

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI

KONVEYÖRLÜ BİR KURUTUCUDA FARKLI GEOMETRİK ŞEKİLLERE
SAHİP GÖZENEKLİ YAPILARIN KURUTMA KİNETİĞİNİN SAYISAL
ANALİZİ

Yazar
Seda ÖZCAN ÇOBAN

Danışman
Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL



MANİSA-2022

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik /Fen-Edebiyat Fakültesi Makine mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Seda ÖZCAN ÇOBAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
Sayfa.....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	X
TEŞEKKÜR.....	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT.....	XIV
1 GİRİŞ	1
2 KURUTMA İŞLEMİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Başlıca Kurutucu Türleri	5
2.2 Kurutma İşlemini Etkileyen Faktörler	10
2.2.1 İç etkiler	13
2.2.2 Dış etkiler	22
2.3 Kurutma işleminde kullanılan sayısal yöntemler	26
3 LİTERATÜR TARAMASI	46
3.1 Çeşitli Kurutma Sistemlerinde HAD Uygulamaları.....	46
3.1.1 Sprey kurutucularda HAD çalışmaları	47
3.1.2 Akışkan yataklı kurutucularda HAD çalışmaları	49
3.1.3 Güneş enerjili kurutucularda HAD çalışmaları.....	52
3.1.4 Dondurarak kurutmada HAD uygulamaları.....	57
3.1.5 Yeni nesil kurutma sistemlerinde HAD uygulamaları	62
3.2 Konvektif Kurutma Sistemlerinde HAD Uygulamaları.....	67
3.3 Kurutma Prosesinde Yapay Zekâ ve Optimizasyon Çalışmaları.....	77
3.3.1 Uzman sistemler (Expert systems).....	78
3.3.2 Bulanık mantık (Fuzzy Logic)	79
3.3.3 Yapay sinir ağları (YSA)	81
4 MATERYAL ve METOT.....	88
4.1 Akış Alanı, Isı ve Kütle Transfer Denklemleri	89
4.1.1 Kanal içerisindeki yöneten denklemler	89
4.1.2 Gözenekli cisim denklemleri.....	92
4.2 Çözüm Metodu	98
4.2.1 Sonlu elemanlar yöntemi	98

4.2.2	Zamana bağı konveksiyon-difüzyon problemi için çözüm metodu:.	103
4.2.3	Sayısal çalışmanın çözüm aşamaları	108
4.3	Yapay Sinir Ağları ile Modelleme	112
4.4	Uygun Ortogonal Ayırıklaştırma (POD) Yöntemi	123
4.5	Optimizasyon Yöntemi.....	125
5	SONUÇLAR.....	128
5.1	İki Boyutlu Bir Kanalda Nemli Gözenekli Cisimlerin Kurutulması	128
5.1.1	İki Boyutlu kanalda dönen bir silindir etkisiyle dikdörtgen nemli ürünün kurutulmasının sayısal analizi	133
5.1.2	Hareketli gözenekli cismin 2 boyutlu kanalda konvektif kurutulması	156
5.1.3	Türbülanslı akışta nemli gözenekli cisimlerin konvektif kurutma performansının incelenmesi: Şekil ve malzeme etkisi.....	169
5.1.4	Konvektif kurutmada sürekli rejimde optimizasyon çalışmasının iki boyutlu durumda kullanılması ve zamana bağı ısı ve kütle transferime entegre edilmesi	176
5.2	Üç Boyutlu Kanalda Nemli Gözenekli Cisimlerin Kurutulması	193
5.2.1	Konvektif koşullarda üç boyutlu gözenekli nemli cisimlerin kurutulması için zamana bağı ısı ve kütle transferinin incelenmesi	194
5.2.2	Üç Boyutlu kanalda hareketli blokların konvektif kurutulması	217
5.2.3	Üç Boyutlu bir kanalda gözenekli çok sayıda nemli nesnenin konvektif kurutma performansının optimizasyonu	232
5.2.4	Yapay sinir ağları ile konvektif kurutma performansı tahmini.....	250
5.2.5	POD tekniğı kullanarak konvektif kurutma için zamana bağı matematiksel model geliştirme	254
6	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	264
	KAYNAKLAR	271

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c_p	Özgöl ısı ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c	konsantrasyon
D	Difüzivite ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
h	Konvektif ısı transfer katsayısı ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
h_{fg}	Buharlaşma gizli ısısı (J kg^{-1})
I	Birim vektör
k	Isıl iletkenlik ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
M	Molar kütle (kg mol^{-1})
m_{evap}	Buharlaşma kütlesi ($\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$)
n	Kütle akısı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
P, p	Basınç (Pa)
R	İdeal gaz sabiti ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
r	Yarıçap (m)
s	Yüzey alanı (m^2)
S	Saturasyon, doygunluk
T	Sıcaklık (K, °C)
t	Zaman (dk, s)
q	Isı akısı ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
$\vec{u}$	Hız vektörü (m/s)
V	Hacim (m^3)
X_m	Kuru maddede nem oranı (kg/kgdb)
x	x-ekseni (m)
y	y-ekseni (m)

Latin semboller

ρ	yoğunluk (kg m^{-3})
ε	gözeneklilik
κ	geçirgenlik (m^2)
μ	dinamik viskozite ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
τ	eğrilik, kıvrımlılık

İndisler

a	hava
c	kılcal
eff	efektif
evap	buharlaşma
g	gaz
l	sıvı
ma	nemli hava
p	basınç
r	bağıl
s	katı
sat	doygunluk
v	buhar
w	su

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kurutucuların sınıflandırılması	10
Şekil 2.2 Higroskopik malzemeler için tipik konvektif kurutma işleminin kuruma eğrisi ...	12
Şekil 2.3 Farklı malzemelerin farklı sıcaklıklarda nem izotermi	15
Şekil 2.4 Şekil. Gözenekli bir madde içerisindeki gözenek biçimleri (Datta, 2007b)	19
Şekil 2.5 Kurutma havası hızının kütle difüzyon katsayısı ve kurutma süresine etkisi (Karim & Hawlader, 2005)	24
Şekil 2.6 Değişen en boy oranlarına göre konvektif kurutmada nem içeriğinin zamanla değişimi (Kaya et al., 2006)	26
Şekil 2.7 HAD yönteminin elemanları	33
Şekil 2.8 HAD yönteminin aşamaları	33
Şekil 2.9 Sonlu fark ayrıklaştırılması(Kong et al., 2021b)	35
Şekil 2.10 Matematiksel modelin SHM ile ayrıklaştırılması(Mazumder, 2016)	37
Şekil 2.11 Bir çubuğun x eksenı boyunca sıcaklık değişimi için uygulanan SEA, u gradyanının düzgün dağılım gösterdiği (a), u gradyanının belli bir noktada artış gösterdiği (daha fazla eleman) (b) iki farklı gösterim (Detailed Explanation of the Finite Element Method (FEM), n.d.)	40
Şekil 2.12 Gözenekli ortamda LB metodunun temsili gösterimi (Zachariah et al., 2019)	43
Şekil 2.13 Bir bitki dokusunun 2 boyutlu şematik gösterimi(a), SPH ile hücre sıvısının, Dem ile hücre duvarının tanımlanması (Karunasena, Senadeera, Gu, et al., 2014)	44
Şekil 3.1 Scopus veri tabanında sayısal kurutma çalışmalarında farklı kurutma yöntemlerinin dağılımı (2010 -2022)	46
Şekil 3.2 Püskürtmeli kurutucu odasının parçacık izleme simülasyonu(Lo, 2005b)	50
Şekil 3.3 Tipik bir akışkan yataklı kurutucunun şematik gösterimi (Y. Kumar & Belorkar, 2015)	53
Şekil 3.4 Başlıca güneş enerjili kurutucu tipleri (Demissie et al., 2019b)	55
Şekil 3.5 Akış seyrekleşme rejimleri için geçerli denklemler (Varna'dan (Varma, 2014) uyarlanmıştır)	59
Şekil 3.6 Tipik bir farmasötik dondurarak kurutma cihazının şematik gösterimi (Alexeenko et al., 2009)	59
Şekil 3.7 Tipik bir ısı pompalı kurutucu şematik gösterimi	63
Şekil 3.8 Yarı dairesel çarpan jet modeli (Huai et al., 2003)	65
Şekil 3.9 Bir uzman sistem şemaitk diyagramı	79
Şekil 3.10 Bulanık mantık sistemi şematik gösterimi	81
Şekil 4.1 İki boyutlu kanalda zorlanmış taşınım	99
Şekil 4.2 Bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözölme aşamaları	104
Şekil 4.3 Merkezi fark (GSEM) ve SUPG yöntemleriyle tek boyutlu eş elemanlı bir ağ yapısının nodal olarak şematik gösterimi Merkezi fark yaklaşımıyla eş elemanlardan oluşan bir boyutlu bir ağ yapısında şekil fonksiyonlarının oluşumu (a)Bir boyutlu eş elemanlardan oluşan bir ağ yapısında ağırlıkların SUPG yaklaşımıyla oluşturduğu şekil fonksiyonları (b)	106
Şekil 4.4 Örnek 2 boyutlu bir çalışmada ağ yapısı	110
Şekil 4.5 Tek ve çok katmanlı YSA modeli	113
Şekil 4.6 İnsan sinir hücresi yapısı(a) Temel yapay sinir hücresinin matematiksel modeli (b)	114
Şekil 4.7 Yapay sinir ağlarında sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonları	115
Şekil 4.8 Bir YSA algoritmasının basitçe işleyişi	120
Şekil 4.9 Optimizasyon şeması	127
Şekil 5.1 4.1.1 nolu çalışma için oluşturulan fiziksel model (a) ağ dağılımı (b)	134

Şekil 5.2 Üst duvar boyunca yerel Nusselt numarası değişimi $Ra = 5 \times 10^5$, $Da = 10^{-4}$ sabit değerleri için $Pr = 0.015$. a) Basak vd. [28], b) Sayısal çalışma	138
Şekil 5.3 $t=100$ dk Mevcut çalışma ve literatürde elde edilen nem içeriği değerlerinin karşılaştırılması ($V = 1$ m/s, $AR = 2$, $T = 353$ K)	139
Şekil 5.4 Silindirin farklı konumları ve $\omega=0$ rad s^{-1} için akım çizgileri ($D=0.1H$, $u = 0,2$ m s^{-1})	141
Şekil 5.5 Silindirin farklı konumları ve $\omega=-200$ rad s^{-1} için akım çizgileri ($D=0.1H$, $u = 0,2$ m s^{-1})	142
Şekil 5.6 Silindirin farklı konumları ve $\omega=-200$ rad s^{-1} için akım çizgileri ($D=0.1H$, $u = 0,2$ m s^{-1})	142
Şekil 5.7 Farklı ω değerlerinde sıcaklık eş eğrileri ($D=0.1H$, $u = 0,2$ m s^{-1} , $t=90$ d).....	143
Şekil 5.8 Farklı çap değerlerinde akım çizgileri ($\omega=-200$ rad s^{-1} , $u = 0,2$ m s^{-1} , $t=90$ dk)....	143
Şekil 5.9 Farklı çap değerlerinde sıcaklık eş eğrileri ($\omega=-200$ rad s^{-1} , $u = 0,2$ m s^{-1} , $t=90$ dk)	144
Şekil 5.10 Farklı kuruma hava hızlarında akım çizgileri ($\omega=-200$ rad s^{-1} , $u = 0,2$ m s^{-1} , $t=90$ dk).....	144
Şekil 5.11 Farklı kuruma hava hızlarında yüzey sıcaklıkları için sıcaklık eş eğrileri ($\omega=-200$ rad s^{-1} , $D = 0.1H$, $u = 0,2$ m s^{-1}).....	145
Şekil 5.12 Farklı ω (rad s^{-1}) için ortalama ısı transfer değerleri ($D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$, $t=90$ dk)	146
Şekil 5.13 Farklı hava hızları için ortalama ısı transfer değerleri ($D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$, $\omega=-200$ rad s^{-1}).....	147
Şekil 5.14 Farklı silindir çapları için ortalama ısı transfer değerleri ($D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$, $\omega=-200$ rad s^{-1}	147
Şekil 5.15 Farklı ω (rad s^{-1}) değerleri için gözenekli ortamın ortasında y eksenini boyunca buharın kütle oranı ($D = 0.1H$, $u = 0,2$ m s^{-1} , $x_c = 0.4W$).....	149
Şekil 5.16 Farklı hava hızları için gözenekli ortamın ortasında y eksenini boyunca buharın kütle oranı ($\omega = -200$ rad s^{-1} , $D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$)	151
Şekil 5.17 Farklı ω (rad s^{-1}) hava hızları için gözenekli ortamın ortasında y eksenini boyunca buharın kütle oranı ($u = 0,2$ m s^{-1} , $D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$).....	152
Şekil 5.18 Silindirin farklı çap değerleri için gözenekli ortamın ortasında y eksenini boyunca suyun doyma oranı ($\omega = -200$ rad s^{-1} , $D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$).....	154
Şekil 5.19 Farklı hava hızları için gözenekli ortamın ortasında y eksenini boyunca suyun doyma oranı ($\omega = -200$ rad s^{-1} , $D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$).....	155
Şekil 5.20 4.1.2 nolu çalışma için oluşturulan fiziksel model	157
Şekil 5.21 Farklı ağ boyutlarında Nu değerlerinin değişimi.....	160
Şekil 5.22 Kod doğrulama sonuçları: Hava hızı $0,64$ m/s olduğunda Jonagold elmanın konvektif kurutulması için boyutsuz nem içeriğinin karşılaştırılması	161
Şekil 5.23 Farklı zamanlar için eş akış çizgileri görünümü $t = 250$ s (a), (b) ve $t = 1000$ s (c), (d) ($T = 333$ K).....	162
Şekil 5.24 Konsantrasyon değişimi ve eş sıcaklık eğrileri $t = 250$ s (a), (c) $t = 1000$ s (b), (d) ve $T = 333$ K, $u = 0,55$ m/s.....	163
Şekil 5.25 Farklı hava hızları için gözenekli hacmin duvarları boyunca Nusselt karşılaştırılması	164
Şekil 5.26 $t = 250$ s için ortalama Nu karşılaştırması (a) değişen hava akış hızları için farklı hava sıcaklıklarına karşı ortalama Nusselt sayısı ve $T = 313$ K ve $t = 750$ s (b) hava hızına karşı ortalama Nusselts sayısı	165
Şekil 5.27 Kurutma zamanlarında farklı hava hızlarında cisim içindeki sıvı suyun doygunluğu ($T = 333$ K).....	166
Şekil 5.28 Farklı hava sıcaklıkları için cismin y eksenini orta çizgisi boyunca nem içeriği ($u = 0,25$ m/s).....	167
Şekil 5.29 Farklı hava sıcaklıklarında farklı hızlar için kurutma sırasında iki kez nem içeriğindeki azalma.....	168
Şekil 5.30 4.1.3 nolu sayısal modelin şematik gösterimi	170

Şekil 5.31 $u=2$ m/s için Sl değerleri, $t=1000$ s'de $T=343$ K, nesne 1(a) ve nesne 2 (b) için tüm şekillerde nem içeriği dağılımları	172
Şekil 5.32 Tüm şekiller için $t=3000$ s'de $u=2$ m/s ve $T=343$ K için Sl değerleri, nesne 1(a) ve nesne 2 (b) için	173
Şekil 5.33 $u=1$ m/s, $T=303$ K (a), $u=2$ m/s, $T=303$ K (b), $u=1$ m/s, T için farklı malzemeler için zamana göre sıvı doygunluğu gelişimi = 343 K (c) ve $u=2$ m/s, $T=343$ K (d).....	174
Şekil 5.34 4.1.4 nolu çalışmanın şematik gösterimi	177
Şekil 5.35 Geometri ağ bağımsızlaştırmasında eleman sayısına göre ortalama S_l değeri ($t=1000$ s) (a) Geometri ağ yapısı (b).....	180
Şekil 5.36 Farklı yatay uzaklıklarda eş akış ve eş sıcaklık eğrisi dağılımları ($sy=2h_p$)	183
Şekil 5.37 Nesneler arasındaki yatay mesafenin yerel (a-b) Nusselt sayıları değişimine etkisi ve ortalama (c) ($sy=2h_p$)	184
Şekil 5.38 Nesneler arasındaki dikey mesafenin yerel Nusselt sayıları değişimine etkisi (a-b) ve ortalama (c) ($sx=4h_p$)	186
Şekil 5.39 Nesneler arasındaki mesafelerin optimum değerleri (sx, sy) (a), akış çizgileri (b) ve izoterm (c) varyasyonları araştırması	187
Şekil 5.40 Nesne arasındaki mesafelerin blok 1 (B1) ve blok 2 (B2) için sıvı doygunluğundaki değişim üzerindeki etkileri.....	189
Şekil 5.41 Nesneler arasında optimum aralık için çeşitli zamanlarda sıvı doygunluğunun (S_l) dağılımı	191
Şekil 5.42 Nesneler aralarındaki optimum boşluk için çeşitli zamanlarda sıcaklıkların değişimi	192
Şekil 5.43 Optimum mesafede blokların her biri için ortalama sıcaklık (a) ve sıvı doygunluğunun (b) zamanla değişimi.....	193
Şekil 5.44 4.2.1 nolu çalışma için fiziksel model (a) ağ dağılımı (b)	196
Şekil 5.45 Farklı ağ boyutları için cismin l'in y eksenine orta çizgisi boyunca Sl değerlerinin karşılaştırılması	198
Şekil 5.46 Farklı zaman aralıkları için cisim l'in y eksenine orta çizgisi boyunca Sl değerlerinin karşılaştırılması	199
Şekil 5.47 . Kod doğrulama çalışması: bir kanaldaki ısıtılmış bloklar için ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırılması	200
Şekil 5.48 Farklı zaman örnekleri için (dakika cinsinden) konvektif akışta patateslerin kurutulması sırasında boyutsuz nem oranı karşılaştırmaları ($V=1$ m/s, $AR=2$ ve $T=353$ K).....	200
Şekil 5.49 3B ve 2B kesme düzlemi için farklı giriş hızları için hava akışının dağılımını düzene sokun ($h=0.2*H$, $l=5*h$, $T=333.15$ K)	202
Şekil 5.50 Farklı zamanlarda $U=10$ m/s için hava akışının 3D ve 2D kesim düzlemi eş sıcaklık eğrileri ($h=0.2*H$, $l=5*h$, $t_{hava}=60$ °C)	203
Şekil 5.51 Farklı giriş hızları için iki alanın duvarları için ortalama ısı transferi katkısı ($h=0.2*H$, $l=5*h$, $T_{hava}=60$ °C, $t=250$ s).....	204
Şekil 5.52 Her cisim için ortalama ısı transfer değerlerinin ve farklı giriş hızları için iki alanın toplam ısı transferinin karşılaştırılması.	205
Şekil 5.53 $t=1000$ s' de ($H=0.2*H$, $l=5*h$, $T=60$ °C) D 1 ve D 2'nin orta bölümünün değişen hızları için sıvı su doygunluğu)	205
Şekil 5.54 $U=6$ m/s ($h=0.2*H$, $l=5*h$, $T_{hava}=60$ °C) (A-b) için farklı zamanlarda alan 1 ve alan 2'nin orta bölümü için sıvı su doygunluğu ve değişken giriş hızları için alan 1 ve alan 2 için % nem içeriğinde azalma ($t=1000$ s)	206
Şekil 5.55 Farklı blok boyutları için akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri ($u=2$ m/s, $l=5*h$, $hava$ sıcaklığı = 60 °C).....	207
Şekil 5.56 Farklı blok boyutları için alan 1 ve alan 2 duvarlarının ortalama ısı transferi katkıları ($u=2$ m/s, $l=5*h$, $t_{hava}=60$ °C, $t=250$ s)	208
Şekil 5.57 $T=1000$ S'de farklı blok boyutları için iki alanın ortalama ısı transferi.....	208

Şekil 5.58 İki cisim için orta bölümdeki farklı blok boyutları için sıvı su doygunluğu $t=1000$ s ($h=0.2 \cdot H$, $l=5 \cdot h$, $t_{\text{hava}}=60$ °C) (A-b) ve alan 1 ve alan 2 için nem içeriğinde azalma (%) blokların değişen yüksekliği için ($t=1000$ s) (c).....	209
Şekil 5.59 Farklı blok mesafeleri için akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri ($h = 0.2 \cdot H$, $u=2$ m/s, $T_{\text{air}}=60$ °C).....	210
Şekil 5.60 Farklı blok mesafeleri için D1 ve D2 duvarları için ortalama ısı transfer oranları ($u = 2$ m/s, $h = 0.2 H$, $T_{\text{hava}}=60$ °C)	211
Şekil 5.61 Farklı kuruma süreleri için iki blokta XY eksenini kesme düzleminin orta bölümü boyunca su doygunluğu ($u = 2$ m/s, $h = 0.2 H$, $T_{\text{hava}}=60$ °C)	213
Şekil 5.62 3D Farklı zamanlar ve hava sıcaklıkları için birinci cisimde XY eksenini kesme düzleminin orta bölümü boyunca su doygunluğu. ($u = 2$ m/s, $h= 0.2H$, $l = 5 h$).	215
Şekil 5.63 Değişken giriş sıcaklıkları için alan 1 ve alan 2 için nem içeriğinde azalma (%) ($t = 1000$ s, $u = 2$ m/s, $h= 0.2H$, $l = 5 h$)	216
Şekil 5.64 5.2.2 nolu çalışmanın fiziksel gösterimi	218
Şekil 5.65 Problem geometrisine ait ağ yapısı	219
Şekil 5.66 Farklı zamanlarda eş sıcaklık eğrileri ($u=0,6$ m/s, $T= 333$ K)	221
Şekil 5.67 Farklı zamanlarda nesnelerin içindeki sıvı su konsantrasyonları ($u = 0,6$ m / s, $T = 333$ K)	223
Şekil 5.68 . Blok 1'in yüzeyleri için farklı kurutma sürelerindeki nem içeriği ($u = 0.6$ m / s, $T = 333$ K, $X_m(0) = 1.31$ kg / kgdb).....	224
Şekil 5.69 Blok 1 için farklı zamanlarda farklı kuru hava sıcaklıkları için nem içeriği dağılımları ($u = 0,6$ m / s).....	225
Şekil 5.70 Her iki bloğun orta düzlemi için farklı hızlarda nem içeriği dağılımları $t = 500$ s ($T = 333$ K)	226
Şekil 5.71 (a) Blok 1 (b) Blok 2' nin dikey orta hattı boyunca farklı hava hızlarıyla ($T = 333$ K) sıvı su doygunluğu	227
Şekil 5.72 Farklı sıcaklıklarda hareketli ve statik koşullar için zamanla ısı transferi gelişimi	230
Şekil 5.73 Ortalama sıcaklık (a) ve nem içeriği (b) zamana göre dağılımları ($u = 0,6$ m / s, $T = 333$ K)	231
Şekil 5.74 Üç adet nemli gözenekli cisim içeren 4.2.3 nolu problemin, Üç boyutlu (a) İki boyutlu (b) şematik gösterimi	234
Şekil 5.75 Çeşitli ızgara boyutları için yüzde (MR) cinsinden nem azalma miktarı	235
Şekil 5.76 Kanala monte edilmiş tek (üstte) ve çoklu (altta) nesnelerin olduğu durumlarda iki farklı Reynolds sayısı için ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırması. Yound ve Vafai (1999) deneysel çalışmasıyla kıyaslama yapılmıştır.....	236
Şekil 5.77 . C1 ve diğer (C2, C3) nesneler arasındaki mesafenin akış (a-c) ve ısı (d-f) davranışları olarak etkisi. C2 ve C3 nesneleri arasındaki mesafenin etkisi ise eş sıcaklık eğrilerinde (g-i) 'de gösterilmiştir	239
Şekil 5.78 Ortalama Nusselt sayısının C1, C2 ve C3 cisminin her biri için yatay uzaklığın değişmesiyle (a, b), C1 cisim ile (C2, C3) cisimleri arası yanal mesafenin değişimiyle (c) değişimi	241
Şekil 5.79 Cisimler arası uzaklığın optimum değerinin (d_1, d_2) için (a) ve (d_1, d_3) için (b) aranması	241
Şekil 5.80 Nesneler arasındaki çeşitli mesafelerin tüm bloklar dikkate alındığında ortalama Nusselt sayısının değişimi üzerindeki etkileri. Optimum değer de grafiklere dahildir.....	242
Şekil 5.81 Optimum aralıkta akış çizgileri (a) ve eş sıcaklık çizgileri (b) ($d_1=5.93h_c$, $d_2=7h_c$ and $d_3=0.584h_c$)	245
Şekil 5.82 Optimum aralık için d_1 uzaklığının C1 (a) ve C3 (b) cisimlerinin sıvı doygunluğu değişimine etkisi.....	246
Şekil 5.83 Optimum aralık için d_2 uzaklığının C1 (a) ve C3 (b) cisimlerinin sıvı doygunluğu değişimine etkisi.....	247
Şekil 5.84 Optimum aralık değeri için cisimler içindeki sıvı konsantrasyonu (a-d), sıcaklık değişimleri (e-h) ($d_1=5.93h_c$, $d_2=7h_c$ and $d_3=0.584h_c$).....	248

Şekil 5.85 Nesneler arası mesafenin nem miktarındaki yüzdelik değişime etkisi. Optimum aralık değerleri de eklenmiştir.....	249
Şekil 5.86 Girdi, çıktı ve katmanları içeren bir sinir ağı mimarisi	252
Şekil 5.87 Sinir ağları modeli algoritması (a) ve eğitim, doğrulama ve test için numune sayısı, ortalama kare hatası (MSE) ve R değerleri (b)	252
Şekil 5.88 C1 ve C3 cisimleri için 317 K kurutma sıcaklığında S_1 değerlerinin zamana bağlı değişimi (a,c) ve YSA ve HAD sonuçlarının karşılaştırılması (b,d)	253
Şekil 5.89 C1 ve C3 cisimleri için 346,5 K kurutma sıcaklığında S_1 değerlerinin zamana bağlı değişimi (a,c) ve YSA ve HAD sonuçlarının karşılaştırılması (b,d)	253
Şekil 5.90 Çalışma 4.2.5 için geometri Görünümleri (a) 3B ve (b) 2B	254
Şekil 5.91 Buhar konsantrasyonu için tekil etkiler (a) ve modal katkılar (b)	257
Şekil 5.92 Kuru hava hızının, $t=2000$ s ve $d=0.5$ H zamanında $T=343$ kuru hava sıcaklığı için $Y=0.15$ H, $z=0.2$ H konumundaki sıcaklık ve c_v değişimi Üzerindeki Etkileri.	258
Şekil 5.93 Hava sıcaklığının $z = 0,2$ H ve $z = 0.4$ H ($u_g = 0,5$ m/s K, $d = 0,5$ H) için iki konum için c_v ve sıcaklık değişimi Üzerindeki Etkileri).....	259
Şekil 5.94 Farklı giriş hızları ve süreleri için POD ile $y=0,15$ H, $z=0,2$ H'de x eksenini boyunca yaklaşık sıcaklıkların değişimi	260
Şekil 5.95 $u_g=0,5$ ve $T_g=343$ 'te iki farklı kez POD ile $y=0,15$ H, $z=0,2$ H'de x eksenini boyunca yaklaşık c_v 'nin karşılaştırılması	261
Şekil 5.96 $y=0,15$ H'de x eksenini boyunca yaklaşık c_v (a) ve T (b, c), $T_g=343$ 'te iki farklı zaman ve hız için POD ile $Z=0,4$ H'de x eksenini boyunca yaklaşık c_v 'nin karşılaştırılması	262

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Kurutmada etkili olan faktörler	4
Tablo 2.2 Endüstride kullanılan başlıca kurutucu türleri	7
Tablo 2.3 Endüstride kullanılan kurutucu türleri ve sınıflandırılması	11
Tablo 3.1 Sprey kurutucular için literatürde yer alan HAD çalışmaları	50
Tablo 3.2 Akışkan yataklı kurutucular için literatürde yer alan HAD çalışmaları	54
Tablo 3.3 Güneş enerjili kurutucular için literatürde yer alan HAD çalışmaları	55
Tablo 3.4 Dondurarak kurutmada literatürde yer alan HAD çalışmaları	60
Tablo 3.5 Yeni nesil kurutucular için literatürde yer alan HAD çalışmaları	65
Tablo 3.6 literatürde konvektif kurutma ile ilgili HAD çalışmalarını özetlemektedir.	72
Tablo 3.7 Literatürde yer alan kurutma çalışmalarında YSA kullanımı	84
Tablo 5.1 Fazların ve katı cismin termofiziksel özellikleri	135
Tablo 5.2 Ortalama Nusselt sayısının karşılaştırılması.	138
Tablo 5.3 Patatesin çeşitli zamanlarda konvektif kurutulması için sayısal ve deneysel boyutsuz nem oranının karşılaştırılması ($V = 1$ m/s, $AR = 2$ and $T = 353$ K).....	139
Tablo 5.4 Ağ bağımsızlık testinin nemdeki (%) azalma ile ölçümü ($u=0,55$ m/s, $T=333$ K, $t=300$ s).....	158
Tablo 5.5 Hesaplama kullanılan malzemeler için termofiziksel özellikler	171
Tablo 5.6 Değişken hava hızlarına sahip tüm şekiller için nem içeriğinde (%) azalma ($T=343$ K, $t=3000$ s)	175
Tablo 5.7 Değişken hava sıcaklıklarına sahip tüm şekiller için nem içeriğinde (%) azalma ($u= 2$ m/s, $t=3000$ s).....	175
Tablo 5.8 B1 ve B2 cisimleri için değişen cisimler arası aralık değerlerinin ortalama Nusselt sayısı üzerine etkileri. Em yüksek Nu değerleri optimum mesafede görülmüştür (koyu renkle gösterilmiştir).	188
Tablo 5.9 Nesneler arasındaki çeşitli aralıklarda iki farklı zamanda ilk blok(B1) için nem miktarındaki azalma. En yüksek değerlere ulaşılır burada test edildiği gibi optimum aralık (kalın olarak gösterilmiştir).	190
Tablo 5.10 Gözenekli cisimler arasındaki aralığı değiştirmek için D1 ve D2 için nem içeriğinde azalma (%) ($t = 1000$ s, $u = 2$ m/s, $h = 0.2$ H, $T_{hava}=60$ °C)	214
Tablo 5.11 Her iki blok için değişen hızlarda (a) sıcaklıklarda (b) nem içeriğindeki yüzde azalma	228

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, uygulanan adımlarda 119M050 nolu projeye araştırma desteğinde bulunan TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU (Tübitak)' na, çalışmaların ilerlemesinde yol gösterici olan ve doktora dönemim boyunca tecrübe ve bilgisiyle bana destek olan danışman hocam Prof. Dr. Fatih Selimefendigil' e, araştırmalarım ve çalışmalarım sırasında manevi desteğini esirgemeyen eşim ve çocuklarıma çok teşekkür ederim.

Seda Özcan ÇOBAN
Manisa, 2022



ÖZET

Doktora Tezi

Seda ÖZCAN ÇOBAN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:

Prof. Dr. Fatih Selimefendigil

Bu çalışmada konveyörlü bir kurutucuda sıcak havayla kurutma işleminin sayısal analizi ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiş, çalışmalar aşama aşama geliştirilerek kurutma prosesindeki farklı parametrelerin kurutma performansına olan etkileri incelenmiştir. Kurutulan cisimler olarak gıda ürünleri, özellikle sebze ve meyve ürünleri tercih edilmiş, ürünlerin özellikleri ise daha önce gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalardan alınmıştır. Sayısal çalışmalar iki boyutlu ve üç boyutlu olarak nemli cisimlerin durağan ve hareketli durumları için ele alınmıştır. Zamana bağlı kanal akışında ve gözenekli cisim içinde bütünleşik ısı ve kütle transferi problemi için iki boyutlu ve üç boyutlu durumlarda konvektif kurutma performansı için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

İlk olarak, iki boyutlu laminar akış koşullarında kanal içerisinde sabit durumdaki nemli gözenekli dikdörtgen şeklindeki cisim ele alınmış, belli kurutma süresi içerisinde farklı kurutma koşulları altında cisim içerisindeki nem kaybının zamanla değişimi gözlenmiştir. Burada değişken parametreler olarak kurutma havası giriş hızı ve sıcaklığı ele alınmıştır. Kurutma işleminin ilk evrelerinde cismin dış yüzeylerinden olan ve özellikle köşelerden olan nem kaybının maksimum düzeyde olduğu görülmüştür. Ayrıca, kanal hava akış yönüne göre ön kısımda kalan yüzey kurutmada nem kaybının en çok yaşandığı yüzey olmuştur. Kurutma havası hızı ve sıcaklığı değerlerinin her ikisinin de artması nem kaybında artışa sebep olmuştur.

Çalışmada, kanal içerisine akışı etkileyen döner bir silindir eklenmiş kurutma üzerinde farklı parametrelerle olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, döner cismin büyüklüğünün, dönüş yönünün ve kanal içerisindeki konumunun akışı ve kurutma performansını etkilediği görülmüştür. Dairesel cismin dönüş yönüne bağlı olarak kurutulan cismin farklı yüzeylerinde nem kaybı miktarları değişmiştir. Ayrıca silindirin kanal içerisinde kurutulan cisme olan uzaklığı arttıkça kurutmaya etkisi de azalmış, aynı etki silindir küçüldükçe de azalmıştır. Bundan sonra üç boyutlu kanal içerisinde biden fazla kübik cismin kurutulması ele alınmış, cisimlerin birbiri ile arasındaki mesafe ve kanaldaki yerleşim şeklinin etkileri incelenmiştir. Burada da cisimler arası mesafenin artışı ile arkadaki cisimlerdeki nem kaybının fazlalaştığı görülmüştür.

Sonraki çalışmalarda, iki boyutlu kanalda cisme hareket eklenmiş ve cismin kurutma kanalı içerisindeki hareketinin de etkisi hava hızı ve sıcaklığının etkisi ile birlikte incelenmiştir. Aynı etki bir sonraki çalışmada üç boyutlu kanal içerisindeki cisimler için de incelenmiştir. Cisme hareket kazandırmanın kurutma performansı üzerinde olumsuz bir etkisi görülmemiştir.

Farklı şekilli cisimlerin kurutma performansının incelendiği çalışmada, daire, kare ve üçgen şeklindeki cisimlerin kurutulması sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada da özellikle dairesel şeklin kurutulma işleminde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Aynı çalışmada bu şekil için farklı malzeme özellikleri ile kurutma işlemi incelenmiş, her malzemenin kurutma performansı ortaya konmuştur. Kanal içerisinde farklı kombinasyonlarla kanala yerleştirilen iki eş kare cismin kurutulmasının sayısal olarak incelendiği bir başka çalışmada, cisimler üzerinden olan ısı transferini maksimuma çıkaracak yerleşimi bulmak için bir optimizasyon çalışması yapılmış, kanaldaki cisimlerin birbirlerine olan optimum yatay ve dikey mesafeler elde edilmiştir. Daha sonra kütle transferleri de farklı parametrelerde incelenmiş, maksimum kütle transferinin de optimum aralık değerlerinde olduğu görülmüştür. Benzer bir çalışma daha sonra üç boyutlu kanalda üç kübik eş cisim için yapılmış, kütle transferinin maksimum değeri optimum aralıklarda elde edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında Yapay Sinir Ağları (YSA/ANN) ve Uygun Ortogonal Ayırıklaştırma (UOA/POD) yöntemleri kullanılmıştır.

Tez kapsamında yapılan sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar konvektif kurutmada farklı durumlar için (üç boyutlu kanal, çok sayıda nemli cisim, nemli-gözenekli cisimlerin hareket halinde olması, kanal içinde türbülanslı akış koşulları vb.) etkin parametrelerin kurutma performansına etkisinin ortaya konulmasında ve sonra yapılacak olan deneysel ve sayısal çalışmalarda referans olarak kullanılabilir. Özellikle bu çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon çalışmaları, zamana bağlı üç boyutlu hem kanal içinde hem de gözenekli cisim içinde bütünleşik ısı-akış ve kütle transferi probleminin çözümünde büyük avantaj sağlamak ve çok sayıda cismin yer aldığı büyük ölçekteki kurutma sistemlerinin modellenmesinde simülasyon zamanını önemli ölçüde kısaltmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Konveksiyon, Difüzyon, Isı ve kütle transferi, Çok fazlı akış, Gözenekli yapı.

2022, 297 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

Seda ÖZCAN ÇOBAN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor:

Prof. Dr. Fatih Selimefendigil

In this study, various studies were carried out on the numerical analysis of the hot air-drying process in a conveyor dryer, the studies were developed step by step and the effects of different parameters in the drying process on the drying performance were examined. Food products, especially vegetable and fruit products, were preferred as dried objects, and the properties of the products were taken from previous experimental studies. Numerical studies are discussed for the stationary and moving states of moist bodies in two dimensions and three dimensions. Optimization studies have been carried out for convective drying performance in two-dimensional and three-dimensional cases for the problem of integrated heat and mass transfer in time-dependent channel flow and porous body.

First, the moist porous rectangular-shaped body in the stationary state in the channel under two-dimensional laminar flow conditions was considered, and the variation of moisture loss in the body with time was observed under different drying conditions within a certain drying time. Here, drying air inlet speed and temperature are considered as variable parameters. In the first stages of the drying process, it was observed that the moisture loss from the outer surfaces of the object and especially from the corners was at the maximum level. In addition, the surface in front of the duct air flow direction was the surface where the most moisture loss was experienced during drying. The increase in both drying air velocity and temperature values caused an increase in moisture loss.

In the same study, the effect of different parameters on drying with a rotating cylinder that affects the flow into the channel was investigated. It was observed that the size of the rotating body, the direction of rotation and its position in the channel affect the flow and drying performance. Depending on the rotation direction of the circular object, the amount of moisture loss on different surfaces of the dried object changed. In addition, as the distance of the cylinder to the object being dried in the channel increases, its effect on drying decreases, and the same effect decreases as the cylinder gets smaller. After that, the drying of more than one cubic object in the three-dimensional channel was discussed, and the effects of the distance between the objects and the placement in the channel were examined. Here, too, it was observed that the moisture loss in the objects behind increased with the increase in the distance between the objects.

In the following studies, motion was added to the object in the two-dimensional duct and the effect of the motion of the object in the drying duct was examined together with the effect of air velocity and temperature. The same effect was investigated for the objects in the three-dimensional channel in the next study. There was no negative effect of adding motion to the object on the drying performance.

In the study in which the drying performance of different shaped objects was examined, the drying of circle, square and triangular objects was examined numerically. In this study, it was observed that especially the circular shape gave better results in the drying process. In the same study, the drying process with different material properties for this shape was examined, and the drying performance of each material was revealed. In another study, in which the drying of two equi-square objects placed in the channel with different combinations in the channel was examined numerically, an optimization study was carried out to find the placement that will maximize the heat transfer over the objects, and the optimum horizontal and vertical distances of the objects in the channel to each other were obtained. Then, mass transfers were also examined in different parameters, and it was seen that the maximum mass transfer was within the optimum range values. A similar study was then carried out for three cubic congruent bodies in a three-dimensional channel, and the maximum value of mass transfer was obtained at optimum intervals. Artificial Neural Networks (ANN) and Appropriate Orthogonal Discretization (POD) methods were used in the optimization studies.

The results obtained from the numerical studies carried out within the scope of the thesis are to reveal the effect of effective parameters on the drying performance for different situations (three-dimensional channel, many moist objects, moist-porous objects in motion, turbulent flow conditions in the channel, etc.) in convective drying. It can be used as a reference in experimental and numerical studies. In particular, the optimization studies developed within the scope of this study provide a great advantage in solving the problem of integrated heat-flow and mass transfer both in the channel and in the porous body, and significantly shorten the simulation time in modeling large-scale drying systems in which many bodies are involved.

Keywords: Drying, Convection, Diffusion, Heat and Mass transfer, Multi-phase flow, Porous body

2022, 297 pages

1 GİRİŞ

Kurutma işlemi, özellikle gıda ürünleri için endüstride sıklıkla uygulanan temel bir prosestir. Gıda ürünlerinin besin içeriğini kaybetmeden ve gıdaların renk, şekil ve içerik bakımından bozulmadan verimli bir şekilde kurutulmasını sağlamak için prosesin her aşamasının iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Verimli bir kurutma işlemi gerçekleştirmek için, kurutulan cismin başlangıç nem oranı, istenilen son ürün nem oranı, cismin şekli, boyutu ve termal hassasiyeti göz önünde bulundurulmalıdır, enerji tüketimini minimuma indiren optimum kurutma performansı elde edilmesi için tüm parametrelerin ele alınması ve değerlendirilmesi önemli bir husustur. Bu sebeple kurutma sistemlerinin tasarımında, maliyetleri en aza indirmek için sayısal çalışmalar faydalı olmaktadır. Bu tür çalışmalar özellikle endüstriyel kurutma sistemlerinin simülasyonları şeklinde tasarlanmakta, kurutmaya etki eden tüm parametreler için farklı değerler kolayca uygulanarak en iyi kurutma performansına ulaşmak için optimum parametreler elde edilebilmektedir.

Nemli ürünlerin endüstriyel veya evsel kurutma uygulamaları, son ürün kalitesini sağlamak için ürünlerin türüne ve kullanımına bağlı olarak çeşitli amaçlar için bir dehidrasyon/nem alma işlemidir [1]. Kurutma işlemi sırasında ortam alanından nemli katıya enerji (ısı) aktarımı ve nemli katıdan çevreye nem transferi gerçekleşir. Böylece, çevreleyen hava nemlendirilir ve nemli cisimde nem kaybı gerçekleşir. Kurutma işlemi, tarım, kimya, gıda, biyoteknoloji, ilaç, ağaç işleme, mineral işleme ve kâğıt üretimi gibi çeşitli endüstrilerde temel bir süreçtir [2]. Son ürünün talep edilen nem içeriği, kurutulan ürünlerin kalitesine, çeşidine ve tüketicilerin talebine bağlı olarak değişir. Bu bağlamda, ilgili endüstrilerde kurutma için farklı yöntemler kullanılmıştır. Meyve ve sebzeler gibi yüksek nemli ürünlerden nemi çıkarmak, ürün kalitesini korurken raf ömrünü uzatmak ve saklama koşullarını iyileştirmek için yaygın olarak kabul edilen bir yöntemdir. Süt, yumurta ve baharat gibi ürünler, farklı uygulama alanlarında kullanım kolaylığı sağlamak için kurutularak toz haline getirilebilmektedir. Öte yandan, seramik, tuğla gibi ürünler dayanıklılık için kurutulurken, ağaç ürünleri de işleme kolaylığı ve uzun süreli kullanım için kurutulabilmektedir. İstenen kaliteyi elde etmek veya kalite kayıplarını en aza indirmek, nakliye maliyetinin düşürülmesi, kimyasal veya mikrobiyal

bozulmaların önlenmesi, kurutma işlemlerinin uygulanmasının nedenlerinden bazılarıdır.

Kurutma prosesleri genel olarak kurutulacak ürüne farklı metotlarla ısı bir etki uygulayarak içerisindeki nemin bir şekilde buharlaştırılması esasına dayanmaktadır. Bununla ilgili kurutmada en yaygın kullanılan yöntem ürün üzerinden akan sıcak havayla kurutma (konvektif kurutma) yöntemidir. Konvektif kurutma pek çok farklı kurutucu türü içerisinde ana proses ya da yardımcı proses olarak kullanılan konvansiyonel bir yöntemdir. Kurutulacak ürünün cinsine uygun olarak nispeten kolay uygulanabilir ve verimli bir yöntem olması da bu yöntemi ön plana çıkarmaktadır.

Yapılan tez çalışmasında, öncelikle konveyörlü kurutucuların çalışma mantığı dikkate alınarak konvektif kurutma prosesi ile ilgili sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk başta iki boyutlu ve hareketsiz cisimlerle ilgili simülasyonlar oluşturulmuş, daha sonra iki boyutlu hareketli, üç boyutlu sabit ve üç boyutlu hareketli simülasyonlar oluşturulmuş ve değişken parametrelerin ısı ve kütle transferine, dolayısıyla kurutma performansına etkileri incelenmiştir. Çalışmalarda, kurutmaya etki eden hava hızı, sıcaklığı, ürün şekli ve boyutu gibi faktörlerin etki derecelerini belirlemek amacıyla bu parametrelerin farklı kombinasyonları hesaba katılarak simülasyonlar hazırlanmış, en etkili kurutma koşullarını elde etmek amaçlanmıştır. Ayrıca, optimum kurutma performansının elde edilmesi için çeşitli parametreler ele alınarak sayısal optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş, yapay sinir ağları ve uygun ortagonal ayrıklaştırma yöntemleri ile de en verimli kurutma koşullarını veren parametre değerleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmaların doğruluğu benzer deneysel çalışmalarla da kanıtlanmıştır. Tez çalışmasının amacı, maliyeti yüksek deneysel çalışmalara doğruluğu yüksek ve düşük maliyetli bir alternatif sunarak kurutma prosesinin performansını ve verimini arttırmaya yönelik yapılan araştırmalara katkıda bulunmaktır.

2 KURUTMA İŞLEMİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Kurutma işlemi, çok eski çağlardan beri uygulanan ve gün geçtikçe daha verimli ve efektif alternatifler sunan bir yöntemdir. Kurutma işleminin çeşitli malzemelere uygulanmasının başlıca nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Taşıma, depolama, paketleme ve dozaj kolaylığı (ilaç sektörü)
- Bazı ürünler için sözleşme veya yasal sınırlar (örneğin tuz, iplik, kum, tütün, un)
- İstenen kaliteye ulaşmak için belirli bir aralıkta nem içeriği elde etmek. Örneğin, bazı gıdalardaki yüksek nem içeriği raf ömrünü kısaltabilirken, çok düşük nem içeriği değerli besin içeriklerinin kaybına sebep olabilir.
- Bazı üretim aşamalarında, prosesleri kolaylaştırmak için nem içeriğini azaltmak gerekebilir. Örneğin, lastiklerin vulkanizasyon işleminde kurutulmuş kauçuk kimyasalları kullanılır, çünkü yüksek nem şişmiş formlara neden olur.
- Bazı tekstil ürünlerinde yüksek nem, küf ve bakteri üremesine neden olur, bu nedenle belirli bir değere kadar kurutma, ürünün bu zararlı durumdan korunmasını sağlar.

Kurutma sırasında ürünlerin fiziksel ve kimyasal değişimi, istenen nihai sonuca ulaşmak için optimum yöntem ve parametreleri belirlemek için ilgi çekici bir konudur. Kurutulacak ürünlerin çeşitliliği arttıkça kurutma yöntemlerinin farklılaşması ve buna göre farklı kurutucu türlerinin tasarımı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, kurutma işlemlerini daha verimli hale getirmek için birçok Ar-Ge çalışması yapılmaktadır. ABD'de kurutma ile ilgili her yıl yaklaşık 250 patent başvurusu yapılırken ve Avrupa'da 80 patent bildirilmektedir [3]. En uygun kurutucuyu seçmek, tüketicilerin ihtiyaçlarını karşılamak için istenen ürünü elde etmek açısından önemli bir konudur ve yüksek üretim oranlarıyla minimum enerji tüketimi ile istenilen kalitede ürün elde etmek, çok önemlidir. Literatürde sadece yaklaşık 50 belirgin kurutucu türü yaygın olarak kullanılırken, 400'den fazla kurutucu türü bilinmektedir [4].

Kurutma işlemleriyle ilgili bir diğer dikkat edilmesi gereken bir husus da enerji tüketimidir. Endüstriyel kurutma için konvansiyonel sistemler genellikle

yüksek enerji tüketimine sahip termal kurutma işlemleridir. Kurutma endüstrisi için büyük miktarda enerji tüketimi gerçekleşmektedir, örneğin gelişmiş ülkelerde ulusal endüstriyel enerjinin %12-25'i yüksek kurutma süreçlerine atfedilir [5]. Bu nedenle, kurutucular için ilk yatırım maliyetlerinden ziyade işletme sırasında büyük maliyetler ortaya çıkar [2,6] .Bu yüksek tüketimin nedeni esas olarak ürünün suyu çıkarmak için gizli buharlaşma ısını sağlamaktır [6]. Bu sebeple, faz dönüşümünde termal etkilerin ve kurutma işleminde ısıtmanın gerektirdiği enerji tüketimi elektromotorlar için gerekli enerji tüketiminden fazladır [7]. Bu yoğun enerji maliyetleri, kurutulmuş ürünler için tedarik zincirini etkiler ve araştırmacıları yeni bir enerji verimli kurutma modeli bulmaya zorlar [8].

Kurutma etkisinin temel özellikleri kurutma kinematiğinin incelenmesi ve bu sebeple Ar-Ge çalışmalarına ihtiyaç duyan çok kapsamlı bir alandır. Kurutmada ele alınması gereken pek çok farklı parametre vardır. Tablo 2.1, kurutmada etkili olan faktörler ve değişim aralıkları gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Kurutmada etkili olan faktörler

Özellik	Değer
Ürün kalınlığı	0.1 µm-10 cm
Gözeneklilik	%0,01-%99,9
Ürün hızı	Sabit- 2000 m/s
Üretim kapasitesi	0,10 kg/sa-100 t/sa.
Kurutma basıncı	1 mbar-25 bar
Kurutma süresi	0,25 sn.- 5 ay
Isı transferi şekli	İletim Taşınım Işınım Dilektik

Kurutma, farklı endüstrilerden gelen ürünlerin çeşitliliğini içeren yoğun bir süreç olduğundan, çeşitli parametrelerin optimum kombinasyonunu belirlemek, kurutma işlemi için bir zorunluluktur. Herhangi bir üründen nemi etkili bir şekilde azaltmak veya çıkarmak için en uygun olanı seçmek için, dikkate alınması gereken parametreler esas olarak aşağıdaki gibi verilmiştir;

- Hammaddenin ilk nem içeriği
- Nihai ürünün istenen nem içeriği
- Ürünün şekli ve boyutu
- Ürün kalitesini düşürmemek için termal, fiziksel ve kimyasal kısıtlamalar ve sınırlamalar
- Ürün depolama, koruma ve taşıma şartları
- Ürünler aracılığıyla kurutma ve diğer işlemlerin (pişirme, ısıtma, sanitizasyon, durulama, örneğin) konjonktif uygulamaları.

2.1 Başlıca Kurutucu Türleri

Kurutucular, çeşitli kurutma yöntemleri dikkate alınarak farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Şekil 2.1 kurutucuların farklı yöntemlere göre sınıflandırılmasını göstermektedir. Termal kurutucular, adından da anlaşılacağı gibi, kurutma işlemi için ısı iletimini kullanırlar, farklı endüstrilerde en yaygın olarak kullanılan kurutucu türleridir. Isı transfer yöntemine göre kurutucular direkt (doğrudan) ve endirekt (dolaylı) kurutucular olarak da sınıflandırılabilir. Doğrudan kurutucular, konvektif kurutucular olarak da bilinir, malzemenin doğrudan ısıtılmış hava akımı ile temas halinde olduğu, dolayısıyla ısı transferinin konveksiyonla gerçekleştiği yerlerdir. Bantlı, döner, flaş, akışkan yataklı, çarpma jeti, karıştırıcı ve tepsili kurutucular, konvektif kurutucuların yaygın örnekleridir. Dolaylı kurutucular, ürünün genellikle ısıtılmış yüzey veya alan ile temas halinde olduğu türlerdir, bu nedenle ısı temel olarak iletim yoluyla aktarılır. Buharlaşan nem, bir vakum uygulanarak veya kurutucu bölmesinden hafif gaz akışı kullanılarak giderilir. Bu tür kurutuculara en iyi örnek özellikle kâğıt kurutmada kullanılan tamburlu kurutuculardır. Radyasyon, güneş enerjili kurutucularda veya elektrikli radyatörlerde görülebileceği gibi başka bir termal kurutma yöntemidir. Mikrodalga kurutucularda, üründen nemi termal olarak buharlaştırmak için yüksek elektrik alanları kullanılır. Buharlaşan nemin

giderilmesi için vakum işlemi veya gaz akışının konveksiyonu kullanılır [2]. Çoğu termal kurutucu sistemi, uygulama sırasında yüksek enerji gerektiren geleneksel sistemlerdir, bu nedenle bu sistemler son yıllarda yeni enerji verimli sistemlerle birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Termal kurutmaya alternatif olarak, malzemelerin kurutulması için mekanik enerji kullanılması bir seçenek olabilir. Vakum veya basınç filtreleri, santrifüjler ve elek presleri, nemli ürünleri mekanik olarak kurutmak için kullanılan ekipmanlardan bazılarıdır [9]. Bu nedenle, hammadde üretim moduna göre farklı şekil, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip çeşitli ürün türleri kurutulmakta, kurutucular da sürekli veya kesikli kurutucular olarak sınıflandırılmaktadır. Konveyör bantlı, tamburlu, flaşlı, püskürtmeli kurutucular sürekli tip kurutucular iken, vakumlu kurutucular, dondurarak kurutucular, tavalı kurutucular yaygın toplu kurutuculardır. Akışkan yataklı, tepsili, güneş enerjili ve mikrodalga kurutucuların hem sürekli hem de yığın tipi tasarımları vardır. Kurutucu tasarımları ürünün taşıma cinsine göre sabit yatak, hareketli yatak, akışkan yatak ve daldırılmış olarak da sınıflandırılır. Geleneksel tepsili, tamburlu kurutucular, dondurarak kurutucular ve vakumlu raf kurutucularının çoğu, sabit (statik yataklı) kurutucular için bazı örneklerdir ve döner, turbo tepsili, titreşimli bantlı kurutucular, hareketli kurutucular için örneklerdir. Tablo 2.2, endüstride kullanılan başlıca kurutucu türlerinin çalışma prensipleri, avantajları, kısıtları ve kurutulan ürünleri hakkında kısa bir bilgi vermektedir. Örneğin, dondurarak kurutmada ürün kalitesi ön plana çıkarken, akışkan yataklı kurutucularda düşük bakım maliyetleri bir avantaj durumundadır. Tablo 2.3, yaygın olarak kullanılan bazı kurutucu türlerinin sınıflandırmalarını göstermektedir. Tabloda genel bir sınıflandırma yapılmıştır, böylece bir tip birden fazla sınıflandırmaya dahil edilebilir. Örneğin, geleneksel bir tepsili kurutucu, tepsilerin bir araba içinde üst üste yerleştirildiği sabit bir kurutucu iken, bir turbo tepsili kurutucu, dönen dairesel tepsilerden oluşan hareketli ve çalkalamalı bir yataklı kurutucudur. Kurutucular, kurutulacak ürün cinsi, kurulum maliyetleri, işletme maliyetleri, enerji tüketimi, kurutucu boyutu, gerekli işçilik miktarı, son üründe istenilen fiziksel ve kimyasal özellikler...vb. gibi birçok farklı etken göz önünde bulundurularak sınıflandırılır.

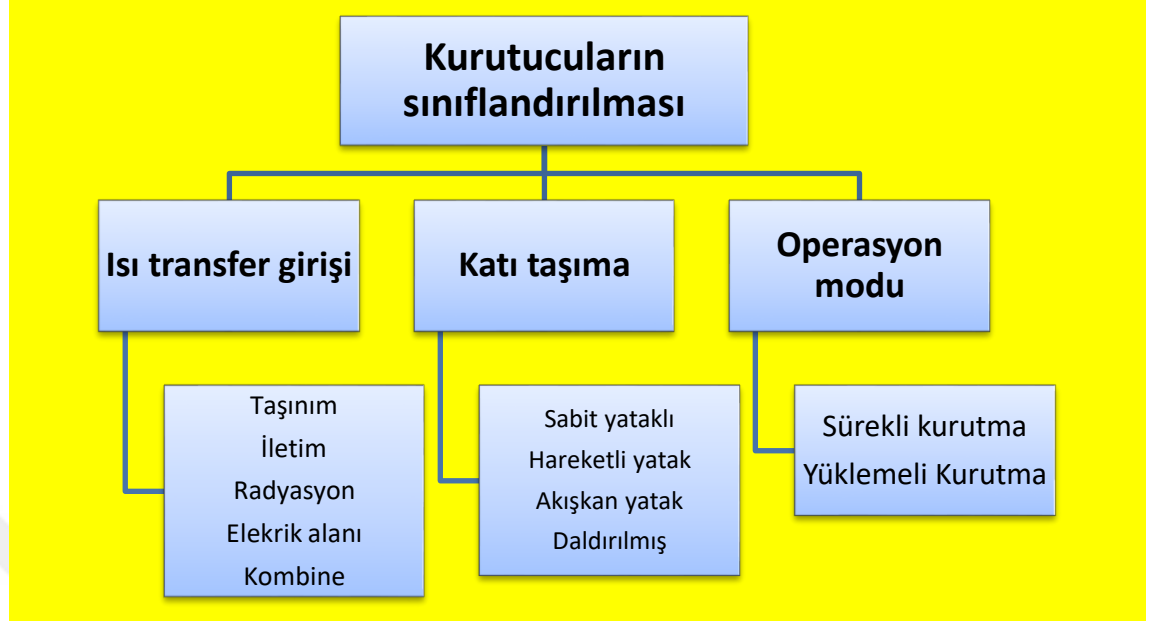
Tablo 2.2 Endüstride kullanılan başlıca kurutucu türleri

KURUTUCU TİPİ	ÇALIŞMA PRENSİBİ	AVANTAJLAR	KISITLAR	ÜRÜNLER
Dondurarak	Suyun %95'ini süblimasyon-vakum ile %5'ini ikincil kurutma ile giderir	•Kalite, tat, renk, şekil korunur •Kimyasal, mikrobiyolojik bozulmayı engeller •Neme duyarlı malzemeler için uygundur •Yüksek temizlik standartlarında kurutma sağlar	•Uzun kurutma süreleri •Yüksek işletme ve bakım maliyetleri	•Nutrasötikler, •Meyve ve sebzeler •Eczacılık •Probiyotik bakteri •Enzimler, Algler, •Kahve
Flaş	Yüksek hızdaki sıcak havayla nemi pnömatik olarak taşır	•Basit proses •Kolay bakım •Yüksek ısı verim •Düşük karbon ayak izi	•Büyük boyutlar •Çok yüksek sıcaklıklar (650 °C' ye kadar)	- Tarım ürünleri - Granül halinde ürünler - Tozlar (un, nişasta)
Akışkan yataklı	Katı nemli taneciklerin sıcak hava ile karışarak bir süspansiyon gibi davranması	•Hızlı kurutma (20-40 dak) •Düşük bakım maliyeti •Isıl hassasiyete sahip ürünle için uygun (ortam havası yaklaşık 60 °C) •Homojen	•İstenmeyen büzülmeler •Yüksek basınç riskleri (10-12 bar) •Yıpranma olasılığı	- Cips şeklindeki gıdalar, tozlar - İnorganik gübreler - İçecek ürünleri - Farmasötik ürünler

		kurutma		Seramik
Sprey	Bir çözelti veya süspansiyonu hava akışıyla katı hale dönüştürür	•Nispeten hızlı kurutma •Termolabil ürünler için uygundur •Yüksek tonajlı üretim •Bulamaç, solüsyon, eriyik, emülsiyon formları kurutulabilir.	•Büyük boyutlar •Yüksek kurulum maliyeti, •Katı cisimler için uygun değildir •Bozulma ve yangın tehlikesi	Süt Yumurta bazlı ürünler Sabun, deterjan Nitrat ve fosfat benzeri gübreler Şeker, özellikle yenilebilir asitler Toz boyalar ve gıda boyaları
Tamburlu	Karşıt yönde dönen iki tambur ile mekanik olarak hamur veya macunu ince film tabakalarına dönüştürür (≈ 0.1 mm) ve daha sıcak ($>100^{\circ}\text{C}$) tamburlara iletirken iletim ile ısı transferi	•Homojen kurutma •Yüksek viskoziteli macun ve hamur kıvamındaki ürünler için uygun •Kısa kurutma süreleri •Kolay bakım	•Düşük viskoziteli ürünler için uygun değil •Ürün beslemede yüksek kontrol gereklidir •Yaprak formlarda kırışıklıklar oluşabilir •Yenilebilir kuru ürün kavrulmuş bir tada	Kâğıt, Hamur, Nişasta ürünleri Antibiyotikler, Böcek ilaçları, Süt, Peynir altı suyu, Maya

	sağlanır [10]		sahip olabilir	
Konveyör bant	Ürünler sürekli olarak perforeli bir konveyör üzerinde sıcak havanın etkisiyle kurur	•Değişken ürün boyutları •Hassas kurutma (nispeten düşük sıcaklıklar maks. 70-80 C) •Geçmişten günümüze çok çeşitli ürünün kurutulması sağlanmıştır	•Yüksek yakıt kullanımı •Büyük boyutlar •Kurutucu içerisinde zarar görme tehlikesi	Granüllü, lifli malzemeler Farklı formlardaki ürünler Ekstrüde ürünler
Kabin tip	Dikdörtgen kabin içerisindeki delikli tepsilerde ürünler sıcak hava etkisiyle kurutulur	•Hızlı proses •Yükleme ve boşaltmada ürün kaybı yaşanmaz •Küçük boyutlar uygulama •Düşük yakıt tüketimi	•Yükleme ve boşaltmada yüksek emek gerektirebilir •Yıpranma olasılığı	İlaçlar Tabletler Granüller Gıda ürünleri Yapışkan ürünler Macunlar
Mikrodalgalı	Mikrodalga ışınlarının elektroman yetik enerjisiyle kurutma sağlanır	•Bazı ürünlerin kalitesi artar •Hızlı hacimsel ısıtma •Düşük enerji tüketimi (%71' e kadar) •Kurutma hızında artış (%800' e kadar) •Düşük işletme	•Yüksek kurulum maliyetleri •Aroma kaybı yaşanabilir •Özel boyut ve şekil gerektirebilir	Deniz ürünleri Farmasötikler Seramikler Ahşap ürünleri

		maliyetleri[11]		
--	--	-----------------	--	--



Şekil 2.1 Kurutucuların sınıflandırılması

2.2 Kurutma İşlemini Etkileyen Faktörler

Bir katının içindeki nem iç kısımlarda bağlı ya da yüzeye yakın bölgelerde serbest şekilde bulunmaktadır. Buharlaştırma iki yöntemle yapılabilir; biri döner tip kurutucularda olduğu gibi sıcaklığı nemin kaynama noktasına yükseltmek, diğeri ise dondurarak kurutucularda olduğu gibi basıncı (vakum işlemi) suya ait üçlü noktanın altına düşürmek ve ardından süblimasyon için ısı eklemektir. Katı üründen sıcak havanın taşınması ile nemin uzaklaştırılması, konvektif kurutucu tiplerinde görüldüğü gibi buharlaştırma yöntemidir. Bu durumda atmosferik basınç, nemin doymuş buhar basıncının üzerindedir. Farklı kurutma yöntemleri de göz önünde bulundurulacak olursa, kurutma hızı birçok faktörden etkilenir. Kurutma hızı iki şekilde tanımlanabilir: birim zamanda birim kütleden ayrılan nem miktarı (ϕ) ve su akısı (N) olarak tanımlanan, birim zamanda birim yüzeyden ayrılan nem miktarıdır. Sabit kurutma koşulları altında konveksiyon için, kurutma hızı aşağıdaki gibi tarif edilir;

$$\phi = -\frac{dW}{Mdt} = -\frac{dX}{dt}, X = \frac{W}{M} \quad (2.1)$$

Su buharlaşma hızı ya da su akısı (N) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$N = -\frac{dW}{Adt} \quad (2.2)$$

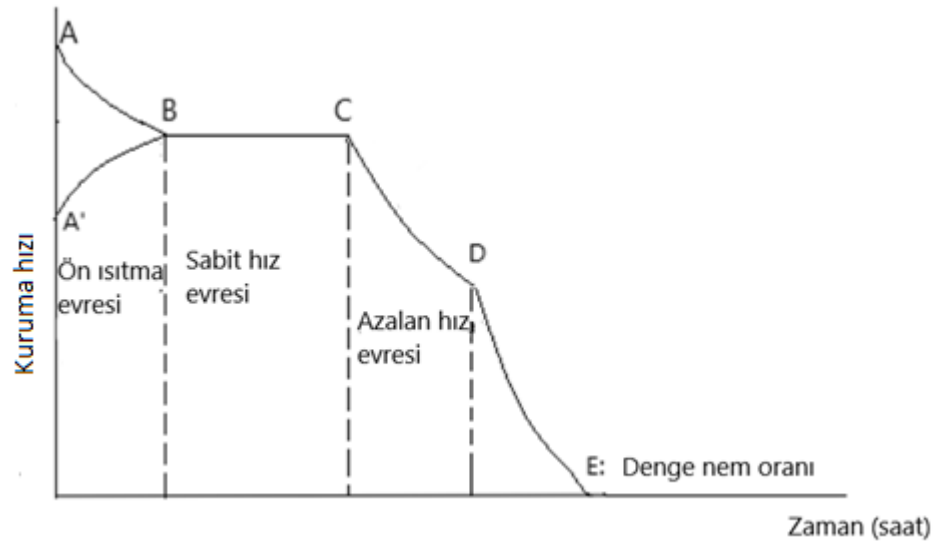
Yukarıdaki denklemlerde, sırasıyla W, M, X, M_s üründeki yaş içerik kütlesi, üründeki kuru içerik kütlesi, kuru bazda ürün başına ıslak bazdaki nem içeriği ve kuru katı kütlesidir.

Tablo 2.3 Endüstride kullanılan kurutucu türleri ve sınıflandırılması

Kurutucu türü	Isı girişi				Katı taşıma			Operasyon modu	
	Isıyı taşıma	Isıyı iletim	Isıyı yalıtım	Dielektrik	Sabit	Titreşimli	Daldırma	Kesikli	Sürekli
Flaş	X	X					X		X
Konveyör	X				X	X			X
Döner	X	X				X			X
Akışkan yatak	X					X		X	X
Püskürtmeli yatak	X							X	
Sprey	X						X		X
Tamburlu		X			X				X

Tepsi		X			X	X		X	X
Mikrodalga				X	X			X	X
Solar	X		X		X			X	X
Kızılötesi			X		X			X	
Vakum	X				X	X		X	
Dondurulmuş	X				X			X	X

Kurutma hızı kurutma eğrisi denilen grafiklerle gösterilir ve ϕ ya da N ' nin zamana göre değişimini gösteren eğrilerdir. Tipik bir konvektif kurutma işleminde kurutma eğrisi Şekil 2.2' deki gibi çizilebilir.



Şekil 2.2 Higroskopik malzemeler için tipik konvektif kurutma işleminin kuruma eğrisi

Grafikte görülen kurutma evreleri aşağıdaki gibi açıklanabilir[12]:

1) Ön ısıtma evresi: Bu evrede ürün kurutma sıcaklığına kadar ısıtılır. Bu aşama genellikle çok kısadır ve nem içeriğinde hiç değişiklik olmaz veya çok az değişiklik olur, bu nedenle bu periyotta genellikle kurutma hızı sıfırdır (A-B).

2) Sabit hız evresi: Bu aşama suyun uzaklaştırıldığı dönemdir. Kurutma hızı bu aşamada sabittir, bu da nem içeriğinin zamanla doğrusal olarak azaldığı anlamına gelir (B-C).

3) Azalan hız evresi: “Kritik nem içeriği” olarak adlandırılan belirli bir nem içeriğine ulaştıktan sonra, kurutma hızı, kurutulmuş ürünün (C-E) nihai nem içeriği değerine kadar keskin bir şekilde düşmeye başlar.

Kurutma hızını etkileyen faktörler iç etkenler ve dış etkenler olarak ikiye ayrılır:

2.2.1 İç etkiler

(a) Nem içeriği:

Nem, katı bir ürünün uçucu kısmıdır. Gözenekli nemli maddede, ürün içindeki gözeneklere su bağlanır. Üründeki su miktarına nem içeriği denir. Nem içeriği ıslak bazda nem içeriği (MC_{wb}) ve kuru bazda nem içeriği (MC_{db}) olarak iki şekilde tanımlanır. Islak maddede ve kuru maddede nem içeriği sırasıyla şu şekilde tanımlanır [13];

$$\begin{aligned} MC_{wb} &= \frac{\text{su kütlesi}}{\text{toplam kütle}} \times 100(\%) \\ &= \frac{\text{suyun kütlesi}}{\text{katı kütlesi} + \text{su kütlesi}} \times 100(\%) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$MC_{db} = \frac{\text{suyun kütlesi}}{\text{katı kütlesi}} \times 100(\%) \quad (2.4)$$

Taze meyve ve sebze gibi yüksek nemli ürünlerde kuru maddede nem miktarı, $MC_{db}\%$ 300-500 aralığında olabilir. Bu, gözeneklerin ve boşlukların içinde çok fazla bağlanmamış serbest su olduğu anlamına gelir. Kurutma eğrisine bakıldığında, sabit hız periyodunda, buharlaşan yüzeyde serbest su filminin varlığından dolayı, bu bölgelerden ısı ve kütle taşınmasını gerçekleştirir (BC noktaları) Buharlaşma bu aşamada ve kritik bir noktada malzemeden bağımsızdır. Malzemenin iç

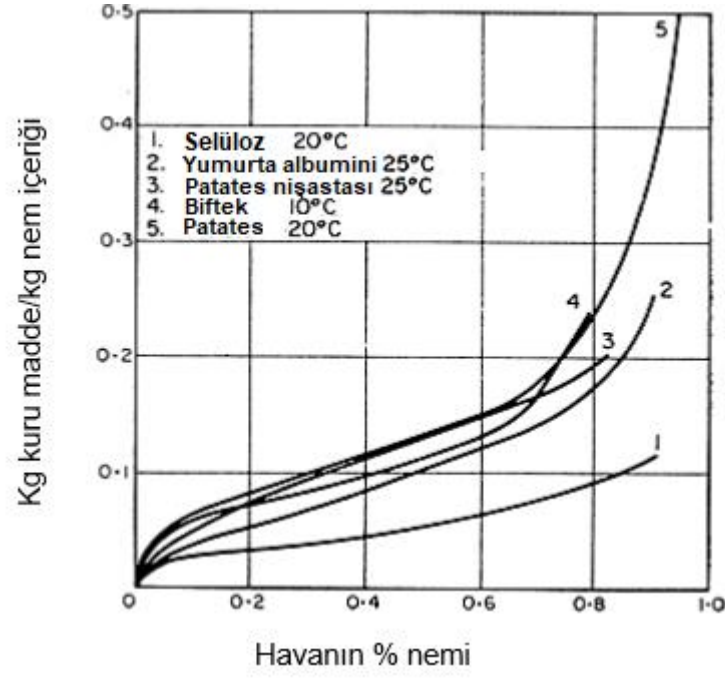
taraflarından yüzeye su beslemesi buharlaşma hızının (C noktası) altına düşer, kuruma hızı, buharlaşmanın durduğu denge nem içeriğine kadar keskin bir şekilde düşmeye başlar (E noktası). Ürünün sıcaklığı, havanın kuru termometre sıcaklığına ulaşmak için ıslak termometre sıcaklığının üzerine çıkar [14]. Kurutma hızının düşmeye başladığı noktadaki nem içeriği kritik nem içeriği (X_c) olarak adlandırılır. Bu durum kurutma eğrisinde C noktası olarak gösterilir. Buhar basıncı, çevredeki ortam buhar basıncı ile dengede ise, bu durumda nem içeriği denge nem içeriği (X_e) olarak adlandırılır, bu değer grafikte E noktasında ve bu noktadan sonra görülür. Buharlaşma olmaz veya çok az olur. Kuruma süresi, buharlaşma hızının genel formülünden hesaplanır;

$$t_d = -\frac{M}{A} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dX}{N} \quad (2.5)$$

Bu genel denklem kurutma eğrisinin tüm aşamalarına göre dönüştürülebilir, grafiğe bakıldığında kısa olan ön ısıtma evresi ihmal denebilir. X_i cismin ilk nem içeriğidir. Denklemin genel biçimini, çeşitli kurutma teknikleri için farklı sınır koşullarıyla dönüştürerek, farklı kurutma eğrileri türleri için referans literatürde çeşitli modeller geliştirilmiştir [15–20]

(b) Denge nem içeriği:

Kurutma işleminde, higroskopik cismin nem içeriğinin onu çevreleyen havanın nemi ile denge halinde olması durumuna cismin denge nem oranı denilmektedir. Bu durumda, cisim nem kaybetmez ya da dışarıdan nem almaz. Denge nem oranı ile çevre havasının bağıl neminin karşılaştırıldığı eğrilere nem izotermi adı verilir. Bu grafikler bir maddenin higroskopik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılır. Nem izoterm grafikleri aynı zamanda ürünün sıcaklığına da bağlıdır. Şekil 2.3, bazı malzemelerin farklı sıcaklıktaki nem izotermelerini göstermektedir.



Şekil 2.3 Farklı malzemelerin farklı sıcaklıklarda nem izotermi

Kurutma kinetiğini belirlemenin bir başka yolu da ilk kez Meel [21] tarafından tanımlanan karakteristik kurutma eğrileridir. Bu eğriler normalize nem içeriğinin (nem oranı/moisture rate) zamanla değişimini gösteren grafiklerdir. Normalize nem içeriği aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (2.6)$$

Burada, X_i başlangıç nem oranı ve X_e denge nem miktarıdır. Denge nem miktarı başlangıç nem miktarına kıyasla çok küçük bir değere sahipse, ihmal edilebilir ve aşağıdaki formüldeki şekle indirgenebilir:

$$MR = \frac{X}{X_i} \quad (2.7)$$

(c) Efektif Difüzivite:

Termal kurutma işleminde ısı sıcak kurutma havasından kurutulan cisme doğru akar, cisim tarafından alınan ısı nemin difüzyon (yayılım) yoluyla atılmasını sağlar. Bu yayılım önce cismin yüzey kısımlarında daha sonra iç kısımlardaki

nemden gerçekleşir. Bu iki difüzyon şekli, kapiler akış, moleküler difüzyon, Knudsen difüzyonu ya da hidrodinamik akış gibi farklı fiziksel olgulara bağlıdır. Tüm difüzyon türleri Fick' in ikinci yasasının genel bir formülü ile tanımlanabilir[22]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (2.8)$$

Denklemde D_{eff} heterojen maddeler de dahil her tür ürün için efektif difüzivitedir. Bu denklem, katı üründeki nem miktarının zamanla değişimini vermektedir. Nem difüzyonunu kontrol mekanizması olarak varsayarsak, kurutma hızı bu denklemden de hesaplanabilir [23], ya da bu denklem kurutma süresini de hesaplamak için kullanılabilir [24]. Fick' in bu genel denklemi farklı koşullardaki başlangıç ve sınır şartları uygulanarak modifiye edilebilir [25]. Bir maddenin difüzivitesi önemli ölçüde sıcaklık ve nem içeriğine bağlıdır [26–35].

