

**İPLİK BOBİNİ KURUTMA İŞLEMİNDE SICAKLIK ALANININ
SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

ALPER KARAKOCA

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Uğur AKYOL

2017

T.C.
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İPLİK BOBİNİ KURUTMA İŞLEMİNDE SICAKLIK ALANININ
SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

ALPER KARAKOCA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Doç. Dr. Uğur AKYOL

TEKİRDAĞ – 2017

Her hakkı saklıdır.

Doç. Dr. Uğur AKYOL danışmanlığında, Alper KARAKOCA tarafından hazırlanan “İplik Bobini Kurutma İşleminde Sıcaklık Alanının Sonlu Farklar Yöntemi İle Belirlenmesi” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Juri Başkanı : Prof. Dr. Kamil KAHVECİ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Rafayel SHALIEV

İmza :

Üye : Doç. Dr. Uğur AKYOL

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İPLİK BOBİNİ KURUTMA İŞLEMİNDE SICAKLIK ALANININ SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Alper KARAKOCA

Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Uğur AKYOL

Bu çalışmada boyanmış yün iplik bobinlerinin içerisinde basınçlı sıcak hava geçirilerek kurutulması işlemi için bir matematiksel model ortaya konmuştur. Sunulan matematiksel model, kurutma problemini, içerisinde yün iplik bobinin efektif termofiziksel özellikleriyle birlikte, zorlanmış taşınım etkisinden kaynaklanan konvektif terimi barındıran nonlineer bir ısı taşınımı problemine indirgemıştır. Matematiksel modelin çözümü için sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen matematiksel model sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca sonlu farklar çözümünün içerdiği zaman ve uzay adımlarının, ortaya konan matematiksel modelin çözümüne etkisi de incelenmiştir. Farklı zaman ve uzay adımları için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, zaman ve uzay adımlarının kurutma süresi boyunca bobinin her noktasında sabit aralıklarla seçilmesinin hassas ve doğru sonuçlar vermediği görülmüştür. Kurutma işlemi sırasında iplik bobini içerisinde faz dönüşümünün daha yoğun gerçekleştiği zaman aralıklarında zaman adımının büyük seçilmesi ve faz dönüşümünün hızlı olduğu sıcaklık ölçüm noktalarında ise uzay adımının düşük seçilmesinin modelin çözümünde daha hassas ve doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: İplik bobini, Kurutma, Sonlu farklar metodu, Matematiksel model

2017, 62 Sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

DETERMINATION OF TEMPERATURE FIELD FOR DRYING PROCESS OF YARN BOBBINS USING FINITE DIFFERENCE METHOD

Alper KARAKOCA

Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur AKYOL

In this study, a mathematical model for the drying of yarn bobbins through forced hot air was presented. The mathematical model presented reduces the drying problem to a nonlinear heat convection problem involving the convective term caused by forced convection, together with the effective thermophysical properties of the wool yarn bobbin. The finite difference method is used to solve the model. The mathematical model results obtained in the study were compared with the experimental results. Also in the study, the effect of the time and space step on the model in the solution of the finite difference solution was examined. The model was solved using different time and space steps and the results were compared with the experimental data. When the results obtained for the different time and space steps were examined, it has been found that the selection of the time and space steps at fixed intervals at every point of the bobbin during the drying period is not sensitive and accurate. It is concluded that during the drying process, when the phase conversion is more intense in the yarn bobbin the selection of time step at higher values, and at the temperature measurement points where the phase conversion is fast the selection of space step at lower values gives more sensitive and accurate results in the solution of the model.

Keywords: Textile bobbin, Drying, Finite difference method, Mathematical model

2017, 62 Pages

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	v
ŞEKİL DİZİNİ	vi
SİMGELER DİZİNİ	x
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Kurutma	1
1.2 Nem Oranı	1
1.3 Denge Nemi	2
1.4 Kuruma Aşamaları.....	2
1.4.1 Ayarlanma süreci.....	2
1.4.2 Sabit hız süreci	4
1.4.3 Kuruma hızının ilk düşüş süreci	5
1.4.4 Kuruma hızının ikinci düşüş süreci	5
1.5 Higroskopiklik	5
1.6 Sorpsiyon İzotermi	6
1.7 Gözenekli Malzemelerin Kuruma Davranışı	6
1.7.1 Higroskopik gözenekli malzemelerin kurutulması.....	7
2. İPLİĞİN KURUTULMASI	8
2.1 Tekstil Lifleri	8
2.1.1 Tekstil liflerinin temel özellikleri	8
2.2 İplik ve İplikte Aranan Özellikler.....	8
2.3 İplikte Bulunan Nemin Durumu	10
3. İPLİK BOBİNİ KURUTMA YÖNTEMLERİ	10
3.1 Taşınım ile Kurutma	10
3.2 İletimle Kurutma	11
3.3 İnfrared (Kızılötesi) Kurutma	11
3.4 Yüksek Frekanslı Kurutma	12
3.5 Güneş Enerjisiyle Kurutma	13
4. LİTERATÜR ÖZETİ	15

4.1 Literatür Çalışması	15
5. İPLİK BOBİNİ KURUTMA İŞLEMİNİN MODELLENMESİ.....	23
5.1 Deney Düzenegi	23
5.2 Deneysel Veriler	23
5.3 Matematiksel Modelin Oluşturulması	25
6. SONLU FARKLAR METODU VE PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ	30
6.1 Sonlu Farklar Metodu.....	30
6.1.1 Explicit metot	32
6.1.2 İmplicit metot	33
6.1.3 Crank-Nicolson metodu.....	33
6.1.4 Halkalı silindir için sonlu farklar yöntemi.....	34
6.1.5 Explicit uygulaması	35
6.1.6 İmplicit uygulaması	36
6.1.7 Crank-Nicolson uygulaması	36
6.2 Konvektif terimi içeren ve içermeyen matematiksel modellerin karşılaştırılması	37
6.3 Zaman ve Uzay Adımının Belirlenmesi	41
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	59
8. KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ	62

ÇİZELGE DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 5.1 : Bobin içerisinde farklı noktalardaki sıcaklıkların zamanla değişimi.....	24
Çizelge 6.1 : İplik bobini için taşınım katsayısının sıcaklıkla değişimi.....	37
Çizelge 6.2 : İplik bobini için birim hacmin efektif ısınma ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi (Akyol, 2007).....	38
Çizelge 6.3 : İplik bobini için ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi (Akyol, 2007).....	38
Çizelge 6.4 : Durum 1,2,3 için zaman ve uzay adımının değerleri.....	42
Çizelge 6.5 : Durum 4 için zaman ve uzay adımının değerleri.....	42
Çizelge 6.6 : Durum 5 için zaman ve uzay adımının değerleri.....	42
Çizelge 6.7 : Durum 6 için zaman ve uzay adımının değerleri.....	43

ŞEKİL DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi (Doğanay,2009).....	3
Şekil 1.2 Kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Doğanay,2009).....	3
Şekil 1.3 Tip II sorpsiyon izotermi (S tipi) ve suyun durumu (Erbaş, Candal 2016).....	6
Şekil 2.1 İplik bobinlerine ait fotoğraflar.....	9
Şekil 3.1 İplik bobini kurutma makinesinin üstten görünüşü (Akyol 2007).....	11
Şekil 3.2 İplik kurutma makinesine ait fotoğraflar.....	12
Şekil 3.3 Yüksek frekanslı bobin kurutma makinesi.....	13
Şekil 3.4 Güneş enerjisiyle kurutma sistemi.....	14
Şekil 4.1 (a) İplik bobini, (b) Rüzgar tüneli içerisinde paralel sıcak hava akımına maruz bırakılmış iplik bobininin şematik gösterimi (Ribeiro ve Ventura, 1995).....	15
Şekil 4.2 Çalışmanın ikinci bölümü için basınçlı ve içten dışa doğru sirkülasyonlu hava akımının kullanıldığı deney düzeneğinin şematik görünümü (Ribeiro ve Ventura, 1995).....	16
Şekil 4.3 Sonsuz silindir için hareketli ara yüzey modelinin şematik gösterimi (Smith ve Farid, 2004).....	17
Şekil 4.4 İplik bobini içerisinde sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar (Akyol 2007).....	18
Şekil 4.5 Silindirik malzemenin şematik gösterimi.....	19
Şekil 4.6 Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ricardo ve Sergio 2017).....	22
Şekil 5.1 İplik bobini içerisinde sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar.....	23
Şekil 5.2 Silindirik koordinatlarda birim hacim elemanı için enerji dengesi gösterimi.....	25
Şekil 6.1 Explicit metodu için sonlu farklar hücresi.....	32
Şekil 6.2 İmplicit metodu için sonlu farklar hücresi.....	33
Şekil 6.3 Crank-Nicolson metodu için sonlu farklar hücresi.....	34
Şekil 6.4 Halkalı Silindirin Eşit Parçalara bölünmüş şekli.....	35

Şekil 6.5 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.	39
Şekil 6.6 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	39
Şekil 6.7 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	40
Şekil 6.8 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	40
Şekil 6.9 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.....	41
Şekil 6.10 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. (durum 1).....	43
Şekil 6.11 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. (durum 1).....	44
Şekil 6.12 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. (durum 1).....	44
Şekil 6.13 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. (durum 1).....	45
Şekil 6.14 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. (durum 1).....	45
Şekil 6.15 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($\tau=300$ s).....	46
Şekil 6.16 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($\tau=300$ s).....	46
Şekil 6.17 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($\tau=300$ s).....	47
Şekil 6.18 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($\tau=300$ s).....	47
Şekil 6.19 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($\tau=300$ s).....	48
Şekil 6.20 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($h=0,0095$ m).....	48
Şekil 6.21 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($h=0,0095$ m).....	49

Şekil 6.22 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($h=0,0095$ m).....	49
Şekil 6.23 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($h=0,0095$ m).....	50
Şekil 6.24 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması. ($h=0,0095$ m).....	50
Şekil 6.25 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).....	51
Şekil 6.26 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).....	51
Şekil 6.27 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).....	52
Şekil 6.28 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).....	52
Şekil 6.29 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).....	53
Şekil 6.30 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).....	53
Şekil 6.31 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).....	54
Şekil 6.32 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).....	54
Şekil 6.33 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).....	55
Şekil 6.34 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).....	55
Şekil 6.35 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).....	56
Şekil 6.36 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).....	56
Şekil 6.37 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).....	57
Şekil 6.38 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).....	57

Şekil 6.39 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).....	58
--	----

SİMGELER DİZİNİ

C_e	: Özgül ısı, [J/kgK]
D_e	: Efektif difüzyon katsayısı, [m ² /s]
D	: Çap, [m]
h	: Uzay adımı ağ parametresi, [m]
h'	: Kütle transferi katsayısı, [m/s]
h_{sb}	: Buharlaşma gizli ısı, [J/kg]
i, j	: Ağ koordinatları,
k	: Isı iletim katsayısı, [W/(mK)]
L	: Kalınlık, [m]
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_b	: Su buharının gaz sabiti, [J/(kgK)]
P_e	: Taşınım etkisini gösteren katsayı, W/(m ² K)
R	: Üniversal gaz sabiti, [J/(kmolK)]
T	: Sıcaklık, [°C]
X	: Nem içeriği, [kg nem/kg kuru madde]
h_e	: Isı taşınım katsayısı, [W/(m ² K)]
ε	: Faz dönüşüm faktörü,
ρ	: Yoğunluk, [kg/m ³]
γ	: Özgül ağırlık, [N/m ³]
τ	: Zaman, [s]
z	: Sıcaklık aralığına düşen düğüm noktalarının sayısı.

ÖNSÖZ

Tekstil sektörü ülkemizde çok önemli bir yere sahiptir. Kurutma işlemi ise tekstil endüstrisinin önemli proseslerinden biridir. Bu işlem yüksek miktarda enerji gerektiren, zaman alıcı ve pahalı bir prosestir. Enerjinin günümüzdeki önemi düşünüldüğünde bu işlemin en etkin şekilde gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Kurutma işlemini birçok parametre etkilemektedir. Bu parametrelerin optimum değerlerde seçilmesi ve kurutma işlemi için uygun matematiksel modeller ortaya konması oldukça önemlidir.

Yüksek Lisans tezi danışmanlığımı üstlenerek konu seçimi ve çalışmalarımın yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Uğur AKYOL'a ve değerli katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Rafayel SHALİYEV'e teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Tekstil sanayinde iplik bobinleri boyama işleminden geçtikten sonra kurutulması gerekmektedir. Kurutma işlemi büyük miktarda enerji gerektiren pahalı ve zaman alıcı bir işlemdir. İpliklerin içindeki nemi almak için uygulanan kurutma prosesi öncelikle mekanik işlemlerle yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan kurutma, ipliklerin kurutulması için yeterli değildir. Mekanik kurutmadan sonra iplikler, genellikle sıcak hava yardımıyla kurutulmaya devam edilir.

Kurutma işlemi sırasında sıcak hava, taşınım yoluyla ipliğe ısı aktarır ve ipliğin kuruması sonucu açığa çıkan suyu iplikten uzaklaştırır. Kurutma işlemi iplik denge nemine ulaştığı zaman sona erer. Kurutma süresi, havanın sıcaklığına ve hızına, malzemenin cinsine, havanın nemine bağlıdır. Bu kadar çok parametre barındıran kurutma işlemini matematiksel modellemek önem arz etmektedir. Bu sayede optimum şartlar elde edilerek kurutma maliyeti ve süresi azaltılmış olur.

Kurutma işlemi için kullanılan matematiksel modeller ısı ve kütle transfer denklemlerini diferansiyel formda yazıp bu denklemleri eş zamanlı çözmeyi gerektirir. Isı ve kütle transfer denklemleri, bünyesinde termodinamik özellikler barındıran, lineer olmayan ifadeler içeren kısmi diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada sunulan matematiksel model ile Akyol'un (2007) modeli, deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır ve modelin çözümü için sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Ayrıca sonlu farklar metodunun içerdiği zaman ve uzay adımının çözüme etkisi incelenmiştir.

1.1 Kurutma

Kurutma, malzemedeki nem alınması işlemine verilen isimdir. Kurutma işlemi değişik şekillerde yapılabilmektedir. Örneğin çamaşır makineleri santrifüj kuvvetleri yardımıyla malzemedeki bir miktar su almaktadır. Ancak genel olarak kurutma işlemi, sıcak havanın malzeme üzerinden geçmesiyle sağlanmaktadır. Sıcak hava malzemedeki nem miktarını buharlaşma neticesiyle malzeme su kaybetmektedir ve bu işlem malzemedeki nem miktarını denge nemine ulaştığında sona erer.

1.2 Nem Oranı

Nem oranı malzemedeki nem miktarının malzemenin toplam kütlesine oranı olarak tanımlanır. Islak bazda ve kuru bazda olmak üzere iki çeşittir.

$$X_y = \frac{m_s}{m_y} \quad (1.1)$$

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.

Kuru bazda nem oranı ise malzemenin içerisindeki nem miktarının malzemenin kuru kütlesine oranıdır.

$$X_k = \frac{m_s}{m_k} \quad (1.2)$$

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

m_s : Malzemenin içerdiği su kütlesi, kg

m_k : Kuru malzemenin kütlesidir, kg.

1.3 Denge Nemi

Belirli bir sıcaklık ve bağıl nemde olan havayla aynı ortamda bulunan malzemenin nem alışverişi sonunda ulaştığı nem değeridir. Bu noktadan sonra hava ve malzeme arasındaki kütle transferi dengeye ulaşır. Kurutma sistemi tasarlanırken denge nem içeriğinin bilinmesi önemlidir. Denge nem içeriği karmaşık bir ısı ve kütle transferi işlemidir ve bu değere etki eden birçok etken vardır (Xie ve ark. 2017). Bu etkenlerin en önemlileri havanın bağıl nemi ve sıcaklığıdır.

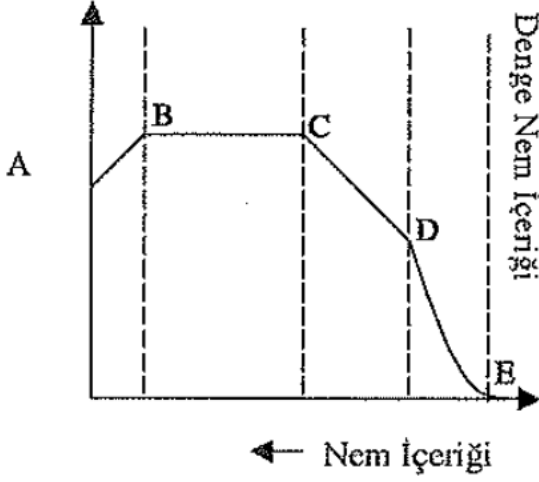
1.4 Kuruma Aşamaları

Kurutma işlemi temel olarak dört adımda gerçekleşir. Bunlar, ayarlanma süreci, sabit hız süreci, ilk hız düşüş süreci ve ikinci hız düşüş sürecidir (Doğanay 2009).

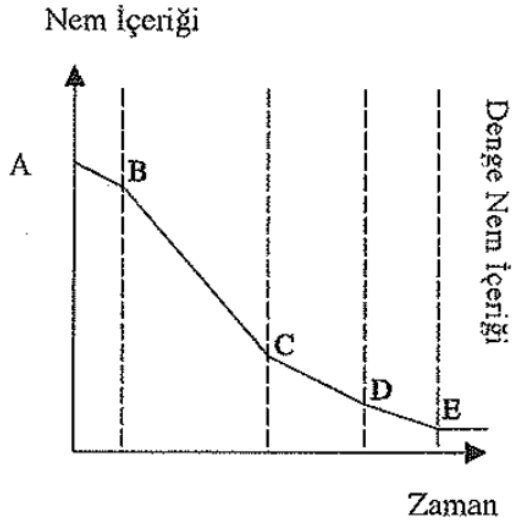
1.4.1 Ayarlanma süreci

Kurutulacak olan nemli maddenin üzerinden, sıcaklığı ve nem içeriği belirli olan hava akımı geçirildiğinde kurutma havasının kurutulacak maddeye verdiği enerjisinin bir kısmı madde yüzeyinin sıcaklığını yükseltirken, diğer kısmı madde bünyesindeki suyu buharlaştırmak için kullanılır. Şekil 1.1.'de görülen B noktasına kadar olan bu AB sürecine

ayarlanma süreci denir ve bu bölgede kuruma hızı düşüktür. Şekil 1.1. kuruma hızının nem içeriğine göre değişimini, Şekil 1.2. ise kuruma hızının kuruma süresine göre değişimini göstermektedir.



Şekil 1.1 Kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi (Doğanay 2009).



Şekil 1.2 Kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Doğanay 2009).

1.4.2 Sabit hız süreci

B noktasından sonra başlayan BC hız sürecine sabit hız süreci denir. Bu süreçte, kurutucu havadan maddeye aktarılan enerjinin hızı, maddedeki suyun buharlaşma hızına eşit olur. Kuruma hızını, maddenin yüzeyindeki su içeriği (H_m) ile kurutucu havanın su içeriği (H_h) arasındaki fark belirler.

($H_m - H_h$) farkı, kurutulacak maddenin üzerindeki suyun yoğunluğu (ρ_s) ile havadaki buharın yoğunluğu (ρ_∞) arasındaki fark şeklinde düşünülebilir. Buradan kuruma hızı denklem (1.3) ile ifade edilir (Çengel 2003).

$$\dot{m} = h_m A (\rho_s - \rho_\infty) \quad (1.3)$$

\dot{m} : Buharlaşma hızı (kg/s)

h_m : Kütle aktarım katsayısı (m/s)

A: Kurutulacak maddenin yüzey alanı (m²)

$\rho_s - \rho_\infty$: Kurutulacak madde yüzeyi ile hava arasındaki yoğunluk farkı (kg/m³)

Maddenin yüzeyindeki suyun buharlaşması esnasında harcanan buharlaşma gizli ısı nedeniyle, maddenin yüzey sıcaklığı, kurutucu havanın sıcaklığından düşük olur. Kuruma yüzeyi ile kurutucu havanın sıcaklığı arasında fark oluşunca, havadan kuruma yüzeyine enerji aktarımı olur. Bu enerji aktarımı, yüzeydeki buharlaşmayı artırır. Havadan aktarılan bu ısı enerjisinin tamamı buharlaşma gizli enerjisi olarak kullanılınca, kuruma yüzeyi üzerindeki buhar basıncı sabitleşir, kurumakta olan maddenin yüzey sıcaklığı da sabitleşir. Sabitleşen bu yüzey sıcaklığına yaş hazne sıcaklığı (T_y) denir. Bu durumda, buharlaşma için harcanan ısı enerjisinin aktarılma hızı, buharlaşma hızına eşit olur. Kuruma, yaş hazne sıcaklığındaki maddenin nem içeriği ile kurutucu havanın nem içeriği farkının ($H_m - H_h$) belirleyeceği sabit hızla devam eder, kuruma hızının en yüksek olduğu süreçtir. Bu süreçte buharlaşma hızına eşit bir difüzyon hızı ile partikül içindeki sıvı yüzeye difüze olarak madde yüzeyinin sıvı filmi devamlı yenilenir.

Bu süreçte, kurutucu havadan maddeye aktarılan ısı enerjisinin tamamı, maddenin içerdiği nemin gizli buharlaşma ısı olarak kullanıldığı için maddenin yüzey sıcaklığı (yaş hazne sıcaklığı) sabit kalır. Kuruma, kurutucu havanın sıcaklığı ile yaş hazne sıcaklığı

arasındaki farkın ($T_h - T_y$) belirleyeceği sabit hızla, birinci kritik nem içeriği noktasına (C noktası) kadar devam eder.

1.4.3 Kuruma hızının ilk düşüş süreci

Kuruma sabit hızda devam ederken nem içeriği azalınca partikülün iç kısmındaki nem dış yüzeye difüze olarak devamlı bir sıvı filmi oluşturamaz. Çünkü kurumadan dolayı maddenin nem içeriği azalmıştır. Kuruyan dış yüzeyde yer yer kuru noktalar oluşmaya başlar. Böylece kritik nem içeriği denen bu C noktasından itibaren kuruma hızı düşmeye, maddenin yüzey sıcaklığı artmaya başlar. CD boyunca kuruma hızının devamlı azaldığı bu sürece, doymamış yüzey kuruma süreci veya kuruma hızının birinci düşme süreci denir.

1.4.4 Kuruma hızının ikinci düşüş süreci

D noktasından itibaren oluşan kuru noktalar çoğalmaya ve genişlemeye başlar ve en dışta kuru bir katman oluşur. Gerek ısı geçirgenliği az olan kuru katmanın oluşması, gerek yüzeyetashınacak sıvı katmanın difüzyon hızının azalması ile kuruma hızı D noktasından itibaren devamlı bir düşüş gösterir. Bu D noktasına ikinci kritik nem içeriği noktası denir.

