölçüm hatalarından ve matematiksel modelleme sırasında yapılan varsayımlardan dolayı oluşabilecek hatalardan kaynaklanabilir. Bununla birlikte düz problemin çözümünden elde edilen sıcaklık değerleri ile literatürden alınan deneyisel sıcaklık değerlerinin uyumunun iyi olması, invers problemin çözümünden elde edilen termofiziksel özelliklerin doğruluğunu göstermektedir.

Deney sonuçlarına göre, en son kuruyan 4 no’lu sıcaklık ölçüm noktası göz önünde bulundurularak, sıcaklık değişimlerinin keskin bir şekilde artış göstermeye başladığı an için 475 dakika olarak tespit edilen kuruma süresi, benzer şekilde aynı nokta için model sonuçlarında yaklaşık olarak %2’lik bir farkla 485 dakika olarak tespit edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada yün iplik bobininin sıcak hava ile kurutulması işlemi teorik olarak incelenmiştir. Bu amaçla iplik bobinin kurutulması ile ilgili literatürdeki deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, iplik bobininin kuruma prosesinin silindirik koordinatlarda radyal doğrultuda bir boyutlu olarak modellenebileceğini göstermiştir. Kurutma prosesi ile ilgili oluşturulan matematiksel modelin çözümü için, bobin içerisindeki nemin buharlaşma gizli ısısı ile kurutma işlemi sırasında meydana gelen kütle taşınımının etkileri efektif termofiziksel özellikler yardımıyla ifade edilmiştir. Problem çözümüne geçmeden önce, bir invers ısı transferi problemi çözülerek, çözüm hassaslığına tesir edebilecek bazı faktörlerin etkisi incelenmiştir. Bu faktörler göz önünde bulundurularak, kurutulan yün iplik bobininin sıcaklığa bağlı efektif termofiziksel özellikleri belirlenmiş, daha sonra iplik bobini içerisindeki sıcaklığın zamanla değişimi bulunmuştur.

Elde edilen model sıcaklıkları ile deneysel sıcaklıklar karşılaştırıldığında hem sıcaklıklar, hem de model ile deney sonuçlarındaki kurutma süreleri arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu görülmektedir. Bu da kuruma prosesi için ortaya konan modelin ve iplik bobini için bulunan termofiziksel özelliklerin doğruluğunu göstermektedir. Model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında ortaya çıkan küçük sapmaların ise deneylerde kullanılan termokuplların bobin içerisine yerleştirilmesi sırasında yapılan hatalardan, termokuplların ölçüm hassaslığından, diğer deneysel ölçüm hatalarından, matematiksel modelleme sırasında yapılan varsayımlardan ve sayısal çözümde kullanılan algoritmalarından dolayı oluşabilecek hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışma, kurutma işlemleri ve içerisinde faz değişimi ve kütle alışverişi bulunan diğer benzeri işlemlerin, efektif termofiziksel özellikler yardımıyla zamana bağlı, lineer olmayan ısı transferi denklemi şeklinde ifade edilerek incelenebileceğini ve iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada yapılanları, elde edilen sonuçları ve bu sonuçlara ait değerlendirmeleri özetleyecek olursak;