(d) Isıl iletkenlik:

Kurutma prosesini etkileyen bir başka özellik ise kurutulacak ürünün ısı iletkenliğidir, özellikle iletim yoluyla ısı transferinin ön planda olduğu dolaylı kurutma sistemlerinde bu özellik daha da önem kazanır (Tamburlu kurutucular). Gıdalarda, bu içsel özellik öncelikle kimyasal bileşime bağlıdır (özellikle sulu bileşenler), bununla birlikte, fiziksel boşluk özellikleri, homojenlik, lif yapısı maddenin durumu ve sıcaklık da katkıda bulunan faktörler olarak kabul edilir [30]. Maddenin ısı iletkenliği Fourier' in formülü ile hesaplanır:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T \quad (2.9)$$

Burada, $\frac{k}{\rho c_p}$ termal difüzivite olarak tanımlanır ve k termal iletkenlik ($W / m^2 K$),

c_p özgül ısı ρ ise yoğunluktur.

Biyolojik yapılarda, hücresel ölçekte, yoğunluk ve nem miktarının ısı iletkenliğe sıcaklıktan daha fazla etki etmesi beklenir. Termal iletkenlik ölçüm yöntemleri kararlı durum, geçici rejim ve kalorimetrik metotlar olmak üzere üç kategoriye

ayrılır. Sürekli rejimde, ısı akışı ölçme, muhafazalı sıcak levha, sıcak kutu, silindir, eksenel ısı akış yöntemleri uygulanırken, sürekli rejimde, temaslı elemanlı ve optik elemanlı olmak üzere ölçüm yöntemleri iki alt başlık altında incelenir. Kalorimetrik ölçüm yöntemleri homojen katı malzemelerin özgül ısı değerlerinin ölçümüne olanak sağlayan yöntemlerdir [36]. Sürekli rejim ölçüm yöntemleri denge sıcaklığına uzun sürede ulaşmaları ve büyük ürün boyutları sebebiyle özellikle biyolojik malzemeler için çok da uygun değildir. Yukarıda belirtilen ölçüm teknikleri daha çok homojen olan ve genellikle katı malzemeler için uygulanabilmektedir. Geçici rejim ölçüm yöntemleri arasında, çizgisel ısı kaynaklı ısıl iletkenlik ölçüm tekniği gıda ürünleri için uygun bir yöntemdir [37]. Kurutma prosesinin uygulandığı gözenekli ve nemli cisimlerin ısıl iletkenliği, katı kısım, içerisindeki sıvı faz ve gaz fazın (genellikle su ve su buharı) ısıl iletkenliklerinin birleşiminden oluşan modeller ile hesaplanır. Literatürde bununla ilgili ilk kaynak Maxwell' in modeli olarak tanımlanabilirken [38], literatürde birçok farklı ampirik ve teorik model de mevcuttur [39]. Bu şekilde tanımlanana ısı iletim katsayıları sayısal çalışmalarda ısı iletiminin hesaplanması açısından önemlidir. Isı transferi miktarının, kütle (nem) transferi ve bu sebeple de kurutmaya etkisi bu açıdan önemlidir.

(e) Cismin kimyasal yapısı:

Nemli bir katı malzeme, çeşitli kurutma teknikleri kullanılarak kurutulabilir. Ürünün iç özelliklerine göre bir hammadde türü için en uygun kurutma yöntemi seçilir. Ürünün kimyasal bileşimi kuruma hızını etkileyen özelliklerden biridir. Bir malzemenin bileşimindeki küçük değişiklikler, yayılma, termal iletkenlik veya gözeneklilik gibi kurutma özelliklerini etkileyebilir. Ayrıca kuruma hızını etkileyen önemli bir parametre olan denge nem içeriği de malzemenin kimyasal bileşimine bağlıdır [40]. Deneysel çalışmalar, hammadde bileşiminin, buharlaştırılacak serbest su miktarını ifade eden nem bağlama enerjisini etkilediği sonucunu vermiştir. Ürünün bileşimi, optimum kurutma parametrelerinin belirlenmesi için de önemlidir. Bir malzemeye hangi kurutma yönteminin uygulanacağını belirlemek, kurutulacak katının bileşimine de bağlı olarak yapılır ve kurutma yöntemi kurutma hızını da etkiler. Kurutma işleminde malzemenin kimyasal olarak bozulmaya uğraması istenmeyen bir durumdur. Değerli besinler, ilaçlar, doğal gıda takviyeleri,

kurutma işlemine tabi tutulan yüksek değerli ürünlerden bazılarıdır ve bileşimlerindeki çok küçük değişiklikler kalitelerini ciddi şekilde düşürür ve onları değersiz artıklara dönüştürebilir. Deneysel ve sayısal çalışmalar, malzemelerin kimyasal bileşiminin, gözeneklilik, nem içeriği ve efektif difüzivite gibi hakim nem taşıma faktörleri üzerinde etkisi olan malzemelerin bağlanma enerjisini etkilediğini göstermiştir [41–45].

f) Yoğunluk ve gözeneklilik

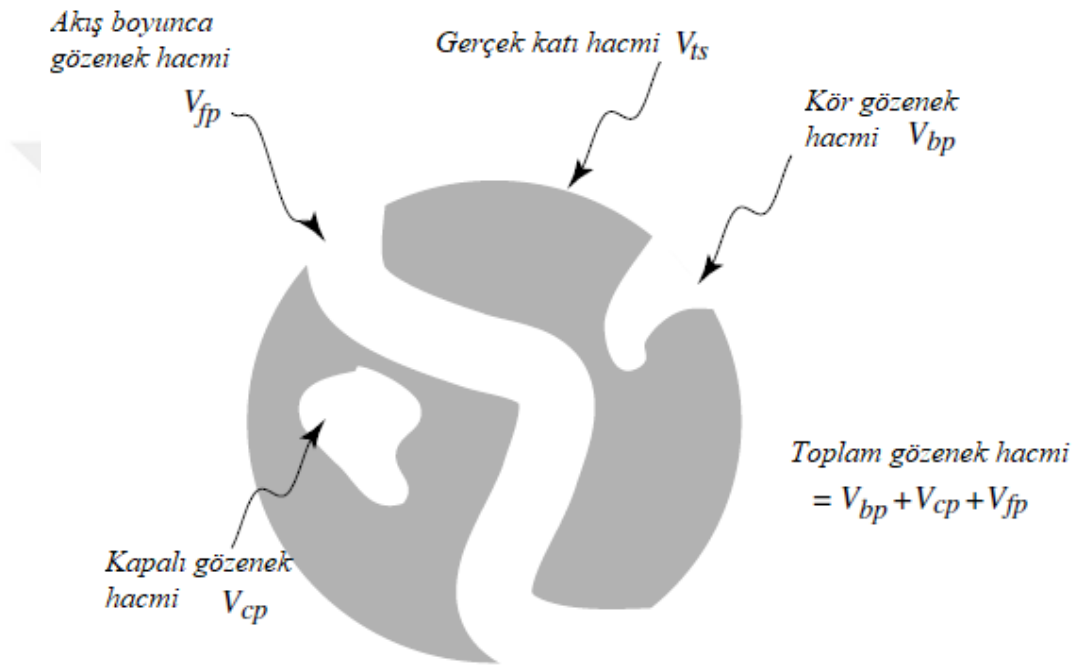
Yapısında gözeneklerin bulunduğu ve bunların da homojen olmayan dağılım gösterdiği maddelerde yoğunluk, farklı şekillerde tanımlanır. Yığın (bulk) yoğunluk, gözenekli bir nesnenin belli bir hacminin yoğunluğu olarak tanımlanırken, parçacık yoğunluğu, özellikle partiküllü cisimlerde tek bir partikülün yoğunluğu olarak tanımlanabilir. Yığın ve parçacık yoğunlukları, özellikle gıdaların termo-fiziksel özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmaları sebebiyle gıda proseslerinin tasarımı, modellenmesi ve optimizasyonunda önemli parametrelerdir[46]. Yığın, yoğunluk özellikleri, kurutma yöntemi ve hızından etkilenir, burada yavaş kurutma, sağlam ve dayanıklı bir ürün verirken hızlandırılmış kurutma, daha düşük yoğunluklu çatlaklar ve deliklerden oluşan bir katı ile sonuçlanır, partikül yoğunluğu ise kurutma türüne bağlı değildir [47]. Yığın yoğunluk, cismin kütlesinin yığın hacme olan oranı olarak aşağıdaki bağıntıyla tanımlanır [48]:

$$\rho_b = m / v_b \quad (2.10)$$

Burada yığın hacim (v_b), gözenekli cismin gözenekleri hesaba katılmadan ortalama boyutlarla hesaplanan hacim olarak tanımlanabilir

Gözeneklilik, bir katı ürün içerisindeki boşluk oranını ifade eden ve nemli maddenin doku ve kalitesi üzerinde etkisi olan fiziksel bir özelliktir. Gözenekli bir ortamdaki gözenekler Şekil 2.4' te gösterildiği gibi üç gruba ayrılabilir. Bunlar her taraftan kapalı, bir ucu kapalı kör ve akışın boydan boya gerçekleştiği açık gözeneklerdir [49]. Gözeneklilik değeri higroskopik maddelerde nem miktarına bağlı olarak değişiklik gösterirken, teorik olarak gözenekliliğin tanımlanması pek mümkün değildir. Kurutma, ısıtma, soğutma gibi ısı ve kütle transferinin

gerçekleştirdiği proseslerde, deneysel yollarla elde edilen gözeneklilik değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Gözeneklilik, meyve ve sebzeler gibi hücresel gıdalardın difüzyon özelliklerine de etki eden bir parametredir [50]. Yapılan çalışmalarda, gözeneklilik sıcak havayla kurutma işlemi sırasında nem miktarının değişimine bağlı olarak da değişmiştir [51,52]. Bu değişim nem miktarıyla gözeneklilik arasındaki ilişkiyi tanımlayan ampirik bağıntılarla elde edilerek gözlenmiştir. Kurutma yönteminin de gözeneklilik üzerine etkileri olduğunu gösteren çalışmalar literatürde yer almaktadır [47,53,54].



Şekil 2.4 Şekil. Gözenekli bir madde içerisindeki gözenek biçimleri [49]

Gözenekliliğin genel bir tanımı yapılacak olursa, cisim içerisindeki gaz faz hacmi (V_g) ile sıvı akışkan (genellikle su) içeren gözeneklerin hacminin (V_l) cismin toplam hacmine (V) oranı şeklinde aşağıdaki gibi tanımlanabilir [40]:

$$\varepsilon = \frac{V_g + V_l}{V} \quad (2.11)$$

Tahıllar gibi taneli ve kesin sınırları olan maddeler için gözeneklilik tamamen geometriye bağlı olarak yoğunluklar cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanabilir [46]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (2.12)$$

Burada, ϕ gözeneklilik ve ρ_s katı yoğunluğudur (gerçek yoğunluk), ρ_b ise görünür ya da yığın yoğunluktur ve aşağıdaki gibi hesaplanır [55]:

$$\rho_b = \rho_s(1 - \varepsilon) + \varepsilon S_w \rho_w \quad (2.13)$$

Bu bağıntıda da görüldüğü gibi gözeneklilik ve yoğunluk birbirleriyle bağlantılı özelliklerdir ayrıca bu iki özelliğin madde içerisindeki nem miktarına bağlı olduğu ampirik bağıntılar da literatürde mevcuttur [46]. Gözenekliliğin yığın yoğunluk, gerçek yoğunluk ve cismin ıslak bazdaki nem miktarına (M_w) bağlı olarak değiştiğini gösteren bir başka model de aşağıdaki gibidir [55]:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_b(1 - M_w)}{\rho_s} \quad (2.14)$$

Literatürde gözeneklilik ile ilgili farklı maddelere uygun olarak ampirik yollarla elde edilmiş ve genel formülasyonlar da bulunmaktadır.

Hem yığın yoğunluk hem de gözeneklilik, kurutma işleminin türüne göre işlem süresince değişkenlik gösteren özellikler olup, cismin ilk baştaki nem miktarına, kimyasal yapısına ve boyutlarına bağlı olarak farklılık gösterir. Bu sebeple de bu iki özellik kurutma işlemine etkileri açısından belirlenmesi önemli olan özelliklerdir.

g) Geçirgenlik

Kurutma işlemlerinde ele alınması gereken önemli bir özellik olmasına karşın, literatürde kendine fazla yer bulamamış bir özellik olan geçirgenlik, özellikle gıdalarda sıvı ve gaz fazları için ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Hidrolik geçirgenlik, basınçla yönlendirilen akış nedeniyle nemli, gözenekli katı bir matrisin direncini ifade eder [56]. Geçirgenliğin önem kazandığı başlıca gıda prosesleri ve aşamaları;

- Mikrodalga ısıtma, kızartma gibi yoğun ısıtmanın olduğu cismin iç kısmındaki buharlaşma etkisiyle basıncın kontrol edildiği prosesler

- Öz elde edilmesi (ekstrasyon) işlemleri gibi sıvının basınçla dışarı atıldığı durumlar
- Kurutma işleminin ilerleyen periyotlarında olduğu gibi doymamış katıda kılcallık etkisi ile ters basıncın sıvının hareketini sağlaması durumudur.

Gözenekli nemli gıda ürünlerinde taşıma mekanizmasını ele aldığımızda, basınçla yönlendirilen akış yalnızca efektif difüzyiviteye bağlı olarak tanımlanamaz. Cisim içerisindeki akışın tek tek çok fazlı olarak açıkça ele alındığı modellerde, geçirgenlik verisine ihtiyaç vardır. Schwartzberg yaptığı çalışmada, diğer özellikler yanında, gıda ürünlerinde ürün dokusunun da geçirgenliği etkilediğini gösteren bir çalışma gerçekleştirmiştir [57]. Jackson ve James derleme çalışmalarında, lifli maddelerde geçirgenliği ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir [58].

Bir gıda ürününün ısı alması sürecinde fiziksel ve biyokimyasal yapısında değişiklikler oluşabilir, bu durum o ürünün geçirgenliğini etkiler. Gözenekli nemli cisimlerde çok fazlı akış ele alındığında, geçirgenlik sıvı veya gaz fazda mutlak ve bağıl geçirgenlik olarak adlandırılan kavramlar yardımıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir [59];

$$\kappa = \kappa_i \kappa_r \quad (2.15)$$

Burada, iç geçirgenlik, κ_i doymuş haldeki sıvı ya da gaz fazında nem içeren cisimdeki geçirgenliği ifade eder. Bağıl geçirgenlik κ_r ise cismin belli fazdaki doygunluğunu belirtmek için 0 ile 1 arasında değerler alır. Bu değerlerde 0 o fazın cisimde var olmaması, 1 ise o fazın tam doygunluğa ulaşmış olması anlamına gelmektedir. Ni ve arkadaşlarının gıdaların mikrodalga ile ısıtılmasının incelendiği çalışmasında, cisim içerisindeki sıvı ve gaz fazının bağıl geçirgenliği 0 ile 1 arasında aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmiştir [60]:

$$\kappa_{r,g} = \begin{cases} 1-1,1S_l, & S_l < 1/1,1 \\ 0 & , S_l \geq 1/1,1 \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\kappa_{r,l} = \begin{cases} \left(\frac{S_l - S_{li}}{1 - S_{li}} \right)^3, & S_l < S_{li} \\ 0 & , S_l \geq S_{li} \end{cases} \quad (2.17)$$

2.2.2 Dış etkiler

(a) Kurutma havası sıcaklığı:

Öncelikle, kurutmada dış koşulların daha çok etkili olduğu periyot, malzeme yüzeyinin yakınında bağlanmamış serbest suyun bulunduğu kurutmanın ilk aşamalarıdır. Kurutma havasının sıcaklığı, her türlü termal kurutma yönteminde kurutma hızı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca özellikle direkt kurutma uygulamalarında sıcaklık ana etken parametrelerden biridir. Kurutma havasının termal özellikleri, kurutma hızı üzerinde önemli etkiye sahip olan ısı ve kütle transfer katsayılarını etkiler. Sıcaklığın kuruma hızı üzerindeki etkilerini araştırmak için birçok çalışma yapılmış [61–64], bazı çalışmalarda sıcaklığın kurutma için kabul edilebilir değerlere çıkarılması kuruma kinetiği üzerinde olumlu bir etkiye sahipken, yüksek sıcaklıklarda kurutmanın kuruma hızı üzerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Kurutma havası sıcaklığı, çalışmaların çoğunda kabul edilebilir minimum ve maksimum değerler aralığında değişmiştir ve bunlar, bağıl nem, basınç ve difüzyon gibi diğer değişken parametrelerle birleştirilmiştir. Kurutulan malzemenin fiziksel yapısı ve bileşimi veya kurutmayı etkileyen diğer parametreler nedeniyle verimli kurutma için en uygun hava sıcaklığı değeri yüksek veya düşük olabilir. Yüksek hava sıcaklıkları kuruma sürecini hızlandırırsa da ısıya duyarlı malzemelerde yapısal bozulmalara neden olabilir. Yüksek sıcaklıklarda kurutma, özellikle gıdalar olmak üzere malzemelerin morfolojisinde istenmeyen değişikliklere neden olabilir. Ziegler ve ark., kırmızı mısır tanelerinin kurutma havası sıcaklığının nişastanın morfolojisi, sindirilebilirliği ve teknolojik özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Deneyler, yüksek sıcaklıklarda (100 °C) kurutmanın, mısır nişastasının iç yapısını ve doğal morfolojisini değiştirdiğini ve daha düşük sıcaklıklara (40 °C) kıyasla sindirilebilirliği azalttığını, bu da yapısal ve teknolojik özelliklerde daha az değişikliği teşvik ettiğini göstermiştir [65] Öte yandan, Kaur ve arkadaşlarının deneysel çalışmasında domates ve tatlı biber için daha yüksek

kurutma sıcaklıkları farklı sonuçlar elde etmiştir, 60 °C'de renk tutma domates için daha iyi iken, biber için 40 °C daha iyi olmuştur [66]. Lang ve ark., deneysel çalışmalarında değişen depolama koşulları altında siyah pirinç fenoliklerinin bileşimi üzerinde kurutma sıcaklığı faktörünü araştırmışlardır[67]. Değişen sıcaklığın fenoliklerin bağlanma enerjisini etkilediğini ve daha yüksek sıcaklıklarda serbest fenoliklerde azalma görüldüğünü gözlemlemişlerdir. İlaç bitkilerinin kurutulması ile ilgili araştırmaya göre, yüksek sıcaklıklar nem kaybının artmasına neden olmuş, ancak çok yüksek değerler bitki yüzeylerinde kavrulmaya neden olabileceğinden sıcaklık kararının dikkatli verilmesi gerekmiştir [68]. Literatürde kuru hava sıcaklığının kurutma kinetiği ve büzülme, renk ve şekil değiştirme, kimyasal bileşim ve kurutulmuş malzemelerin kalitesi gibi fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştıran çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, yüksek enerji verimliliği ve düşük işletme maliyetleri ile optimum kurutma parametrelerinin belirlenmesine katkı sunmak amacıyla yapılmıştır.

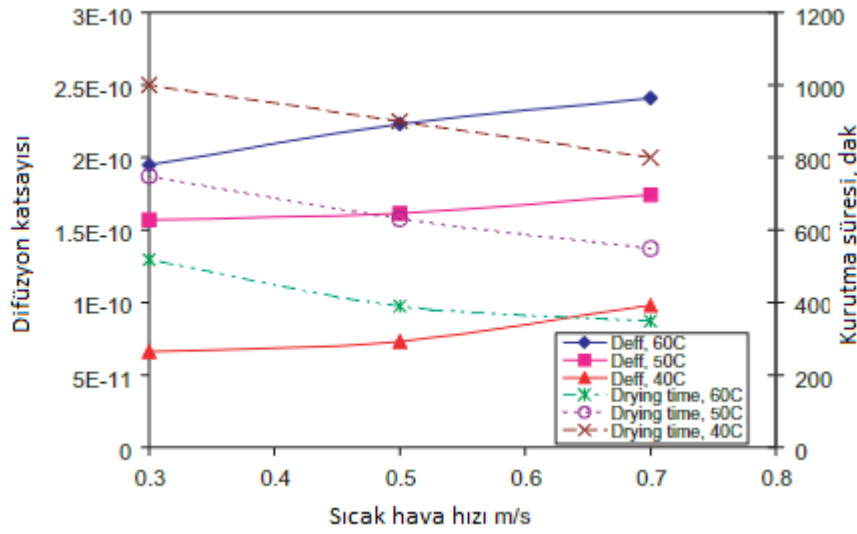
(b) Kurutma havasının bağıl nemi:

Bağıl nem, gerçek buhar yoğunluğunun havadaki doymuş buhar yoğunluğuna yüzdesini tanımlar. Genel olarak sıcaklığa bağlı bir özelliktir, ayrıca malzemenin yüzeyine yakın bağıl nem, malzemenin toplam nem içeriğine bağlıdır [69]. Özellikle kurutma işlemi yapılan üründe büzülme ve deformasyon meydana geldiğinde bağıl nem önemlidir. İlk serbest nemin uzaklaştırılmasından sonra, ürünün iç kısımları ile yüzey arasında yüksek nem gradyanları meydana gelir. Bu, aşırı çekme ürün içinde çok fazla gerginliğe neden olur ve dolayısıyla çatlama ve bükülme meydana gelir. Bu durumu önlemek için, nemin içeriden yüzeye kontrollü ve yavaş hareketi ile yüksek bağıl nemin korunması, makul olmayan buharlaşmayı engeller. Öte yandan, büzülme önemli bir faktör değilse, deneysel araştırmaların çoğu, havadaki bağıl nemin azalmasının kuruma hızlarının artmasına neden olduğu sonucunu vermiştir [68,70–76].

(c) Kurutma havası hızı:

Kurutma havasının kurutma alanına akış hızı ve akış yönü de kurutmayı etkileyen dış etkenlerden biridir. Cismin üzerindeki nemin buharlaşması, büyük ölçüde sıcaklık farkıyla birlikte hava akımının oluşturduğu ısı taşınımı ile

gerçekleşir. Özellikle taşınım ısı transferinin önemli olduğu direkt kurutma yöntemlerinde, kurutma havasının hızı büyük önem taşımaktadır. Yapılan birçok çalışmada, artan hava hızının taşınım miktarını da arttırdığı, buna bağlı olarak da ısı transferiyle birlikte nem transferinin de olumlu etkilendiği ve kurutma hızının arttığı görülmüştür. Khan ve ark. konvektif ve mikrodalga ile kurutmanın bir arada yapıldığı sayısal ve deneysel çalışmada, kurutma havası hızının ısı ve kütle transfer katsayılarının değişimi üzerinde etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir [77]. Kurutma havası hızının sıcaklık ile birlikte kütle yayılım katsayısına etki ettiğinin gösteren bir boyutlu sayısal çalışmada Karim ve Hawlader [78], kurutma havası hızının artmasıyla difüzyon katsayısının arttığını da gözlemlemişlerdir. Şekil 2.5’ de referans çalışmadaki deneysel sonuçlarda kurutma hızının artmasıyla difüzyon katsayısı ve kurutma süresinin değişimini gösteren grafiğe bakıldığında, artan hava hızının cisimden olan difüzyon katsayısını artırdığını, dolayısıyla kurutma süresinin de azaldığını göstermektedir.

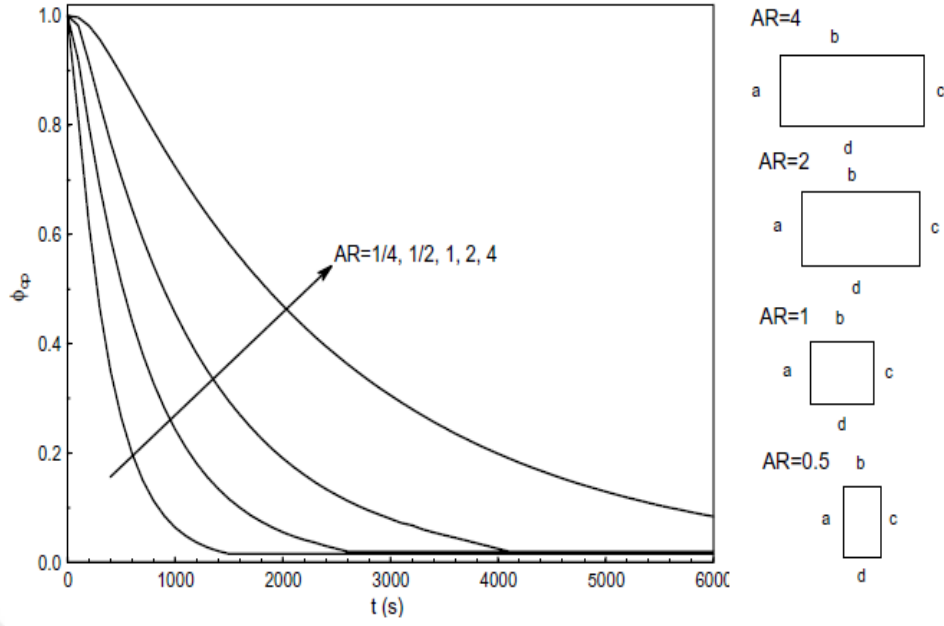


Şekil 2.5 Kurutma havası hızının kütle difüzyon katsayısı ve kurutma süresine etkisi [78]

Kurutma havası hızının kurutma üzerine etkisini inceleyen birçok çalışma göstermiştir ki, hava hızı kurutma oranın, nem miktarını, ısı ve kütle transfer katsayısını etkilemektedir [79–82].

(d) Malzeme şekli, boyutu, kurutma ortamındaki durumu:

Kurutulacak ürünün istenen nihai nem içeriğine ulaşmasında önemli faktörlerden birisi de ürün şekli ve boyutudur. Kurutma yöntemine istenen son ürün cinsine göre bazı ürünler mikron boyutlarında ya da toz halinde kurutulurken, bazı ürünler ise belli geometrik şekillerde (kübik, silindirik, küresel) ve belirli kalınlık ve derinliklere sahip olmaktadır. Belli bir ürünün farklı boyutları için kurutma prosesi ele alındığında, örneğin elmanın kurutulması göz önünde bulundurulacak olursa, küçük boyutlu dilimler büyük dilimlere göre çok daha çabuk kuruyacaktır [83]. Fakat bazı ürünlerde çok küçük boyutlar cisim içerisinde istenmeyen kuruluk miktarlarına ulaşmaya ve sertliğe sebep olduğu için, cismin boyutunun iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Ayrıca kurutma yönteminin de cisimlerin şekil ve boyutu üzerinde etkisi vardır. Örneğin püskürtmeli kurutucularda genellikle toz halindeki ürünler kurutulurken ya da sıvı ürünlerin toz haline getirilmesi sağlanırken [84–87], akışkan yataklı kurutucularda da toz ya da çok küçük taneli parçacıklar kurutulmakta [88–91], tepsili, solar ya da konveyörlü kurutucularda ise belli boyutlara sahip dilimlenmiş ya da kalıp halindeki ürünler kurutulmaktadır [92–96]. Ayrıca ürünün kurutma odasındaki ya da kanaldaki diziliş şekli de kurutmayı etkileyen bir faktördür. Örneğin güneş enerjili bir kurutucuda, çok sıkışık bir şekilde yerleştirilmiş ürün grubu, seyrek ve araları açık şekilde yerleştirilmiş ürün grubuna göre daha uzun sürede kuruyacaktır. Kaya, Aydın ve Dinçer' in sayısal çalışmasında [97], dikdörtgen şeklindeki ürünlerin konvektif kurutulmasında farklı boyut ve en/boy oranlarının kurutmaya etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, en/boy oranının değişimiyle ısı transfer katsayısında 4,33 ile 96,16 W/m²K, kütle transfer katsayısında $9,28 \times 10^{-7}$ ile $1,94 \times 10^{-5}$ m/s arasında değişim gözlenmiştir. Şekil 2.6'da referans makaleden alınan değişen en boy oranlarına göre (AR) nem içeriğinin zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 2.6 Değişen en boy oranlarına göre konvektif kurutmada nem içeriğinin zamanla değişimi [97]

2.3 Kurutma işleminde kullanılan sayısal yöntemler

Fizik yasaları genellikle matematik dilinde ifade edilir. Örneğin, enerjinin korunumu yasası, kütlenin korunumu ve momentumun korunumu gibi korunum yasalarının tümü, kısmi diferansiyel denklemler (KDD' ler) olarak ifade edilebilir. Kurucu ilişkiler, bu yasaları sıcaklık, yoğunluk, hız, elektrik potansiyeli ve diğer bağımlı değişkenler gibi değişkenler cinsinden ifade etmek için de kullanılabilir.

Çeşitli kurutma yöntemlerinin varlığında ve kurutma uygulamalarının karmaşıklığından dolayı bu sistemlerin projeksiyonu, işletimi, optimizasyonu ve kontrolü için matematiksel modelleme gerekli hale gelmiştir. [98] Sayısal yöntemleri kullanmanın sebepleri ve avantajları aşağıdaki gibi açıklanabilir [99]:

- Sistemdeki akış dağılımı, ağırlık kayıpları, ısı ve kütle transferi, parçacık hareketleri ve dağılımı gibi birçok fiziksel olguyu içinde barındıran yapılardır. Bu sayede belli bir kurutma işlemi ya da sisteminde meydana gelen önemli özelliklerin çok daha derin bir şekilde anlaşılmasını sağlar
- Sistem içerisindeki geometrik ve tasarım değişikliklerinin yol açacağı sonuçları daha az zaman ve maliyetle anlamayı ve değerlendirmeyi sağlar.

- Kısa zamanda kurutmadaki türlü olasılıkların cevabı alınabilir.
- Modellerin ölçekten bağımsız olmaları ve temel fizik kurallarını içermeleri boyut büyütme sorunlarını da ortadan kaldırır.
- Yüksek sıcaklık veya tehlikeli ortam koşulları gibi deneysel olarak denenmesi mümkün olmayan ya da zor olan koşulların simülasyonunda yararlıdır.
- Pro aktif bir tasarım sunduğu için sadece sistemdeki problemlerin ortaya çıkarılmasını değil, ana sebebinin de değerlendirilmesini sağlar.

Fiziksel bir problemin matematiksel modellemesi üç yöntemle geliştirilebilir;

- Teorik Modeller: Problemin fiziksel ve matematiksel tanımına göre fizik yasalarını kullanır.
- Ampirik Modeller: İlgili önceki çalışmaların ampirik korelasyonlarını kullanır.
- Hibrit Modeller: Hem fiziksel hem de ampirik yaklaşımları kullanır.

Deneysel verilerle matematiksel modelleme, fizik tabanlı modellere göre daha kolay ve hesaplanabilir, gözenekli nemli malzemelerin kurutma işlemlerinde termodinamik özellikler, gözeneklilik ve geçirgenlik gibi parametrelerin çoğu ampirik denklemlerle hesaplanır. Bu ampirik formülasyonlar genellikle çözümlerde iyi tahminler verir ve hesaplanması kolaydır. Öte yandan, ısı ve kütle taşınımını tanımlayan temel denklemler, kurutma prosesleri için ampirik modellerle tanımlanamaz. Bu yönetsel denklemler fizik tabanlı yaklaşım kullanılarak çözülmelidir. Sayısal kurutma çalışmalarının çoğunda, araştırmacılar temel denklemleri çözmek için fizik tabanlı modeller kullanırlar ve kurutma özelliklerini etkileyen belirli parametreleri tanımlamak için ampirik veya yarı ampirik modeller kullanırlar.

Sayısal modeller tasarım için kolay uygulanabilen, esnek ve çok yönlü bir yardımcı niteliğindedir. Sayısal çalışmalarla; matematiksel model geliştirme, ölçümlerle ve farklı parametrelerle veri toplama, simülasyon oluşturma ve sonuç değerlendirme ögelerini içerir. Analiz edilecek problem verileri; geometri,

yüklemeye, sınır koşulları gibi mevcut sistem parametreleri ve kurucu özelliklerden oluşur. İletkenlik katsayısı, elastisite modülü gibi kurucu özellikler genelde laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilir. Mevcut problemin karmaşıklığına ve lineer olmama durumuna göre elde edilen sonucun analitik çözümdeki gibi kesinliği yoktur. Bu tür çözümler matematiksel modele yaklaşık sonuçlar sunar.

Kurutma işlemleri için matematiksel modeller, fiziksel problemin içeriğine göre değişir. Kurutma modelleri için yaygın olarak kullanılan matematiksel modeller şu şekilde sınıflandırılır;

- Difüzyon modelleri: Bu modeller için difüzyonlu nem taşınması belirleyici faktördür. Efektif difüzyon hızı, kurutma eğrileri kullanılarak ayrı ayrı belirlenir. Difüzyon modeli denklemleri zamana ve mekâna bağlı nem içeriği, büzülme etkisi ve ısı transferini verir.
- Lattice Boltzmann modelleri: Genellikle karmaşık sıvı akışı problemleri çözülür. Dondurarak kurutmadaki gibi nadir görülen akışlar için bu yöntemin kullanılması sayısal çalışmalar için en iyi yoldur.
- Ayırık Eleman modeli: Bir akıştaki katı ve sıvı parçacıkların tek tek izlenmesi yöntemidir, hesaplaması pahalı ve zaman alıcıdır. Sprey kurutma işleminde olduğu gibi dağılmış sıvıların kurutulmasıyla ilgili sayısal çalışmalarda kullanılabilir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), bilgisayarlarda matematiksel modelleme yoluyla ilgili fiziksel problemlerin davranışını tahmin etmek için pratik ve güçlü bir yöntemdir. Karmaşık akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümü çoğu zaman analitik olarak elde edilemez, bu fiziksel problemleri çözmek için kısmi diferansiyel denklemler (KDD' ler) kullanılır. HAD, bir cebirsel denklem sistemi ile KDD' lere yaklaşık bir ayrıklaştırma yöntemi kullanarak esnek bir yaklaşım elde eder ve bunları çoğunlukla sayısal yöntemler kullanarak çözer. Ayrıklaştırma, denklemlerin küçük alanlara uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Bu alanlar uzayda veya zamanda veya her ikisinde de olabilir, bu nedenle çözüm sonuçları uzay veya zamanda ayrı olarak elde edilir. Bir deneysel verinin doğruluğunun kullanılan araçların kalitesine bağlı olduğu gibi, sayısal bir çözümün kesinliği de modellenen ayrıklaştırmanın kalitesine bağlıdır [100].

Akışkan akışı, ısı, kütle transferi ve ilgili olguları tanımlayan kısmi diferansiyel denklemler sayısal algoritmalar ile çözülür ve bunlar HAD kodlarını oluşturur [101]. Kütle, momentum ve enerji denklemleri, genel formuyla aşağıdaki gibi tanımlanır:

Kütle korunumu (Süreklilik): Denklem, bir akışkan alanına giren kütle akışlarının, alanı terk eden kütle akışları arasındaki dengesini tanımlar. Kütle dengesi denklemi olarak da adlandırılır ve aşağıdaki gibi tanımlanır [102]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.18)$$

Yukarıdaki denklem, tüm akışkanlar için olan genel bir denklemdir ve akışkanın sürekli rejimde, viskoz ve sıkıştırılmaz olması gibi özelliklere göre bazı terimler ihmal edilebilir.

Momentumun korunumu: Bu denklem Newton'un ikinci hareket yasasından yola çıkarak bir akışkana etki eden toplam dış kuvvetlerin o akışkandaki momentum değişimine eşit olduğunu şu şekilde açıklar:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.19)$$

Yukarıdaki form genel bir formdur ve sol taraftaki terim, akışkanın hız bileşenlerinin zamana bağlı olarak değişimini ifade eder. Sağdaki terimler ise sırasıyla basınç değişiminden kaynaklı, yerçekiminden kaynaklı ve viskoz kuvvetleri temsil eder.

Enerjinin korunumu: Denklem, enerjinin yaratılamayacağını veya yok edilemeyeceğini belirten termodinamiğin birinci yasasını tanımlar, bu, bir akışkanın iç enerjisinin değişiminin akışkana eklenen ısıya ve sistem üzerinde yapılan işe eşit olduğu anlamına gelir:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p \vec{V}) \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = S_T \quad (2.20)$$

HAD kodları, aşağıdaki faydaları sunan kullanışlı araçlardır [103]:

- 1) Akışkan akışı, ısı ve kütle transferi, ağırlık kayıpları vb. gibi fiziksel olguları ayrıntılı olarak anlamaya yardımcı olurlar.
- 2) Gerçekleştirilmesi mümkün olmayan kapsamlı ölçüm koşullarını simüle etmek için kullanılırlar.
- 3) Problemlerin sadece etkilerini değil, kökenlerini de ortaya koyarlar.
- 4) Karmaşıklığı yüksek birçok fiziksel olayın davranışı hakkında bilgi verirler ve bu yönüyle sayısal deneyler olarak tanımlanabilirler.

HAD kodları, ön işlemci, çözücü ve son işlemci olmak üzere üç temel öge içerir. Şekil 2.7, aşamaları şematik olarak açıklamaktadır. Tüm aşamalar aşağıda kısaca açıklanmıştır [104].

- Ön işlemci (Pre-processor): Bir kurutma probleminin sayısal olarak çözümünden önce gerçekleştirilen tüm işlemler ön işleme adımına dahil edilmektedir. Problem düşünme, HAD kullanmanın ilk aşamasıdır. Pratik yapmaya başlamadan önce, karşılaşılan problemin fiziği hakkında düşünme ve tasarım gerçekleşir. Bu aşamada analist akış problemini dikkate almalı ve mümkün olduğunca anlamaya çalışmalıdır [99]. Daha sonra fiziksel problemin geometrisi (hesaplama alanı) tanımlanır. Bu aşamayı ardından ağ oluşturma (meshing) veya küçük parçalara bölme yoluyla alanın ayrıklaştırılması yapılır yani geometri hacim, hücre ya da eleman olarak adlandırılan çok sayıda küçük parçaya ayrılmış olur. Problemdeki fiziksel yapıların (akış alanı, nemli cisim... vb.) özellikleri tanımlanır. Sonuç olarak, etki alanı sınırına denk gelen hücrelerde sınır koşulları belirlenir. Sonlu bir akış alanı belirlendiğinden, akış alanının sınırlarında fiziksel koşullar belirlenmelidir. Simülasyon genellikle bir ilk çözümden başlar ve bir nihai akış alanı çözümüne ulaşmak için yinelemeli bir yöntem kullanılır.

Ön işleme safhasının uygulanmasında, özetle aşağıdaki adımları takip etmek gerekir [99]:

- Problem analizinin amacını belirleme
- Bu amaçların en kısa ve kolay yoldan uygulama

- Dahil edilecek geometriyi belirleme
- Serbest akış ya da çalışma koşullarını belirleme
- Problem için uygun boyut belirleme (1, 2 ya da 3 boyutlu)
- Problemin kararlı ya da kararsız (zamana bağlı) olup olmadığını belirleme
- Akışın yapısını belirleme (laminer, türbülanslı, viskoz)

Problem geometrisi ağ yapısıyla ayrılmıştır. Ağ oluşturma, yapı ve geometriyi tanımlamayı ve ardından bu geometri üzerinde bir ağ oluşturmayı içerir. Ayrıklaştırma işlemi bir, iki ya da üç boyutlu olma durumuna göre çizgisel, üçgensel, dikdörtgensel, kübik ya da tetragonal, hekzagonal...vb. biçimlerde ağ yapılarının geometri boyunca uygun şekilde örülmesiyle gerçekleştirilir. Yani tüm geometri belli biçimlerdeki eleman, hücre ya da hacimlere ayrılmış olur. Bu hücre ya da elemanların biçim ve boyutları geometri yapısına ve sınır şartlarına bağlı olarak belli bölgelerde değişiklik gösterir, örneğin sınır şartlarına yakın bölgelerde daha sık ve küçük elemanlar gibi. Bunun yapılmasının sebebi, sayısal çözümün doğruluğunu arttırmak ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmektir. Burada unutulmaması gereken bir husus da ağ yapısı ve sıklığının çözücüye zorlayacak, uzun hesaplama süreleri ve yüksek hesaplama performansı gerektirecek kadar sık ve karmaşık şekilde oluşturulmamasına dikkat edilmesidir.

- **Çözücü (Solver):** Problemin çözümü üç adımda yapılır, ilk adımda bilinmeyen akış değişkenleri basit fonksiyonlar aracılığıyla yaklaşık olarak hesaplanır. Önce, problem fiziği tanımlandıktan sonra, akışkan malzeme özellikleri, akış fiziği modeli ve sınır koşulları bir bilgisayar kullanılarak çözülecek şekilde ayarlanır. Çözüm aşaması için genellikle, HAD uygulamalarına uygun ticari yazılımlardan yararlanılır. Daha sonra, yaklaşımlar ikame edilir ve ana denklemlere ve sonraki matematiksel işlemlere ayrılır ve son adımda cebirsel denklemler çözülür.

Bir HAD kodu genellikle, istenen strateji ile oluşturulan girdi parametrelerinin değerlerini listeleyen bir girdi veri dosyasının oluşturulmasını gerektirir. Ayrıca,

genellikle ağ ve sınır koşulu bilgilerini içeren bir ağ dosyası gereklidir. Ağ yapısı ve ilk akış çözümü için dosyaların oluşturulması da gerekir.

Ağ serisini oluşturmak için en kolay yaklaşım, belki de kişinin bir ağ oluşturma toleransının üst sınırına ulaşan veya bu ağdaki hesaplamanın yakınsamasını en iyi şekilde yapan, ince ağ yapısı (fine grid) aralığı olarak kabul edilen bir ağ yapısı oluşturmaktır. Daha sonra, her bir koordinat yönündeki diğer tüm ağ çizgileri kaldırılarak daha kaba ızgaralar elde edilebilir. Bu, daha kaba ağlar ek seviyeleri oluşturmak için devam ettirilebilir. İnce ağ oluştururken, koordinat yönündeki ızgara noktalarının sayısı aşağıdaki bağıntıyı sağlayacak şekilde n adet seviye içeren daha kaba ızgaralar oluşturulabilir:

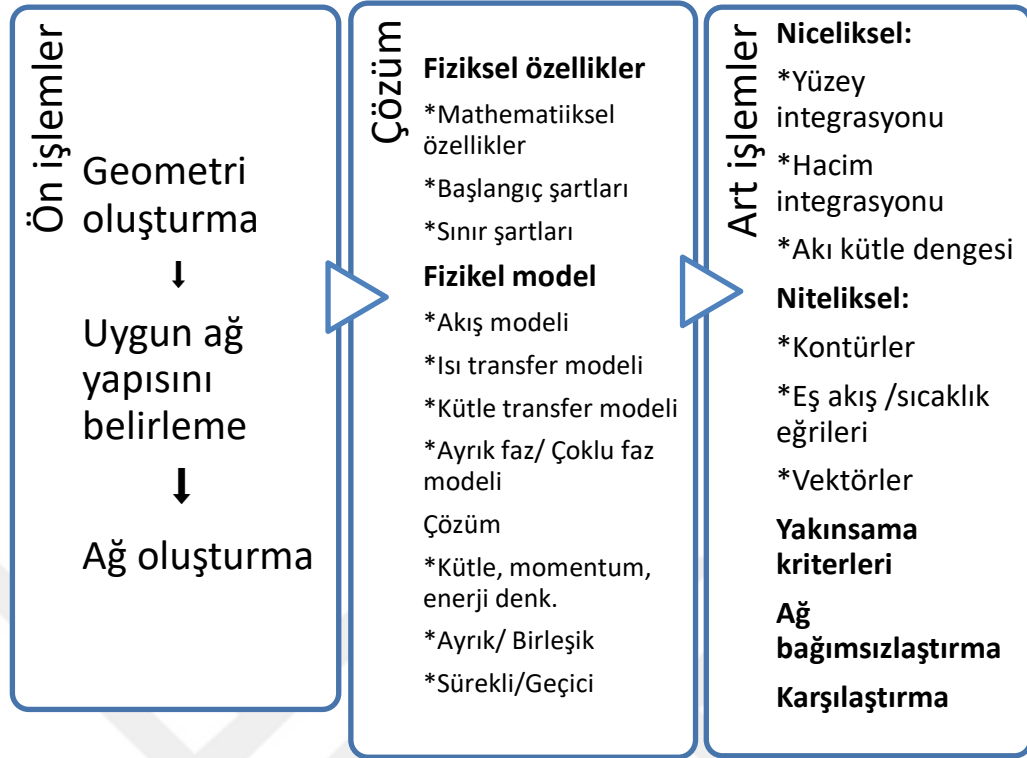
$$N = 2^n m + 1$$

Burada, m bir tam sayıdır. Örneğin, kaba ağlar iki seviyeli olacaksa (yani ince, orta ve kaba ızgaralar), her koordinat yönündeki ızgara noktası sayısı $4m+1$ 'e eşit olmalıdır; m , her koordinat yönü için farklı olabilir [105].

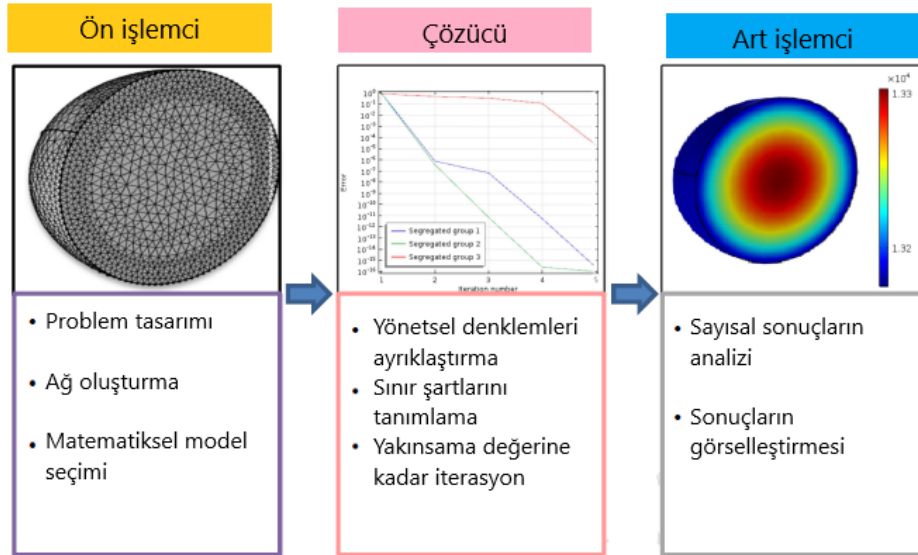
- **Art işlemci (Post processor):** İstenilen akış özelliklerinin çıkarılmasını ve deneysel, analitik çözümler veya diğer sayısal yöntemlerin sonuçları arasında karşılaştırma yapılmasını içeren aşamadır.

Hesaplanan sonuçların hassasiyeti, sonuçların doğruluğundaki ve/veya hesaplama performansındaki olası farklılıkları anlamak için boyut, akış koşulları, başlangıç ve sınır koşulları, ağ yapısı, çözüm stratejisi, bilgisayar kapasitesi dikkate alınmalıdır. Bu parametreler de bir önceki iki aşamada ele alınması gereken unsurlar olduğu için, art işlemlerde doğru ve kesin sonuçlar elde edilmesi iyi ve eksiksiz bir ön işleme ve çözüm stratejisine bağlıdır denilebilir.

Bir HAD uygulamasında genel olarak uygulanan temel aşamalar içerikleriyle birlikte şekil 2.8' de özetlenmiştir.



Şekil 2.7 HAD yönteminin elemanları

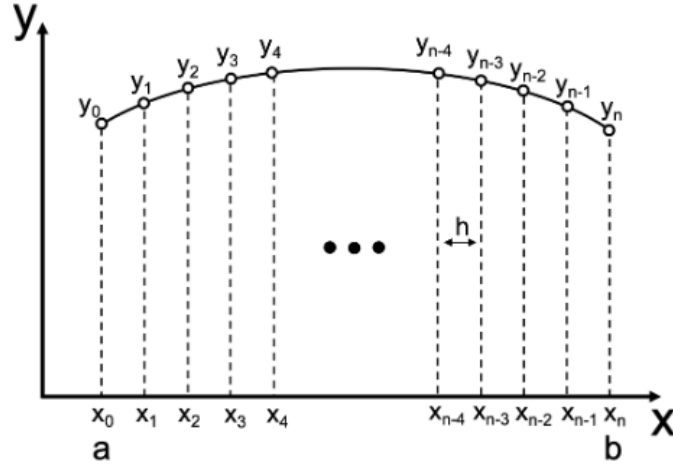


Şekil 2.8 HAD yönteminin aşamaları

Diferansiyel denklemler, bağımsız bir değişkendeki (x, y, z, t) bir değişikliğe göre bağımlı bir değişkendeki küçük bir değişikliği belirleyen ifadeleri içerir. Uzun ve zamana bağlı problemler için fizik yasalarının tanımı genellikle kısmi diferansiyel denklemler (KDD' ler) cinsinden ifade edilir. Bu küçük değişiklik, bağımlı değişkenin bağımsız değişkene göre türevi olarak da adlandırılır. Özellikle HAD uygulamaları, analitik yollarla çözülemeyecek kadar karmaşık fiziksel problemlerdeki KDD' lerin çözümü için farklı ayrıklaştırma metodlarının uygulanarak yaklaşık çözüme ulaşıldığı yapılardır. Bu ayrıklaştırma yöntemleri, sayısal yöntemlerle çözülebilen model denklemleriyle KDD' lere yaklaşır. HAD yöntemi kullanılarak fiziksel bir problem simüle edilirken, matematiksel model oluşturulduktan sonra, çözücü adımıyla problemin çözümü için yaygın olarak kullanılan üç ayrıklaştırma yöntemi vardır. Bunlar; sonlu farklar (FD) sonlu hacim (FV) ve sonlu elemanlar (FE) ayrıklaştırma yöntemleridir ve aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Sonlu farklar yöntemi (Finite difference method): Bu yöntemde, bir koordinat çizgisi boyunca bölünen elemanların düğüm noktaları aracılığıyla problemin bilinmeyen değişkenleri tanımlanarak etki alanı ayrıklaştırılır. Sonlu fark yöntemleri genellikle kararlı, hızlı yakınsama özelliğine sahip, doğru sonuçlar veren ve özellikle bir boyutlu problemlerde kısmi diferansiyel denklemleri çözmesi kolay olan bir yöntemdir. Sonlu farklar uygulanarak, problem alanı ayrıklaştırılır ve denklemin diferansiyel terimleri, sonlu fark denklemi olarak adlandırılan lineer cebirsel bir denkleme dönüştürülür. Ek olarak, bağımlı değişkenler yalnızca ayrık noktalarda dikkate alınır [106]. Çözümün yaklaşıklığı, bir düğümün her türevinin en yakın formülle değiştirilmesiyle yapılır. Taylor serisi açılımları, komşu ağ (grid) noktalarının bilgilerini kullanarak bir düğümdeki (node) bilinmeyen bir değişkeni tanımlamak için kullanılır. Problemin geometrisi düzgün bir ağ oluşturmak için yeterince basitse, sonlu fark ayrıklaştırma yöntemi yararlıdır.

Sonlu farklar yönteminde, diferansiyel denklemdaki türevler, sonlu fark formülleri kullanılarak yaklaştırılır. $[a, b]$ aralığını Şekil 2.9' da gösterildiği gibi h uzunluklu n eşit alt aralığa bölebiliriz [107].



Şekil 2.9 Sonlu fark ayrıklaştırılması[107]

Genellikle, sonlu fark yöntemlerinde daha iyi doğruluk sağlamaları nedeniyle merkezi fark formüllerini kullanılabilir. Diferansiyel denklem sadece ızgara noktalarında uygulanır ve birinci ve ikinci dereceden türevler aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h} \quad (2.21)$$

$$f'(x_j) = \frac{f(x_j) - f(x_{j-1})}{x_j - x_{j-1}} \quad (2.22)$$

Merkezi fark, fonksiyonun x_j 'deki eğimini, $(x_{j+1}, f(x_{j+1}))$ ve $(x_{j-1}, f(x_{j-1}))$ 'i bağlayan doğruyu kullanarak tahmin etmektir:

Bir f fonksiyonunun türevini sonlu fark yöntemiyle yaklaşık olarak elde etmek için, yukarıdaki fonksiyonlar Taylor serisi açılımlarına dönüştürülür [108].

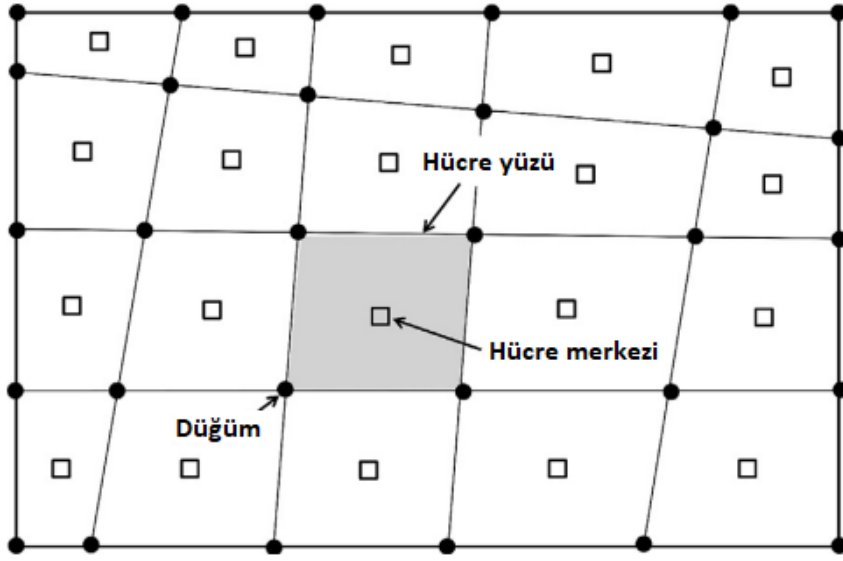
Sonlu Hacimler Yöntemi (Finite Volume Method): Sonlu hacimler metodu (SHM) korunum yasalarını diferansiyel hacimler üzerinden açıklayan KDD'leri, sonlu hacimler ile ifade edilen ayrık cebirsel denklemlere dönüştüren yöntemdir. Özel bir sonlu fark formülasyonu olarak geliştirilmiştir. Analitik akışkan dinamiğinin kontrol hacmi formülasyonuna dayalı olarak, SHM'deki ilk adım, alanı, ilgilenilen değişkenin merkezinde yer aldığı bir dizi kontrol hacmine (diğer adıyla hücreler, elemanlar) bölmektir. Bir sonraki adım, her bir kontrol hacmi

üzerinde ana denklemlerin diferansiyel formunu (kontrol hacmi yaklaşımına çok benzer) entegre etmektir. Daha sonra, ilgili değişkenin hücre merkezleri arasındaki varyasyonunu tanımlamak için enterpolasyon profilleri varsayılır. Ortaya çıkan denklem, ayrıklaştırılmış denklem olarak adlandırılır. Bu şekilde, ayrıklaştırma denklemi, kontrol hacmi içindeki değişken için koruma ilkesini ifade eder. Çözümün doğruluğu, kontrol hacimlerinin şekline, boyutuna ve konumuna, ayrıca sınır koşullarına bağlıdır [109].

Sonlu hacim metodunda, korunum denklemlerindeki terimler yüzey akılarına dönüştürülür ve sonlu hacim yüzeylerinde değerlendirilir. Bunun sebebi, bir hacim içerisine giriş yapan akının ona bitişik hacimden ayrılan akıya eşit olmasıdır. SHM' nun bu koruma özelliği onu HAD uygulamaları için elverişli bir yöntem haline getirmiştir. SHM' nun bir diğer önemli özelliği fiziksel alanda yapılandırılmamış poligonal ağlar üzerinde formüle edilebilmesidir [110].

Yukarıda da açıklandığı gibi, SHM' da hesaplama alanı veya analiz edilecek maddenin toplam hacmi önce bölünür veya bir dizi daha küçük kontrol hacmine ayrıklaştırılır. Bu kontrol hacimlerine hücreler (cells) denir. Hücreleri bağlayan yüzeyler ise yüzler (faces) olarak tanımlanır. Hücrelerin köşeleri ise düğümler (nodes) olarak adlandırılır [111]. Şekil 2.10, bir sonlu hacim ayrıklaştırma modelini şematik olarak göstermektedir. Düğümlerin konumu, siyah noktalarla dairelerle belirtilmiştir, bu düğüm noktaları sonlu fark yönteminde de aynı yerlere denk gelecektir. SHM' da yönetsel denklemlerden başlayarak cebirsel denklemler, bağımlı değişkenlerin her hücre için uzamsal (veya hacimsel) olarak ortalamasının alınmasıyla oluşturulur. Örneğin, hacimsel-ortalama bir değer aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\bar{\phi}_0 = \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \phi dV \quad (2.23)$$



Şekil 2.10 Matematiksel modelin SHM ile ayrıklaştırılması[111]

Burada V_0 hacim değerinin, kontrol hacminde ortalaması hesaplanmış halidir, ϕ_0 ise ϕ bağımlı değişkeninin mevcut kontrol hacmindeki ortalamasıdır. Sonlu hacim denklemin, türetmeye aşağıdaki gibi uzamsal bir boyutlu adi diferansiyel bir denklemlerle başlanırsa;

$$\frac{d}{dx} \left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right] = -S_\phi \quad (2.24)$$

Burada Γ , konuma bağlı bir fonksiyon ve/veya bağımlı değişkendir, yani $\Gamma = \Gamma(x, \phi)$ olarak tanımlanabilir. Γ değeri sabit olursa, denklem 2.24 bir boyutlu Poisson denklemi haline indirgenir. Genelde, bu tür denklemler yayılımı ifade etmek için kullanılır ve o zaman Γ ısı iletkenlik katsayısını, S_ϕ ise birim hacimdeki ısı kaynağını temsil eder. Böylece denklem 2.24, kararlı haldeki iletimle ısı transferi denklemine dönüşür. Fiziksel niceliklerin transfer oranı, örneğin ısı iletimi için birim ısı akısı q aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$q = -\Gamma \frac{d\phi}{dx} \quad (2.25)$$

Şimdi, yönetsel denklemin bir boyutlu sayısal bir model üzerinden SHM ile çözümü Şekil 2.10 üzerinden gerçekleştirilsin. Bu yöntemde, şekilde görüldüğü

gibi O, E, W, N notasyonları kullanılacaktır. Bu notasyonlar, düğümlerden çok hücre merkezleri olarak tanımlanır. Ayrıca, hücrenin yüzleri de e, w, n ve s olarak tanımlanmaktadır. Belli bir kontrol hacmi için sonlu hacim denklemini oluşturmanın ilk adımı, yönetsel denklemini kontrol hacmi ya da hücre içinde analitik olarak integre etmektir. Şekil 2.10' da herhangi bir i hücresi için aşağıdaki denklem oluşturulur [111]

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right] dx = - \int_w^e S_\phi dx \quad (2.26)$$

Burada, hücrenin batı yüzünden (w), doğu yüzüne (e) integrasyonu yapılmıştır. Denklem 2.27' nin basitleştirilmiş şekli:

$$\left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right]_{e,i} - \left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right]_{w,i} = -S_i \Delta x_i \quad (2.27)$$

Burada, alt indis e,i ve w,i ; i hücresinin sırasıyla doğu ve batısını ifade eder. S_i ise S_ϕ 'nin Δx_i boyutlu kontrol hacmindeki ortalamasıdır. Isı iletim denkleminin (denk. 2.26) basitleştirilmiş şekli de aşağıdaki hale dönüşür:

$$q_{e,i} - q_{w,i} = S_i \Delta x_i \quad (2.28)$$

Denklem 2.28, kontrol hacminin iki yüzü arasındaki ısı akılarının farkını ifade eden korunum denklemidir, bu da hücre içerisinde üretilene eşittir. Özünde, yönetsel KDD (Denk. 2.18), daha açık bir biçimde yorumlanmıştır. Bir sonlu hacim formülasyonunun başlangıç noktası, Denklem 2.28' e benzer şekilde bir akı dengeleme eşitliği oluşturmaktır. Daha sonra, denklem aynı ifadeyi veren eşdeğer cebirsel forma dönüştürülür ve çözülür. Ayırıklaştırma yaklaşımları, bu oluşturulan cebirsel denkleme uygulanır. KDD' yi yöneten çözüm, bu değiştirilmiş cebirsel ifadedir ve bu çözüme zayıf form çözümü adı verilir. Denklem 2.28, sistemdeki tüm hücrelere uygulanır ve tümü için ayrı ayrı hesaplanır. $i = 1, 2, 3, \dots, N_c - 1$ hücrelerinin tümü için $q_{e,i} = q_{w,i+1}$ eşitliği sağlanacak şekilde tüm korunum denklemleri toplanırsa, aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$q_{e,N_c} - q_{w,1} = S_1 \Delta x_1 + S_2 \Delta x_2 + \dots + S_{N_c} \Delta x_{N_c} = \int_{x_L}^{x_R} S dx \quad (2.29)$$

Denklem 2.29, Denklem 2.28' in tüm sayısal modele uygulanmış halidir. İlk denklem korunum yasalarını lokal olarak (bir hücre için) ifade ederken, ikinci denklem ise global olarak (tüm model için) açıklar. Basit bir şekilde açıklanan Denklem 2.29, çok boyutlu modellerde de uygulanabilir [111].

Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis):

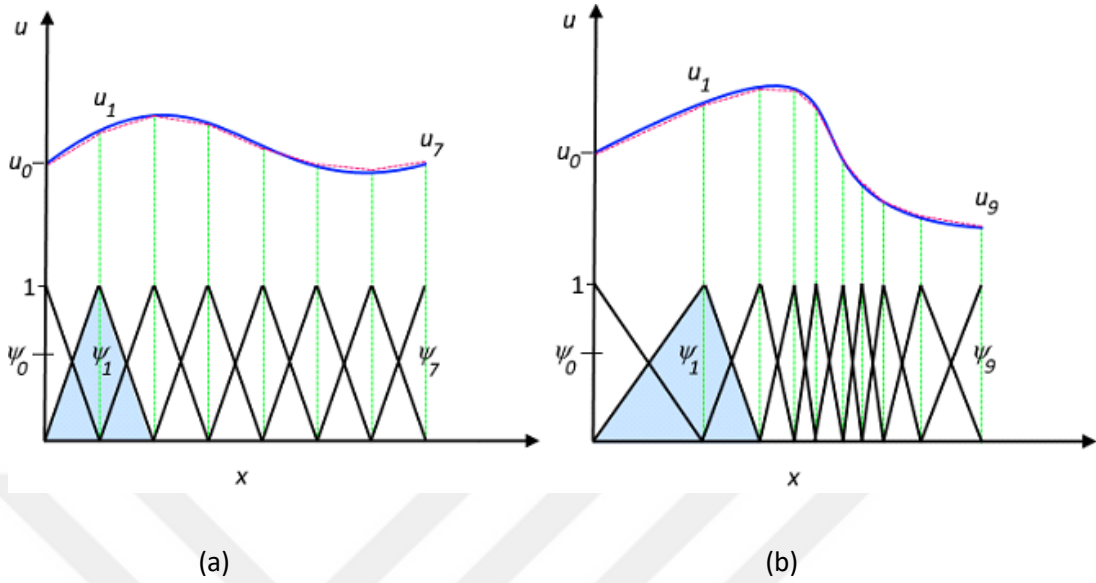
Bu yöntemde, bilinmeyen alan değişkenlerinin yerel varyasyonlarını tanımlamak için basit parçalı fonksiyonları kullanılır. Hesaplama alanı küçük parçalara (sonlu elemanlar) bölünür ve her küçük alanın çözümü, her bir düğümün doğrusal temel fonksiyonlarından yapılır.

Örneğin, bir KDD 'de bağımlı değişken olabilen bir u fonksiyonu alalım (ör: sıcaklık, elektrik potansiyeli, basınç, vb.) ifade:

$$u = u_h, u_h = \sum u_i \psi_i \quad (2.30)$$

Burada, ψ_i , temel fonksiyonları ve u_i , u' ya u_h ile yaklaşan katsayıları ifade eder. Şekil 2.11, bir 1 Boyutlu problem için bu prensibi göstermektedir. Örneğin, eşit olmayan bir şekilde ısıtılan bir çubuğun uzunluğu (x) boyunca sıcaklık değişiminin hesaplanmasını ele alalım. Burada lineer temel fonksiyonların ilgili düğümlerinde 1 ve diğer düğümlerde 0 değeri vardır. Bu durumda, x ekseninin u fonksiyonunun tanımlandığı kısım (yani çubuğun uzunluğu) boyunca yedi eleman vardır. Grafiğe bakılacak olunursa, temel işlevlerin doğrusal bir birleşimi olan u_h (kırmızı kesikli çizgi) ile, düz mavi çizgi ile temsil edilen u' ya yaklaşılr. Katsayılar fonksiyonu ψ_i ise siyah kalın çizgi ile gösterilmiştir. Katsayılar u_0 ile u_7 arasında değişmektedir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanmanın faydalarından biri, hem uzayı ayrıklaştırmak için kullanılabilecek elemanlarda hem de temel fonksiyonlarda ayrıklaştırma seçiminde büyük özgürlük sunmasıdır. Örneğin şekilde, elemanlar x eksenini üzerinde düzgün bir şekilde dağılmıştır, ancak bu böyle olmak zorunda

değildir. Şekil 2.11(b)' de vurgulandığı gibi, u gradyanının büyük olduğu bir bölge için daha küçük elemanlar da uygulanabilirdi [112].



Şekil 2.11 Bir çubuğun x eksenini boyunca sıcaklık değişimi için uygulanan SEA, u gradyanının düzgün dağılım gösterdiği (a), u gradyanının belli bir noktada artış gösterdiği (daha fazla eleman) (b) iki farklı gösterim [112]

Yukarıdaki şekillerin her ikisi de seçilen lineer temel fonksiyonların çok sınırlı destek içerdiğini (sadece dar bir aralıkta sıfırdan farklı) ve x eksenini boyunca örtüşüğünü göstermektedir. Mevcut probleme bağlı olarak, lineer fonksiyonlar yerine başka fonksiyonlar seçilebilir. Lineer fonksiyonlar lineer olmayanlara göre çözümü çok daha basit, kısa süreli ve az maliyetli bilgisayar hesaplamalarıyla çözülebilirler. Fakat ancak, bazı durumlarda lineer varsayımlar, gerçekçi olmayan bir tahminle sonuçlanabilir. Analizin doğrusal veya doğrusal olmayan biçimde olması, analizin amacına ve yanıtındaki hataların sistemi tolere edebilecek düzeyde olmasına bağlıdır. Yüksek hızlı akışlar, katı cisimler etrafında viskoz olmayan akışkanların incelenmesi gibi karmaşık problemlerin çözümü için doğrusal olmayan yaklaşımlar tek seçenek olabilir. Lineer olmama durumu geometriye ya da malzemeye bağlı olmak üzere iki farklı şekilde oluşabilir. Ayrıca her iki tür için lineer olmama durumu da aynı problemde olabilir [106].

Tipik bir sonlu eleman analizi çalışması, analiz edilecek gerçek fiziksel sistem veya bunun bir parçası ile başlar. Ardından, analiz için bir dizi hedef

oluşturulur. Analizin amacı sistemin bir ön tasarımının geliştirilmesine yardımcı olmaksa, basit bir modelleme yeterli olacaktır. Öte yandan, analizin amacı bir sistemin nihai tasarımını doğrulamak ve onaylamaksa, analiz gerçekleştirilebilecek en karmaşık analiz olmalıdır. Böylece hedefler, benimsenecek sistemin idealleştirilmesinin türünü belirleyecektir; örneğin, problem iki boyutlu veya üç boyutlu olarak mı modellenmeli, doğrusal veya doğrusal olmayan bir problem mi olmalı, dikkate alınacak doğrusal olmama durumları ne türde olmalı ne tür kurucu özellik modelleri kullanılmalı, yükler ve sınır şartları nasıl belirlenmeli, varsa hangi birleştirme etkileri dikkate alınmalı... vb. Problem idealleştirme çalışması tamamlandığında matematiksel model de oluşturulmuş olur ve sonraki adım ayrıklaştırma türünün seçilmesi olacaktır. Burada, bilinmeyenlerin seçimi yapılmalıdır ki, bu da sırasıyla sonlu eleman modelinin tipini, eleman tipini, ağ tipini belirler ve doğrusal olmayan analiz yapılacaksa, yük artışlarının büyüklüğü, yinelemeli (iteratif) yöntem çözümünün türü, hata kriteri, hata toleransı ve programın sonlandırılması için izin verilen maksimum iterasyon sayısı seçilir. Hesaplamalı bir model oluşturmanın son adımı, kodun doğrulanması (verification) ve matematiksel modelin onaylanmasıdır (validation). Kod doğrulama (verification), hesaplamalı modelin matematiksel modelin kesin bir ayrık analog biçimi olup olmadığını belirleme sürecidir. Yani, bir bilgisayarda sonlu aritmetik nedeniyle ortaya çıkan yuvarlama hataları ihmal edilebilirse, hesaplama modeli matematiksel modelin kesin çözümünü vermelidir. Bu nedenle doğrulama, kıyaslama problemlerinin bilinen kesin ve/veya deneysel sonuçlarıyla karşılaştırmasıdır. Öte yandan modelin onaylanması (validation), matematiksel modelin (dolayısıyla doğrulanan bilgisayar kodunun), modelin kullanım amacı açısından sistemin fiziksel gerçekliğini temsil etme derecesini belirleme sürecidir. Açıkça anlaşılmaktadır ki, doğrulama alıştırması yalnızca modelin yaygın kullanımlarıyla ilgili olarak tanımlanabilir. Matematiksel modelin onaylanması, modeldeki eksik parametrelerin belirlenerek modeli bunları da içerecek şekilde modifiye etmek ve böylece fiziksel problem için kesin çözüme yaklaşmak amacıyla yapılmaktadır. Onaylama işlemi, özellikle çoklu fizik problemlerinde uygulanması gerekli bir çalışmadır.

SEM' nun tarihine bakıldığında, yöntemin kullanışlılığı ilk olarak 1940'ların başında Alman-Amerikalı bir matematikçi olan Richard Courant tarafından fark edilmiştir. Courant, sınırlı bir dizi probleme uygulandığını kabul etse de yaklaşımın genel olarak yapısal mekaniğin dışındaki alanlarda uygulanması ve bugünkü haline gelmesi birkaç on yıl almıştır.

Sonlu elemanlar analizinin uygulama aşamalarını kısaca özetlemek gerekirse, aşağıdaki adımlardan bahsedebiliriz:

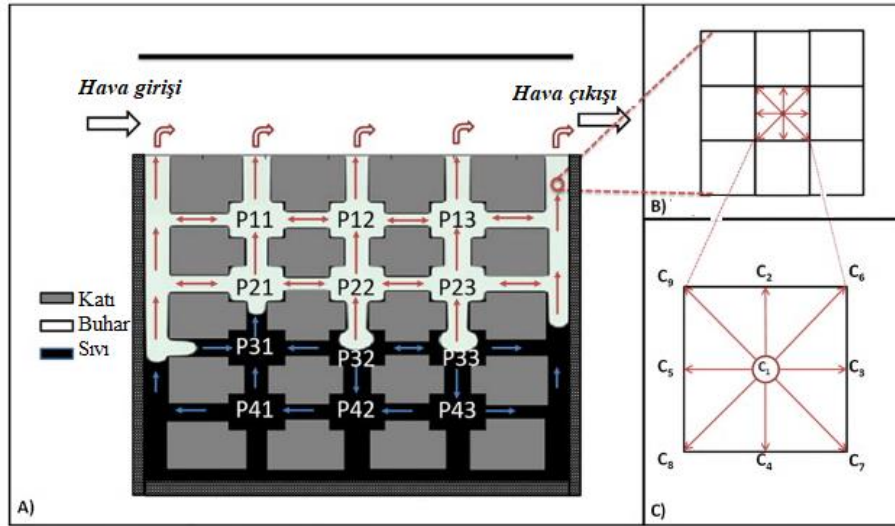
1. Modelin bütününe parçalara (sonlu elemanlara) bölme
2. Her temsili eleman üzerinde ikincil ve birincil değişkenler arasındaki ilişkileri geliştirme, örneğin kuvvet ve yer değiştirme ya da ısı ve sıcaklık değişkenleri
3. Tüm elemanları (elemanlar arasındaki ilişkileri) bir araya getirme, böylece tüm sistemin birincil ve ikincil değişkenleri arasındaki ilişkiyi elde etme

Sonlu eleman analizi birinci, ikinci ve üçüncü dereceden diferansiyel denklemlerin çözülmesinde sıkça uygulanan bir yöntemdir. Mevcut tez çalışmasında çözüme ulaşmak amacıyla iki ve üç boyutlu problemler için sonlu elemanlar analizi ile çözümler elde edilmiş olup, analizin aşamaları, ne tür iterasyon çeşitleri ve yakınsama türleri uygulandığı ile ilgili açıklama metotlar bölümünde açıklanacaktır.

Yukarıda açıklanan yöntemler sayısal modellemede sıklıkla kullanılan analiz yöntemleri olmasının yanı sıra, HAD uygulamalarında özellikle son yıllarda ortaya çıkan farklı yöntemler de bulunmaktadır. Aşağıda, özellikle ısı ve kütle transferinin ele alındığı tek fazlı veya çok fazlı sistemlerin sayısal modellemesinde kullanılan diğer başlıca yöntemler de kısaca açıklanmıştır.