DE boyunca, buharlaşma hızı, iç katmanlardan yüzeye difüze olan nemin difüzyon hızına bağlıdır. Buharlaşma (kuruma) hızı azaldıkça kurutucu havadan alınan ısı enerjisinin çok az bir miktarı buharlaşma gizli ısısı olarak kullanıldığından partiküllerin yüzey sıcaklıkları daha da artar. E noktasına ulaşıldığında buharlaşma durmuştur. Çünkü kurutucu havanın içindeki nemin buhar basıncı ile maddenin içindeki nemin buhar basıncı eşit olunca kuruma sona erer. Bu durumda, buharlaşma olmadığından verilen ısı buharlaşma gizli ısısı olarak kullanılmaz; bu ısı, ürün sıcaklığını artırır ve kuruyan maddenin sıcaklığı kurutucu havanın sıcaklığına (kuru hazne sıcaklığına) yaklaşır. Maddenin nem içeriğini daha da düşürmek için kurutucu havanın sıcaklığını artırmak gerekir.

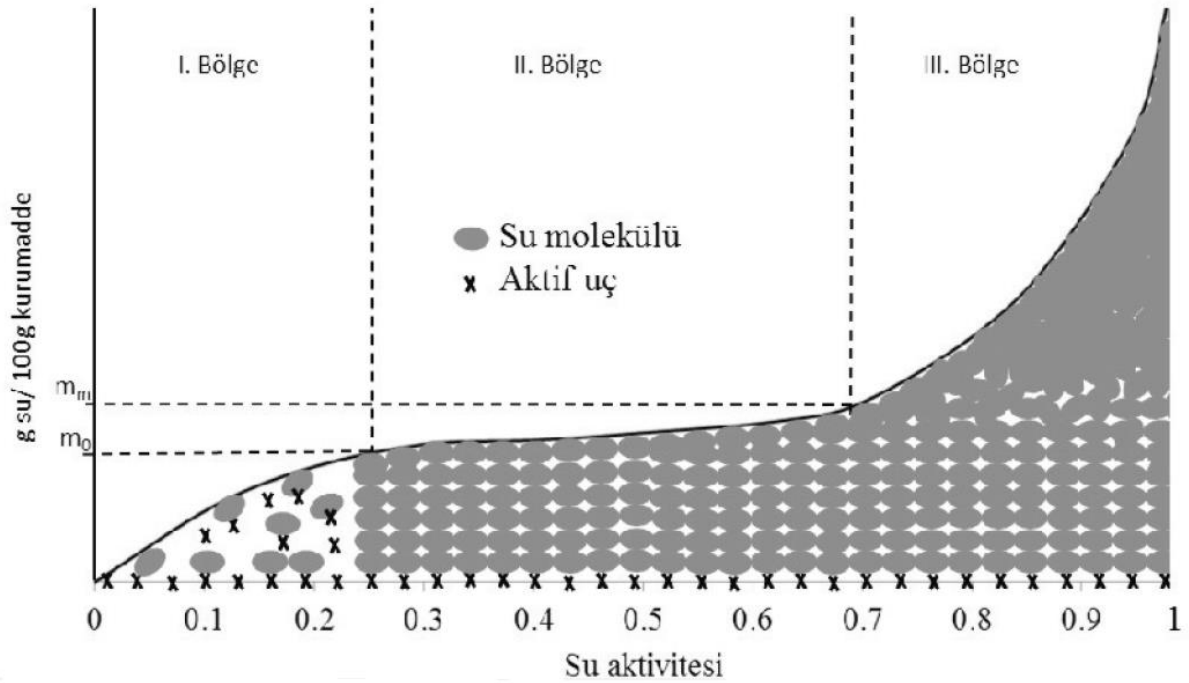
1.5 Higroskopiklik

Higroskopiklik, havanın nem miktarına göre maddenin kendi nemini ayarlama durumudur. Havanın nem miktarı arttıkça madde kendi bünyesinde daha fazla nem tutma eğilimindedir. Havadaki nem azaldıkça ise madde bünyesindeki nemi azaltır.

1.6 Sorpsiyon İzotermi

Sorpsiyon izotermi, herhangi bir sıcaklıktaki denge nem içeriği ile su aktivitesi arasındaki ilişkiye verilen isimdir. Su aktivitesi (a_w), malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak malzemedeki suyun fizikokimyasal durumu hakkında bilgi veren ve su içeriğinden bağımsız olan bir büyüklük olup, malzemedeki suyun buhar basıncının (P) aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına (P_0) oranı olarak tanımlanır (Aykın ve ark. 2015, Ostrowska-Ligeza ve ark. 2014).

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (1.4)$$



Şekil 1.3 Tip II sorpsiyon izotermi (S tipi) ve suyun durumu (Erbaş, Candal 2016).

1.7 Gözenekli Malzemelerin Kuruma Davranışı

Birçok malzeme içerisinde boşluklar barındırır. Bu boşluklar su ve hava ile dolu olabilir. Malzemenin boşluklu olma durumunda kapilarite kurutma üzerinde etkili olabilir.

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).

1.7.1 Higroskopik gözenekli malzemelerin kurutulması

Higroskopik malzemelerin havadaki su moleküllerini yakalama kabiliyeti olduğu için bu malzemeler sıfır nem değerine kadar kurutulamazlar. Bu malzemeler ancak denge nemine kadar kurutulabilirler.

2. İPLİĞİN KURUTULMASI

2.1 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 üretilmektedir. 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.

2.1.1 Tekstil liflerinin temel özellikleri

Tekstil sektöründe kullanılan liflerin özellikleri tekstil ürünün kalitesini oldukça etkilemektedir. Bu yüzden tekstil liflerinin özelliklerini bilmek kaliteli bir tekstil materyali için önem arz etmektedir.

Kaliteli bir tekstil materyalinin aşağıdaki şu özelliklere sahip olması gerekir;

- Uzunluk
- İncelik
- Mukavemet
- Parlaklık
- Eğrilme yeteneği
- Uzama ve esneklik
- Yoğunluk
- Nem çekme özelliği
- Isıdan etkilenme özelliği
- Işıktan etkilenme özelliği
- Kimyasal reaktiflerden etkilenme özelliği
- Elektriksel özelliği

2.2 İplik ve İplikte Aranılan Özellikler

İplik, tekstil elyaflarını, filamentleri veya malzemeleri sürekli olarak bükmek için kullanılan bir terimdir (Houck ve Siegel 2015). Delikli, içi boş silindirik veya konik şeklindeki

malzemeler üzerine ipliklerin belirli bir sarım sıklığı ile sarılmasıyla oluşturulan materyallere iplik bobini denmektedir. Şekil 2.1.'de iplik bobinlerine ait bazı fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 2.1. İplik bobinlerine ait fotoğraflar.

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

Numara: İplik numarası ipliğin boyutunu (inceliğini, kalınlığını) belirlemek için verilen sayısal bir değer olup, birim uzunluk başına ağırlığı veya birim ağırlık başına uzunluğu belirten bir ölçüdür.

Büküm: İpliğin eğrilmesi sırasında elyafların ya da ipliklerin bir arada tutulması ve mukavemet kazandırılması için kendi etrafında verilen spiral dönmelerdir. Bir elyafı bükmek, kullanım amacındaki dayanma koşulları açısından önemlidir. İplikteki büküm sayısı sağlamlık, elastiklik ve dolaylı olarak tüylülük gibi iplik özelliklerini etkiler.

Tüylülük: Kesikli elyaf ipliklerinde lif uçlarının iplik kesitinden dışarı doğru uzanması sonucunda tüylülük veya tüylenme oluşmaktadır. Tüylülük, ipliğin 1 cm uzunluğundaki ölçme bölgesinde, iplik kesitinden dışarı doğru uzanan kılcal liflerin toplam uzunluğudur.

Mukavemet: İpliğin uygulanan yüke gösterdiği dirençtir. Mukavemetin yüksek olması iplik kopuşunu ve makine duruşlarını azaltarak verimliliğin artmasını sağlar. İplik mukavemetini etkileyen en önemli faktör hammaddedir. Hammaddenin cinsi elyaf uzunluğu, elyaf inceliği, elyaf uzunluk dağılımı ve elyaf mukavemeti iplik mukavemetine etki eden en önemli faktörlerdir. Bükümün artırılması belli bir noktaya kadar iplik mukavemetini de artırır.

Elastikiyet: Bir ipliğin gerilim altında boyunun uzaması ve gerilim kalktığında eski uzunluğuna tamamen ya da kısmen dönebilme kabiliyetidir. Kritik uzama noktasına kadar uzatılmış yani kopma noktasına gelmiş bir ipliğin o anki erişmiş olduğu uzunluğun, serbest haldeki uzunluğuna oranlanmasıdır.

2.3 İplikte Bulunan Nemin Durumu

Bir tekstil ürünü, ağırlığının yaklaşık olarak %150-300'ü kadar su tutabilir (Akyol 2011). Yaş bir tekstil ürününün üzerindeki suyun hepsi aynı durumda bulunmayıp, bulunduğu yere ve tekstil ürünüyle arasındaki bağ durumuna göre şu ayırım 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.

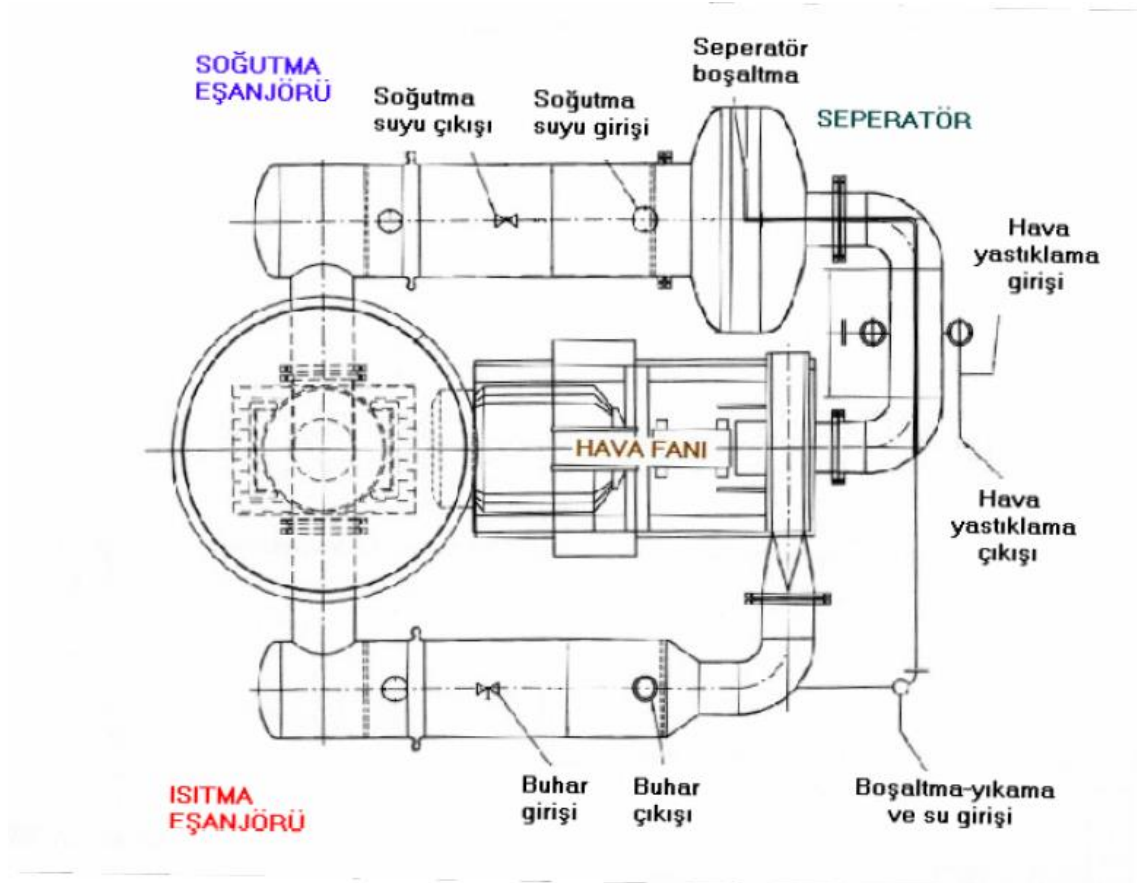
e) Higroskopik su: Şişme suyu gibi liflerin içerisinde miseller arasında bulunan su, normal kuru bir tekstil mamulünde bulunması gereken nemdir. Bu nedenle, iyi bir kurutmanın sonunda, bu su kısmının liflerde kalması sağlanmalıdır. Higroskopik nemi uzaklaştırılan bir ürünün tutumu bozulur ve bu su bir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

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 uzaklaştırılmayan kapiler suyunun diğer kısmı ile şişme suyu ısı enerjisi yoluyla uzaklaştırılmalıdır.

3. İPLİK BOBİNİ KURUTMA YÖNTEMLERİ

3.1 Taşınım ile Kurutma

Taşınım ile kurutmada, ısıtılmış ve nemi azaltılmış havanın tekstil ürünüyle direkt teması sağlanır. Bu sayede hava tekstil ürünüde bulunan nemin buharlaşmasını ve buharlaşan nemin tekstil ürününden uzaklaşmasını sağlar. Bu tip kurutma makineleri; gergili kurutucular, (ramözler) taşıma bantlı ve hava yastıklı kurutucular, hot-fluelar, delikli tamburlu kurutuculardır.



Şekil 3.1 İplik bobini kurutma makinesinin üstten görünüşü (Akyol 2007).

3.2 İletimle Kurutma

İletimle kurutmada, tekstil ürününün kızgın buhar ya da yağ ile ısıtılan silindirler ile teması sağlanarak içindeki nem uzaklaştırılır. Bu yöntemde, ısıtılan yüzey ürün ile direk temas halinde olmasından dolayı homojen olmayan bir kurutma ya da aşırı ısınma durumları söz konusudur. Bu tip kurutucular genellikle kâğıt ürünleri sanayinde ve imalatında kullanılmaktadır.

3.3 İnfrared (Kızılötesi) Kurutma

Işınım (kızıl ötesi) kurutma, yüksek sıcaklıktaki yüzeylerden elektromanyetik dalgalar şeklinde ısı transferi ile gerçekleştirilir. İki tarafında ışınlayıcıların olduğu dikey bir kanal içerisinde tekstil ürünü geçirilerek kurutma işlemi gerçekleştirilir. Bu tip kurutma proseslerinde sıcaklık 500°C'nin üzerine çıkmaktadır. Bu nedenle aşırı kurutma riski çok yüksektir. Üründeki su miktarının %25 civarına düşürüleceği durumlarda uygulanır.



Şekil 3.2. İplik kurutma makinesine ait fotoğraflar.

3.4 Yüksek Frekanslı Kurutma

Yüksek frekansla kurutma, yüksek frekanslı alternatif akıma bağlı iki kondansatör levhası arasından tekstil ürününün geçirilmesi ile kurutma işleminin gerçekleştirilmesidir. İşlem esnasında ürün içerisindeki su moleküllerinin sürekli yer değiştirilmesi sürtünmeye neden olur dolayısı ile ısınır ve buharlaşma meydana gelir. Uygulanan frekans aralığına göre dielektrik kurutma (10-100 MHz) ve mikrodalga kurutma (1000-3000 MHz) olarak ikiye

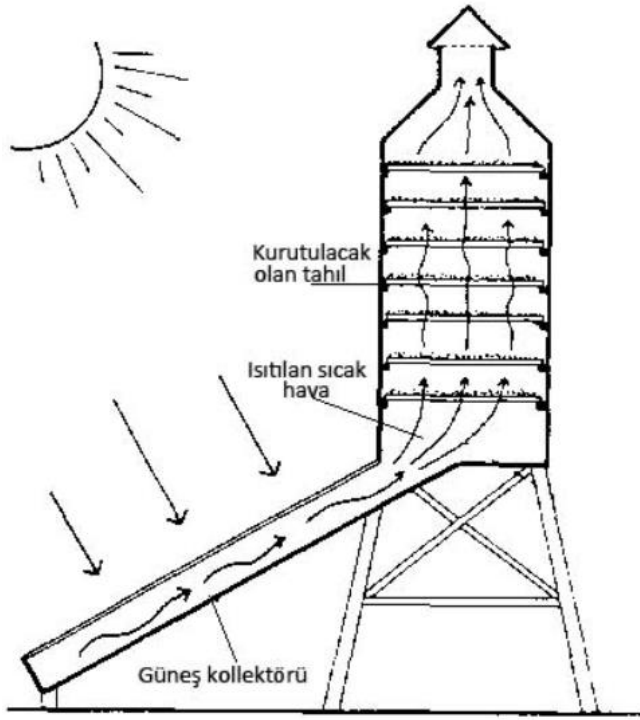
ayrılır. Geleneksel kurutma yöntemlerine göre çok daha hızlı ve etkili bir kurutma sağlar (Zhanlong ve ark. 2017). Aşırı kurutma riski yoktur. İlk yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen avantajlarından dolayı hızla yaygınlaşan bir kurutma yöntemidir.



Şekil 3.3 Yüksek frekanslı bobin kurutma makinesi.

3.5 Güneş Enerjisiyle Kurutma

Güneşten elektromanyetik ışınım biçiminde yayılan güneş ışınları dünyaya ulaşır ve bu enerji ısı enerjisine dönüştürülerek kurutma işlemi gerçekleştirilir. Güneş ile kurutma, güneş enerjisinden yararlanmanın etkili bir yöntemidir (Janjai 2007). Bu yöntemde ürünler güneşin önüne serilerek kurutma gerçekleştirilebilir. Ancak güneşe serilerek tabii olarak yapılan kurutmada değişkenler (bağıl nem, sıcaklık, hava hareketi ve ürünün temizliği vb.) kontrol altında tutulamadığından ürünün kalitesi düşmektedir. Bu yüzden güneş enerjisiyle kurutma işlemi teknik yöntemlerle yapılmaktadır. Güneş enerjisini soğurması için kolektörler yerleştirilir ve bu kolektörler soğurdukları enerjiyi ısıya dönüştürüp havaya aktarırlar. Isınan hava fan yardımıyla kurutulacak olan ürünlerin üzerinden geçirilir ve kurutma işlemi gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 3.4 Güneş enerjisiyle kurutma sistemi.

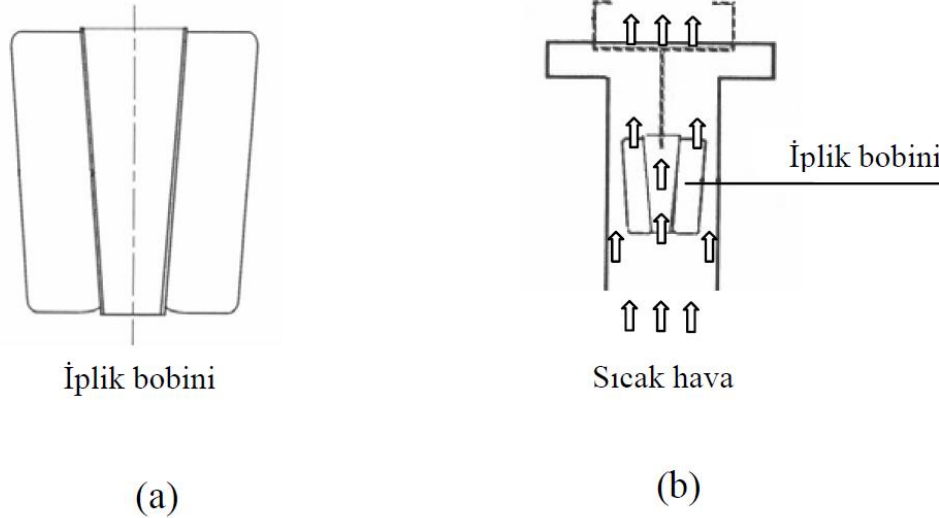
4. LİTERATÜR ÖZETİ

4.1 Literatür Çalışması

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.

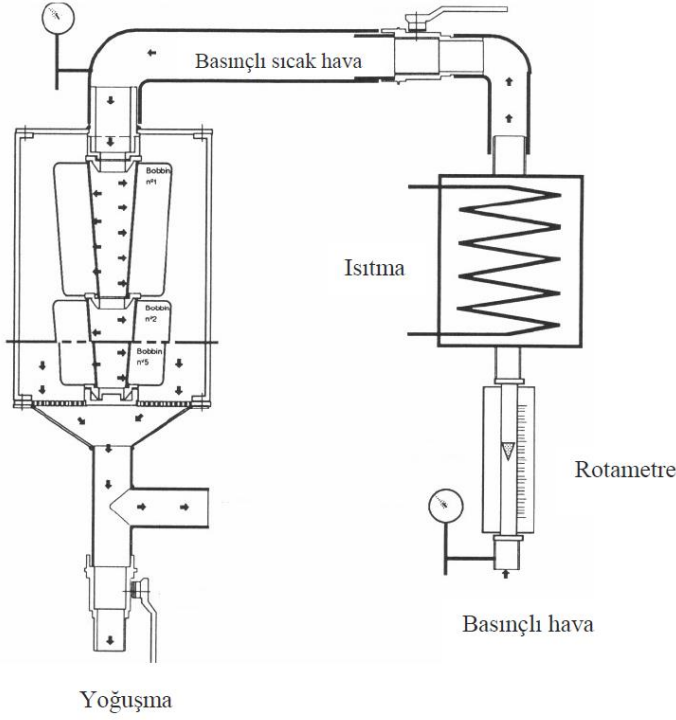
Ribeiro ve Ventura (1995), yün iplik bobinlerinin paralel hava sirkülasyonu ve içten dışa doğru hava sirkülasyonu yardımıyla olmak üzere iki şekilde kurutulmasıyla ilgili olarak iki ayrı bölümden oluşan deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Çalışmanın birinci kısmında sıcak hava akımı bobinlerin hem içinden hem de dışından geçerek bobinin kurutulması sağlanmıştır. Hava sıcaklıkları 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C ve hava hızları 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s olarak seçilmiştir.



Şekil 4.1 (a) İplik bobini, (b) Rüzgar tüneli içerisinde paralel sıcak hava akımına maruz bırakılmış iplik bobininin şematik gösterimi (Ribeiro ve Ventura 1995).

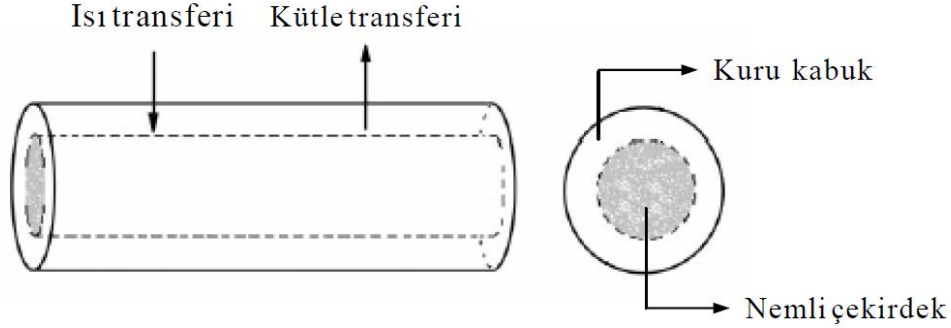
Çalışmanın ikinci kısmında ise beş adet iplik bobini kullanılmış ve hava iplik bobinlerinin sadece içinden geçerek kurutma sağlanmıştır. Bu düzenekteki bobinin sahip olduğu nem içeriği havanın bobine giriş ve çıkışındaki nem içeriğindeki farktan belirlenmiştir.



Şekil 4.2 Çalışmanın ikinci bölümü için basınçlı ve içten dışa doğru sirkülasyonlu hava akımının kullanıldığı deney düzeneğinin şematik görünümü (Ribeiro ve Ventura 1995).