- ✓ Bu çalışmada iplik bobininin sıcak hava yardımı ile kurutulması işlemine ait teorik bir çalışma yapılmış, bu amaçla matematiksel bir model ortaya konmuştur.
- ✓ İplik bobininin kurutulma işlemini ifade eden matematiksel model içerisindeki temel denklem, iplik bobinine ait efektif termofiziksel özellikler yardımı ile yeniden ifade edilmiştir.
- ✓ Problemi çözümüne geçmeden önce invers bir ısı transferi problemi çözülerek, invers problemin çözüm hassaslığına tesir edebilecek bazı faktörler incelenmiştir.
- ✓ Kurutulan yün iplik bobinine ait termofiziksel özellikler; problem çözüm hassaslığına etki edebilecek bazı faktörler göz önünde bulundurularak, sonlu farklar şemasının kullanıldığı doğrudan yöntemle invers ısı transferi probleminin çözümü neticesinde belirlenmiştir.
- ✓ Termofiziksel özellikler belirlendikten sonra, modele ait düz problem çözülmüş; hem ortaya konan matematiksel modelin geçerliliği, hem de belirlenen termofiziksel özelliklerin doğruluğu kontrol edilmiştir.
- ✓ Elde edilen model sonuçları ile deney sonuçları arasındaki uyumun iyi olması, bu çözüm yönteminin benzer çalışmalar için iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir.
- ✓ Bu çalışma, ülkemizde kendimize ait teknolojinin oluşturulması ve bu teknolojilerin geliştirilmesi konusunda yol gösterici bir alt çalışma oluşturabilecek niteliktedir.

7. KAYNAKLAR

ALIFANOV OM, 1994, "Inverse Heat Transfer Problems", Springer-Verlag, Berlin.

ALIFANOV OM, ARTYUKHIN EA, RUMYANTSEV SV, 1995, "Extreme Methods of Solving Ill-Posed Problems and Their Application to Inverse Heat Transfer Problems", Begell House, New York.

BECK JV, BLACKWELL B, CLAIR JR CRS, 1985, "Inverse Heat Conduction", Wiley, New York.

BERKOVSKIY BM, NOGOTOV EF, 1976, "Isı Transferi Problemlerinin Sonlu Farklar Yöntemi ile İncelenmesi", Nauka-i Teknika, Minsk.

BON J, SIMAL S, ROSSELLO C, MULET A, 1997, "Drying Characteristics of Hemispherical Solids", Journal of Food Engineering, 34, 109-122.

BOUKADIDA N, BEN NASRALLAH S, 2002, "Effect of the Variability of Heat and Mass Transfer Coefficients on Convective-Radiative Drying of Porous Media", Drying Technology, 20, 1, 67-91.

CHANG WJ, WENG CI, 1999, "Inverse Problem of Coupled Heat and Moisture Transport for Prediction of Moisture Distributions in an Annular Cylinder", International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, 2661-2672.

CHAPRA, SC, CANALE, RP, 1989, "Numerical Methods for Engineers", McGraw-Hill.

CİHAN A, 1991, "Çeltik Kurutmasının Deneysel ve Teorik Araştırılması", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

CORBMAN BP, 1983, "Textiles, Fiber to Fabric", McGraw-Hill.

DANTAS LB, ORLANDE HRB, COTTA RM, 2002, "Estimation of Dimensionless Parameters of Luikov's System for Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Media", International Journal of Thermal Sciences, 41, 217-227.

DANTAS LB, ORLANDE HRB, COTTA RM, 2003, "An Inverse Problem of Parameter Estimation for Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Media", International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 1587-1598.

DIETL C, WINTER ERF, VISKANTA R, 1998, "An Efficient Simulation of the Heat and Mass Transfer Processes during Drying of Capillary Porous, Hygroscopic Materials", International Journal of Heat and Mass Transfer, 41, 3611-3625.

DINÇER İ, HUSSAIN MM, 2002, “Development of a New Bi-Di Correlation for Solids Drying”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3065-3069.

ETEMOĞLU AB, 2003, “Hava Jetli Kumaş Kurutucularda Eşzamanlı Isı ve Kütle Transferi”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 23, 52-61.

FAN J, LUO Z, LI Y, 2000, “Heat and Moisture Transfer with Sorption and Condensation in Porous Clothing Assemblies and Numerical Simulation”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 2989-3000.

FARID M, 2001, “A Unified Approach to the Heat and Mass Transfer in Melting, Solidification, Frying and Different Drying Processes”, *Chemical Engineering Science*, 6, 5419-427.

FOHR JP, COUTON D, TREGUIER G, 2002, “Dynamic Heat and Water Transfer through Layered Fabrics”, *Textile Research Journal*, 72, 1, 1-12.