Lattice Boltzmann Yöntemi (LB): Orta ve küçük ölçekli modellerde uygulamaya elverişli geleneksel metotlardan farklı bir yöntemdir. Katı maddeler ve sıvılar, Lattice Boltzmann yönteminde yarı parçacık olarak temsil edilir. Bu parçacıklar, bir çarpışma ile etkileşim halindeyken temel korunum yasalarını (kütle, momentum, enerji) sürdürürler. Çarpışmanın kuralları ayrıklaştırılmış LB denklemini oluşturur. Momentum, uzay ve zamanın ayrıklaştırılması LB yöntemini diğer yöntemlerden

farklılaştırır. LB yöntemi, Boltzmann denkleminin özel bir ayrıklaştırılmış ya da minimize edilmiş biçimi olarak görülebilir. Burada, makroskobik ölçekte hidrodinamik davranışı korumak için mikroskobik kinetik prensipler korunur [113]. Şekil 2.12, konvektif kurutmaya maruz kalan doymuş bir gözenekli ortamda LB metodunun şematik gösterimini vermektedir. Boşlukların dikdörtgensel biçimde olduğu bir simülasyonda, şekil 2.12 (a)' da temsili LB modelinde sıvı-gaz ara yüzü görülmektedir. Hava akışı cismin üst yüzeyine paralel oluşmakta ve buharlaşma bu bölgeden olmaktadır. Şekil 2.12 (b)' de ise belli bir taslağa uygun oluşturulan her bir lattice (kafers) düğümü görülmektedir. Grafikte faz dağılımları siyah, gri ve beyaz renklerin sırasıyla sıvı, katı ve gaz fazını temsil edecek şekilde renklendirilmiştir [114].

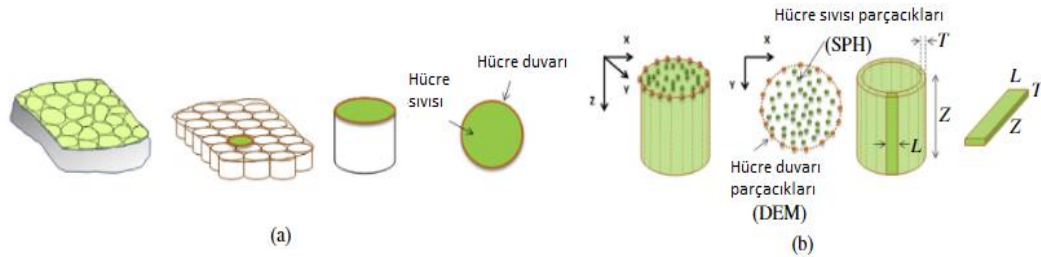


Şekil 2.12 Gözenekli ortamda LB metodunun temsili gösterimi [114]

Moleküler Dinamik Metodu: Bu yöntemde, moleküllerin momentumu Newton' un hareket yasası denkleminde göre hesaplanır. Van der Waals ve kovalent bağlar ve elektrostatik etkileşim potansiyel bir alan oluşturur. Bu potansiyel alan moleküller arası kuvvetleri hesaplamak için kullanılır [115]. Bu potansiyellerin değerlendirilmesi, moleküler dinamik simülasyonunun hesaplama açısından en yoğun adımıdır. Moleküler dinamik metodu bir çeşit ayrık eleman yöntemi olarak düşünülebilir.

SPH ve DEM Metotları: Yukarıdaki yöntemlerin yanı sıra, ağ oluşturulması yapılmadan çözüme ulaşmayı hedefleyen yöntemler de vardır. Ağsız parçacık

yöntemlerinde anahtar fikir, malzemenin kütleli olarak madde noktalarına ayrıştırılmasıdır. Bazı araştırmacılar kurutulacak maddenin mikro mekaniğini simüle etmek için parçacık tabanlı sayısal model üzerinde çalışmaktadır [116,117]. Bir kısım araştırmacıysa, toplu doku mekaniğini hücrelerin mikro mekaniği ile ilişkilendirmekle ilgilenir. Bu sebeple, her bir hücrenin mekaniğini ve bunların dış etkilere olan tepkisini incelemek için ağdan bağımsız parçacık metotları geliştirilmiştir. Bununla beraber, bir dokunun mekanik davranışının modellenmesi ile ilgili önemli endişeler vardır. Şekil 2.13' te bir bitki dokusunun iki boyutlu şematik gösterimi ve hücrenin farklı bölgelerinin SPH ve DEM yöntemi ile tanımlanması gösterilmiştir. Bu model, hücre sıvısını ve hücre duvarını, hücrenin iki ana unsuru olarak kabul eder. Hücre sıvısını modellemek için Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (Smoothed Particle Hydrodynamics/SPH) yöntemi geliştirilmiştir. Hücre duvarını modellemek için ise, Ayrık Parçacık Yöntemi (Discrete Particle Method/DEM) geliştirilmiştir. Burada araştırmacı, hücrenin mekanik yüke nasıl bir tepki gösterdiği üzerine çalışır. Hücresel düzeydeki küçülmeyi nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak tahmin edebilen iki boyutlu tek hücre modeli geliştirilmiştir. Araştırmacılar, modelin ağdan bağımsız serbest doğasının ona büyük deformasyonları ve çok fazlı (multiphase) etkileşimleri, ayrıca çok ölçekli modellemede ana endişe olan hücre altı ayrıntıları da işleme yeteneği verir [83].



Şekil 2.13 Bir bitki dokusunun 2 boyutlu şematik gösterimi(a), SPH ile hücre sıvısının, Dem ile hücre duvarının tanımlanması [116]

HAD yazılımları, güçlü bilgisayarların gelişmesiyle 1990'lı yıllardan itibaren gıda ve içecek endüstrisi ile ilgili kurutma, pişirme, soğutma, kızartma, karıştırma ve sterilizasyon gibi işlemlerde kullanılmaktadır. Kurutma uygulamaları sadece gıda maddeleri için değil, tarım, ilaç, ağaç ve kâğıt ürünleri için de farklı kurutma

yöntemlerine konu olmaktadır. Bir kurutma işlemi için hava akışı ve hızı gibi kurutma havası özelliklerinin optimizasyonu, kurutma sistemlerinin çeşitli yerlerine yerleştirilecek birkaç sensörün ihtiyaçları nedeniyle deneysel olarak gerçekleştirilmek için çok zaman alıcı ve maliyetli olabilir [99]. HAD uygulamaları, kurutulacak malzemenin fiziksel özelliklerini belirterek belirli bir ürün için uygun kurutma yönteminin seçilmesi için uygundur. Bu bölümde literatürde farklı kurutma yöntemleri için kullanılan HAD uygulamaları sınıflandırılmış ve açıklanmıştır. En yaygın olarak kullanılan HAD yazılımları aşağıda listelenmiştir:

- ANSYS CFX / Ticari, <http://www.software.aeat.com/cfx/>
- FLUENT / Ticari, <http://www.fluent.com/>
- PHOENICS / Ticari, <http://www.cham.co.uk/>
- STAR_CD / Ticari, <http://www.cd.co.uk>
- COMSOL / Ticari, <http://www.comsol.com>
- OpenFOAM/ Açık kaynak, <http://OpenFOAM.org>
- Flow 3D / Ticari, <http://www.flow3d.com>

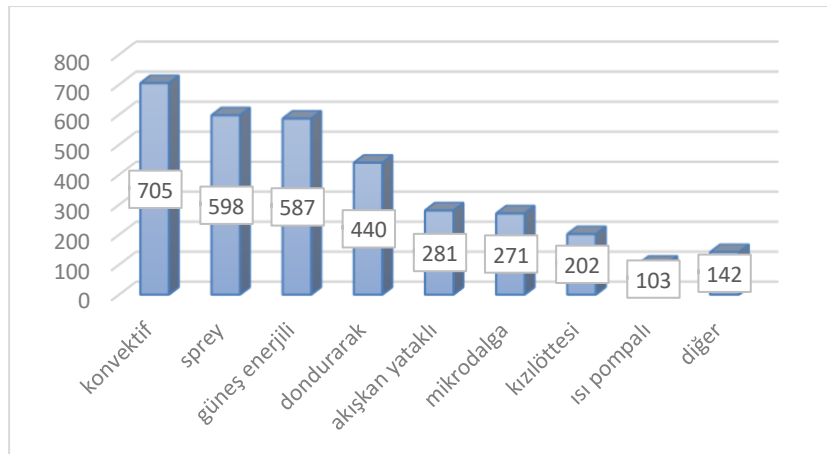
Listelenen yazılımlar, HAD problemlerini çözmek için kullanılan yaygın araçlardır. İlgili fiziksel sistem için ele alınan yönetici denklemler, farklı ayırıklaştırma yöntemleri kullanılarak yapılandırılmış veya yapılandırılmamış ağların oluşturulmasıyla, kararlı veya kararsız koşullarda 1 boyutlu, 2 boyutlu veya 3 boyutlu geometriler için çözülür.

3 LİTERATÜR TARAMASI

3.1 Çeşitli Kurutma Sistemlerinde HAD Uygulamaları

Kurutma, birçok ürünün temel üretim aşamalarından biridir. Hemen hemen her endüstride kurutulması gereken nemli ürünler bulunmaktadır. Bunların başlıca örnekleri, gıda ürünleri, polimerler, ahşap, seramik ürünler, toz halindeki ürünlerdir. Kurutma işlemi, endüstrinin birçok alanında üretim maliyetlerin büyük bir yüzdesini oluşturur. Kurutma işlemleri yüzyıllardır bilinmekte ve kullanılmakta olmakla beraber, sanayi makinelerinin gelişmesiyle beraber, kurutulacak ürüne göre farklı kurutma sistemleri ortaya çıkmıştır.

Kurutma işleminin endüstrinin birçok alanında üretim maliyetlerinin büyük bir yüzdesini kapladığı düşünülürse, bu maliyetleri azaltmak adına çok çeşitli kurutma sistemleri için sayısal çalışmalar elverişlidir. Yeni teknolojiye sahip ve hibrit kurutma sistemleri de dahil, pek çok kurutma sisteminin sayısal analizi literatürde geniş bir şekilde yer almaktadır. Kurutmayla ilgili yapılan sayısal çalışmaların farklı kurutma yöntemlerine göre dağılımı Şekil 3.1’ de verilmiştir. Elde edilen veriler, Scopus veri tabanı içerisinde belli kurutma yöntemleri ile birlikte (konvektif, solar, dondurarak, mikrodalga...) sayısal (numerical) veya hesaplamalı (computational) veya HAD (CFD) kelimelerini içeren literatürdeki yayınların taranması ile elde edilmiştir.



Şekil 3.1 Scopus veri tabanında sayısal kurutma çalışmalarında farklı kurutma yöntemlerinin dağılımı (2010 -2022)

Şekilde de görüldüğü gibi, pratikte yaygın olarak kullanılan kurutma sistemleri, literatürdeki sayısal çalışmalarda da yaygın bir şekilde yer almıştır. Bu bölümde de yaygın olarak kullanılan bazı kurutma sistemleri ile ilgili literatürde yer alan sayısal çalışmalara yer verilecektir.

3.1.1 Sprey kurutucularda HAD çalışmaları

Püskürterek kurutma, sıvı süspansiyonların veya çözeltilerin toz formlara dehidrasyon yöntemi olarak tanımlanabilir. Sistemin kurutucu kısmı, prosesin ürün kalitesini etkileyen en önemli aşaması olarak kabul edildiğinden, işleme hattının sonuna gelir. Püskürtmeli kurutucular, verimli bir şekilde yüksek miktarlarda kurutmaya izin veren hızlı sistemlerdir, ancak genellikle çalışması ve kontrolü için özel çaba gerektiren hacimli sistemlerdir. Bu büyük ölçekli kurutucular için hava akışı, sıcaklık, parçacık boyutu ve yörünge ölçümleri zor olabilir, bu nedenle pahalı ve kapsamlı deneysel denemelerden kaçınmak için HAD simülasyonları sıklıkla kullanılır [118]. HAD simülasyonları yaygın olarak, sıcak hava akışının Euler yaklaşımıyla sürekli yapıda simüle edildiği, kurutma odasına enjekte edilen parçacıkların (damlacıkların) ise Lagrange yöntemi ile ayrı ayrı takip edilerek simüle edildiği Eulerian-Lagrange modelleri kullanılarak oluşturulur. Literatürde Eulerian-Lagrange çerçevesi kullanılarak gerçekleştirilen, partikül yörüngelerini tahmin etmeye, partikül ve gaz kalış süresi ve kurutucu duvarlarındaki birikimleri modelleyen birçok çalışma vardır [119–122]. Partikül yörüngelerinin simülasyonları, partikül kalma sürelerini ve kuruma hızı üzerinde etkili olan duvar birikimlerini tahmin etmek için esastır. Parçacık izlemeli modellemenin 2 boyutlu simülasyonu Şekil 3.2' de gösterilmektedir. Literatürde ayrıca Eulerian-Eulerian yaklaşımı ile yapılan ve iki yöntemin karşılaştırılmasının yapıldığı pek çok çalışma bulunmaktadır [123,124]. Mezhericher ve ark. [125] kararlı ve kararsız koşullar için sprej kurutma odasında 2 Boyutlu eksenel simetrik ve 3 boyutlu damlacık kurutma modelleri geliştirmişler, akış profili, ürün kalitesi, kurutucu boyutu ve diğer kurutma özelliklerini incelemişlerdir. 2B model, sürdürülebilir doğruluk ve doğrulama ile sürecin tahmini için iyi bir kaynak olmasına rağmen, 2B modelde asimetrik akış kalıpları 3B simülasyon kalıpları ile karşılaştırıldığında 3B çalışmada

doğruluk oranını yüksek olduğu görülmüştür. Oakley ve Bahu, Flow3D HAD kodunu kullanarak akış modeli, parçacık sıcaklığı ve nem gradyanlarını simüle etmek için ayrık damlacık kurutma modeli oluşturmuşlardır [126]. Çalışmaya göre, dönen akışın $k-\epsilon$ türbülanslı modelinden oldukça doğru tahminler alırken, sprey/gaz karıştırma modellerinin sürtünme katsayısı, ısı transferi ve kütle transfer katsayıları için ampirik korelasyonların doğrulama ve kalibrasyon için yeterli olması gerektiği sonucuna vardılar. Püskürtmeli kurutmanın kararlı durum ve geçici HAD modellerinin temel ilkeleri, parçacık izleme (particle-tracking) metodu kullanılarak tanımlanır. Kararlı durumlarda her parçacık enjeksiyondan itibaren akış alanı içerisinde kurutma odasının çıkışına kadar izlenir. Zamana bağlı modellerde, her zaman adımında püskürtme gerçekleşir ve zaman adımı bitene kadar akış alanı boyunca parçacıklar hareket ederler. Bir diğer termal kurutma yöntemi olan akışkan yataklı kurutma da HAD uygulamalarında sıklıkla simüle edilen sistemlerdir. Akışkanlaştırma, akışkanlar gibi davranabilen ıslak malzemeleri kurutmak için yaygın ve geleneksel bir yöntemdir [127]. Literatürde yer alan birçok çalışmada, sprey kurutma işleminde ısı verimliliği artırmak ya da toplam maliyeti düşürmek için kurutucu yatağın hidrodinamiği simüle edilmiştir. Bu faktörlerin yanı sıra, özellikle gıda ürünlerinin kalitesi de ele alınması gereken önemli bir faktördür. Bu varsayıma dayanarak Schmitz-Schug, Kulozik ve Foerst [128], sprey kurutma koşullarının, süt ürünlerinde önemli bir besin maddesi olan lizinin kaybı üzerindeki etkisini incelemiştir. HAD uygulaması Star-CCM kullanılarak Reaksiyon Mühendislik Yaklaşımı (REA) ile modelleme yapılmıştır. Modelde lizin kaybının kinetiğini temsil etmek için sıcaklık, nem ve ürün içerisindeki laktozun fiziksel durumu hesaba katılmıştır. Araştırmacılar, yapılan çalışmanın sprey kurutucularda süt ürünlerinin kurutulması işleminin optimize edilmesi için uygun bir yaklaşım geliştirdiği fikrini öne sürmüşlerdir.

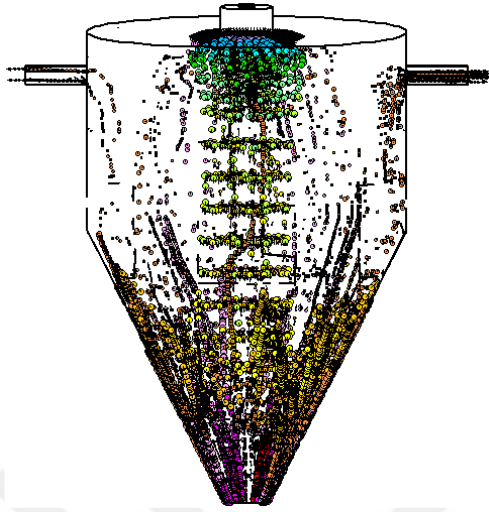
Sprey kurutucularda HAD uygulamalarıyla ilgili literatürde birçok derleme makale de yer almaktadır [129–132]. Özellikle sprey kurutmanın avantajlarının öne çıkaran HAD çalışmalarının derlendiği bir çalışma Mujumdar ve ark.[133] tarafından gerçekleştirilmiştir. Abdullah ve ark. [134]., endüstride de sıklıkla kullanılan ters akışlı kuleleri içeren HAD çalışmalarına yer verilen bir sprey kurutma derleme çalışması ortaya koymuşlardır. Bu gibi çalışmalar da bu alana ilgi

duyan araştırmacılar için iyi birer kaynak niteliğindedir. Tablo 3.1' de literatürde sprey kurutmayla ilgili sayısal çalışmaların bir özeti yer almaktadır.

3.1.2 Akışkan yataklı kurutucularda HAD çalışmaları

Akışkan yataklı kurutma proseslerinde, katı partiküller ve sıcak gaz (hava) yüksek temasla karıştırıldığı için ısı ve kütle transfer katsayıları yüksektir. Bu tür kurutucular ile ilgili yapılan sayısal çalışmalar, verimli bir kurutma işlemi için ve kurutucuların tasarımını optimize etmek amacıyla uygulanır ve sonuçların iyi tahminler içerdiği gözlenmiştir. Standart bir akışkan yataklı kurutucu için şematik bir açıklama Şekil 3.3' te gösterilmektedir [135]. Yatak boyunca sıcak gazlara maruz kalan parçacıklar kurumuş olarak yatağı terk eder. Akışkanlaştırma işlemi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır ve bunlardan biri 1960'lı yıllardan beri kullanılan akışkan yataklı kurutuculardır (AYK). Bu nedenle AYK çalışmaları literatürde geniş bir yer tutmaktadır. Akışkanlaştırma için sayısal modeller, HAD tabanlı modeller ve deterministik modellerdir [127]. Deterministik modeller ilk olarak Davidson ve ark. [136] ve Konni ve ark. [137] tarafından önerilmiştir, genellikle katı parçacıklar içermeyen bir sıvının kabarcık fazı, sıvı ve parçacık karışımlarının emülsiyon fazı (yoğun faz) olarak tanımlanır. Genel olarak, tıkaç akışı her iki fazda da görülür [138]. HAD modelleri temel olarak iki akışkan (Eulerian-Eulerian) ve parçacık yörüngesi (Eulerian-Lagrange) çerçevelerine dayanmaktadır. İki HAD modelinin bir kombinasyonu olarak kullanılan başka bir formülasyon, ayrık parçacık modellemedir (DEM). Bu modelde, sıvı faz denklemleri için ortalama formülasyonlar kullanılırken, süspansiyondaki katı parçacık hareketleri için Newton denklemleri ayrı ayrı çözülür. Bu üç formülasyon, çok ölçekli bir modelleme prosedürü oluşturur [139]. Tüm bu işlemler arasında en çok tercih edilen yöntem, AYK sistemleri için iki akışkanlı HAD tabanlı modellerdir. Hajidavaloo ve Hamdullahpur [140] büyük partiküllerin kurutulması için üç fazlı bir model kullanmışlardır. Fazlar, kabarcık fazı, ara gaz fazı ve katı faz olarak tanımlanmıştır. Ana korunum denklemlerinin çözümü için sonlu fark yöntemi kullanılmış ve küresel yapıda bir ağ oluşturulmuştur. Kuruma oranları, çıkış havasının nemi ve malzeme nem içeriği için sonuçlarda iyi bir doğrulama elde edilmiş ve akış alanında uniform sıcaklık gradyanları görülmüştür. Tablo 3.2,

akışkan yataklı kurutmayla ilgili literatürde yer alan sayısal çalışmaların bir özetini vermektedir.



Şekil 3.2 Püskürtmeli kurutucu odasının parçacık izleme simülasyonu[121]

Tablo 3.1 Sprey kurutucular için literatürde yer alan HAD çalışmaları

Çalışmanın amacı	Metot	Sonuçlar	Referans/ Basım yılı
Farklı türbülans modelleri ile sprej kurutmanın HAD modellemesi	*2 Boyutlu *Dönüşsüz standart k-ε/ *Reynolds gerilmesi/dönüşlü *FLOW3D (SHM)	*Dönüşsüz akıştaki doğruluk dönüşlü akışa göre daha yüksek	Oakley ve Bahu, 1991 [126]
Uzun tip sprej kurutucuda parçacık izlemeli HAD modellemesi	*3 Boyutlu *standart k-ε *CFX *SHM	* 45° ve 60°'lik iki farklı püskürtme açısı için parçacık izlemeli simülasyonda deneysel çalışma ile iyi bir uyum	Zbicinski, 1995 [141]

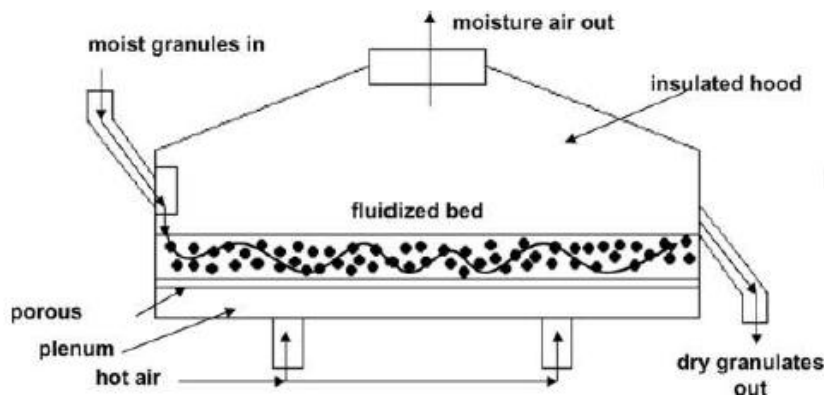
		gözlendi	
Pilot boyuttaki bir kurutucuda giriş havası dağılımının akış kalıplarına etkisi	*2 Boyutlu *standart k-ε *SHM (CFX)	*Giriş havası türbülansının artması buharlaşmanın artışına yol açmıştır	Southwell ve ark., 1999 [142]
Uzun tip sprej kurutucuda iki fazlı modelleme	*2 Boyutlu *standart k-ε *SEM *CFX	*Son parçacık nem oranında deneysel sonuçlarla benzer sonuçlar gözlendi	Harvie ve ark., 2002 [143]
Dört farklı püskürtme odası geometrisi kullanılarak sıvı bulamacın püskürtülerek kurutulmasının HAD simülasyonu.	*2B-aksiyal simetrik *standart k-ε *Fluent *SHM	*Farklı geometrilerde farklı parçacık izleme ve kalış zamanları gözlendi *En uygulanabilir geometri, besleme ve atomizer özelliklerine bağlı	Huang ve ark., 2003 [120]
Püskürtmeli kurutma odasında damlacık hareketlerinin ve damlacıklar arasındaki ısı ve kütle transferinin analizi	*1 Boyutlu *standart k-ε *STAR-CD *SHM	* Çalışma koşulları ve partikül kalitesi optimum hava debisini belirler *Minimum hava debisi, minimum maliyet sağlar	Lo, 2005 [132]
Döner atomizerli bir sprej kurutucunun üç boyutlu	*3 Boyutlu *RNG k-ε *Fluent	* Basınçlı meme atomizerine kıyasla bir atomizer takıldığında daha fazla oda hacmi	Huang ve ark., 2005 [144]

simülasyonu	*SHM	etkili bir şekilde kullanıldı.	
İki tip spreyci kurutucunun kurutulması sırasında partikül geçmişi	*3 Boyutlu *standart k-ε *Fluent *SHM	*Deneysel sonuçlarla iyi uyum *Silindirik duvarda partikül birikim oranlarında azalma görüldü * Atomizerin daha geniş püskürtme açıları, ısı ve kütle transferinde artışa neden oldu	Kuriakose ve ark., 2010 [131]

3.1.3 Güneş enerjili kurutucularda HAD çalışmaları

Güneş enerjisiyle kurutma sistemleri şüphesiz en eski kurutma yöntemidir. Güneş enerjisinin doğrudan ısı kaynağı olarak kullanılabileceği veya konvektif kurutma sistemleri için yardımcı faktör olarak kullanılabileceği enerji tasarrufu sağlayan kurutma sistemleridir. Güneş enerjisi kurutucuları, aktif ve pasif güneş kurutucuları olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Pasif güneş enerjisi kurutucuları doğal hava sirkülasyonu olan geleneksel sistemler iken aktif kurutucular genellikle cebri hava sirkülasyonu olan hibrit sistemlerdir [139]. Bir diğer sınıflandırma da direkt ve indirekt sistemler olmak üzere iki tip için yapılmıştır. Direkt sistemler, ürünün doğrudan güneş ışığına maruz kaldığı geleneksel sistemlerdir. Kabinli güneş kurutucuları ve sera kurutma sistemleri, direkt güneş kurutucularının bazı popüler örnekleridir. Dolaylı (indirekt) sistemler, güneş enerjisi kolektörleri vasıtasıyla konvektif kurutma havasını ısıtmak için güneş enerjisini kullanır. Kurutucu odası, kolektörler, ısıtıcı, sirkülasyon fanı ve ürün kurutma odasından oluşur. İki tip kurutucunun bileşimi olan hibrit tip solar kurutma sistemleri de son yıllarda yaygınlaşmıştır. Temel güneş enerjili kurutucu tipleri şematik olarak Şekil 3.4' te modellenmiştir. Güneş enerjisiyle kurutma işlemleri için sayısal çalışmalar, genellikle problemlerin belirtilen koşulları nedeniyle değiştirilmiş korunum denklemlerine dayanmaktadır. Çekirdeksiz üzümlerin dolaylı bir güneş modelinde

kurutulması Bennamoun ve Belhamri [145] tarafından geliştirilmiştir. Kütle taşınımı için difüzyon bazlı bir yöntem kullanılmış ve kurutma odası için konvektif, iletimle ve ışınlama ısı transferi düşünülmüştür. Parabolik kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için sonlu farklar ayrıklaştırması geliştirilmiş, büzülme etkisi ihmal edilmiştir. Sonuçlara göre hava sıcaklığı kademeli olarak artmıştır ki bu da ürünün kurummasının belirli bir aralık veya sürede gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Ayrıca ortam hava hızının kollektör çıkışındaki hava sıcaklığı üzerinde etkisi olmuştur. Darcy-Brinkmann-Forchheimer modeli, Hassine ve ark. [146] 'in çalışmasında bir sera kurutucusunda kanalizasyon çamurunun güneş enerjisiyle kurutma işlemi için 2 Boyutlu laminar zorlanmış konveksiyon denklemlerini çözmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, radyasyon yoğunluğu (güneş ışığı yoğunluğu) arttıkça ürün yüzeyindeki sıcaklık, kütle oranı ve buharlaşma hızının arttığını göstermiştir. Sera girişinde ısı ve kütle transferinin en yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Kuan ve ark. [147], karasal iklimler için ısı pompası destekli güneş enerjili kurutucunun sayısal bir simülasyonu modellemişlerdir. Çalışmada, ortam basıncının sabit olduğu ve havanın hızının $0,4 \text{ ms}^{-1}$ 'de sabit olduğu varsayılmıştır. Güneş hava kollektörünün radyasyonunun da sabit olduğu varsayılmıştır. Yönetim denklemleri dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak çözülmüş ve problem algoritması C++ dili ile geliştirilmiştir. Sonuçlar, ısı pompası destekli güneş enerjili kurutucuda kurutma hızının sadece güneş enerjisiyle kurutma işlemine göre daha verimli olduğunu göstermiştir. Tablo 3.3' te literatürde yer alan güneş enerjili kurutmaya ilgili bazı sayısal çalışmalarla ilgili kısa bilgiler vermektedir.

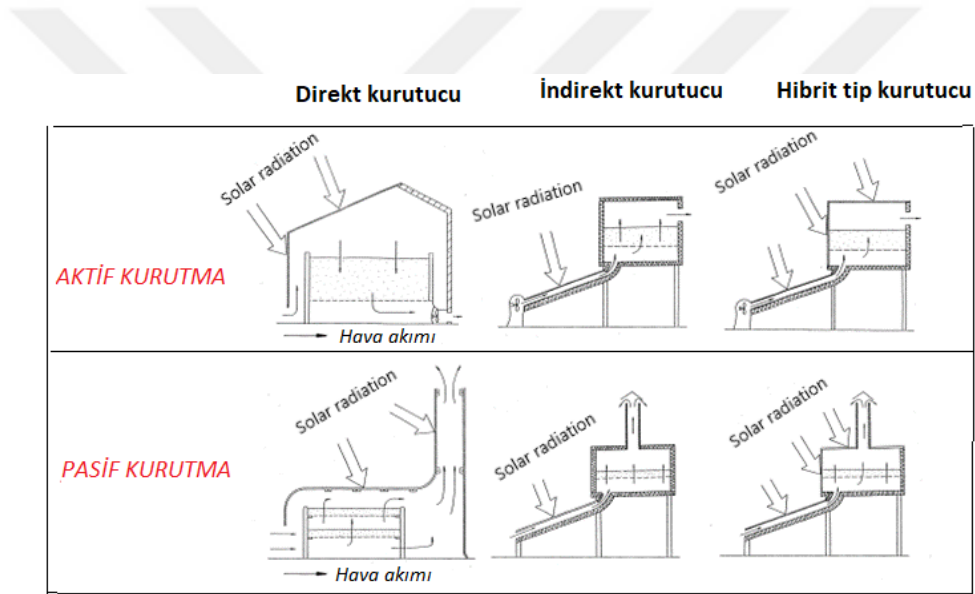


Şekil 3.3 Tipik bir akışkan yataklı kurutucunun şematik gösterimi [135]

Tablo 3.2 Akışkan yataklı kurutucular için literatürde yer alan HAD çalışmaları

Çalışmanın amacı	Metot	Sonuçlar	Referans/ Basım yılı
Fındığın AYK kurutulmasının deneysel ve sayısal analizi	*Crank-Nicholson implicit model *SHM *Üç-fazlı model	* Kurutmanın ilk evrelerinde yüksek kuruma hızı * Deneysel verilerle karşılaştırıldığında sayısal sonuçlarda çok küçük farklılıklar görüldü	Topuz ve ark., 2004 [148]
AYK' nun sayısal simülasyonu ve deneysel çalışma ile doğrulama	*2B-aksiyal simetrik *iki akışkan (Euler-Euler) metodu *SHM	*Giriş gazı hızı ve sıcaklığı, katının nem içeriği ve sıcaklığı üzerinde etkili olmuştur. *Deneysel verilerle iyi uyum gözlenmiştir	Assari ve ark., 2007 [127]
AYK' da soya küspesi kurutmasının deneysel ve sayısal analizi	*2B-aksiyal simetrik *iki akışkan (Euler-Euler) metodu *SHM	*Sıcaklık kuruma kinetiği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. *Hava ve katı sıcaklığı arasında küçük farklılıklar görülmüştür. * Deneysel verilerle iyi uyum gözlenmiştir	Da Silva ve ark., 2012 [149]
Bir tıkaç akışında kabuklu mısırın AYK' sının sayısal olarak incelenmesi ve	*3 Boyutlu *Tıkaç akışı için Euler metodu * SHM	* Giriş gazı sıcaklığı ve yatak yüksekliği azaldıkça partikülün nem içeriği azalmıştır. * Sayısal sonuçlarda	Khanali ve ark., 2018 [150]

model geliştirilmesi	(Matlab)	yüksek doğruluk görüldü	
Titreşimli bir AYK'da biyokütle kurutma için sayısal yaklaşım	*1 Boyutlu *DEM-HAD birleşik (Open FOAM) *Euler-Lagrange	*Farklı zamanlardaki nem içerikleri tahminleri yüksek doğruluğa sahiptir *Giriş gazı hızındaki ve sıcaklığındaki artış, nihai nem içeriği üzerinde azaltıcı bir etkiye sahiptir	Mohseni ve ark., 2019 [151]



Şekil 3.4 Başlıca güneş enerjili kurutucu tipleri [152]

Tablo 3.3 Güneş enerjili kurutucular için literatürde yer alan HAD çalışmaları

Çalışmanın amacı	Metot	Sonuçlar	Referans/ Basım yılı
Gıda ürünlerinin solar kurutulmasıyla ilgili sayısal	*2 Boyutlu, tıkaç akışı *SFM (Gear Algorit.)	* Giriş havası nemi arttıkça kuruma süresi uzamıştır. *Hava akış hızının kuruma süresi üzerinde etkisi olmuştur * Sayısal ve deneysel sonuçlar	Ratti ve ark., 1997 [153]

çalışma		arasında iyi bir uyum vardır	
Dolaylı bir güneş kurutucusunda kurutma sırasında biberdeki ısı ve kütle transferi	*3 Boyutlu *SHM (StarCD) *Türbülanslı akış (doğal ve zorlanmış taşınım)	*Doğal konveksiyonla kurutma radyasyondan daha uygun görüldü *Zorlanmış taşınımlı çevrimde homojen olmayan sıcaklık dağılımı görüldü	Rigit ve ark., 2010 [154]
Direkt güneş kurutucusunda çamurun kurutulması sırasında ısı ve kütle transferinin HAD modellemesi.	*2B-aksiyal simetrik *Türbülanslı akış *SHM (Fluent)	*Hava üfleyiciden uzaklaştıkça çamur yüzey sıcaklığı ve kuruma hızı azaldı. *Deneyisel verilerle iyi uyum görüldü	Krawczyk ve ark., 2011 [155]
Dolaylı konvektif güneş kurutucusunda hava akışı ve sıcaklık profillerinin simülasyon simülasyonları	*2 Boyutlu *SEM (COMSOL) *Laminer akış	*Farklı deklanşör konumları ile elde edilen sonuçlar, yarı açık deklanşör konumu için kurutucu içindeki sıcaklık değerlerinin en yüksek olduğunu göstermiştir. *Akışkan akışı, ısı ve kütle transfer dağılımları deneyisel verilerle iyi bir uyum içindeydi	Vintila ve ark., 2014 [22]
Dolaylı bir güneş kurutucusunda vanilya kurutulmasının HAD simülasyonu	*3 Boyutlu * Laminer akış * SHM (Fluent)	* Deneyisel ölçümlerle kurutucudaki sıcaklık dağılımında iyi uyum görüldü *Kabin içindeki sıcaklık değerlerinde simülasyon ve ölçümler arasında fark görülmüştür.	Romero ve ark., 2014 [156]
Doğal	*3 Boyutlu	*Kabin tasarımındaki	Sanghi ve

konveksiyonlu dolaylı güneş enerjisi kabinli kurutucuda mısır kurutmasının HAD modellemesi	*RNG k-ε türbülanslı akış * SHM (Fluent)	değişiklikler kurutucu performansını etkilemiştir *Doğal konveksiyonun iyileştirilmesi kuruma hızı ve veriminde artışa neden olmuştur.	ark., 2018 [92]
Kırmızı biberleri kurutmak için karışık tip doğal konveksiyonlu güneş kurutucusunun matematiksel modellemesi	*1 Boyutlu *Laminer akış *Fourth order Runga-Kutta (FORTRAN)	* Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum vardır	Simo-Tagne ve ark. 2018 [157]
Dolaylı bir güneş kurutucusunun HAD modellemesi	*3B-simetrik *SHM(Fluent) *standart k-ε	*35 saat sonra tüm kurutma odasında tek tip çalışma sıcaklığı görüldü. *Deneysel verilerle iyi uyum görüldü	Demissie ve ark, 2019 [94]

3.1.4 Dondurarak kurutmada HAD uygulamaları

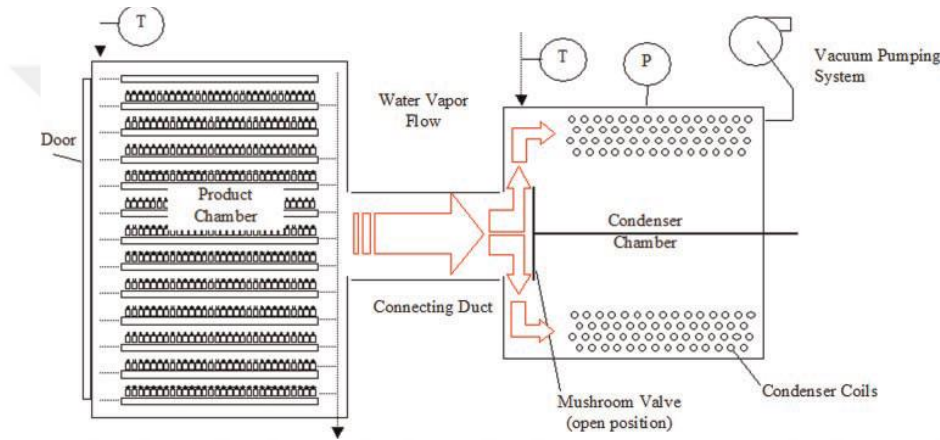
Dondurarak kurutma, diğer adıyla liyofilizasyon düşük sıcaklıkta bir dehidrasyon yöntemidir. Bu etkili yeni yöntem, kurutma sonunda malzemenin kalitesini koruduğu için farmasötikler ve nutrasötikler gibi değerli ve ısıya duyarlı ürünlerin dehidrasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Dondurarak kurutma, dondurma, vakumlu süblimasyon ve kurutma aşamalarını içeren kademeli bir işlemdir. Sürecin her adımı, kurulum ve çalıştırma için özel ekipman gerektirir. Genel olarak, diğer yaygın kurutma teknikleri ile karşılaştırıldığında, dondurarak kurutma, başlangıç ve işletme maliyetleri açısından en pahalı sistem olarak kabul edilebilir. Öte yandan bu sistemlerin popülerlik ve tercih edilme sebepleri ise enerji

verimliliği ve yüksek nihai ürün kalitesidir. HAD simülasyonları, kurutma karakteristikleri ve ürün özellikleri için doğru tahminler sunan dondurarak kurutma prosesleri için geçerlidir. Dondurarak kurutma odası modelleri için belirleyici bir parametre Knudsen sayısıdır. Boyutsuz parametre, kurutma odasındaki sıvı akışının sürekliliğini karakterize etmek için kullanılır ve moleküler ortalama serbest yolun (λ) sistemin karakteristik boyutuna (r) oranı olarak tanımlanır ($Kn = \lambda / r$). Knudsen sayısı çok küçükse ($Kn < 0.01$), akışkanın termal dengede olduğu kabul edilir ve bu koşullarda genellikle Navier-Stokes denklemleri (kütle, momentum, enerji eksileri) kullanılır. Aksi takdirde, seyreltik akışkan akışları için Boltzmann denklemi kullanılır [158]. Akış seyrekleşme rejimlerine göre kullanılabilecek denklemleri veren bir çizelge Şekil 3.5’ te gösterilmektedir [159]. Endüstriyel ölçekli dondurarak kurutucularda, kondenser kanalının içindeki gaz akış hızları çok yüksek (sonik) olabilir, bu da basınç değerleri için bir risktir. Bu durum yanlış kanal seçiminden ve diğer tasarım hatalarından kaynaklanabilir. Numerik modelleme, ön tasarım çalışmalarına imkân vermesi ve operasyon öncesi güvenlik risklerini görebilmesi açısından önemlidir. Alexeenko ve ark. [160], Boltzmann denklemini doğrudan ve pilot ölçekli bir modelleme ve büyük ölçekli bir dondurarak kurutucu ile farmasötik ürünün dondurarak kurutulması için Monte Carlo (DSMC) yönteminin doğrudan simülasyonunu kullanarak çözmüştür. Hesaplamalı modelin şematik açıklaması Şekil 3.6’ da verilmiştir. Ürünler şişelerdedir ve ürün haznesinde üst üste raflarda düzenlenmiştir. Raf sıcaklığı ve oda basıncı, su buharının süblimleşme oranını etkiler. Haznenin basıncı, yoğunlaşmayan bir gaz (Azot) girişi ile kontrol edilir. Basınç değişimlerinden dolayı su buharı ve Azot kondenser deposuna akar. Ürün ile kondenser odası arasındaki bağlantı kanalı birkaç metre uzunluğunda olabilir. Yerinde temizleme/Yerinde sterilize etme boruları (CIP/SIP) genellikle yüksek basınçlarda boğulmayı önlemek için kullanılır. Gerçek zamanlı veriler ile model verileri arasındaki karşılaştırmada bazı eksiklikler olmasına rağmen, düşük basınç bölgesindeki buhar ve yoğunlaşmayan akışkan özelliklerinin enerji ve zaman alıcı maliyetler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Laboratuvar ölçekli dondurarak kurutucular, akış hızlarının çok yüksek olmaması, haznede tıkanmaya neden olmaması için uygundur. Dondurarak kurutma işleminde sürekli bir akış rejimi için Varma [159] tarafından kapsamlı bir sayısal çalışma yapılmıştır. Sonuçlar, kondenser odasındaki

akış hızlarının ve süblimleşme hızının kurutma kinetiğini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Oda basıncı da süblimasyon oranı üzerinde etkili olmuştur.

Kn sayısı			
$\ll 0.01$	Euler metodu		
≈ 0.01		Navier-Stokes denk.	
$\gg 0.01$			Boltzmann denk.

Şekil 3.5 Akış seyrekleşme rejimleri için geçerli denklemler (Varna'dan [159] uyarlanmıştır)



Şekil 3.6 Tipik bir farmasötik dondurarak kurutma cihazının şematik gösterimi [160]

Baressi ve Marchisio [161] pilot ölçekli bir dondurarak kurutma odasının simülasyonunu geliştirmiş ve hız, basınç, sıcaklık ve bileşim alanlarını simüle etti. Bir öncekiyle ilgili benzer ardışık çalışmalarında da, önce çeşitli tasarımlarla kondenser odasını araştırdılar ve ikinci çalışmada vana tipi ve şeklinin kanal iletkenliği ve akış koşulları üzerindeki etkisini simüle ettiler [162,163]. Tüm çalışmalar, odanın geometrik parametrelerinin ve boşluğunun, kanalın konumunun ve boyutunun akış koşulları ve süblimleşme oranları üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca valf tipleri ve konumlarının da kuruma kinetiği üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Özetlenmiş literatür araştırması Tablo 3.4' te listelenmiştir.

Tablo 3.4 Dondurarak kurutmada literatürde yer alan HAD çalışmaları

Çalışmanın amacı	Metot	Sonuçlar	Referans/ Basım yılı
İki farklı kurutucu terazisi ile farmasötik ürünün dondurarak kurutmanın HAD analizi.	* Büyük ölçekli kurutucu için sürekli akış/SHM (Akıcı) *Laboratuvar ölçekli kurutucu (DSMC) için nadir akış/Boltzmann modeli *3B/ laminar akış	*Bağlantı kanalındaki CIP/SIP boru sistemi, akış alanı özelliklerini etkiler.	Aleexenko ve ark., 2009 [164]
Farmasötik dondurarak kurutmanın nadir gaz dinamiklerini modelleme	* Hem süreklilik hem de seyrek akış *3 BOYUTLU *SHM (Akıcı)/sürekli *Monte Carlo tekniği(nadiren)	*Kanalın boru tasarımı akış rejimini etkiler *Kanal tasarımının, buzlanma oranlarının homojenliği üzerinde etkili olduğu belirlendi.	Ganguly ve ark., 2012 [165]
Üretim ölçekli bir dondurarak kurutucuda kurutmanın çalışma koşullarının etkilerinin belirlenmesi	*Sürekli akış *2 Boyutlu *SHM (Fluent)	* Bölme konumu, akış hızı üzerinde önemli bir etkiye sahipti. *Vana kaldırılarak debi artırıldı *Yükün, raf sıcaklığının ve hazne basıncının boğulma oluşumu üzerindeki etkisi doğrulandı	Ganguly ve ark., 2013 [166]
Laboratuvar ölçekli bir dondurarak	*3 Boyutlu *Laminer/standart	* Oda basıncının süblimasyon oranı	Varna, 2014 [159]

kurutucuda kurutma işleminin CFD analizi	k- ϵ turb. *SHM(Fluent)	üzerinde etkisi olmuştur *Akış hızı ve süblimasyon hızı kurutma performansını etkiler	
Mikro partiküllerin ve paketlenmiş yatakların dondurularak kurutulmasının çok ölçekli modellemesi	*Parçacık-parçacık etkileşimleri için DEM simülasyonu *Süreklilik/ Serbest moleküler *Açık Köpük (mikro ölçekli) *COMSOL (SEM)(büyük ölçekli)	* Kütle transferinde gözeneklilik, kıvrımlılık ve geçirgenlik etkileri görülmüştür. *DeneySEL verilerle iyi uyum	Capozzi ve ark., 2019 [167]
Farklı tasarımlara sahip pilot ölçekli bir dondurarak kurutucunun HAD verileri.	*3 Boyutlu *SHM (Fluent)	* Kurutucunun her bir parçasının çeşitli tasarım seçenekleri, hazne içindeki akışkan dinamiklerini etkilemiştir	Baressi, 2018 [161]
Çok ölçekli liyofilizasyon odasının CFD modellemesi	*3 Boyutlu * Tamamen yinelemeli çok ölçekli yöntem *SHM(Fluent) *Laminar, continuum flow	* Kanalın odanın alt kısmına yerleştirilmesi optimum konfigürasyon olarak kabul edildi. * Raflar üzerindeki basınç gradyanları, odanın ölçeğiyle güçlü bir şekilde alakalıydı.	Baressi, 2018 [162]
Kondenser kanalı ve valf modellemesinin	*3 Boyutlu	* Akış valf geometrisi ve	Marchisio,

dondurarak kurutmaya etkileri	*Laminer, sürkli *SHM(Fluent)	tasarımından etkilenmiştir *İnert gazın varlığının kanalın iletkenliği üzerinde etkisi olmuştur.	2018 [163]
-------------------------------	----------------------------------	---	------------

3.1.5 Yeni nesil kurutma sistemlerinde HAD uygulamaları

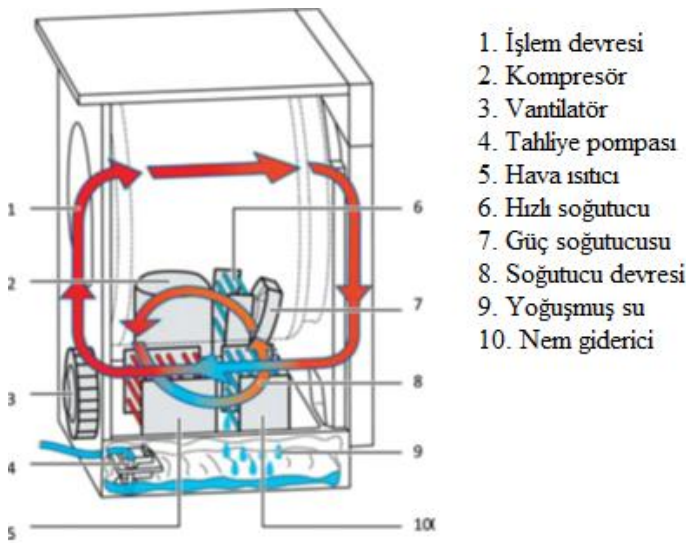
Çevre sorunlarına etki eden en büyük etkenlerden biri olan yüksek fosil enerji tüketimine karşı dünya genelinde pek çok önlem alınmaktadır. Bu istenmeyen durum, endüstri dallarını enerji tasarruflu uygulamalarda yenilik yapmaya zorlamaktadır. Yeni kurutma ve dehidrasyon teknikleri çoğunlukla bu nedenle icat edilmiştir. Yeni kurutucuların önerdiği diğer yenilikler aşağıda belirtilmiştir;

- Başlangıç ve işletme maliyetlerinin en aza indirilmesi
- Enerji tüketimini azaltmak
- Ürün kalitesini artırmak
- Kompakt, yönetilebilir ve kontrol edilebilir kurutma sistemleri inşa etmek
- Bir kurutma işleminde kurutulacak malzemenin cinsinin arttırılması.
- Çalışma sırasında güvenliği artırmak ve risk faktörlerini en aza indirmek.
- Kurutma koşullarının esnekliğini artırma
- Yoğunlaştırma kurutma hızları

Bu yenilikleri hemen hemen hepsi bir arada uygulamak için hibrit (kombine) kurutma sistemleri kurulur. Kudra ve Mujumdar' a göre kurutma işlemlerini yöneten parametreler taleplere göre değiştirilebilir [168]. Farklı kurutucu tipleri ile ayırt edici faktörler arttırılabilir. Mujumdar tarafından yeni kurutma sistemleri hakkında sonraki çalışmasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır [169]. Yeni

kurutma teknikleri, diğer işlemlerin bir kombinasyonu ile ön işlem veya yardımcı işlemler olarak da kullanılabilir. Bu bölümün altında yaygın olarak kullanılan ileri kurutma teknikleri hakkında kısa bilgi verilmektedir.

Isı pompalı kurutma: Isı pompası sistemleri ev ısıtmasında yaygın olarak kullanılan enerji tasarruflu sistemlerdir, ısı pompalı kurutucular da aynı prensipte çalışan sistemlerdir. Gizli ısı, bir ısı pompası çevriminde buhar yoğunlaştırıcı ünitesinde duyulur enerjiye dönüştürülür. Şekil 3.7' de işletim ekipmanı ile birlikte ısı pompalı kurutucunun şematik bir çizimi gösterilmektedir. Enerji tasarruflu bir termal sistem olarak, ısı pompaları ayrıca ısı pompası destekli mikrodalga kurutma [170] ve ısı pompası destekli güneşte kurutma gibi diğer geleneksel veya gelişmiş kurutma işlemleriyle birlikte kullanılır [147]. Kuan ve arkadaşları tarafından ısı pompası destekli güneş enerjisi kurutucusunun karasal iklimler için sayısal bir simülasyonu incelenmiştir. Ortam basıncının sabit olduğu ve havanın hızının 0,4 m/s' de sabit olduğu varsayılmıştır. Güneş hava kollektörünün radyasyonunun sabit olduğu varsayılmıştır. Yönetim denklemleri dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak çözülmüş ve problem algoritması C++ dili ile geliştirilmiştir. Sonuçlar, ısı pompası destekli kurutma hızının güneş enerjisiyle kurutmaya yardımcı olduğunu ve sayısal sonuçlara göre ısı pompasının sisteme uygulanmasının sadece güneş enerjisiyle kurutma işlemine göre daha verimli olduğunu göstermiştir [147].

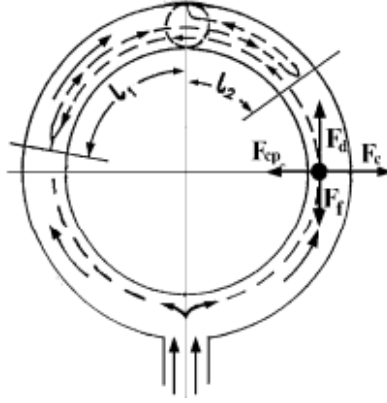


Şekil 3.7 Tipik bir ısı pompalı kurutucu şematik gösterimi

Kızgın buharlı kurutma (KBK): Sistemin ana prensibi, yakma gazının sıcak havası yerine konvektif kurutucuda kurutma işlemi için kızgın buhar kullanılmasıdır. Düşük basınçta buharın sıcaklığı kaynama noktasından daha yüksektir. Bu sistem genellikle doğrudan kurutma işlemlerinin kombinasyonu ile kullanılır. Sayısal modelleme, referans olarak geleneksel sıcak havayla kurutma kullanılarak bu sistemlere kolayca uygulanabilir. Kurutma özellikleri ve taşıma özelliklerinin tahmini için simülasyonlar yapılır. Le ve ark. atmosferik basınç koşullarında hücresel bitki gözenekli ortamın taşıma özelliklerini belirlemek için sürekli bir kızgın buhar kurutma modeli geliştirdi. MATLAB hesaplama programı yardımıyla korunum denklemlerinin çözümü için kontrol hacmi sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar, patates dilimlerinin KBK' sinin deneysel verileriyle doğrulanmış ve buharlaşma oranları ve ısı transfer hızı için iyi bir uyum bulunmuştur [169].

Darbeli yanmalı kurutma: Bu sistemin ayırt edici özelliği, geleneksel brülörlerin sürekli yanması yerine brülörlerde yakıtın aralıklı yanmasıdır. Periyodik hareket daha az yakıt (enerji) tüketimi sağlar ve kirletici emisyonları azaltır. Yanmanın titreşimli etkisi gazın basıncının, hızının ve sıcaklığının artmasına ve ısı ve kütle transfer oranlarının artmasına neden olur.

Çarpan jet akışlı kurutma: Bu kurutucu türleri, hızlı kurutucuların bir tür yeni versiyonudur. Dağınık katı parçacıklara sahip bir gaz, yüksek hızlı bir gaz akışıyla çarpışır ve zıt yönden gelir ve yüksek hızlara sahip karşı yönlerden iki akış, bir çarpma bölgesi oluşturur, bu bölgede salınım hareketi ile hız kayıpları meydana gelir. Parçacıklar, çarpan gazdan bağımsız olarak aynı yörüngeyi takip eder. Huai ve ark. [171], fiziksel bir çarpan akışlı kurutma modeli geliştirdi ve çok fazlı akış ve kurutma özelliklerini araştırdı. Çarpan akımının yarı dairesel bir modeli (Şekil 3.8) oluşturulmuş ve laminar, geçici ve türbülanslı akış rejimleri için sonlu farklar yöntemiyle ana denklemler çözülmüştür. Sonuçlar, daha yüksek giriş havası sıcaklığının kuruma hızını arttırdığını ve iç çemberin dibine taze hava eklenmesinin veya daire çapının artmasının kurutma performansının artmasına yol açtığını göstermiştir [171]. Tablo 3.5, ileri tekniklerin ve hibrit kurutma sistemlerinin CFD çalışmalarını özetlemektedir.



Şekil 3.8 Yarı dairesel çarpan jet modeli [171]

Tablo 3.5 Yeni nesil kurutucular için literatürde yer alan HAD çalışmaları

Çalışmanın amacı	Metot	Sonuçlar	Referans/ Basım yılı
Isı pompası destekli sürekli kurutma işleminin simülasyonu	Logaritmik-ortalama sıcaklık farkı yöntemi/ısı pompası *Kontrol hacmi modeli/sürekli kurutma * Denklemleri çözmek için Newton-Rapson yöntemi.	*By-Pass hava oranı, toplam kütle akış hızı, havalandırılan hava kütle akış hızı, kurutma işleminin temel faktörleridir. *Sıcak havanın By-Pass edilmesi, kurutma oranını yaklaşık %29 oranında iyileştirmiştir.	Jia ve ark., Jolly ve ark., 1990 [172,173]
Soya fasulyesinin mikrodalga destekli AYK'sının HAD simülasyonu	*2B-aksiyal simetri *İki akışkan model *Standart k-ε *SHM(Fluent)	*Pilot ölçekli kurutucu için deneysel verilerle makul düzeyde uyum görüldü *Büyük ölçekli kurutucular için daha fazla doğrulama gereklidir	Ranjbaran ve ark., 2012 [174]
Kızgın buharlı akışkan yataklı	*2B-aksiyal	* Nem içeriği-zaman grafiklerinde deneysel	Xiao ve ark.,

kurutucunun HAD modellemesi	simetri *Kontrol hacimli iki fazlı sistem *Standart k-ε *SHM(Fluent)	verilerle iyi uyum görüldü *Kurutmanın ilk aşamasında negatif kuruma oranı görüldü	2013 [175]
Küre biçimli ürünlerin mikrodalga kurutmasının sayısal analizi	*3 Boyutlu *SEM (COMSOL) *Difüzyon modeli	* Farklı boyutlardaki küreler, benzer koşullar altında farklı davranış sergilemiştir *Büyük ebatlı ürünlerde aşırı hacimsel ısınma görülmüştür. *Küçük ebatlı ürünler düşük sıcaklıklarda iyi kurutulmuştur.	Gulati ve ark., 2015 [176,177]
Güneş ısısı geri kazanımı destekli kızılötesi (IR) kurutmada kavun kurutmanın sayısal analizi	*3 Boyutlu * Standart k-ε * SHM (Fluent)	* IR kurutma ile kombine güneş ısısı geri kazanım sistemi, kurutma performansı için sadece IR kurutucuya göre daha iyi sonuç verdi *DeneySEL sonuçlarla iyi uyum	Aktaş ve ark., 2016 [178]
Kaplamalı (çok katmanlı katı) kullanılmış tahılların KBK'sinin hesaplamalı modellemesi	*3 Boyutlu *k-ω türbülans * SHM (Ansys-CFX)	* Kızgın buhar sıcaklığının kuruma süresi üzerinde SS hızından daha yüksek etkisi oldu *Termo-fiziksel özellikler ürünün çekmesine etki etmiştir.	Ramachandran ve ark., 2019 [179]
Linyitin mikrodalga destekli AYK'	*2 Boyutlu *İki akışkan	* Artan mikrodalga gücü ve hava hızı ile kurutma	Si ve ark., 2019 [180]

sının deneysel ve sayısal analizi	modeli *standart k- ϵ *SHM (Fluent)	hızı artmıştır *Isı transfer katsayısı artan mikrodalga gücü, hava sıcaklığı ve hızı ile arttı *Deneysel verilerle iyi uyum görüldü	
-----------------------------------	--	---	--

3.2 Konvektif Kurutma Sistemlerinde HAD Uygulamaları

Konvektif kurutma uygulamaları, sıcak hava akımının nemli ürün içerisinden geçerek ürünün içindeki nemin buharlaşmasına neden olduğu doğrudan kurutma sistemlerdir. Sistem, hava akışı, taşınım ile ısı transferi ve nem taşınımını içeren fiziksel bir problem olarak düşünüldüğünde, bu işlem, parametrelerin çeşitli değerlerini içeren uygun bir HAD kodu ile tanımlanabilir. Sıcak havayla kurutma sisteminin karmaşıklığı, hava akışı türbülanslı olduğunda artar ve bu durum fiziksel problemi zorlu bir probleme dönüştürür. Kuruyan nesnenin geometrisi, çözüm kolaylığı açısından dikdörtgen, küre ve silindirik geometriler şeklinde standartlaştırılmıştır. Taşıma denklemlerinin ağ oluşturma ve yakınsama kolaylığı nedeniyle HAD modellerinde yaygın olarak dikdörtgen bir şekil kullanılır [152]. Gelişen bilgisayarlar ve çözüm tekniklerinin sunduğu olanakların artmasıyla, ürünlerin boyutu, geometrisi, özellikleri de çeşitlilik kazanmıştır. Stanish ve ark. [181], ahşap kurutmanın matematiksel bir modelini geliştirdiler ve sonuçları ahşap numunelerin deneysel çalışması ve higroskopik olmayan gözenekli seramik katı kurutma ile karşılaştırdılar. Kütle ve enerji taşınım denklemleri tek boyutlu ve nem içeriğinin sıvı su, bağlı su ve su buharı olmak üzere üç fazlı olduğu varsayılmıştır. Isı ve kütle taşınımının matematiksel sonuçları, deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum göstermiştir. Yiotis ve ark., kurutma işleminde gözenekli bir ortamın eşleştirilmiş konvektif-yayımlı kütle transferini incelemiştir. Sonuçlar, ortamın iç gözeneklerinden nem difüzyonu yerine yüzeylerden baskın olarak kütle transferi

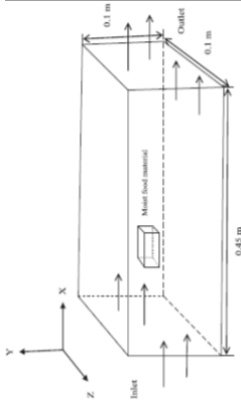
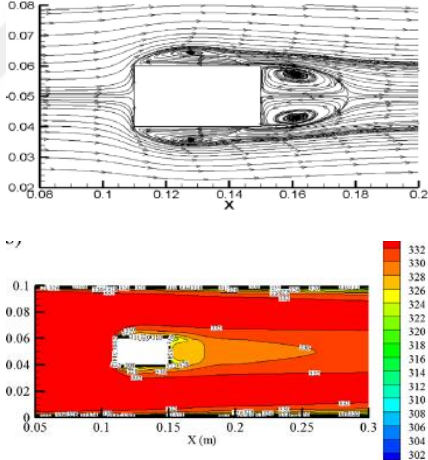
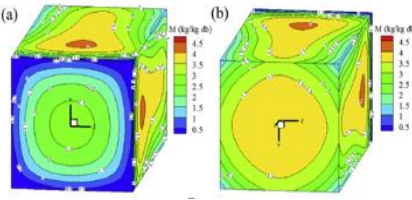
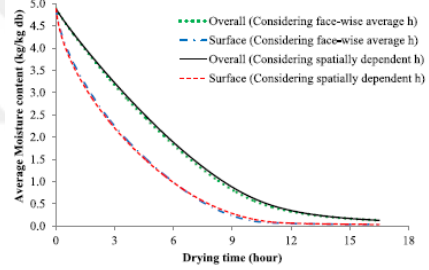
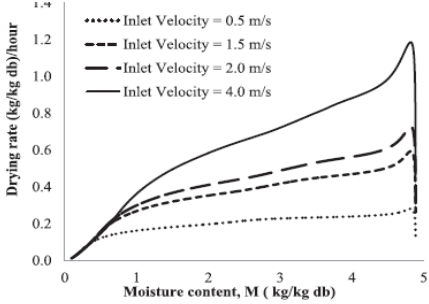
gerçekleştğinde, kuruma hızının sabit kaldığını göstermiştir [182]. Üzümlerin dehidrasyonu Gavrilă ve ark. tarafından statik bir yatakta kararsız bir konvektif kurutmayla sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, malzeme ortalama kurutma hızının kuruyan havanın sıcaklığına ve bağıl nemine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir ve sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum içindedir [183]. Haydari ve ark., konvektif kurutmada ısı transferinin neden olduğu gerilmeleri incelemiş ve sonuçları kurutulmuş Kaolin numuneleriyle doğrulamıştır. Sayısal çalışmada, sonuçlara göre ısı transferinden kaynaklanan gerilmeler, kütle transferinden kaynaklanan gerilmelerden daha az önemli olmuştur [184]. Gomez ve ark. [185], bir ısı pompasının konvektif kurutma odasındaki sıcaklık dağılımına hava akışının etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Düşük hız alanlarında devridaim görülmüş ve bu bölgeler zayıf kurumaya neden olmuştur. Kumar ve ark., [186] elma dilimlerinin konvektif kurutulması üzerine kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Isı ve kütle transferi katsayıları daha önceki deneysel çalışmalardan alınmış ve çalışmada üç boyutlu bir elma diliminin eksenel simetrik geometrisinin konvektif kurutulmasında kullanılmıştır. Buharlaşma yoğunlukla numunenin yüzeyinde ve yakınında görülmüştür ve sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum sağlamıştır. Sayısal çalışmalarda ısı ve kütle aktarım katsayılarının belirlenmesi çeşitli yöntemlerle kullanılabilir. Bir başka iki boyutlu eksenel simetrik model Dhall ve arkadaşları tarafından bal peteği şeklindeki katı seramiklerin konvektif kurutma simülasyonunda oluşturulmuştur. Nem kaybını, belirli bir kuruma süresinden sonra su içeriğinin nesnedeki ilk su içeriğine oranı anlamına gelen 'kurutma kaybı' olarak tanımladılar ve sonuçlar, iki farklı ortam sıcaklığında sıcak hava tünelli kurutucudan alınan deneysel verilerle doğrulanmıştır. Çalışmaların çoğunda, nem transferi Fick'in difüzyon yasası tarafından yönlendirilir. Tek boyutlu türbülanslı akış koşulları ve difüzyon kaynaklı kütle transferinin varsayıldığı çalışmada Tzempelikos ve ark. [187]. Nusselt sayısını belirleyen bir korelasyon geliştirmiştir. Difüzyon katsayısı, Arrhenius tipi sıcaklığa bağlı bir modelden ve ısı transfer katsayıları da tahmini HAD hesaplamalarından elde edilmiştir. Özellikle ısı transferi ile kütle transferinin eşlenik olarak bir arada ele alındığı çeşitli sayısal konvektif kurutma çalışmalarına göre, buharlaşma hızı sıcaklığa ve kurutma havasının hızına bağlıdır ve sonuçlar genellikle benzer deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlamıştır [188–191]. Şekil etkisi ve büzülme d, çalışmaların çoğunda

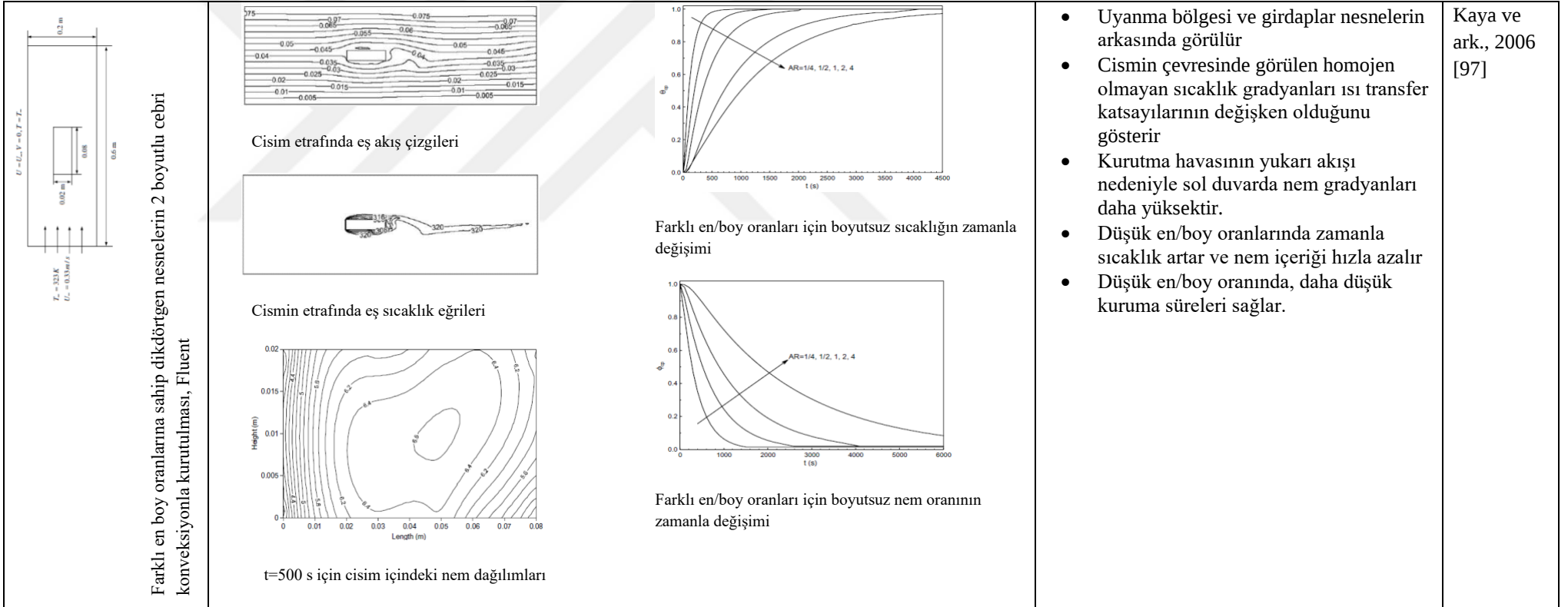
gözlenen bir olgudur [192,193]. Kaya ve arkadaşlarının dikdörtgen nemli bir nesnenin kurutulmasıyla ilgili 2 boyutlu çalışmasında [97], ısı ve kütle transfer katsayıları, termal ve konsantrasyon sınır tabakaları arasındaki analogi kullanılarak değerlendirilmiştir. Kurutulmuş havuçların ve Hayward kivi meyvelerinin [194] hem deneysel hem de teorik analizi Kaya ve ark. tarafından yapılmıştır. Deney odasında şartlandırılmış havanın sıcaklık, ortalama hız ve bağıl nem değişimleri ile ilgili deneysel çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, belirli bir kuruma süresi sonunda nem içeriğinin farkı olan kuruma hızı, hava sıcaklığı, hızı ve bağıl nemden etkilenmiştir. Her iki çalışma için de sayısal sonuçlar sonlu farklar yöntemiyle hesaplanmıştır ve deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlandığı görülmüştür. Mohan ve Talukdar [195], sonlu hacim örtülü şeması ile dikdörtgen nemli bir nesnenin geçici konvektif kurutması için 3 boyutlu bir model geliştirmiştir. Yüzeylerdeki ısı transfer katsayıları bir HAD kodundan elde edildi ve daha sonra kütle transfer katsayılarını elde etmek için termal ve konsantrasyon sınır tabakaları arasındaki analogi kullanılmış, Değişen hava sıcaklıkları ve hızlarının kuruma hızı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hava hızı artırılarak kuruma hızı artırılmış ve hava sıcaklığı artırılarak kuruma süresinden yaklaşık %40 oranında tasarruf edilmiştir. Pasban ve arkadaşlarının çalışmasında elma dilimlerinin üç boyutlu konvektif kurutulmasında ısı ve kütle taşınımını hesaplamak için spektral tanzim yöntemi kullanılmıştır [196] ve konvektif ısı transfer katsayısı, toplu sistem analizinden hesaplanırken, kütle transfer katsayısı termal ve konsantrasyon sınır tabakaları arasındaki analogi kullanılarak değerlendirilmiştir. Lal ve ark. [197], hava akışının makro gözenekli bir malzemedan su buharının konvektif olarak uzaklaştırılması üzerindeki etkisini araştırmıştır. Malzeme gözenekli asfalttı ve türbülanslı hava koşullarında rüzgâr akış hızlarının etkisi simüle edilmiş, sonuçlara göre sadece en yüksek hava rüzgâr hızı toplam buhar akışı üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Farklı boyutlardaki zeytin değirmeni atıklarının döner kurutucuda değişen hava sıcaklıkları ve hızlarının etkisi altında konvektif olarak kurutulması Cruz ve ark. [198] tarafından araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre değişen hava sıcaklıkları ve hızları için kuruma hızı ve etkin yayılımı hesaplamışlar, daha yüksek hız ve sıcaklıklarda daha yüksek kuruma hızı değerleri ve etkin yayılmalar elde etmişlerdir. Öztop ve Akpınar'ın [199] çalışmasında elma ve patates dilimleri için

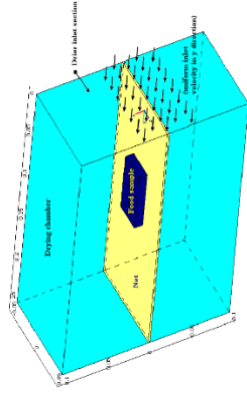
kurutmanın sayısal ve deneysel analizi karşılaştırılmıştır. Nesnelerin içindeki nem dağılımları, sayısal sonlu hacim yöntemi kullanılarak farklı zaman adımlarında sunulmuş, sonuçlar, bir konvektif siklon kurutucu düzeneğinden alınan deneysel verilerden alınan sonuçlarla oldukça iyi uyum sağlamıştır. Patates, elma ve kabak dilimlerinin siklon konvektif kurutucuda kurutulması Akpınar [200] tarafından on üç farklı kurutma eğrisi denklemi kullanılarak sayısal olarak çalışılmış ve en uygun denklemi elde etmek için sonuçlar değişen hava sıcaklıkları ve hızlarında yapılan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Zogzas ve ark. [201] patates, elma ve havuç küplerinin sıcak havayla kurutmada yığın yoğunluğunu, gözenekliliğini ve büzülmesini deneysel olarak belirlemiş ve sayısal çalışmalarda kullanılmak üzere etkili sonuçlar elde etmiştir. Elma ve havuç dilimlerinden nem transferini araştırmak için Srikiatden ve Roberts [202] tarafından Fick'in difüzyon yasasına dayanan sabit bir konvektif kurutma modeli geliştirilmiştir. Gerçek izotermal koşullardan sıcaklığa bağlı etkin difüzivite elde edilmiş ve izotermal olmayan kurutma koşulları sırasında modele uygulanmıştır ve malzeme nem içeriğine karşı özellikleri tahmin etmek için sayısal bir model kullandılar ve deneysel ve sayısal çalışmaların uygun sonuçlarını elde etmişlerdir. Nasrallah vd [202] tarafından iki farklı gözenekli ortam (ahşap ve tuğla) için zorlanmış taşınımlı kurutma koşulları altında ısı ve kütle transferinin sayısal çalışması geliştirilmiştir. Ahşap kurutmanın matematiksel bir modeli olan Stanish ve arkadaşlarının çalışmasına benzer bir kuruma süresinden sonra her iki numune için de aynı yerde sıcaklık artışına rağmen yüzeylerin doygunluğu azalmıştır. Nem oranı, başlangıçtaki nem içeriğine göre kuruduktan sonra gözenekli nesnedeki nem miktarını belirten kesirli bir değerdir [203]. Cevoli ve ark. [204], bir çörek ekmeğinin yenilebilir kaplamasının kurutma işleminde ısı ve kütle transferi olaylarını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, kuruma süresini etkileyen üç ana faktör olan sıcaklık, kaplamanın kalınlığı ve solvent konsantrasyonuna odaklanmışlardır. FEM tabanlı bilgisayar programı Comsol Multiphysics' de kuruma süresini hesaplamak ve yüzey sıcaklık dağılımını ve kütle akısını değerlendirmek için 1B ve 2B modeller geliştirilmiş ve sonuçlar deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Yüzey sıcaklığı dağılımının kütle akısı üzerindeki etkileri, kurutma sıcaklığı 80°C'ye kadar zayıftı ve 25°C ve 60°C kurutma sıcaklıklarında deneysel çalışmalarla doğrulanan sonuçlar arasında iyi bir uyum görülmüştür. Onwude ve ark. [205], birleştirilmiş kızılötesi ve sıcak hava

kurutma prosesi ile sayısal olarak tatlı patates kurutması için bir model geliştirmiştir. Model geometrisi, silindirik bir tatlı patates diliminin 2B eksenel simetrik kesitiydi ve kurutma sırasındaki eş zamanlı ısı ve kütle transferi hem sıcaklığa hem de büzülmeye bağlı yayılım dikkate alınarak simüle edildi. Her iki kurutma işlemi de kullanıldığında kuruma süresinin kısalması daha yüksektir ve kızılötesi radyasyonla kurutmanın dahili ısıtma kapasitesi nedeniyle numune içindeki sıcaklık dıştakinden daha yüksektir. Nem oranı, başlangıçtaki nem içeriğine göre kuruduktan sonra gözenekli nesnedeki nem miktarını belirten kesirli bir değerdir [206]. Kurutma sırasında nem içeriği değişir ve nem içeriğinin gelişimini hesaplamak için çeşitli sayısal yöntemler kullanılmıştır [207,208]. Sıcak havayla kurutmanın hareketli bir bant üzerindeki gözenekli nemli nesneler aracılığıyla etki edebileceği ve kuruyan havanın yönünün bandın hareketine paralel olabileceği göz önüne alındığında, araştırılması gereken yeni bir fiziksel fenomen ortaya çıkmaktadır. Literatürde bu kurutma tipini araştıran sayısal çalışmalar bulunmamaktadır. Kim ve arkadaşlarının sayısal çalışması [209], hareketli nemli nesneler aracılığıyla konvektif kurutma örneğidir. Kurutma, eş zamanlı olarak ısı ve kütle akıları ve sıcaklık koşullarıyla birleştirilen 2B model için eş zamanlı olarak hesaplanan ısı kütlesi ve konsantrasyon değerlendirmesi de dahil olmak üzere nesnelerin ve taşıma mekanizmasının dışındaki türbülanslı koşullar altında varsayılmıştır. Nesnenin hızı, taşıma fenomeni üzerinde etkiliydi. Sanghi ve ark. [210], bir güneş enerjisi kabinli kurutucuda mısırların doğal konvektif kurutulmasının HAD modellemesini inceledi. Mısır tarafından kısa dalga radyasyonunun absorpsiyonunu simüle etmek için gelen bir güneş radyasyonunu modellemek için çift bantlı bir spektrum kullanıldı. Model deneysel sonuçlarla doğrulandı ve sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum görülmüştür. Tablo 3.6, literatürde yer alan sayısal bazı konvektif kurutma çalışmalarını özetlemektedir.