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 bulundukları modelde, 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 ısı, bunu takip eden ve faz değişimi ile ilgili olan gizli ısı ve son olarak da malzemenin kuruyan kısmının duyulur ısıdır. 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 4.3 Sonsuz silindir için hareketli ara yüzey modelinin şematik gösterimi (Smith ve Farid 2004).

Hussain ve Dinçer (2003), 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 difüzyon katsayısı ifadelerinin yerini, Fick denkleminde sırasıyla nem içeriği ve nem difüzyon katsayısı almaktadır.

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

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.1)$$

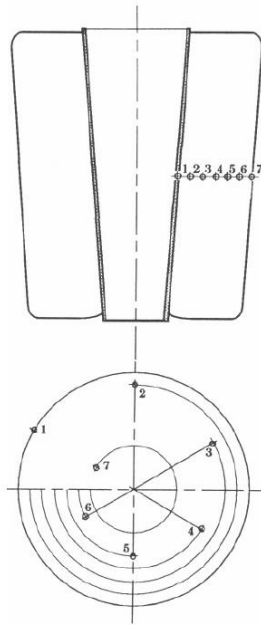
$$\frac{1}{D} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (4.2)$$

X: Nem içeriği, kg nem/kg kuru madde

D: Difüzyon katsayısıdır, m²/s

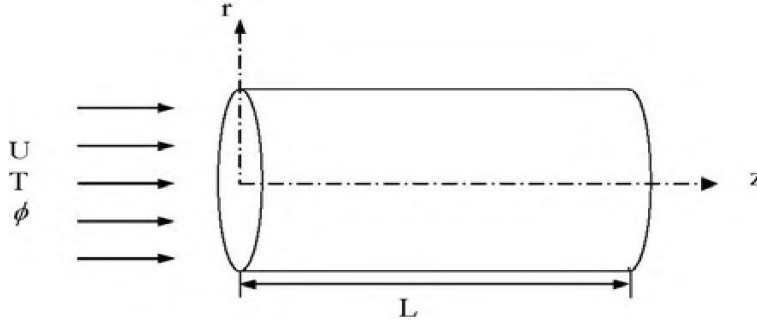
Atmosfer şartlarının dokumalar içerisinde meydana gelen ısı, su ve gaz transferi üzerine olan etkisinin araştırıldığı bir çalışmada eşzamanlı ısı ve kütle transferi için dinamik bir model ortaya konmuştur (Zhongxuan ve ark. 2004). Yün dokuma malzemesi için nem difüzyonu ve ısı transferinin ele alındığı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

Akyol (2007) çalışmasında, iplik bobininin sıcak hava ile kurutulmasını modellemiş ve literatürden aldıkları verilerle yün iplik bobinine ait termofiziksel özellikleri belirlemiştir. Modeli oluştururken Ribeiro ve Ventura'nın (1995) deney düzeneğindeki verileri kullanmışlardır. Bobinin iç yüzeyinden dış yüzeyine doğru yedi farklı noktadan veri alınmıştır.



Şekil 4.4 İplik bobini içerisinde sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar (Akyol 2007).

Kaya ve arkadaşları (2009), değişik kurutma şartlarında havucun kurutma davranışını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Çalışmada kullanılan hava sıcaklıkları, hızları ve bağıl nemleri sırasıyla 35°C, 45°C ve 55°C, 0,2 m/s, 0,4 m/s ve 0,6 m/s, %40, %55 ve %70'dir.



Şekil 4.5 Silindirik malzemenin şematik gösterimi.

Çalışmada kullanılan havuç dilimi için kütle transferi denklemi yazılarak sayısal bir çözüm geliştirilmiştir. Oluşturulan model aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{1}{D_{\text{eff}}} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (4.3)$$

D_{eff} : Efektif yayılım katsayısı, m^2/s

M : Herhangi bir zamandaki nem miktarı, $\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ kuru madde

r : Radyal koordinat

z : Eksenel koordinat

t : Zaman

Abbasi ve arkadaşları (2009), yaptıkları çalışmada mikrodalga yardımcı akışkan yataklı bir kurutucuda silindirik havuç parçalarının kurumasını modellemişlerdir. Havuç parçacığındaki sıcaklık ve nem dağılımını bulmak için ısı ve kütle transfer denklemlerini eş zamanlı çözmeyi önermişlerdir. Model oluşturulurken havuç çapının ve mikrodalga nüfuziyetinin homojen olduğu kabul edilmiştir. Yapılan kabullerle oluşturulan matematiksel model aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial(\rho_s X)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho_s r D_{\text{ef}} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (4.4)$$

$$\rho_s C_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_{\text{mic}} \quad (4.5)$$

ρ_s : Yoğunluk, kg/m³

X: Kuru bazda nem oranı, kg su/ kg kuru madde

r: Yarıçap, (m)

D_{ef} : Efektif yayılım katsayısı, m²/s

C_p : Taneciğin özgül ısısı, J/kg°C

T: Sıcaklık, °C

k: Isıl iletim katsayısı, W/m°C

Q_{mic} : Mikrodalga ısı üretimi, (W/m³)

Zielinska ve Markowski (2010), havuç parçacıklarının sıcak hava ile kurutulmasında hava sıcaklığının kuruma kinetiği üzerindeki etkisini incelemek üzere iki farklı matematiksel model kullanmışlardır. Hava sıcaklığı 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C olarak seçilerek sıcaklığın etkisi, hem deneysel hem de matematiksel modellerde incelenmiştir.

Barati ve Esfahani (2011), kurutma prosesinin modellemek üzere iletim ve taşınım yoluyla ısı ve kütle transferini dikkate almışlardır ve oluşturulan matematiksel model için analitik bir çözüm geliştirmişlerdir. Ayrıca teorik yaklaşımlarını literatürden aldıkları hem deneysel hem de nümerik sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Aşağıda araştırmacıların matematiksel modeli gösterilmektedir.

$$D \frac{\partial X}{\partial z} = -h_m (P_s - P_\infty) / \rho_{dp} \quad (4.6)$$

$$\rho \delta C \frac{dT}{dt} = h(T_\infty - T) - h_m L_w (P_\infty - P_s) \quad (4.7)$$

D: Efektif yayılım katsayısı, m²/s

X: Kuru bazda nem oranı, kg H₂O/kg kuru havuç

ρ : Havuç yoğunluğu, kg/m³

C: Taneciğin özgül ısısı, J/kg°C

h_m : Kütle taşınım katsayısı, s/m

δ : Yarı kalınlık, m

L_w : Buharlaşma gizli ısısı, J/kg

P_s : Havuç yüzeyinde buhar kısmi basıncı, Pa

P_∞ : Ortam havasındaki buharın kısmi basıncı, Pa

ρ_{dp} : Kuru havucun yoğunluğu, kg/m³

T : Havucun yüzey sıcaklığı, °C

T_∞ : Ortam havasının sıcaklığı, °C

t : Zaman, s

Mohamed ve arkadaşları (2012), buğday tohumu için mikrodalga kurutma yöntemini modellemişlerdir. Taşınımlı kurutma işlemi ile mikro dalga kurutmayı birleştirerek matematiksel model oluşturmuşlardır. Buğday tohumunun başlangıç nem değeri yükseldikçe kuruma oranının yükseldiğini görmüşlerdir.

Ricardo ve Sergio (2017), quinoa besininin kurutma kinetiğini incelemek üzere deneysel ve teorik çalışmışlardır. Çalışmanın teorik kısmında araştırmacılar ısı ve kütle transfer denklemlerini yazarak bir model oluşturmuşlardır. Ayrıca çalışmada deney verileri efektif yayılım katsayısını belirlemek için kullanılmıştır. Deneyde kullanılan hava sıcaklıkları 80, 100, 120 ve 140°C ve hızı 0.8 m/s'dir. Matematiksel model aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial W_1}{\partial r} \right) \quad (4.8)$$

$$\rho_{so} C_p \frac{dT}{dt} = h_T a_v (T_a - T) + \rho_{so} \left(\frac{dW_m}{dt} \right) L_w \quad (4.9)$$

D_{eff} : Efektif yayılım katsayısı, m²/s

W_1 : Yerel nem miktarı, kg H₂O/kg kuru madde

ρ_{so} : Kuru madde yoğunluğu, kg/m³

C_p : Taneciğin özgül ısısı, J/kg°C

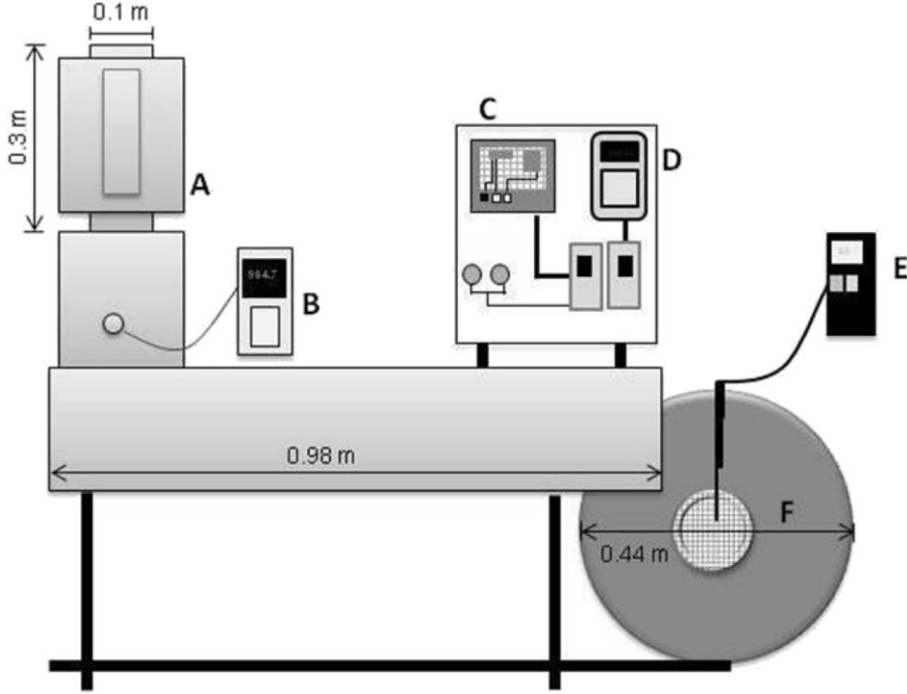
h_T : Isı transfer katsayısı, W/m²°C

W_1 : Ortalama nem miktarı, kg H₂O/kg kuru madde

L_w : Buharlaşma gizli ısısı, J/kg

r: Radyal koordinat, m

t: Zaman, s



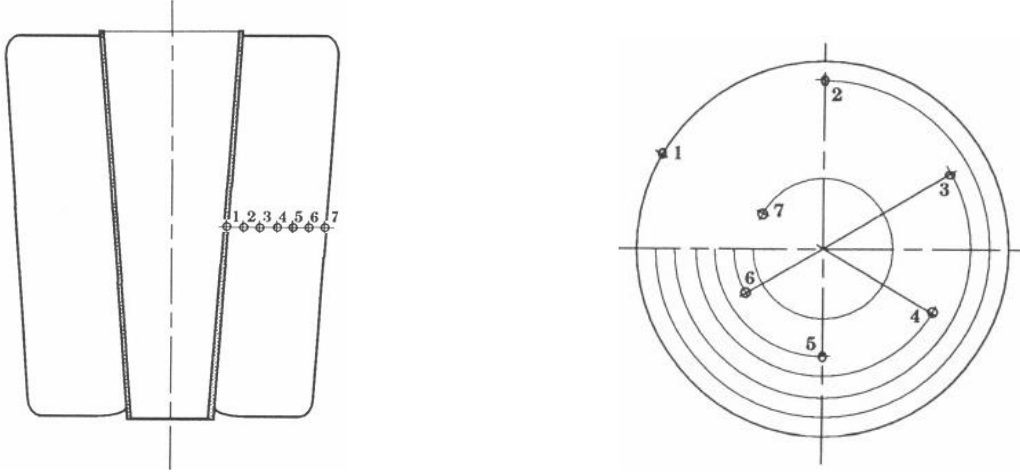
(A) Kurutma Odası, (B) Dijital mikromanometre, (C) Elektronik devre sıcaklık kontrolörü,
(D) Fan hız kontrolörü, (E) Dijital sıcak telli anemometre, (F) Santrifüj fan.

Şekil 4.6 Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ricardo ve Sergio 2017).

5. İPLİK BOBİNİ KURUTMA İŞLEMİNİN MODELLENMESİ

5.1 Deney Düzeneği

Namık Kemal Üniversitesinde kurulu olan deney düzeneğinde yün iplik bobinleri sıcak hava ile kurutulmuştur. Sıcak hava iplik bobinlerinin yalnızca içerisinden geçerek basınç farkından dolayı içeriden dışarıya doğru bir kurutma sağlanmıştır. Deneyde $450 \text{ m}^3/\text{saat}$ sıcak hava debisi kullanılmıştır. Sıcak havanın sıcaklığı ve basıncı sırasıyla 80°C ve 1 bar (etkin)'dir. Deneylerde kullanılan iplik bobinleri 35 mm iç çapa ve 150 mm uzunluğa sahiptir. İpliğin sarıldığı bobin, polietilen malzemeden yapılan üzerinde hava geçişini sağlayan deliklerden oluşmaktadır.



Şekil 5.1 İplik bobini içerisinde sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi termokupllar eşit aralıklarda ve farklı açılarda yerleştirilmiştir. Yapılan deneylerde bobin uzunluğu boyunca sıcaklığın çok fazla değişmediği görülmüştür. Bu nedenle matematik model oluşturulurken yalnızca radyal yönlerdeki değişim göz önüne alınmıştır.

5.2 Deneysel Veriler

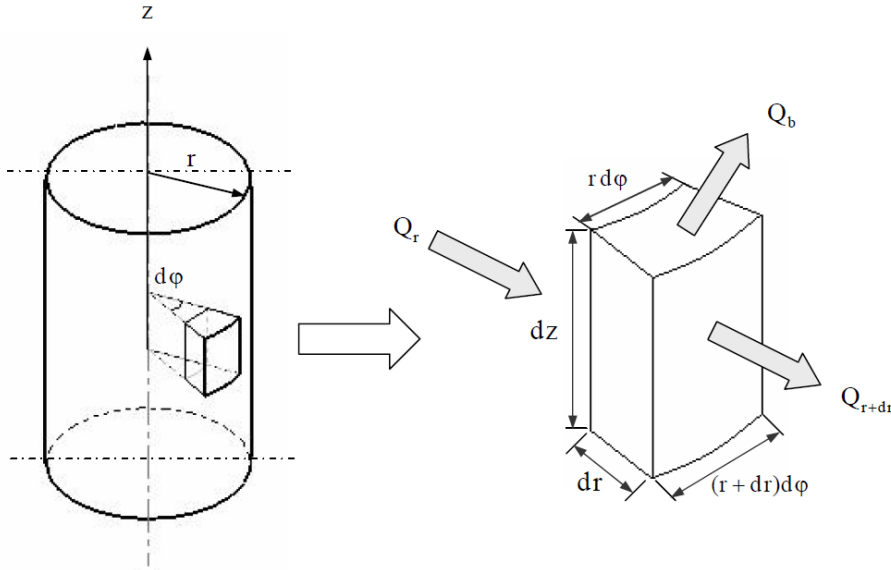
İplik bobinlerine ait deney düzeneğinde 7 ölçüm noktasında sıcaklık değerleri kurutma işlemi bitinceye kadar kaydedilmiştir. Deneysel veriler, matematiksel model için hem sınır şartı hem de modelin doğruluğunu saptamak için kullanılmıştır. Çizelge 5.1'de bu çalışmada kullanılan deneysel veriler gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Bobin içerisinde farklı noktalardaki sıcaklıkların zamanla değişimi.

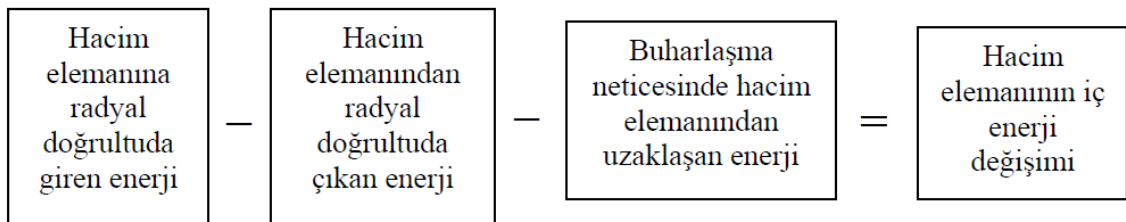
SÜRE (DAKİKA)	DENEYSEL SICAKLIKLAR (T _a , °C)						
	r ₁ (mm) 33	r ₂ (mm) 42,5	r ₃ (mm) 52	r ₄ (mm) 61,5	r ₅ (mm) 71	r ₆ (mm) 80,5	r ₇ (mm) 90
0	28,30	28,25	28,20	28,15	27,10	25,30	25,20
5	51,70	37,50	37,20	36,00	32,00	30,80	26,50
10	71,00	40,10	40,05	40,00	39,40	39,10	31,10
15	74,30	40,90	40,85	40,80	40,00	39,95	39,30
20	75,50	41,70	41,30	41,20	40,40	40,35	40,30
25	76,20	42,40	41,60	41,30	40,70	40,65	40,60
30	76,60	44,80	41,70	41,50	40,90	40,85	40,80
35	77,10	55,10	42,50	41,60	40,95	40,90	40,85
40	77,60	72,80	43,50	41,70	41,10	41,05	41,00
45	77,70	77,00	54,00	41,80	41,15	41,10	41,05
50	77,90	77,30	69,50	41,85	41,20	41,15	41,10
55	77,95	77,60	76,80	41,90	41,25	41,20	41,15
60	78,00	77,65	77,40	42,30	41,30	41,25	41,20
65	78,05	77,90	77,80	45,40	41,35	41,30	41,10
70	78,10	78,00	77,90	48,90	41,40	41,35	41,00
75	78,15	78,10	78,00	54,50	41,45	41,40	40,90
80	78,20	78,15	78,10	71,00	41,50	41,45	40,80
85	78,25	78,20	78,15	76,90	41,55	41,50	40,70
90	78,30	78,20	78,15	77,60	41,60	41,55	40,70
95	78,35	78,30	78,25	77,90	42,50	42,45	40,60
100	78,40	78,35	78,30	78,10	45,80	44,20	40,40
105	78,45	78,40	78,35	78,20	61,40	45,50	40,30
110	78,50	78,45	78,40	78,35	72,70	48,20	40,20
115	78,55	78,50	78,45	78,40	77,00	54,70	40,10
120	78,80	78,55	78,50	78,45	77,70	67,20	40,30
125	79,20	78,60	78,55	78,50	78,20	77,00	40,30
130	79,40	78,90	78,85	78,80	78,40	78,30	40,20
135	79,45	79,20	79,15	79,00	78,50	78,45	40,10
140	79,50	79,40	79,30	79,05	78,60	78,55	40,20
145	79,55	79,50	79,40	79,10	78,70	78,65	40,40
150	79,60	79,55	79,50	79,20	78,80	78,75	40,40
155	79,65	79,60	79,55	79,30	78,90	78,85	41,00
160	79,70	79,65	79,60	79,35	78,95	78,90	41,50
165	79,75	79,70	79,65	79,40	79,00	78,95	42,40
170	79,80	79,75	79,70	79,40	79,05	79,00	44,80
175	79,85	79,80	79,75	79,45	79,10	79,05	47,90
180	80,00	79,85	79,80	79,70	79,15	79,10	58,20
185	80,10	79,90	79,85	79,75	79,20	79,15	72,60
190	80,15	79,95	79,90	79,80	79,30	79,25	77,40
195	80,20	80,00	79,95	79,90	79,50	79,45	78,70
200	80,25	80,20	80,15	80,00	79,60	79,55	79,20
205	80,30	80,25	80,20	80,10	79,65	79,60	79,50
210	80,35	80,30	80,25	80,15	79,70	79,65	79,60
215	80,40	80,35	80,50	80,20	79,75	79,80	79,70

5.3 Matematiksel Modelin Oluşturulması

Kurutma işlemi için oluşturulan model ısı ve kütle transferinin çözümünden ibarettir. Bu denklemlerin yazılmasından sonra sınır şartları belirlenir ve daha sonra denklemler uygun bir yöntemle çözülür. Bu çalışmada kullanılacak matematiksel model, Akyol'un (2007) doktora çalışmasından alınmıştır (Akyol 2007).