EL ACHARI A, BEN AMAR S, CAZE C, GHENAIM A, 2000, “The Dynamics of Heat and Moisture Transportation through Textiles”, 6th Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Scherbrooke.

GHALI K, GHADDAR N, JONES B, 2002, “Empirical Evaluation of Convective Heat and Moisture Transport Coefficients in Porous Cotton Medium”, *Journal of Heat Transfer*, 124, 530-537.

GIBSON PW, CHARMCHI M, 1997, “Modeling Convection/Diffusion Processes in Porous Textiles with Inclusion of Humidity-Dependent Air Permeability”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 24, 5, 709-724.

GÜNGÖR A, ÖZBALTA N, 1997, “Endüstriyel Kurutma Sistemleri”, III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi.

HAGHI AK, 2003, “Factors Effecting Water-Vapor Transport through Fibers”, *Theoretical Applied Mechanics*, 30, 4, 277-309, Belgrade.

HAGHI AK, 2003, “Thermal Analysis of Drying Process”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 74, 827-842.

HALICI F, GÜNDÜZ M, 2001, “Örneklerle Isı Geçişi”, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya.

HOFFMAN JD, 2001, “Numerical Methods for Engineers and Scientists”, Second Edition, Marcel Dekker.

HUANG CH, YEH CY, 2002, “An Inverse Problem in Simultaneous Estimating the Biot Numbers of Heat and Moisture Transfer for a Porous Material”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 4643-4653.

HUSSAIN MM, DİNÇER İ, 2003, “Two-Dimensional Heat and Moisture Transfer Analysis of a Cylindrical Moist Object Subjected to Drying: A Finite-Difference Approach”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 4033-4039.

INCROPERA FP, DEWITT DP, 1990, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Third Edition, John Wiley & Sons.

KANEVCE GH, KANEVCE LP, DULIKRAVICH GS, ORLANDE HRB, 2005, “Estimation of Thermophysical Properties of Moist Materials under Different Drying Conditions”, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 13, 4, 341-353.

KANEVCE LP, KANEVCE GH, DULIKRAVICH GS, 2005, “Application of Inverse Concepts to Drying”, *Thermal Science*, 9, 2, 31-44.

KEEY RB, 1972, “Drying Principles and Practice”, Pergamon Press.

KOZDOBA LA, KRUKOVSKIY PG, 1982, “İnvers Isı Transferi Problemlerinin Çözüm Yöntemleri”, *Naukova Dumka*, Kiev.

LE CV, LY G, POSTLE R, 1995, “Heat and Moisture Transfer in Textile Assemblies, Part I: Steaming of Wool, Cotton, Nylon, and Polyester Fabric”, *Textile Research Journal*, 65, 4, 203-212.

LEE HS, CARR WW, BECKHAM HW, LEISEN J, 2002, “A Model of Through Air Drying of Tufted Textile Materials”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 357-366.

LI Y, PLANTE AM, HOLCOMBE BV, 1995, “Fiber Hygroscopicity and Perceptions of Dampness, Part II: Physical Mechanisms”, *Textile Research Journal*, 65, 6, 316-324.

LI Y, ZHU Q, 2003, “A Model of Coupled Liquid Moisture and Heat Transfer in Porous Textiles with Consideration of Gravity”, *Numerical Heat Transfer*, 43, 501-523.

LI Y, ZHOUNGXUAN L, 1999, “An Improved Mathematical Simulation of the Coupled Diffusion of Moisture and Heat in Wool Fabric”, *Textile Research Journal*, 69, 10, 760-768.

LI Y, ZHU Q, YEUNG KW, 2002, “Influence of Thickness and Porosity on Coupled Heat and Liquid Moisture Transfer in Porous Textiles”, *Textile Research Journal*, 72, 5, 435-446.

LIENHARD JH, 2003, “A Heat Transfer Textbook”, Third Edition, Phlogiston Press.