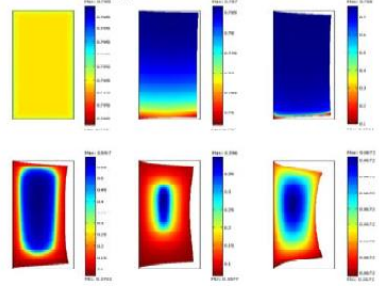
Tablo 3.6 Literatürde konvektif kurutma ile ilgili HAD çalışmalarını özetlemektedir.

HAD Modellemesi	Simülasyon sonuçları	Yorumlar	Referans
Türbülanslı koşullarda dikdörtgen nemli bir nesnenin konvektif kurutmasının 3D simülasyonu 	 2 boyutlu eş akış (üst) ve eş sıcaklı (alt) eğrileri  Cisim yüzeylerinde 3 boyutlu nem içeriği dağılımı	 Sabit hava sıcaklığında ve hızında nemli gıdanın zamana bağlı ortalama nem içeriği  Değişen hızlarda nem içeriğine karşı kuruma hızı - Akış devridaimleri ve sıcaklık gradyanları nesnenin arkasında daha yüksektir - Yüzeye bakan kanal girişinde nem içerikleri daha düşüktür - Yüzey ve toplam hacim arasındaki ortalama nem içeriği farkı, her iki tür kütle aktarım katsayısı için ihmal edilebilir düzeydedir. - Sabit kuruma hızı, daha yüksek hızlara kıyasla 0,5 m/s daha düşük hız için daha uzundur.	Ateeque ve ark., 2014 [211]

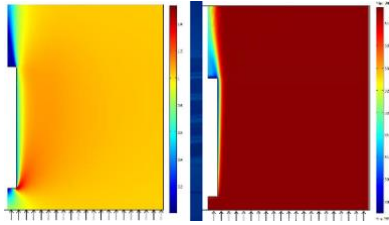




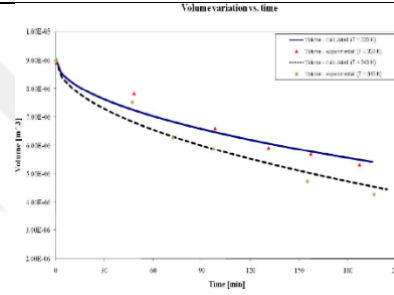
Patatesin kurutulması sırasında taşıma olayları ve büzülme etkisi, COMSOL Multiphysics



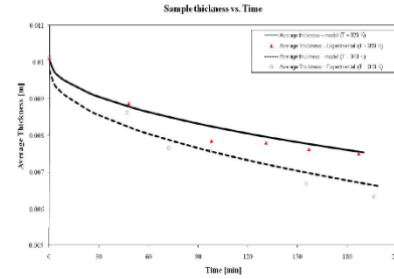
Moisture content of potato during drying considering shrinkage effect



Velocity field and temperature profile around 2D porous object (potato)



Total volume evolution of potato sample with time



Slab thickness evolution of potato sample with time

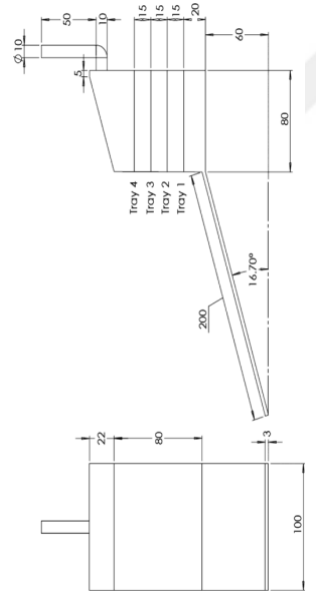
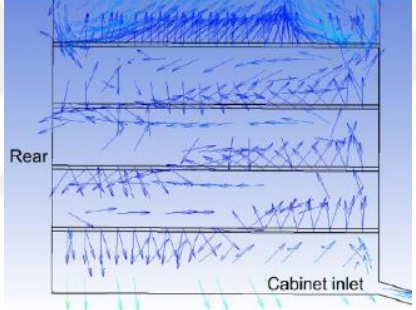
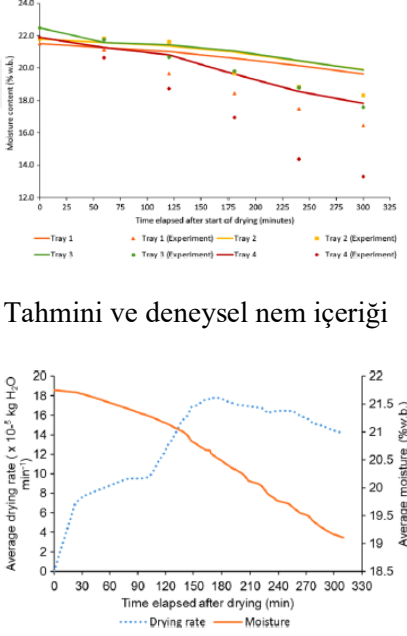
• Üründen suyun buharlaşması ile zamanla gözenekli patates numunesinde büzülme etkisi görülür.

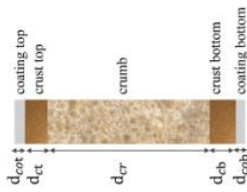
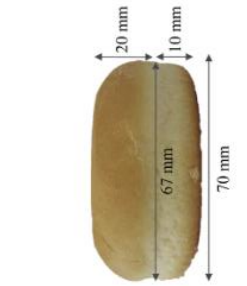
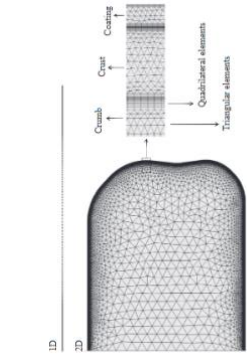
• Numune yüzeyinin yakınında hız ve sıcaklık gradyanları gözlemlenir.

• Kurutma sırasında patates hacmini azaltmak için sayısal ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum

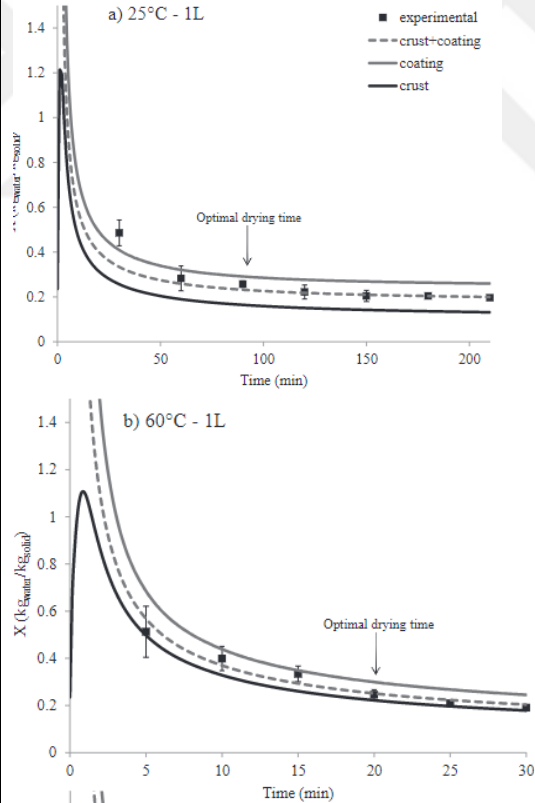
• Kurutma sırasında numune kalınlığı azalır ve sayısal sonuçlarla iyi tahminler gözlemlenir.

Curcio ve ark., 2009 [212]

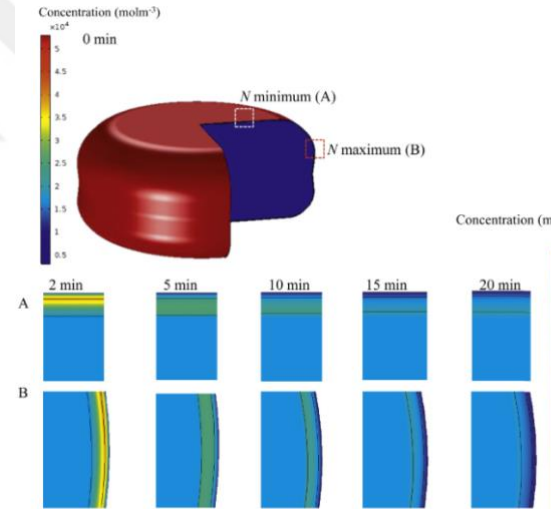
 Doğal konveksiyonlu güneş kurutucusunda mısır kurutmasının 3 boyutlu simülasyonu	 Kabinli kurutucunun merkez düzlemindeki hava akış profili	 Tahmini ve deneysel nem içeriği Kurutma boyunca ortalama nem içeriği ve kurutma oranı	- Hız vektörlerinin girişten yukarıya, ardından kabinde yatay olarak arkaya ve sonra aşağıya doğru bir devridaim modeli görülür. - Simülasyon sonuçlarında mısırların nem içeriği değişiminde iyi tahminler elde edilmiştir. 2 saat kuruma sonrası kuruma hızında keskin bir artış görülür.	Sanghi ve ark., 2018 [92]
---	--	---	---	----------------------------------



Bir çörek ekmeginin konvektif kurutulmasında ısı ve kütle transferinin sayısal olarak incelenmesi



Nem içeriğinin zamana bağlı farklı sıcaklıklarda değişiminin; deneysel ve farklı sayısal çalışmalarla karşılaştırılması



Nem konsantrasyon alanlarının maksimum (a) minimum (B) kütle akılarında farklı zamanlarda 2 boyutlu eksenel simetrik model için değişimi

- Bir boyutlu veiki boyutlu modellerde kaplamalı, kabuklu ya da her ikisinin birden olduğu durumlarda transfer mekanizması sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmıştır.
- Farklı kurutma sıcaklıklarının ve kaplama kalınlığının kurutma süresine etki ettiği görüldü.
- Optimum kurutma sıcaklığı ve kaplama kalınlığı çok yüksek doğrulukla ($R^2=0,98$) elde edildi

[204]

3.3 Kurutma Prosesinde Yapay Zekâ ve Optimizasyon Çalışmaları

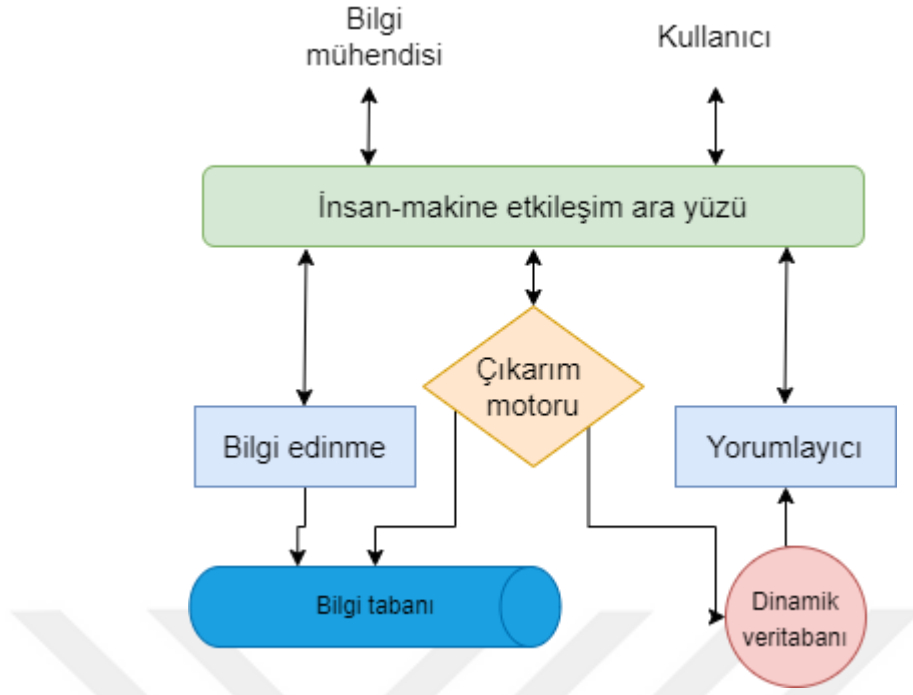
Yapay zekâ, 1960'lardan beri uygulanmasına rağmen yüksek hesaplama gücü gereksiniminin getirdiği maliyetlerden dolayı ilk etapta sınırlı kullanım alanına hizmet etmişlerdir. Özellikle 90'lı yılların sonrasında bilgisayar teknolojilerinin hızla gelişmesi, bilgisayarların kapasiteleri ve hesaplama performanslarının artması yapay zekâ uygulamalarının da pek çok sektöre yayılmasını sağlamıştır. Genel anlamda yapay zekâ, insan zekasını taklit eden örneğin konuşma tanımı, görsel algı, karar verme, dil çevirisi gibi bilgisayar sistemlerini tasarlayan bilgisayar bilimidir [213]. Bu teknoloji, çok geniş kullanım alanlarında proseslerin iyileştirilmesi ve verimin artması, daha az iş gücü ile daha yüksek performanslı üretim ve hizmet sağlama, istenilen son ürüne ya da sonuca daha çabuk ve daha az adımla ulaşma gibi performans arttırıcı ve optimize edici yöntemler için kullanılmaktadır. Yapay zekanın pekiştirmeli öğrenme, sürü zekâsı (sosyal zekâ), bulanık mantık, bilişsel bilim, yapay sinir ağları, evrimsel sinir ağları gibi pek çok türü arasından uygulanacak problem türüne göre uygun olan seçilebilir. Yapay zekanın özellikle son yıllarda yüksek ilgi görmesi, çabuk ve doğruluğu yüksek karar verme, tahmin ve sınıflandırma yeteneği, kalite iyileştirme, maliyet düşürücü etki, ve karlılık artışı gibi istenen durumları kolaylıkla elde edebilmesidir [214]. Bir örnek verilecek olursa, yapay zekanın gıda endüstrisinde uygulanması; süreçte daha az insan hatası, toplu ürünlerde daha az kayıp, proseslerin otomatikleştirilmesi ve optimize edilmesi ile üretim hatlarında daha hızlı ve doğru işlemler sağlar. Ayrıca, yapay zekâ ile hijyen ve sanitasyon koşullarının optimum düzeylerde sağlanması da gıda güvenliğini arttırıcı bir etkidir. Kişiselleştirilmiş siparişlerin üretimi konusundaki kolaylıklar tüm yukarıda sayılanlarla birlikte daha mutlu müşteri profilini beraberinde getirmektedir [213].

Kurutma sektöründe de yapay zeka uygulamaları, özellikle gıda ürünlerinin kurutulmasında uygulanan pek çok yöntem için gerçekleştirilmekte olup, sayısal çalışmalarda simülasyonlar üzerinden kurutma prosesinin senaryosu oluşturularak, hangi kurutma koşullarında ne tür sonuçlar elde edilebileceğinin tahmin edilmesi, en verimli kurutma koşulunun ve ortamın bulunması, kurutulacak ürüne göre optimum kurutma yönteminin ve şartlarının belirlenmesi veya kurutma şekline göre kurutulacak ürünleri

sınıflandırılması gibi uygulamalar için kullanılmaktadır. Genel olarak kurutmada kullanılan yapay zekâ uygulamaları aşağıda listelenmiştir.

3.3.1 Uzman sistemler (Expert systems)

Uzman sistemler bir diğer adıyla bilgi tabanlı sistemler, insan beyninin bilgi ve muhakeme yeteneğini taklit eden bir tasarıma sahip yapay zekâ algoritmalarıdır. Bir ES, tıpkı konusunda uzman bir insan gibi bilgisayarların verileri yorumlayarak ve aralarında seçim yaparak karar vermesini sağlar. Verileri işlemek için kuralların kullanıldığı, kural tabanlı çıkarım olarak bilinen bir teknik kullanır. Yapay zekanın ana iş uygulaması, insan uzmanlara zor sorunları çözmede yardımcı olan uzman sistemlerdedir. Bu sistemler bir konuda uzmanlaşmış kişilerin konuyla ilgili karşısına çıkan zor sorunları çözmelerinde uzman bilgilerini de kullanarak yardımcı olurlar [213]. Bu sistemler genellikle altı bölümden oluşur. Bunlar; insan-makine ara yüzü, bilgi edinme, bilgi tabanı, çıkarım motoru, dinamik veri tabanı ve yorumlayıcıdır. İnsan-makine ara yüzü, sistem ve kullanıcının bulunduğu, kullanıcının temel bilgileri girdiği, sistem tarafından oluşturulan soruları cevapladığı ve muhakeme sonuçlarının aldığı kısımdır. Uzman sisteme ait temel şematik gösterim Şekil 3.9’ da verilmiştir. Bilgi edinme kısmı, bilgi tabanına giden bir anahtar konumundadır. Bilgi edinim aşaması sayesinde bilgi tabanı genişletilebilir, değiştirilebilir ve sistem otomatik öğrenme işlevini gerçekleştirebilir. Uzman tarafından sağlanan bilgi, bilgi tabanında depolanır. Uzman sistemin problem çözme şekli, bilgi tabanındaki bilgiler yardımıyla tıpkı bir uzmanın düşünme tarzını simüle etmesi şeklindedir. Genel olarak, bilgi tabanı, diğer uzman sistem programlarından bağımsızdır, böylece kullanıcılar bilgi tabanının içeriğini değiştirebilir ve uzman sistem performansını geliştirebilir. Çıkarım motoru, mevcut durum ya da edinilen bilginin ışığında, bilgi tabanındaki kurallarla tekrar tekrar eşleşerek yeni sonuçlar ve problem çözümleri elde eder. Dinamik veri tabanı geçici depolama alanı olarak genellikle orijinal verileri depolamak için kullanılır, bunlar muhakeme sürecinde ihtiyaç duyulan ara sonuçlar ve nihai sonuçlar olabilir. Yorumlayıcı, kullanıcı sorularına göre problem çözümünün ne nihai sonuçların açıklamasını gerçekleştirerek sistemin daha insancıl olmasını sağlar. Özellikle karar verme sürecinde yüksek faydaları olduğu kanıtlanan uzman sistemler, literatürde pek çok kurutmaya uygulamasında kullanılmıştır [215].



Şekil 3.9 Bir uzman sistem şemaitk diyagramı

3.3.2 Bulanık mantık (Fuzzy Logic)

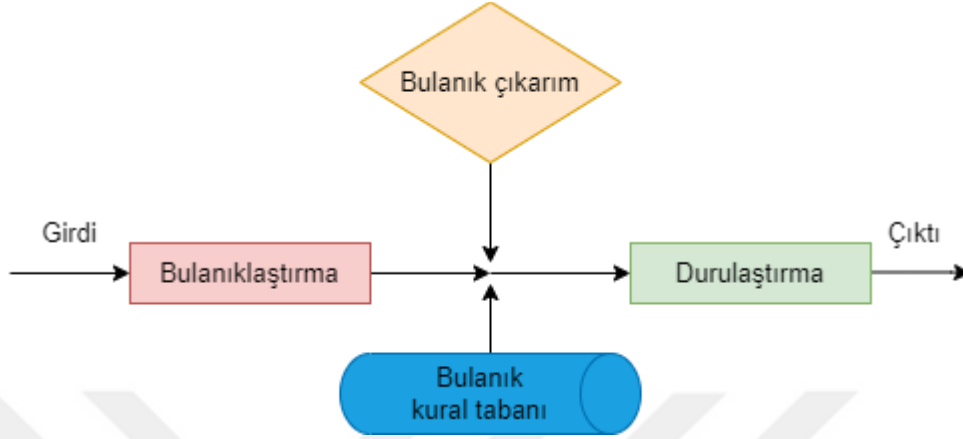
Bulanık mantık, insan beyninin muhakeme ve karar verme yeteneğini taklit eden, bulanıklaştırma, çıkarım ve durulaştırma aşamalarından oluşmaktadır. Şekil 3.10 bir bulanık mantık sisteminin genel görünüşünü vermektedir. Yapay zekâ bulanık mantık sistemlerinde ilk olarak veri girişi yapılır. Böylece bulanık mantık sistemi çalışmaya başlar. Daha sonra sisteme girilen veriler 0 ile 1 arasındaki bulanık değerlere dönüştürülür. Bulanıklaştırma işlemi sırasındaki çıkarım kuralları belirlenir ve bu kurallar kullanılarak bulanık giriş değerleri için bulanık sonuçlar çıkarılır. Durulaştırıcı aşamasında çıkarımdan elde edilen sonuçları istenilen gerçek değerlere dönüştürür. Bu aşamalardan sonra sistem kesin ve spesifik bir çıkış değeri verir [216].

Bulanık mantıkta kullanılan en kullanışlı kurallarda birisi If-Then (Eğer- O halde) kuralıdır. Literatürde proses iyileştirme amacıyla bu kuralın uygulandığı birçok kurutma çalışması yer almaktadır. Örnek olarak yeni kurulan bir tahıl kurutma tesisinde, orantılı integral türev denetleyicisi (PID) ile kontrol performansını optimize etmede genetik olarak optimize edilmiş bulanık mantık kullanılmıştır [217]. Ayrıca akıllı görüntüleme [218] ve parametre kontrolü [219] gibi sistemlerin kurutma proseslerine uygulanması için de Eğer-O halde (If-Then) kuralı uygulanmıştır.

Bulanıklaştırma, bulanık çıkarım mekanizmasının ilk adımıdır. Kesin (sayısal) değeri, girdilerin ilgili bulanık kümelerine ait olduğu derecelere göre eşleştirme işlemidir. Burada kesin değerler, üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanık set diline uygun olarak üyelik derecelerine (0-1 arası değerler) dönüştürülür. Daha sonraki adım olan bulanık çıkarım aşaması bulanıklaştırılan verilerden bilgi tabanı yardımıyla çıkarımlar yapar. Bilgi tabanı bulanık kümeler arasındaki ilişki ve gelecek verilere göre nasıl çıkarımların yapılacağıyla ilgili kuralların saklandığı yerdir. Bulanık sistemlerden çok kullanılan çıkarım yöntemleri Mamdani [219] ve Sugeno [220] çıkarımlarıdır. Mamdani çıkarımında giriş ve çıkış değerleri bulanık değerler iken, Sugeno çıkarımında çıkış değeri bir fonksiyon şeklindedir [221]. Çıkarım yapıldıktan sonraki aşama durulaştırma aşamasıdır. Bu aşamada bulanık değer aralığında gelen verileri, gerçek verilere dönüştürerek çıktıyı oluşturur.

Raghavan vd. [222], mikrodalgalı bir kurutucuda bulanık mantık algoritmasının uygulandığı bir elektronik burunla gerçek zamanlı aroma izleme ve kontrol sistemi tasarlamışlardır. Algoritma, için kurutma derecesine dinamik olarak karar verme ve otomatik faz kontrolü sağlayarak kurutma sıcaklığını ve mikrodalga güç seviyesini ayarlamayı sağlamıştır. Havuç ve elma kurutmada yapılan testlerde, yeni geliştirilen kontrol stratejilerinin kurutulan ürün kalitesini artırıcı etkisi olduğu ve aroma kaybını düşürdüğü görülmüştür. Yine bulanık mantık algoritmasıyla yapılan benzer bir çalışmada Li vd. [223], gerçek zamanlı bir uçucu algılamalı kontrol sistemini mikrodalgalı kurutmada uygulamış. Mikrodalga gücünün sürekli bir şekilde ayarlanması için geliştirilen programla bir veri edinim birimi kontrol sistemine entegre edilmiştir. Havucun kurutulmasıyla yapılan testte ürün kalitesini sağlamak için gerekli güç, sıcaklık ve uçuculuk kontrolü başarıyla doğrulanmıştır. Zhang vd. [224], kurutma odasındaki sıcaklığın ve bağıl nemin gerçek zamanlı kontrolü için adaptif nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) tarafından desteklenen sugeno tipi bulanık çıkarım sistemi (FIS) kullanmışlardır. Çalışmada sırasıyla bulanık mantık sistemi girişi, bulanıklaştırma, çıkarım, normalizasyon ve sonuç, toplama adımlarına karşılık gelecek şekilde için 1-5-5-5-1'lik bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Geleneksel orantısız integral türev kontrol mekanizmasıyla karşılaştırıldığında, bulanık mantık uygulamasıyla bağıl nemdeki dalgalanmanın $\pm 2,5$ 'ten $\pm 0,6$ 'ya düştüğü görülmüştür. Bulanık mantığın kontrol mekanizması olarak kullanılması literatürde ve uygulamalarda çok çeşitli kurutma yöntemleri için kullanılmıştır [225]. Diğer yapay zekâ

sistemleriyle bütünleşik olarak kullanıldığı pek çok uygulama da literatürde yer almaktadır. Bulanık mantık da diğer yapay sistemleri gibi amaca uygun bir şekilde tasarlandığı ve aşamaların uygulanması da gerektiği gibi gerçekleştirildiği takdirde, maliyet düşürücü, kalite ve verim artırıcı kurutma proseslerinin oluşturulmasına büyük katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.10 Bulanık mantık sistemi şematik gösterimi

3.3.3 Yapay sinir ağları (YSA)

YSA, insan beyni aktivitelerinin teorik bir matematiksel modelidir ve ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla birbirine bağlanan düğümler olarak da adlandırılan bir dizi doğrusal veya doğrusal olmayan işleme elemanından oluşur. Bir yapay sinir ağı, giriş katmanı, ara katman (gizli katman) ve çıkış katmanı olmak üzere en az üç katmandan oluşmaktadır. Gizli katmanlar bir veya daha fazla olabilir. YSA' nı oluşturan öğeler; katmanları oluşturan nöronlar arası bağlantı yapısını temsil eden mimari yapı, uygun çıktıyı elde etmek için gerekli güncellemeyi sağlayan öğrenme algoritması ve içerisinde verilerin bulunduğu nöronlardan oluşmaktadır. Genel olarak YSA modeli ileri beslemeli ve geri beslemeli olarak iki farklı mimariye sahip olabilir. Öğrenme algoritması da danışmanlı, danışmansız ve hibrit öğrenme şeklinde üç ana başlık altında incelenebilir [226]. Bir YSA algoritmasının başarısı farklı şekillerde ölçülebilse de genellikle başarı ölçütleri, korelasyon katsayısı (R), belirleme katsayısı (R^2), Ortalama kare hatası (MSE) ya da ortalama mutlak hata (MAE) olarak tanımlanabilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_{pi} - x_{di})^2}{\sum_{i=1}^N (x_{pi} - \bar{x})^2} \quad (3.1)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{pi} - x_{di})^2 \quad (3.2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{pi} - x_{di}| \quad (3.3)$$

Burada x_{pi} gözlem i için tahmin edilen çıktı, x_{di} gerçek çıktıdır, $\bar{x}$ ise olması gereken çıktı değerlerinin ortalaması, N gözlem sayısıdır. YSA ile ilgili ayrıntılı bilgi bölüm 4.3'te verilmiştir.

YSA sistemlerinin kurutma çalışmalarında uygulanması verim ve kalite artırıcı etkisiyle sıklıkla yer almaktadır. Bu tür uygulamalar, proses öncesi genellikle uygun kurutma ortamı koşullarını (sıcaklık, nem, hava hızı...vs.) belirleme, proses sırasında kurutulan cisim içerisindeki, renk, şekil, nem oranı değişimini kontrol ederek uygun koşulları tespit etme, proses sonrası son ürün kalite ve özelliklerinin kontrol edilerek prosesin daha verimli olabileceği koşullara karar verme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sayısal olarak bir kurutma ortamı simülasyonu oluşturarak optimum koşulların belirlenmesi ve sistemin test edilmesi yönündeki çalışmalar da literatürde az da olsa yer almaktadır. Nem içeriğinin

Garavand ve ark. [227] sıcak havalı kurutucuda farklı kurutma havası sıcaklıkları, hızları ve bağıl nem değerleri için mercimek otunun (savory herb) kurutulmasını deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Kurutma işlemi sırasında cisimdeki nem miktarını tahmin etmek için ileri beslemeli bir sinir ağı yapıları oluşturmuşlar, en iyi modelleme ve tahmini gerçekleştiren YSA mimarisini belirlemek için ise genetik algoritma kullanmışlardır. İki adet gizi katmanın, 9 ve 17 adet nöronun bulunduğu mimaride, yüksek doğruluk (0,9992) ve düşük ortalama kare hatası ($9,46 \times 10^{-5}$) sonuçlarının elde edilmesinden de anlaşıldığı gibi, yapılan çalışmada nem oranı tahmininin bu ağ yapısında en başarılı şekilde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Durak [228], yün ipliklerinin konvektif kurutulması deneyinden elde edilen veriler ışığında, kurutma işleminin YSA ile modellemesini

gerçekleştirmiş, simülasyonların farklı kurutma şartlarında elde edilen deneysel veriler ve literatürdeki ampirik modellerle karşılaştırılması yapılmıştır. Deneyler farklı ortam basıncı ve kurutma havası sıcaklıklarında farklı iplik bobini çaplarında elde edilen deneysel verilerle, YSA modelinden elde edilen verilerin birbiriyle uyum içerisinde olduğunu göstermiştir. Ayrıca YSA modeli ile elde edilen sonuçların, literatürde kurutma davranışını ürün nem oranı (moisture ratio) ile ifade eden pek çok ampirik ve yarı ampirik modelden elde edilen sonuçlardan daha yüksek doğrulukla deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür (90 °C hava sıcaklığında elde edilen $R=0,999574$). Plastik üretimi gibi birçok alanda kullanılan çalıda benzer *panicum virgatum* bitkisinin kurutulmasında YSA ile nem içeriği tahmini başarıyla gerçekleştirilmiştir [229]. Çeşitli kurutma işlemlerinde özellikle nem içeriğinin değişimi ile ilgili YSA kullanımı literatürde sıklıkla yer almıştır. Özellikle nem içeriği tahmininde pek çok çalışmada çok katmanlı algılayıcı (MLP) YSA yöntemi kullanılmış, başarılı sonuçlar elde edilerek verim artışı sağlanmıştır [230–234]. Tarafdar ve ark., mantarların dondurularak kurutulması işlemine, kurutma davranışlarının tahmini için üç farklı YSA algoritması kullanmışlardır. Farklı YSA yapılarıyla nem içeriği, nem oranı ve kurutma hızı tahmini yapılmış, kurutma odası için farklı kurutma süreleri, sıcaklık ve basınç değerleri, mantarlar için ise farklı kalınlık ve başlangıç nem değerlerinde yapılan incelemelerde, yüksek doğruluk değerlerine ($R=0.97$) ulaşılmıştır [235]. Gıdaların kurutma işlemi sırasında meydana gelen renk, tat, deformasyon, kimyasal içerik değişimi gibi kalite parametrelerinin ölçümü için de YSA algoritması uygulanan pek çok çalışma da göstermiştir ki, bu yapay zeka uygulaması kurutmadaki karmaşık ve doğrusal olmayan davranışları tahmin etmede yüksek başarı elde etmiştir [236–238]. YSA özellikle son yıllarda özellikle gıdalarla ilgili proseslerde verim artırıcı etkisi sebebiyle sıklıkla kullanılmıştır. Kurutma işlemi baz alınacak olursa, üzümün kurutulmasında model oluşturma ve kontrol amaçlı [239], balık yağının spreyle kurutulması ve yine sprey kurutucuda yağsız süt tozu elde edilmesi işlemi ekserji analizinde [240], havucun sıcak hava ve kızgın buharlı sistemlerle kurutulmasında nem kaybı ve büzülmenin tahmininde YSA kullanılmıştır [241]. Hernandez ve ark. [237], iki farklı ileri beslemeli sinir ağı yapısı kullanarak cassava ve mango meyvelerinin kurutulmasında sıcaklık ve nem değişiminin çevrimiçi tahminini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada simülasyon ve deney sonuçları da karşılaştırılarak sistemin doğruluğu kanıtlanmıştır. Farklı kalınlıklardaki elma dilimlerinin sıcak havayla kurutulmasında, çok katmanlı algılayıcı YSA kullanılmış, farklı kurutma havası sıcaklık ve hız değerleri için

kalınlık renk değışimi ve nem içeriği ilişkisi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar 0,92 korelasyon katsayısıyla tatmin edici olmuştur [242]. Geri yayılımlı çok katmanlı YSA yapısı, endüstriyel kurutucuların performans analizi için kullanılmış, bu şekilde test ve iyileştirme maliyetlerinin de dūřürölmesi hedeflenmiştir [243,244]. Tablo 3. 7’ de çeşitli kurutma sistemlerinde uygulanan YSA uygulamaları yer almaktadır.

Tablo 3.7 Literatürde yer alan kurutma çalışmalarında YSA kullanımı

YSA türü	Amaç	Girdi/ıktı	Sonuç	Referans/Yı l
MLP	Mango ve cassava nın kurutulmasında ısı ve kütle transferinin tahmini	Hava sıcaklığı, hızı, büzölme, zaman, hava nemi/ sıcaklık, ürün nem miktarı	Sıcaklık içi belirleme katsayısı $R^2=0,91$, ürün nem miktarı için $R^2=1$ ile yüksek doğruluk içeren çıktılar elde edilmiştir.	Hernández-Pérez ve ark., 2004 [237]
İleri beslemeli YSA L-M algoritması	Muzun sıcak havayla ve dondurarak kurutulmasında antioksidan aktivitesi ve fenolik bileşiklerinin analizi	Ürün eşitdi, kuruluk durumu, özüt tipi ve sırası/ Antioksidan aktivitesi, fenolik bileşik içeriği	Metanol ve aseton özütleri tahmininde maksimum 0,8258 korelasyon katsayısı (R) ve antioksidan aktivitesinde 0,90 R değeri ile iyi tahminler elde edilmiştir.	Guiné ve ark., 2015 [236]
MLP	Üzümün sıcak havayla kurutulmasında evrimii görüntölleme ve kontrol	Kurutma havası sıcaklığı, hızı, büzölme ve t süresindeki nem miktarı/ $t+\Delta t$ süresindeki nem miktarı	Eğitimde 4×10^{-5} ortalama kare hatası (MSE) ve 0,99947 R^2 değeri, testte 3×10^{-5} MSE ve 0,99952 R^2 değeri ile iyi tahminler elde edilmiştir.	Behrozzi ve ark., 2013 [239]
MLP	Spreyli kurutmayla yağsız süttozu ve balık yağı	Kurutma havası giriş sıcaklığı, kurutma havası	Ekserji verimi tahmininde $R^2=0,9994$, ekserji kaybında	(Aghbashlo ve ark., 2012 [240])

	elde edilmesinde enerji ve ekserji analizi	kütle akış hızı, sıvı kütle akış hızı, sprej akış hızı/Kurutma odasına toplam giriş ve çıkış ekserjileri, entropi üretimi, ekserji verimi	$R^2=0,9841$ değerleriyle yüksek doğruluk elde edilmiştir.	
Geri yayımlı YSA, L-M algoritması 1	Endüstriyel bir kurutucuda yüksek tonajlı mısır kurutma işleminin analizi	Ortam sıcaklığı, bağıl nemi, çıkış bağıl nemi, giriş, çıkış ve baca gazı havası sıcaklığı/ Mısır nem miktarı, ısı değiştirici ekserjetik verimi, radyatörün enerji geri kazanım oranı	Nem içeriği için $R^2=0,998$ Ekserji geri kazanımı için $R^2=0,992$ Ekserji verimliliği için $R^2=0,98$ değerleri elde edilmiştir.	B. Li ve ark., 2020 [243]
MLP	Ayva dilimlerinin konvektif kurutulmasında kurutma performansının tahmini	Kurutma havası sıcaklığı, hızı/ Nem içeriği	Deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında nem içeriği değerinde %99'dan daha yüksek doğruluk görülmüştür.	Chasiotis ve ark., 2020 [245]
MLP	Soğanın kurutma davranışının tahmini	Sıcaklık, süre/ nem oranı	Geliştirilen model farklı sıcaklıklarda ve kurutma sürelerinde kurutma kinetiği ile ilgili 0.99956 doğruluk katsayısı (R) değeri ile yüksek performans sergilemiştir.	Jafari ve ark., 2016 [246]
MLP	Patates	Sıcaklık, yatak	Geliştirilen model	Azadbakht

	küplerinin akışkan yataklı kurutulmasında , enerji kayıpları analizi	derinliği/ekserji i verimliliği, ekserji kaybı, enerji kullanımı enerji kullanım oranı	enerji kayıpları tahminini ve enerji ve ekserji analizini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiş, 0,99 R değeri elde edilmiştir.	ve ark., 2017 [247]
MLP-İleri beslemeli	Domatesin kurutulmasında , kurutma işleminin YSA ile oluşturulan matematiksel modelle karşılaştırılması	Isıtıcı gücü, kurutma havası hızı/ Nem oranı	YSA ile oluşturulan matematiksel modellerin domatesin kurutma davranışını ampirik korelasyonlara bir alternatif olarak açıkladığı görülmüştür.	Movagharne ve ark., 2007 [233]
Çok katmanlı-İleri beslemeli	Havucun kurutma davranışının dinamik olarak tahmin edilmesi	Kurutma havası sıcaklığı, hızı, ürün kalınlığı/ Nem miktarı	Geri yayımlı YSA algoritmasının kurutma işlemi sırasında nem içeriğini iyi bir şekilde tahmin ettiği görüldü	Erentürk ve ark., 2007 [232]
Çok katmanlı, ileri beslemeli	Mango zerdeçalın mikrodalgalı kurutulmasında kurutma kinetiğinin tahmini	Mikrodalga gücü/ Nem oranı, kurutma hızı, efektif difüzivite	Kurutma boyunca cisim içerisindeki nem miktarı 0,985 R ² değeriyle yüksek doğrulukta tahmin edildi	Krishna ve ark., 2012 [248]
Geri yayılım İleri beslemeli MLP	Vişnenin kızılötesi-konvektif kurutulmasında nem difüzyonu ve enerji tüketiminin tahmini	Kızılötesi gücü, kurutma havası sıcaklık ve hızı/ Efektif difüzivite, spesifik enerji tüketimi	Tahminlerde en iyi sonuç efektif difüzivitede 0,9944 ve enerji tüketiminde 0,9905 R ² değerleriyle elde edildi.	Chayyin ve ark., 2014 [249]
Geri yayılım	Mantar ve sebzelerin	Kurutma süresi,	Regresyon modelinde yüksek	Jena ve ark.,

MLP	kurutulmasında nem yayılımının regresyon modelleri ile tahmini	sıcaklığı, hava hızı, ürün boyutları, efektif difüzivite/ Ampirik modeldeki altı sabit	doğruluk elde edilmiştir.	2013 [250]
Geri yayımlı YSA (logik ak. fonk.)	Bezelyenin akışkan yataklı ve mikrodalgalı kurutulmasında kurutma süresinin tahmini	Kurutma havası sıcaklığı, ürün nem miktarı /Kurutma süresi	0,98 belirleme katsayısıyla (R^2) yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir.	Momenza ve ark., 2012 [251]
Geri yayımlı - LM algoritmali YSA	Kivinin konvektif-kızılötesi kurutulmasında enerji analizi	Yüzey sıcaklığı, hava giriş sıcaklığı ve hızı, zaman/ Enerji tüketimi, nem miktarı	R^2 0,99 ve kök hata kareleri hatası (RMSE) 0,001 sonuçları tahmin değerlerinin yüksek doğrulukta olduğunu göstermiştir.	Özdemir ve ark., 2017 [252]
İleri beslemeli LM algoritmali YSA	Elmanın konvektif kurutulmasında nem kaybının öngörülmesi	Ürün özellikleri, sıcaklık/ Nem, asidite, sertlik, yapışkanlık, çignenebilirlik	Her özellik için yüksek doğrulukta çıktılar elde edilmiştir.	Guine ve ark., 2014 [253]

4 MATERYAL ve METOT

Tez kapsamında yaygın bir kurutma yöntemi olan konvektif kurutma işleminde kurutma performansının etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve bunların kurutma kinetiği ve performansı üzerine etkileri sayısal olarak araştırılacaktır. Etken parametreler ele alınarak en verimli kurutma prosesinin sağlanması için araştırmacılara yol gösterici bir kaynak oluşturmak hedeflenmiştir. Yapılan sayısal çalışmalar için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış, simülasyonlar ve çözümler için ticari HAD kodlarından faydalanılmıştır. Konvektif kurutmaya ilgili yapılan sayısal çalışmada üç temel fiziksel olgu ele alınarak ön plana çıkmıştır:

- Isı transferi (zorlanmış taşınım, iletim)
- Çok fazlı kütle transferi (moleküler difüzyon, konvektif akı, kapiler akı)
- Çok fazlı akış (gaz, sıvı)

Tüm bu fiziksel olgular hem kurutma ortamı olan cisim etrafındaki hava, hem de cisim için ayrı ayrı ele alınmış, kullanılan ticari kodla bütünleşik bir çözüm yöntemi uygulanmıştır. Yani ısı ve kütle transferinin bir arada ele alındığı bir çözüm yöntemi uygulanmıştır.

Farklı kanal geometrilerinde, gözenekli ve nemli cisme ait farklı şekilleri hareketli ya da durağan olması, birden fazla cisim bulunması ve cisimlerin kanal içerisindeki yerleşimi gibi etkiler de ele alınmıştır.

Aynı zamanda çalışmada etkin simülasyonlar yapmak amacıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) metodu uygulanmıştır. Bunun yanında kurutma performansının optimize edilmesi için HAD ile birlikte optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bütünleşik ısı, kütle transferi problemi için Uygun Ortogonal Ayırıklaştırma (UOA) metoduna dayalı matematiksel bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemle kurutma performansı çok zaman gerektiren HAD analizlerine yardımcı olmak üzere performans tahmini için kullanılabilecektir.

4.1 Akış Alanı, Isı ve Kütle Transfer Denklemleri

4.1.1 Kanal içerisindeki yöneten denklemler

Çalışmada, kurutma işlemi bir kanal içerisinde gerçekleştirilmiştir. İlk önce kanal içerisindeki kurutma havası için akış denklemleri uygulanır. Sayısal çalışmalarda, farklı akış rejimleri göz önüne alınmıştır, hem laminar akış koşulları hem de türbülans akış modeli uygulanmıştır. Her iki koşul için de kütle, momentum ve enerji denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

a) Laminer akış modeli:

Bu modelde, kanalda Newtonyen ve sıkıştırılamaz akışkan varsayımları dikkate alınırken, kanaldaki nemli hava için kütle dengesi, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [254,255];

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_a \vec{u} = 0 \quad (4.1)$$

$$\rho_a \frac{\partial u}{\partial t} + p_a \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla \cdot \left[p \vec{I} + (\mu_a) \left((\nabla \vec{u}) + (\nabla \vec{u})^T \right) - \left(\frac{2}{3} \right) (\nabla \cdot \vec{u}) \vec{I} \right] \quad (4.2)$$

$$\rho_a C_{p,a} \frac{\partial T}{\partial t} \nabla \cdot (k_a \nabla T) + \rho_a C_{p,a} \vec{u} \nabla T = 0 \quad (4.3)$$

b) Türbülanslı akış modeli

Türbülans durumunda, istatistiksel bir olasılıkla, süreç değişkenlerinin akış rejimi içerisinde belirli bir değer aralığında olacağı varsayıldığında, RANS (Reynolds ortalama Navier-Stokes) denklemleri kullanılır [256]. Türbülansın akış alanındaki etkisi bu denklemlerle zaman ortalama olarak belirlenecektir, bu denklemler zaman ortalama Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılır. Bu ortalama alma yöntemi türbülans akış rejiminin stokastik özelliklerini ortadan kaldırır ve Reynolds gerilmesi (Reynolds Stress) adı verilen ve farklı denklem sistemleri ile modellenebilen altı ek gerilim oluşturur [129].

LES (Large Eddy Simulation) türbülans modeli, yüksek derecede anizotropik büyük türbülanslı girdapların akış alanının geometrisine ve ortalama hız gradyanlarına bağlı

olduğu gerçeğine dayanmaktadır. Bu modellerde hız alanı büyük girdapları temsil eden çözülmüş bir kısma ve küçük ölçekleri temsil eden bir alt-ızgaralı kısma ayrılmıştır. RANS modelleri, kompleks sistemlerin simülasyonlarında tatmin edici sonuçlar verir, ayrıca diğer yöntemlere göre daha az maliyetli sistemlerdir. LES modeli doğruluğu yüksek bir yaklaşım olsa da zaman alıcıdır ve güçlü bilgisayarlar gerektirir, dolayısıyla pahalıdır. Günümüzde kurutma işlemlerini modellemek için gelişmiş daha yüksek doğruluğa sahip hibrit RANS-LES gibi yöntemler kullanılmaktadır [118].

Bahsedilen türbülans modellerinin hepsinin belli avantajları ve dezavantajları vardır, hangi modelin uygulanacağına ilişkin tahmin güçlü bir şekilde sistemin geometrisine ve akış durumuna bağlıdır. Sıklıkla kullanılan türbülans modelleri aşağıda açıklanmıştır.

Standart k-ε türbülans modeli:

Sıcak hava, gözenekli nemli nesnelerin yüzeyi üzerinden akar. Cisimlerin sıcaklığı başlangıçta kanalın ortam sıcaklığında sabittir ve sıcak hava ile temas ettiklerinde sıcaklıkları artmaya başlar. Sıcak havadan nesnelere ısı transferi, nesnelerden havaya nemin geçmesine ve havanın nemlenmesine neden olur. Kanaldaki sıcak hava akışı için standart k-ε türbülanslı akış koşulları için girdap viskozitesi ve momentum denklemleri aşağıdaki gibidir [257];

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} P_k \quad (4.4)$$

$$\rho_a \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_a (\vec{v} \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu_a + \frac{M_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.5)$$

$$\rho_a \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_a (\vec{v} \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu_a + \frac{M_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.6)$$

burada k kinetik enerji ve ε türbülanslı akışın enerji dağılımı, P_k viskoz efektlerden kaynaklı kinetik enerji üretimi, C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, türbülanslı akışlarda yaygın olarak kullanılan boyutsuz sabitlerdir ve aşağıdaki gibi yazılır [104]:

$$C_{\mu} = 0,09, \sigma_k = 1,00, \sigma_{\varepsilon} = 1,30, C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92$$

RNG k-ε türbülans modeli:

Standart k-ε' ye benzer bir modeldir, ancak bazı dağılma oranlarının gelişimi için ilave ifadeler ve standart k-ε modeli sabitlerinden farklı bazı sabitler içerir. Bu model, Navier-Stokes denklemlerinin renormalizasyon grup analizine dayanmaktadır. Türbülans üretim ve dağılım için taşıma denklemleri standart k-ε modeli için olanlarla aynıdır, ancak model sabiti bir fonksiyonla değiştirilir. Modelin bazı avantajları, ampirik bağıntılardan bağımsız olması ve kompleks akışların düzensizliğini de hesaba katabilmesidir. Ayrıca devirdaim akışlarında iyi sonuçlar elde edilir.

Gerçekleştirilebilir(Realizable) k-ε türbülans modeli:

Ampirik türbülans modeli sabiti yerine (Standart k-ε modeli gibi), türbülans akış özelliklerinin ve ortalama akışın bir fonksiyonu olan bir sabit terim. Böylece Reynolds gerilme tensöründeki belirli matematiksel kısıtlamaları türbülanslı akışın fiziğine uygun bir şekilde karşılar. Ayrıca yayılım hızı için geliştirilmiş yeni bir modeldir. RNG modeli ile benzer avantajları vardır, ayrıca jet çarpması gibi karmaşık durumlar için de uygundur.

Standart k-ω modeli:

Bu modelde k, türbülans kinetik enerjisi ve ω, özgül yayılım hızıdır (birim türbülans kinetik başına dağılma hızı). Avantajlarından biri düşük Reynolds sayılı akışlarda duvar kenarı akışı incelemesidir. Bu model k-ε için gereken karmaşık lineer olmayan sönümler fonksiyonlarını içermez bu sebeple daha kesin sonuçlar ortaya çıkarır. Düşük Reynolds k-ε modeli tipik olarak $y^* > 0.2$ lik bir yakın duvar çözünürlüğü gerektirirken, Reynolds k-ω modeli en az $y^* > 2$ lik bir yakın duvar çözünürlüğü gerektirir. Bazı endüstriyel akışlarda bu değer bile garanti edilemez ve bu sebeple duvara yakın ek bir yaklaşım kullanılması gerekir. Bu modelde türbülans viskozitesi aşağıdaki bağıntıyla türbülans kinetik enerjisi ve türbülans frekansına bağlıdır:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.7)$$

Reynolds gerilme modeli:

Bu model, Reynolds gerilimleri için taşıma denklemlerini içerir. Bunlar, türbülans enerjisi yayılım hızı ve her bir skaler özelliğin türbülanslı akıları için üç ayrı taşıma denklemdir. Bu model, fiziksel olarak en eksiksiz model olarak tanımlanabilir. Ters basınç gradyanları olduğu durumlarda ve kompleks akışlarda uygundur. Fakat uzun hesaplama süreleri ve yüksek güç sarfıyatı gerektirebilir. Literatürde düşük doğruluk içeren bazı sonuçlara da rastlanmıştır.

4.1.2 Gözenekli cisim denklemleri

Gözenekli cisimlerde, içinde gaz ve sıvı fazlarının barındıran çok fazlı akış geçerlidir. Ürünün içindeki nemin transferi hem sıvı hem de gaz fazında gerçekleştirilebilir. Kurutulmuş malzemelerde nem hareketi için literatürde de bahsedilen aşağıdaki mekanizmalar mevcuttur [258].

Kılcal kuvvetlerden kaynaklanan sıvı hareketi, özellikle ilk kurutma döneminde ürün içerisindeki kılcal damarlardaki sıvının transferini sağlar. Nemin hareketi ise kılcal potansiyel gradyanından kaynaklanır. Konsantrasyon gradyanlarından kaynaklanan sıvı difüzyonu, ürünün içindeki nem miktarıyla orantılı olacak şekilde sıvı formunda bir nem akısı oluşturur. Sıvı difüzyon kavramı ilk kez Levis (1921) tarafından önerilmiş ve sıvıdaki nem hareketinin tanımı için diğer bazı yazarlar tarafından kabul edilip uygulanmıştır. Toplam basınçtaki farklılıklar nedeniyle sıvı ve buhar akışı, Darcy' nin gözenekli cisimlerdeki akış modeli ile tanımlanır. Dış basınç, büzülme, yüksek sıcaklıklar ve kılcallık etkileri bu tür hareketler içerebilir, bu nem akısı daha çok kurutmanın ilk döneminde gerçekleşir. Buhar konsantrasyonundaki fark nedeniyle buhar difüzyonu kılcal gözenekli cisimlerde nemin buhar fazındaki transferini tanımlayan Fick' in yasasına dayalı ana modeldir. Çoğunlukla ikinci kurutma dönemi ile ilgilidir.

Kısmi buhar-basınç gradyanları (Stefan akışı) nedeniyle buharlaşma bölgesi malzemenin içine çekildiğinde buhar difüzyonu meydana gelir. Malzeme içerisindeki buhar üretimi o kadar yoğundur ki, önemli bir buhar basıncı gradyanı ortaya çıkar.

Ozmotik basınçtan kaynaklanan nem hareketi, çözünür ve çözünür olmayan fraksiyonlar içeren kolloidal cisimlerle ilgilidir. Çözünmeyen fraksiyonlar yarı geçirgen

hücreler oluşturur, burada su için geçirgen fakat çözücü olmayan kısımlar için geçirgen olmayan bir yapı vardır. Çözünür kısmın hücre dışında, içinde olduğundan daha düşük konsantrasyona sahip olması su doygunluğunun ardından, iç kısımda dışarıya göre daha fazla basınç artışına neden olur. Hücre içerisindeki basıncın dışarıya göre fazla olması durumuna ozmotik basınç denir. Hücrelerin dışındaki su, kurutma süresince uzaklaştırılması suyun hücrelerden hareketinden kaynaklanan basınç farklarına sebep olur.

Buhar efüzyonu, buhar moleküllerinin serbest yolunun cisim içindeki gözenek çaplarına göre düzenlenmesidir. Burada su buharının hareketi Knudsen modeli olarak bilinir.

Termodifüzyon, izotermal olmayan koşullarda gerçekleşir. Burada cisimdeki ısı akısıyla aynı yönde, sıcaklık farklarından kaynaklanan ilave bir nem akısı meydana gelir.

Buharlaştırma-yoğunlaştırma mekanizması, ikinci kurutma periyodunda kritik kuruma noktasından sonra meydana gelir. Kılcal damarların içindeki nem füniküler (gözenek duvarları boyunca devamlı) ve sarkaç biçimli (sıvının izole ceplerde durması) biçimindedir. Bu dönemde ürünün ısısı arttığı için sıcaklık gradyanı da ürünün iç kısmına doğru artar. Sıcak bölgedeki sıvı partiküller burada bulunan hilal biçimli ceplerden soğuk kısımlara göre daha hızlı buharlaşır. Buna ilaveten, daha soğuk bölgedeki buharın bir kısmı cep yüzeylerinde yoğunlaşır. Bu sebeple, daha sıcak kısımdaki ceplerin eğriliği soğuk kısımlara göre fazladır. Daha yüksek eğrilikteki gözenekler daha fazla gerilim oluşturur, böylece sıcak bölgelere doğru bir hareket meydana gelir. Bu şekilde sıvı cepler sınır yüzeylerine doğru yaklaşır [258].

Nispeten büyük gözeneklere sahip malzemelerde, buharlaştırma bölgesi kurutma süresince genişler. Kurutulan ürün doymamış bölge, buharlaşan bölge ve doymuş bölge olarak üç bölüme ayrılır, Doymamış bölgedeki nem transferi buhar fazında gerçekleşirken, doymuş kısımdaki ise sıvı fazda gerçekleşir.

Gaz fazının gözenekli bölge içindeki akışı, yukarıda açıklanan Fick'in ikinci yasasından türetilen Brinkmann denklemleri ile tanımlanabilir, bu denklem gaz fazındaki parçacıklarının nemli havadaki moleküler difüzyonunu açıklar ve buna ek olarak, iki faz arasındaki basınç gradyanlarından kaynaklanan Darcy akışı ve sıvı moleküllerin

çekiminden kaynaklanan kılcal akış hesaba katılır. Sıvı fazın kılcal akışı, konsantrasyon ve sıcaklık gradyanlarından kaynaklanan kılcal ve çekici kuvvetlerin bir sonucu olarak meydana gelir ve Datta'nın referans alınan çalışmasında sıvı akıları aracılığıyla açıklanmıştır [259].

Sıvı faz, gaz fazı ve havanın kütle dengesi denklemleri, gözenekli ortamdan kuvvetli bir şekilde dağıtılmış buharlaşmanın izotermal olmayan bir formülasyonu ile açıklanmaktadır [259] :

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_l) = -R_{evap} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial c_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_g) = R_{evap} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_a) = 0 \quad (4.10)$$

Bu denklemlerde, R_{evap} buharlaşma hızıdır ve $\vec{n}$ gaz fazı için Darcy kanunuyla tanımlanan konvektif ve Fick tarafından tanımlanan difüzyif akıların ve sıvı faz akısının toplamıdır. Basınç gradyanlarından kaynaklanan konvektif akı Darcy' nin kanunuyla aşağıdaki gibi tanımlanır [260]:

$$n_g^p = -\rho_g \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial s} \quad (4.11)$$

Denklemlerde, g gaz fazını belirtmektedir, n_g^p kütle akısıdır, P gazın toplam basıncı, ρ_g yoğunluğu ve μ_g gazın dinamik viskozitesidir. Gaz fazı geçirgenliği;

$$\kappa_g, \kappa_g = \kappa \kappa_r$$

olarak hesaplanır, burada κ iç geçirgenlik ve $\kappa_{r,g}$ gaz fazının bağıl geçirgenliğidir ve aşağıda geçirgenliğin kısaca tanımı ve geçerli bağıntılar verilmiştir.

Her fazın bağıl geçirgenliği, fazların doygunluğu ve özellikleri ile ilgilidir. Bu problemde, κ_r 'yi tanımlayan işlevler her zaman pozitif olacak şekilde tanımlanır [259].

$$\kappa_{r,g} = \begin{cases} 1-1,1S_l, S_l < 1/1,1 \\ 0, & S_l \geq 1/1,1 \end{cases}$$

$$\kappa_{r,w} = \begin{cases} \left(\frac{S_l - S_{ir}}{1 - S_{ir}} \right)^3, S_w > S_{ir} \\ 0, & S_w \leq S_{ir} \end{cases} \quad (4.12)$$

S_{li} değişkeni sıvı fazın indirgenemez doygunluğunu ifade eder ve sabit bir değere sabittir. Mevcut sayısal çalışmalarda bu değer 0,1 alınmıştır.

Gaz parçacıklarının gaz karışımlarındaki moleküler difüzyonu, Fick yasasıyla tanımlanır ve difüzyon akısının denklemi şu şekilde tanımlanır:

$$n_g^d = -D_g \frac{\partial C_g}{\partial s} \quad (4.13)$$

D_g ve c_g , gözenekli cisimdeki gazın moleküler difüzivite ve konsantrasyonunu belirtir. Difüzivite, tüm kütlenin yığın (bulk) difüzivitesi D , τ akış yatağındaki kıvrımılık ve gözeneklilik ε ile ilgilidir:

$$D_g = \frac{D}{\tau} \varepsilon \quad (4.14)$$

Gözeneklilik ise şu şekilde ifade edilir:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V_g + \Delta V_l}{\Delta V} \quad (4.15)$$

ΔV gözenekli cisimlerin toplam temsili hacmini tanımlar ve şu şekilde verilir:

$$\Delta V = \Delta V_g + \Delta V_l + \Delta V_s \quad (4.16)$$

Buradaki indisler, g , gaz, l , sıvı ve s , katıyı göstermektedir. Doygunluk, gözeneklerin su ya da gaz ile dolumu ile ilgilidir. Doygunluk, su ya da gaz hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanır.

$$S_l = \frac{\Delta V_l}{\Delta V_g + \Delta V_l} = \frac{\Delta V_l}{\varepsilon \Delta V} \quad (4.17)$$

$$S_g = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_g + \Delta V_l} = \frac{\Delta V_g}{\varepsilon \Delta V} \quad (4.18)$$

Sıvı doygunluğu aşağıdaki gibi de belirtilebilir:

$$S_l = \frac{C_l M_l}{\rho_w \varepsilon} \quad (4.19)$$

Burada M_l sıvının molar kütesidir ($kg \ mol^{-1}$) ve ρ_l sıvı yoğunluğu ($kg \ m^{-3}$) ve c_l sıvının konsantrasyonudur ($kg \ m^{-3}$).

Açıkça anlaşılmalıdır ki basınç farklarından dolayı oluşan kütle akışı hem akışkan hem de gözenekli matrisin özellikleriyle ilişkilidir. Çünkü yoğunluk viskozite ve geçirgenlik değişkendir. Sıvı faz için ise hem kılcal etkilerden dolayı hem de basınç farklarından kaynaklanır. Sıvı fazın kütle akışı aşağıdaki gibi tarif edilir:

$$n_l^p = -D_c \frac{\partial c_l}{\partial s} - D_T \frac{\partial T}{\partial s} \quad (4.20)$$

Burada D_c ve D_T sırasıyla kapiler etkilerden dolayı oluşan difüzyon ve sıcaklık değişimlerinden dolayı oluşan difüzyondur ve aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir [102]:

$$D_c = -\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial c_l} \quad (4.21)$$

$$D_T = -\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial T} \quad (4.22)$$

Denklemlerde p_c kapiler etkilerden dolayı oluşan basınçtır ve P toplam basınç, p_l ise sıvı basıncı olmak üzere, $p_c = P - p_l$ bağıntısı sıvı fazdaki kütle akışının basınç farklarından kaynaklandığını açıklar.

Kurutulacak cisim, içerisinde farklı fazları barındıran gözenekli bir yapıda olduğu için, yukarıdaki denklemlerde kullanılacak termmofiziksel özelliklerin de bu yapıya uygun olarak düzenlenmesi gereklidir. Literatürde efektif yoğunluk, özgül ısı, termal iletkenlik ve

difüzivite için pek çok farklı model bulunmaktadır [261–263]. Aşağıdaki bağıntılar, tez çalışmasındaki hesaplamalarda kullanılan efektif termofiziksel özellikleri ifade etmektedir. Efektif yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletkenliği cismin içerisindeki nemin su olduğu düşünülerek g, w, s ve ma indisleri sırasıyla gaz, sıvı su, katı fazlar ve nemli havayı temsil edecek şekilde aşağıdaki gibi tanımlanır [49,186,259]:

$$\rho_{eff} = \rho_s (1 - \varepsilon) + (S_g \rho_g + S_w \rho_w) \quad (4.23)$$

$$c_{p,eff} = \frac{(S_g \rho_{ma} c_{p,ma} + S_w \rho_w c_{p,w})}{\rho_{eff}} \quad (4.24)$$

$$k_{eff} = k_s (1 - \varepsilon) + k_w \varepsilon S_w + k_g \varepsilon (1 - S_w) \quad (4.25)$$

Efektif difüzivite aşağıdaki gibi verilir:

$$D_{eff} = D_{va} \varepsilon^{3/4} S_g^{10/3} \quad (4.26)$$

D_{va} buhar-hava difüzyonunu temsil eder ve $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak alınır [40].

Gözenekli cisimler için enerjinin korunumu denklemi de aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\rho_{eff} c_{peff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_g h_g + \vec{n}_a h_a + \vec{n}_w h_w) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) - h_{fg} R_{evap} + \dot{q} \quad (4.27)$$

Burada denklemin sağ tarafındaki ilk terim zamana bağlı terim, ikincisi ise konvektif ısı transferi terimidir. Sol taraftaysa ilk başta iletimle olan ısı transferi sonraki terim ise buharlaşmadan olan ısı transferidir, son terim ise kaynak terimidir. h_g, h_a, h_w sırasıyla su buharı, hava ve suyun entalpilerini (J) verir. Görüldüğü gibi, cismin içerisindeki nemin üç fazı için de (gaz, hava ve sıvı) konvektif ısı transferi hesaba katılmıştır. Buharlaşma teriminde h_{fg} (J/kg) buharlaşma gizli ısısını verirken, R_{evap} da hacimsel buharlaşma kızını (kg/m^3s) ifade etmektedir.

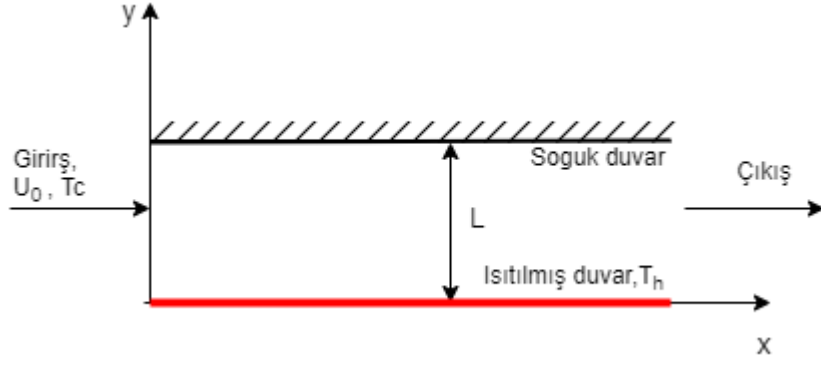
4.2 Çözüm Metodu

4.2.1 Sonlu elemanlar yöntemi

Mevcut problem geometrisinin ayrıklaştırılması ve ana denklemlerin çözümü “*Sonlu elemanlar yöntemi/FEM*” kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, mevcut çalışma şeklindeki kompleks problemler için sıklıkla kullanılmakta, akışkanlar gibi karmaşık ve düzensiz modelleri sonlu elemanlara bölerek ağlaştırma yapmaktadır. Oluşturulan matematiksel modeller, çok sayıda serbestlik derecesine (degrees of freedom/DOF) sahip diferansiyel denklemleri içermektedir [264]. Sonlu elemanlar yöntemi, ağırlıklı bir artık yöntemidir, burada artık belirli bir diferansiyel denklem (veya bir diferansiyel denklemler sisteminin toplam artığı) belli türden fonksiyonların (tipik olarak kısmi polinomlar) enterpolasyon kullanılarak çözüme yaklaşma yoluyla minimize edilir. SE yönteminin, uygun koşullarda, verilen enterpolasyon denklemleri ile elde edilebilecek en iyi çözümü sağladığı bilinmektedir [265].

Şekil 3.1’ de gösterilen problemde, alt duvarı ısıtılmış olan 2 boyutlu bir L karakteristik yüksekliğine sahip kanal içerisinden U_0 hızıyla geçen sıkıştırılamaz Newtonyen akışkanın sıcaklık değişiminin konuma bağlı olarak incelendiği çalışmada, laminar akış koşullarında akışkan özelliklerinin yoğunluk dışında sabit olduğu varsayılmaktadır. Yoğunluk değişiminde Boussinesq yaklaşımı benimsenmiş, viskoz yayılım ihmal edilmiştir. İlgili değişkenler ve parametreler öncelikle aşağıdaki gibi boyutsuzlaştırılır;

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{u}{U_0}, V = \frac{v}{U_0}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \\ P &= \frac{p}{\rho U_0^2}, \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}, \text{Re} = \frac{U_0 L}{\nu} \end{aligned} \quad (4.28)$$



Şekil 4.1 İki boyutlu kanalda zorlanmış taşınım

Burada, L kanalın uzunluğu, x, y yatay ve dikey yönlerdeki uzaklıklar, u, v sırasıyla yatay (x) ve dikey (y) yöndeki hız bileşenleri, T sıcaklık, p basınç, ρ yoğunluk, T_h ve T_c sıcak ve soğuk duvar sıcaklıklarıdır. U_0 Giriş hava sıcaklığını, X ve Y sırasıyla boyutsuz yatay ve dikey koordinatları, U ve V , sırasıyla yatay ve dikey yönlerdeki boyutsuz hız bileşenleri, θ boyutsuz sıcaklığı, P ise boyutsuz basıncı temsil etmektedir. Re ve Pr de sırasıyla Reynolds ve Prandtl sayılarını temsil etmektedir. Boyutsuzlaştırma tanımlandıktan sonra, yukarıda anlatılan varsayımlar doğrultusunda korunum denklemleri aşağıdaki gibi yazılır;

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (4.29)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (4.30)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (4.31)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4.32)$$

Yukarıdaki korunum denklemleri, sonlu elmanlar metodunu Galerkin yaklaşımıyla çözülecektir. Bunun için, süreklilik denklemi (Denk. 4.29), kütle korunumuyla ilgili

bir kısıtlama olarak tanımlanır, bu kısıtlama da basınç dağılımını elde etmek için kullanılabilir. Penaltı sonlu elemanlar yaklaşımıyla, momentum denklemlerindeki basınç terimi bir penaltı terimiyle yer değiştirebilir ve denk. 4.29' daki sıkıştırılamazlık kriteri aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$P = -\gamma \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \quad (4.33)$$

Süreklilik denklemi büyük γ değerleri için sağlanır ve γ ' nin tutarlı çözümler veren değeri 10^7 olarak belirlenmiştir. Yukarıdaki değeri kullanarak momentum denklemleri (Denk. 4.30, 4.31) aşağıdaki biçime indirgenir;

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \gamma \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (4.34)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \gamma \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (4.35)$$

Problem için belirlenen yönetsel denklemler (Denk. 4.29 – 4.32) uygun sınır şartları da uygulanarak Galerkin sonlu elemanlar yöntemiyle çözülür. Boyutsuz hız bileşenleri ve sıcaklık, temel bir fonksiyon seti $\{\Phi_k\}_{k=1}^N$ kullanılarak genişletilir.

Denklemler sonucunda elde edilen parçalı fonksiyonlar, denklemleri tam olarak sıfıra eşitleyemeyeceğinden Galerkin yöntemi ile denklem 4.34, 4.35 ve 4.32 için bir Ω etki alanında doğrusal olmayan artık denklemleri (R) elde edilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\begin{aligned} R_i^{(1)} = & \sum_{k=1}^N U_k \int_{\Omega} \left[\left(\sum_{k=1}^N U_k \Phi_k \right) \frac{\partial \Phi_k}{\partial X} + \left(\sum_{k=1}^N V_k \Phi_k \right) \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} \right] \Phi_i dXdY \\ & + \gamma \left[\sum_{k=1}^N U_k \int_{\Omega} \frac{\partial \Phi_i}{\partial X} \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} dXdY + \sum_{k=1}^N V_k \int_{\Omega} \frac{\partial \Phi_i}{\partial X} \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} dXdY \right] \\ & + \frac{1}{\text{Re}} \sum_{k=1}^N U_k \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_i}{\partial X} \frac{\partial \Phi_k}{\partial X} + \frac{\partial \Phi_i}{\partial Y} \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} \right] dXdY \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned}
R_i^{(2)} = & \sum_{k=1}^N V_k \int_{\Omega} \left[\left(\sum_{k=1}^N U_k \Phi_k \right) \frac{\partial \Phi_k}{\partial X} + \left(\sum_{k=1}^N V_k \Phi_k \right) \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} \right] \Phi_i dXdY \\
& + \gamma \left[\sum_{k=1}^N V_k \int_{\Omega} \frac{\partial \Phi_i}{\partial Y} \frac{\partial \Phi_k}{\partial X} dXdY + \sum_{k=1}^N V_k \int_{\Omega} \frac{\partial \Phi_i}{\partial Y} \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} dXdY \right] \\
& + \frac{1}{\text{Re}} \sum_{k=1}^N V_k \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_i}{\partial X} \frac{\partial \Phi_k}{\partial X} + \frac{\partial \Phi_i}{\partial Y} \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} \right] dXdY
\end{aligned} \tag{4.37}$$

$$\begin{aligned}
R_i^{(3)} = & \sum_{k=1}^N \theta_k \int_{\Omega} \left[\left(\sum_{k=1}^N U_k \Phi_k \right) \frac{\partial \Phi_k}{\partial X} + \left(\sum_{k=1}^N V_k \Phi_k \right) \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} \right] \Phi_i dXdY \\
& + \frac{1}{\text{Re.Pr}} \sum_{k=1}^N \theta_k \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_i}{\partial X} \frac{\partial \Phi_k}{\partial X} + \frac{\partial \Phi_i}{\partial Y} \frac{\partial \Phi_k}{\partial Y} \right] dXdY
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Yukarıdaki doğrusal olmayan cebirsel denklemler (Denk. 4.36-4.38), indirgenmiş entegrasyon [266,267] ve Newton-Raphson yöntemleri kullanılarak çözülür, çözümler hız bileşenlerine bağlı olarak (U,V) elde edilmiştir. Yukarıda yer alan eşitliklerindeki integralleri değerlendirmek için ikinci dereceden temel fonksiyonlar üç noktalı Gauss Quadrature yöntemi ile birlikte kullanılır. Denklem 4.36 ve 4. 37’ de penaltı parametresini içeren ikinci terim iki noktalı Gauss Quadrature kuralıyla değerlendirilir. Ağırlıklı artıklar sonlu eleman denklemleri (Denk. 4. 36-4.38) için matris vektör notasyonu aşağıdaki gibi ifade edilir [268]:

$$(\mathbf{K}_1 + \gamma \mathbf{K}_2) \mathbf{a} = \mathbf{F} \tag{4.39}$$

Burada $\mathbf{a}$ bilinmeyen vektörü, $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ artıkların Jakobyen matrislerdir. Penaltı parametresi γ , 10^7 gibi yüksek bir değerde ya da yakın olduğunda, kısıt denklemi (ör: süreklilik denklemi) daha iyi sonuç verir, bu da $\mathbf{K}_1$ ’in $\gamma \mathbf{K}_2$ ’ ye kıyasla ihmal edilebilir olacağı sonucunu verir, böylece yukarıdaki denklem aşağıdaki biçime dönüşür:

$$\mathbf{K}_2 \mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{\gamma} \tag{4.40}$$

Bu durumda γ sonsuza gider ve yönetsel denklemler kısıtlı formda kalır. Böylece momentum ve enerji denklemlerinin katkısı tamamen kaybolur. Bunun yanı sıra, büyük γ değeri için $\mathbf{K}_2$ matrisi tekil olmadığı için, denklem çözümü çok küçük ya da sıfıra

eşittir. Çözüm değerinin sıfırdan farklı bir değer alması için, γ 'nın yüksek değerlerinde $\mathbf{K}_2$ matrisinin tekil olması gereklidir. Bu sonuç $\mathbf{K}_2$ için Gauss quadrature yöntemi ve $\mathbf{K}_1$ için üç noktalı Gauss kareleme yöntemi kullanılarak elde edilir. Yukarıda belirtilen indirgenmiş entegrasyon metodunun yokluğundaysa hızlar önemsiz hale gelir [267].