Şekil 5.2 Silindirik koordinatlarda birim hacim elemanı için enerji dengesi gösterimi



$$Q_r - Q_{r+dr} - Q_b = Q_d \quad (5.1)$$

Hacim elemanına radyal doğrultuda giren enerji Fourier yasasıyla ifade edilir.

$$Q_r = -k(r dz d\phi) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5.2)$$

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

$$Q_{r+dr} = Q_r + \frac{\partial}{\partial r}(-k(rd_z d_\varphi) \frac{\partial T}{\partial r})d_r$$

$$Q_{r+dr} = Q_r - d_z d_\varphi d_r \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) \quad (5.3)$$

$$Q_d = C_v (rd_z d_\varphi d_r) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.4)$$

Buharlaşma ile kaybedilen ısı buharlaşan su miktarıyla (\dot{m}_b) buharlaşma gizli ısısının (h_{sb}) arpımına eşittir.

$$Q_b = \dot{m}_b h_{sb}$$

Buharlaşan su miktarı, faz donüşüm faktörü, kuru kütle miktarı ve birim hacim elemanın zamanla nem değişiminin çarpımına eşittir.

$$\dot{m}_b = \varepsilon m_{kuru} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.5)$$

Faz donüşüm faktörü (ε) buharlaşan su miktarının birim hacim elemanındaki toplam su miktarına oranıdır.

$$m_{kuru} = \rho_o r d_z d_\varphi d_r \quad (5.6)$$

$$Q_b = \varepsilon \rho_o r d_z d_\varphi d_r \frac{\partial X}{\partial t} h_{sb} \quad (5.7)$$

Çıkarılan bağıntılar enerji dengesi denkleminde yerine konup düzenlenirse aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \varepsilon \rho_o r h_{sb} \frac{\partial X}{\partial t} = C_v r \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.8)$$

Hacim elemanı içerisindeki açısal ve aksenal doğrultudaki sıcaklık değişimlerinin küçük olması dolayısıyla ihmal edilmesi durumunda matematiksel model aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \varepsilon \rho_o h_{sb} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.9)$$

(5.9) denkleminin sağ taraftaki ikinci terimi buharlaşmayla ayrılan ısıyı göstermektedir. Bu bağıntıyı zincir kuralını kullanarak aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\varepsilon\rho_0h_{sb}\frac{\partial X}{\partial t} = \varepsilon\rho_0h_{sb}\frac{\partial X}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.10)$$

Yeniden düzenlenen buharlaşma ifadesini (5.9) denklemindeki buharlaşma ifadesinin yerine koyarsak:

$$C_v\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) - \varepsilon\rho_0h_{sb}\frac{\partial X}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.11)$$

$$\left(C_v + \varepsilon\rho_0h_{sb}\frac{\partial X}{\partial T}\right)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) \quad (5.12)$$

C_v : Islak bobin için birim hacmin ısınma ısısı, $J/(m^3K)$

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

t : Zaman, s

T : Sıcaklık, $^{\circ}C$

r : Radyal koordinat, m

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

ε : Faz dönüşüm faktörü,

ρ_0 : İplik bobininin kuru kütlelerinin yoğunluğu, kg/m^3

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

Oluşturulan matematiksel model incelendiğinde modeli oluşturan denklemin birkaç termodinamiksel özelliği içeren lineer olmayan bir denklem olduğu görülmektedir. Bobin içerisindeki yerel nem içeriğini ölçmek pratikte oldukça güçtür (Akyol 2007). Bu yüzden iplik bobinin kurutulması işleminin modellenmesinde yukarıdaki ifadenin yerine; faz dönüşüm faktörünü içinde barındıran birim hacmin efektif ısınma ısısı (C_{ve}) ile kütle taşınımı ve ısı iletim katsayısını içinde barındıran efektif ısı iletim katsayısı (k_e) kullanılarak modeli aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$C_{ve}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_e r\frac{\partial T}{\partial r}\right) \quad (5.13)$$

Akyol'un elde ettiği modelde hava, iplik bobinlerinin hem içerisinden hem de dışından geçmektedir. Bu şekilde yapılan kurutma işleminde hava, ipliklerin içinden çoğunlukla difüzyon vasıtasıyla ilerler. Bu yüzden havanın taşınım etkisi Akyol'un çalışmasında yer almamaktadır. Bu çalışmada ise hava, iplik bobinlerinin yalnızca içerisinden geçtiği için iplik bobininin içi ile dışı arasında basınç farkı oluşmaktadır. Belirli bir basınç altında belirli bir sıcaklıkta hareket eden hava kütlesi, ısı (iç) enerji ve kinetik enerjiye sahiptir. Isıl ve kinetik enerji, iç yüzeyden iplikler arası boşluklardan bobin içerisine yığın akışkan hareketi ile katılır ve bobin hacmine iplikler arası boşluklardan girer. Enerji ayrıca yüzeylerden moleküler işlemler ile de geçebilir. Bu iki yolla olabilir: İletim ve madde yayılımı. Bununla birlikte akışkanın madde içerisinden geçişi sırasında basınç ve sürtünme kuvvetleri tarafından iş yapılır. İplikler arası boşluklardan geçen sıcak hava, iplikler ve su molekülleri ile çarpışarak enerjisinin bir kısmını onlara aktarır. Hareketi sırasında buharlaşan su moleküllerini de alarak nem miktarı artan hava dış yüzeye doğru hareketine devam eder ve ısınmış su molekülleri de zorlanmış difüzyona uğrar (Akyol ve ark. 2015). Bu nedenle havanın zorlanmış taşınım etkisi de denkleme dahil edilmelidir.

$$C_{ve} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_e r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + P_e(r) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5.14)$$

$P_e(r)$ konvektif terim olup koordinatın fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$P_e(r) = (c_{ph}\rho_h + c_{pb}\rho_b)V_a \quad (5.15)$$

C_{ve} : Islak bobin için birim hacmin efektif ısınma ısısı, $J/(m^3K)$

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

P_e : Konvektif terim, $W/(m^2K)$

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

c_{pb} : Su buharının ısınma ısısı, $J/(kgK)$

ρ_h : Kuru havanın yoğunluğu, kg/m^3

ρ_b : Su buharının yoğunluğu, kg/m^3

V_a : Havanın iplik bobininin içerisindeki ilerleme hızı, m/s

t: Zaman, s

T: Sıcaklık, °C

r: Radyal koordinat, m

Fiziksel prosesi ifade eden matematiksel model eşitlik (5.14) şeklindedir. Aşağıdaki gibi başlangıç ve sınır koşullarında bir sonraki bölümde anlatılacak sonlu farklar yöntemi ile düz problem çözülmüştür.

$$r_{iç} < r < r_{dış}; \quad 0 < \tau < \tau_m$$

$$T(r, 0) = T_i \quad T(r_{iç}) = f_1(\tau); \quad T(r_{dış}) = f_2(\tau)$$

6. SONLU FARKLAR METODU VE PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

6.1 Sonlu Farklar Metodu

Isı ve kütle transferi denklemleri diğer çoğu mühendislik probleminde olduğu gibi kısmi türevleri, lineer olmayan ifadeleri barındıran zor problemlerdir. Bu problemlerin analitik çözümü çoğunlukla yoktur. Ancak bir takım basitleştirmelerle çözülebilirler. Bu problemleri çözmek için çoğunlukla sayısal yöntemler kullanılır. Son yıllardaki bilgisayar sistemlerinin ciddi bir şekilde gelişmesi sayesinde sayısal yöntem çözümleri yaygınlaşmıştır (Özışık M.N. 2000)

Sayısal yöntemleri uygulamak için diferansiyel denklemlere ayrıklaştırma yapılarak diferansiyel denklemler lineer cebirsel ifadelere dönüştürülür. Isı transferi ve akışkanlar mekaniği denklemlerinin çözümü için kullanılan temelde iki yöntem vardır. Bunlar sonlu farklar metodu (FDM) ile sonlu elemanlar metodu (FEM) dir. Her iki yöntemin de kendine göre avantajları vardır. Ancak bütün problemler için mükemmel bir çözüm olacak bir metod yoktur. Bir boyutlu sistemler için kullanılan metodlar iki ve üç boyutlu sistemler için geçerli olmayabilir. FDM çok kolay öğrenilebilen ve çok kompleks geometriye sahip olmayan kısmi diferansiyel denklemler için çok kullanışlıdır. Geometrinin karmaşıklaşması halinde FDM çok iyi sonuç vermemektedir. FEM ise karmaşık geometriler için daha uygun bir metottur. Bu çalışmada diferansiyel denklemin çözümü için FDM kullanılacaktır.

Diferansiyel denklemler için uygun bir çözüm yöntemi bulabilmek için diferansiyel denklemin tipini bilmek önemlidir. Temel olarak eliptik, parabolik ve hiperbolik olmak üzere üç çeşit denklem tipi vardır. Aşağıdaki Forsythe ve Warsow'un (1967) kullandığı denklem üzerinden bu üç tip denklemin neler olduğu gösterilecektir.

$$A \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial x} + C \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D \frac{\partial \phi}{\partial x} + E \frac{\partial \phi}{\partial y} + F\phi + G(x, y) = 0 \quad (6.1)$$

$$B^2 - 4AC < 0 \quad \text{eliptik}$$

$$B^2 - 4AC = 0 \quad \text{parabolik}$$

$$B^2 - 4AC > 0 \quad \text{hiperbolik}$$

Bir diferansiyel denklemini analitik olarak çözdüğümüzde ortaya çıkan sonuç, çözüm yapılan alandaki tüm noktalar için geçerlidir. Problem analitik olarak çözülemediği zaman

sonlu farklar metodu kullanılır. Bu yöntemde dikkate alınan kontrol hacmindeki belli noktalar için çözüm mevcuttur.

Sonlu farklar metodundaki kontrol hacmini noktalara ayırma işlemine ayrıklaştırma denir. Ayrıklaştırma işlemi temel olarak iki şekilde yapılır. Bunlardan birincisi Taylor serisi açılımı, diğeri ise kontrol hacmi yaklaşımıdır. Bu çalışmada Taylor serisi açılımı kullanılacağı için bu yöntem açıklanacaktır.

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \frac{df}{dx} \Delta x + \frac{d^2f}{dx^2} \frac{1}{2!} \Delta x^2 + \frac{d^3f}{dx^3} \frac{1}{3!} \Delta x^3 + \dots, \quad -\infty < x < \infty \quad (6.2)$$

$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - \frac{df}{dx} \Delta x + \frac{d^2f}{dx^2} \frac{1}{2!} \Delta x^2 - \frac{d^3f}{dx^3} \frac{1}{3!} \Delta x^3 + \dots, \quad -\infty < x < \infty \quad (6.3)$$

Yukarıdaki iki Taylor serisi açılımı sonlu farklar metodunun df/dx ifadesi için kullandığı temel ifadedir. (6.2) ve (6.3) no'lu denklemler düzenlenip tekrar yazılırsa sonlu farklar için kullanılan ileri ve geri farklar ifadesi çıkarılmış olur.

$$\frac{df}{dx} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} + 0(\Delta x) \quad \text{İleri farklar} \quad (6.4)$$

$$\frac{df}{dx} = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} + 0(\Delta x) \quad \text{Geri farklar} \quad (6.5)$$

Buradaki $0(\Delta x)$ ifadesi sonlu farklar yaklaşımının hata derecesini (truncation error) gösterir. Taylor serisi için kullanılan iki açılımı birbirinden çıkarırsak merkezi farklar açılımını bulmuş oluruz.

$$\frac{df}{dx} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} + 0(\Delta x^2) \quad \text{Merkezi farklar} \quad (6.6)$$

Görüldüğü gibi merkezi farklar açılımındaki hata ikinci derecededir. İleri ve geri farklardaki hata birinci dereceden olduğu için merkezi farklar diğer iki açılıma göre daha doğru bir yaklaşımdır.

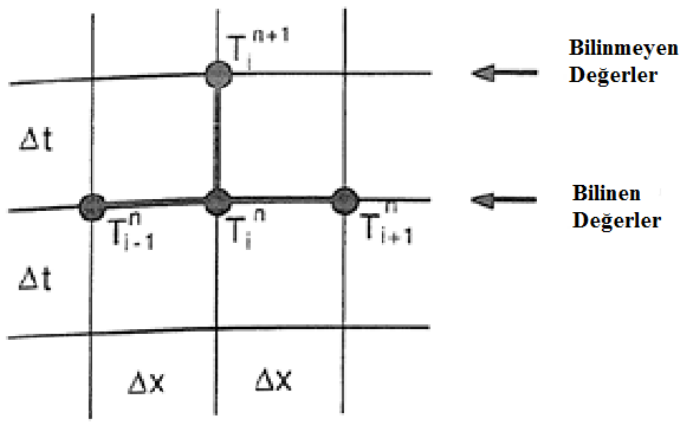
İkinci dereceden türev için sonlu farklar açılımı yapmak üzere Taylor serisinin açılımları birbiriyle toplanır ve aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{d^2f}{dx^2} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x^2} + 0(\Delta x^2) \quad (6.7)$$

Kısmi ve ikinci dereceden türev içeren ısı transferi denkleminin çözümü için iki değişik sonlu farklar metodu kullanılabilir. Bunlar explicit ve implicit yöntemlerdir.

6.1.1 Explicit metot

Explicit metot, mevcut zamandaki değerleri kullanarak bir sonraki zaman adımındaki değerlerin bulunduğu yöntemdir. Bu yöntemde başlangıç durumundaki değerler biliniyorsa diğer bütün zaman adımlarındaki değerler bulunabilir. Bu yöntemdeki kesme hatası $O(\Delta t)$, $O(\Delta x^2)$ şeklindedir.



Şekil 6.1 Explicit metodu için sonlu farklar hücresi.

Örnek olarak kartezyen koordinatlardaki zamana bağlı bir boyutlu içerisinde ısı üretimi olmayan ısı transferi denklemini düşündüğümüzde:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{n+1,i} - T_{n,i}}{\Delta t} \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{n,i+1} - 2T_{n,i} + T_{n,i-1}}{\Delta x^2} \quad (6.10)$$

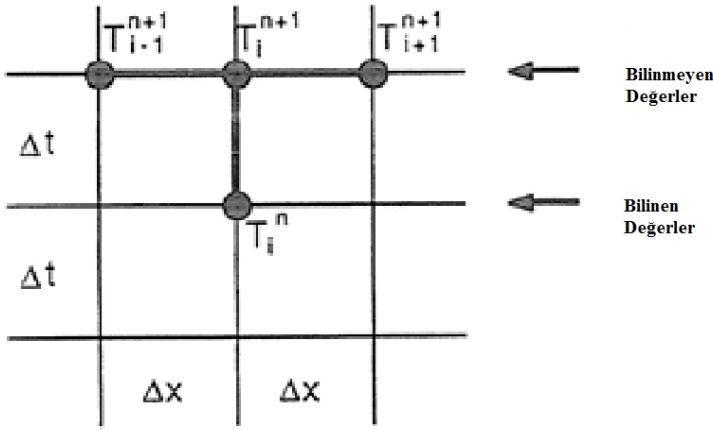
(6.8) numaralı denklem yukarıda gösterilen şekilde açılarak çözüm gerçekleştirilir. Explicit metodunun en büyük dezavantajı kararlılık sınırının olmasıdır.

$r \leq 1/2$ için kararlıdır.

$$r = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (6.11)$$

6.1.2 İmplicit metot

İmplicit metot mevcut zamanda bilinen bir değer kullanılarak bir sonraki zaman adımı için denklem sistemi oluşturur ve bu denklem sistemi eş zamanlı çözülür. Explicit metoda göre daha kararlı bir yöntemdir. Kesme hatası ($O(\Delta t)$, $O(\Delta x^2)$) şeklindedir. Kesme hatası explicit metotla aynı olmasına rağmen kararlılık sınırı olmaması nedeniyle explicit metoda göre daha iyi bir yöntemdir.



Şekil 6.2 İmplicit metodu için sonlu farklar hücresi

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6.12)$$

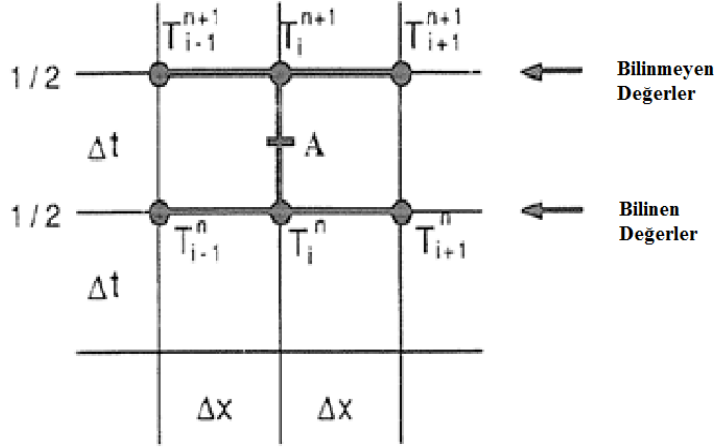
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{n+1,i} - T_{n,i}}{\Delta t} \quad (6.13)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{n+1,i+1} - 2T_{n+1,i} + T_{n+1,i-1}}{\Delta x^2} \quad (6.14)$$

6.1.3 Crank-Nicolson metodu

İmplicit metodu iyi bir yöntem olmasına karşın zamana göre birinci dereceden kesme hatasına (truncation error) sahiptir. Bu yüzden Crank-Nicolson adında başka bir implicit

yöntem geliştirilmiştir. Bu yönteme göre denklemin sol tarafı aynı kalmak koşuluyla sağ tarafı basit explicit ve basit implicit yöntemin aritmetik ortalaması alınarak yazılır. Böylece zamandaki kesme hatası ikinci dereceden olmuş olur ($0(\Delta t^2)$, $0(\Delta x^2)$).



Şekil 6.3 Crank-Nicolson metodu için sonlu farklar hücresi.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{n+1,i} - T_{n,i}}{\Delta t} \quad (6.16)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \frac{1}{2} \left[\frac{T_{n+1,i+1} - 2T_{n+1,i} + T_{n+1,i-1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{n,i+1} - 2T_{n,i} + T_{n,i-1}}{\Delta x^2} \right] \quad (6.17)$$

Yukarıda anlatılan yöntemler seçilen kontrol alanındaki iç noktaların bulunmasında kullanılır. Sınır noktalarının bulunması için ise sınır şartları kullanılır. Temel olarak üç çeşit sınır şartı bulunmaktadır. Sınırlarda sıcaklığın bilinmesi, taşınım ile ısı geçişi olma durumu ve sınırda tanımlanmış belli ısı akısı.

Bu çalışmadaki sınır şartı sınırlardaki sıcaklığın bilindiği durumdur. Bu şartlarda içerdeki noktalar yukarıda anlatılan yöntemlerden biri kullanılarak belirlenir ve problem çözülmüş olur.

6.1.4 Halkalı silindir için sonlu farklar yöntemi

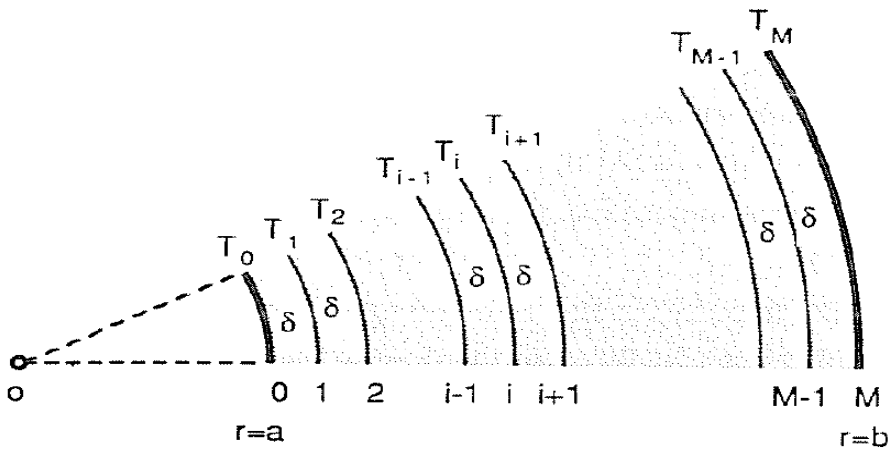
Deneyslerde kullanılan iplik bobinleri halkalı silindir şeklinde geometriye sahiptir. Bu yüzden bu bölümde halkalı silindirler için sonlu farklar metodundan bahsedilecektir. Sonlu farklar metodunu uygulanmak üzere (5.14) numaralı denklem kullanılacaktır.

$$C_{ve} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_e r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + P_e \frac{\partial T}{\partial r}$$

Yukarıdaki denklem bir önceki bölümde anlatılan üç değişik sonlu farklar yöntemiyle de çözülecektir.

6.1.5 Explicit uygulaması

Explicit yöntemini uygulamak üzere $a \leq r \leq b$ aralığında M eşit parçaya bölünmüş her bir parçanın kalınlığı eşit bir silindir düşünülecektir.



Şekil 6.4 Halkalı silindirin eşit parçalara bölünmüş şekli.

$$\delta = \frac{b - a}{M} \quad (6.18)$$

(5.14) numaralı denklem korunumlu olmayan şekilde (non-conservative) yazılırsa:

$$C_{ve} \frac{\partial T}{\partial t} = \left[k_e \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{\partial r} \left(\frac{k_e}{r} + \frac{\partial k_e}{\partial r} \right) \right] + P_e \frac{\partial T}{\partial r} \quad (6.19)$$

(6.19) numaralı denklemdeki zamana bağlı terim ileri farklar, diğer terimler ise merkezi farklar şeklinde açılacaktır.

$$(C_{ve})_{n,i} \frac{T_{n+1,i} - T_{n,i}}{\Delta t} = \left[(k_e)_{n,i} \frac{T_{n,i+1} - 2T_{n,i} + T_{n,i-1}}{\delta^2} + \frac{T_{n,i+1} - T_{n,i-1}}{2\delta} \left(\frac{(k_e)_{n,i}}{a+i\delta} + \frac{(k_e)_{n,i+1} - (k_e)_{n,i-1}}{2\delta} \right) \right] + P_e \frac{T_{n,i+1} - T_{n,i-1}}{2\delta} \quad (6.20)$$

$$T_{n+1,i} = T_{n,i+1} \left[\frac{(r)_{n,i}}{\delta^2} + \frac{\left(\frac{(r)_{n,i}}{a+i\delta} + \frac{(k_e)_{n,i+1} - (k_e)_{n,i-1}}{2\delta} \frac{\Delta t}{(C_{ve})_{n,i}} \right) + \frac{P_e}{2\delta} \frac{\Delta t}{(C_{ve})_{n,i}}}{2\delta} \right] + T_{n,i} \left[-2 \frac{(r)_{n,i}}{\delta^2} + 1 \right] + T_{n,i-1} \left[\frac{(r)_{n,i}}{\delta^2} - \frac{\left(\frac{(r)_{n,i}}{a+i\delta} + \frac{(k_e)_{n,i+1} - (k_e)_{n,i-1}}{2\delta} \frac{\Delta t}{(C_{ve})_{n,i}} \right) - \frac{P_e}{2\delta} \frac{\Delta t}{(C_{ve})_{n,i}}}{2\delta} \right] \quad (6.21)$$

$$r = \frac{(k_e)_{n,i} \Delta t}{(C_{ve})_{n,i}} \quad (6.22)$$

(6.21) denklemi ara noktalar için geçerlidir. Sınırlarda sıcaklıklar bilindiği için problem çözülmüş olur. Daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi explicit yönteminin kararlılığı sınırlıdır.

$$\frac{r}{\delta^2} \leq 1/2 \text{ için kararlıdır.}$$

6.1.6 İmplicit uygulaması

İmplicit uygulaması için şekil 6.4 ile gösterilen silindir kullanılacaktır. (6.19) numaralı denklem implicit olarak açılırsa problem çözümü için gerekli olan sonlu farklar denklemi aşağıdaki gibi olur:

$$(C_{ve})_{n,i} \frac{T_{n+1,i} - T_{n,i}}{\Delta t} = \left[(k_e)_{n,i} \frac{T_{n+1,i+1} - 2T_{n+1,i} + T_{n+1,i-1}}{\delta^2} + \frac{T_{n+1,i+1} - T_{n+1,i-1}}{2\delta} \left(\frac{(k_e)_{n,i}}{a+i\delta} + \frac{(k_e)_{n,i+1} - (k_e)_{n,i-1}}{2\delta} \right) \right] + P_e \frac{T_{n+1,i+1} - T_{n+1,i-1}}{2\delta} \quad (6.23)$$

Bu denklem aynı şekilde ara noktalar için (M-1) adet denklem takımı oluşturur ve eş zamanlı olarak çözüldüğünde ara noktalar için sıcaklık değerleri bulunmuş olur. Sınırlarda sıcaklıklar bilindiği için denklem bütün noktalar için çözülmüş olur. Bu yöntem her şartta kararlıdır.