MEHRABOV AO, SHALİYEV RN, 1983, “Yüksek Sıcaklıklarda Az Alaşımli Çeliklerin Termofiziksel Karakteristiklerinin Deneyisel Tayini”, *Sanayi Isı Tekniği Dergisi*, 5, No.2, s. 32-38, Kiev, (Rusça).

- MHIMID A, BEN NASRALLAH S, FOHR JP, 2000, "Heat and Mass Transfer during Drying of Granular Products-Simulation with Convective and Conductive Boundary Conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 2779-2791.
- MIGLIORI M, GABRIELE D, DE CINDIO B, POLLINI CM, 2005, "Modeling of High Quality Pasta Drying: Mathematical Model and Validation", *Journal of Food Engineering*, 69, 387-397.
- MUJUMDAR AS, 1995, "Handbook of Industrial Drying", Marcel Dekker.
- NASTAJ JF, 2000, "Numerical Model of Vacuum Drying of Suspensions on Continuous Drum Dryer at Two-region Conductive-Convective Heating", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27, 7, 925-936.
- OĞULATA RT, DOBA KADEM F, KOÇ E, 1999, "Tekstilde Kurutma Yöntem ve Makinaları", IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 803-810.
- RIBEIRO J, VENTURA JMP, 1995, "Evaluation of Textile Bobbins Drying Processes: Experimental and Modeling Studies", *Drying Technology*, 13, 1-2, 239-265.
- RAYNAUD M, BRANSIER J, 1986, "A New Finite Difference Method for Non-linear Inverse Heat Conduction Problem", *Numerical Heat Transfer*, 9 (1) 27-42, 1986.
- SHALİYEV R, AKYOL U, ÇELEN S, 2006, "Bir İnvers Isı Transferi Probleminin Sayısal Çözümü", *Trakya University Journal of Science*, 7, 1, 1-8.
- ŞAHİN AZ, DİNÇER İ, 2002, "Graphical Determination of Drying Process and Moisture Transfer Parameters for Solid Drying", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3267-3273.
- ŞEN B, 1994, "Tekstil Sanayinde Kullanılan Kurutma Sistemlerinin İncelenmesi ve Mukayesesi", *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- SHI M, WANG X, 2004, "Investigation on Moisture Transfer Mechanism in Porous Media during Rapid Drying Process", *Drying Technology*, 22, 1, 2, 111-122.
- SIMPSON R, CORTES C, 2004, "An Inverse Method to Estimate Thermophysical Properties of Foods at Freezing Temperatures: Apparent Volumetric Specific Heat", *Journal of Food Engineering*, 64, 89-96.
- SMITH MC, FARID M, 2004, "A Single Correlation for the Prediction of Dehydration Time in Drying and Frying of Samples Having Different Geometry and Size", *Journal of Food Engineering*, 63, 265-271.
- TARAKÇIOĞLU I, 1986, "Tekstil Terbiyesi ve Makinaları", *Ege Üniversitesi Tekstil Fakültesi Yayınları*
- TREYBAL RE, 1982, "Mass-Transfer Operations", McGraw Hill.

WANG ZH, CHEN G, 1999, "Heat and Mass Transfer during Low Intensity Convection Drying", *Chemical Engineering Science*, 54, 3899-3908.

ZHOUNGXUAN L, FENGZHI L, YINGXI L, YI L, 2004, "Effect of the Environmental Atmosphere on Heat, Water and Gas Transfer within Hygroscopic Fabrics", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 163, 199-210.

ZHU Q, LI Y, 2003, "Effects of Pore Size Distribution and Fiber Diameter on the Coupled Heat and Liquid Moisture Transfer in Porous Textiles", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 5099-5111.

ZNAIDIA S, MZALI F, SASSI L, MHIMID A, JEMNI A, BEN NASRALLAH S, PETIT D, 2005, "Inverse Problem in a Porous Medium: Estimation of Effective Thermal Properties", *Inverse Problems in Science and Engineering*, 13, 6, 581-593.