Lineer olmayan artık denklemleri (Denk. 4. 36-4.38) Newton-Raphson prosedürü ile çözülmüş olur, bu şekilde denklem 4.38' deki genişleme katsayıları belirlenir. Her bir iterasyonda, lineer $(3N \times 3N)$ sistemi:

$$\mathbf{J}(\mathbf{a}^n) [\mathbf{a}^n - \mathbf{a}^{n-1}] = \mathbf{R}(\mathbf{a}^n) \quad (4.41)$$

şeklinde çözülür, burada n değeri yinelemeyi temsil eden indistir. Jakobyen matrisin elementleri, $\mathbf{J}(\mathbf{a}^n)$ artık denklemlerindeki hız bileşenlerine (U_j, V_j) ve sıcaklığa (θ_j) bağlı türevleri içerir ve $\mathbf{R}(\mathbf{a}^n)$ artıkların vektörüdür. Her bir yineleme (iterasyon) için indisler numaralandırılır bu şekilde jakobyen bir bant matrisi oluşturur. Yineleme, yakınsama değeri $\left[\sum (R_i^{(j)})^2 \right]^{0.5} \leq 10^{-6}$ olduğu zaman sonlanır.

Tez konusu olan sayısal çalışmalarda sonlu elemanlar metodunun uygulanmasında gerçekleştirilen adımlar sıralanacak olursa, öncelikle fiziksel problem belirlenmiştir. Bu çalışmada fiziksel problem konvektif kurutma işleminin kanal ya da kavite içerisinde uygulandığı bir simülasyondur. Kanal içerisinde akışı ve dolayısıyla taşınınm ısı transferini etkileyici bazı unsurlar ilave edilebilmekte veya kurutulacak cisimlerin şekli, boyutu sabit ya da hareketli olma durumu değiştirilebilmektedir. Ayrıca kanal veya kavite şekli ve boyutu da değiştirilebilmektedir. Buna göre ilk aşama problem geometrisinin belirlenmesidir. Daha sonra fiziksel problem için hangi yönetsel denklemlerin uygulanacağı belirlenmiştir. Mevcut çalışmada, akışkan akışı, ısı ve kütle transferi için korunum ve enerji denklemlerini içeren Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır. Denklemlerin oluşturulmasından sonra başlangıç ve sınır şartları belirlenir ve problem ayrıklaştırılması yapılır, ayrıklaştırma türü belirlenir (bir, iki, üç boyutlu). Bu problemde iki ya da üç boyutlu ayrıklaştırma yapılmıştır. Daha sonra çözümde uygulanacak alt yönteme göre şekil fonksiyonları belirlenir, sonlu eleman denklemleri oluşturulur ve

rijitlik matrislerinin cinsine göre uygun çözücülerle çözüm gerçekleştirilir. Sonlu elemanlar yönteminin hesaplama aşamaları Şekil 4.2’ de verilmiştir.

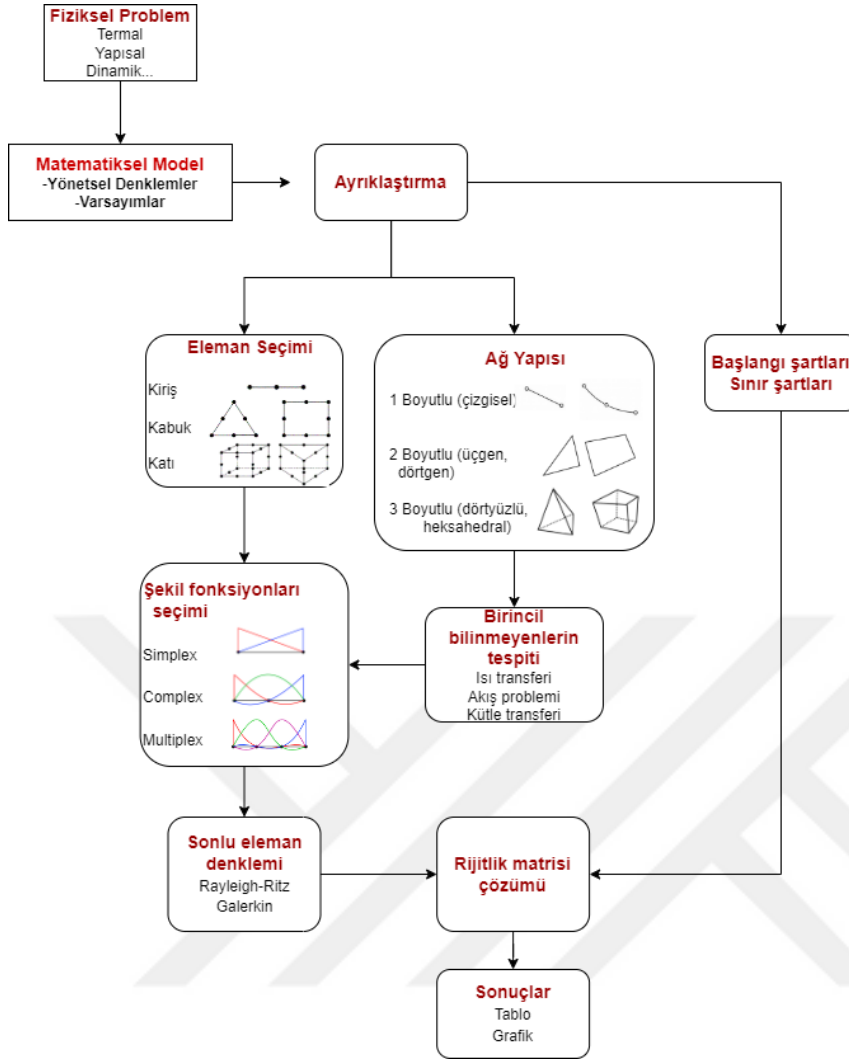
4.2.2 Zamana bağlı konveksiyon-difüzyon problemi için çözüm metodu:

Basit bir konveksiyon-difüzyon probleminde hangi etkinin baskın olduğu boyutsuz Peclet sayısı ile aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$Pe_L = \frac{uL}{\alpha} = Re_L Pr \quad (4.42)$$

Denklemden, u hız bileşeni, L karakteristik uzunluk, α termal yayılım katsayısıdır Re ve Pr de sırasıyla karakteristik uzunluk boyunca Reynolds sayısı ve Prandtl sayısıdır. Yüksek Pe değerleri için ($Pe > 1$), yani taşınımın baskın olduğu durumlarda Galerkin sonlu elemanlar yöntemi, düğümünden düğüme yapay salınımlardan dolayı yüksek sapmaların oluştuğu sonuçlar çıkarabilir [269]. Benzer sonuçlar sonlu farklar merkezi fark yaklaşımlarında da görülebilir. Bu salınım ve sapmaları minimize etmek ve daha kararlı sonuçlar elde etmek için farklı çözüm yöntemleri sonlu elemanlara uygulanmaktadır.

Konveksiyon-difüzyon ısı transferi problemlerinin çözümünde yüksek Reynolds sayısına sahip türbülanslı akışlar gibi özellikle taşınım etkilerinin çok yüksek olduğu durumlarda çözüme dayalı sapma ve salınımları en aza indireyen dengeleyici yöntemlerden biri yukarı akış yönlü (upwind) fark yaklaşımıdır. Upwind fark çözümleri merkezi fark çözümlerine göre daha iyi sonuçlar verir, sapmalar düşüktür ve gelişime açık bir profile sahiptir [270]. Upwind yaklaşımının sonlu elemanlarda kullanıldığı birkaç farklı yöntem vardır. Bunlar kısaca aşağıda açıklanmıştır:



Şekil 4.2 Bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözülme aşamaları

Yapay difüzyon: Bu yöntemde fiziksel difüzyona bir yapay difüzyon terimi eklenir ve geleneksel Galerkin sonlu eleman ayrıklaştırılması uygulanır. Bu aslında Galerkin’deki negatif difüzyon davranışına karşı bir ‘dengeleyici difüzyon’ olarak düşünülebilir.

Kareleme: Bu yöntemde konveksiyon terimi için uygulanan sayısal kareleme (ikinci mertebeye getirme) kuralı upwind etkisini oluşturmak için modifiye edilir.

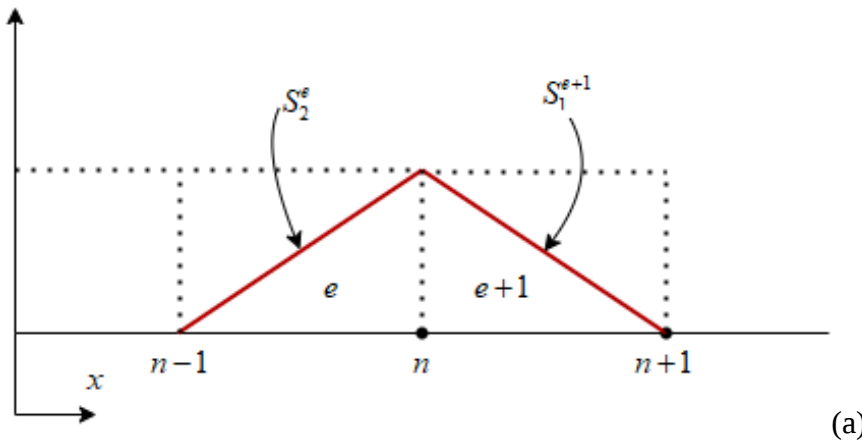
Petrov-Galerkin: Herhangi bir düğümdeki (node) ağırlık fonksiyonu, düğümün yukarı yönüne (upwind) aşağı yönünden (downwind) daha fazla ağırlık verilerek modifiye edilir. Bu yöntemin bir boyutlu eş lineer elementlerden oluşan bir ağ yapısında düğümler arası ağırlık dağılımının merkezi fark yaklaşımıyla karşılaştırılması Şekil 4.3’te gösterilmiştir.

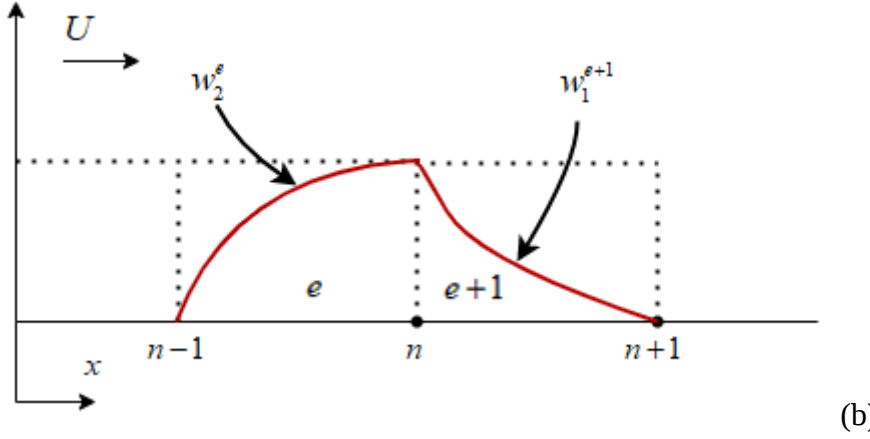
Şekildeki n düğümü için sonlu eleman denklemlerine yalnızca kendisine komşu düğümlerle oluşturduğu şekil fonksiyonları katkı sağlar. Hız bileşeninin sıfırdan büyük olması durumunda ($U > 0$), $n-1$ düğümü n düğümüne göre yukarı akış (upstream) yönündedir, bu durumda $n+1$ düğümü de aşağı akış (downstream) yönünde olmuş olur. SUPG yaklaşımında, sonlu eleman için oluşturulan şekil fonksiyonları herhangi bir düğümün komşularına eşit şekilde dağılmak yerine, yukarı yönde ağırlaştırılmış biçimde oluşturulur.

Petrov-Galerkin upwind (yukarı yöne yakınsama) metodudur (Streamline Upwind Petrov Galerkin/SUPG) [270]. Literatürde bu yöntem birçok akışkanlar dinamiği ve taşınım-difüzyon-reaksiyon problemine başarıyla uygulanmaktadır [271–274]. Mevcut problemin zamana bağlı kısmındaki denklemler bu yöntem kullanılarak çözüme ulaştırılmıştır.

Bu yöntem, sonlu farklar metodundaki upwind şemasının benzeri bir şekilde sonlu elemanlar metoduna uygulanmış biçimidir. Galerkin SE yöntemine daha kararlı sonuç veren bir alternatif olarak sunulmaktadır. Bir taşınım-difüzyon ısı transferi problemi için Galerkin ayrıklaştırma denkleminde istenmeyen sapmalara bir çare olarak upwind yakınsaması uygulanabilir. Denklem 4.36'daki herhangi bir değişkenin yakınsamasını bir boyutlu olarak ele alacak olursak, herhangi bir x_A noktasındaki $\phi_x(x_A)$ yaklaşımı yalnızca o noktanın üst komşuluğundaki ϕ değeriyle yapılır.

Özetle açıklamak gerekirse, Galerkin sonlu elemanlar ayrıklaştırılması merkezi farklara benzer bir profil sergilerken, Petrov-Galerkin (SUPG) yaklaşımı upwind farklarına benzer bir yol izler.





Şekil 4.3 Merkezi fark (GSEM) ve SUPG yöntemleriyle tek boyutlu eş elemanlı bir ağ yapısının nodal olarak şematik gösterimi Merkezi fark yaklaşımıyla eş elemanlardan oluşan bir boyutlu bir ağ yapısında şekil fonksiyonlarının oluşumu (a)

Bir boyutlu eş elemanlardan oluşan bir ağ yapısında ağırlıkların SUPG yaklaşımıyla oluşturduğu şekil fonksiyonları (b)

Zamana bağlı konveksiyon-difüzyon problemlerinin çözümünde kararlılığı (stabilite) artırmak adına farklı yaklaşımlar kullanılmakta, böylece çözümlerin doğruluğunu yükseltmek amaçlanmaktadır. Bunlar generalize alfa (Generalized alpha), Runga-Kutta ve Geriye dönük fark formülü (Backward differantion formula / BDF)' dür. Açık (explicit) Runga-Kutta yöntem grubu, adi diferansiyel denklemler sistemleri için en uygun yapılardır ve genellikle kısmi diferansiyel denklemleri içeren problemlerde çok verimli sonuçlar vermezler. Generalize alfa, yüksek frekansların sönümleme derecesini kontrol etmek için literatürde alfa olarak adlandırılan bir parametre içerir. Geriye dönük fark formülü, zaman terimi için geriye dönük fark yaklaşımına sahip örtülü (implicit) bir şemadır. Bu şema koşulsuz olarak kararlıdır ve şemanın doğruluğu zaman adımının büyüklüğüne bağlı olarak değişir. BDF çözücüsü (geriye doğru Euler yöntemi olarak da bilinir), bir ile belli bir zaman adımı arasında değişen doğruluk sırasına sahip geriye doğru farklılaşma formüllerini kullanan örtülü bir çözücüdür. Yani, bir sonraki zaman düzeyinde çözüm elde etmek için mevcut (n) ve önceki zaman düzeylerinde (n-1, n-2,...) bilinen çözüm değerlerini kullanan doğrusal çok adımlı bir yöntemdir [275]. BDF yöntemleri uzun süredir kullanılmaktadır ve kararlılıkları ile bilinmektedir. Herhangi bir kontrol hacmi V ve birim yüzey dS için sıkıştırılamaz akışta Navier-Stokes denklemlerinin integral formu aşağıdaki gibi ele alınsın [276–278]:

$$\Gamma \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \iint_S [F - G] \cdot dS = 0 \quad (4.43)$$

Burada Γ Jakobyen operatörü, Q temel korunum değişkenlerinin bağımlı vektörü, F ve G ise S yüzeyinden dışa doğru normal yönündeki konvektif ve difüzyif akı vektörleridir ve aşağıdaki gibi ifade edilir [277]:

$$F = \begin{pmatrix} \rho V_n \\ \rho V_n u + P n_x \\ \rho V_n v + P n_y \\ \rho V_n w + P n_z \\ \rho V_n H \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 0 \\ n_x \tau_{xx} + n_y \tau_{xy} + n_z \tau_{xz} \\ n_x \tau_{yx} + n_y \tau_{yy} + n_z \tau_{yz} \\ n_x \tau_{zx} + n_y \tau_{zy} + n_z \tau_{zz} \\ n_x \theta_x + n_y \theta_y + n_z \theta_z \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} P \\ u \\ v \\ w \\ T \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

Burada, n_x, n_y, n_z her bir elemanda (hücrede) yüzeyin dışına doğru yönde birim vektör bileşenleri olmak üzere, V_n yüzeyin normal doğrultusundaki hız, $\tau_{x,y}$ viskoz akı ve $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ enerji akısıdır. Denklem 4.45' teki ilk terim olan zaman türevli korunum değişkenleri belli bir doğruluğu veren derecedeki (k) BDF yaklaşımıyla yer değiştirir. Genel mertebeden bir BDF yöntemi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{W}^{n+1} = \left(\frac{\partial W}{\partial t} \right)^{n+1} = -\frac{1}{h} \sum_{i=0}^k \alpha_i W^{n+1-i} \quad (4.45)$$

Yukarıdaki denklemde h sabitlenmiş zaman adımı boyutu ve α_i ' ler tüm mertebelerdeki $(W^{n+1-k}, \dots, W^n, W^{n+1})$ çözüm değerleri katsayılarıdır.

Mevcut tez çalışmasında simülasyonlar ve sayısal analizlerde COMSOL ticari programı kullanılmıştır. Program çözücüsünde kullanılan BDF uygulaması değişken mertebelidir. Yani, mümkün olduğunca yüksek bir mertebe kullanılmış ve bazı durumlarda kararlılığı sağlamak için gerektiğinde otomatik olarak daha düşük mertebelere geçiş yapılmıştır. BDF yöntemi aynı zamanda bir Diferansiyel-Cebirsel Denklemler sistemi (DAE) çözücüsüdür.

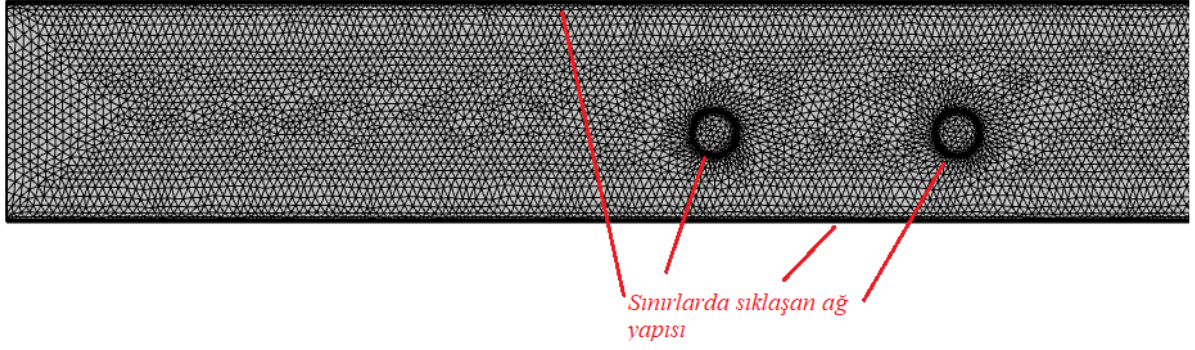
4.2.3 Sayısal çalışmanın çözüm aşamaları

Mevcut tez çalışmasında simülasyonların oluşturulması, çözüm için gerekli fiziksel modüllerin problem türüne göre uygulanması, ağlaştırma çalışmaları ve ısı ve kütle transferinin bütünleşik çözümü için elverişli bir ticari yazılım olan COMSOL Multiphysics 5.5 versiyonu kullanılmıştır. Bu yazılımın tercih edilmesini sebepleri, sonlu elemanlar yönteminin çok çeşitli HAD simülasyonlarında rahatlıkla uygulanabilir olması, pek çok farklı fiziksel olgunun (akışkan akışı, ısı transferi, kütle transferi) bütünleşik olarak ele alınabilmesi bu şekilde gerçeğe yakın çözümler elde edilebilmesi, çözüm denklemlerinin çeşidi, mertebesi, lineer olma durumuna göre farklı çözücü türlerinin uygulanabilmesi olarak sıralanabilir.

Bir termal kurutma işleminin sayısal olarak analiz edilmesinde, iki transport mekanizması ön plana çıkmaktadır. Bunlardan sıcak havanın etkisiyle kurutulacak cisim üzerindeki ısı transferi, diğeri de ısı transferinin etkisiyle ortaya çıkan buharlaşmadan olan kütle (nem) transferidir. Mevcut tez çalışmasının bir özgünlüğü de literatürde çok fazla yer almayan kurutma havası ortamının (akış alanı) da probleme dahil edilerek sıcak havanın etkisiyle, akışkan akışı, ısı ve kütle transfer mekanizmalarının bütünleşik olarak ele alınmasıdır. Daha açık bir ifadeyle, kanaldaki gözenekli nemli nesnelerin konvektif kurutma uygulamaları için, nesneler ve kanal için ısı ve kütle transferi denklemlerinin birleştirilmesine ihtiyaç vardır. Daha önceki çalışmalarda nemli cisimler boyunca ısı ve kütle aktarım katsayıları belirlenmiş ve ısı/kütle aktarım taşınım denklemleri sadece nesneler için çözülmüştür. Ya da ısı transferi katsayıları hesaplanarak kütle transferi katsayıları da ısı ve konsantrasyon sınır tabakaları arasında bir analogi oluşturularak elde edilmiştir. Ancak, nesneler boyunca yerel ısı transfer katsayılarının zamana bağlı olması nedeniyle bu yaklaşım doğru olmayabilir. Aynı zamanda nesneler arasındaki boşluktaki değişikliklere göre de katsayılar değişiklik gösterebilmektedir. Yapılan sayısal çalışmalarda ısı ve kütle transferi bütünleşik olarak hesaplanır ve buna bağlı olarak transfer katsayıları da zamansal ve mekânsal olarak farklılık göstermektedir. Bu da çözümlerin doğruluğunu arttıran ve gerçeğe yakın çözümler elde edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Tez çalışmasında uygulanan HAD adımları, ön işleme, çözüm ve art-işleme olarak bu bölüm altında belirtilmiştir.

a) Ön-işleme (Pre-processor) aşaması

Yapılan sayısal çalışmanın temel adımları sıralanacak olursa, ilk önce hesaplanacak fiziksel olgular ara yüzden seçilir. Yukarıda da belirtildiği gibi, tez çalışması için seçilecek modüller akışkan alanı türü (laminer, türbülans akış), Isı transferi modülü (sıcak hava akışıyla oluşan ısı transferi) ve kütle transferi modülüdür (termal etkiyle nem taneciklerinin buharlaşarak transferi). Daha sonra, problem geometrisi fiziksel mekanizmanın özelliğine göre belirlenerek oluşturulur. Burada iki ya da üç boyutlu kanalın ölçüleri, şekli, kurutulacak cisimlerin miktarı, büyüklüğü, geometrisi, kanal içerisindeki konumları göz önünde bulundurularak geometri oluşturulur. Geometri oluşturulduktan sonra kanal içerisindeki havanın sıcaklığı, nemi, hava hızı gibi özellikler, ayrıca kurutulacak cisimlerin termofiziksel özellikleri, gözeneklilik, geçirgenlik gibi özellikleri belirlenir. Buna benzer olarak sırasıyla kanal içerisindeki ve cisim gözenekleri içerisindeki havanın özellikleri, sıvı haldeki ve buhar fazındaki suyun özellikleri, gözenekli ortamın (kurutma cismi) temel özellikleri de belirlenir. Bu aşamadan sonra, nemli hava, iki fazdaki su ve gözenekli cisim için efektif termofiziksel özellikler ve değişkenler tanımlanır. Daha sonra problem için uygun başlangıç ve sınır şartları belirlenir ve çalışma üzerinde uygulanır. Bu aşamadan sonra uygun ağ yapısı belirlenerek ağlaştırma (meshing) gerçekleştirilir. Mevcut tez çalışmasında hata payını en aza indirmek ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek adına, el ile sınır şartlarında yoğunlaşan bir ağ yapısı belirlenmiştir. Uygulanacak problemin türüne göre gereksiz hesaplama sürelerinden kaçınarak uygun ağ sıklığını belirlemek için ağ bağımsızlık çalışması (mesh independence study) gerçekleştirilmiş, buna göre genel anlamda ince ağ (fine mesh) uygulanmıştır. Şekil 4.4' te iki boyutlu dairesel bir cismin kurutulmasının yapıldığı çalışma için uygulanan ağ görülmektedir. Burada net bir görüntü oluşması açısından geometrinin bir bölümü gösterilmiştir. Görüldüğü gibi belirlenen sınırlar için daha sık ve ince bir ağ oluşturulmuştur. Bu da bu bölgelerde çözüm aşamalarının daha sık olması yöntemin daha kesin sonuçlar vermesini sağlayacaktır.



Şekil 4.4 Örnek 2 boyutlu bir çalışmada ağ yapısı

Yukarıda belirtilen işlemler bir HAD uygulamasının ön-işlemci (pre-processor) aşamasıdır. Çözüm (Solver) kısmına geçebilmek için ön işlemedeki gerekli tüm adımlar eksiksiz ve hatasız olarak gerçekleştirilmiş olmalıdır. Aksi takdirde problem çözüm aşamasında hata verecek ya da uygun bir çözüm gerçekleştiremeyecektir.

b) Çözüm (Solver) aşaması:

Bölüm 4.2.1. ve 4.2.2' de mevcut tez çalışmasında öne çıkan bazı çözüm yöntemleri açıklanmıştır. Bu alt başlıkta ise bu yöntemler daha ayrıntılı bir şekilde ele alınacak ve çalışmanın cinsine göre uygulanan ilave yöntemler açıklanacaktır. Öncelikle gerçekleştirilecek sayısal çalışmanın parametrik bir çalışma olması düşünülüyorsa, yani problemdeki hava hızı, hava sıcaklığı, kurutulacak cisimlerin boyutu gibi bazı parametrelerin farklı değerleri için hesaplamalar yapılacaksa, bu özellikler tanımlanır. Daha sonra problemdeki kararlı ve zamana bağlı olarak çözülecek kısımlar belirlenerek toplam süre ve zaman adımları belirlenir. Bu seçimlerden sonra da çözüm gerçekleştirilir. Çözüm süresi problemin boyutu (2 ya da 3 boyutlu), geometrinin karmaşıklığı, ağ yapısının yoğunluğuna göre değişiklik gösterir. Ticari yazılım, sonlu elemanlar yöntemini temel alan çözüm yöntemini uygular, yönetsel denklemlerin lineerliği, kararlı ya da zamana bağlı rejim uygulanması, rijitlik matrislerinin simetrikliği ve ağ yapısının türüne göre uygun ek yöntemi seçerek problemin çözümü gerçekleştirilir. Örneğin kararlı kısmı direkt çözücü (direct solver) ile çözerken, zamana bağlı kısmı ayrıklaştırmış çözücü (segregated solver) ile bölünmüş bir şekilde çözer.

Kararlı kısım çözümünde uygulanan direkt çözücünün kullandığı yöntemler MUMPS, PARDISO, SPOOLES ve Dense Matrix yöntemleridir. Bu yöntemler kısaca açıklanacak olursa;

MUMPS (MULTifrontal Massively Parallel sparse direct Solver): Büyük boyutlu lineer sistemlerdeki, genel simetrik matrisler, simetrik pozitif matrisler, genel simetrik olmayan matrislerin çözümünde kullanılan bir direkt çözüm yöntemidir. Özellikle hesaplama zamanı ve hafıza kullanımında ekonomik bir yöntemdir, fakat ağ yapısına karşı hassastır. Hidrolojik hesaplamalar için, ağ yoğunluğuna karşı duyarlılık kararlı ve kesin çözümler elde edilebilecek kadar yüksektir. Hesaplamadaki verimliliği ve doğru bir çözüm elde etmek için yineleme sırasındaki hata toleransı 0,001 olarak ayarlanır [279]. Mevcut tez çalışmasında direkt çözücü olarak bu çözüm metodu seçilmiştir. Bu seçim genelde yazılım tarafından otomatik olarak yapılmakta, sonuçlarda tutarsızlık veya çözüm aşamalarında hata olması durumunda manuel olarak da seçim yapılabilir.

PARDISO (PARallel DIrect Solver): Çözücüler içerisinde en hızlı olanıdır. $Ax = b$ şeklindeki lineer seyrek matrislerin çözümünde kullanılır. İndirgenmiş permütasyon matrisi P' nin bulunması ve paralel seyrek matrislerin çarpanlara ayrılması yöntemini içerir [279]. Sıralı ve paralel seyrek sayısal çarpanlara ayırma performansını iyileştirmek için, çözücü algoritmaları Düzey-3 BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms) güncellemesine dayanır ve sol görünümlü ve sağ görünümlü süper düğüm tekniklerinin bir kombinasyonu ile ardışık düzen paralelliliğinden yararlanır [279].

SPOOLES (SParse Object Oriented Linear Equations Solver): SPOOLES çözücüsü, multifrontal yöntemini ve seyrek matris A'nın doğrudan LU ayrıklaştırmasını (lower-upper decomposition) kullanarak $Ax = b$ biçimindeki genel sistemler üzerinde çalışır. SPOOLES, sütunlara izin vermek ve böylece doldurmayı en aza indirmek için birkaç ön sipariş algoritması kullanır [280].

Dense Matrix: $Ax = b$ biçimindeki genel sistemler üzerinde çalışır. Bu çözücü, esas olarak, sınır elemanı modelleri (Boundary Element Models /BEM) gibi sistem matrislerinin yoğun olarak doldurulduğu durumlarda kullanışlıdır.

Problemin zamana bağlı kısmının çözümü için ayırık çözücü (segregated solver) kullanılmıştır. Bu yinelemeli yöntemleri içeren çözücüler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

GMRES (Generalized Minimum RESidual): Bu, $Ax = b$ biçimindeki genel doğrusal sistemler için yinelemeli bir yöntemdir. Matris-vektör çarpımı aşırı karmaşıksa (örneğin, A yoğunsa ve hızlı matris-vektör çarpımını sağlamak için hiçbir farklı özelliği yoksa), o

zaman GMRES, muhtemelen artık kısmi istenen düzeye indirgemek için en az sayıda matris-vektör çarpımı gerektirdiğinden tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemde, hızlı yakınsama için uygun bir ön koşullandırıcı kullanmak önemlidir [281,282].

Conjugate Gradients (CG): Bu çözücü, eşlenik gradyanlar yinelemeli yöntemini kullanır. A matrisinin pozitif tanımlı ve (Hermitian) simetrik olduğu $Ax = b$ biçimindeki doğrusal sistemler için yinelemeli bir yöntemdir. Bu yöntem, Gauss eliminasyon yöntemi gibi, herhangi bir yuvarlama hatası yoksa çözümü n adımda gerçekleştirir. Basit ve hafızada fazla yer kaplamayan bir yöntemdir. Verilen matris, işlem sırasında değiştirilmez, böylece maksimum orijinal veri kullanılır [283].

BiCGStab (BiConjugate Gradient Stabilized): Bu çözücü, $Ax = b$ biçimindeki genel lineer sistemleri çözmek için çift-eşlenik gradyan stabilize yinelemeli yöntemi kullanır. Bu yöntemde bir artık r_j , farklı bir vektör satırına $(\hat{r}_0, \hat{r}_1, \dots, \hat{r}_{j-1})$ göre ortagonal olacak şekilde yaklaşımlar gerçekleştirilir. Aynı durum tersi artık $\hat{r}_j$ için farklı satıra göre $(r_0, r_1, \dots, r_{j-1})$ de geçerlidir. BiCG yöntemi ayrıca en fazla n adımda sona erer (A , n 'ye n matris olduğunda), ancak ara adımlar için CG'deki gibi bir minimizasyon özelliği yoktur [284]. BiCGStab ile bir yineleme için gereken bellek ve hesaplama süresi sabittir; yani, zaman ve bellek gereksinimleri, GMRES için olduğu gibi yineleme sayısı ile artmaz. BiCGStab, GMRES' in iki yineleme için kullandığı ile yaklaşık olarak aynı miktarda bellek kullanır. Bu nedenle, BiCGStab tipik olarak GMRES'ten daha az bellek kullanır. Mevcut tez çalışmasında zamana bağlı kısmın çözümü için GMRES ve BiCGStab yöntemleri kullanılmıştır.

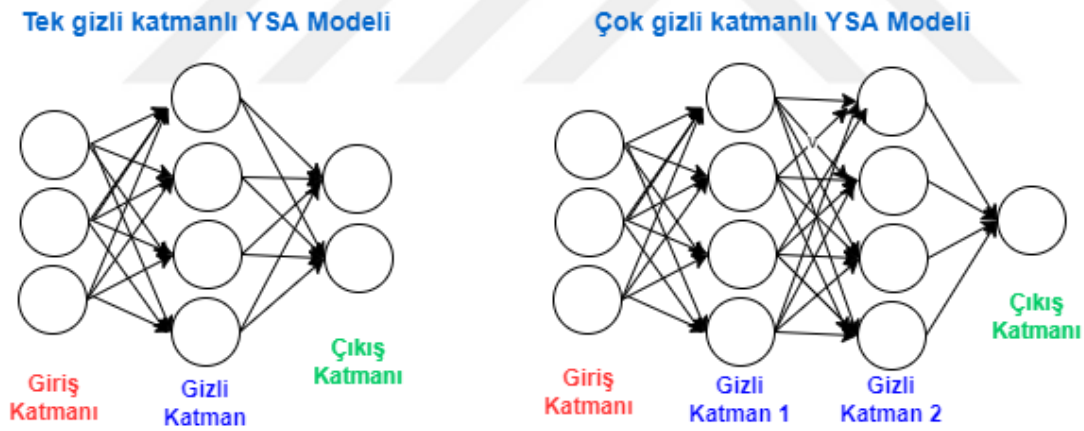
4.3 Yapay Sinir Ağları ile Modelleme

Tez kapsamında konvektif kurutma performansı için Yapay Sinir Ağlarına (YSA) dayalı bir modelleme tekniği kullanılmıştır. Özellikle 3 boyutlu ve zamana bağlı hesaplama sürelerinin çok uzun sürdüğü durumlarda performans tahmini için YSA ya da diğer yapay zekâ modelleri kullanmak büyük avantaj sağlayacaktır.

Yapay sinir ağları, nörofizik bilimini temel alan ve mimari yapısı insan beynindeki nöron yapısından esinlenerek tasarlanan bir yapay zekâ işleme tekniğidir.

Genel olarak birbirleriyle karmaşık bir iletişim ağıyla bağlantılı yüzlerce basit işleme biriminden oluşan bir mimarisi vardır. Her bir birim ya da eleman gerçek bir sinir hücresinin (nöron) basitleştirilmiş bir biçimidir, her bir nöron bağlı olduğu bir önceki nörondan yeteri kadar kuvvetli bir giriş sinyali alırsa kendi bilgisini bağlı olan ileri nörona iletir. YSA' lar insanlar gibi, örnek bilgi ve tecrübelerle çalışırlar [285].

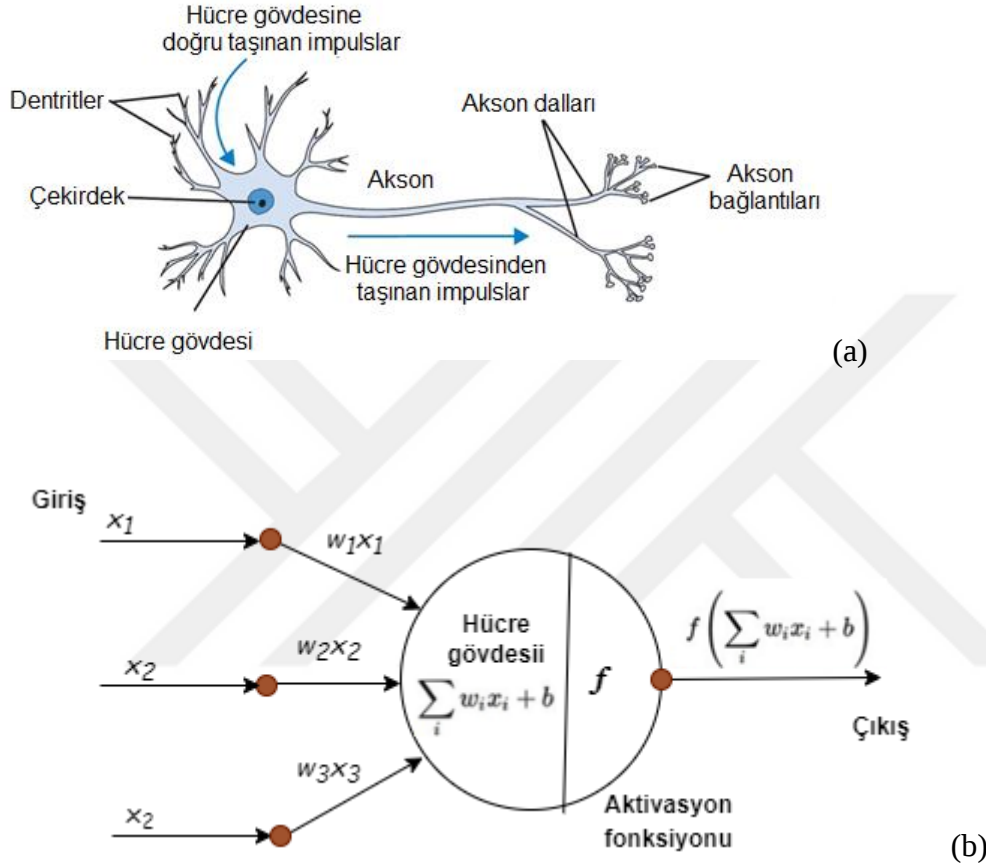
YSA tek ve çok katmanlı olmak üzere iki farklı model olarak tasarlanabilir. İlk olarak yapay sinir ağı modelleri tek katmanlı yapıya sahip olarak tasarlanmıştır. 1960 yılında Widrow ve Hoff çok gizli katmanlı yapıya geçen ilk çalışmayı yapmışlardır. Şekil 4.5'te tek ve çok katmanlı yapay sinir ağları modellerinin görseli verilmiştir. İlk katman, giriş verilerinin beslendiği giriş katmanıdır. İkinci katman ise giriş verileriyle bağlantılı olan ve aktivasyonu bağlantılardaki ağırlıklarla belirlenen gizli katmandır, gizli katmanlar birden fazla da olabilir. Çıkış katmanı ise davranışı gizli katmanla ve bağlantısındaki ağırlık değerleriyle belirlenen son katmandır. Tek gizli katmanlı YSA modelinde giriş katmanlarından sonra oluşturulan gizli katmandaki nöron sayısına göre modeller eğitilerek çıkış katmanına gönderilir. [286].



Şekil 4.5 Tek ve çok katmanlı YSA modeli

Şekil 4.6 (a)' da insan beynindeki sinir hücresinin yapısı, (b)' de ise insan sinir hücresi analogisiyle oluşturulan yapay sinir ağı yapısı yer almaktadır. İnsan sinir hücresinde hücre gövdesinde oluşan impulslar aksonlar aracılığıyla diğer sinir hücrelerinde ve tüm vücuda yayılarak komutların gerçekleştirilmesini sağlarlar. Bir yapay sinir ağında da nörona aksonu giriş verisi, sinap ve dentritler ağırlıklar ve giriş parametreleri, hücre gövdesi ise YSA aktivasyon fonksiyonunun olduğu kısımdır. Çıkış aksonu da giriş verilerinden uygun olanı işleyerek çıkış verisine ulaştıran kısımdır.

Gösterildiği gibi yapay sinir ağları insan sinir hücrelerine benzer bir yapıda giriş değerlerine göre (x_0, x_1, x_2 vs.) ağırlıkları belirlenip (w_0, w_1, w_2 vs.) çarpılarak elde edilen sonuçların toplanması ilkesine dayanmaktadır. Yapay sinir ağlarında istenilirse sabit bir bias değeri eklenerek belirlenen aktivasyon fonksiyonuna göre hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 4.6 İnsan sinir hücresi yapısı(a) Temel yapay sinir hücresinin matematiksel modeli (b)

Temel bir yapay sinir ağı modelinin matematiksel denklemi aşağıdaki gibidir;

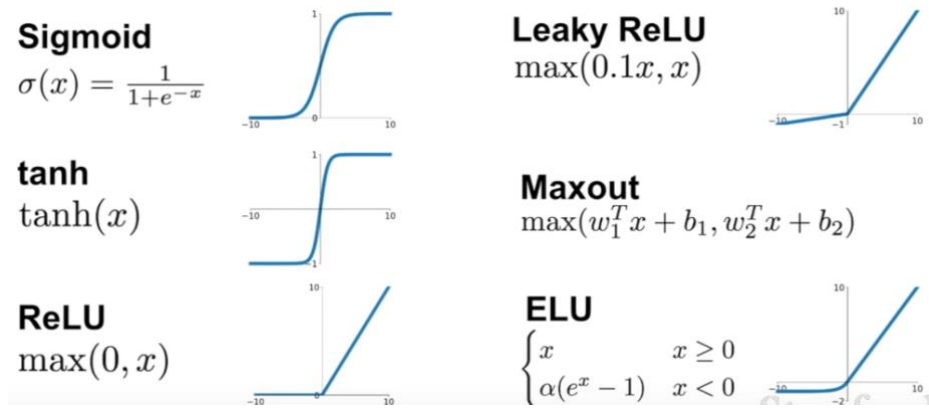
$$y = wx + b \quad (4.46)$$

Burada; y, x 'e bağlı bağımlı değişken olup, giriş parametrelerine göre modelden elde edilen doğruluk sonucu verir, x, w, b ise sırasıyla giriş parametresi, her bir giriş parametresinin ağırlık ve sabit bias terimidir. Yapay sinir ağı modellerinde w ve b parametreleri değiştirilerek en iyi doğruluk sonucunu elde edilinceye kadar model eğitilir.

Şekil 4.6’ da görüldüğü gibi, ağa giren her bir girdi değeri (x_i) eş zamanlı bir şekilde gizli katman nöronuna iletilir, bağlantılardaki ağırlık değerleri belirlendikten sonra girdi (x_i) ve ağırlık değerleri (w_i) çarpılıp birleştirme fonksiyonu ile toplanarak net girdi (s) değeri elde edilir. Burada, birleştirme işlemi, tüm $w_i x_i$ değerlerinin toplamı, aritmetik ortalaması, en büyük ya da en küçük değerin alınması gibi farklı uygulamalardan uygun olan yöntemle gerçekleştirilir. Uygun birleştirme fonksiyonu genelde deneme yanılma yoluyla bulunur. Aşağıda toplama işlemi ile yapılan birleştirme fonksiyonu bağıntısı gösterilmiştir.

$$s = \sum w_i x_i \quad (4.47)$$

Fonksiyonlar girdi ve çıktı arasındaki eşleşmeyi sağlayan ve net girdi değerini farklı algoritmalarla gerçek bir çıktı değerine dönüştüren fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar genellikle doğrusal değildir ve kullanılan türe göre $[-1,1]$ veya $[0,1]$ çıktı değerini verirler. Yapay sinir ağı modelinde problem çözümü için kurulan modelde sıklıkla kullanılan farklı aktivasyon fonksiyonları Şekil 4.7’ de verilmiştir.



Şekil 4.7 Yapay sinir ağlarında sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonları

a. Sigmoid Fonksiyonu

YSA modellerinde sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından biridir. Bu fonksiyonu $[0,1]$ arasında değerler alabilen ve sınıflandırma problemlerinde kullanılır. Sigmoid fonksiyonu modelden elde edilen sonucun hangi sınıfa ait olduğunu öğrenen olasılıksal bir değer üretir.

b. Hiperbolik Tanjant (tanh) Fonksiyonu

Sigmoid fonksiyonuyla benzerlik gösteren bir fonksiyondur ve sınıflandırma için kullanılır. Çıkış değeri $[-1,1]$ aralığında doğrusal olmayan bir fonksiyondur.

c. Rectified Linear Unit / Rektifiye Doğrusal Birim (ReLU) Fonksiyonu

ReLU aktivasyon fonksiyonu çok gizli katmanlarda sıklıkla kullanılır, aynı anda tüm nöronları aktive etmez. Doğrusal bir fonksiyondur ve bu fonksiyonda negatif değerler üreten nöronlar sıfır değeri kabul edilir. Böylece ReLU aktivasyon fonksiyonu herhangi bir modeli daha verimli ve hızlı eğitir.

d. Leaky ReLU Fonksiyonu

ReLU fonksiyonunda benzer biçimde doğrusal bir fonksiyondur. Fakat Leaky ReLU fonksiyonunda negatif değerler ReLU fonksiyonunda olduğu gibi sıfır değil de sıfıra yakın negatif bir değer alır. Böylece öğrenmenin çift yönlü yönde de gerçekleşmesi sağlanmış olur.

e. Maxout Fonksiyonu

Maxout fonksiyonu öğrenilebilen, hesaplamalı olarak ucuz ve yalnızca etken giriş parametresini dikkate alan YSA modellerinde kullanılan bir aktivasyon fonksiyonudur. Böylece en etkili giriş parametresi seçilerek elde edilen sonuçlar çıkışa gönderir.

f. Üst Lineer Birim (Exponential Linear Unit)-ELU Fonksiyonu

Bu fonksiyonu negatif girdiler hariç ReLU fonksiyonuna benzerlik gösterir. ELU fonksiyonunda orta nokta “0” sıfırdır. Böylece ölü nöronların önüne geçerek modelin daha hızlı yakınsaması sağlanabilir

YSA’ da bir öğrenme sürecini anlamak ve tasarlamak için, ilk olarak bir sinir ağının yönettiği ortamın bir modeline sahip olunmalı, yani ağ için hangi bilgilerin mevcut olduğu bilmelidir. İkinci olarak ağ ağırlıklarının nasıl güncellendiği anlaşılmalıdır ki öğrenme kuralları güncelleme prosesini yönetir. Bir öğrenme algoritması, öğrenme kurallarının ağırlıkların uygun çıkış verisini elde etmek amacıyla güncellenerek ayarlanması esasına dayanmaktadır [287]. Özetle, giriş verisinden çıkışa ulaşana kadar

her katman bağlantısındaki ağırlıklar, en uygun doğruluğa sahip çıkış verisini elde etmek için sürekli güncellenerek eğitilir. Bu işlem için de farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu model bir öğrenme paradigması olarak adlandırılır ki bu da sinir ağının mimarisini oluşturur. YSA’ da kullanılan iki çeşit mimari yapı bulunmaktadır. Bunlar;

- **İleri beslemeli YSA modeli:** Bu yapıda tek yönlü bir bilgi akışı söz konusudur. Giriş katmanındaki bilgiler, gizli katman (lar)a daha sonra da çıkış katmanına tek yönlü olarak iletilir. Bu tür YSA yapısı tek yönlü olduğu için bağlantılar arası döngüler oluşmaz bu sebeple hızlı bir şekilde çıktı üretilebilir.
- **Geri beslemeli YSA modeli:** Dinamik bir yapıya sahip geri beslemeli YSA’ larının bir diğer adı da yinelemeli ağıdır. Giriş verisi oluşturulduğunda, nöron çıktıları da hesaplanır. Geri dönüşümlü yollar vasıtasıyla, uygun çıktı verisi elde edilene kadar girdi-nöron bağlantıları modifiye edilir böylece ağ yeni bir duruma güncellenir [287].

Yukarıda belirtilen YSA modelleri kendi yapılarına uygun olarak farklı öğrenme algoritmaları benimseyebilirler. YSA’ da bilgi düğümler arası ağırlıklarda tutulur, bu ağırlık değerlerinin optimal olanının bulunması amacıyla ‘ağ eğitimi’ gerçekleştirilir. Öğrenme algoritmaları, uygun ağırlık değerlerinin elde etmek amacıyla gerçekleştirilen öğrenme biçimidir. YSA’ da temel olarak üç öğrenme biçimi mevcuttur. Bunlar:

- **Danışmanlı öğrenme:** Bu öğrenme biçimi, adından da anlaşılacağı gibi öğrenme sırasında bir öğretmen (danışman) kullanır. Her bir girdi kalıbı için tek bir doğru çıktı oluşturulur, yani girdi ve çıktı değerleri ağa gösterilir. Sinir ağının çalıştırılması sonrası elde edilen çıktı değeri ile başta verilen çıktı değeri karşılaştırılarak aradaki fark olan hata hesaplanır. Bu öğrenme yapısına örnek olarak tek katmanlı ve çok katmanlı algılayıcı (Single, Multi Layer Perceptron) gösterilebilir [288].
- **Danışmansız öğrenme:** Ağa girdi bilgisi verilip çıktı bilgilerinin verilmediği öğrenme biçimidir. Burada, eğitim veri setinde giriş bilgisiyle bağlantılı herhangi bir doğru çıktı bilgisi verilmez. Örüntüler arasındaki bağıntıları veya veri içerisindeki yapıyı inceleyerek örüntüleri kategorize eder, kendi kendine öğrenme söz konusudur [289]. Kendi kendine öğrenen haritalar (Self Organizing Maps/ SOM) danışmansız öğrenme algoritmalarına örnek olarak verilebilir.

- **Hibrit Öğrenme:** Danışmanlı ve danışmansız öğrenme biçimlerinin bir arada kullanıldığı yapıdır. Ağırlıkların bir kısmı danışmanlı öğrenme ile, geri kalanı danışmansız öğrenme ile elde edilir.

Geri yayılım algoritması

İleri ve geri beslemeli YSA mimarileri, farklı amaçlar için farklı topolojiler benimseyebilirler. Örneğin tahmin-öngörü problemleri için geri yayılım, yönlendirilmiş rastlantısal tarama, radyal tabanlı fonksiyon gibi topolojiler kullanılırken, veri ilişkilendirme için Kohonen's SOM, Hopfield ağları, çift yönlü ilişkili hafıza yöntemleri kullanılır [288]. Hemen hemen tüm kullanım amaçları için yaygın bir biçimde kullanılan İleri Beslemeli Geri Yayılım ağları (Feedforward Backpropagation) optimizasyon problemleri için de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu öğrenme algoritması, çok katmanlı ileri beslemeli ağlarda danışmanlı öğrenmede kullanılır [290]. Basit bir ifadeyle, geri yayılım, bir ağ üzerinden her ileri geçişten sonra, modelin parametrelerini (ağırlıklar ve bias terimleri) ayarlarken geriye doğru bir geçiş gerçekleştirir. Çok katmanlı ağlarda geri yayılım genelleştirilmiş Delta Öğrenme Kuralını uygular. Bu kural ileri doğru hesaplama (feed forward) ve geriye doğru hesaplama (backpropagation) olmak üzere iki aşamadan oluşur. Bu algoritmada giriş katmanındaki aktivasyonlar yani herhangi bir nöron değerinin aktivasyon fonksiyonu ile çarpımı aşağıdaki gibi giriş verileri olarak tanımlanır:

$$x_i^{(1)} = a_i^1 \quad (4.48)$$

Burada, i indisi ilk katmandaki nöron sayısıdır. Giriş katmanında ağırlıklar için rastgele küçük değerler belirlenir. İlk katmandan $x_i^{(1)}$ değerinin aktivasyona atanmasından sonra diğer katmanlar için, bir l gizli katmanındaki her bir nöron için elde edilen son değer z^l ve aktivasyon değeri de a^l olmak üzere:

$$\begin{aligned} z^{(l)} &= w^{(l-1)} a^{(l-1)} + b^{(l-1)} \\ a^{(l)} &= f(z^{(l)}) \end{aligned} \quad (4.49)$$

şeklinde ifade edilir. Burada görüldüğü gibi bir katmandaki herhangi bir nöronun değeri, bir önceki katmandaki ağırlıklar ve aktivasyon değerinin çarpımı ile bias teriminin toplamıyla elde edilir. Aktivasyon değeri elde edilmesi de nöron değeri ve aktivasyon

fonksiyonunun çarpımı ile bulunur. Giriş katmanındaki her bir nöron için son değerler bulunarak tümü toplanarak bias teriminin de eklenmesiyle giriş katmanı toplam girdi verisi elde edilmiş olur. Bu şekilde tüm katmanlardaki değerler ileriye doğru işler ve en son çıkış katmanına ulaşır. Aşağıda l adet katmana sahip bir ağın çıkış katmanındaki i 'nci nöronundan elde edilen çıktı ifadesi verilmektedir.

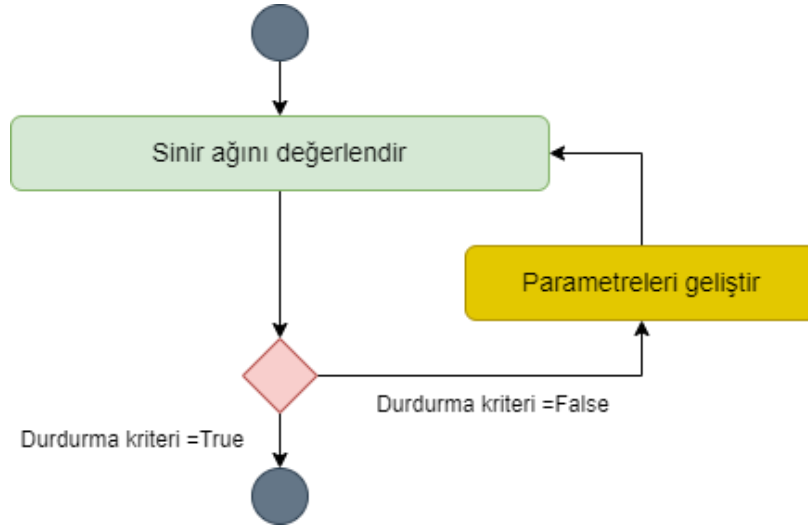
$$s = w_i^{(l)} a_i^{(l)} \quad (4.50)$$

Burada elde edilen tahmini çıktı değeri s ile olması gereken çıktı değeri y arasındaki fark kayıp fonksiyonunu verir. Tüm çıkış nöronlardaki kayıpların toplamı maliyet fonksiyonu (cost function) C 'yi verir. Geri doğru yayılım, maliyet fonksiyonunu minimize etmek amacıyla her katmanda geriye doğru gidilerek, ağırlıkların değiştirilmesi şeklinde gerçekleşir.

Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon algoritmaları (optimizer), bir sinir ağında öğrenme sürecini gerçekleştirir. Bellek gereksinimi, sayısal hassasiyet ve işlem hızı açısından pek çok farklı optimizer bulunmaktadır. Belirtildiği gibi, sinir ağları için öğrenme problemi, kayıp indeksinin minimum bir değer aldığı bir dizi parametreyi aramaktan ibarettir. Gerekli koşul, sinir ağı minimum kayıp indeksindeyken gradyanın sıfır olması durumudur. Kayıp indeksi, parametrelerin lineer olmayan fonksiyonlarından oluşur. Yinelemeli ağda, her bir adım ya da iterasyonda (epoch) kayıp indeksi azalır. Eğitimin durması ve ağın ilerlemesi Şekil 4.8'deki prosedüre göre işler ki, diyagramdaki durma kriterinin sağlanması için kayıp değerinin genel olarak aşağıdaki koşullardan birini sağlaması gerekir:

- ✓ Kayıp azalması bir set değerine ulaşmışsa
- ✓ Kayıp hedeflenen bir değere ulaşmışsa
- ✓ Belirlenen bir maksimum epoch sayısına ulaşılmışsa
- ✓ Belirlenen bir hesaplama süresi aşılmışsa
- ✓ Seçilen alt kümedeki hata belli epoch sayısı boyunca artış gösteriyorsa



Şekil 4.8 Bir YSA algoritmasının basitçe işleyişi

Optimizasyon algoritması, sinir ağındaki parametrelerin nasıl ayarlandığını belirler. Çeşitli hesaplama ve depolama gereksinimlerine uygun birçok farklı optimizasyon algoritması vardır, en çok kullanılan optimizasyon algoritmaları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Dereceli Azaltma (Gradient Descent / GD): Bu algoritmada parametreler, her itersyonda kayıp indeksinin negatif gradyanı doğrultusunda yenilenir. Başka bir deyişle, değişkenler hedef fonksiyonun gradyanlarına ters yönde her iterasyonda güncellenir. Hedef fonksiyonun (çıkıtı) istenen değerine yakınsamak için, kademeli bir güncelleme gerçekleşir. Öğrenme oranı η her yinelemede adım boyutunu belirler ve bu da istenene çıktıya ulaşmak için gerekli iterasyon sayısını etkiler [291]. İlk önce kayıp fonksiyonunun türevi alınır ve parametreler için alınan rastgele değerler toplanır ve bu değerler parametrelere gönderilir, daha sonra adım büyüklüğü (step size) hesaplanır ve eski parametre arasındaki fark, yeni parametreyi verir. Minimum seviyeye ulaşıncaya kadar rastgele parametre oluşturma tekrarlanır. Bu kurala benzer olarak çok büyük veri setlerinde olasılıksal dereceli azaltma (Stochastic Gradient Descent / SGD) kuralı da uygulanabilir. Bu yöntem, karmaşık hesaplama ve yüksek ölçekli veri içeren durumlarda ve çevrimiçi öğrenmenin yapılamadığı zaman önerilir [291]. SGD algoritmasında optimum noktayı ararken çok fazla salınım gerçekleşebilir. Bu salınımları azaltma ve hedefe ulaşma hızını artırma için kullanılan bir yöntem de momentum yöntemidir, bu yönteme daha uygun bir deyişle kontrollü iniş de denilebilir. Nesterov ivmeli dereceli

azaltma yöntemi (Nesterov Accelerated Gradient Descent / NAGD) momentum kullanarak hedefe ulaşan bir algoritmadır. Bu yöntem SGD' nin öğrenme süresinin uzun olduğu durumlarda iyi bir alternatiftir.

Yukarıda anlatılan GD ve alternatif yaklaşımlar birinci dereceden gradyanlarda kullanılan yöntemler olup bu tip gradyanlar için kullanılan AdaGrad, AdaDelta, Adam, SAG, SVRG, ADMM gibi yöntemler de literatürde sıkça yer bulan yaklaşımlardır [288,289,291–293,293–297].

Eşlenik Gradyan (Conjugate gradient): Bu yöntem, büyük ölçekli doğrusal denklem sistemlerinin çözümü için veya doğrusal olmayan optimizasyon problemleri için kullanılan etkili bir yaklaşımdır [296]. Birinci derece ve ikinci derece gradyan yöntemlerinin arasında bir yöntemdir. Birinci dereceden yöntemlerin yakınsaması yavaş olurken ikinci dereceden yöntemler ise yüksek kaynak verisine ihtiyaç duyarlar, bu yöntem ise az bilgi gereksinimi ve hızlı yakınsama ile iki yöntemin ortasında bir yöntem olarak kabul edilir.

Quasi-Newton: Bu yöntem, öğrenme yönünü hesaplamak için ikinci kısmi türevlerin matrisi olan Hessian matrisini kullanan Newton metodunun farklı bir türüdür. Newton yaklaşımı, yüksek mertebeden bilgi kullanan bir yaklaşım olduğu için, öğrenme yönü minimum kayıp fonksiyonu değerini yüksek doğrulukla bulur. Hessian matrisinin tersi hesaplama ve depolama açısından pahalı olduğu için, benzer quasi-Newton yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemin temeli, Hessian tersini yaklaşık bir biçimde bulmak için, belirli bir pozitif matris kullanılarak işlem basite indirgenir. Quasi-Newton yaklaşımını uygulayan bazı yöntemler; öneren araştırmacıların isimlerinin baş harfi ile tanımlanan DFP [298,299], BFGS [300–302], L-BFGS [303,304] yöntemleridir. Yüksek ölçekli makine öğrenmesi modellerinde, her adımın nispeten küçük bir öğrenme alt kümesine dayalı olasılıksal algoritmalar kullanmak uygundur. Olasılıksal quasi-Newton (Stochastic quasi-Newton) bu tür öğrenme durumlarında elverişli modellerdir, Hessian matrisi yaklaşımı için birinci dereceden gradyan verisi kullanır.

Hessian-free (HF): Bu yöntem Newton yaklaşımı gibi ikinci dereceden gradyan verisi kullanan bir yöntemdir. Buradaki fark Hessian matrisini doğrudan bulma gereksinimi olmamasıdır. Bu yaklaşım, Hessian matrisini hesaplamak zorunda kalmadan ikinci dereceden eğitim hızına yaklaşmak için tasarlanmıştır.

Levenberg-Marquardt: Bu yöntem doğrusal olmayan bir fonksiyonu en aza indirme problemine sayısal bir çözüm sunan, hızlı ve kararlı yakınsamaya sahip bir algoritmadır. Yapay sinir ağları alanında, bu algoritma küçük ve orta ölçekli problemlerin eğitimi için uygundur [305]. Levenberg-Marquardt algoritması, yalnızca kayıp indeksi bir kareler toplamı biçiminde olduğunda (toplam kare hatası, ortalama kare hatası veya normalleştirilmiş kare hatası gibi) uygulanabilir. Kayıp indeksinin gradyanı ve Jakobiyen matrisinin hesaplanmasını gerektirir.

Quasi-Newton yöntemleri gibi, Levenberg-Marquardt algoritması da Hessian matrisini hesaplamak zorunda kalmadan ikinci dereceden eğitim hızına yaklaşmak için tasarlanmıştır. Performans fonksiyonu bir kareler toplamı şeklinde olduğunda (tipik eğitim beslemeli ağlarda olduğu gibi), o zaman Hessian matrisi şu şekilde tahmin edilebilir:

$$\mathbf{H} = \mathbf{J}^T \mathbf{J} \quad (4.51)$$

Gradyan ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (4.52)$$

Burada, $\mathbf{J}$ ağırlıklara ve sapmalara göre ağ hatalarının ilk türevlerini içeren Jakobiyen matrisidir ve $\mathbf{e}$, ağ hatalarının bir vektörüdür. Jakobiyen matrisi, Hessian matrisini hesaplamaktan çok daha az karmaşık olan standart bir geri yayılım tekniği ile hesaplanabilir. Levenberg-Marquardt algoritması, aşağıdaki Newton benzeri güncellemede Hessian matrisine bu yaklaşımı kullanır:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - [\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (4.53)$$

Burada, $\mathbf{w}$ ağırlık vektörü, $\mathbf{I}$ birim matris, μ ise kombinasyon katsayısıdır [306]. Burada skaler büyüklük μ , 0'a eşit olduğunda, bu Hessian matrisi yaklaşımını kullanan Newton metodudur. Büyük bir değer aldığında küçük bir adım boyutuyla dereceli azaltma olur. Newton metodu minimum hataya daha yüksek doğruluk ve hızla yaklaştığı için, bu yöntemle çabuk geçmek amacıyla, her başarılı adımın ardından μ azaltılır yalnızca geçici bir adım performans fonksiyonunu artıracak zaman artar. Bu şekilde, performans fonksiyonu algoritmanın her iterasyonunda azalacaktır [306].

Yapay sinir ağında katmanlar içinde kullanılan nöronların birbirleri ile ilişkisi yoktur. Sistemde olan bilgiyi bir sonraki katmana ya da çıkış katmanına aktarma görevini üstlenirler. Art arda gelen iki katmandaki nöronlar farklı aktivasyon değerlerine göre YSA modelinin öğrenme seviyesini belirleyip aktarım işlemini gerçekleştirir. Yapay sinir ağlarında nöron sayısı, giriş parametresi ve katman sayısı modelin önemli parametrelerindendir. Pek çok hiper parametre kullanılarak çıkış performansı artırılabilir. W ağırlık vektörü ise düğüm/nöron sayısı (hücre), bias (b) değerleri de gelecek katmandaki düğüm sayısı kadar olmalıdır.

4.4 Uygun Ortogonal Ayrıklaştırma (POD) Yöntemi

Uygun Ortogonal Ayrıştırma (POD), yüksek boyutlu veri kümelerinin baskın özelliklerini ortaya çıkarmayı amaçlayan veri analizi için güçlü ve pratik bir yöntemdir [307]. Yüksek boyutlu prosesler bu metotla daha düşük boyutlu yaklaşımlar yapılarak tanımlanabilir. Simülasyon, analiz ya da tasarımda yüksek mertebeden modellerin analizde kullanılamayacak kadar karmaşık olduğu durumlarda, model azaltma gerekliliği ortaya çıkar. Model indirgeme sırasında, orijinal modelin özelliklerinin ve kararlılığının korunması önemlidir. POD yöntemi sadece mevcut verilerin yeniden yapılandırılması için değil, aynı zamanda eksik verilerin yaklaştırılması için de kullanılır. Bu teknikte temel olarak deneysel ölçümler ya da sayısal simülasyon çıktılarından bir konvergenz matrisi oluşturulur, buna ilk kez Sirovich [308] tarafından sunulan “Anlık görüntü yöntemi” denilir. Sirovich’ in bu yöntemi HAD uygulamalarında da sıklıkla kullanılmaktadır. POD, yeni bir teknik olmasına rağmen görüntü işleme, sinyal analizi, veri sıkıştırma gibi alanların yanı sıra fiziksel mühendislik uygulamalarında da kullanılmaktadır. Türbülanslı akış modelleri, lineer olmayan sistemlerin tanımlanması, yapısal titreşimler ve yapı dinamiği, mikro elektro-mekanik sistemler gibi mühendislik uygulamalarında POD çalışmalarında rastlanmaktadır. [309–312] Bu teknik, Karhunen-Loève ayrışması (KLD), asıl bileşen analizi (PCA) ve tekil değer ayrıştırması (SVD) gibi farklı formlarda birçok fiziksel uygulamada kullanılan matematiksel bir yöntemdir [313]. Kütüphaneli cisimler etrafındaki akış dinamiği veya kanaldaki akış dinamiği POD metodu kullanılarak açıklanmıştır [314–317]. Aerodinamikte ve ısı transferinde parametrik POD metodu HAD yerine etkili bir yöntem olarak kullanılmıştır [318–320].

Mertebe azaltma modellerinin geliştirilmesi, araştırılan problemin fiziği hakkında hızlı, ucuz ve güvenilir tahmin araçlarıyla detaylı bilgi elde etme amacıyla gerçekleştirilmiş, birçok alanda da başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Isıl kimyasal işleme, viskoz olmayan kanat profilleri analiz ve tasarımı ve dinamik modeller bu tür merteye azaltma modellerinin başarılı örnekleridir [321].

Temel POD prosedürü burada kısaca özetlenmiştir. POD modları aşağıdaki ifadenin maksimize edilmesiyle elde edilir:

$$\max_{\psi} \frac{\langle |U, \psi|^2 \rangle}{(\psi, \psi)} = \frac{\langle |U, \Phi|^2 \rangle}{(\Phi, \Phi)} \quad (4.54)$$

Burada, (U, Φ) , Φ temel vektörünün (sıcaklık, basınç vb.), herhangi bir $U(x, t)$ alanı ile iç çarpımıdır. Alan değişkeni için x koordinat verilerini, t ise zamanı ifade etmektedir, $\langle \rangle$ zaman ortalamasını ifade eden simgedir. Sirovich [322] tarafından tanıtılan yöntemde, anlık görüntü adı verilen bir anlık çözümler topluluğu elde edildikten sonra buradan ortaya çıkan temel fonksiyonlarda elde edilen tüm modelin en büyük öz değerlere (eigenvalues) karşılık gelen öz vektörlere (eigenvectors) izdüşümü yapılarak indirgenmiş model bulunabilir. Daha açık bir ifadeyle, bir çözümden elde edilen orijinal veriler, daha az sayıda baskın mod kullanılarak yeniden oluşturulabilir ya da tahmin edilebilir. Verileri topladıktan sonra, POD tekniği, toplanan anlık görüntülerin dağılımını en iyi şekilde temsil eden bir dizi temel fonksiyon üretir. Her bir POD temel işlevi, fonksiyonların belirli bir yüzdesini yakalar [323,324]. Yeterli miktarda veri yakalamak için tüm veriler arasından belirli N sayıda POD modu (snapshot) seçilebilir ve ardından bu modlar, temel vektör Φ (basınç, sıcaklık) ile aşağıdaki gibi sonlu boyutlu bir yaklaşım olarak temsil edilebilir [325]:

$$U(x, t) \approx \sum_{i=1}^N a_i(t) \Phi_i(x) \quad (4.55)$$

Burada, Φ_i , grubun i 'inci modu, a_i de zamana bağlı POD katsayısıdır. Alan değişkendeki POD modlarını elde etmek için, ilk önce ölçümlerin yapıldığı i 'inci zamandaki bir dizi anlık veri (snapshots) elde edilir. Anlık veriler grubunun ortalaması aşağıdaki gibidir:

$$\bar{U}(x) = \langle U \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i(x) \quad (4.56)$$

Burada M snapshot sayısıdır. Daha sonra yeni bir (Φ_i) snapshot seti tüm verilerden ortalama değeri çıkarıldığı zaman elde edilir:

$$\Phi_i(x) = U_i(x) - \bar{U}(x) \quad (4.57)$$

Bu aşamadan sonra, $M \times M$ uzamsal korelasyon matrisi C aşağıdaki gibi oluşur;

$$C_i = \frac{1}{M} \int \Phi(x) dx, \quad i = 1, \dots, M \quad (4.58)$$

Alanın Φ_i POD vektörü öz değeri fonksiyonunun çözülmesiyle elde edilir;

$$C\Phi_i = \lambda_i \Phi_i \quad (4.59)$$

Burada, POD Φ_i modları C korelasyon matrisinin öz vektörleridir. Öz değeri λ_i alandaki tanımlanan norma göre i sayılı moddan alınan enerjiyi temsil eder. Bu enerji tanımlamasından yola çıkarak, Denklem 4.60' daki yaklaşım için POD modları sayısı (N) belirlenebilir. POD modları elde edildikten sonra, anlık görüntülerin POD modlarına yansıtılmasıyla alanın zaman katsayıları a_i elde edilebilir.

$$a_i(t) = \frac{1}{M} \int \Phi(x) dx. \quad i = 1, \dots, N \quad (4.60)$$

Buradaki denklemi yeniden oluşturma denklemi olarak adlandırılır.

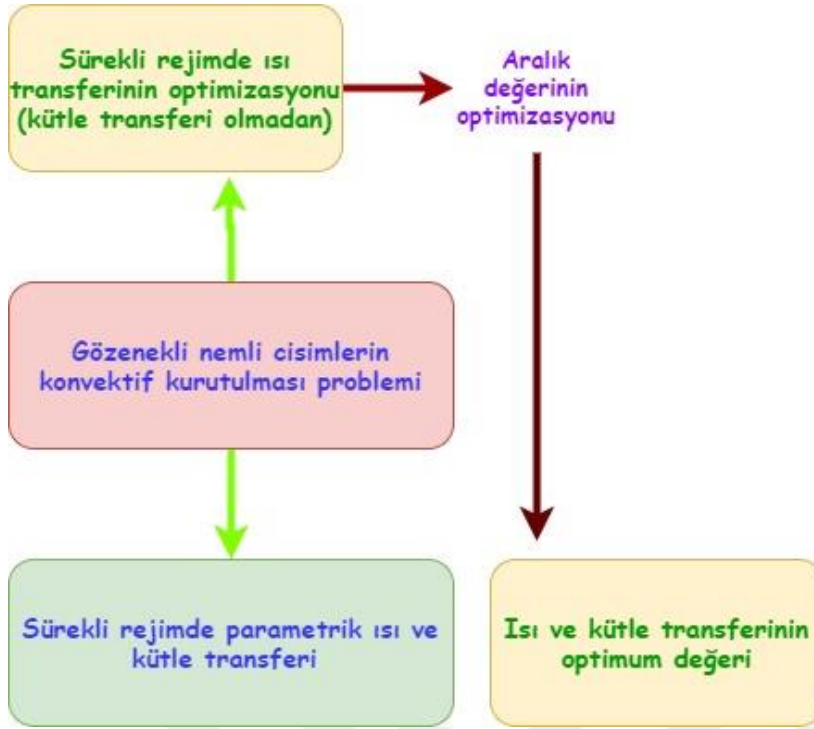
4.5 Optimizasyon Yöntemi

Kanaldaki gözenekli nemli nesnelerin konvektif kurutma uygulamaları için, nesneler ve kanal için ısı ve kütle transferi denklemlerinin birleştirilmesine ihtiyaç vardır. Daha önceki çalışmalarda nemli cisimler boyunca ısı ve kütle aktarım katsayıları belirlenmiş ve ısı/kütle aktarım taşınım denklemleri sadece nesneler için çözülmüştür. Ancak, nesneler boyunca yerel ısı transfer katsayılarının zamana bağlı olması nedeniyle

bu yaklaşım doğru olmayabilir. Aynı zamanda nesneler arasındaki boşluktaki değişikliklere göre de katsayılar değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 4.9' da optimizasyonda kullanılan yaklaşım şematik olarak gösterilmiştir.

Çalışmanın ilk adımında, kütle transferini hesaba katmadan ısı transferini maksimize eden cisimler arası yatay ve dikey mesafeyi bulmak için bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Termo-akışkan ile cisimlerin kurutulduğu problemde, amaç fonksiyonu olarak konvektif ısı transferi miktarını gösteren boyutsuz Nusselt sayısı kullanılmıştır. Optimizasyon için COBYLA (Constrained Optimization BY Linear Approximations) algoritması kullanılmıştır. Bu türevsiz yöntem (amaç fonksiyon türevi bilinmemektedir veya hesaplama açısından pahalıdır), kısıtlı problemler için sayısal bir optimizasyon tekniğidir.