6.1.7 Crank-Nicolson uygulaması

Aynı işlemler bu yöntem için uygulanırsa (6.19) numaralı denklem aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$(C_{ve})_{n,i} \frac{T_{n+1,i} - T_{n,i}}{\Delta t} = \left[\frac{(k_e)_{n,i}}{2} \left(\frac{T_{n+1,i+1} - 2T_{n+1,i} + T_{n+1,i-1}}{\delta^2} + \frac{T_{n,i+1} - 2T_{n,i} + T_{n,i-1}}{\delta^2} \right) + \frac{T_{n,i+1} - T_{n,i-1}}{2\delta} \left(\frac{(k_e)_{n,i}}{a+i\delta} + \frac{(k_e)_{n,i+1} - (k_e)_{n,i-1}}{2\delta} \right) \right] + P_e \frac{T_{n,i+1} - T_{n,i-1}}{2\delta} \quad (6.24)$$

6.2 Konvektif terimi içeren ve içermeyen matematiksel modellerin karşılaştırılması

Bir önceki bölümde teorisi anlatılan Akyol'un (2007) matematiksel modeli, iplik bobininin iç ve dış yüzeylerinden paralel olarak geçen sıcak hava koşullarında kurutma prosesi için tasarlanmıştır. Akyol ve ark. (2010) daha sonraki çalışmalarında (5.13) numaralı eşitliği kullanarak uygun sınır koşullarında düz ve ters ısı transferi problemi çözmüşlerdir ve deneyle iyi uyum içerisinde olan sonuçlar elde etmişler. Bu çalışmada ise kurutma iç yüzeyden dış yüzeye doğru geçen basınçlı sıcak hava koşulunda gerçekleştiği için havanın taşınım etkisi de modele ilave edilerek matematiksel model çözülmüştür. Yeni modelin doğruluğunu incelemek üzere yeni matematiksel model ile Akyol'un modeli çözümlü deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yeni modelin içerdiği, havanın taşınım etkisini içeren konvektif terim (P_e) koordinatın fonksiyonudur. Bu çalışmada kullanılan P_e değerleri çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Ayrıca her iki modelin de içerisinde bulunan, faz dönüşüm faktörünü içinde barındıran birim hacmin efektif ısınma ısısı (C_{ve}) ile kütle taşınımı ve ısı iletim katsayısını içinde barındıran efektif ısı iletim katsayısı (k_e) çizelge 6.2 ve 6.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 İplik bobini için taşınım katsayısının sıcaklıkla değişimi.

T (°C)	P_e (W/m ² K)
17,0	150
21,0	145
24,0	140
27,0	135
30,0	130
32,0	125
34,0	120
36,0	115
38,0	110
40,0	105
40,5	100
41,0	92
41,5	87
42,0	82
42,4	77

42,5	72
42,8	67
T (°C)	P_e (W/m ² K)
43,0	62
43,3	57
43,6	52
43,7	47
43,8	42
44,0	37
44,2	36
44,5	35
45,0	210
45,5	215
46,0	220
46,5	225
47,0	230

47,3	235
48,5	400
49,0	405
50,0	410
T (°C)	P_e (W/m ² K)
51,0	415
52,0	420
53,0	425
54,0	630
55,0	635
56,0	640
57,0	645
58,0	650
59,0	655
60,0	660
62,0	665

64,0	670
66,0	675

68,0	680
70,0	685

75,0	690
80,0	695

Çizelge 6.2 İplik bobini için birim hacmin efektif ısınma ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi (Akyol, 2007).

T (°C)	$C_{ve} \cdot 10^{-6}$ (J/m ³ K)
17,0	1,50
21,0	1,45
24,0	1,25
27,0	1,55
30,0	1,60
32,0	1,95
34,0	2,00
36,0	2,20
38,0	2,90
40,0	3,55
40,5	4,00
41,0	4,40
41,5	5,00
42,0	6,00
42,4	8,00
42,5	19,0
42,8	31,54

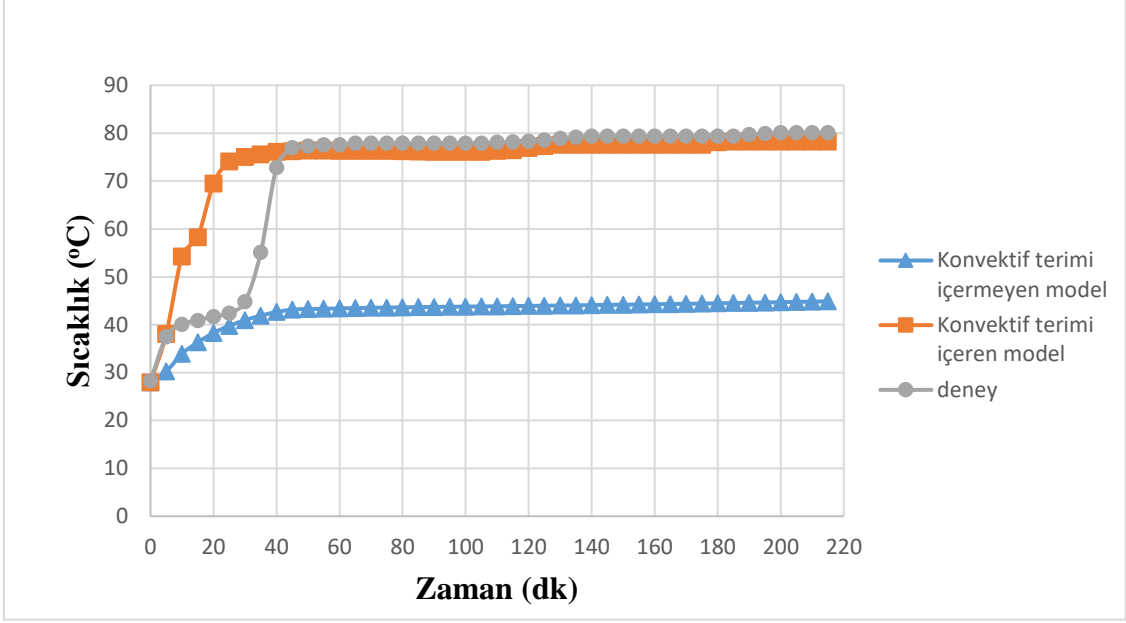
T (°C)	$C_{ve} \cdot 10^{-6}$ (J/m ³ K)
43,0	44,46
43,3	57,00
43,6	96,90
43,7	134,9
43,8	138,7
44,0	121,6
44,2	112,1
44,5	98,80
45,0	79,04
45,5	64,22
46,0	52,44
46,5	31,92
47,0	18,62
47,3	11,59
48,5	9,20
49,0	8,50
50,0	7,70

T (°C)	$C_{ve} \cdot 10^{-6}$ (J/m ³ K)
51,0	7,50
52,0	6,90
53,0	6,50
54,0	6,25
55,0	4,90
56,0	4,75
57,0	4,45
58,0	4,25
59,0	4,05
60,0	3,90
62,0	3,55
64,0	3,00
66,0	3,05
68,0	3,10
70,0	3,05
75,0	3,25
80,0	3,45

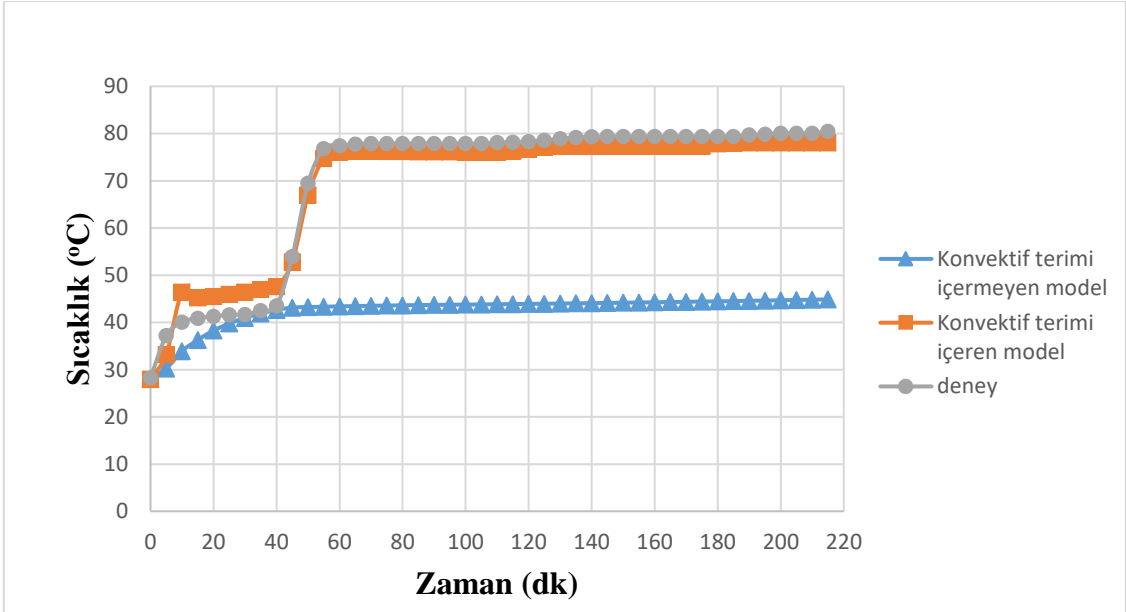
Çizelge 6.3 İplik bobini için ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi (Akyol, 2007).

T (°C)	k_e (W/mK)
17,00	0,200
22,00	0,150
27,00	0,115
31,00	0,092
35,00	0,081
40,00	0,072
42,00	0,068
44,00	0,066

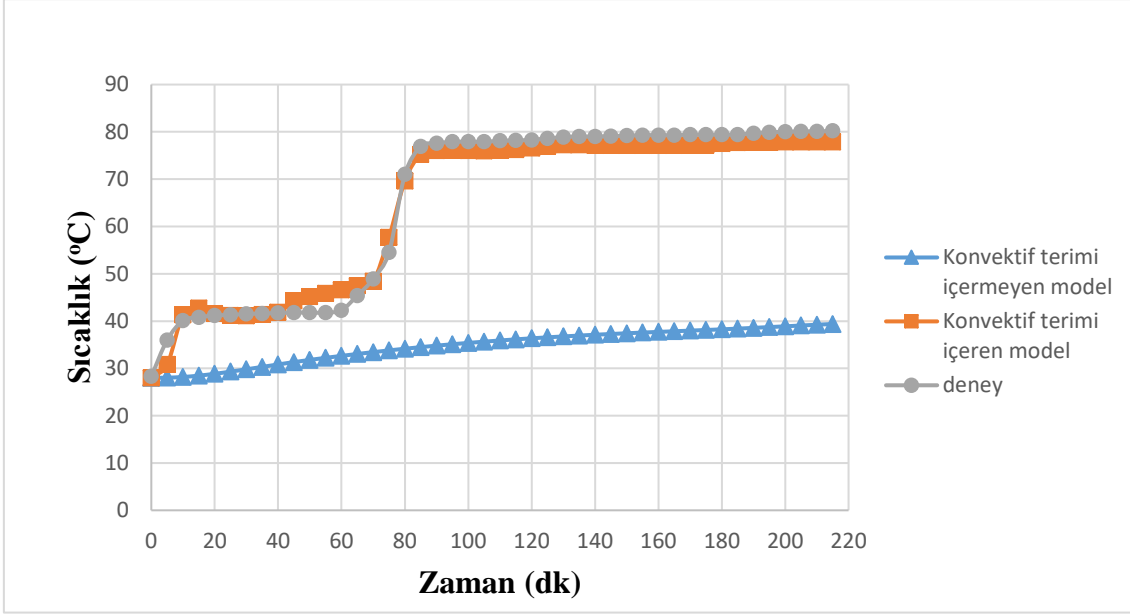
T (°C)	k_e (W/mK)
46,00	0,063
48,00	0,062
50,00	0,061
55,00	0,060
60,00	0,061
65,00	0,064
70,00	0,067
75,00	0,070



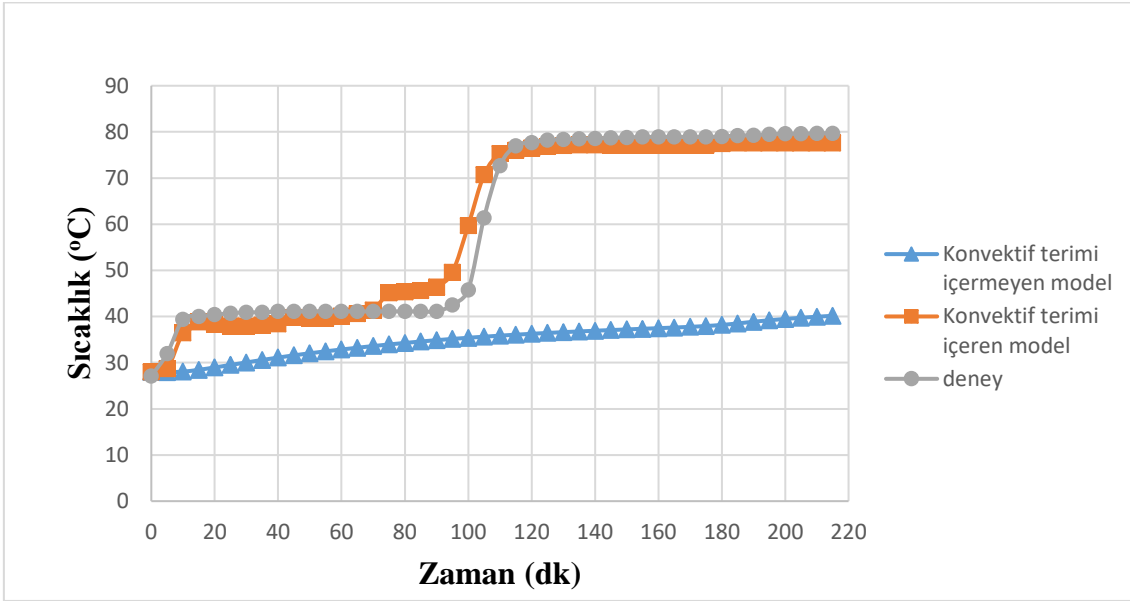
Şekil 6.5 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.



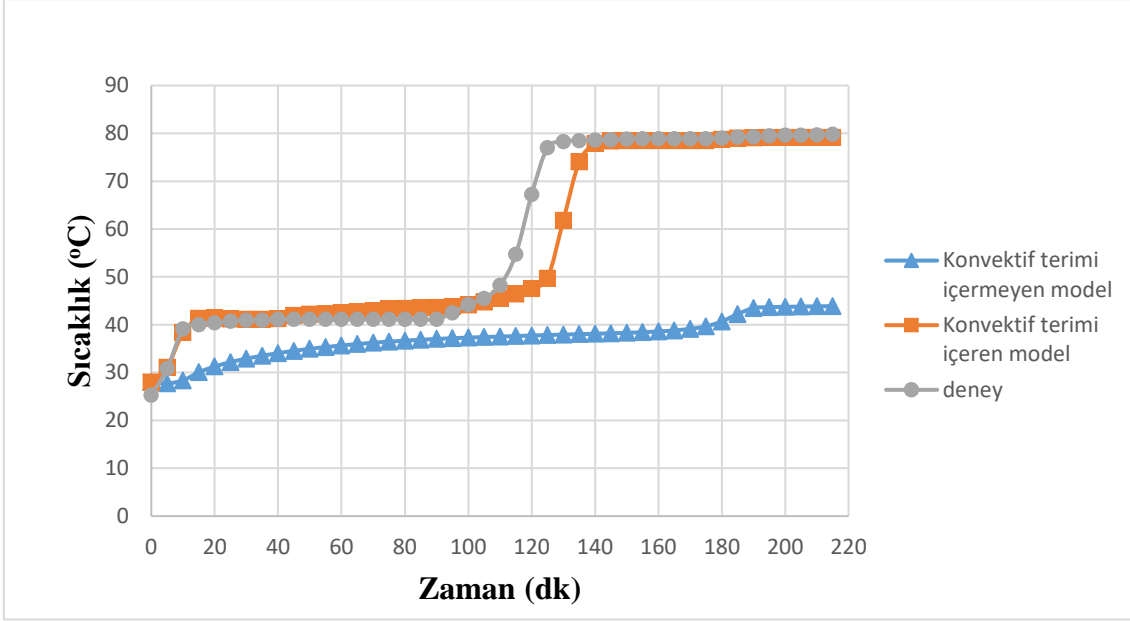
Şekil 6.6 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 6.7 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 6.8 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 6.9 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması.

Sonuçlar incelendiğinde (Şekil 6.5-Şekil 6.9) Akyol'un denkleminin, içten dışa basınçlı kurutma prosesi için doğru sonuçlar vermediği açıkça gözükmemektedir. Bu çalışmada sunulan matematiksel modelden elde edilen sonuçlarla deney sonuçlarının karşılaştırılması ise deney ile model arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Böylece modelde yer alan konvektif terimin problemin çözümü için gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

6.3 Zaman ve Uzay Adımının Belirlenmesi

Zaman ve uzay adımının seçimi, nümerik çözümlerde hatayı ve yakınsama hızını önemli ölçüde etkilemektedir (Sarshar ve ark. 2017). Bu yüzden bu iki parametrenin doğru seçilmesi gerekmektedir.

Kurutma problemlerinde, kurutulacak olan üründe bulunan su molekülleri buharlaşmak suretiyle malzemeden ısı çeker ve bu durum malzemenin sıcaklığının artmasını bir süre engeller. Malzemedeki nem denge nemine ulaştığı zaman buharlaşma etkisi ortadan kalkar ve malzeme sıcaklığı hızlı bir şekilde artmaya başlar. Bu yüzden zaman ve uzay adımının işlem sürecince sabit seçilmesi doğru değildir. Buharlaşma sırasında sıcaklıkta çok küçük değişimler olduğu için bu bölgede zaman adımının büyük seçilmesi gerekir. Buharlaşma bittikten sonra sıcaklık hızlı bir şekilde yükselecektir. Bu şekildeki büyük değişimleri yakalamak için zaman adımı bu noktalarda küçük seçilmelidir. İplik bobini kurutma işleminde sıcak hava içeriden

dışarıya doğru geçtiği için içerideki noktalarda basınç farkından dolayı hızlı bir buharlaşma gerçekleşmektedir. Bu yüzden bu bölgelerde uzay adımının küçük seçilmesi gerekmektedir.

Bu iki parametre belirlenmek üzere matematiksel model değişik zaman ve uzay adımlarında çözülmüştür. Alınan sonuçlar birbiriyle ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır ve optimum değerler belirlenmiştir.

İlk olarak sabit zaman ve uzay adımları belirlenerek model çözülmüştür. Zaman adımı ' $\tau=300$ s' ve uzay adımı ' $h=0,0095$ m' olarak seçilmiştir. Bu ilk belirlemelerle beraber model bir önceki bölümde tayin edilen termofiziksel özelliklerle çözülmüştür. Alınan sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

İlk belirlemelerden sonra uzay ve zaman adımları değiştirilerek model çözdürülmüştür. Sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.4, 6.5, 6.6, 6.7 değişik durumlar için kullanılan zaman ve uzay adımlarını göstermektedir.

Çizelge 6.4 Durum 1,2,3 için zaman ve uzay adımının değerleri

Durum 1	Durum 2	Durum 3
$h=0,0095$ m	$h=0,00475$ m	$h=0,0095$ m
$\tau=300$ s	$\tau=300$ s	$\tau=150$ s

Çizelge 6.5 Durum 4 için zaman ve uzay adımının değerleri

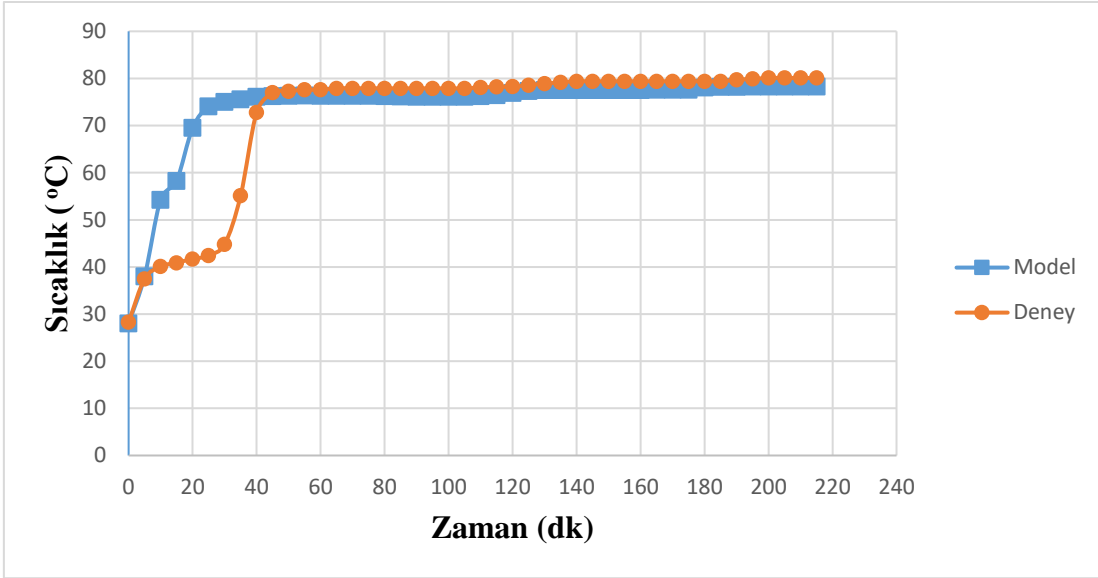
Durum 4			
Sıcaklık Ölçüm Noktası	Uzay Adımı	Zaman Aralığı	Zaman Adımı
1-2	$h=0.00475$ m	0-200s	$\tau=100$ s
2-3-4-5-6-7	$h=0.0095$ m	200-600s	$\tau=200$ s
		600-12900s	$\tau=300$ s

Çizelge 6.6 Durum 5 için zaman ve uzay adımının değerleri

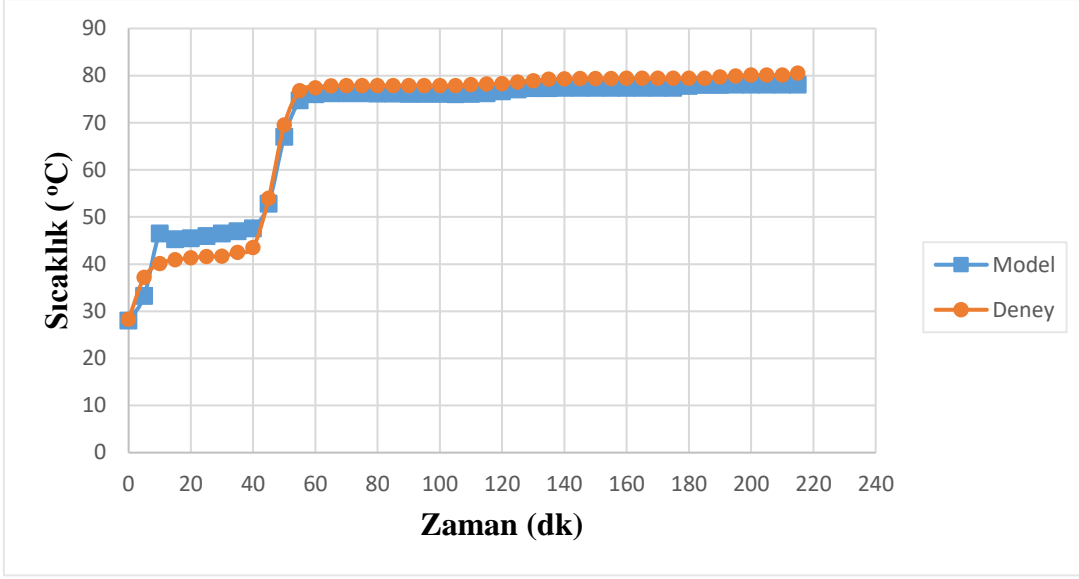
Durum 5			
Sıcaklık Ölçüm Noktası	Uzay Adımı	Zaman Aralığı	Zaman Adımı
1-2-3	$h=0.00475$ m	0-200s	$\tau=100$ s
3-4-5-6-7	$h=0.0095$ m	200-600s	$\tau=200$ s
		600-12900s	$\tau=300$ s