Bu gradyansız yöntem ile hem objektif fonksiyonu hem de kısıtlamalar için doğrusal yaklaşımlar korunur ve güncellenir. Bu optimizasyon yönteminde, bir simpleks köşelerinde enterpolasyon yapılırken, her yineleme adımında hedefin optimizasyonu bir güven bölgesi içinde gerçekleştirilir. Yöntem kısıtlı bir optimum değere doğru geliştiğinde bölgenin yarıçapı azalır. Bu optimizasyon rutini, aşağıda açıklandığı gibi birleştirilmiş alan denklemlerini çözmek için kullanılan Comsol yazılımında uygulanmaktadır. Termo-akışkan sistemindeki parametreleri oluşturmak için kontrol değişkenleri kullanılır ve Kısmi diferansiyel denklemler (KDD) kısıtlama optimizasyonundaki bloklardan ortalama Nusselt sayılarının toplamı olan KDD çözümünün bir fonksiyonu elde edilir. Genel optimizasyon probleminde, PDE problemi şu şekilde bir eşitlik kısıtlaması olarak dahil edilir:



Şekil 4.9 Optimizasyon şeması

$$\begin{aligned}
 &f(\Phi(\psi), \psi) \\
 &\xi(\Phi(\psi), \psi) = 0, \\
 &lb \leq G(\Phi(\psi), \psi) \leq ub
 \end{aligned} \tag{4.61}$$

Yukarıdaki gösterimde, kontrol değişkenleri, KDD çözümleri ve kısıtlamalar ψ , Φ ve G ile temsil edilirken optimizasyon çözücü olarak COBYLA seçilmiştir. İlgili parametreler için alt ve üst sınırlar sınır şartlarından elde edilir. Kurutulacak nemli gözenekli nesnelerden ortalama ısı transferini maksimize eden optimum parametreleri belirlendiğinde, nesnelerdeki kütle taşıma özellikleri kanal akış denklemleri ile birleştirilir.

5 SONUÇLAR

5.1 İki Boyutlu Bir Kanalda Nemli Gözenekli Cisimlerin Kurutulması

Tez konusu olan çalışmaya giriş olarak, konvektif kurutmaya ilgili sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiş, sonuçlar değerlendirilerek çeşitli makaleler yayınlanmıştır. Çalışmanın ilk aşaması olarak iki boyutlu simülasyonlar hazırlanmış, kanal içerisinde farklı koşullar altında çeşitli nemli cisimlerin konvektif kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kurutma işleminde meydana gelen fiziksel olaylar kanal havası akışı, kanaldaki sıcak kurutma havasından ürüne olan ısı transferi ve üründen ortama olan kütle (nem) transferidir. Oluşturulan simülasyonlarda, tüm bu fiziksel olgular bir arada bütünleşik olarak incelenmiş, ısı ve kütle transfer katsayıları zamansal ve uzamsal olarak farklılıklar göstermiştir. Ayrıca, gözenekli cisim içerisindeki boşluklar nem ile birlikte sıvı su, su buharı ve hava karışımı olarak üç farklı fazda ele alınmış, çok fazlı yapıda oluşan kütle transferi biçimleri transfer denkleminde eklenmiştir. Öncelikle, iki boyutlu simülasyonlar için geçerli olan yönetsel denklemlerin belirlenmesi önemlidir.

a. Akış alanı denklemleri: Kanal içerisindeki hava, başlangıçta sıcak kuru havadır. Belli bir kuruma süresinden sonra gözenekli cisimlerden havaya nem transferi gerçekleşir, bu şekilde ortam havası nemlenir. Kanal içerisinde sıkıştırılmaz, Newtonyen laminar akış koşulları geçerli olduğunda, kanaldaki hava-su buharı karışımı için kütle, momentum korunumu ve enerji denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5.4)$$

Kanal içerisindeki hava akışının sıkıştırılmaz, Newtonyen ve türbülanslı olması koşulunda standart k-ε türbülans modeli girdap viskozitesi ve momentum denklemlerine aşağıdaki gibi uygulanır [257]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} P_k \quad (5.5)$$

$$\rho_a \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_a (\vec{v} \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu_a + \frac{M_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5.6)$$

$$\rho_a \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_a (\vec{v} \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu_a + \frac{M_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.7)$$

Burada k kinetik enerji ve ε türbülanslı akışın enerji dağılımı, P_k viskoz efektlerden kaynaklı kinetik enerji üretimi, C_μ, σ_k, σ_ε, C_{ε1}, C_{ε2}, ise türbülanslı akışlarda yaygın olarak kullanılan boyutsuz sabitlerdir ve aşağıdaki değerleri alırlar [104]:

$$C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,00, \sigma_\varepsilon = 1,30, C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92$$

Bu ifadelerde, k ve ε hız ölçeğini tanımlamak için kullanılır ve mevcut problemde olduğu gibi yüksek Reynolds sayı değerlerinde katı duvardan y eksenine mesafesinde (y +) evrensel hız dağılımı aşağıdaki denklemde olduğu gibi kullanılır:

$$v^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + 1,55 \quad (5.8)$$

b. Gözenekli cisim denklemleri: Kurutulacak olan nemli gözenekli cisim, katı kısım, sıvı suyla dolu gözenekler ve su buharı ve havayla dolu gözenekler olmak üzere çok fazlı bir yapıya sahiptir. Sıcak kurutma havasından olan ısı transferinin etkisiyle cisim içerisindeki gaz fazında bulunan su konveksiyon ve difüzyon etkisiyle dışarı atılır ve bu şekilde cisimdeki nem miktarı azalır. Nem transferini önemli bir şekilde etkileyen bir özellik olan gözenekliliği tanımlamak için önce, fazlar arası ilişkiyi ifade eden temsili temel hacim terimi ifade edilmelidir [326]:

$$\Delta V = \Delta V_g + \Delta V_l + \Delta V_s \quad (5.9)$$

Burada alt indisler g, l ve s sırasıyla gaz, sıvı ve katı fazları ifade etmektedir. Bu tanımdan yola çıkarak, gözeneklilik, cisim içerisindeki gaz ve sıvı fazların hacminin cismin toplam hacmine oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V_g + \Delta V_l}{\Delta V} \quad (5.10)$$

Sıvı ve gaz fazları için doygunluk kavramı nem transferini ifade eden terimler olup gözeneklilik cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$S_l = \frac{\Delta V_l}{\Delta V_g + \Delta V_l} = \frac{\Delta V_l}{\varepsilon \Delta V} \quad (5.11)$$

$$S_g = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_g + \Delta V_l} = \frac{\Delta V_g}{\varepsilon \Delta V} \quad (5.12)$$

Cisim içerisindeki çok fazlı yapı, kurutma işlemi boyunca cisim içerisinde çok fazlı bir akış gerçekleşmesine sebep olur. Kütle transferi buhar fazı için (su buharı ve hava) difüzyon ve basınç kaynaklı konveksiyon şeklinde gerçekleşir, sıvı faz için ise basınç ve kılcılık etkisinden kaynaklanır. Gözenekli cisim içerisindeki nem transferi için yönetsel denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_l) = -R_{evap} \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial c_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_g) = R_{evap} \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_a) = 0 \quad (5.15)$$

Burada, R_{evap} buharlaşma oranını, $\vec{n}$ konvektif, difüzif ve kılcılık etkisinden doğan kütle akıların toplamıdır. Gaz fazının kütle akışları, moleküler difüzyon ve basınçla yönlendirilen konveksiyon yoluyla meydana gelir. Basınç gradyanlarından kaynaklanan konvektif akı Darcy yasası ile, moleküler difüzyon Fick yasasına göre sırasıyla 5.16 ve 5.17 ile tanımlanır:

$$n_g^p = -\rho_g \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial s} \quad (5.16)$$

$$n_g^d = -D_g \frac{\partial C_g}{\partial s} \quad (5.17)$$

Denklem 5.16' da P gazın toplam basıncı, ρ_g ve μ_g sırasıyla gazın yoğunluğu ve dinamik viskozitesidir, k_g gaz fazının geçirgenliği, S ise yüzey alanı ifade eden terimlerdir. Su buharı için geçirgenlik ifadesi, daha da önce ifade edildiği gibi gaz fazının bağıl geçirgenliği ile mutlak geçirgenliğin çarpımıdır. Mutlak geçirgenlik ise, gözenekli cismin gözeneklerinin akış yatağındaki kıvrımlılığına (τ) ve gözeneklerin tüm kütleye oranına bağlı bir ifadedir [102]. Konveksiyonla olan gaz transferi ifadesi yukarıdaki tanımlardan anlaşıldığı gibi hem gözeneklerdeki gazın özelliklerine (yoğunluk, viskozite) hem de gözenekli matrisin özelliklerine (geçirgenlik) bağlıdır. Denklem 5.10' da c_g gaz fazının konsantrasyonu, D_g ise moleküler difüzyondur. Moleküler difüzyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir[102]:

$$D_g = \frac{D}{\tau} \varepsilon \quad (5.18)$$

Burada, D tüm kütledeki difüzyon, τ kıvrımlılık (tortuosity) olarak ifade edilir. Burada da hem gazın su buharının özelliklerine hem de gözenekli matrisin özelliklerinde bağlı bir kütle akışı söz konusudur. Gözenekler içerisindeki hava ve su buharı karışımı da ideal gaz olarak kabul edilmiştir.

Sıvı fazdaki suyun kütle akışı kılcallık etkisi (kapiler etki) ile ifade edilir ve sıvı moleküllerin birbirleriyle etkileşiminden kaynaklanır. Burada suyun hareketi, ucu açık ince bir tüp içerisindeki suyun yukarıya çıkmasına benzer şekilde olur. Tüpün çapı küçüldükçe, kapiler etki dolayısıyla suyun uca doğru yükselme seviyesi artar. Gözenekli cismin içerisindeki sıvı su, konsantrasyonun az olduğu kısımlarda daha fazla tutulurken yoğun olan kısımlardaysa çok sıkı tutulamaz. Kapiler etkiden kaynaklanan bu farktan dolayı, sıvı akışı sıvının çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru gerçekleşir ve doymamış akış olarak adlandırılır, özellikle gıdaların kurutulmasında çok önemli bir durumdur. Basınç nedeniyle sıvıların gözenekli bir malzeme içinde taşınması tıpkı gazlarda olduğu gibi (Denk. 5.19) Darcy yasası ile

tanımlanır. Fakat sıvı fazdaki basınç etkisi gaz fazında olduğundan daha farklıdır. Yukarıda bahsedilen kapiler etki sıvıda bir ters basınç oluşmasına sebep olur, örneğin su, bu basınç tarafından tutulur.

Böylece sıvı fazın kütle akışı aşağıdaki gibi tanımlanır [102]:

$$n_l^p = -\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \frac{\partial P}{\partial s} + \rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial s} \quad (5.19)$$

Denklemden P cismin içerisindeki toplam gaz basıncı, p_c ise sıvı fazın kapiler basıncıdır. Görüldüğü gibi sıvı faz kütle akışı, toplam gaz basıncından kaynaklı akı (sağ taraftaki ilk terim) ile kapiler basınçtan kaynaklı akı (sağ taraftaki ikinci terim) arasındaki farkla ifade edilebilir. Denklemden ikinci terim olan kapiler etkiden kaynaklı basınç, sıvı su konsantrasyonu ve sıcaklığa bağlı olarak ifade edilirse denklem aşağıdaki biçime dönüşür:

$$n_l^p = -\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \frac{\partial P}{\partial s} + \rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial c_l} \frac{\partial c_l}{\partial s} + \rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial s} \quad (5.20)$$

Denklemin 5.20' yi, yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki ikinci ve üçüncü terime uygularsak;

$$n_l^p = -\rho_l \frac{\kappa_l}{\mu_l} \frac{\partial P}{\partial s} - D_c \frac{\partial c_l}{\partial s} + D_T \frac{\partial T}{\partial s} \quad (5.21)$$

Burada, D_c ve D_T konsantrasyon kaynaklı kapiler difüzyon ve sıcaklık kaynaklı kapiler difüzyon olarak tanımlanabilir. Burada difüzyon terimi kullanılsa da bilinmelidir ki, akış mekanizması moleküler difüzyona değil kılcallık etkisine bağlı şekilde gelişir. Bunun yanı sıra, konsantrasyon farklarından doğan kılcal difüzyon, sıcaklık farklarından kaynaklanan kılcal difüzyona göre çok daha baskın bir etkiye sahiptir.

Tüm fazların ısı dengede olduğu düşünülerek, gözenekli cisim için enerjinin korunumu denklemi aşağıdaki gibi yazılır [186]:

$$\rho_{eff} c_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_g h_g + \vec{n}_l h_l) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) - h_{fg} m_{evap} \quad (5.22)$$

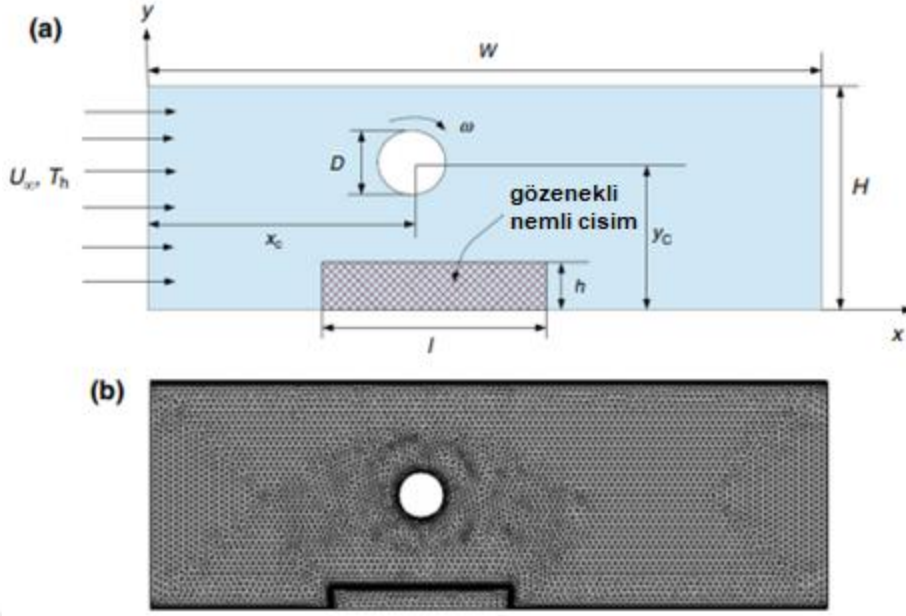
Burada T her fazın sıcaklığı (K), h_g ve h_l sırasıyla su buharı ve sıvı suyun ortalapileri (J), $c_{p,eff}$ efektif ısı kapasite, ρ_{eff} efektif yoğunluk ve k_{eff} efektif ısı iletkenliktir. Denklemin sağ tarafındaki son terim olan buharlaşmadan gelen ısı kaynak terimi yerine ifade edilmiştir ve burada, h_{fg} buharlaşma gizli ısı (J / kgK), m_{evap} ise buharlaşma kütlesidir (kg / m³s) ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$m_{evap} = K(a_w c_{sat} - c) \quad (5.23)$$

Burada K buharlaşma oranı (1/s), a_w su aktivitesi, c_{sat} doyguluk konsantrasyonu ve c ise anlık konsantrasyondur (kg / m³). Buharlaşma hızı sabit bir değere sahiptir ve su aktivitesi, genelde belli gıdalarda belli koşullarda sabit bir değeri aralığında kabul edilse de tez çalışmasındaki hesaplamalarda cismin nem miktarına bağı olarak değışen bir model baz alınmıştır [327]. Yukarıdaki yönetsel denklemlerde yer alan, gözenekli cisimlere ait efektif termofiziksel özelliklere ait kullanılan modeller, Bölüm 4' te verilmiştir.

5.1.1 İki Boyutlu kanalda dönen bir silindir etkisiyle dikdörtgen nemli ürünün kurutulmasının sayısal analizi

İlk çalışma için şematik gösterim Şekil 5.1. de verilmiştir. Bir gıda numunesi kanalın orta noktasına yerleştirilmiş olup, problemin çözümü iki boyutlu olarak düşünülmüştür. Çözüm laminar akışta yapılmış olup, gözenekli ortam içerisinde sıvı ve gaz fazları tanımlanmıştır. Kuru hava sıcaklığı 60 °C (333 K) olarak alınmıştır. Buharlaşma yoluyla suyun çok fazlı geçişi oluşmuştur. Cisme ve kanal havasına ait termofiziksel özellikler Tablo 5.1' de verilmiştir. Aksi belirtilmediği sürece, bu çalışmayla beraber yapılan tüm çalışmalarda aynı termofiziksel özellikler geçerlidir. Akış alanı için yönetsel denklemler bir önceki bölümde bulunan laminar akış için olan denklemlerdir. Gözenekli cisim denklemleri ve efektif termal özellik denklemleri de bir önceki bölümde belirtildiği gibidir.



Şekil 5.1 5.1.1 nolu çalışma için oluşturulan fiziksel model (a) ağ dağılımı (b)

a. Başlangıç ve sınır koşulları

Akışkan alanı: Kanal girişinde hız ve sıcaklık düzenlidir. Çıkışta, tam gelişmiş akış, alt ve üst sınırlarda ise, kaymama koşulu uygulanmıştır. Başlangıç şartları aşağıdaki gibi verilebilir:

$$c_v(0) = 0, P(0) = P_{\text{atm}}, T(0) = 293 \text{ K}$$

Kurutma havasının giriş sıcaklığı $T = 333 \text{ K}$ 'dir. Silindir, gözenekli ortamın üst tarafına yerleştirilmiş olup, pasif olarak akış ve ısı transferini kontrol etmek amacıyla, kendi eksenine etrafında döner. Buna göre, açısal hız denklemleri;

$$u_x = -\omega(y - y_c) \quad (5.24)$$

$$u_y = \omega(x - x_c) \quad (5.25)$$

Burada, u_x ve u_y , x ve y eksenlerindeki açısal hızlardır. x_c ve y_c ise, koordinat sisteminin merkezleridir. $\omega (\text{rad s}^{-1})$ ise açısal dönme hızıdır.

Gözenekli matris: Gözenekli matrisin başlangıç koşulları aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$T(0) = 293 \text{ K}, S_1(0) = 0.5$$

Gözenekli ortamın sıvı fazı için, sıvı suyun başlangıç yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$c_l = \frac{S_l(0) \rho_l \varepsilon}{M_l} \quad (5.26)$$

S_l sıvı doygunluğu, M_l molar ağırlık, ε ise gözenekliliktir.

b. Çözüm metodu

Problem modeli ticari HAD kodu COMSOL Multiphysics 5.4 ile çözülmüş, ana denklemler için sınır koşulları boyunca Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Denklemlerin zayıf formunu elde etmek için Galerkin ağırlıklı artıklar yöntemi kullanılmıştır. Alan içindeki akış değişkenleri, farklı sıralardaki Lagrange polinomları ile yaklaşılmıştır.

Problem geometrisi üçgensel elemanlara ayrılmıştır. Momentum denklemlerindeki doğrusal olmayan terimleri basitleştirmek için Newton-Raphson yineleme algoritması kullanılmıştır. Çözümün yakınsaması, değişkenlerin her biri için bağıl hata aşağıdaki yakınsamayı sağladığında varsayılır;

$$\left| \frac{\Gamma^{n+1} - \Gamma^n}{\Gamma^{n+1}} \right| \leq 10^{-6} \quad (5.27)$$

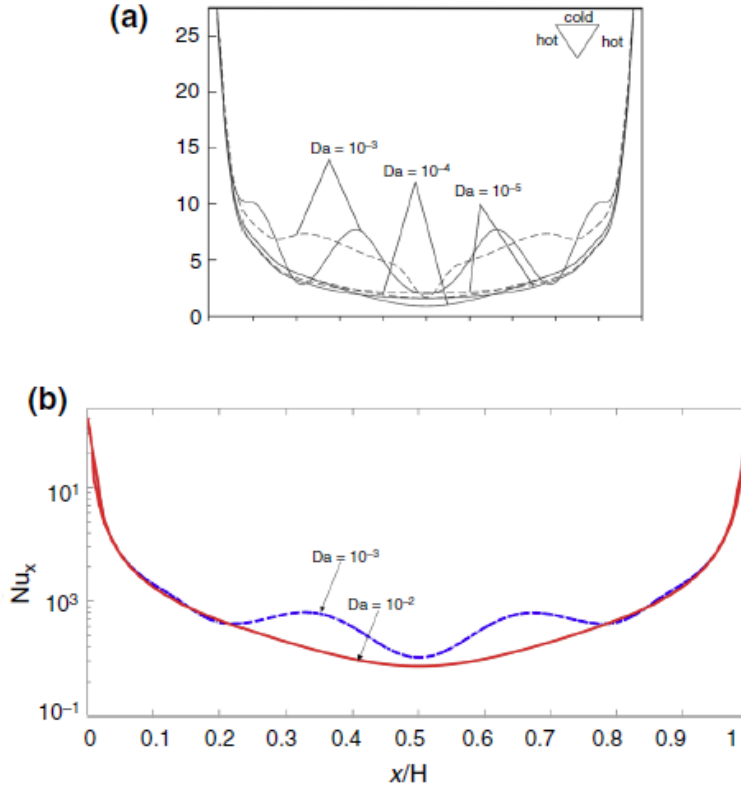
Tablo 5.1 Fazların ve katı cismin termofiziksel özellikleri

Özellik	Faz	Değer	Referans
Termofiziksel özellikler			
Isı iletkenliği, k W mK ⁻¹	Hava	0,025	Bejan, [328]
	Sıvı su	0,59	Bejan, [328]
	Su buharı	0,026	Bejan, [328]
	Katı cisim	0,21	Halder ve ark., [329]
Özgül ısı, c	Hava	1006	Halder ve ark., [40]

J /kg K	Sıvı su	4182	Kumar ve ark., [186]
	Su buharı	2062	Choi ve ark., [261]
	Katı cisim	1650	Halder ve ark., [329]
Yoğunluk, ρ kg m ⁻³	Hava	1,205	Çengel ve Boles, [330]
	Sıvı su	998,2	Çengel ve Boles, [330]
	Gözenekli matris	1528	Halder ve ark., [329]
Dinamik Viskozite, μ kg/ ms	Hava	$1,81 \cdot 10^{-5}$	Bejan, [328]
	Sıvı su	$1,002 \cdot 10^{-3}$	Bejan, [328]
	Su buharı	$1,8 \cdot 10^{-5}$	Bejan, [328]
Molar kütle kg /mol	Hava	0,028	Çengel ve Boles, [330]
	Sıvı su	0,018	Çengel ve Boles, [330]
	Su buharı	0,018	Çengel ve Boles, [330]
Gözeneklilik, ε	Gözenekli matris	0,8	Bu çalışma
Geçirgenlik, κ	Gözenekli matris	$1 \cdot 10^{-14}$	Bu çalışma
Kıvrımlılık, τ	Gözenekli matris	1,25	Ghanbarian ve ark., [331]
Sabitler			
Buharlaştırma sabiti, K		1000	Bu çalışma
Evrensel gaz sabiti, R_g		8,314 J/ mol K	Çengel ve Boles, [330]
Buharlaştırma gizli ısı, h_{fg}		2,26e6 J/ kg	Çengel ve Boles, [330]
Ortam basıncı, P_{amb}		101,325 pa	
Buhar doygunluğunun başlangıç konsantrasyonu, $c_{v, sat}(0)$		0,95914 mol/ m ³	Bu çalışma

c. Ağ seçimi ve sayısal kodun doğrulanması

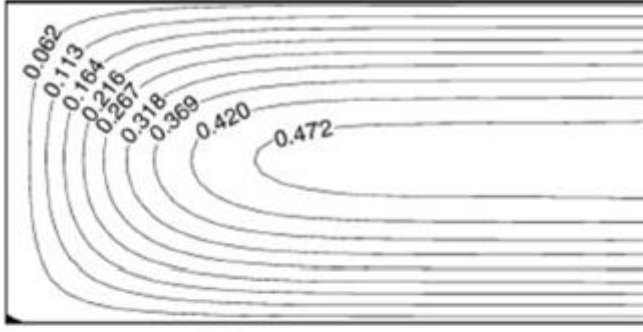
Çözümün ağ yapısından bağımsız olduğunu göstermek için, çeşitli ağ boyutlarında denemeler yapılmıştır. Ağ örgüsü, çözüm hassasiyeti gerektiren bölgelerde yüksek gradyanları çözmek için özellikle duvarların yakınında ve ara yüzde daha sık tayin edilmiştir. Hesaplama alanının ağ gösterimi Şekil 5.1b' de gösterilmektedir. Literatürdeki mevcut farklı çalışmalardan yararlanılarak sayısal kodun doğrulanması da yapılmıştır. Doğrulama için, Basak ve arkadaşlarının sayısal sonuçlarından yararlanılmıştır [332]. Darcy sayısının iki değeri için üst duvarda yerel Nusselt sayı varyasyonunun karşılaştırması Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Bir iç dönen silindir ile farklı şekilde ısıtılmış bir boşluktaki konveksiyon için başka bir karşılaştırma Roslan ve ark. için yapılmıştır [333]. Tablo 5.2, iki farklı açısız dönme hızı ile silindir yarıçapına göre ortalama Nusselt sayılarını göstermektedir. Başka bir doğrulama ise patatesin konvektif kurutulması için sayısal ve deneysel veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir [334,335]. Öztop 'un sayısal çalışmasında [334], ısı ve kütle transfer katsayıları ile termofiziksel özellikler Akpınar'ın [335] deneysel çalışmasından alınmıştır. Isı ve kütle taşınımı için konvektif koşullar ile bağlantılı ısı ve kütle transferi problemi sayısal olarak çözülmüştür. Doğrulama için mevcut çalışmaya benzer bir yaklaşım benimsenmiştir. $V = 1$ m/s, $AR = 2$ ve $T = 353$ K için konvektif koşullarda patateslerin 100 dakikalık bir zamanda konvektif kurutulması için nemli cismin nem dağılım karşılaştırmaları Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Tablo 5.3, çeşitli zaman durumlarında patatesin konvektif kurutulması için sayısal ve deneysel boyutsuz nem oranlarının karşılaştırmasını göstermektedir. Sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



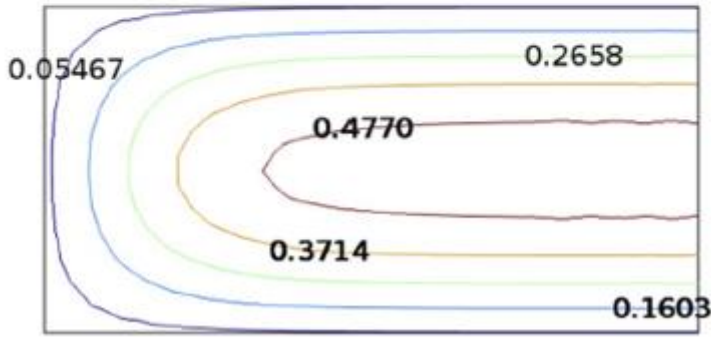
Şekil 5.2 Üst duvar boyunca yerel Nusselt numarası değişimi $Ra = 5 \times 10^5$, $Da = 10^{-4}$ sabit değerleri için $Pr = 0.015$. a) Basak ve ark. [332], b) Sayısal çalışma

Tablo 5.2 Ortalama Nusselt sayısının Roslan ve ark.'ın çalışmasıyla [333] karşılaştırılması.

	Sayısal Çalışma	Roslan ve ark.	Fark (%)
$\Omega=100$, $R=0.2$	4.81	4.78	-0.63
$\Omega=500$, $R=0.1$	4.74	4.75	-0.21



a) Karşılaştırma çalışması



b) Sayısal Çalışma

Şekil 5.3 $t=100$ dk Mevcut çalışma ve literatürde [199]elde edilen nem içeriği değerlerinin karşılaştırılması ($V = 1\text{m/s}$, $AR = 2$, $T = 353\text{K}$)

Tablo 5.3 Patatesin çeşitli zamanlarda konvektif kurutulması için sayısal ve deneysel boyutsuz nem oranının karşılaştırılması ($V = 1\text{ m/s}$, $AR = 2$ and $T = 353\text{ K}$)

Zaman (dk)	Boyutsuz nem oranı	
	Sayısal HAD çalışması [199]	Deneysel çalışma [336]
50	0.74	0.71
100	0.506	0.48
200	0.212	0.20
300	0.0993	0.095

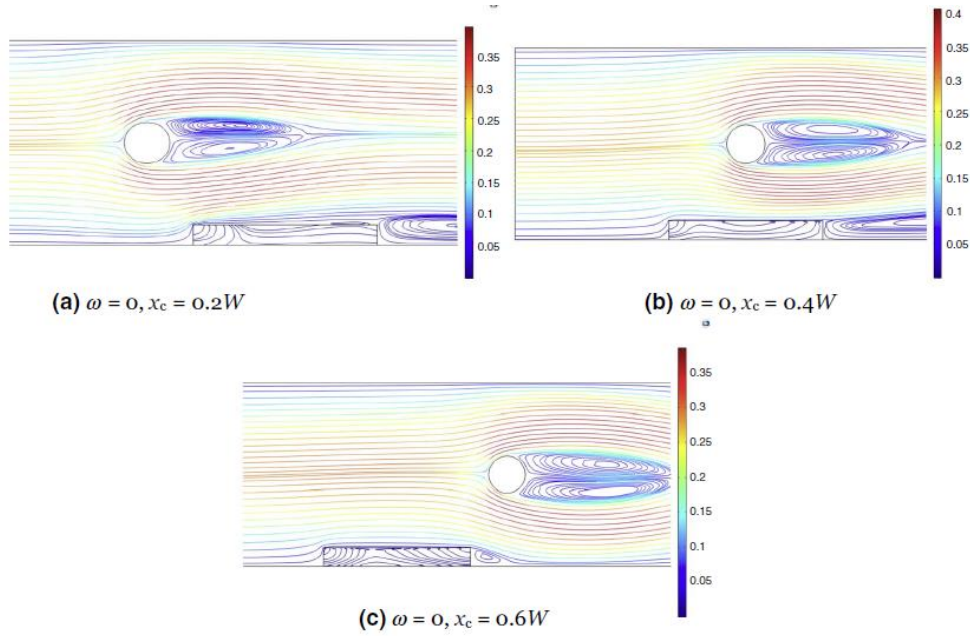
c. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, dikdörtgen gözenekli bir ortamın bir kanalda konvektif olarak kurutulması sayısal olarak incelenmiştir. Ortamın üzerine dönen bir silindir monte edildi ve silindirin x ekseni konumu, açısıal hızı ve yarıçapı farklı değerlerle değiştirilmiştir. Kurutma havasının sıcaklığı sabit ve 333 K değerinde kabul edilmiştir. Havanın hızı laminar ve tam gelişmiş akış koşullarında farklı değer üzerinden değerlendirilip, gözenekli cisimden kanaldaki havaya ısı ve nem taşınması bu koşullarda hesaplanmıştır. Çalışma, laminar akış koşullarında 2 boyutlu olarak kütle korun denklemleriyle çözölmüştür.

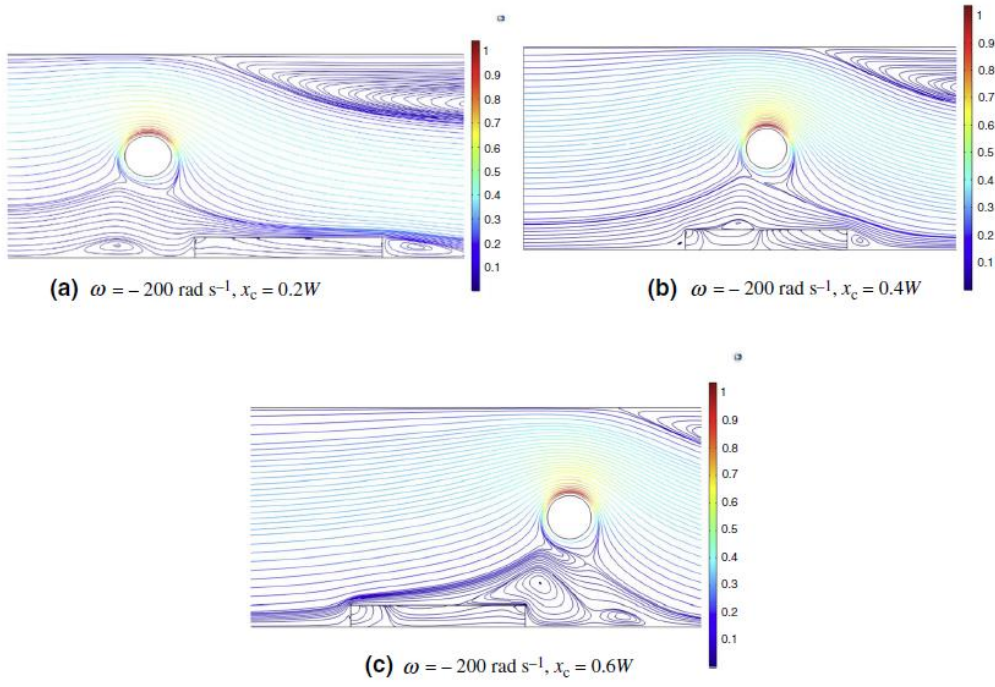
şekil 5.4- şekil 5.6 kanal içerisindeki farklı açısıal dönme hızları için silindirin farklı konumlarında kanal içerisindeki akım çizgilerini göstermektedir. Silindirin açısıal yönü ω negatif olduğunda saat ibresi yönündedir. şekil 5.4'de silindir sabit olduğunda silindirin arkasında girdaplar meydana gelmiştir. Gözenekli cismin arkasında silindirin bulunduğu yerde cismin gerisinde şekil 5.4c gösterildiği gibi vorteks oluşmaktadır. Silindir yüzeyi ve kanal arasındaki boşluktan dolayı gözenekli cismin duvarındaki boşluk azalır bu bölgede hızlar artar. şekil 5.5'te silindir saat ibresi yönünde dönmektedir ve döner silindirin bulunduğu yere bağlı olarak silindirin altında girdaplar oluşur ($\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$). Silindirin saat ibresinin tersi yönündeki dönüşü için, gözenekli cismin önüne doğru daha fazla akış sapması yaşanır ve silindirin arkasında vorteks oluşmaz.

şekil 5.7, silindir gözenekli cismin ortasında konumlandırıldığında ($x_c = 0.4W$) farklı ω değerleri için kanaldaki ve gözenekli cisim içindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. $\omega = 0$ için, gözenekli cismin duvarları boyunca sınır tabakaları geliştirilir ve silindirin dönüşü ile bu sınır tabakaları etkilenir. Gözenekli cisim içinde, termal gradyanlar farklı ω değerlerinden etkilenir. şekil 5.8, silindirin farklı çap boyutları için akım çizgilerini gösterir. Silindirin boyutu küçük olduğunda, silindirin arkasında küçük bir alanda girdap bölgesi görülür ve kanaldaki akış üzerindeki etkisi azdır. Bununla birlikte silindirin yarıçapı kademeli olarak artırıldığında, kanal akışı üzerindeki etkisi açıkça görölmektedir. Silindirin üstündeki kanalın üst kısmında girdap akımları oluşmakta ve artan silindir boyutları ile girdap boyutları büyümektedir. Gözenekli cismin arkasına doğru kanal akışının daha fazla sapması nedeniyle daha yüksek silindir boyutları için, bu bölgedeki girdap akımları görülmemiştir. Fakat gözenekli cismin önünde girdap

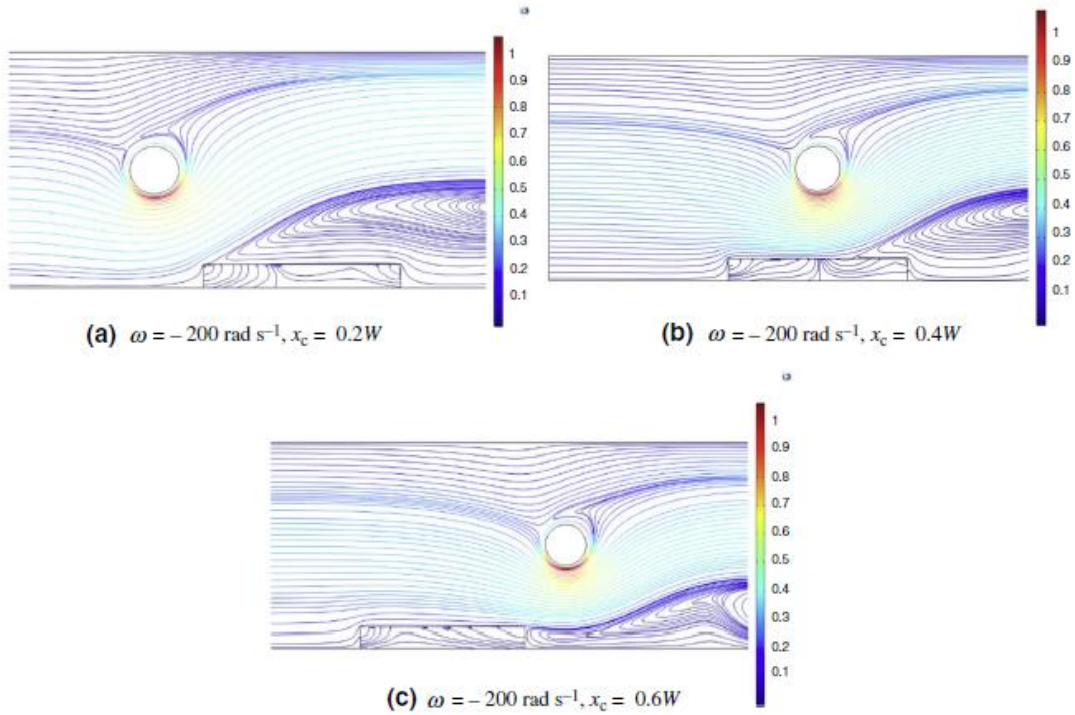
akımları belirlemiştir. Şekil 5.9, 90 dakikalık kuruma süresinde değişen çap boyutlarının yüzey sıcaklığı dağılımını göstermektedir. Ara yüzey sınırına yakın eş sıcaklık eğrileri sıkışmış ve gözenekli cisim içinde artan silindir ebatları ile termal farklar daha belirgin hale gelmiştir. Kanaldaki kurutma havasının hızının eş akış çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri üzerindeki sonuçları Şek. 5.10. ve Şekil 5.11’ de verilmiştir. Daha düşük kanal hızı için, silindirin dönüşü kanal akışı üzerinde etkilidir. Daha yüksek u değerleri için, bu durumda dönmenin etkisi kanal akışı üzerinde azaldığından, silindir ve gözenekli cisim arkasında girdap akımları oluşmuştur. Cisim ile akış hacmi arasındaki ara yüz boyunca termal sınır tabakaları daha düşük hızlar için bozulmuş olsa da (artan dönme etkisi), gözenekli cisim içinde, termal gradyanlar artan kanal giriş hızları için daha yüksek hale gelir (Şekil 5.11).



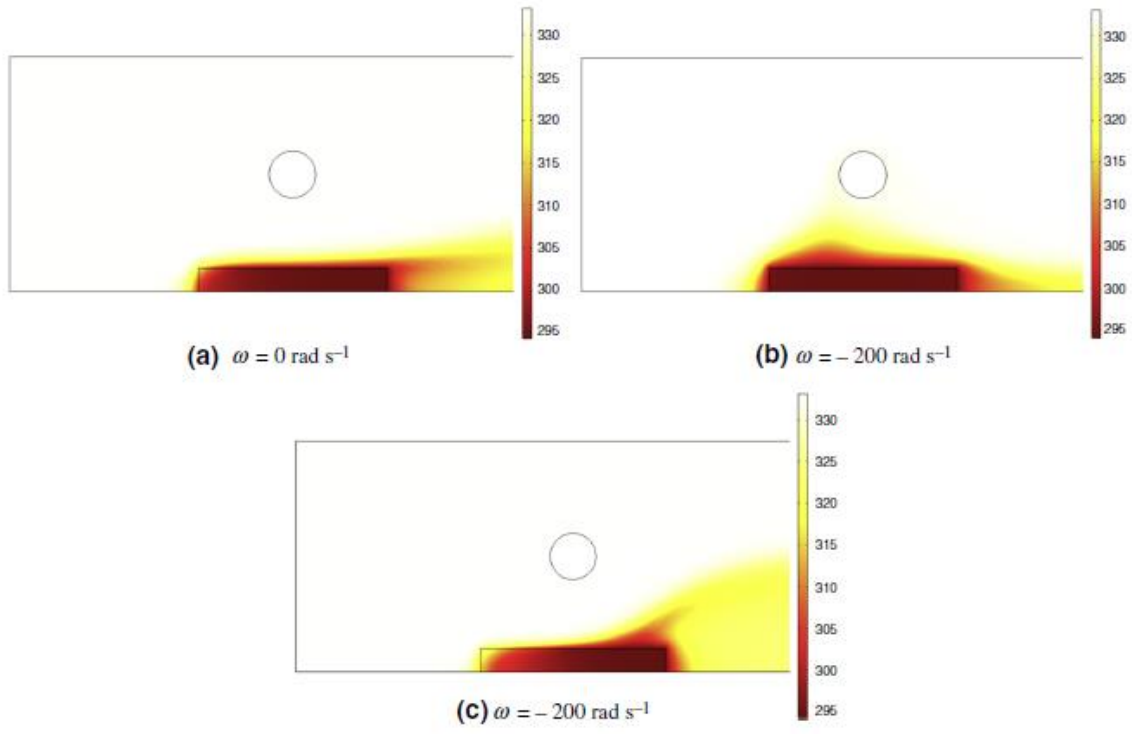
Şekil 5.4 Silindirin farklı konumları ve $\omega=0 \text{ rad s}^{-1}$ için akım çizgileri ($D=0.1H$, $u=0,2 \text{ m s}^{-1}$)



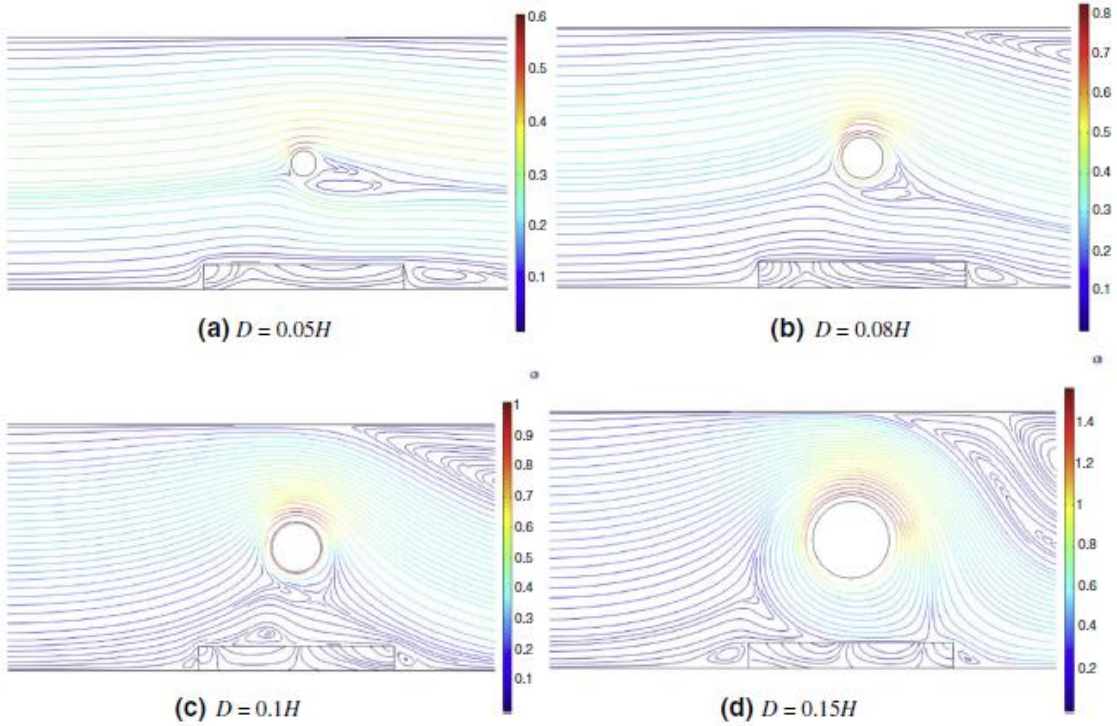
Şekil 5.5 Silindirin farklı konumları ve $\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$ için akım çizgileri ($D=0.1H$, $u = 0,2 \text{ m s}^{-1}$)



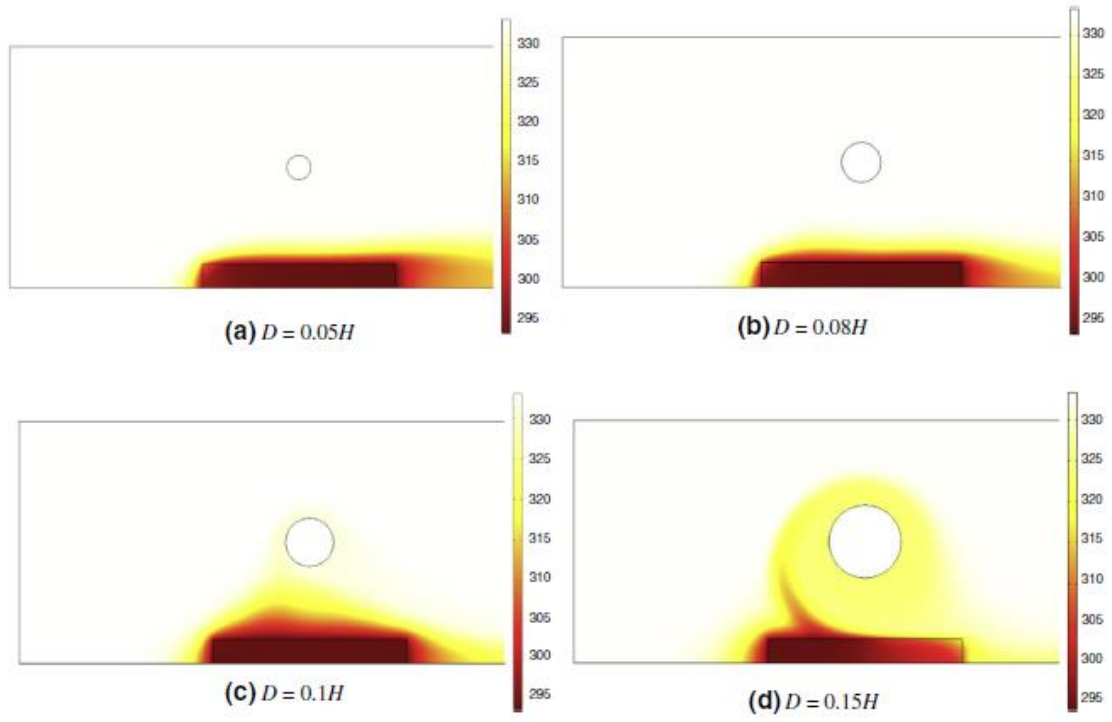
Şekil 5.6 Silindirin farklı konumları ve $\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$ için akım çizgileri ($D=0.1H$, $u = 0,2 \text{ m s}^{-1}$)



Şekil 5.7 Farklı ω değerlerinde sıcaklık eş eğrileri ($D=0.1H$, $u=0,2 \text{ m s}^{-1}$, $t=90 \text{ d}$)

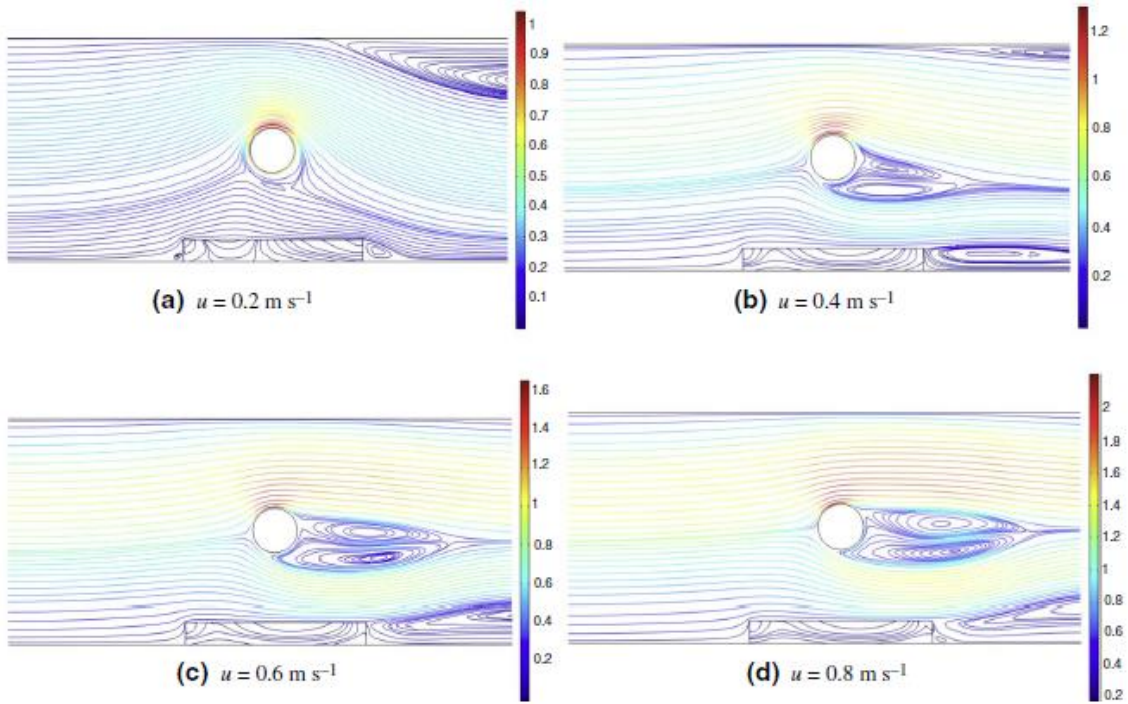


Şekil 5.8 Farklı D değerlerinde akım çizgileri ($\omega=-200 \text{ rad s}^{-1}$, $u=0,2 \text{ m s}^{-1}$, $t=90 \text{ dk}$)

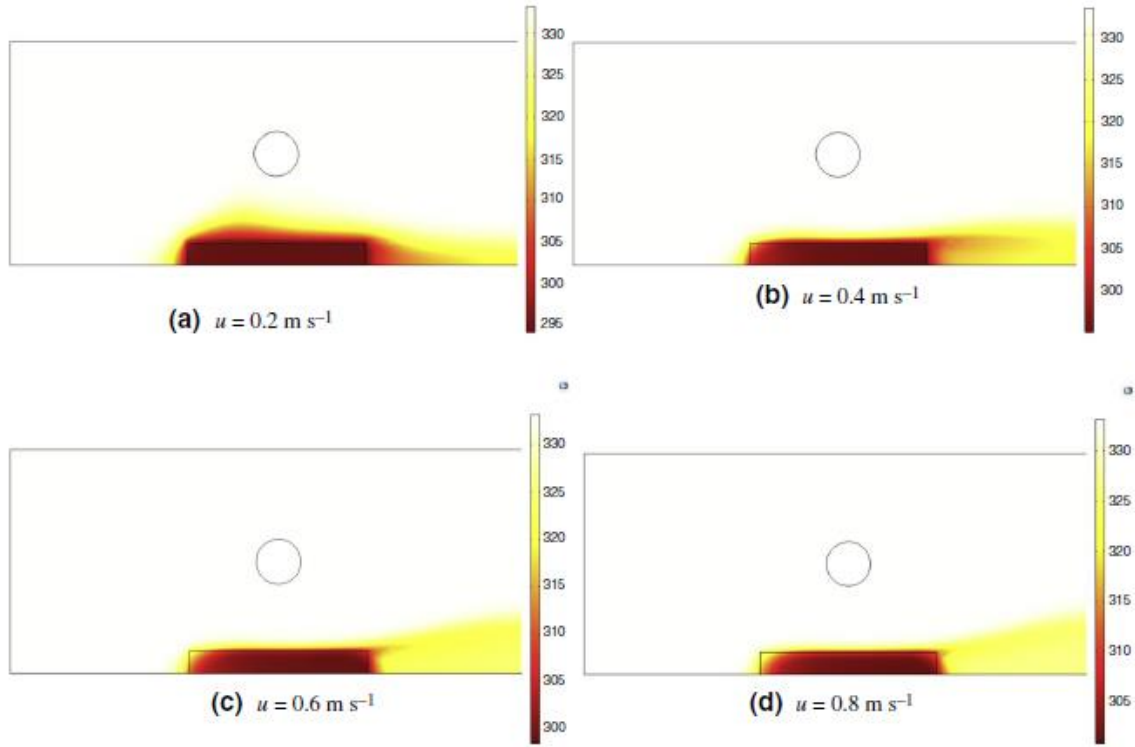


Şekil 5.9 Farklı çap değerlerinde sıcaklık eş eğrileri ($\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$, $u = 0,2 \text{ m s}^{-1}$, $t = 90 \text{ dk}$)

Şekil 1.9.



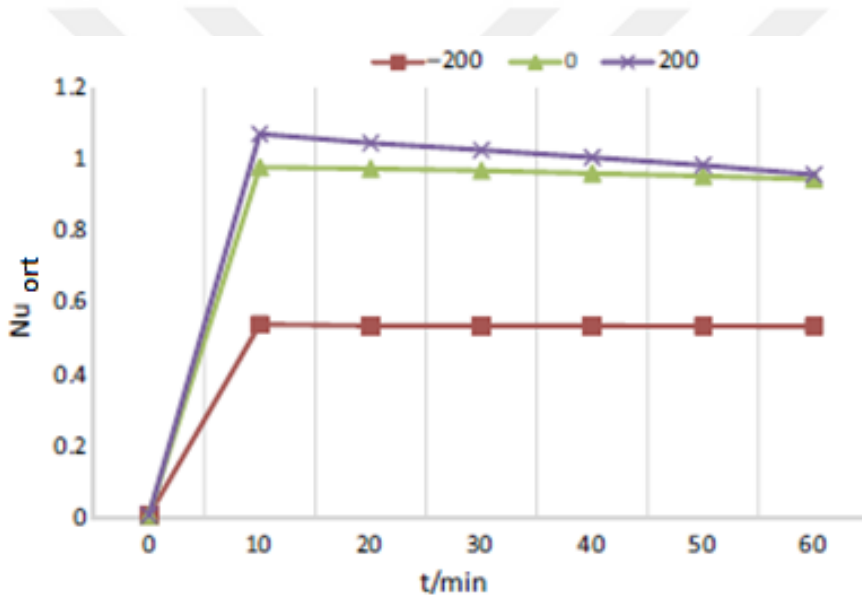
Şekil 5.10 Farklı kuruma hava hızlarında akım çizgileri ($\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$, $u = 0,2 \text{ m s}^{-1}$, $t = 90 \text{ dk}$)



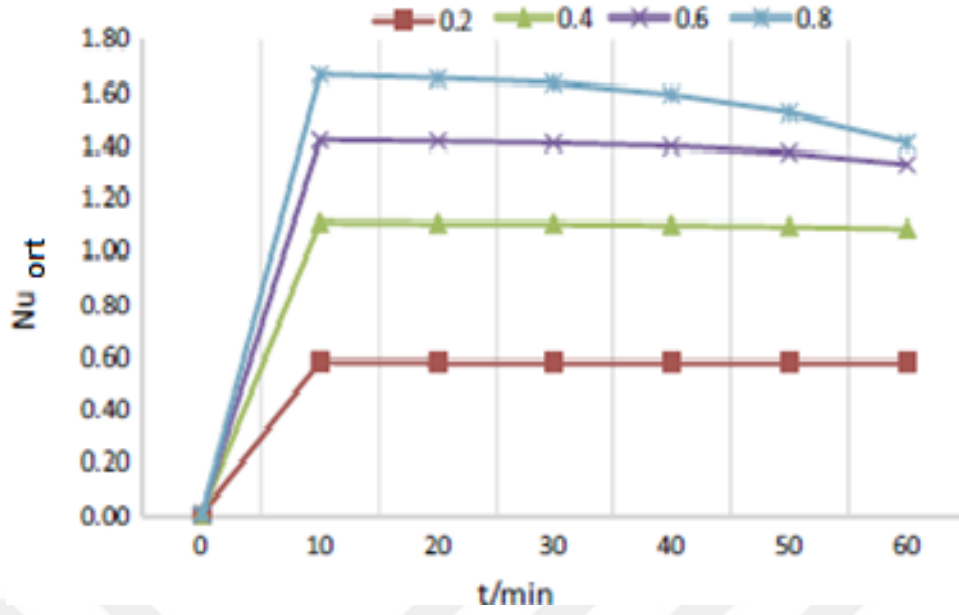
Şekil 5.11 Farklı kurutma hava hızlarında yüzey sıcaklıkları için sıcaklık eş eğrileri ($\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$, $D = 0.1H$, $u = 0.2 \text{ m s}^{-1}$)

Kurutma sürecinde, gözenekli ortamdan, nem transferi (konsantrasyon gradyanı) ve ısı transferi (sıcaklık gradyanı) taşınım aracılığıyla gerçekleşir ve Şekil 5.12- 5.14'de ortalama ısı transferi farklı parametreler için gösterilmiştir. Alt yüzey hariç gözenekli cismin tüm yüzeyleri için zaman içindeki ortalama ısı transferi gelişimi bu şekillerde verilmiştir. Şekil 5.12' de, silindirin değişen açısal dönüş hızları için ortalama ısı transferi gösterilmektedir. Isı transferi, $\omega = 200 \text{ rad s}^{-1}$ değeri için her zaman en yüksek olmuş ve en düşük ısı transferi $\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$ için görülür. Ayrıca $\omega = 200 \text{ rad s}^{-1}$ için ısı transferi, silindirin diğer dönme hız değerleri için yaklaşık olarak aynı kaldığı fakat zamanla doğrusal olarak azaldığı görülmüştür. Farklı kurutma havası hızları için zamana bağlı ortalama ısı transferi Şekil 5.13' te gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi hızın artmasıyla ısı transferi artar. Şekil 5.14, dönen silindirin değişen boyutları için zamana göre ortalama ısı transfer değişimini gösterir. Nu_{ort} 'nın en düşük değeri, silindirsiz durumda görülür. Silindirin boyutu arttığında, ısı transferi de artmış ve silindirin en büyük olması durumu haricinde en yüksek değere çıktıktan sonra zamanla sabit kalmıştır.

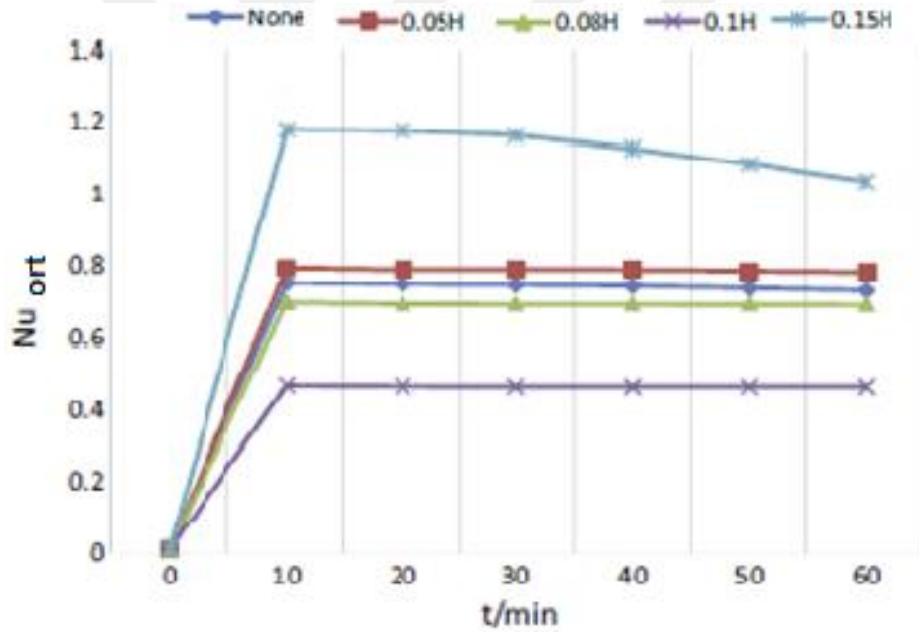
Çeşitli parametreler için gözenekli cismin yüzeyindeki buharın kütle oranı dağılımları, Şekil 5.15. – Şekil 5.17’de verilmiştir. Şekil 5.15’ de farklı konumlara sahip sabit silindir için buhar kütlesi gösterilmektedir. Silindir gözenekli cismin önünde olduğunda, silindirin dönme etkisinden dolayı buharlaşmanın çoğu cismin ön köşesinde görülür, ancak cismin diğer tarafları için çok zayıf bir buharlaşma görülür. Silindirin merkezde olduğu durumu için cismin üst yüzeyinde ve arka köşesinde doygunluk azalır. Silindirin geriye doğru konumlandırılmasında cismin arka köşesinde üst yüzeye göre daha fazla buharlaşma görülmüştür. Tüm lokasyonlarda kurumanın büyük bir kısmının ön köşede gerçekleştiği açıktır. Şekil 5.16, $\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$ olduğunda farklı kurutma havası hızları ve farklı kurutma süreleri için cismin orta dik yüzeyindeki buhar kütlesi değişimini göstermektedir. Hız ve kuruma süresindeki artışla su buharının arttığı görülmüştür.



Şekil 5.12 Farklı ω (rad s^{-1}) için ortalama ısı transfer değerleri ($D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$, $t = 90$ dk)



Şekil 5.13 Farklı hava hızları için ortalama ısı transfer değerleri ($D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$, $\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$)

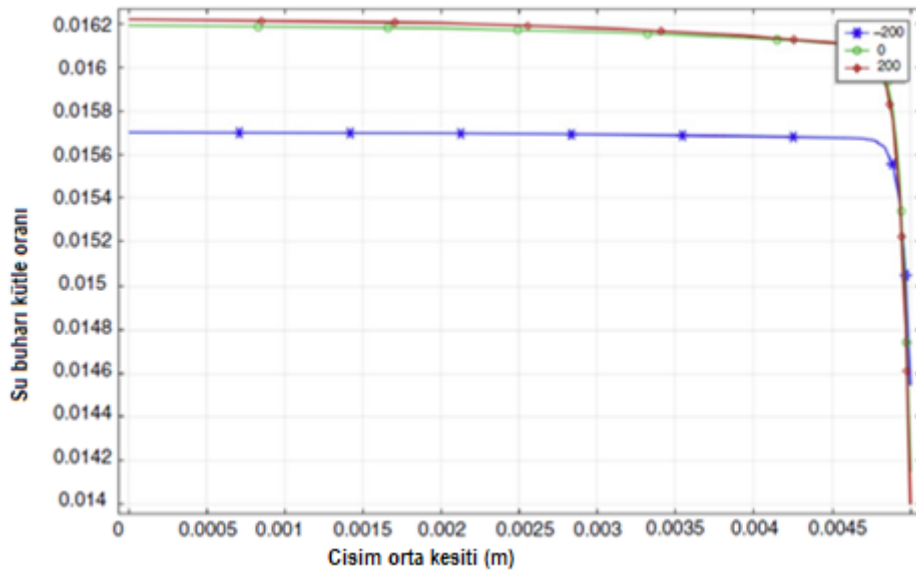


Şekil 5.14 Farklı silindir çapları için ortalama ısı transfer değerleri ($D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$, $\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$)

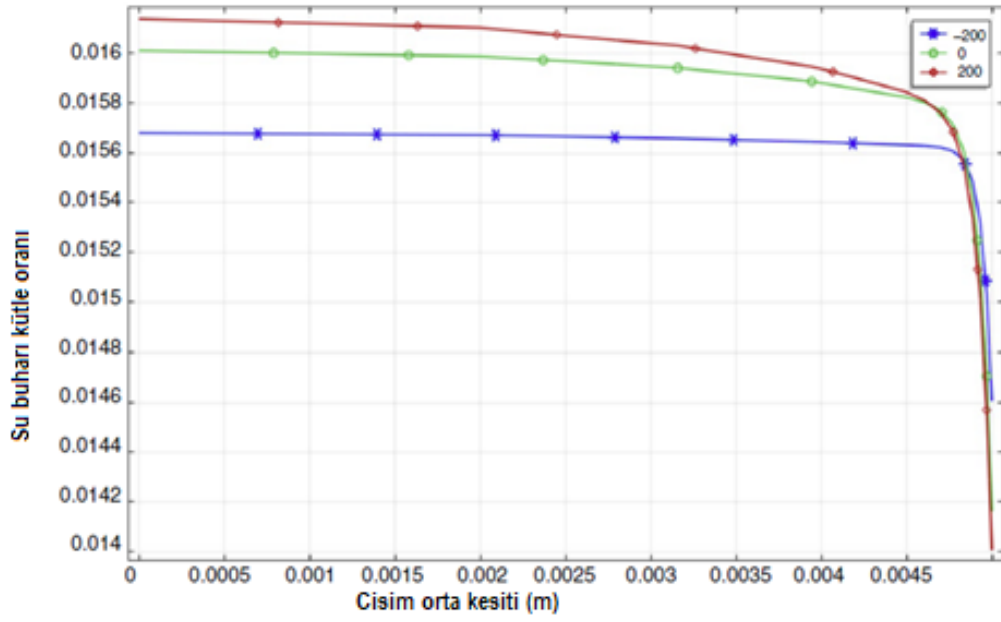
Gözenekli ortam içindeki nem taşınmasını analiz etmek için, farklı parametrelerde cismin orta dikey kesitinde sıvı ve buhar miktarı hesaplanmıştır. Şekil 5.15, silindirin farklı açısıl dönme hızları için farklı zamanlarda cismin orta bölüm boyunca buhar su buharı kütle oranını göstermektedir. Beklendiği gibi, su buharı oranı 90 dakikalık sürede en yüksektir

ve merkezden yüzeye doğru hafifçe azalır. Yüzeyde, her koşulda havanın buharlaşması nedeniyle su buharında keskin bir düşüş olmuştur. Ayrıca, bu oran, silindirin saat yönünün tersine dönüşünde en yüksektir ve tüm kurutma zamanları

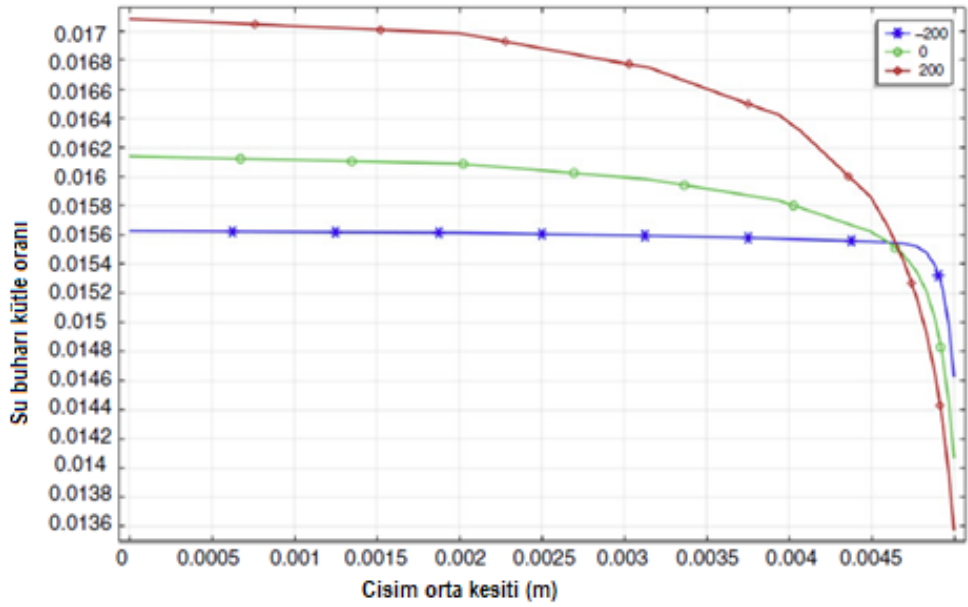
Şekil 5. 17’de üç farklı kurutma zamanında değişen silindir dönüş hız değerleri için S_l 'yi göstermektedir. Kurutma, cismin yüzeyine yakın bölgelerde etkili olurken, Şekil 5.15’ e uyumlu olarak, $\omega = 200 \text{ rad s}^{-1}$ olduğunda doygunluk en azdır bu da buharlaşmanın bu dönme hızı için en fazla olduğu anlamına gelir. Şekil 5.18’ de silindir boyutundaki değişikliklerle S_l dağılımı üç farklı zamanda gösterilmektedir. Silindir olmadığında, nem içeriği dikey eksen boyunca azalır ve daha ilerleyen zamanlarda silindirin boyutunun artırılmasıyla önce nem içeriğini azalır; daha sonra daha yüksek boyutlar için artar, ancak en yüksek silindir boyutunda nem içeriği tekrar azalır. Şekil 5.19, kanalın farklı giriş hızları için sıvı su doygunluğunu göstermektedir. Şekil 5.16 ile uyumlu olarak, görülebileceği gibi hava hızının artırılması, su doygunluğunu azaltmada etkili olmuştur.



(a) Silindir cismin önünde

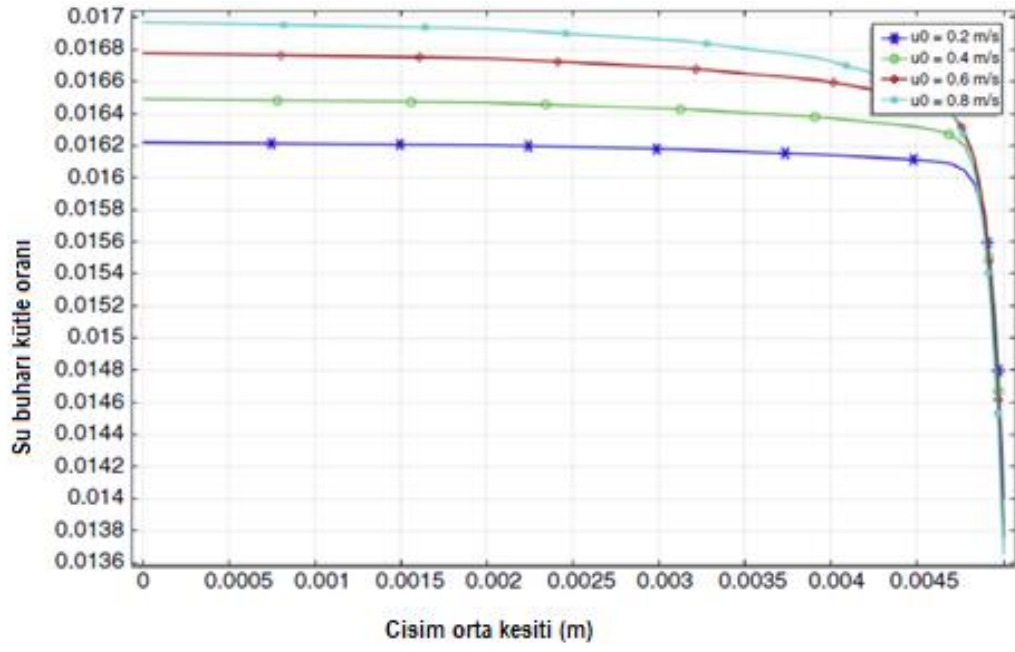


(b) Silindir cismin üstünde

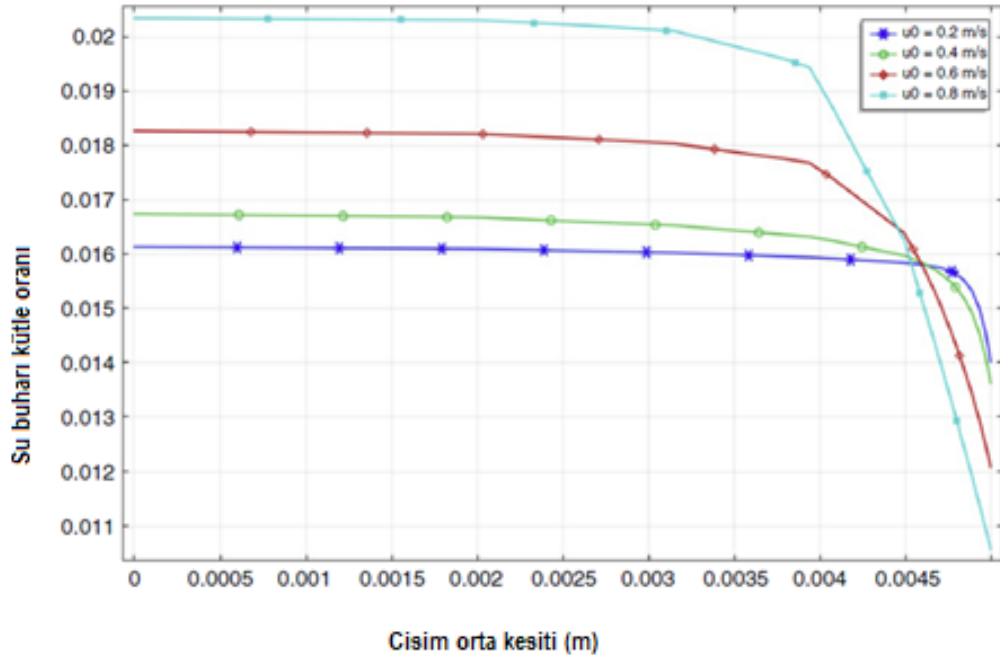


(c) Silindir cismin arkasında

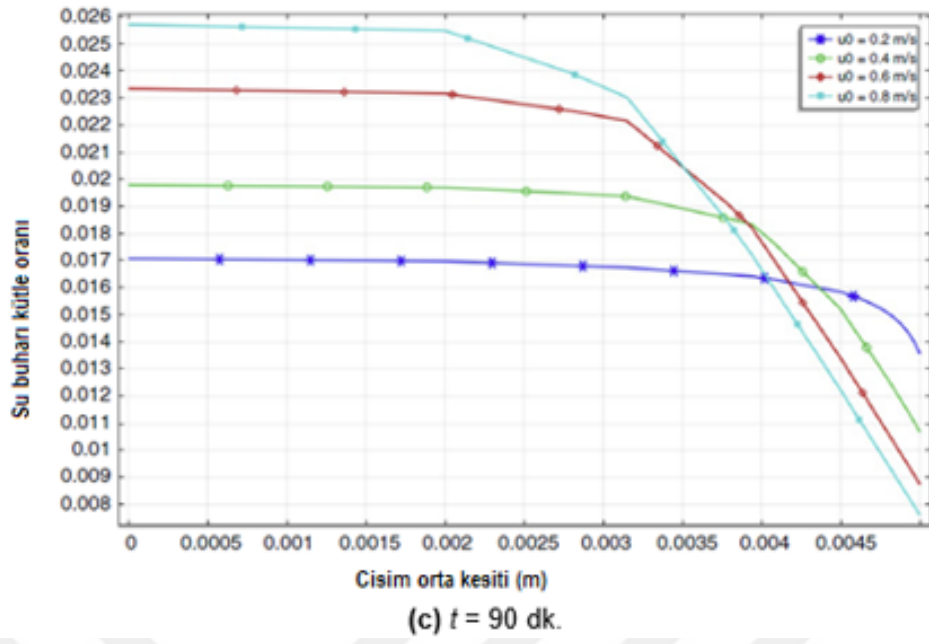
Şekil 5.15 Farklı ω (rad s^{-1}) değerleri ve silindir konumları için gözenekli cismin orta y eksenini boyunca buharın kütle oranı ($D = 0.1H$, $u = 0.2 \text{ m s}^{-1}$, $x_c = 0.4W$)



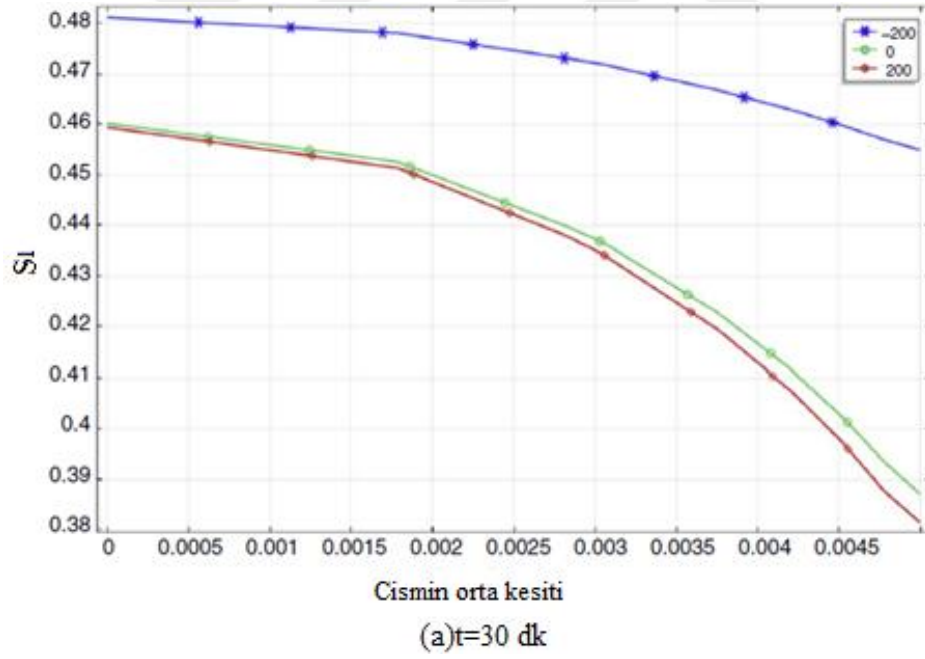
(a) $t = 30$ dk.

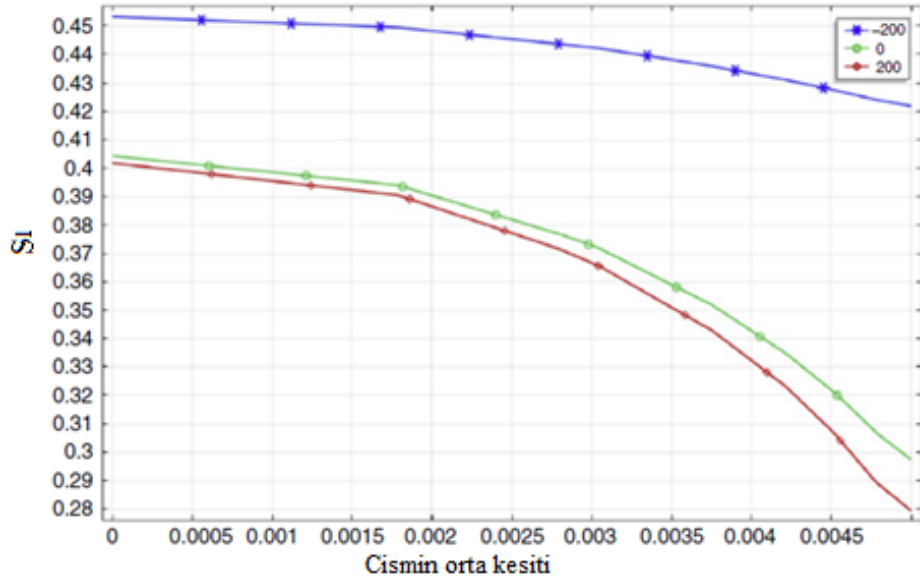


(b) $t = 60$ dk.

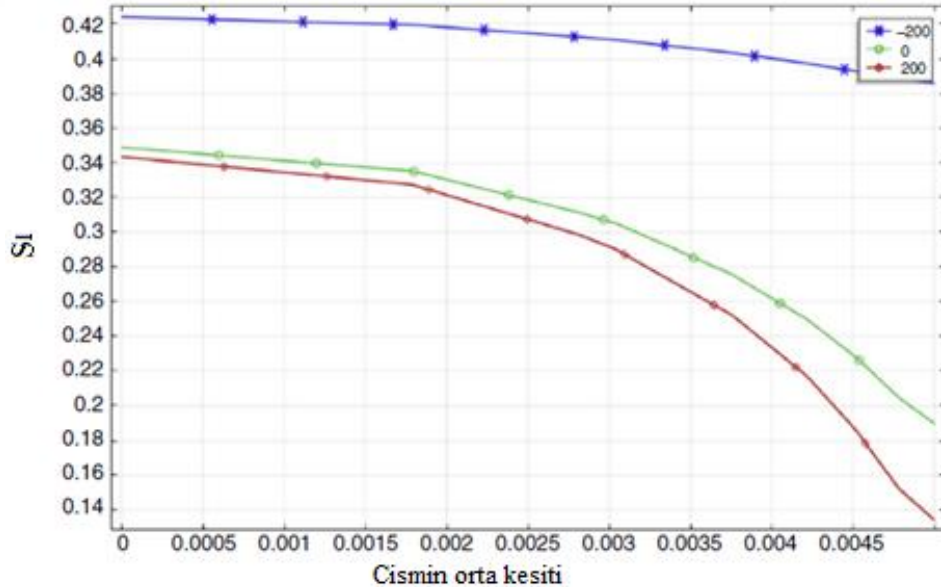


Şekil 5.16 Farklı hava hızları için gözenekli cismin orta y eksenı boyunca buharın kütle oranı ($\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$, $D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$)



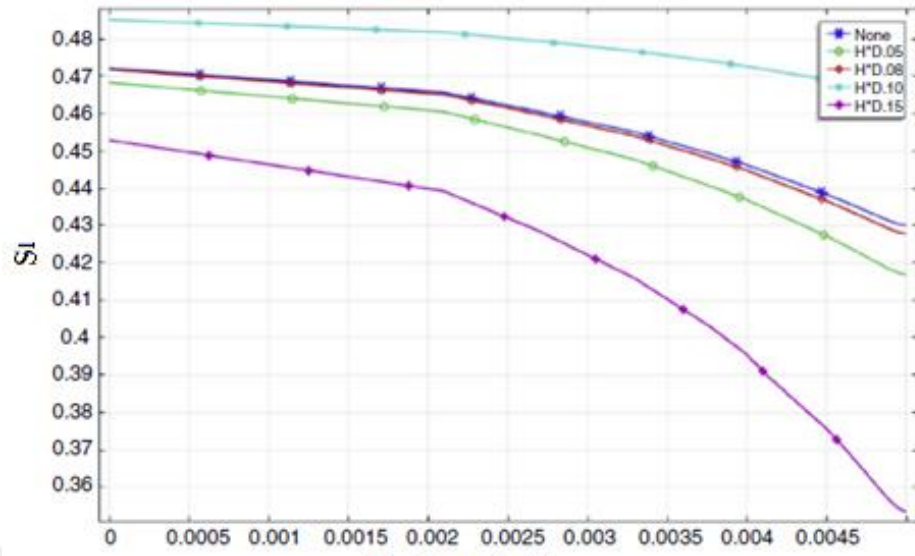


(b) t=60 dk



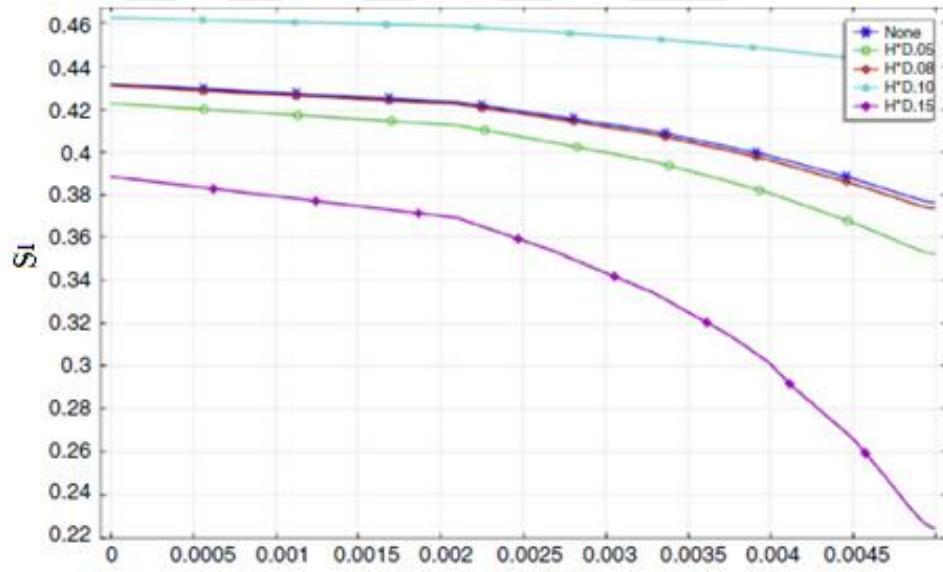
(c) t=90 dk

Şekil 5.17 Farklı silindir dönme hızları ω (rad s⁻¹) için gözenekli ortamın ortasında y eksenini boyunca sıvı su doygunluk değerleri ($u = 0,2$ m s⁻¹, $D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$)



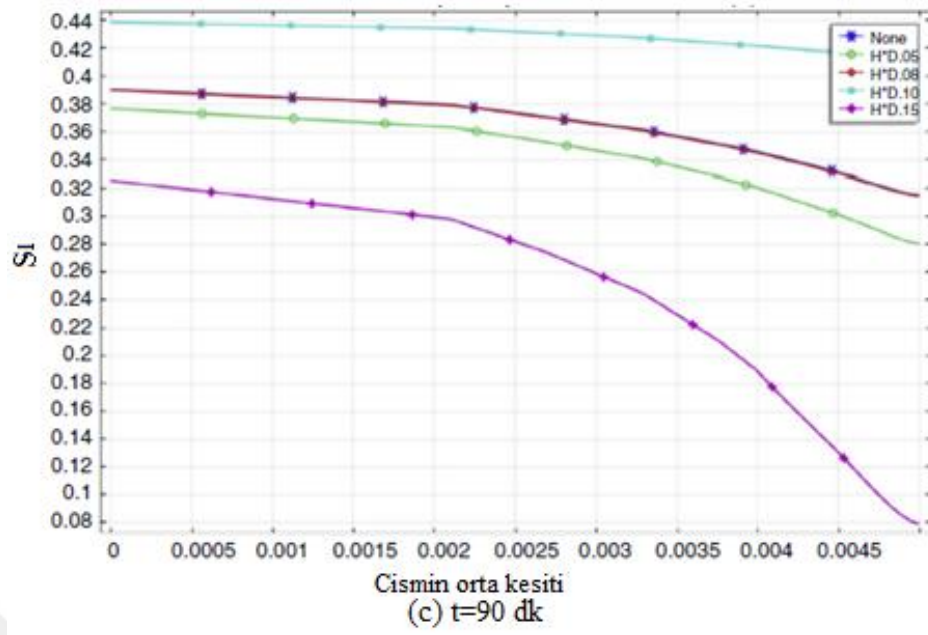
Cismin orta kesiti

(a) t = 30 dk

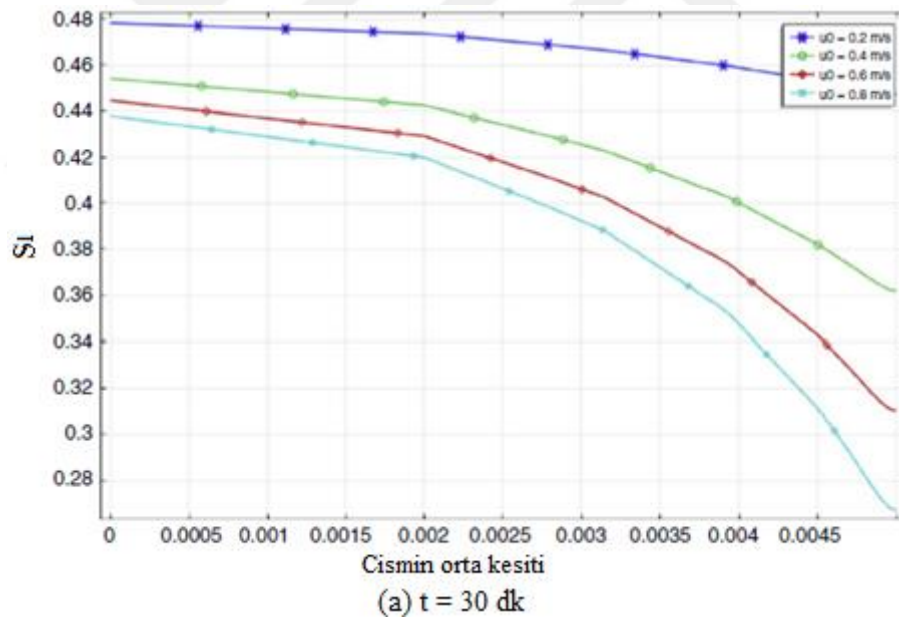


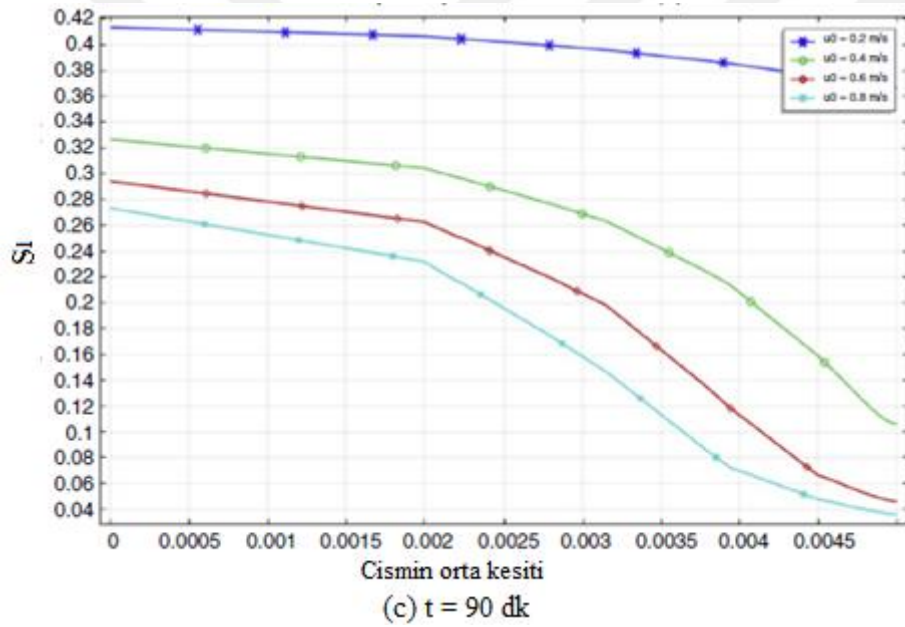
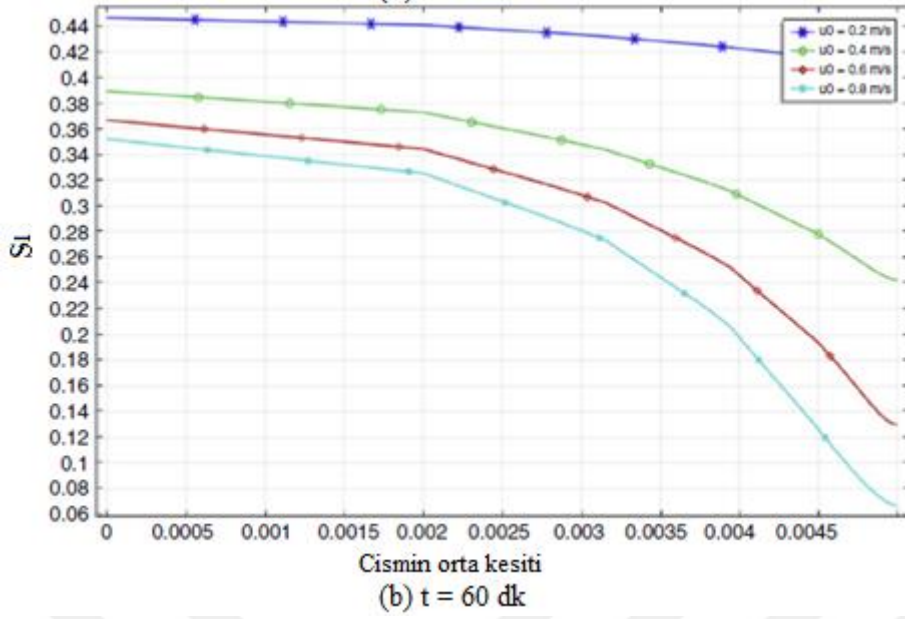
Cismin orta kesiti

(b) t = 60 dk



Şekil 5.18 Silindirin farklı çap değerleri için gözenekli cismin orta y- eksenini boyunca suyun doygunluğu ($\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$, $D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$)





Şekil 5.19 Farklı hava hızları için gözenekli cismin orta y eksenı boyunca suyun doyma oranı ($\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$, $D = 0.1H$, $x_c = 0.4W$)

Bu çalışmada, Gözenekli bir cismin konvektif kurutulması sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve çeşitli koşullar için ısı ve nem taşınımı incelenmiştir. Çalışmada, gözenekli cisim alt duvarın merkezine yerleştirilmiş ve kanalda akışkan olarak kuru hava kullanılmıştır. Gözenekli cismin üzerine dönen bir silindir monte edilmiş ve silindirin yönü ile konumu değiştirilmiştir. Kuru hava giriş hızı, silindir çapı, silindirin x eksenı konumu gibi çeşitli parametrelerin etkileri incelenmiş ve her bir değişkenin, ısı ve nem taşınımı

üzerinde önemli etkileri olduğu anlaşılmıştır. Laminer akış koşullarında kurutma havasının hızının ısı ve nem taşınması üzerinde önemli bir etki olduğu açıkça anlaşılmıştır. Ayrıca silindirin saat yönünün tersine dönüş yönünde ($\omega = -200 \text{ rad s}^{-1}$) belirgin etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Dönen silindirin boyutu, ısı ve nem transferi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve silindirin çapının artırılması, kuru hava akışını daha verimli hale getirmiştir.

Çalışmanın amacı, konvektif kurutma proseslerinde taşınım olaylarının anlaşılmasına katkıda bulunmak ve kurutma üzerinde nasıl daha fazla etki yaratılacağını bulmaktır. Farklı parametrelerde kurutma davranışını anlamak ve deneysel verilerin eksikliğinde cihazların en etkili kombinasyonunu bulmak için modelin çeşitli varyasyonları geliştirilmiştir. Farklı şekillerdeki cismin konvektif kurutması, üç boyutlu ve hareketli duvar çalışmaları gelecekteki çalışmalarda düşünülebilir.

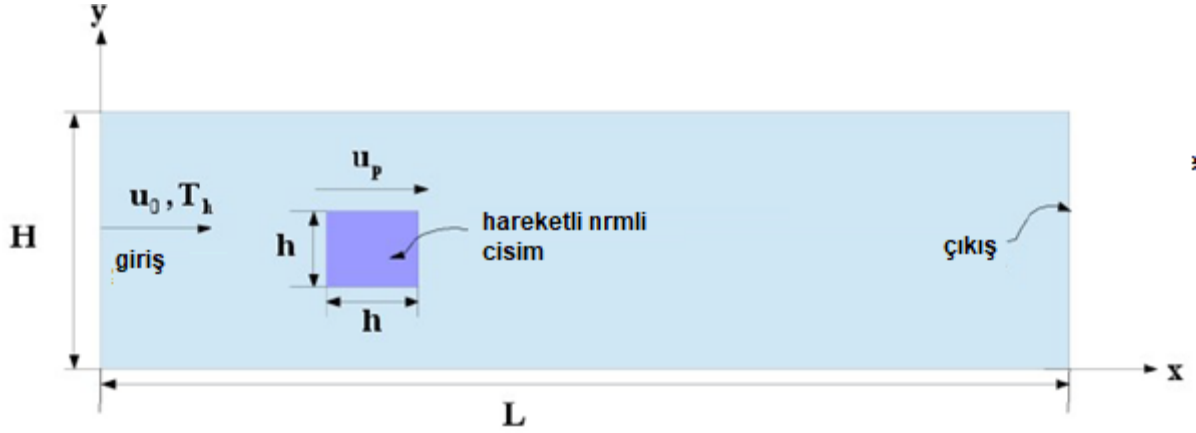
5.1.2 Hareketli gözenekli cismin 2 boyutlu kanalda konvektif kurutulması

Bu çalışmanın amacı, hareketli gözenekli bir gıda numunesinin laminer akış koşullarına sahip 2 boyutlu dikdörtgen bir kanalda konvektif olarak kurutulması sırasında ısı ve kütle transferini araştırmaktır. Gözenekli nemli cismin hareketini modellemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklara sahip sıcak kuru hava, farklı hızlarda kanalda akar ve gözenekli cisimde akışa paralel yönde bir harekete sahiptir. Deneysel sonuçlar kullanılarak kod doğrulaması yapılmıştır. Sonuçlar, hareketli gözenekli nemli cismin ısı transfer katsayısının zamana bağlı olduğunu ve yerel olarak değiştiğini göstermiştir. Artan hava sıcaklığı ve hız değerlerinin ısı ve kütle transfer özellikleri üzerinde önemli etkileri gözlenir.

a. Matematiksel Model

Şekil 5.20' de problemin 2 boyutlu tanımı verilmektedir. Gözenekli cisim, başlangıçta kanal girişine yakın yerleştirilmiş olup cismin hızı x eksenine boyunca $u_p = 10^{-4} \text{ m/s}$ hızıyla hareket eder. Düşey olarak merkezlenmiş cisim kuruma için en yüksek etkiye maruz kalır. Kanal uzunluğu $L = 0,15 \text{ m}$ ve yüksekliği $H = 0,05 \text{ m}$ olarak verilmiştir. Gözenekli nemli cisim her bir kenar ölçüsü $h = 0,1H$ olan karedir. Sıcak kurutma havası hareket eden cisim boyunca laminer akış koşullarında akar. Sınır şartları olarak; giriş hava sıcaklığı 293 K-343 K arasında, hava hızı ise 0.1-0.55 m/s aralığında

değiştirilmiştir. Nem transferi sıvı ve gaz fazlarında cisim içerisindeki su çok fazlı akış şartlarında buharlaşması nedeniyle meydana gelir.



Şekil 5.20 5.1.2 nolu çalışma için oluşturulan fiziksel model

b. Sınır ve başlangıç koşulları

Kanaldaki sıvı için başlangıç koşulları şunlardır;

$$c_v(t=0) = 0, \quad P_{(t=0)} = P_{atm}, \quad P_{(t=0)} = P_{atm}, \quad T_{(t=0)} = T_0$$

Kanal girişinde, kuru hava için düzenli hız ve sıcaklık değerleri kullanılır:

$$x = 0 \quad u = u_0, \quad T = T_0, \quad C_v = 0.$$

Kanal çıkışında, tam gelişmiş koşullar aşağıdaki gibi geçerlidir:

$$x = L, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Kanalın diğer duvarlarında adyabatik duvarlı kaymama koşulları kullanılır:

$$y = 0 \text{ ve } y = H, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial c}{\partial y} = 0$$

Gözenekli cisim başlangıç koşulları şu şekilde tanımlanır:

$$T_{(t=0)} = 293K, \quad S_{l(t=0)} = 0.7$$

Suyun sıvı fazının başlangıç konsantrasyonu şu şekilde tanımlanır:

$$c_v = \frac{S_l(0)\rho_l\varepsilon}{M_l} \quad (5.28)$$

Burada S_l , ρ_l , M_l ve ε sırasıyla sıvı haldeki doygunluk, suyun yoğunluğu, suyun molar kütesidir ve gözenekliliktir. Başlangıç buhar konsantrasyonu $0,9591 \text{ mol/m}^3$ 'dir. Kanaldaki dış akış ile gözenekli cismin yüzeyi arasındaki ara yüzde, yerel ısı ve kütle aktarım katsayıları değerleri kullanılarak belirlenebilir:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_s - T_a), \quad -D \frac{\partial M}{\partial n} = h_m(M_s - M_a) \quad (5.29)$$

Burada, k ısı iletkenlik (W/mK), T sıcaklık (K) olmak üzere, alt indis s ve a katı yüzey ve havayı temsil etmektedir. D difüzyivite, M kuru kütledeki nem oranıdır. Isı ve kütle transfer katsayıları ise sırasıyla h (W/m^2K) ve h_m (m/s)' dir. Gözenekli ortama ait diğer termofiziksel özellikler ve çözüm metodolojisi bir önceki çalışmadaki gibidir.

c. Çözümün ağ yapısından bağımsızlığı ve kod doğrulama

Çalışmada ele alınan fiziksel alan için 13088 üçgen elemanla çok ince bir ağ ayırıklaştırması yapılmıştır. Duvarların yakınında ve dış akışkan alanı ile nemli gözenekli cisim sınırları arasındaki ara yüzlerde ağ daha incedir. Tablo 5.4, çeşitli eleman boyutları için ağ bağımsızlık test sonuçlarını göstermektedir. Sayısal geometrinin ağ yapısı ve ağdan farklı ağ yapılarında $u=0,55 \text{ m/s}$, $T=323 \text{ K}$ için Nusselt sayısının değişimi ve geometrinin ağlaştırılmış biçimi sırasıyla Şekil 5.21 a ve 5.21b' de verilmiştir.

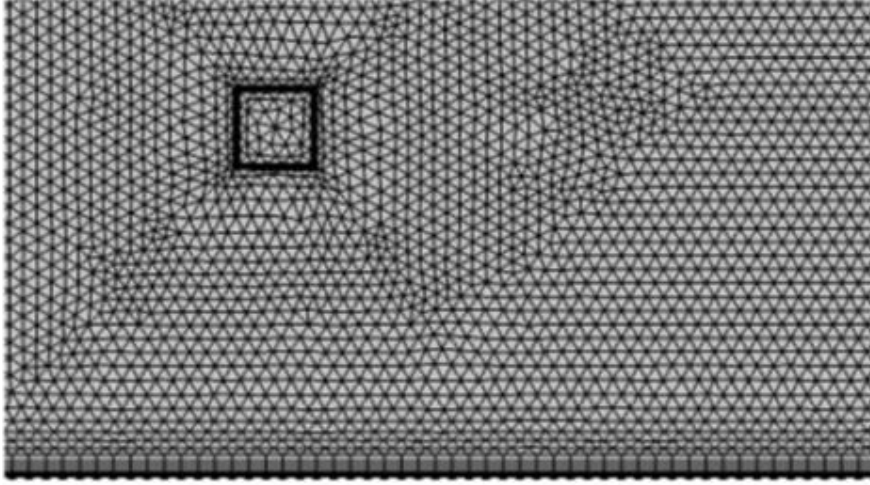
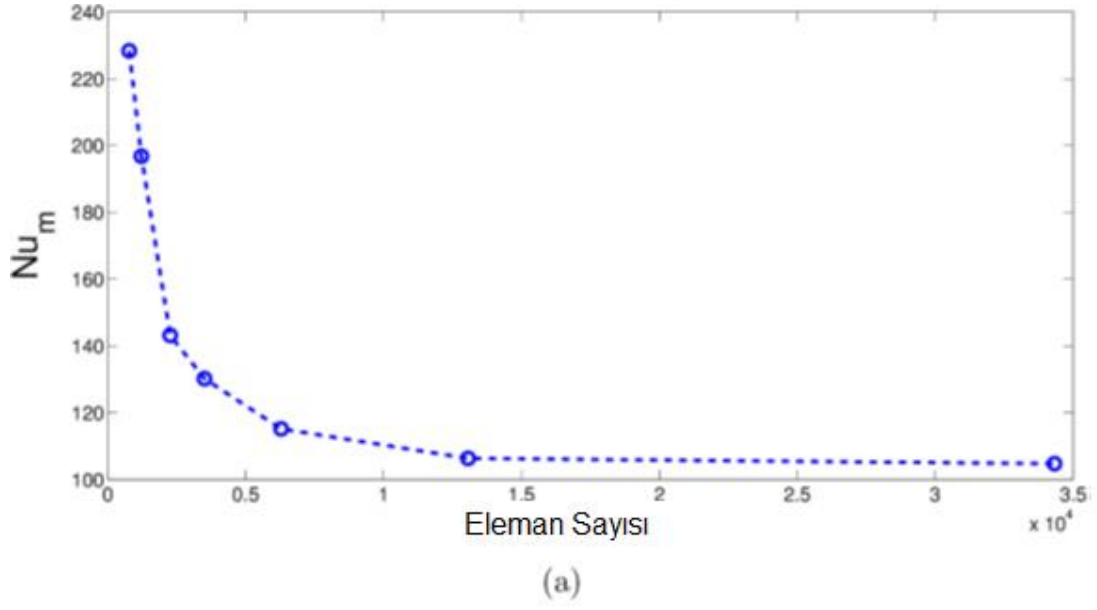
Tablo 5.4 Ağ bağımsızlık testinin nemdeki (%) azalma ile ölçümü ($u=0,55 \text{ m/s}$, $T=333 \text{ K}$, $t=300 \text{ s}$)

Ağ biçimi	Ekstra geniş	Çok Geniş	Geniş	Normal	İnce	Çok ince	Ekstra ince
Eleman sayısı	782	1226	2268	3512	6292	13088	34326
Nemdeki azalma (%)	85,71	73,84	62,12	44,5	34,90	31,40	30,85

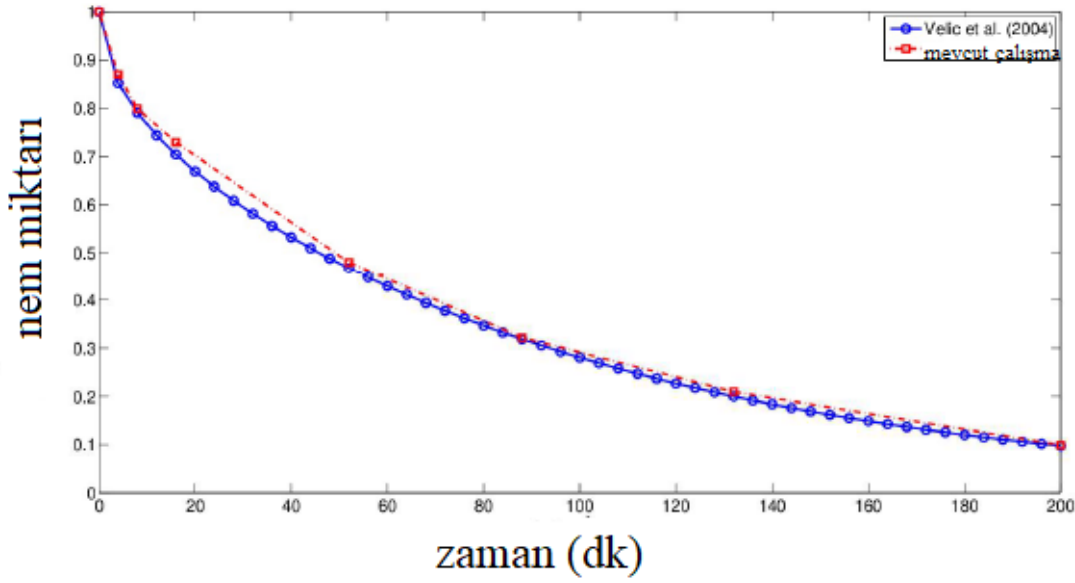
Ağ doğrulaması için Velic ve arkadaşlarının deneysel çalışması kullanılmıştır [81]. Bu çalışmada Jonagold elmasının konvektif kuruma kinetiği incelenmiş ve farklı hava akış hızları dikkate alınarak ısı transferi ve difüzyon katsayılarının değerleri belirlenmiştir. Şekil 5.22’ de nem miktarının zamana bağlı değişimi için referans çalışmayla mevcut çalışm karşılaştırılmıştır. CFD ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

e. Sonuçlar ve tartışma

Hareketli kare bir gözenekli cismin dikdörtgen bir kanalda konvektif kurutulması sayısal olarak incelenmiştir. Kurutma havası sıcaklığı ve hızı, 2 boyutlu laminar akış koşulları için beş farklı değer olacak şekilde değiştirilmiş, her bir parametrenin kurutma davranışına etkisi incelenmiştir. Nemli gözenekli cisminde ısı ve nem taşınması cismin hareketi dikkate alınarak da değerlendirilmiştir. Şekil 5.23, farklı zamanlarda farklı kuru hava hızları için eş akış çizgilerini göstermektedir. Cismin arkasındaki girdaplar, $u = 0,55$ m / s hızında (Şekil 5.23b ve d) cisim girişe daha yakın olduğunda $u = 0,1$ m / s'ye kıyasla daha büyük iken cismin arkasında yeniden akış bölgesinde dönmeler oluşmuştur. Cismin arkasındaki resirkülasyonlar, cisim hareketiyle daha uzun süre bastırılır. Kanal içerisindeki sıcaklık ve konsantrasyonun zamanla değişimin Şekil 5.24’ te verilmiştir. Gözenekli cisimdeki sıcaklık gradyanları zamanla değişir ve bu, Şekil 5.24c ve d' de gösterildiği gibi cisim içindeki konsantrasyon değişimini farklı zamanlarda etkiler. Gözenekli cismin sınırına yakın eş sıcaklık eğrilerinin kümelenmesi, çeşitli duvarlar ve farklı zamanlar için farklılık göstermektedir. Bu nedenle, cismin duvarları boyunca ısı transfer katsayısı sabit değildir ve zamandan bağımsızdır; bu etki, farklı hava akış hızları lokal Nusselt sayısının değerlendirildiği Şekil 5.25'te bu etki görülebilmektedir.



Şekil 5.21 Farklı ağ boyutlarında Nu değerlerinin değişimi(a) geometrinin bir kısmının ince ağ ile örülmüş biçimi (b)

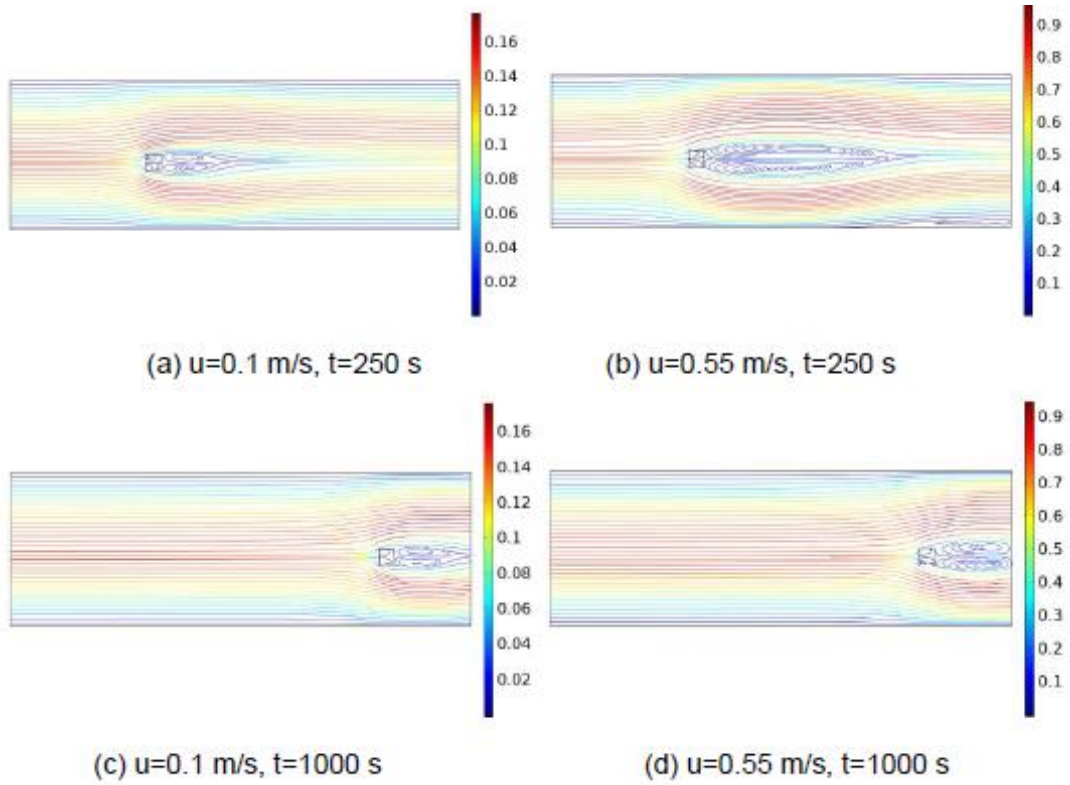


Şekil 5.22 Kod doğrulama sonuçları: Hava hızı 0,64 m/s olduğunda Jonagold elmanın konvektif kurutulması için boyutsuz nem içeriğinin karşılaştırılması

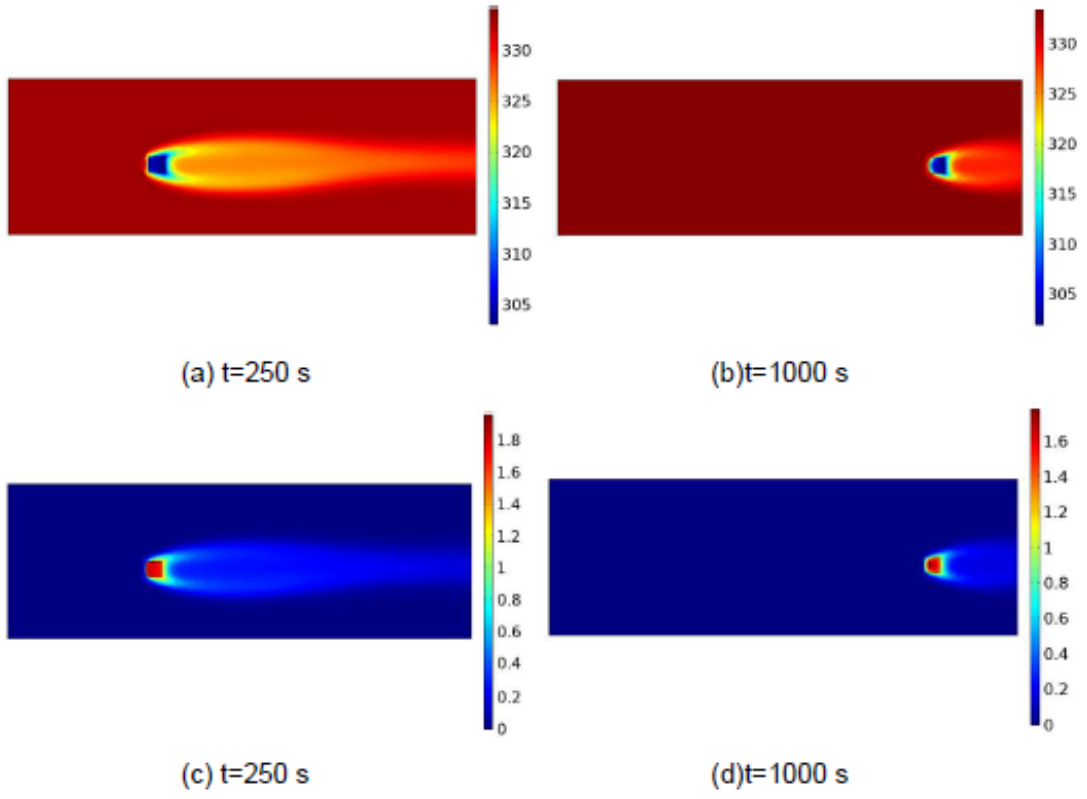
Gözenekli cismin farklı hava sıcaklıkları ve çeşitli hızlar için ortalama ısı transfer değerleri Şekil 5.26'da farklı zamanlarda verilmiştir. Cisim giriş konumuna daha yakın olduğunda ve daha düşük kurutma sıcaklığı değerleri için daha erken bir zamanda, ısı aktarım hızı daha yüksektir. Zaman ilerledikçe, 0,35 m / s ve 0,55 m / s hızlarına karşılık gelen ortalama değerler arasındaki tutarsızlık çok az farklılık gösterir ve bu da cismin hareketine atfedilir. Hava giriş sıcaklığının artırılması, gözenekli cismin tüm duvarları dikkate alındığında ısı transfer hızını düşürücü bir etki yapar. Şekil 5.27, iki farklı kurutma zaman değerinde farklı hava hızlarının etkisi altında gözenekli cisim içindeki sıvı su doygunluğunu göstermektedir. Akışın yönünden dolayı cismin ön tarafı tüm hızlar için daha fazla buharlaşmaya sahip olmakla birlikte, hız arttıkça konturların değerlerinde de görüldüğü gibi buharlaşma artmaktadır. En çok buharlaşma 1000 s'de 0,55 m / s hızda gerçekleştiği S_l 'nin bu akış koşulunda en düşük değerlere sahip olmasından görülebilmektedir.

Şekil 5.28, iki farklı kurutma süresinde ve tüm hava sıcaklıklarında cismin ortasının y eksenini çizgisi boyunca nem içeriğini göstermektedir. Hava sıcaklığı arttıkça, nem içeriği her iki durumda da azalır. Cismin konumu dikey olarak kanalın merkezinde olduğundan, cismin üst ve alt yüzeyindeki buharlaşma maksimum değerdedir ve hemen hemen eşittir. Değerler daha yüksek sıcaklıklar için daha düşükken, aynı sıcaklıktaki profiller özellikle

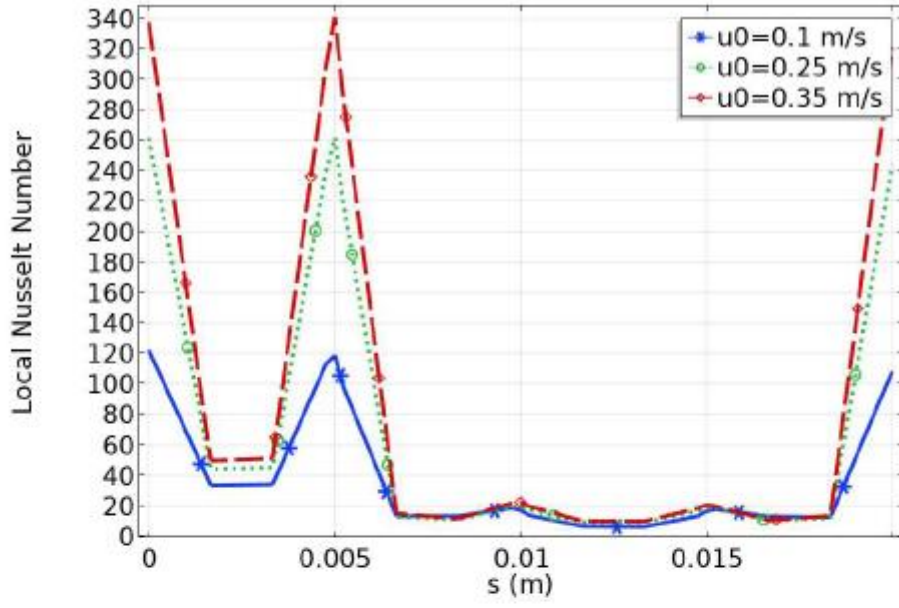
gözenekli cisim ile dış akış arasındaki arayüz sınırlarına yakın yerlerde farklılık gösterir. Farklı hava hızları ve sıcaklıklar için $t = 250$ s ve $t = 1000$ s'de nem içeriğindeki azalma yüzdesi Şekil 5.29' da gösterilmektedir. Daha düşük kuruma sürelerinde ($t = 250$ s), daha yüksek hızlarda ve sıcaklıklarda nem miktarında daha yüksek azalma gözlenir. Zaman ilerledikçe, nem içeriğindeki azalma $0,55$ m / s hızda %85,7'ye yükselirken, en yüksek hava sıcaklığı için $0,1$ m / s hızda yalnızca %44,8, en düşük ve en yüksek hava sıcaklığı değerleri için, $t = 1000$ s anında, $0,1$ m / s hızında, nem içeriği azalmasındaki değişim (artış) $0,1$ m / s'de %25,5 iken, $0,25$ m / s için %36,3 ve ile $0,55$ m / s hızında %36,8'dir.



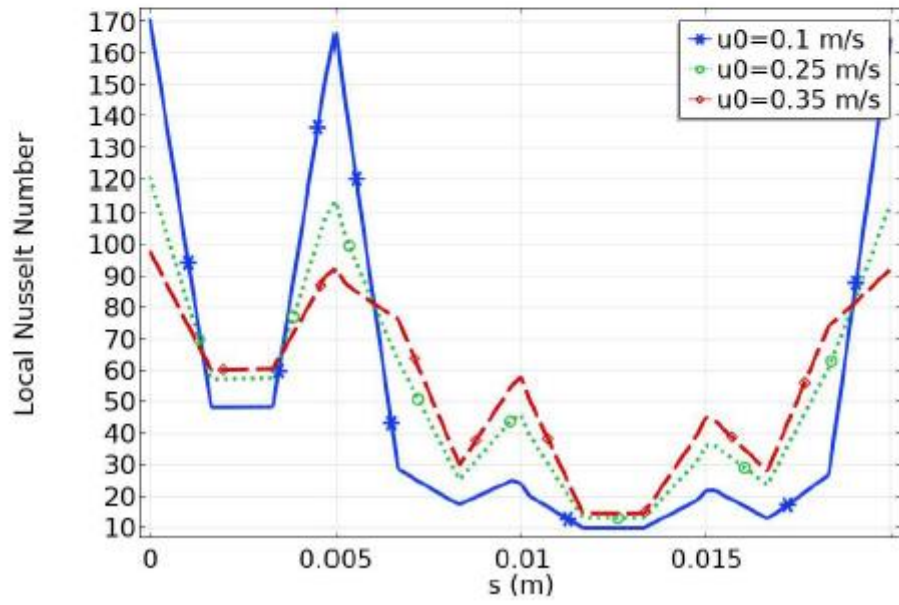
Şekil 5.23 Farklı zamanlar için eş akış çizgileri görünümü $t = 250$ s (a), (b) ve $t = 1000$ s (c), (d) ($T = 333$ K)



Şekil 5.24 Farklı zamanlarda sıcaklık (a, b) ve konsantrasyon değişimi (c, d) $t = 250$ s (a), (c) $t = 1000$ s (b), (d) ve $T = 333$ K, $u = 0,55$ m/s

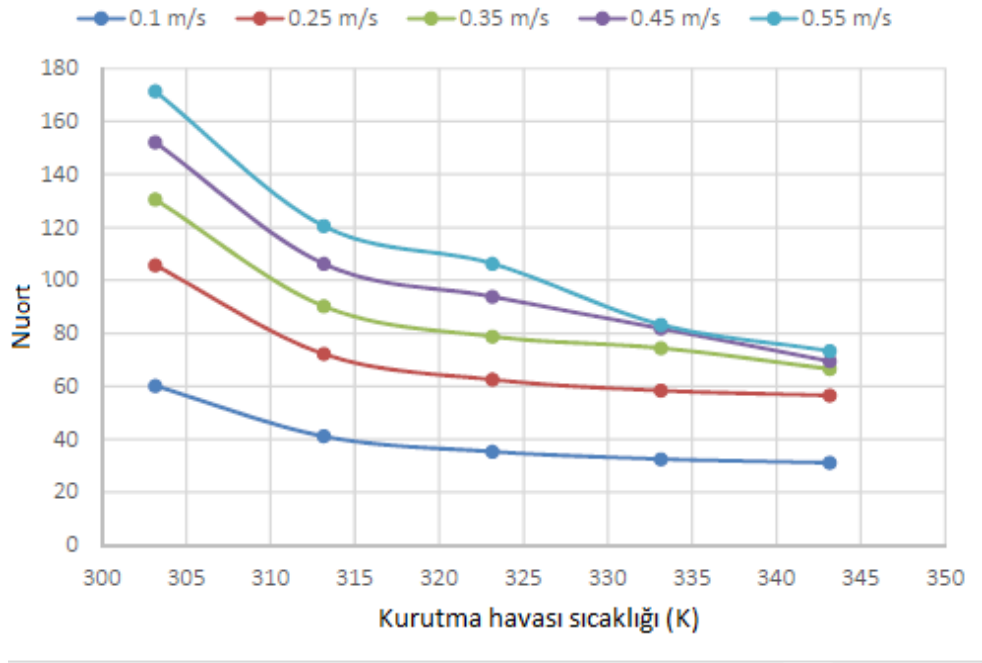


(a) $t=100$ s

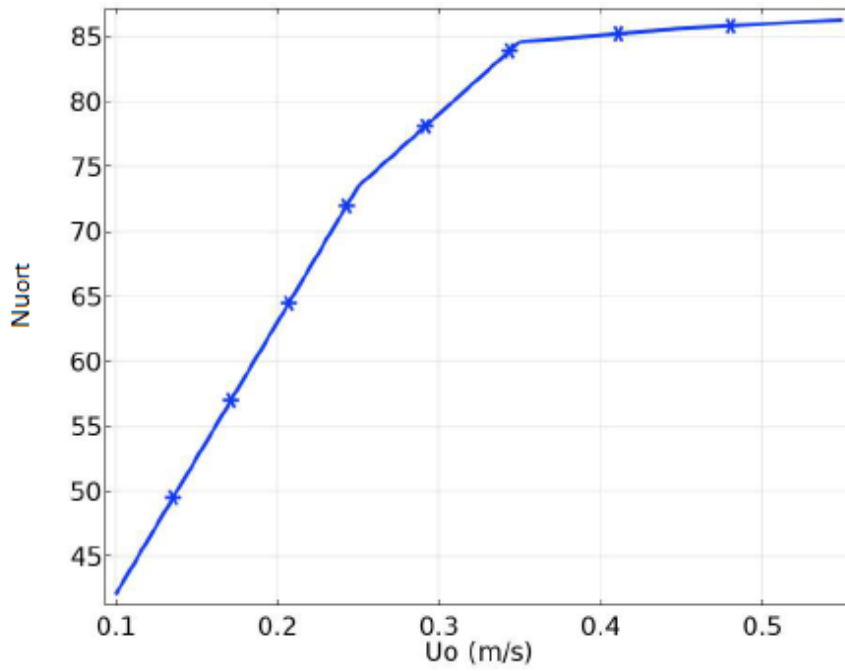


(b) $t=1000$ s

Şekil 5.25 Farklı hava hızları için gözenekli hacmin duvarları boyunca Nusselt karşılaştırılması

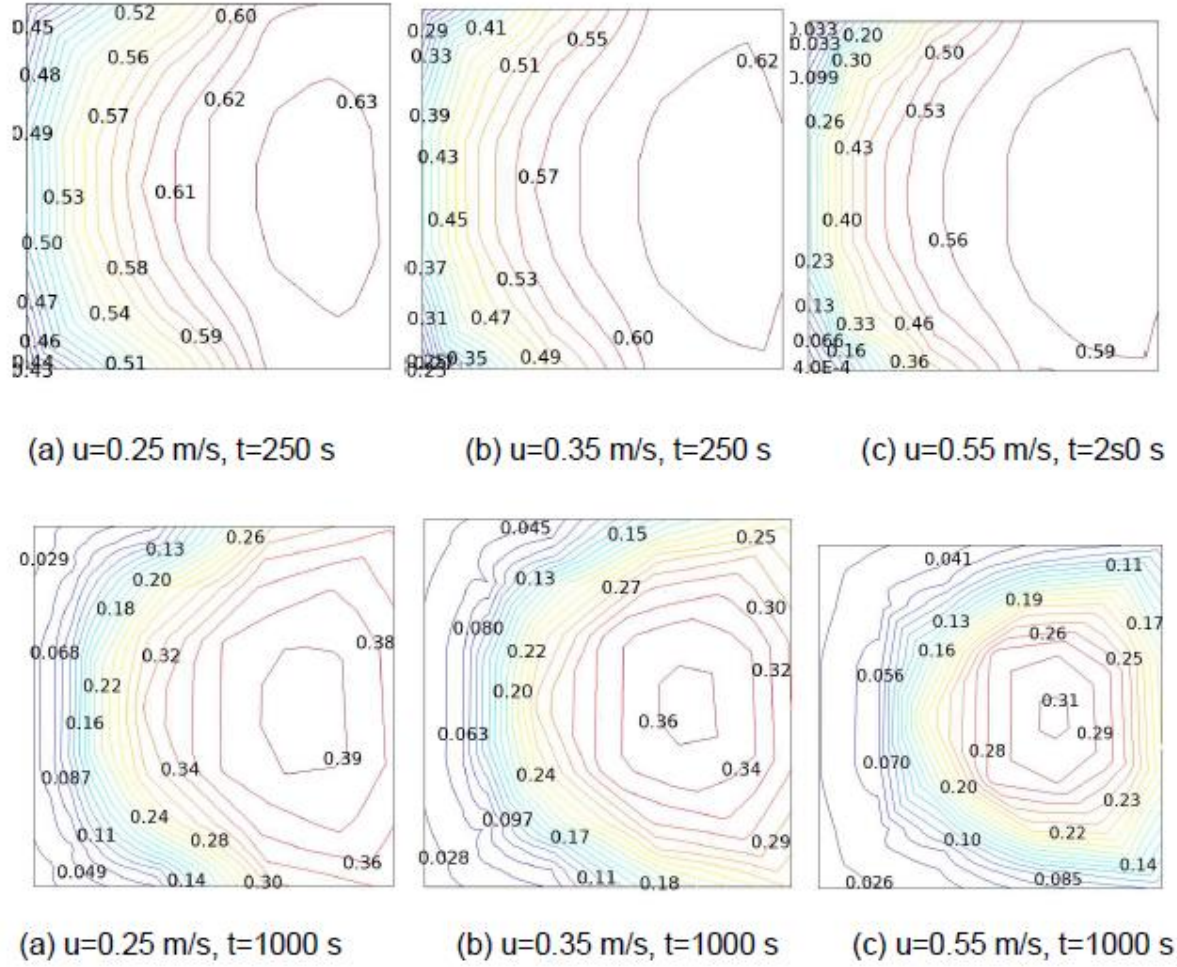


(a) $t=250$ s



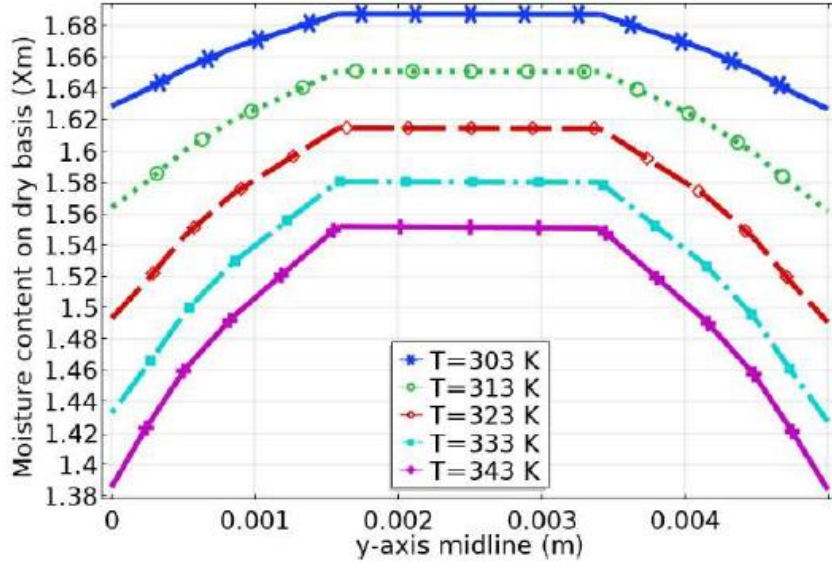
(b) $t=750$ s

Şekil 5.26 $t = 250$ s için ortalama Nu karşılaştırması (a) değişen hava akış hızları için farklı hava sıcaklıklarına karşı ortalama Nusselt sayısı ve $T = 313$ K ve $t = 750$ s (b) hava hızına karşı ortalama Nusselts sayısı

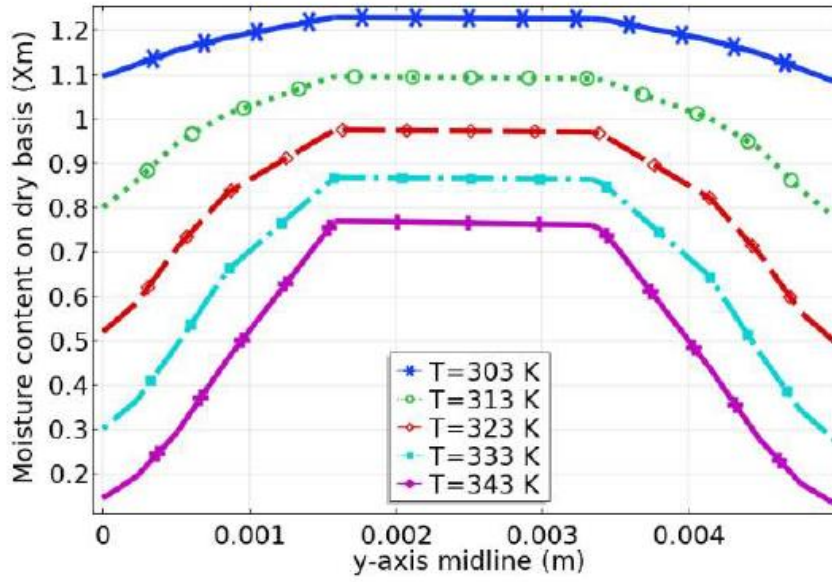


Şekil 5.27 Kurutma zamanlarında farklı hava hızlarında cisim içindeki sıvı suyun doygunluğu ($T = 333$ K)

Bu çalışmada, hareketli ve gözenekli bir cisim için, ısı ve kütle transferi, FEM ve ALE metotları kullanılarak değişen akış koşulları için 2 boyutlu laminar kanal akışında simüle edilmiştir. Kullanılan örnek model, endüstride konveyörlü bir kurutma prosesinde uygulanabilir. Sonuçlarda bazı parametreler kurutma işlemlerini daha verimli hale getirmiştir. Hareket eden cisim duvarı boyunca ısı transfer katsayısının yerel olarak değiştiği ve aynı zamanda zamana bağlı olduğu gözlenmiştir. Önemli parametrelerden biri, çok kısa kuruma sürelerinde bile buharlaşma üzerinde önemli etkileri olan kuru havanın hızıdır. Ayrıca, sıcak havanın sıcaklığı hem ısı hem de nem taşınması üzerinde olumlu etkileri olan göze çarpan bir parametredir. Daha düşük bir kuru hava sıcaklığı değerinde, nem içeriğindeki azalma%19,3'ten%49,4'e çıkarken, en yüksek kuru hava sıcaklığında, en düşük ve en yüksek hava hızları karşılaştırıldığında, değerler 44,8'den %85,7'ye çıkmıştır. Cismin hareket ettirilmesinin kurutma üzerinde olumsuz bir etkisi görülmemiştir.

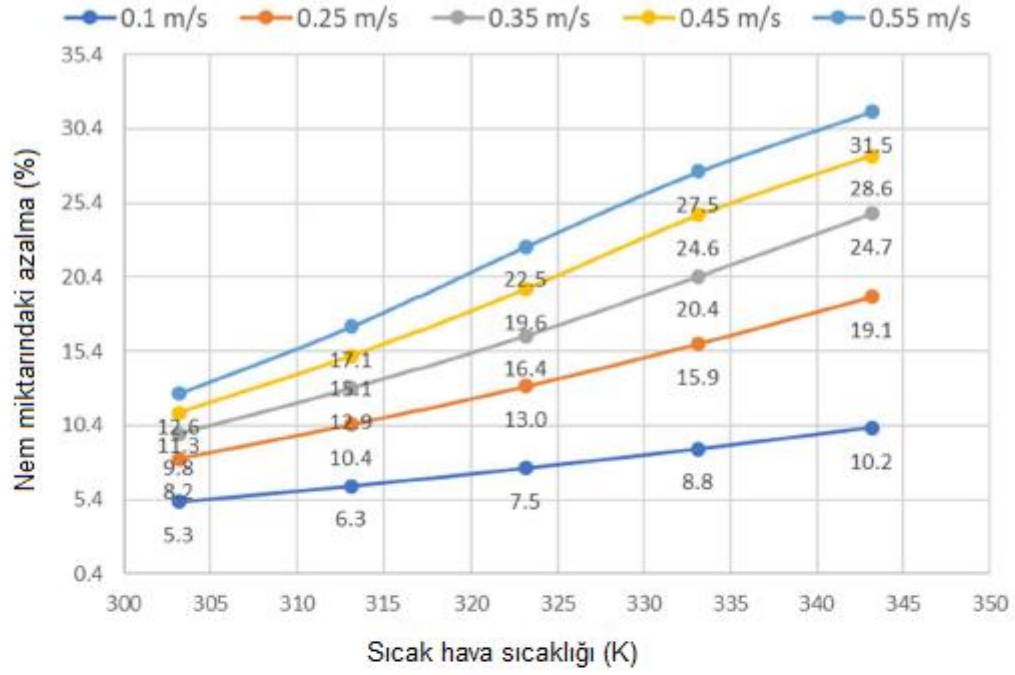


(a) $t=250$ s

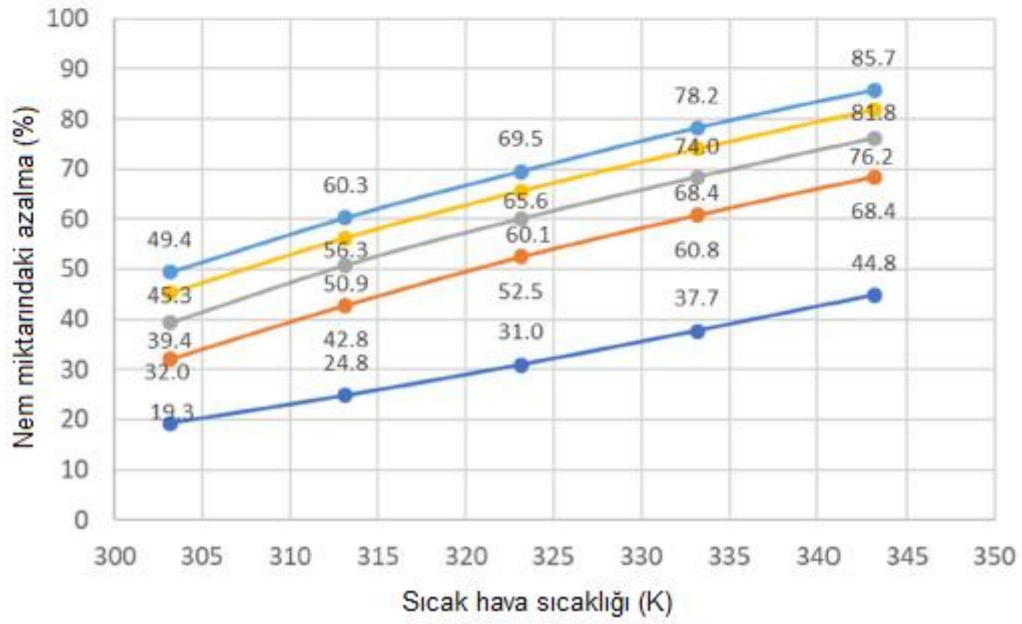


(b) $t=1000$ s

Şekil 5.28 Farklı hava sıcaklıkları için cismin y eksenine orta çizgisi boyunca nem içeriği ($u = 0,25$ m/s)



(a) $t=250$ s



(b) $t=1000$ s

Şekil 5.29 Farklı hava sıcaklıklarında farklı hızlar için kurutma sırasında iki kez nem içeriğindeki azalma

5.1.3 Türbülanslı akışta nemli gözenekli cisimlerin konvektif kurutma performansının incelenmesi: Şekil ve malzeme etkisi

a. Matematiksel Model

Bu çalışmada, konvektif kurutmanın etkileri altında dikdörtgen bir kanalda farklı şekilli gözenekli nemli nesnelerin birleştirilmiş ısı ve kütle taşınımını incelenmiştir. İki boyutlu bir kanalda silindirik, üçgen ve dikdörtgen şekilli farklı gıda ürünleri için türbülanslı koşullar altında sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Daire şeklindeki gözenekli gövde için 2 boyutlu geometrinin şematik bir gösterimi Şekil 5.30' da gösterilmektedir. Gövde dikey olarak kanalın merkezine, yatay olarak öndeki cisim kanal girişine daha yakın konumlandırılmıştır. Kanalın yüksekliği $H = 0,05$ m ve kanalın uzunluğu $L = 20H$ ' dir. Çemberin çapı karenin ve eşkenar üçgenin kenarları ile aynıdır ve $h = 0,2H$ şeklindedir.

Kanalın girişinden ($x=0$) ilk cismin gövdesine olan yatay mesafe $x_b = 3H$ 'dir ve dikey mesafe alt duvardan ($y=0$) gövdeye kadar $y_b = 0,4H$ ' dir. Kanaldaki hava akışı için 1m/s ile 2 m/s arasında değişen beş farklı hava hızı ile türbülanslı akış koşulları geçerlidir. Havanın sıcaklığı 303 K- 343 K arasında değişir. Problem için aşağıdaki varsayımlar geçerlidir:

1. Kurutma etkisiyle cisimlerdeki büzülme ve deformasyon ihmal edilir
2. Tüm fazlar yerel ısı dengededir ve Soret etkisi ihmal edilebilir.
3. Hava hızı ve sıcaklığı sabittir.
4. Forchheimer ve türbülans etkileri problem için ihmal edilebilir düzeydedir.

Tablo 5.5, problemde kullanılan farklı mazlemeler ve suyun tüm halleri ve hava için kullanılan termofiziksel özellikleri vermektedir. Görüldüğü gibi çözümler üç farklı malzeme için gerçekleştirilmiş, bu malzemelere ait özellikler ise tabloda referans verilen çalışmalardan alınmıştır.

b. Başlangıç ve sınır koşulları

Dış kanal akışı için başlangıç koşulları (kanal havası) aşağıdaki gibidir:

$$c_{v(t=0)} = 0, P_{(t=0)} = P_{atm}, T_{(t=0)} = T_0$$

Kanal girişinde, hız ve sıcaklık sabit ve üniformdur:

$$x = 0, u = u_0, T = T_0$$

Gözeneki cisim için başlangıç koşulları:

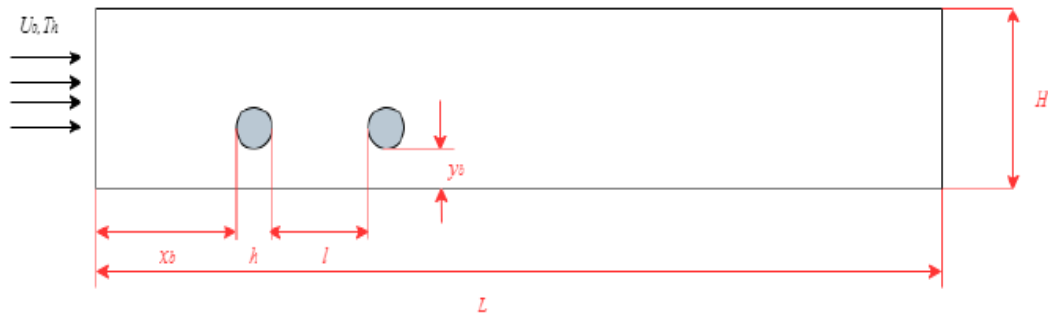
$$T_{(t=0)} = 293 \text{ K}, S_{l(t=0)} = 0.5$$

Sıvı faz başlangıç konsantrasyonu Denklem 5.21' deki gibi hesaplanır. Cisme ve fazlara ait termodiziksel özellikler tablo 5.5' te verilmiştir.

Başlangıç buhar konsantrasyonu aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$c_v = \frac{610.7 \cdot 10^{7.5 \frac{(T-273.15)}{(T-35.15)}}}{R}$$

Bu çalışmada, $c_v(0) = 0,95914 \text{ mol} / \text{m}^3$ tür.



Şekil 5.30 5.1.3 nolu sayısal modelin şematik gösterimi

Tablo 5.5 Hesaplama da kullanılan malzemeler için termofiziksel özellikler

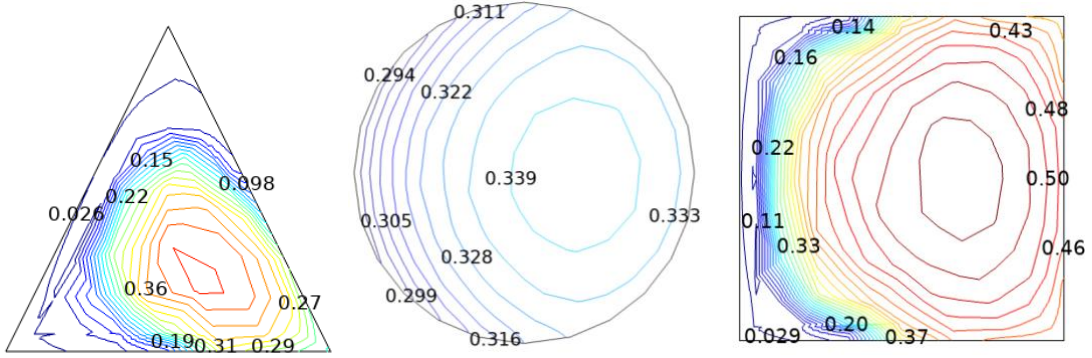
	Hava	Sıvı su	Su buharı
Isıl itkenlik, k	0.025 W/mK	0.59 W/mK	0.026 W/mK
Özgül ısı, c_p	1006 J/kgK	4182 J/kgK	2062 J/kgK
Dinamik viskozite, μ	$1.81 \cdot 10^{-5}$ kg/ms	$1.002 \cdot 10^{-3}$ kg/ms	$1.8 \cdot 10^{-5}$ kg/ms
Molar kütle	0.028 kg/mol	0.018 kg/mol	0.018 kg/mol
	Hava	Sıvı su	
Yoğunluk, ρ	1.205 kg/m ³	998,2 kg/m ³	
	Gözenekli katı cisim		
	Patates [40]	Elma [186]	Havuç [202]
Gözeneklilik, ϵ	0.8	0.92	0.9
Isıl iletkenlik, k	0.46 W/mK	0.481 W/mK	0.669 W/mK
Özgül ısı, c_p	1650 J/kgK	3734 J/kgK	3920 J/kgK
Yoğunluk, ρ	1528 kg/m ³	1419 kg/m ³	1490 kg/m ³
Geçirgenlik, κ	$1 \cdot 10^{-14}$		
Buharlaşma sabiti, K	1000		
İdeal gaz sabiti, R_g	8.314 J/molK		
Buharlaşma gizli ısı, h_{fg}	2.26e6 J/kg		
Ortam basıncı, P_{amb}	101325 pa		

c. Sonuçlar ve tartışma

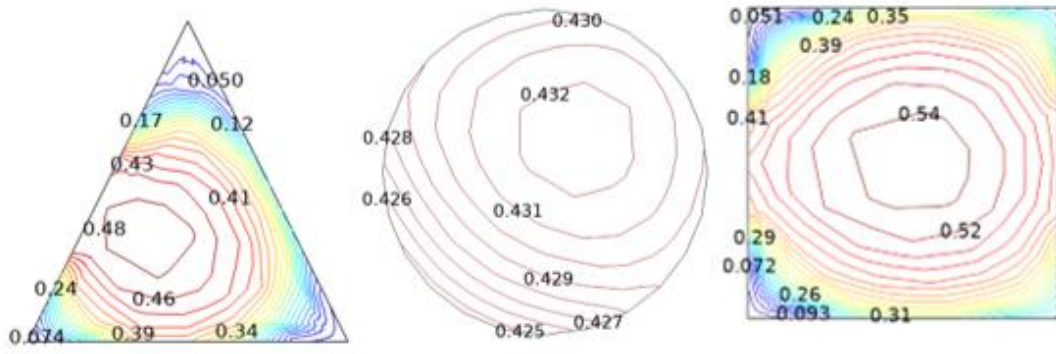
Farklı şekillerin kurutma üzerindeki etkisi

Çalışmada her nesneyi daha net bir şekilde değerlendirmek için, kanaldaki cisimler, kanalın ön tarafındaki cisim 'nesne 1' ve kanalın arkasındaki cisim 'nesne 2' olacak şekilde tanımlanır. Şekil 5.31, $u=2$ m/s ve $T=343$ K için 1000 s kurutma süresinde nesne 1(a) ve nesne 2 (b) içindeki nem içeriği dağılımlarını göstermektedir. Yerel nem içeriği değerlerine bakıldığında tüm şekiller arasındaki, en yüksek buharlaşma üçgen nesne için görülmektedir ve nem içeriğindeki en düşük azalma daire nesnesinde görülür. Tüm şekiller için, beklendiği gibi, kanalın arka tarafındaki nesneler (nesne 2), ön taraftaki nesnelere göre daha fazla nem içeriğine sahiptir, ayrıca, tüm nesneler için nem içeriğindeki en yüksek azalma ön tarafta görülür ve buharlaşma başlangıçta ön taraflardan başlar., bunun nedeni sıcak havanın bu kısımlar üzerinde daha etkili olmasıdır. Şekil 5.32, $u=2$ m/s ve $T=343$ K için 3000 s kurutma süresinde nesne 1(a) ve nesne 2 (b) içindeki nem içeriği dağılımlarını göstermektedir. Zaman ilerledikçe, nem içeriği özellikle ön tarafta önemli ölçüde azalır

cismin kenarları Şekil 5.31 ile uyumludur. Şekil 5.31'in aksine, en düşük nem içeriği değerleri, $t=3000$ s kurutmada dairesel cisimlerin yüzeylerine yakın yerlerde görülmüştür.