Çizelge 6.7 Durum 6 için zaman ve uzay adımının değerleri

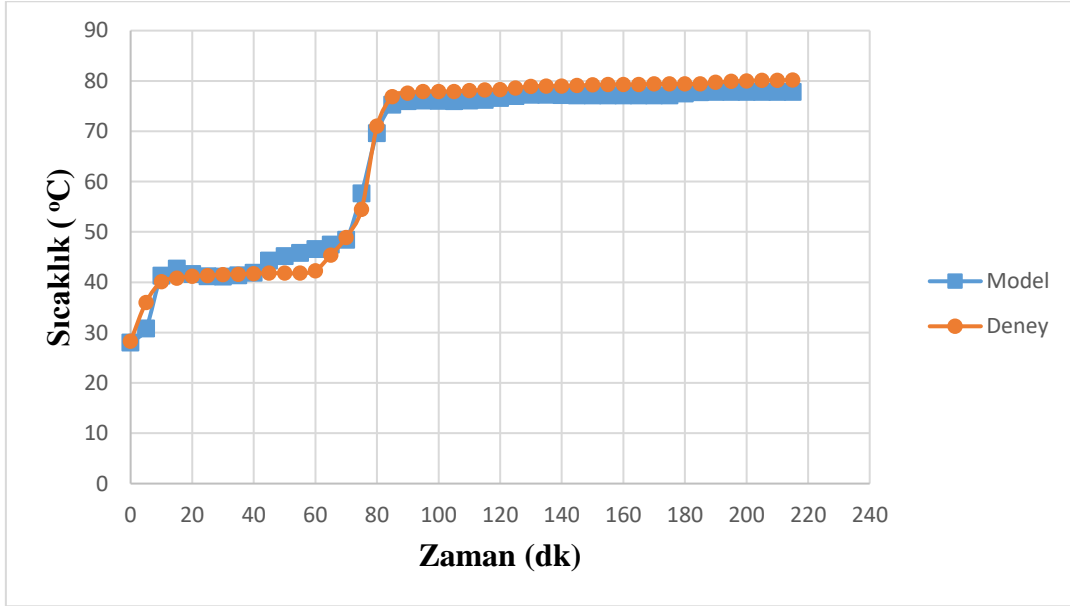
Durum 6			
Sıcaklık Ölçüm Noktası	Uzay Adımı	Zaman Aralığı	Zaman Adımı
1-2-3	$h=0.00475$ m	0-200s	$\tau=100$ s
3-4-5-6-7	$h=0.0095$ m	200-600s	$\tau=200$ s
		600-4200s	$\tau=300$ s
		4200-4500s	$\tau=100$ s
		4500-5700s	$\tau=300$ s
		5700-7200s	$\tau=100$ s
		7200-12900s	$\tau=300$ s



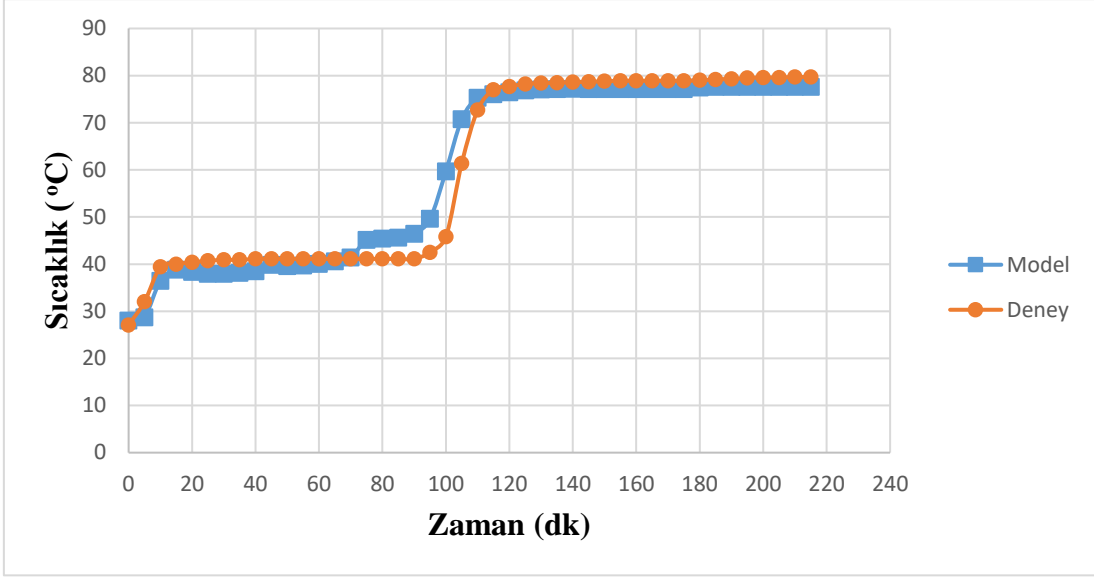
Şekil 6.10 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 1).



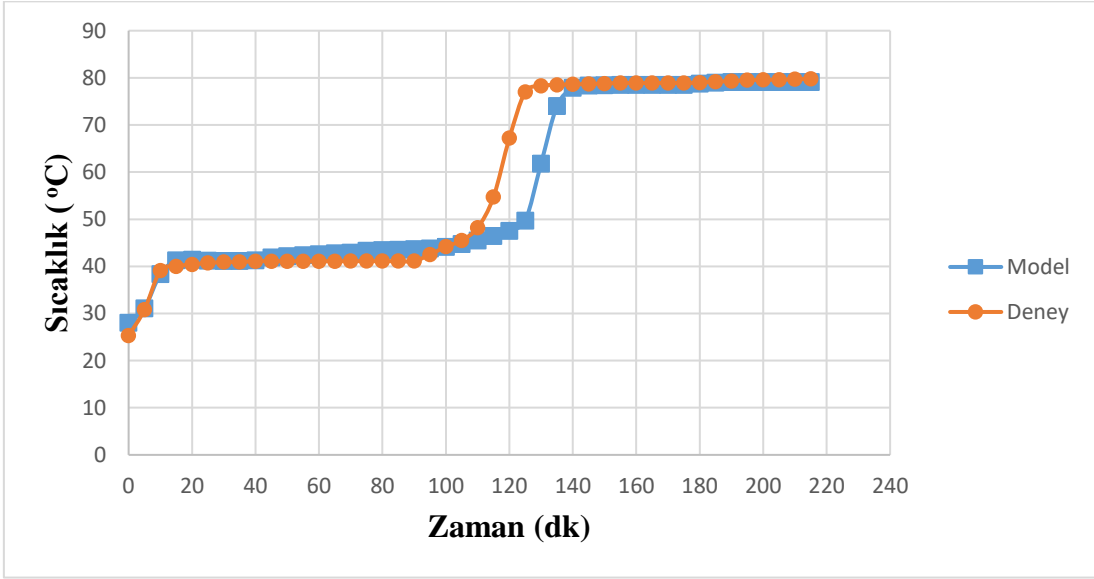
Şekil 6.11 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 1).



Şekil 6.12 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 1).



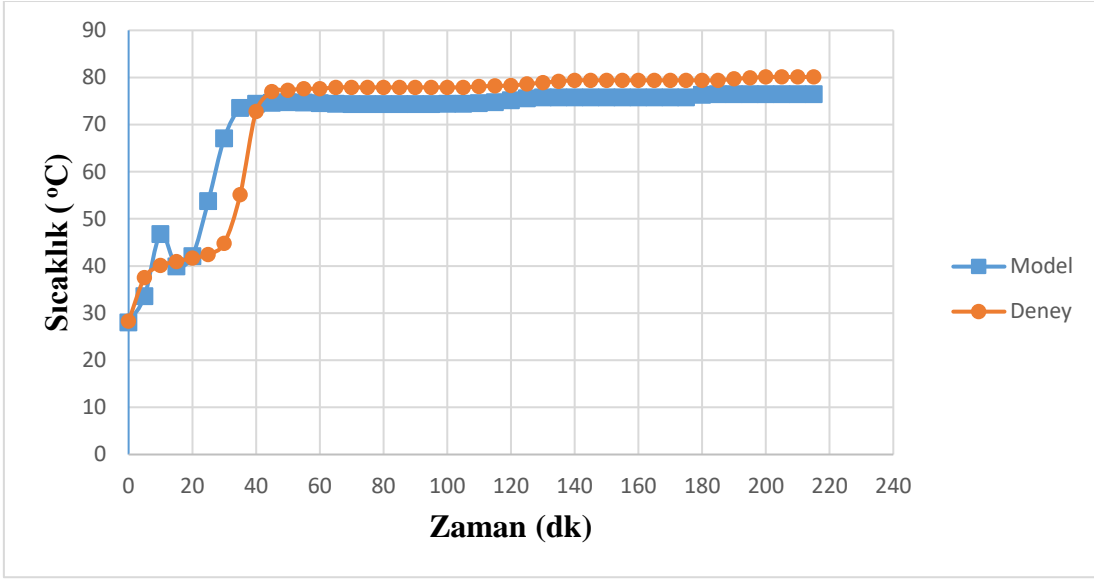
Şekil 6.13 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 1).



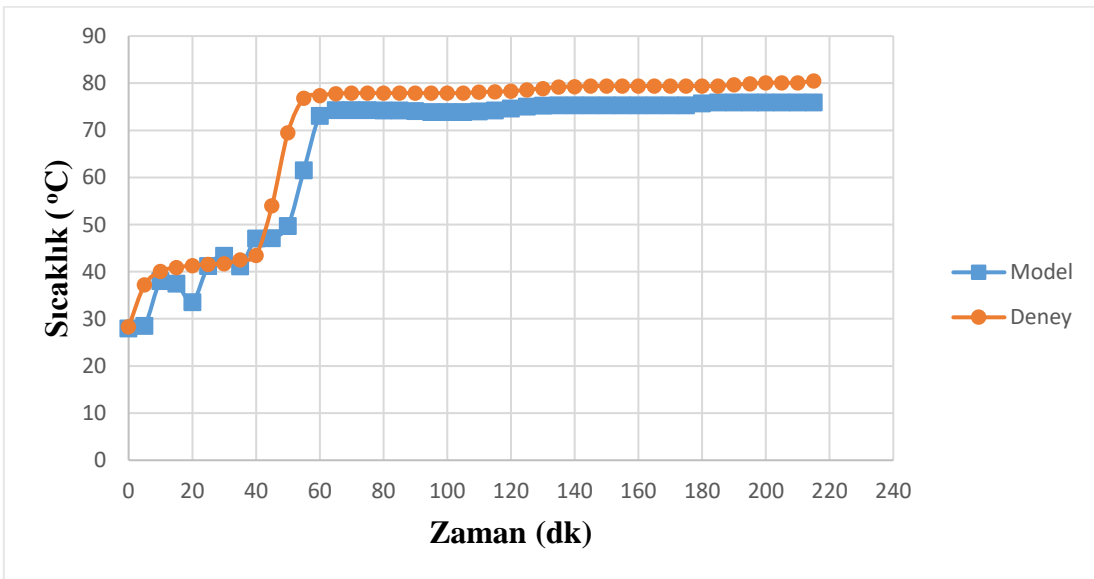
Şekil 6.14 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 1).

Model ve deney sonuçları karşılaştırıldığında (Şekil 6.10) 2. noktada ilk zamanlarda deneyden sapmanın fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni 2. noktanın bobinin giriş bölgesine çok yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Bobinin girişinde kuruma çok hızlı gerçekleştiği için bu noktada zaman ve uzay adımı daha küçük seçilmelidir.

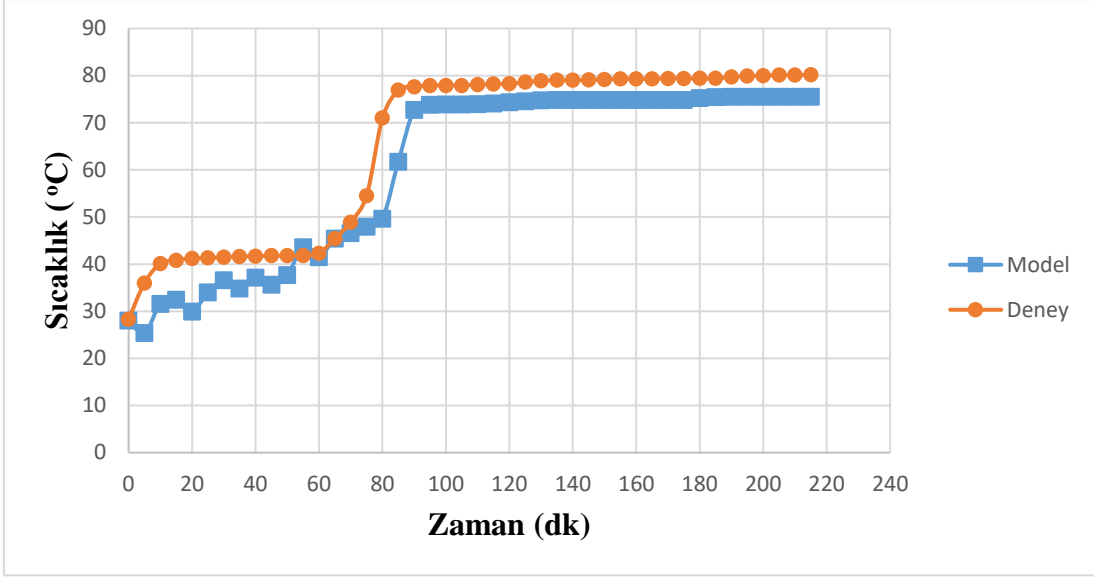
3. ve 4. noktalarda deneyle model arasında küçük farklar bulunmaktadır (Şekil 6.11-Şekil 6.12). 5. noktada ise model deneye göre daha hızlı buharlaştığı için bu bölgede modelin deneyden sapması fazla olmaktadır (Şekil 6.13). 6. noktada modelin buharlaşma süresi daha uzundur. Bu da bu bölgede deneyden sapmaya neden olmuştur (Şekil 6.14). Uzun adımın model sonuçlarına etkisini incelemek üzere zaman adımı sabit tutulup uzun adımın bütün noktalarda sabit olmak koşuluyla yarıya indirilmiştir (durum 2) ve model çözülmüştür. Sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.



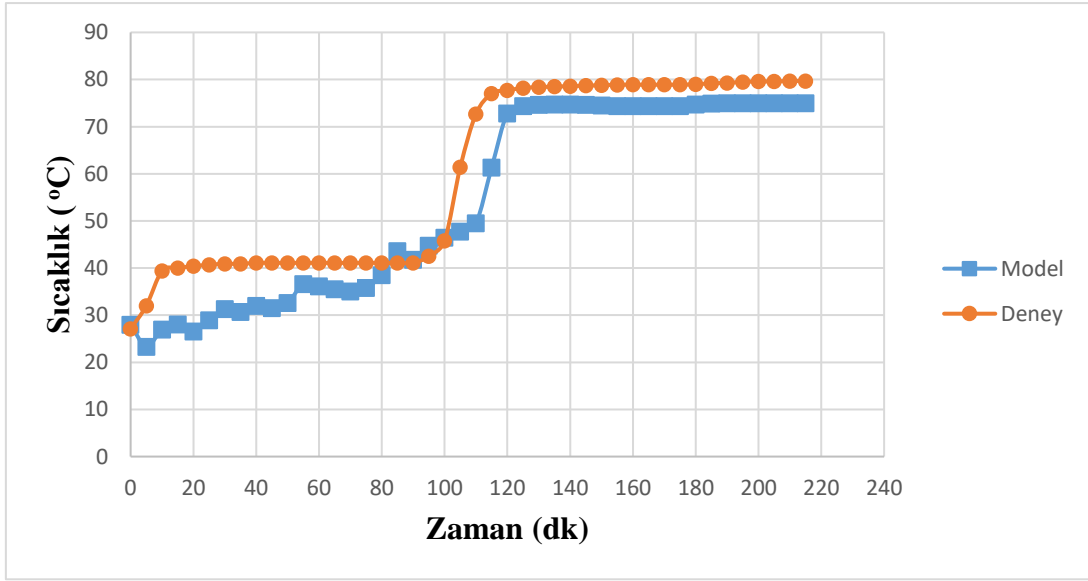
Şekil 6.15 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 2).



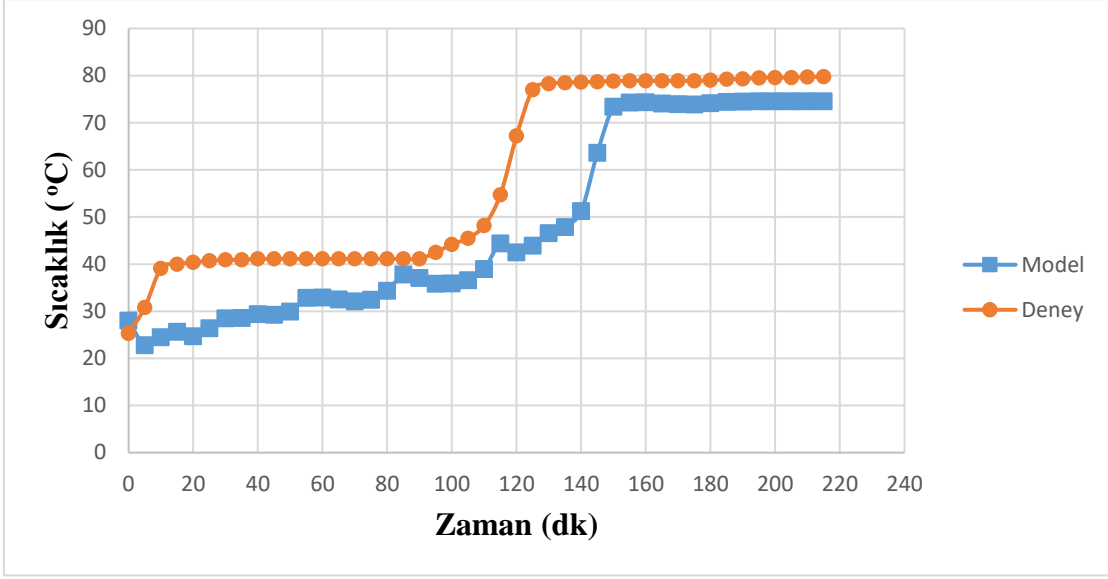
Şekil 6.16 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 2).



Şekil 6.17 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 2).



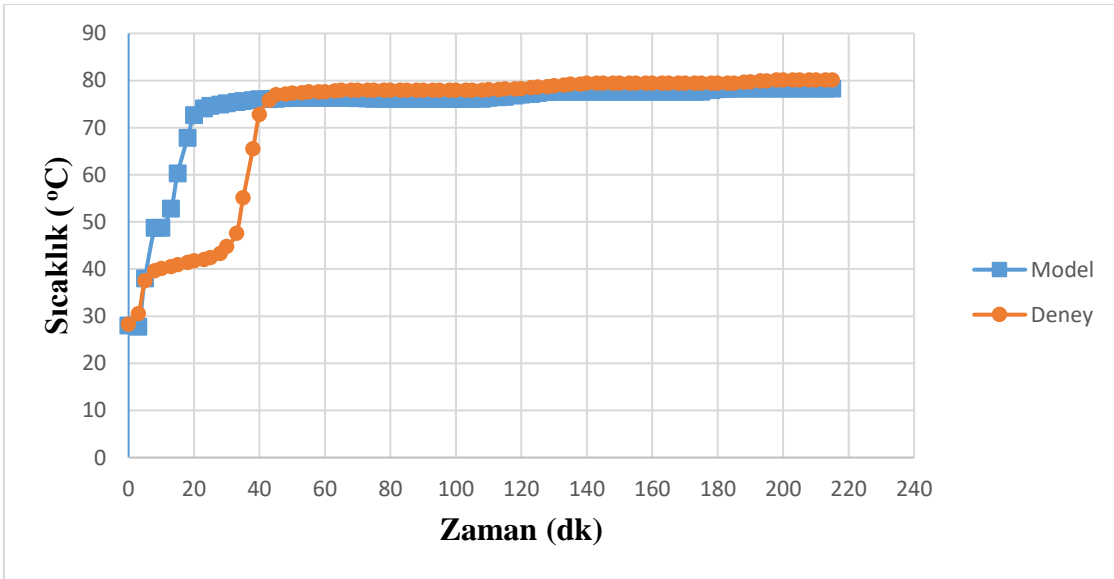
Şekil 6.18 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 2).



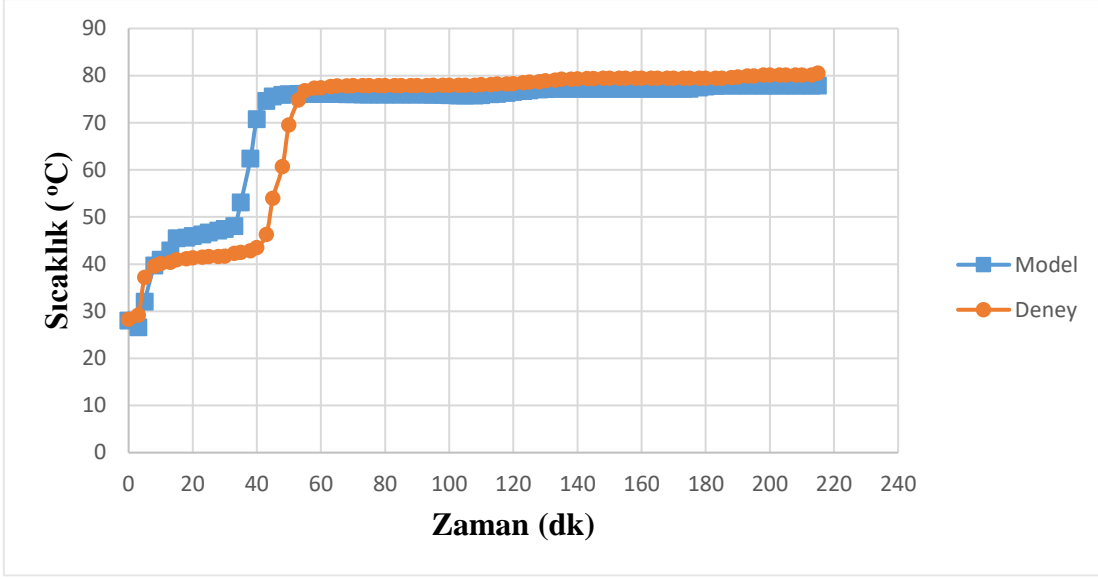
Şekil 6.19 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 2).

Uzay adımını yarıya düşürmek 2 numaralı noktada bir miktar iyileştirme yapmasına rağmen diğer noktalarda modelin kötü sonuç vermesine neden olmuştur (Şekil 6.15-Şekil 6.19). Bu yüzden uzay adımının bütün noktalarda düşürülmesi doğru değildir.

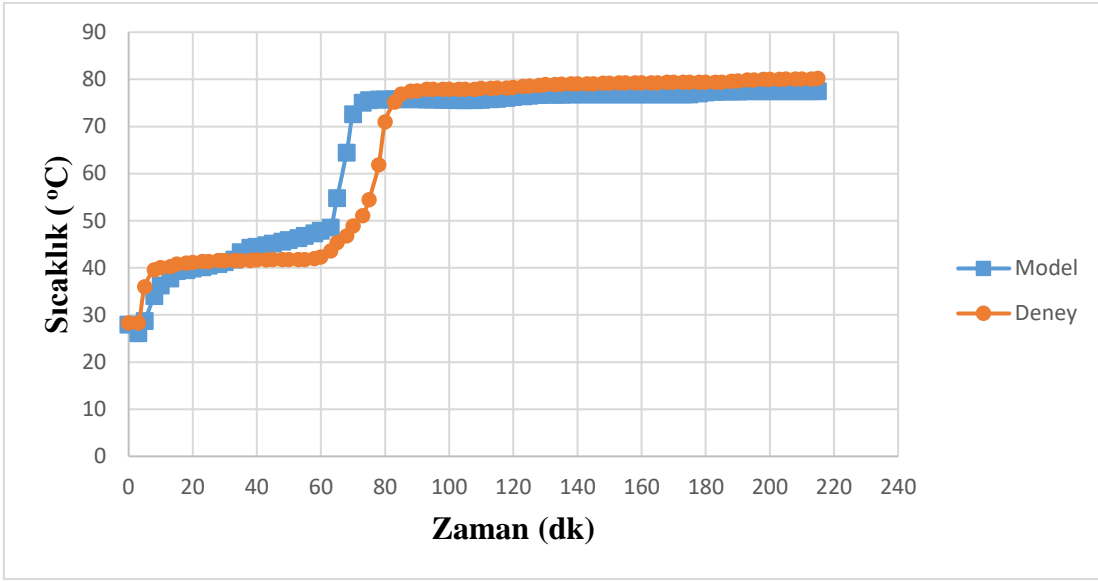
Uzay adımından sonra zaman adımının model sonuçlarına etkisini araştırmak üzere uzay adımının başlangıçtaki değeri kullanılarak zaman adımı yarıya indirilmiştir (durum 3). Sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



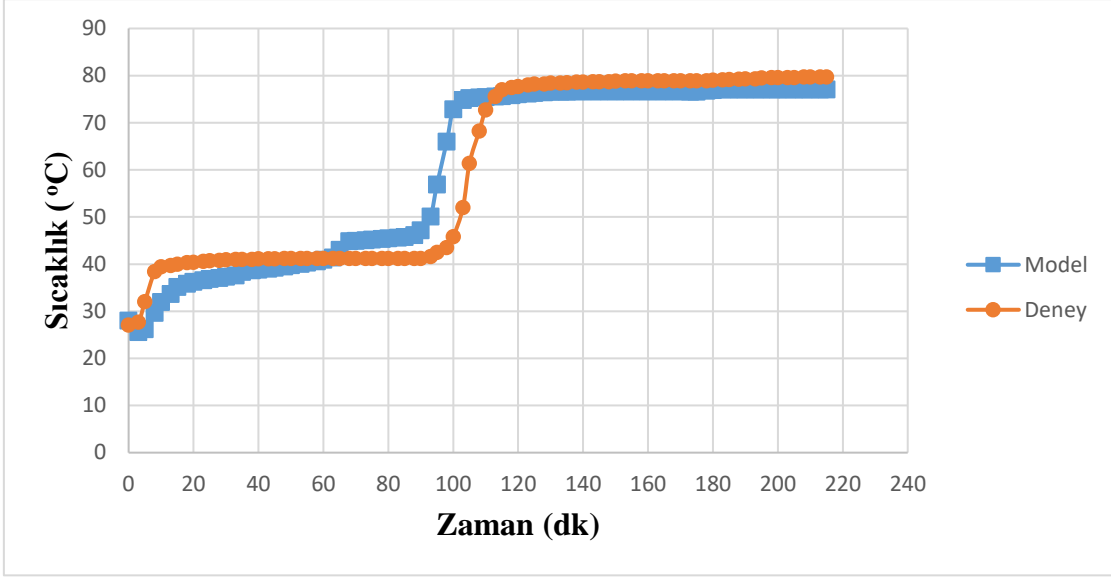
Şekil 6.20 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 3).



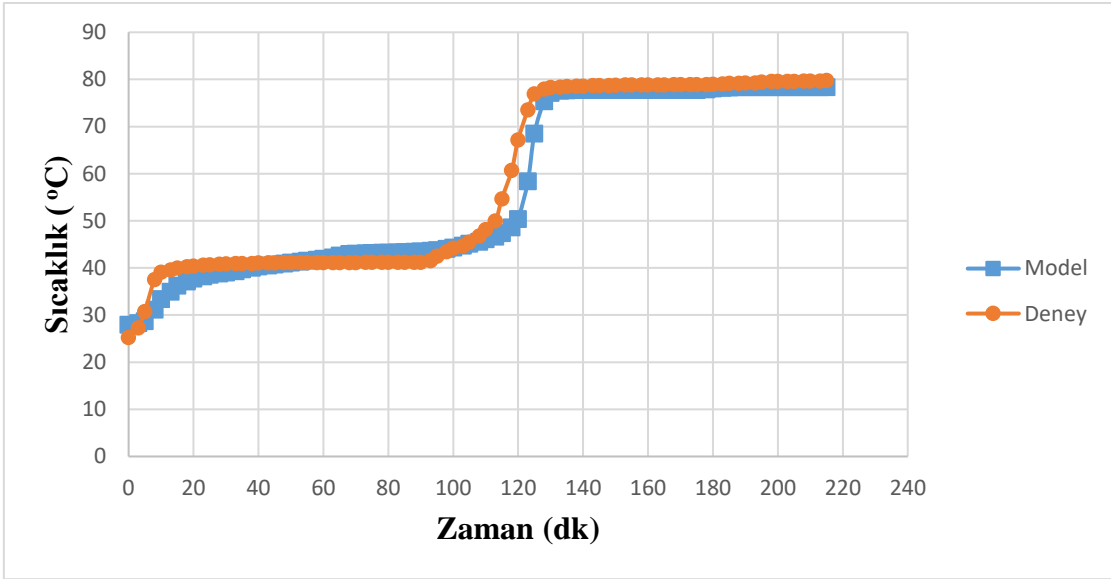
Şekil 6.21 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 3).



Şekil 6.22 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 3).



Şekil 6.23 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 3).

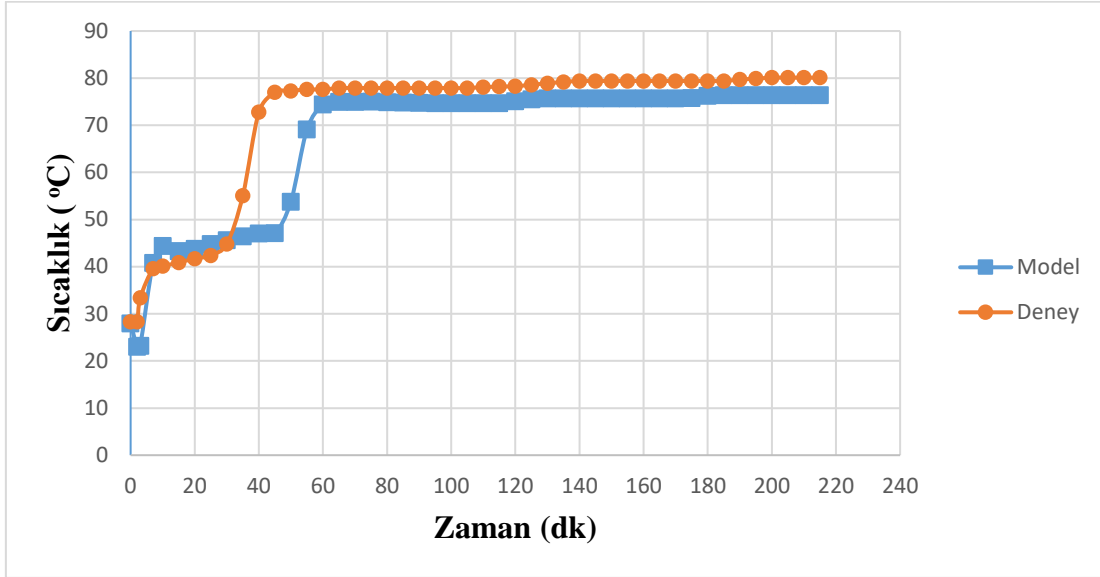


Şekil 6.24 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 3).

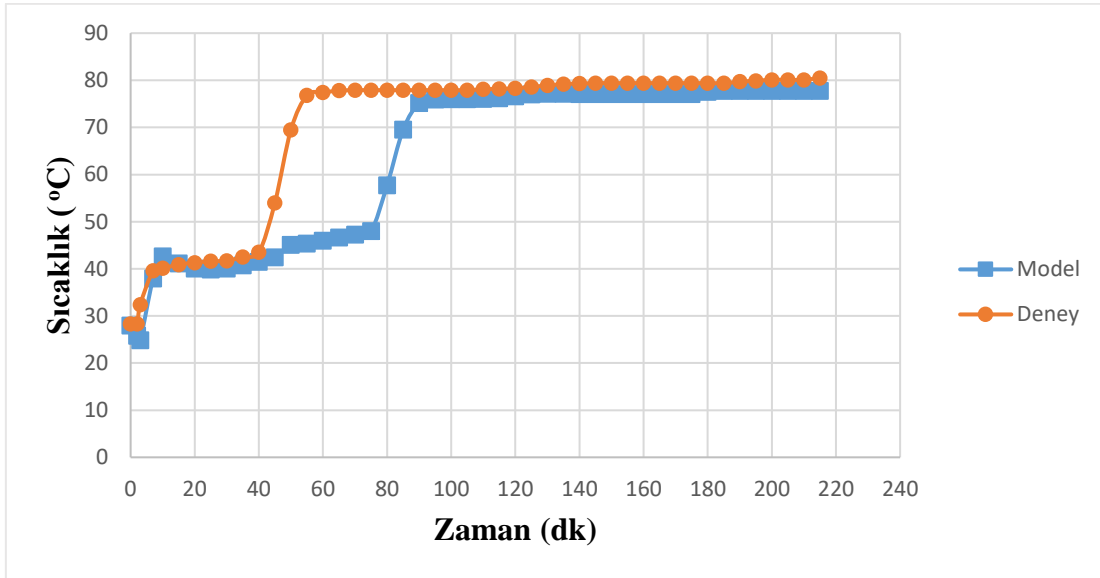
Zaman adımını yarıya indirmek birinci duruma göre ciddi farklar oluşturmamıştır (Şekil 6.20-Şekil 6.24). Daha önce de belirtildiği gibi zaman adımını tüm zaman boyunca küçük seçmek doğru değildir. Model sonuçları da bunu doğrulamaktadır.

Zaman ve uzay adımının ayrı ayrı model sonuçları üzerindeki etkisi görüldükten sonra ikisi beraber değiştirilerek model çözülecektir ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılacaktır.

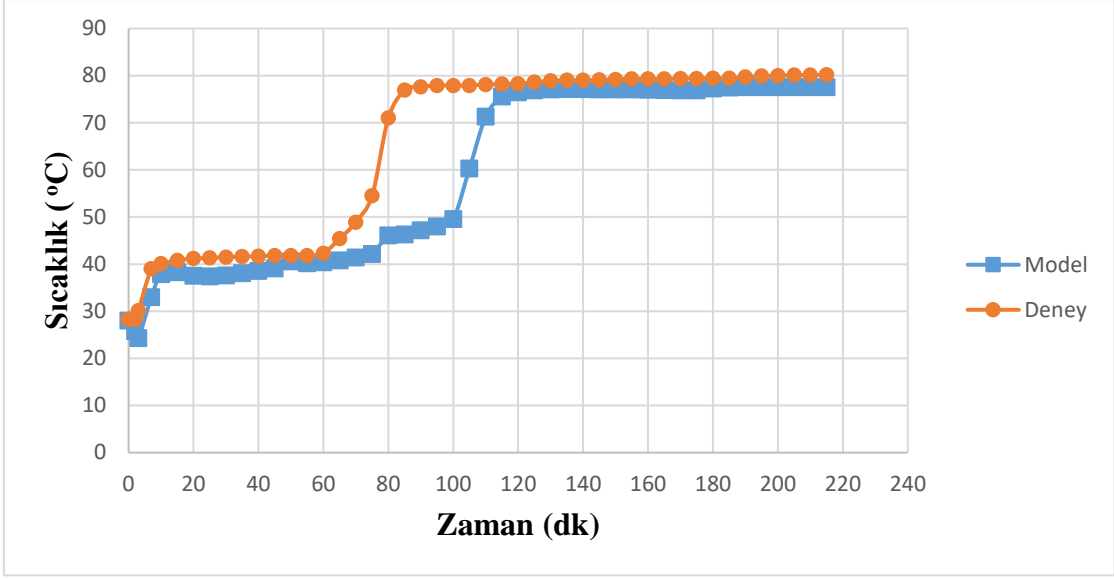
Başlangıçta 2 numaralı noktada hızlı buharlaşma olduğu için ilk iki adımda zaman adımı düşük seçilmiştir ve uzay adımı ilk 1. İle 2. nokta arasında yarıya düşürülmüştür. Zaman adımı kademeli olarak artırılmıştır (durum 4).



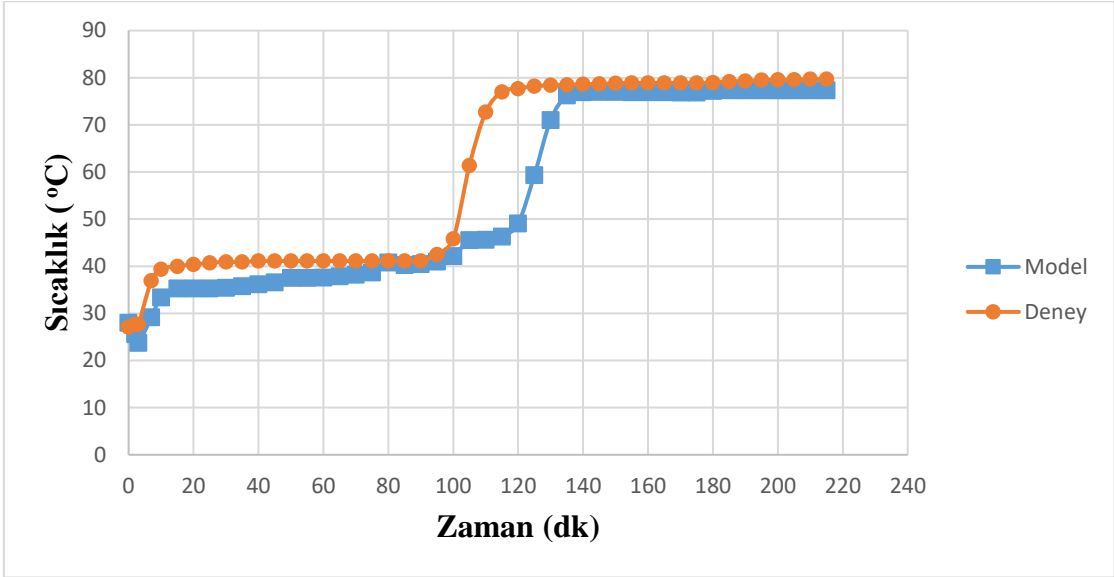
Şekil 6.25 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).



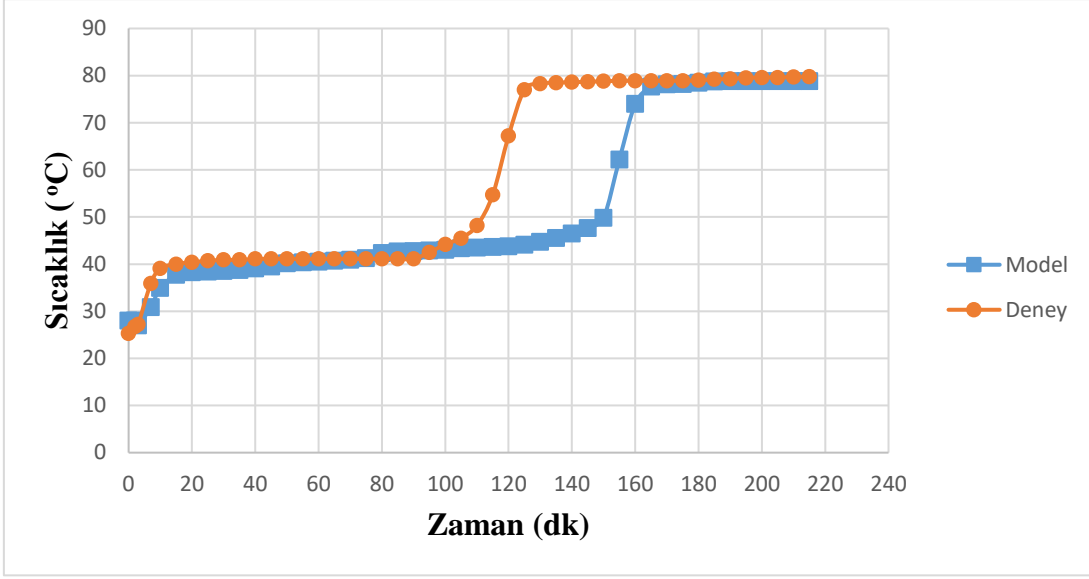
Şekil 6.26 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).



Şekil 6.27 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).

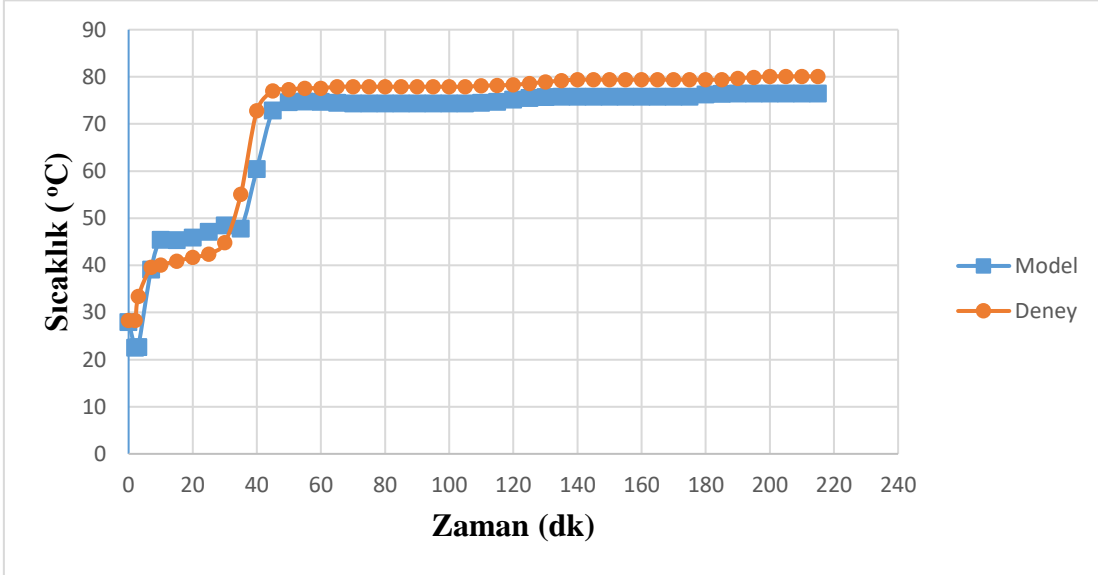


Şekil 6.28 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).

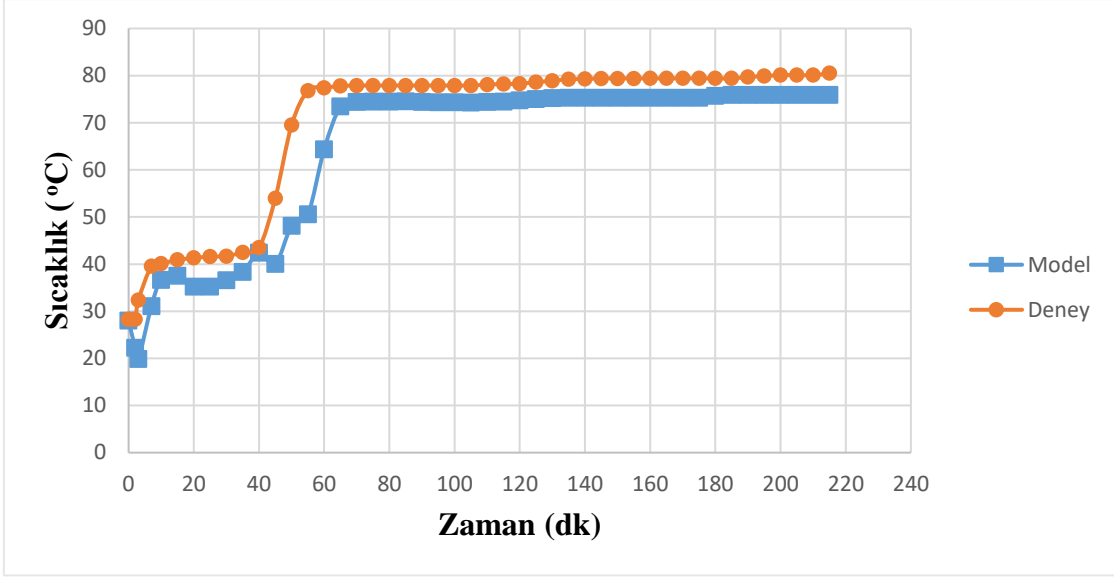


Şekil 6.29 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 4).

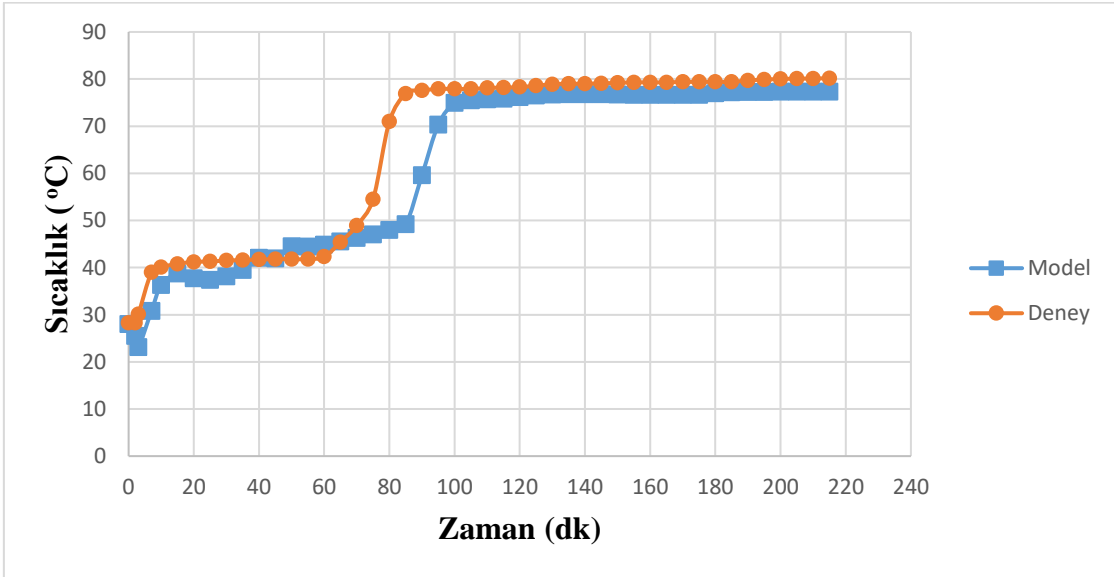
Sonuçlar incelendiğinde 2 numaralı nokta deneysel sonuçlara yaklaşmasına rağmen diğer noktalar kötü sonuç vermiştir (Şekil 6.25-Şekil 6.29). Bu yüzden zaman adımları aynı almak şartıyla uzay adımı 2. ve 3. nokta arasında da yarıya indirilip (durum 5) model çözdürülmüştür.



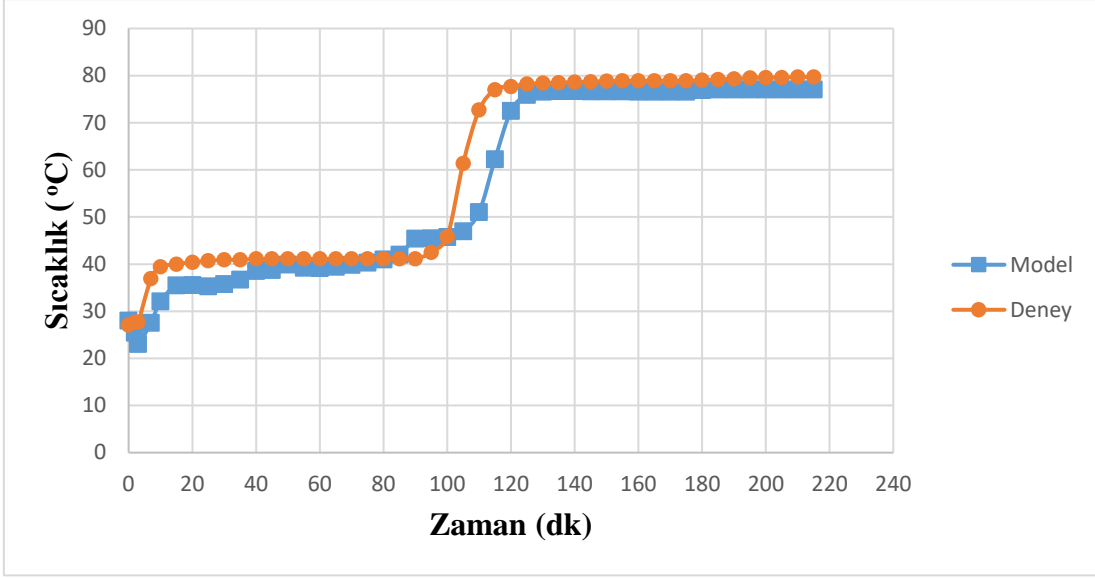
Şekil 6.30 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).



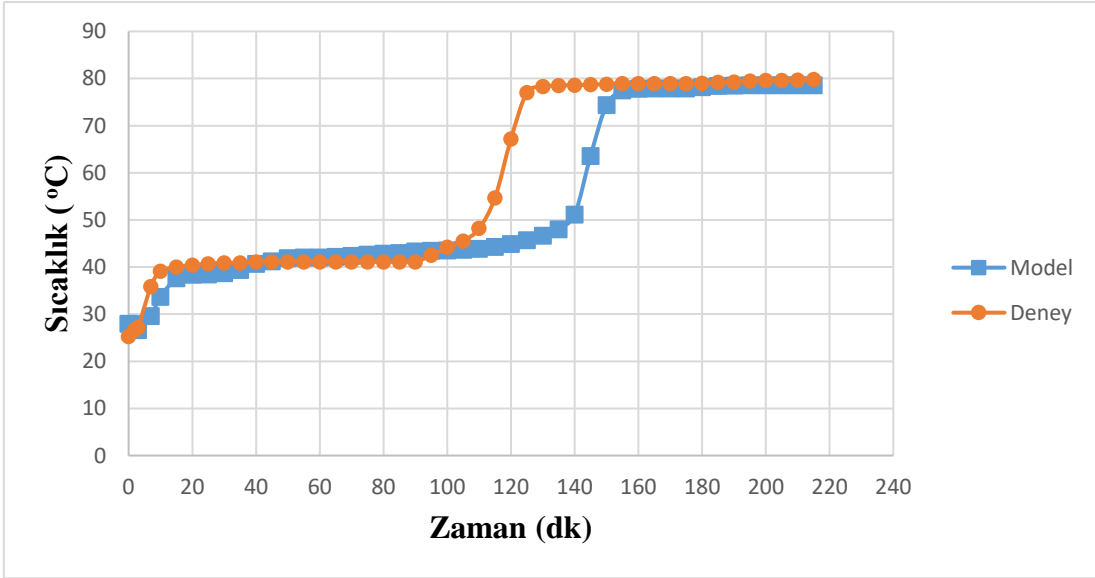
Şekil 6.31 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).



Şekil 6.32 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).



Şekil 6.33 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).

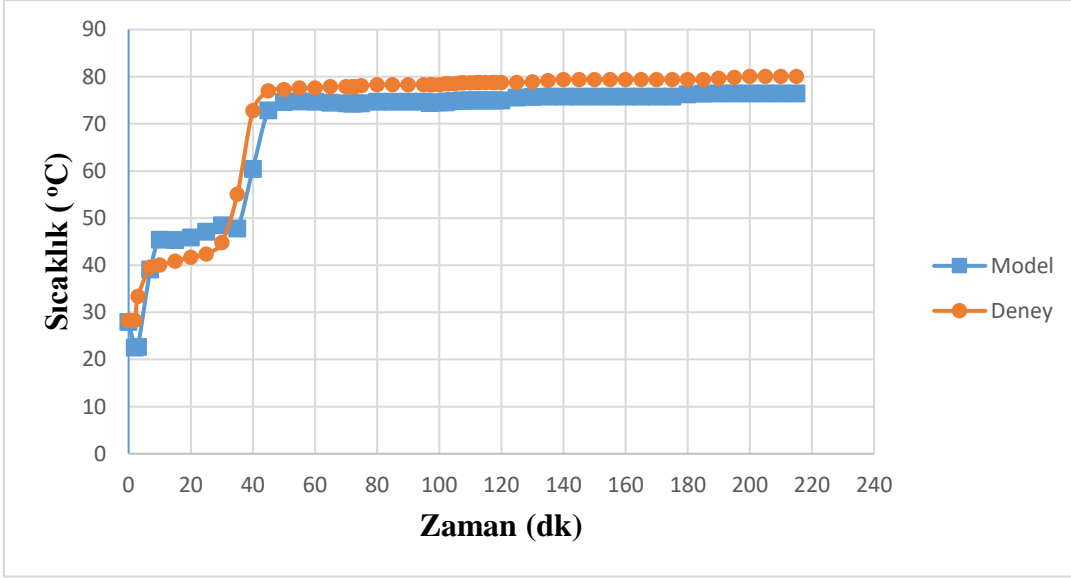


Şekil 6.34 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 5).

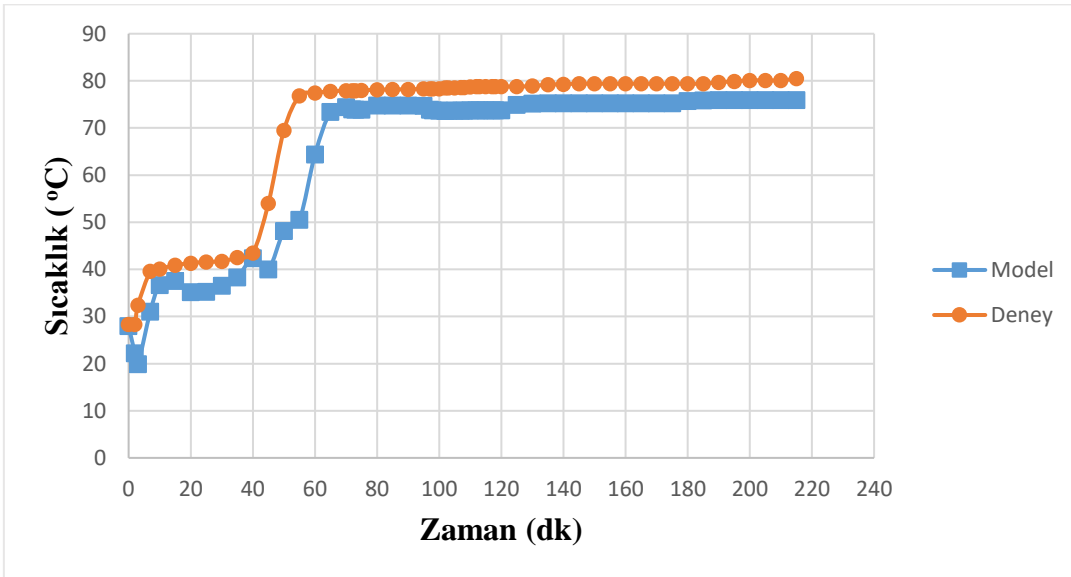
Sonuçlar incelendiğinde tüm sıcaklık ölçüm noktalarında durum 4'e göre iyileşme olmuştur (Şekil 6.30-Şekil 6.34). Özellikle 2 numaralı noktada model sonuçları deney sonuçlarına çok yakın çıkmıştır. Modelin deneysel verilerden saptığı noktalar genel olarak buharlaşma giriş ve çıkış noktalarıdır. Bunun sebebi termodinamik özelliklerin bu noktalarda önemli miktarda değişmesidir. Sıcaklık ölçüm noktaları, basınçlı havanın geçtiği bölgeden

uzaklıklarına göre farklı zamanlarda yoğun bir şekilde buharlaşmaya başlamaktadırlar. Bu yüzden zaman adımı bu bölgelerde küçültülecektir.

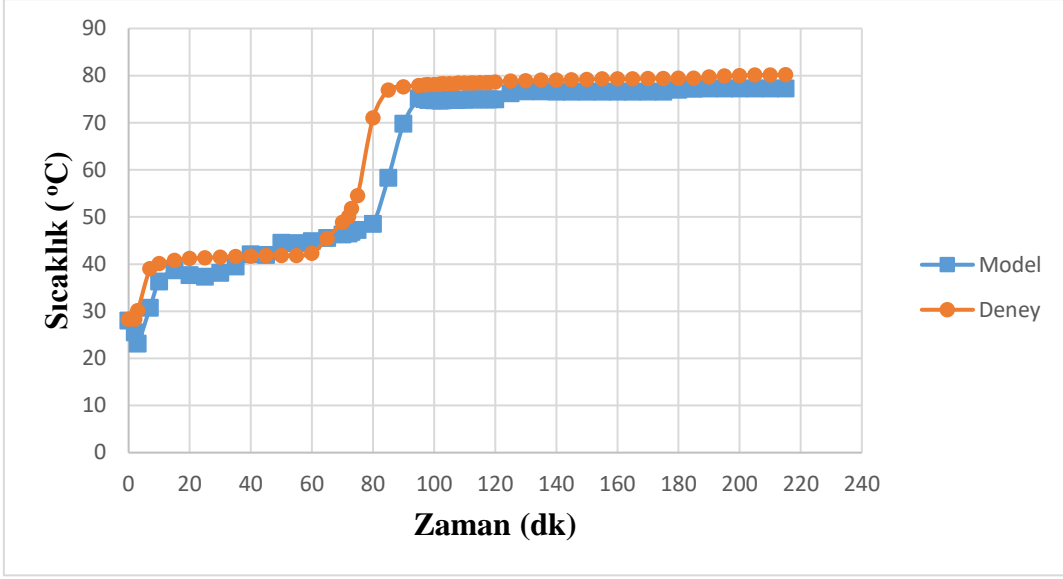
Uzay adımı durum 5'deki gibi olmak üzere zaman adımları değiştirilerek (durum 6) model çözülmüştür.



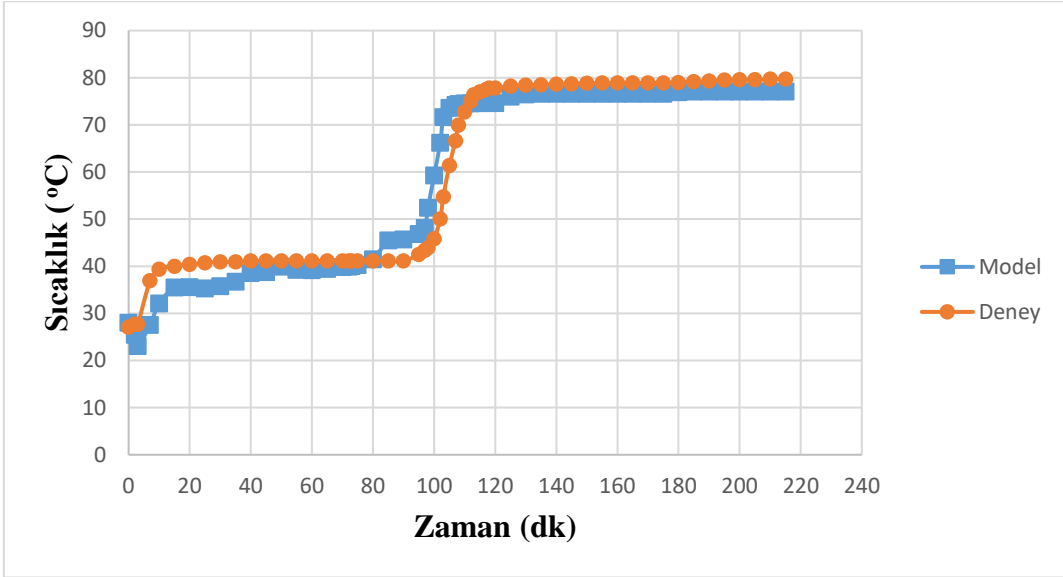
Şekil 6.35 (2) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).



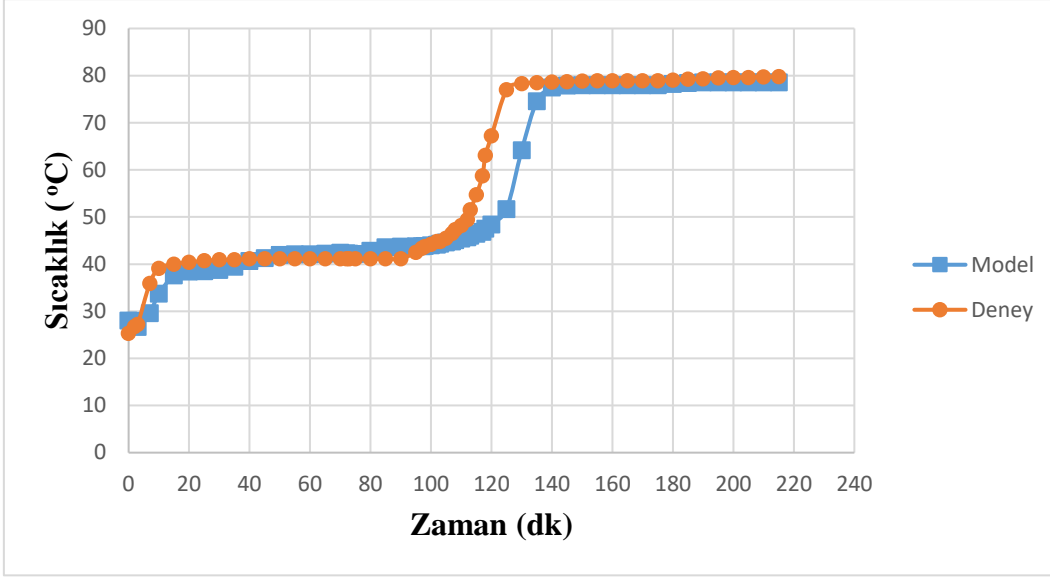
Şekil 6.36 (3) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).



Şekil 6.37 (4) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).



Şekil 6.38 (5) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).



Şekil 6.39 (6) numaralı sıcaklık ölçüm noktası için deneysel sonuçlarla, model sonuçlarının karşılaştırılması (durum 6).

Deneysel verilerden en büyük sapmalar buharlaşma bölgesine giriş ve çıkışlarda olmaktadır. Bu durumun nedeni bu bölgelerde ani sıcaklık değişimlerinin olmasıdır. Bu bölgelerde zaman adımını küçültmek sonuçların iyileşmesini sağlamıştır. Durum 6 en iyi sonuçların alındığı zaman ve uzay adımını içermektedir. Durum 6'ya bakıldığında deneysel verilerden az da olsa sapma görülmektedir (Şekil 6.35-Şekil 6.39). Problemin çözümü için sayısal bir yöntem kullanılmıştır. Sayısal yöntemlerde analitik çözümlerden farklı olarak hata payı vardır. Bu nedenle sayısal yöntem çözümlerinde her zaman bir miktar hata olacaktır. Hatanın kabul edilebilir sınırlar içinde olması çözüm için yeterlidir. Durum 6 sonuçlarına bakıldığında sonuçlar deneysel verilerle uyum göstermiştir.

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada iplik bobininin sıcak hava ile kurutulması teorik olarak incelenmiştir. Namık Kemal Üniversitesi'nde sıcak havanın iplik bobinlerinin içerisinden geçerek bobinin içinden dışına doğru kurutma sağladığı bir deney düzeneği bulunmaktadır. Deney düzeneğinden alınan veriler matematiksel modelin çözümünden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde, sunulan matematiksel model ile Akyol'un (2007) modeli deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde ise modelin çözümünde kullanılan sonlu farklar metodunun ana parametreleri olan zaman ve uzay adımlarının modelin çözümüne olan etkisi incelenmiştir.

Akyol'un modeli bobinin her iki tarafından hava akışı olması durumu için oluşturulmuştur. Bu çalışmada ise hava bobinin yalnızca içerisinden geçtiği için model iyi sonuç vermemiştir. Bu çalışmadaki model ise deneysel verilerle uyum göstermiştir. Bu sayede modelde bulunan konvektif terimin önemi ortaya çıkmıştır. Zaman ve uzay adımının etkisi incelendiğinde; zaman adımının tüm zaman aralığı boyunca ve uzay adımının da tüm ölçüm noktaları için sabit bir değerde seçilmesi modelin kötü sonuç vermesine neden olmuştur. Bu yüzden faz dönüşümünün hızlı bir şekilde gerçekleştiği sıcaklık ölçüm noktalarında (iplik bobinin iç kısımları), uzay adımının düşük seçilmesi ve bu bölgeden uzaktaki noktalarda yüksek seçilmesi uygun görülmüştür. Zaman adımı ise faz dönüşümünün yoğun olduğu zaman dilimi içerisinde büyük seçilmiştir. Faz dönüşümünün tamamlanmasıyla birlikte bobin içerisindeki sıcaklık değerleri daha keskin bir şekilde artmaya başlamaktadır. Bu nedenle bu periyotta zaman adımı değeri azaltılarak problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu sayede modelin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

8. KAYNAKLAR

- A. Durak (2012). Konvektif Bir Kurutma Prosesinin Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- A. Sarshar, P. Tranquilli, B. Pickering, A. McCall, C. J. Roy, A. Sandu, (2017). “A numerical investigation of matrix-free implicit time-stepping methods for large CFD simulations”, *Computers and Fluids journal*, 159, 53-63.
- Akyol E. (2011). Yün İplik Bobinlerinin Kuruma davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Akyol U. (2007). İplik Bobininin Kurutulmasının Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Akyol U., Cihan A. and Shaliyev R., (2010). “Thermophysical Parameter Estimation of a Wool Bobbin during Convective Drying Process”, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 18, 227-240.
- Akyol U., Shaliyev R., Cihan A., Kahveci K. (2015). “Kurutma işleminde iplik bobinleri içerisindeki sıcaklık dağılımının matematiksel model yardımıyla belirlenmesi”, 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 114-118.
- Aykın E, Arslan S, Durak AN, Erbaş M., (2015). “Gıdalarda bulunan suyun fizikokimyasal durumu ve sorpsiyon izotermi”, *Gıda*, 40(2), 109-116.
- B. Abbasi Souraki, A. Andres, D. Mowla, (2009). “Mathematical modeling of microwave-assisted inert medium fluidized bed drying of cylindrical carrot samples”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48, 296-305.
- Doğanay, T., (2009). “Kurutma”, *TEB Eczacılık Akademisi - Modern Farmasötik Teknoloji*, 18-47.
- E. Barati, J.A. Esfahani, (2011). “Mathematical modeling of convective drying: Lumped temperature and spatially distributed moisture in slab”, *Energy*, 36, 2294-2301.
- Huang, C.-H. and Yeh, C.-Y., (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.
- H. Xie, G. Gong, Y. Wu (2017). “Investigations of equilibrium moisture content with Kelvin modification and dimensional analysis method for composite hygroscopic material”, *Construction and Building Materials*, 139, 101-113.
- Hussain MM, Dinçer 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.
- Kaya A., Aydın O., Demirtaş C., (2009). “Experimental and theoretical analysis of drying carrots”, *Desalination*, 237, 285–295
- Li Y, Zhongxuan L, (1999). “An Improved Mathematical Simulation of the Coupled Diffusion of Moisture and Heat in Wool Fabric”, *Textile Research Journal*, 69, 10, 760-768.
- Max M. Houck, Jay A. Siegel, (2015). “Fundamentals of Forensic Science (Third Edition)”. Oxford, 703s, İngiltere.

- M. Erbaş, C. Candal, Ö. Kılıç, C. Mutlu (2016). “Gıdaların Nem Sorpsiyon İzotermlerinin Belirlenmesi Ve Eşitliklerinin Çözümü”, *Gıda*, 41 (3):171-178
- Mohamed H., Ruplal C., D.G. Watson, (2012). “A coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds”, *Biosystems Engineering*, 112, 202-209.
- Mujumdar AS, (1995). “Handbook of Industrial Drying”, Marcel Dekker.
- M. Zielinska, M. Markowski, (2010). “Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots”, *Chemical Engineering and Processing:Process Intensification*, 49, 212-218.
- Ostrowska-Ligeza E, Jakubczyk E, Górska A, Wirkowska M, Brys J. (2014). “The use of moisture sorption isotherms and glass transition temperature to assess the stability of powdered baby formulas”. *J Therm Anal Calorim*, 118(2), 911-918.
- Özışık M.N. (2000). “Finite Difference Method in Heat Transfer”, CRC Press, 412 p, Florida, USA.
- Ribeiro J, Ventura JMP, (1995). “Evaluation of Textile Bobbins Drying Processes: Experimental and Modeling Studies”, *Drying Technology*, 13, 1-2, 239-265.
- Ricardo M., Sergio A., (2017). “Modeling thin layer drying-roasting kinetics of soaked quinoa. Coupled mass and energy transfer”, *Biosystems Engineering* 157, 99-108
- S. Janjai, V. Khamvongsa, B.K Bala (2007). “Development, design, and performance of a pv ventilated greenhouse dryer”, *Int Energy J*, 8 pp. 249-258
- Smith M.C., 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.
- Yunus A. Çengel, (2003). *Heat Transfer: A Practical Approach* 3rd ed. McGraw-Hill, 879 p, New York, USA.
- Zhanlong S., Chuanming J., Liansheng Y., Xiqiang Z., Jing S., Wenlong W., Yanpeng M., Chunyuan M., (2017). “Coal slime hot air/microwave combined drying characteristics and energy analysis”, *Fuel Processing Technology*, 156, 491-499.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Alper KARAKOCA, 13/09/1990 yılında Soma/Manisa'da doğdu. 2008 yılında Bursa Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne giriş yaptı ve 2013 yılında mezun oldu. Aynı yıl Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak işe başladı. 2017 yılında Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Eğitimi'ne başladı. Halen burada çalışmakta ve yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.