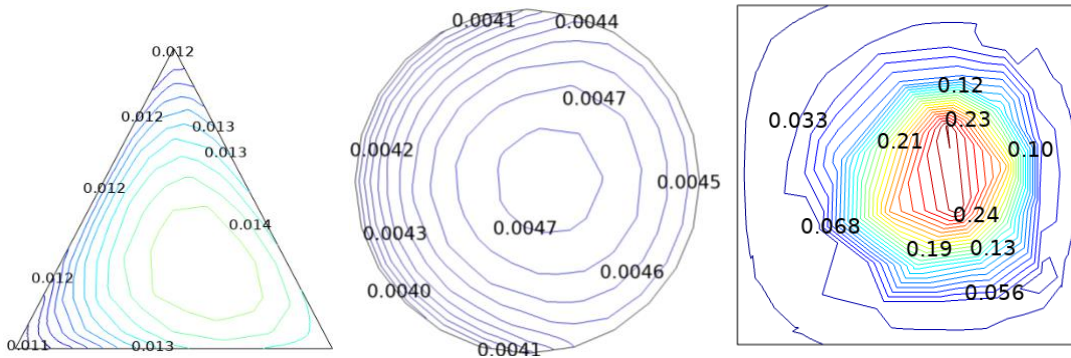


(a)

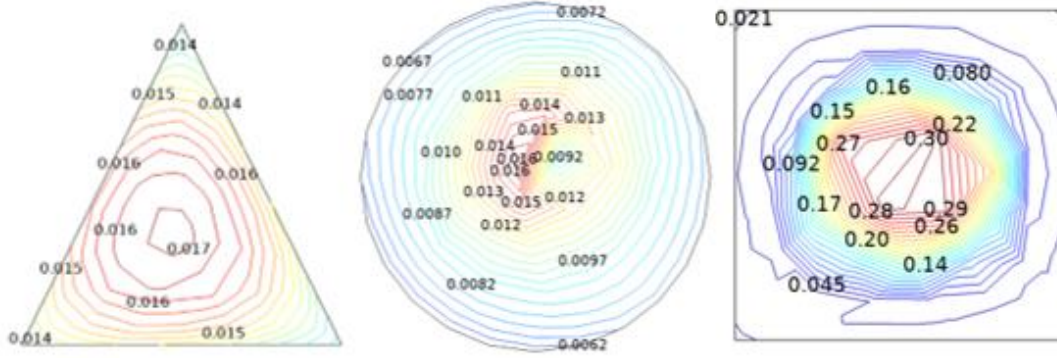


(b)

Şekil 5.31 $u=2$ m/s için Sl değerleri, $t=1000$ s'de $T=343$ K, nesne 1(a) ve nesne 2 (b) için tüm şekillerde nem içeriği dağılımları



(a)8

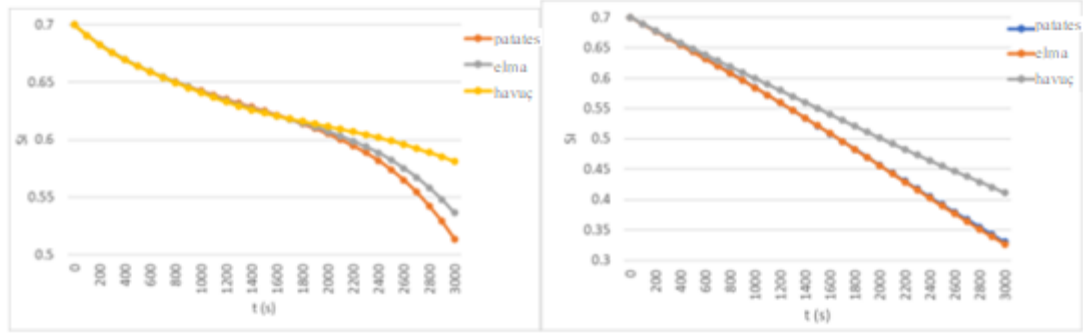


(b)

Şekil 5.32 Tüm şekiller için $t=3000$ s'de $u=2$ m/s ve $T=343$ K için S_l değerleri, nesne 1(a) ve nesne 2 (b) için

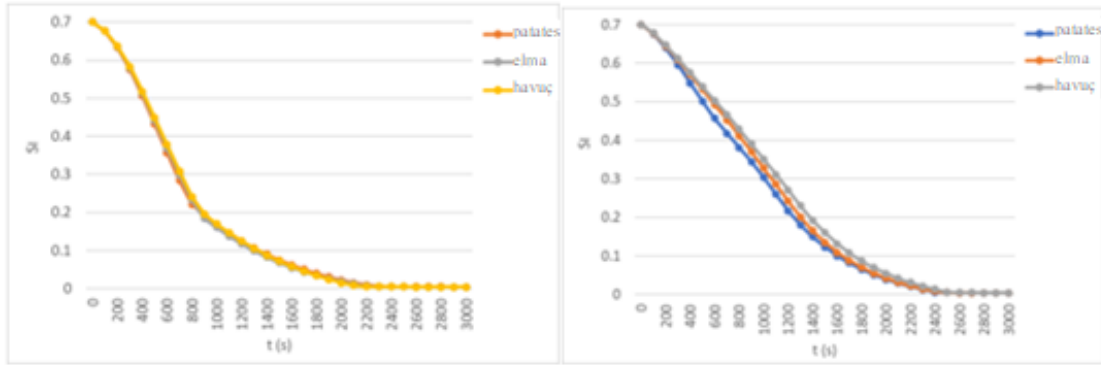
Farklı malzemelerin kurutulmasının değerlendirilmesi

Bu problemde, literatürde konvektif kurutma ile ilgili çalışmalardan üç farklı gıda malzemesinin özellikleri alınmış ve bu malzemelerin kurutulması dairesel şekilli nesneler için simüle edilmiştir. Şekil 5.33, $u=1$ m/s ve 2 m/s hava hızı ve $T=303$ K ve 343 K hava sıcaklığı için patates, elma ve havuç için zamana göre sıvı su doygunluk değişimini göstermektedir. Hava hızının $T=303$ K hava sıcaklığında farklı malzemelerin kuruması üzerindeki etkisi Şekil 5.33a ve 5.33b' de görülebilir. Hızın artmasının tüm malzemeler için buharlaşma üzerinde olumlu etkileri olduğu S_l değişiminde açıkça görülebilir. 303 K hava sıcaklığında iki hava hızı için $t=3000$ s de nem içerikleri arasındaki fark havuç için %29, elma için %39 ve patates için %36'dır. Şekil 5.33c ve 5.33d, $T=343$ K hava sıcaklığında farklı malzemelerin kurutulmasında hava hızının etkisini göstermektedir. Grafiklere bakıldığında, $u=1$ m/s hava hızı için nem içeriğinde daha keskin bir düşüş görülmektedir, ancak sonuç olarak kuruma süresi sonunda nem içerikleri hemen hemen aynıdır. Bu durum, daha yüksek hava sıcaklıklarının, daha düşük hava sıcaklıklarına kıyasla hava hızının buharlaşma üzerindeki etkisini en aza indirebileceği şeklinde yorumlanabilir. İki hava hızı için $t=3000$ s'deki nem içerikleri arasındaki farklar, 343 K hava sıcaklığında havuç için %1,4, elma için %1,7 ve patates için %5,6'dır.



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 5.33 $u=1$ m/s, $T=303$ K (a), $u=2$ m/s, $T=303$ K (b), $u=1$ m/s, $T=343$ K (c) ve $u=2$ m/s, $T=343$ K (d) için farklı malzemeler için zamana göre sıvı doygunluğu gelişimi

Nem içeriğindeki azalma

Değişen parametrelerin kuruma performansı üzerindeki etkisini belirlemek için tüm şekiller için kuruma süresi sonunda nem içeriğinin azalması araştırılmıştır. Tablo 5.6, tüm şekiller dikkate alındığında her iki nesne için $T=343$ K hava sıcaklıklarında değişen hava hızları için nem içeriğindeki azalmayı göstermektedir. En yüksek azalma, hızın en yüksek olduğu kanal girişine yakın olan daire cismi için %99,38 olarak görülmüş ve hızın artışı tüm şekiller için buharlaşmayı olumlu etkilemiştir. Tüm hızlarda dikdörtgen nesne için nem içeriğinde en düşük azalmalar görülür. Tablo 5.7, $t=3000$ s'de ve $u=2$ m/s hızında değişen hava sıcaklıklarına sahip tüm şekiller için nem içeriğindeki azalmayı göstermektedir. Son satır, aynı veriler nedeniyle ($u=2$ m/s, $T=343$ K) Tablo 5.6'nın son satırı ile aynıdır ve sonuçlar, hava sıcaklığının artmasının kurutma üzerinde artan bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.6 Değişken hava hızlarına sahip tüm şekiller için nem içeriğinde (%) azalma (T=343 K, t=3000 s)

Nem içeriğindeki azalma (%)						
U ₀ (m/s)	dikdörtgen		üçgen		daire	
	O1	O2	O1	O2	O1	O2
1	78.82	76.80	97.71	92.90	99.34	98.60
2	81.64	78.30	97.85	95.90	99.40	99.36
3	84.22	80.87	97.95	97.29	99.33	97.13
4	86.54	83.40	98.02	97.56	99.36	98.95
5	88.84	85.96	98.07	97.78	99.38	97.48

Tablo 5.7 Değişken hava sıcaklıklarına sahip tüm şekiller için nem içeriğinde (%) azalma (u= 2 m/s, t=3000 s)

Nem içeriğindeki azalma (%)						
T(K)	dikdörtgen		üçgen		daire	
	O1	O2	O1	O2	O1	O2
303	55.08	43.71	83.58	60.16	52.79	13.30
313	64.78	59.18	92.65	76.81	97.29	76.80
323	74.42	70.47	97.32	87.89	99.24	81.60
333	81.97	78.76	97.85	95.25	99.35	94.38

343	88.84	85.96	98.07	97.78	99.38	97.48
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Bu özel çalışmalar sonucunda kuru hava sıcaklığı ve hızının yanında konvektif kurutma dinamiğine etki eden önemli parametrelerin cisimlerin kanal içinde sahip olduğu hız, cisimlerin şekli ve termodinamik özellikleri olduğu ortaya konulmuştur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde (HAD) çok sayıda gözenekli cismin yer aldığı ve cisimlerin hareketinin göz önüne alındığı çalışmalar bulunmamaktadır ve bu çalışmanın sonucunda ilk defa bu etkilerin göz önüne alındığı çalışmalar ortaya konulmuştur.

5.1.4 Konvektif kurutmada sürekli rejimde optimizasyon çalışmasının iki boyutlu durumda kullanılması ve zamana bağlı ısı ve kütle transferine entegre edilmesi

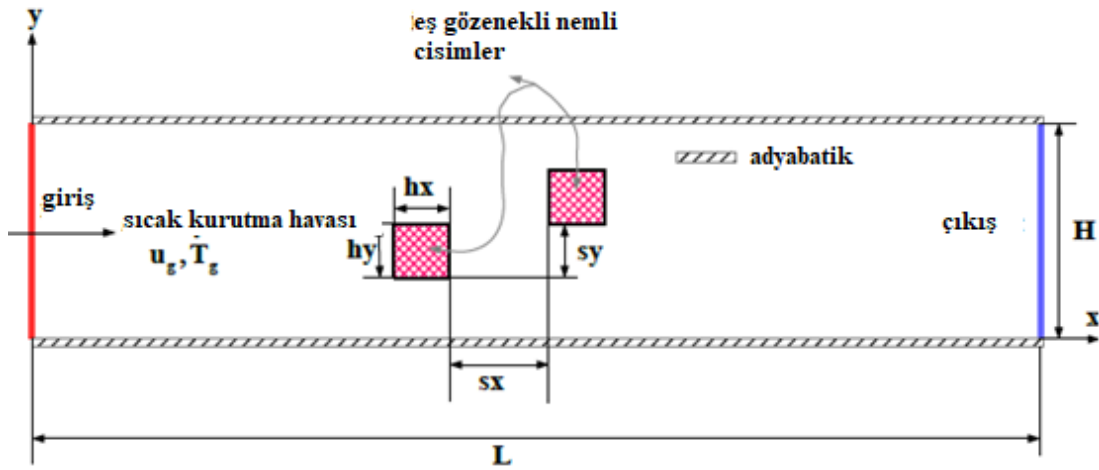
a. Sayısal Model

Bu çalışmada birden fazla nemli ve gözenekli nesnenin konvektif kurutma prosesinde ısı ve kütle transferinin optimize edilmesi için verimli bir yöntem kullanılmıştır. Yöntemin ilk adımı olarak, ısı ve kütle transferi miktarını arttırmak için nesnelerin arasındaki optimum mesafeyi elde etmek amacıyla bir PDE kısıtlama optimizasyonu uygulanmış, ikinci olarak da bu cisimlerin optimum aralık değerlerinin belirlemek için zamana bağlı alan denklemlerine başvurulmuştur. Sonuçlara bakıldığında, resirkülasyon bölgelerinin cisimlerin arka tarafında oluştuğu ve bu bölgelerin cisimler arası mesafeden oldukça etkilendiği gözlemlenmiştir. Cisimler arası mesafeyi yatayda değiştirmenin, ilk blok için ortalama ısı transferini %12,5' a kadar değiştirdiği görülmüştür. Cisimler arası dikey boşluğu değiştirmenin ortalama Nu üzerindeki etkileri, ikinci nesne için çok önemlidir. Dikey uzaklık parametresi s_y ' nin 0 ile $1,5h_p$ arasındaki değişiminin ortalama Nusselt sayısında %80'lik bir artışa neden olduğu görülmüştür.

Şekil 5.34, 2 Boyutlu olarak iki gözenekli nemli nesnenin konvektif kurutulması için hazırlanan termo-akışkan konfigürasyonunun şematik çizimini göstermektedir. Kanal yüksekliğinin boyutu H , uzunluğu ise $40H$ olarak belirlenmiş, birbirine eş kare şeklindeki iki nemli gözenekli cisim kanal içerisine yerleştirilmiş olup cisimlerin her bir

kenarının uzunluğu $h = 0,1H$ boyutundadır. Cisimler arası yatay (s_x) ve dikey (s_y) uzaklık miktarları için farklı değerler verilmiştir. Kanal içerisinde, hızı u_g ve sıcaklığı T_g olacak şekilde sıcak kurutma havası geçirilmektedir. Proses boyunca, nemli cisimden havaya olan buharlaşma sonucunda kanal içerisindeki havanın nem oranı zamanla artmaktadır.

İlk olarak, nesnelerden ısı aktarım hızını en üst düzeye çıkaran gözenekli nemli nesneler arasındaki yatay ve dikey yönlerde optimum aralığı belirlemek için bir optimizasyon çalışması yapılır. Daha sonra, kanal akışı ve optimize edilmiş konfigürasyondaki nesneler arasındaki zamana bağlı denklemlerin doğrudan bağlantısı kullanılarak nemli nesneler için kütle taşıma özellikleri analiz edilmiştir. Kanalın yüksekliğine göre Reynolds sayısı $Re = 555$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.34 5.1.4 nolu çalışmanın şematik gösterimi

. Çalışmada, kütle transferinin hesaba katmadan ısı transferinin maksimum değerini elde eden cisimler arası mesafe miktarını bulmak amacıyla bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Kontrol değişkenleri, termo-akışkanın parametrelendirilmesi için kullanılır ve PDE kısıtlamalı optimizasyondaki ortalama Nu sayılarının toplamı anlamına da gelen kısmi differansiyel denklemin (PDE) çözümünün bir fonksiyonu elde edilir.

Genel optimizasyon probleminde, PDE sorunu aşağıdaki gibi bir eşitlik kısıtı olarak dahil edilmiştir:

$$f(\Phi(\psi)\psi) \text{ fonksiyonu}$$

$$\xi(\Phi(\psi)\psi)$$

$l_b \leq G(\Phi(\psi)\psi) \leq u_b$ bağıntısına bağlı olarak minimize edilir.

Yukarıdaki gösterimde, kontrol değişkenleri, PDE çözümleri ve kısıtlamalar Φ , ψ ve G ile temsil edilmektedir ve kısıtlamalı optimizasyon çözücü olarak COBYLA (Constrained Optimization BY Linear Approximations) seçilmiştir. Bu, gradyan içermeyen bir algoritmadır ve daha az değişken sayısı ile daha iyi performans elde edilir. COBYLA, amaç ve kısıtlama fonksiyonlarına doğrusal yaklaşımlar için kullanılır. Bu optimizasyon yönteminde, enterpolasyon her yineleme adımında bir simpleksin köşelerinde yürütülür, problemin optimizasyonu bir güven bölgesi içinde gerçekleştirilir. Alt ve üst sınırlar ilgili parametreler için kullanılır:

$$2h_p \leq s_x \leq 6h_p, \quad 0 \leq s_y \leq 3h_p$$

Bloklarda ortalama ısı transferi değerinin en üst değere çıkararak ilgi parametreleri belirlendiğinde, nemli cisimlerle ilgili kütle transferi özellikleri kanal akış denklemleriyle birleştirilir.

b. Başlangıç ve sınır koşulları

Problem için oluşturulan başlangıç ve sınır koşulları aşağıdaki gibidir.

- Kanal girişinde, kurutma havası için $u = u_g$, $T = T_g$, $c_v = 0$
- Kanal çıkışında, tam gelişmiş koşullar aşağıdaki sınır şartlarında geçerlidir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial x} = 0$$

- Kanal duvarları;

$$u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial c}{\partial n} = 0$$

- Kanal içindeki akış için

$$c_{v, (t=0)} = 0, \quad P_{(t=0)} = P_{atm}, \quad T_{(t=0)} = T_0$$

- Gözenekli nemli cisimleri için başlangıç şartları:

$$T_{(t=0)} = 293 \text{ K}, \quad S_{l, (t=0)} = 0.7$$

- Sıvı fazı için başlangıç konsantrasyonu denklem 5.21' deki gibi tanımlanır.

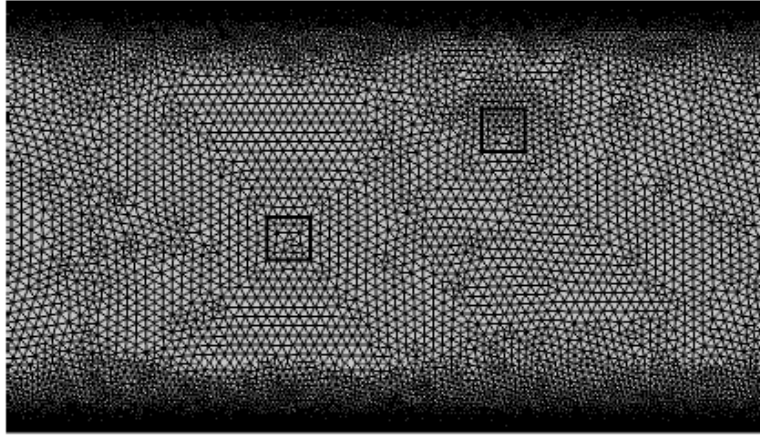
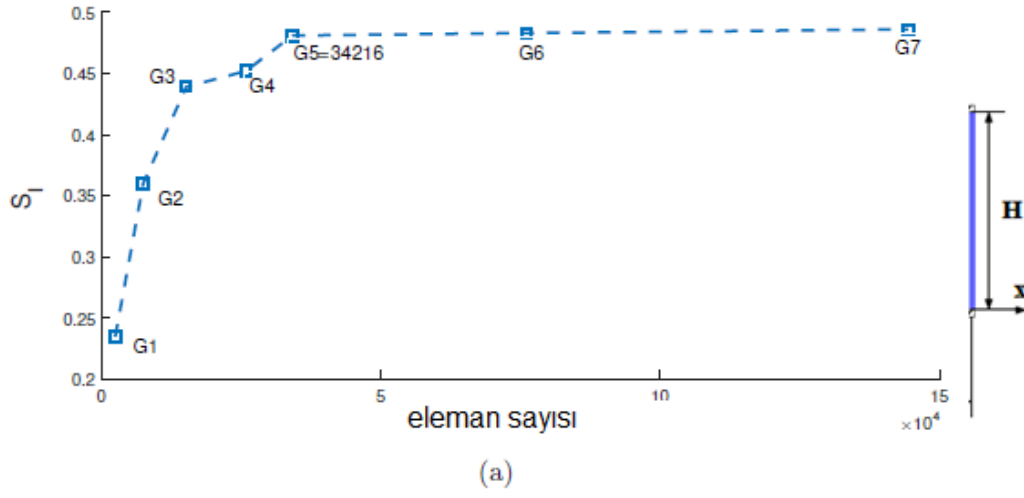
Her seferinde, gözenekli nesneler ve kanal akışı arasındaki yerel ısı ve kütle aktarım katsayı değerleri arasında Denklem 5.22' deki bağıntı geçerlidir.

c. Çözüm metodu

Yukarıda verilen yönetim denklemleri uygun sınırlar ve başlangıç koşullarına göre Galerkin ağırlıklı artık sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile çözülmüştür. Bu yöntemde, denklemler zayıf bir formülasyona dönüştürülür ve alan değişkenlerinin yaklaşık formları yönetsel denklemlerine eklenir. Yakınsamalar için, Lagrange sonlu elemanları kullanılmıştır. Zamana bağlı denklemlerin çözümü için doğrudan PARDISO çözücü seçilir ve 2. derecenin geriye doğru farklılaşma formülü (BDF) kullanılır. Sonraki hesaplamalarda, 10^{-6} 'lık bir yakınsama kriteri belirlenmiştir. Optimizasyon için yukarıda bahsedildiği gibi COBYLA kullanılmıştır. Çözümün ağ bağımsızlaştırması, farklı ağ boyutlarındaki çözümler karşılaştırılarak yapılmıştır. Şekil 5.35 (a), farklı ağ boyutlarında $t = 1000$ s'de B1 bloğu için dikkate alınan ortalama sıvı doygunluğunu göstermektedir. 34216 eleman sayısı ile G4 ağ boyutu seçilir. Şekil 5.35 (b) probleme ait ağ yapısını göstermektedir, görüldüğü gibi duvar yakınları ve ara yüzlerde ağ sıklaştırılmıştır.

d. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada, iki adet dikdörtgen şekilli cismin konvektif kurutulmasında ısı ve kütle transferi değerlerini elde etmek için sayısal bir çalışma yapılmış ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. Öncelikle, kararlı yapıda ısı transferini maksimum yapan bloklar arasındaki en uygun yatay ve düşey mesafeyi belirlemek için bir optimizasyon çalışması yapılmış, daha sonra, optimize edilmiş biçimdeki kanal akışı ve cisim denklemleri arasında doğrudan bağlantı kurularak nemli cisimler için kütle transferi özellikleri analiz edilmiştir. Verilen kanal yüksekliğinde Reynolds sayısı $Re = 555$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.36, cisimler arasındaki mesafenin $1.1h_p$ ile $6h_p$ arasındaki etkisini kütle transferi olmadan (cisim yüzeyleri boyunca sıcaklık sabit) veren eş akış ve eş sıcaklık çizgilerini göstermektedir. Eş akış çizgilerinde, cisimler arkasında sirkülasyon bölgelerinin oluştuğu gözlenmiş ve cisimler arası mesafe arttırıldığında ilk nesnenin arkasındaki girdapların büyüdüğü görülmüştür. İkinci nesnenin arkasında oluşan girdap da birinci nesnenin girdap boyutundan etkilenmektedir.



Şekil 5.35 Geometri ağ bağımsızlaştırmasında eleman sayısına göre ortalama S_l değeri ($t=1000$ s) (a) Geometri ağ yapısı (b)

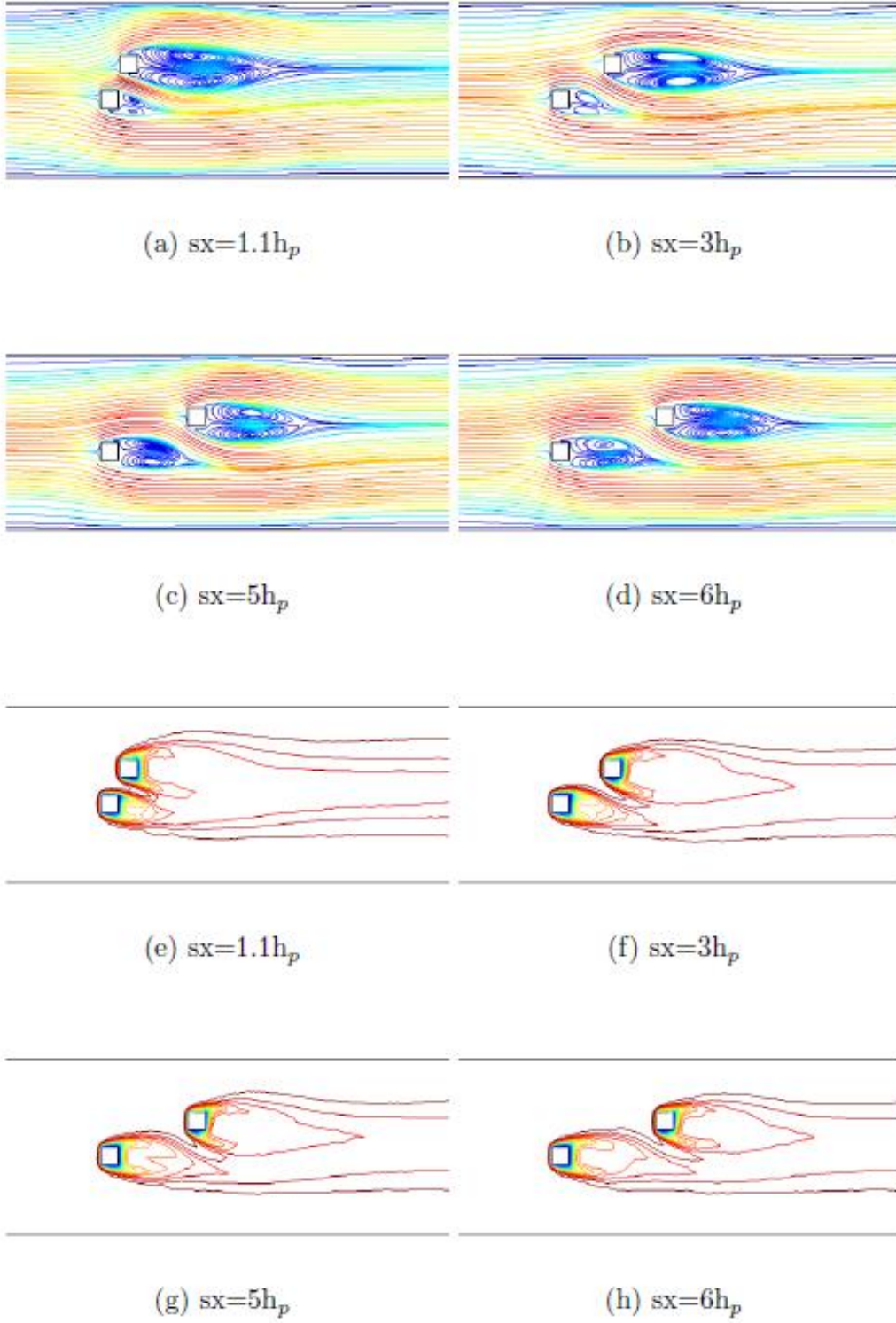
Nesneler arası mesafenin çok dar olduğu $s_x = 1.1h_p$ uzaklığında hızın bölgesel olarak arttığı ve sıcaklık gradyanlarının da ilk bloğun üst taraflarında dikleştiği gözlenmektedir. İzoterm kümelenmesinin daha az olmasından dolayı ikinci bloğun üst kısımlarında bu durumun tersi görülür. $s_y = 0$ ' da cisimler arasındaki girdap daha zayıfken bu boyut $s_y = h_p$ olduğunda artar. Ancak nesne $s_y = 3h_p$ 'de üst duvara yaklaştığında, üst duvar ikinci nesnenin arkasındaki devridaimi azaltmak için bir engel görevi görür. Nesneler arasındaki dikey mesafe dikdörtgen nesnelerin arkasındaki girdap boyutlarını

değiştirmek için kullanılabilir ve sıcaklık değişimleri de etkilenir. Bu, azaltılmış devirdaim boyutuna bağlanır ve bu duvarda daha fazla sıvı teması anlamındadır. Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’ de, nesneler arasındaki mesafenin değişen değerlerinde her bir blok için yerel ve ortalama Nusselt sayısının değişimini göstermektedir. Ön yüzey için birinci bloğun ve ikinci bloğun (A ve E), yatay mesafesinin etkileri önemli hale gelirken, üst yüzeyler (B ve F) için bu etkiler hafiftir. B ve F yüzeyleri için bu, nesneler arasındaki alanın azalmasından kaynaklanmaktadır. İlk ve ikinci cismin ön yüzeyinde (A ve E) cisimler arası yatay uzunluk miktarının etkisi zayıftır, üst yüzeylere (B ve F) bakıldığında bu etkinin öneminin arttığı görülmüştür. Bu durum B ve F yüzeyleri için mesafenin düşürülmesi sonucu aradaki alanın azalmış olmasıyla açıklanabilir. Ortalama Nusselt sayısı ilk blok için mesafenin artmasıyla genelde azalmış, ikinci blok için çok önemli değişiklikler olmamıştır, en yüksek Nu sayısı değeri $s_x = 5h_p$ mesafesinde görülmüştür. Yatay mesafelerin en az ve en fazla olduğu durumlar arasında Nusselt sayılarında %12’ ye varan değişimler görülmüştür. Dikey mesafenin değişimi dikkate alındığında, etki B2 bloğu için daha yüksektir çünkü ilk blok sabitken ikinci blok dikey olarak hareket etmektedir. Yerel Nu sayısı, ikinci blok üst duvara yakın konumdayken bloğun sol, üst ve sağ yüzeyi için daha yüksek değerlere ulaşır, bunun sebebi duvar ve blok arası mesafenin azalmasıyla yerel hızın bu noktada artmasıdır. Bunun bir sebebi de s_y ’ nin en yüksek değerinde kanal üst duvarının ikinci bloğun (B2) arka bölgesinde resirkülasyon bölgesinin oluşmasını sağlayan bir set görevi görmesidir. B2 için ortalama ısı transferi $s_y = 1.5h_p$ değerine kadar ciddi bir artış gösterir, bu noktadan sonraysa yavaş şekilde azalır. Mesafenin $s_y = 0$ ile $s_y = 1.5h_p$ değerleri arasındaki değişimiyle B2 için ortalama ısı transferinde %80’ lik bir varyasyon görülmektedir. Bununla beraber, B1 için cisimler arası dikey mesafenin yüksek değerlere ulaşmasıyla bile ortalama ısı transferindeki değişim çok yavaştır, Nusselt sayısındaki en büyük değişim %10 olarak hesaplanmıştır. Değişen uzaklık değerlerine karşı ortalama Nu sayısı nesneler arasında düzenli olmayan bir davranış gösterir ve ortalama Nusselt değerlerinin maksimum olduğu optimum değerler iki cisim için farklı durumlarda görülür.

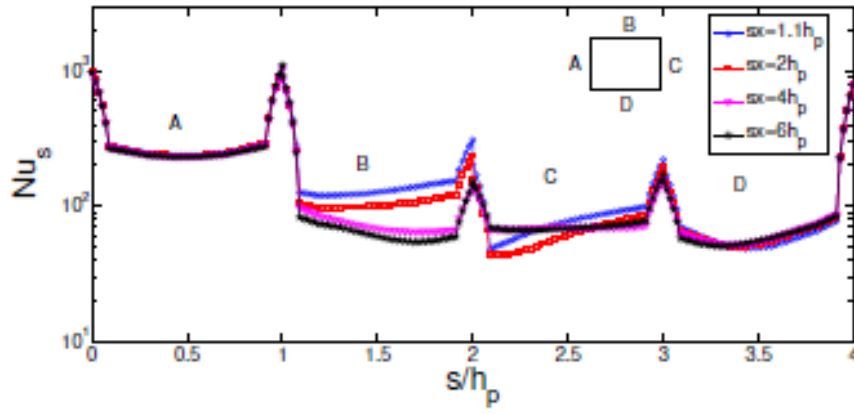
Bu çalışmada ısı transferi değerlerinin maksimum olduğu nesneler arası yatay ve düşey mesafeyi elde etmek için bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 5.39a’ da Nusselt sayısını en yüksek yapan optimum değerler aranmıştır, optimum değerlere $s_x = 1.1h_p$ ve $s_y = 1.9h_p$ ’ de ulaşılmıştır. Optimizasyon çalışmasında elde edilen sonuçların

doğruluğunu ispatlamak için, (sx, sy) kombinasyonunun değişen değerleri için parametrik bir çalışma yapılmıştır. B1 ve B2 nesneleri için, (sx, sy) parametrik kombinasyonunun değişen değerlerinde elde edilen ortalama Nu değerleri Tablo 5.8' de verilmiştir. Koyu renkle görülen değerlerden anlaşıldığı gibi, optimizasyon ile elde edilen sonuç, her iki blok için ortalama Nusselt sayılarının en yüksek değerlerini sağlamıştır. Optimum çalışma noktasında eş akış ve eş sıcaklık çizgilerinin değişimi sırasıyla Şekil 5.39b ve Şekil 5.39c 'de gösterilmiştir. Kanalin üst duvarı civarında vorteks oluşurken ikinci cismin arkasındaki resirkülasyon bölgesi göze çarpar.

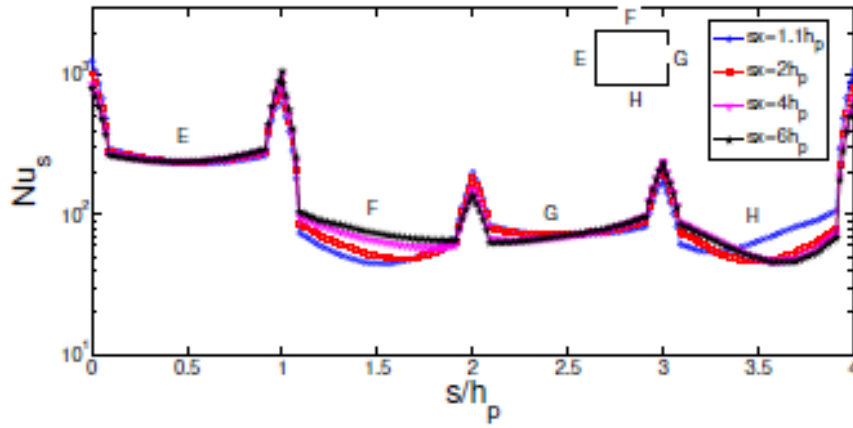




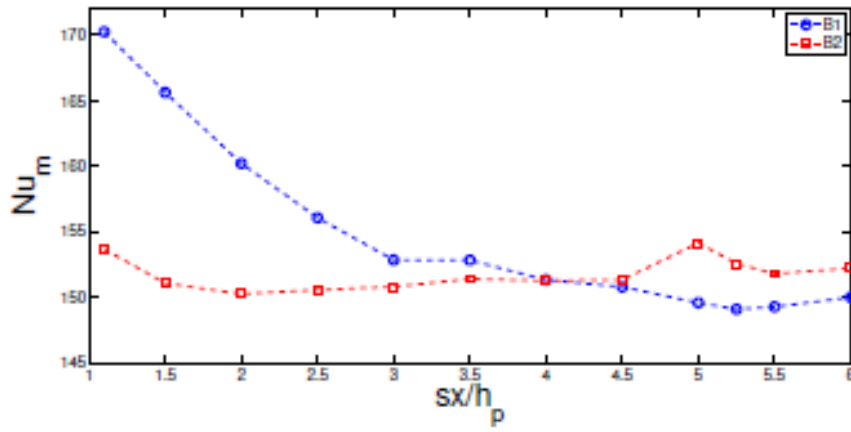
Şekil 5.36 Farklı yatay uzaklıklarda eş akış ve eş sıcaklık eğrisi dağılımları ($s_y = 2h_p$)



(a) B1

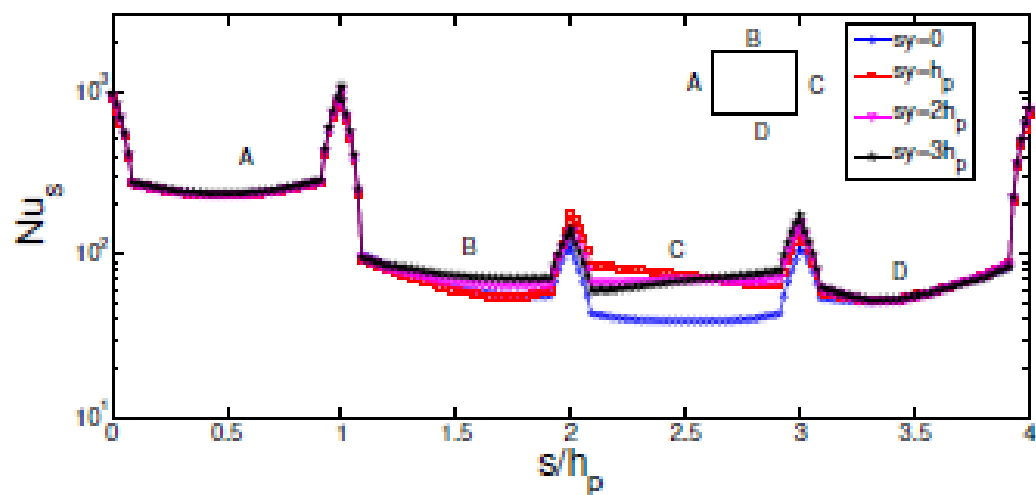


(b) B2

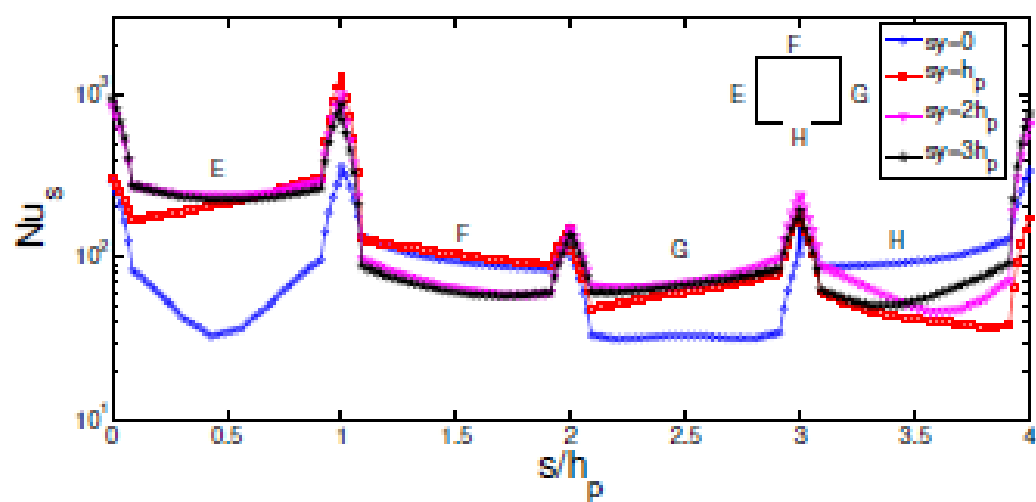


(c)

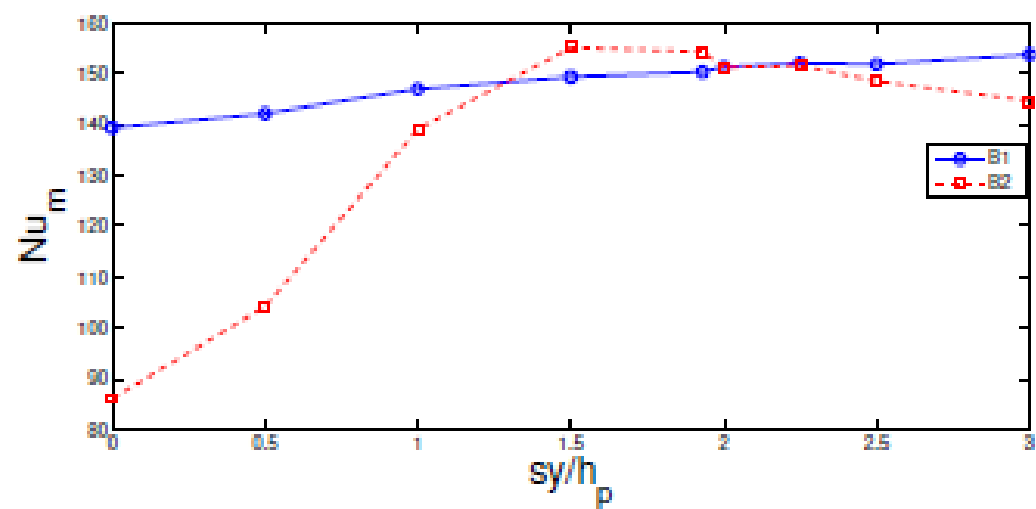
Şekil 5.37 Nesneler arasındaki yatay mesafenin yerel (a-b) Nusselt sayıları değişimine etkisi ve ortalama (c) ($s_y = 2h_p$)



(a) B1



(b) B2

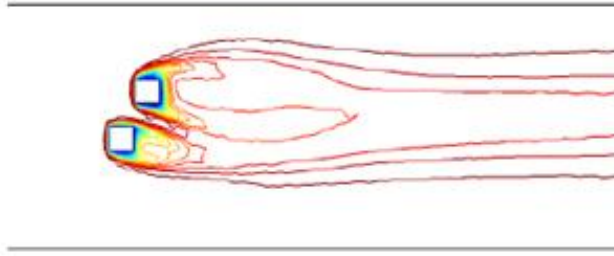
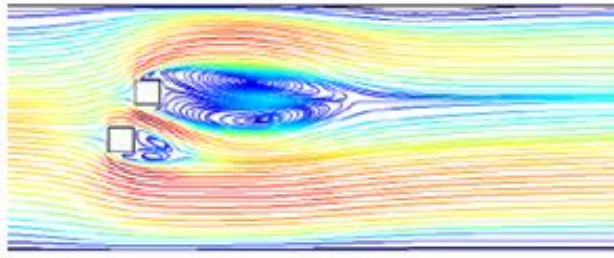
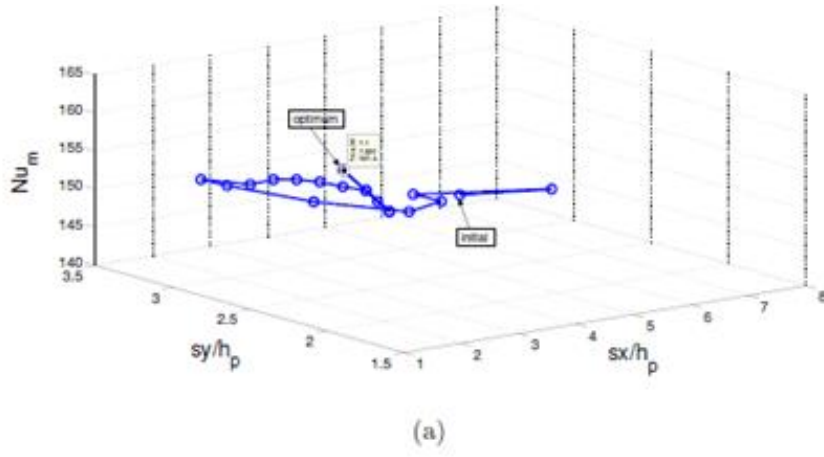


(c)

Şekil 5.38 Nesneler arasındaki dikey mesafenin yerel Nusselt sayıları değişimine etkisi (a-b) ve ortalama (c) ($s_x = 4h_p$)

Çalışmanın ikinci kısmında, bir önceki aşamada elde edilen optimum parametrelerle gözenekli cisimler için ısı ve kütle transferi özellikleri analiz edilir. Bir önceki kısımda elde edilen optimum parametrelerin konvektif kurutmada en etkili şartları oluşturup oluşturmadığını kontrol etmek için s_x ve s_y ' nin değişen değerlerinde zamana bağlı ve termo-akışkan içeren bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.40, yatay ve düşey mesafenin değişen değerlerinde ortalama farklı zamanlarda sıvı akışkan doygunluğunu vermektedir.

Her iki cisim için de farklı zamanlarda ortalama doygunluğun en düşük olduğu s_x ve s_y değeri $s_x = 1,1h_p$ ve $s_y = 1,9h_p$ ' dir. Tablo 5.9, B1 cismi için $t=1000s$ ve $t=5000 s$ ' de optimum (s_x, s_y) parametresini de içeren nesneler arası farklı mesafe değerleri için nem içeriğindeki azalmayı göstermektedir. Nem içeriğindeki azalmanın maksimum değeri B1 cismi için $t=1000 s$ ' de %33,4 ve $t=5000 s$ 'de %98, 015 değerleriyle optimum (s_x, s_y) noktasında görülmüştür. Şekil 5.41, optimum parametrede farklı zamanlar için nesneler içindeki S_l değişimini göstermektedir. Beklendiği gibi yüzeye yakın kısımlar sıcak havaya daha yakın olduğu için daha düşük S_l değerine sahiptir. Blok 1' de nem miktarında blok 2' ye göre daha hızlı bir azalma görülmüştür. Kurutmanın $t= 5000 s$ ' deki son kısmında, her iki blok için S_l miktarlarının çok düşük değerlerde olduğu görülür. Şekil 5.42'de optimum parametreler için farklı zaman aralıklarında kanalda ve cisimlerdeki sıcaklık değişimleri görülmektedir. Sıcak kurutma havası ve cismin soğuk iç kısımları arasındaki sıcaklık farkı, zaman ilerledikçe azalmıştır. B1 ve B2 cisimleri için zamana bağlı ortalama yüzey sıcaklıkları Şekil 5.43 (a)' da verilmiştir. Ortalama yüzey sıcaklığı birinci blok için $T=293 K$ başlangıç değerinden $T= 325 K$ ' e yükselmiştir, burada etkili taşınım özelliklerinden dolayı geçiş süresi daha hızlıdır. Şekil 5.43 (b), B1 ve B2 cisimleri için zamana bağlı ortalama sıvı doygunluğunu göstermektedir. Belirlenen optimizasyon noktaları için benzer trend gözlenmiş ve taşınım özelliklerinin her iki nesne için etkili olduğu anlaşılmıştır.

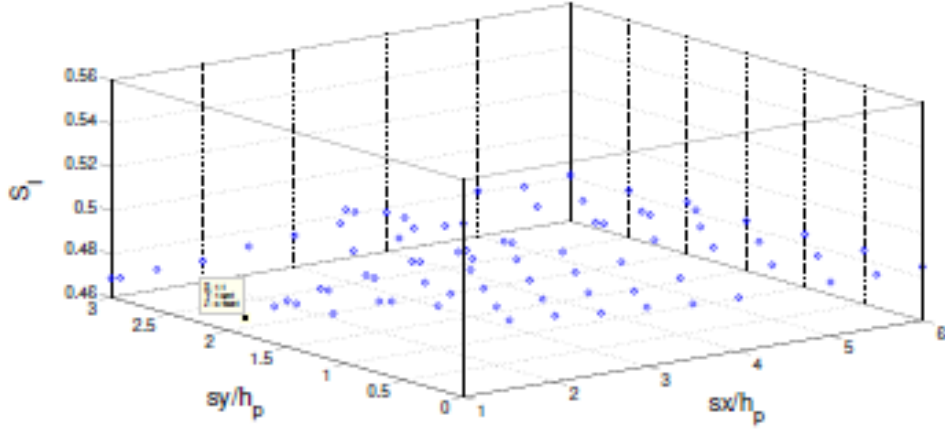


Şekil 5.39 Nesneler arasındaki mesafelerin optimum değerleri (s_x , s_y) (a), akış çizgileri (b) ve izoterm (c) varyasyonları araştırması

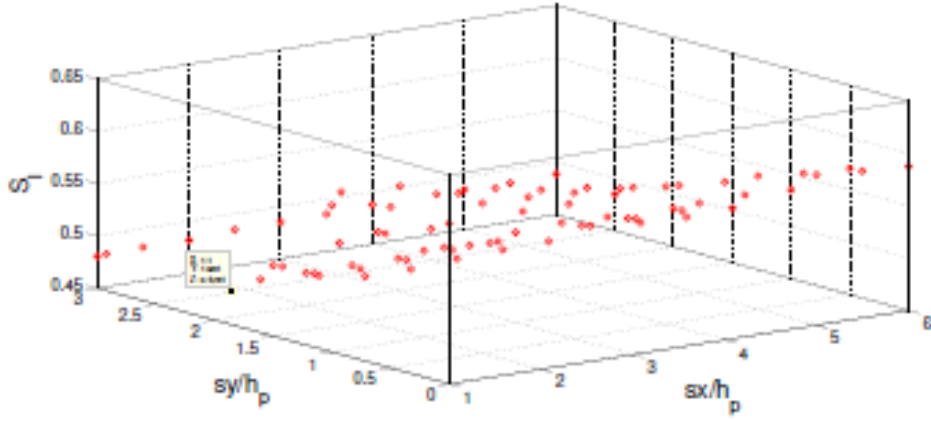
Tablo 5.8 B1 ve B2 cisimleri için değişen cisimler arası aralık değerlerinin ortalama Nusselt sayısı üzerine etkileri. Em yüksek Nu değerleri optimum mesafede görülmüştür (koyu renkle gösterilmiştir).

ax/h_p	ay/h_p	B1 (Nu_m)	B2 (Nu_m)	ax/h_p	ay/h_p	B1 (Nu_m)	B2 (Nu_m)
1.1000	0	132.1805	45.8633	3.0000	1.9306	153.9451	151.4616
1.1000	0.5000	121.3621	70.3960	3.0000	2.0000	152.8405	150.7942
1.1000	1.0000	119.1003	97.1783	3.0000	2.2500	154.6693	148.7466
1.1000	1.5000	167.8333	153.0728	3.0000	2.5000	154.2869	147.8504
1.1000	1.9306	169.5612	153.1635	3.0000	3.0000	155.9970	144.3525
1.1000	2.5000	168.4502	153.0340	3.5000	0	138.9629	81.5283
1.1000	3.0000	164.3811	150.9393	3.5000	0.5000	140.1832	97.0153
1.5000	0	135.3186	50.9198	3.5000	1.0000	146.5737	141.3420
1.5000	0.5000	144.9865	104.0896	3.5000	1.5000	148.0433	151.9582
1.5000	1.0000	154.8888	146.4154	3.5000	1.9306	152.1694	151.9135
1.5000	1.5000	161.1655	150.1035	3.5000	2.0000	152.8274	151.3921
1.5000	1.9306	165.9237	152.3757	3.5000	2.2500	152.6626	148.9920
1.5000	2.0000	165.6424	151.0705	3.5000	2.5000	153.8840	148.1150
1.5000	2.2500	165.0619	150.3390	3.5000	3.0000	154.4649	145.1964
1.5000	2.5000	165.3448	148.8398	4.0000	0	139.3290	86.1546
1.5000	3.0000	161.5500	147.1455	4.0000	0.5000	142.1604	104.2072
2.0000	0	136.6448	58.8292	4.0000	1.0000	146.9944	139.0860
2.0000	0.5000	137.3774	98.0732	4.0000	2.0000	151.3109	151.2487
2.0000	1.0000	143.5450	148.3625	4.0000	2.2500	152.0188	151.5392
2.0000	1.5000	154.4267	152.4176	4.0000	2.5000	151.8343	148.5540
2.0000	1.9306	160.3724	150.6450	4.0000	3.0000	153.7465	144.6063
2.0000	2.0000	160.2118	150.2317	4.5000	0	140.4522	92.5788
2.0000	2.2500	161.6088	150.8839	4.5000	0.5000	143.3145	104.0780
2.0000	2.5000	161.6367	148.2790	4.5000	1.0000	146.8238	138.4388
2.0000	3.0000	162.8190	145.5668	4.5000	1.5000	147.1046	152.7860
2.5000	0	137.9727	66.7476	4.5000	1.9306	150.0768	152.3202
2.5000	0.5000	137.2861	93.0809	4.5000	2.0000	150.7795	151.3172
2.5000	1.0000	144.6143	145.9734	4.5000	2.2500	150.2261	150.2572
2.5000	1.5000	152.1278	151.8455	4.5000	2.5000	151.0676	148.1020
2.5000	1.9306	155.5967	152.6120	4.5000	3.0000	153.8125	144.5402
2.5000	2.0000	156.0673	150.5483	5.0000	0	140.4598	95.5432
2.5000	2.2500	155.6649	149.2464	5.0000	0.5000	145.2705	107.3870
2.5000	2.5000	158.0650	148.3505	5.0000	1.0000	146.8381	139.0937
2.5000	3.0000	159.3650	144.8677	5.0000	1.5000	147.1658	152.2474
3.0000	0	138.8249	75.3241	5.0000	1.9306	148.7692	151.9557
3.0000	0.5000	139.8410	92.4333	5.0000	2.0000	149.5698	154.1413
3.0000	1.0000	145.2771	142.3453	5.0000	2.2500	149.6982	150.2570
3.0000	1.5000	149.9344	154.4596	5.0000	2.5000	150.3550	148.6462

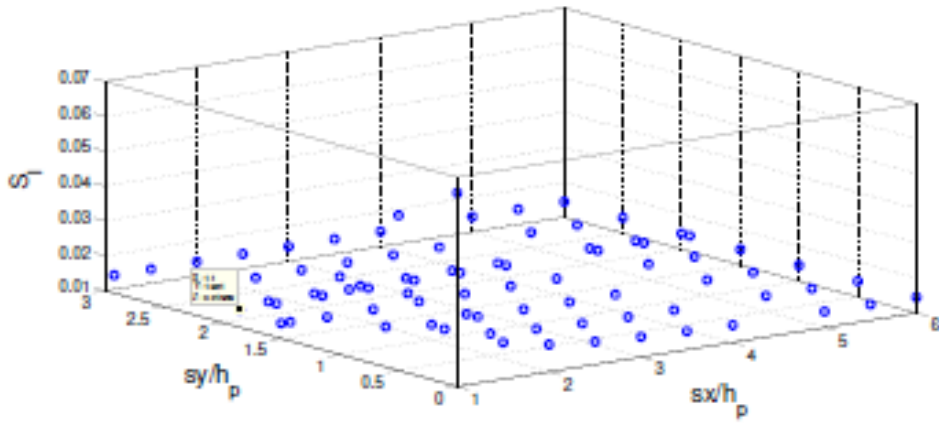
ax/h_p	ay/h_p	B1 (Nu_m)	B2 (Nu_m)
5.0000	3.0000	151.8630	144.4506
5.2500	0	141.3614	101.7826
5.2500	0.5000	145.6821	109.0749
5.2500	1.0000	146.8468	137.0910
5.2500	1.5000	147.3968	150.4249
5.2500	1.9306	148.9729	154.7202
5.2500	2.0000	149.0735	152.5693
5.2500	2.2500	150.2077	151.7784
5.2500	2.5000	149.9389	148.5484
5.2500	3.0000	150.7381	144.4362
5.5000	0	140.2492	98.4556
5.5000	0.5000	146.2252	107.7160
5.5000	1.0000	145.1267	139.3150
5.5000	1.9306	147.5667	153.0041
5.5000	2.0000	149.2555	151.7897
5.5000	2.2500	149.9595	151.6421
5.5000	3.0000	149.8750	144.0777
6.0000	0	141.6577	103.0036
6.0000	0.5000	148.2717	115.2662
6.0000	1.0000	148.3223	137.9614
6.0000	1.5000	146.2001	150.9816
6.0000	1.9306	149.3839	152.3150
6.0000	2.0000	149.9882	152.2099
6.0000	2.2500	149.3707	149.7805
6.0000	2.5000	150.3352	148.4045



(a) B1, $t=1000$



(b) B2, $t=1000$

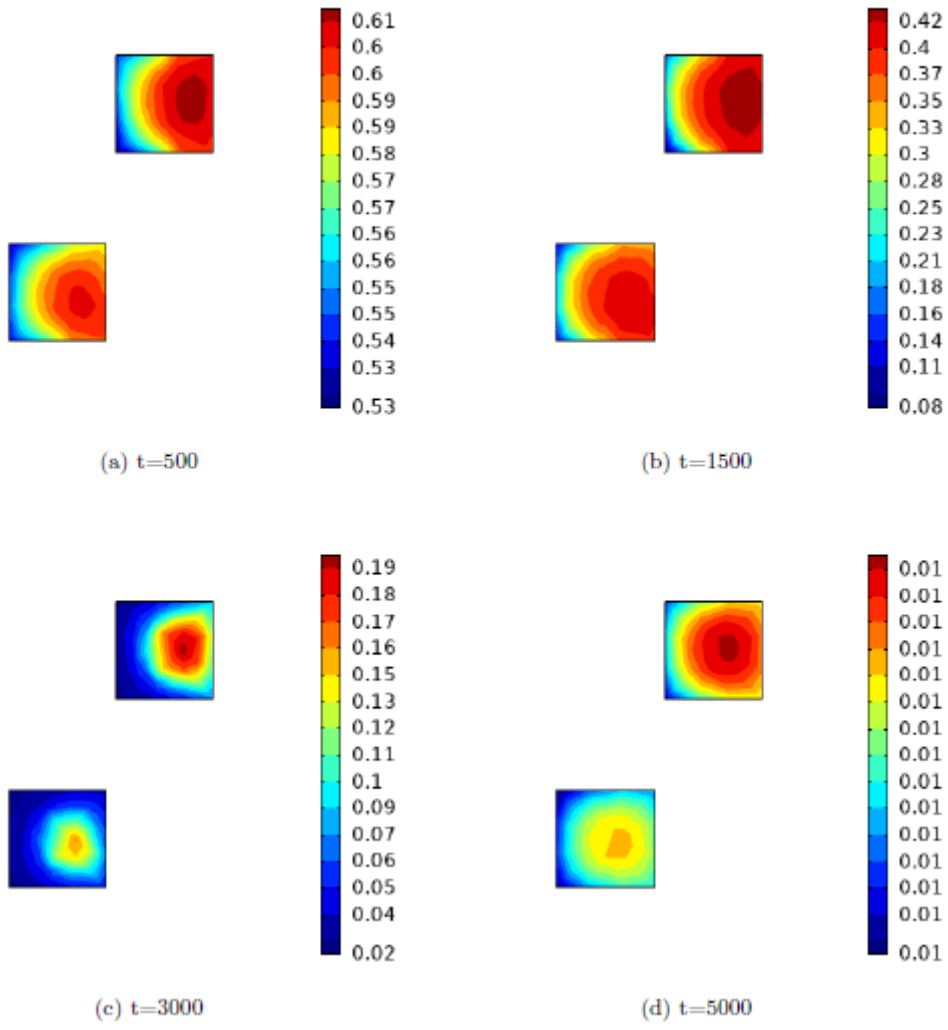


(c) B1, $t=5000$

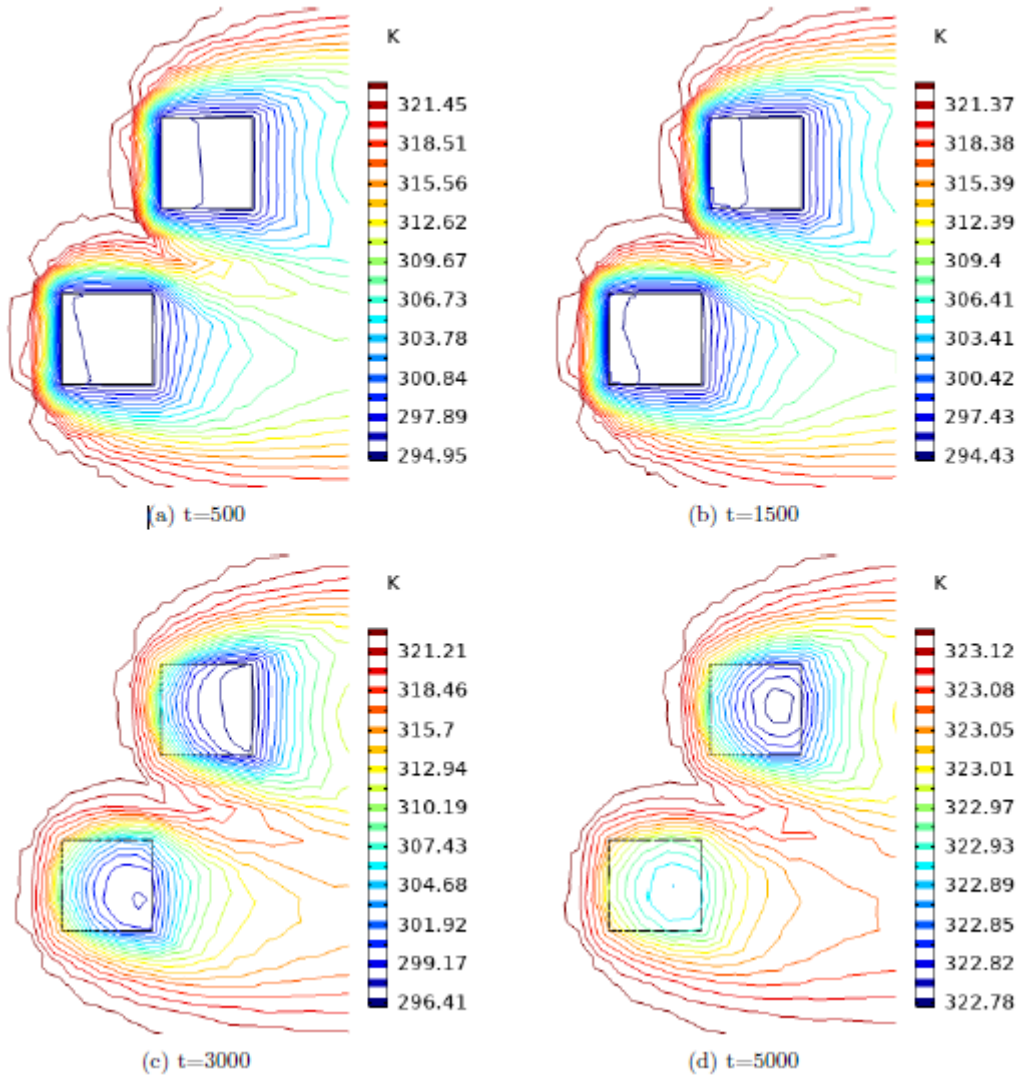
Şekil 5.40 Nesneler arasındaki mesafelerin blok 1 (B1) ve blok 2 (B2) için sıvı doygunluğundaki değişim üzerindeki etkileri

Tablo 5.9 Nesneler arasındaki çeşitli aralıklarda iki farklı zamanda ilk blok(B1) için nem miktarındaki azalma. En yüksek değerlere ulaşılır burada test edildiği gibi optimum aralık (kalın olarak gösterilmiştir).

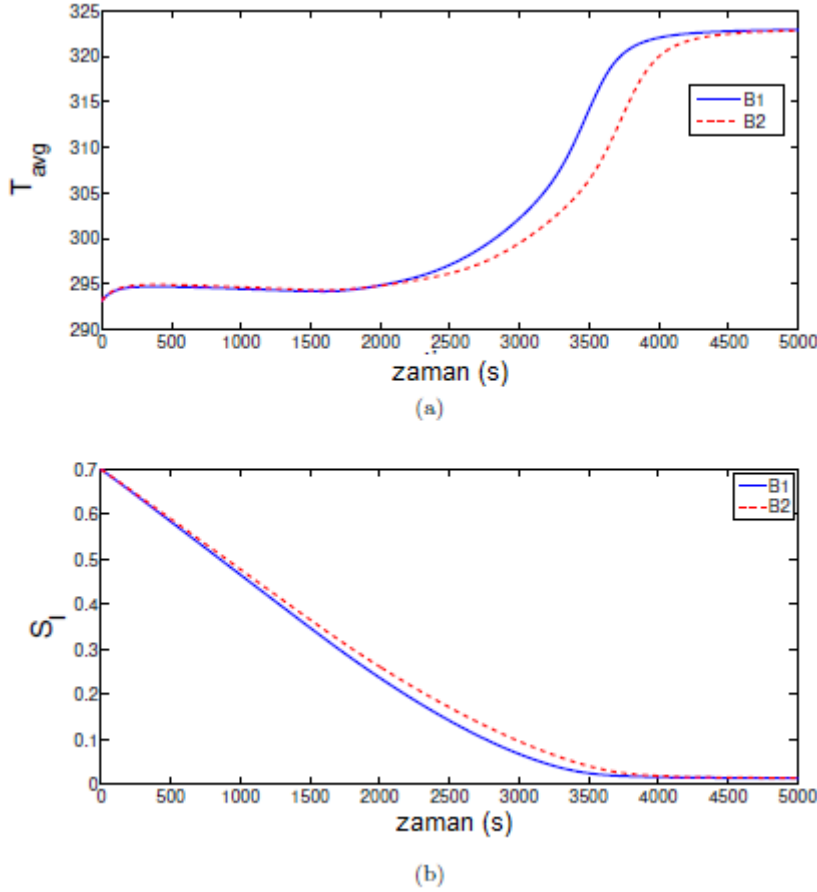
ax/h_p	ay/h_p	B1 (t=1000)	B1 (t=5000)	ax/h_p	ay/h_p	B1 (t=1000)	B1 (t=5000)
1.0000	0	22.8765	90.6395	3.5000	0.5000	30.9319	97.8855
1.0000	0.5000	23.5892	92.2092	3.5000	1.0000	30.7897	97.9269
1.0000	1.0000	24.1784	95.3863	3.5000	1.5000	31.0235	97.9341
1.0000	1.5000	31.2380	97.9416	3.5000	1.9306	31.3799	97.9483
1.1000	0	25.2981	95.6661	3.5000	2.0000	31.6256	97.9511
1.1000	0.5000	24.3762	95.4707	3.5000	2.5000	31.8208	97.9615
1.1000	1.0000	24.4006	95.9705	3.5000	3.0000	31.9326	97.9643
1.1000	1.5000	31.5531	97.9566	4.0000	0	30.7881	97.8631
1.1000	1.9306	33.4077	98.0161	4.0000	0.5000	30.5788	97.8991
1.1000	3.0000	33.0926	97.9965	4.0000	1.0000	30.6207	97.9192
1.5000	0	29.7442	97.0674	4.0000	1.5000	31.0225	97.9313
1.5000	0.5000	29.1047	97.1756	4.0000	1.9306	31.3807	97.9454
1.5000	1.0000	30.6881	97.7366	4.0000	2.0000	31.4362	97.9455
1.5000	1.5000	32.5876	97.9984	4.0000	2.5000	31.5239	97.9505
1.5000	2.0000	33.2170	98.0081	4.0000	3.0000	31.7009	97.9549
1.5000	3.0000	32.9669	97.9920	5.0000	0	30.7725	97.9127
2.0000	0	29.9657	97.4604	5.0000	0.5000	30.7234	97.9215
2.0000	0.5000	30.4594	97.6657	5.0000	1.0000	30.6584	97.9254
2.0000	1.0000	31.4978	97.9546	5.0000	1.5000	31.2576	97.9365
2.0000	1.5000	32.2893	97.9863	5.0000	1.9306	31.1375	97.9354
2.0000	1.9306	32.5099	97.9907	5.0000	2.0000	31.2048	97.9367
2.0000	2.0000	32.5423	97.9877	5.0000	2.5000	31.2551	97.9428
2.0000	3.0000	32.8834	97.9897	5.0000	3.0000	31.3032	97.9483
2.5000	0	30.2995	97.6381	5.5000	0	30.7579	97.9222
2.5000	0.5000	30.4668	97.7672	5.5000	0.5000	30.6348	97.9281
2.5000	1.0000	30.8434	97.9282	5.5000	1.0000	30.7606	97.9254
2.5000	1.5000	31.5589	97.9581	5.5000	1.5000	30.8987	97.9285
2.5000	1.9306	32.1796	97.9751	5.5000	1.9306	31.0435	97.9334
2.5000	2.0000	32.1517	97.9720	5.5000	2.0000	30.9893	97.9324
2.5000	3.0000	32.4383	97.9764	5.5000	2.5000	31.3543	97.9421
3.0000	0	30.4038	97.7425	5.5000	3.0000	31.5341	97.9477
3.0000	0.5000	30.5396	97.8480	6.0000	0	30.7433	97.9276
3.0000	1.0000	30.7892	97.9266	6.0000	0.5000	30.7665	97.9280
3.0000	1.5000	31.2095	97.9425	6.0000	1.0000	30.8033	97.9269
3.0000	1.9306	31.6322	97.9562	6.0000	1.5000	31.0093	97.9300
3.0000	2.0000	31.7493	97.9581	6.0000	1.9306	31.2347	97.9371
3.0000	2.5000	32.1455	97.9707	6.0000	2.0000	30.8597	97.9303
3.0000	3.0000	32.2423	97.9724	6.0000	2.5000	31.2046	97.9394
3.5000	0	30.6798	97.8149	6.0000	3.0000	31.2777	97.9422



Şekil 5.41 Nesneler arasında optimum aralık için çeşitli zamanlarda sıvı doygunluğunun (S_l) dağılımı



Şekil 5.42 Nesneler aralarındaki optimum boşluk için çeşitli zamanlarda sıcaklıkların değişimi



Şekil 5.43 Optimum mesafede blokların her biri için ortalama sıcaklık (a) ve sıvı doygunluğunun (b) zamanla değişimi

5.2 Üç Boyutlu Kanalda Nemli Gözenekli Cisimlerin Kurutulması

Tez konusu olan çalışmada daha sonra, üç boyutlu kanalda konvektif kurutmayla ilgili çeşitli sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiş, sonuçlar değerlendirilerek çeşitli makaleler yayınlanmıştır. Kurutma işleminde meydana gelen fiziksel olaylar kanal havası akışı, kanaldaki sıcak kurutma havasından ürüne olan ısı transferi ve üründen ortama olan kütle (nem) transferidir. Oluşturulan simülasyonlarda, iki boyutlu çalışmalarda olduğu gibi tüm bu fiziksel olgular bir arada bütünleşik olarak incelenmiş, ısı ve kütle transfer katsayıları zamansal ve uzamsal olarak farklılıklar göstermiştir. Ayrıca, aynı şekilde, gözenekli cisim içerisindeki boşluklar nem ile birlikte sıvı su, su buharı ve hava karışımı olarak üç farklı fazda ele alınmış, çok fazlı yapıda oluşan kütle transferi biçimleri transfer

denklemine eklenmiştir. Üç boyutlu simülasyonlar için geçerli olan yönetsel denklemler aşağıda belirtilmiştir.

a. Akış alanı: Kanal içerisindeki hava, başlangıçta sıcak kuru havadır. Belli bir kuruma süresinden sonra gözenekli cisimlerden havaya nem transferi gerçekleşir, bu şekilde ortam havası nemlenir. Kanal içerisinde sıkıştırılamaz, Newtonyen laminar akış koşulları geçerli olduğunda, kanaldaki hava-su buharı karışımı için kütle, momentum korunumu ve enerji denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} &= \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (5.32)$$

Türbülanslı akışta girdap viskozitesi denklemi üç boyutlu çalışmalarda da aynıdır. Gözenekli cisim denklemleri de genel haliyle iki boyutlu çalışmalarda kullanıldığı gibi kullanılmıştır.

5.2.1 Konvektif koşullarda üç boyutlu gözenekli nemli cisimlerin kurutulması için

zamana bağlı ısı ve kütle transferinin incelenmesi

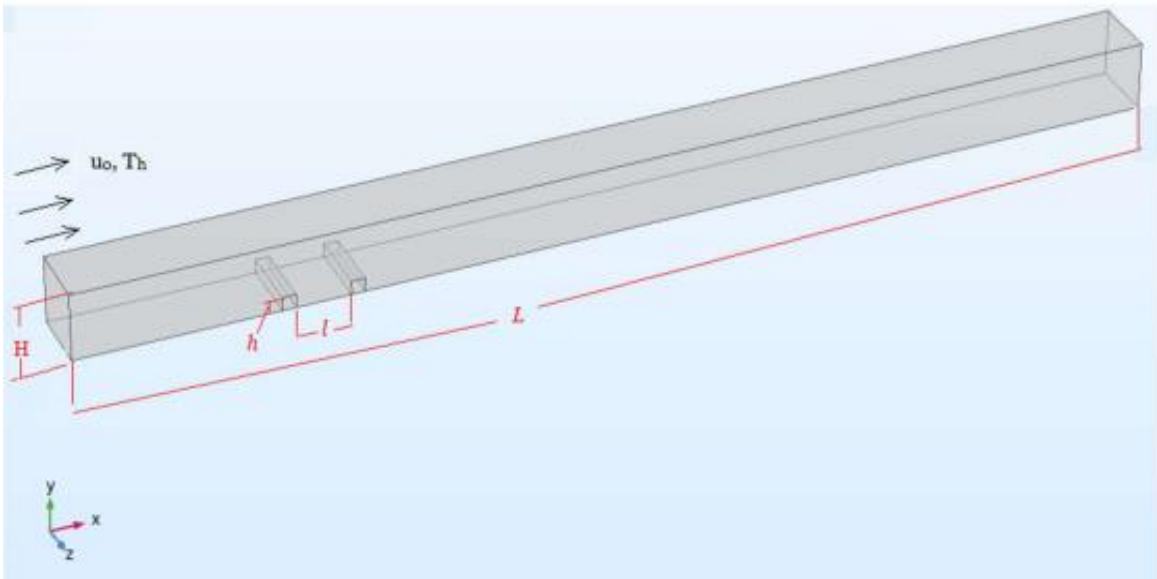
Kurutma işleminin üç boyutlu sayısal çalışması, türbülanslı akış koşullarında bir kanaldaki iki gözenekli nemli cisim için, ısı ve nem transferi olayları üzerinde farklı parametreler dikkate alınarak incelenmiştir. Isı ve kütle transferi denklemleri Galerkin ağırlıklı sonlu elemanlar yöntemi ile 3 boyutlu olarak çözülmüştür. Kurutulan cisimler, dikdörtgen şekilli ve gözenekli yapıya sahip olup, cisimler arasındaki mesafe, giriş kurutma havasının hızı ve sıcaklığının etkileri farklı değerlerle ısı ve nem transferi üzerinde incelenmiş, cisimler arasındaki mesafe arttıkça hız ve boyut kadar etkili olmasa

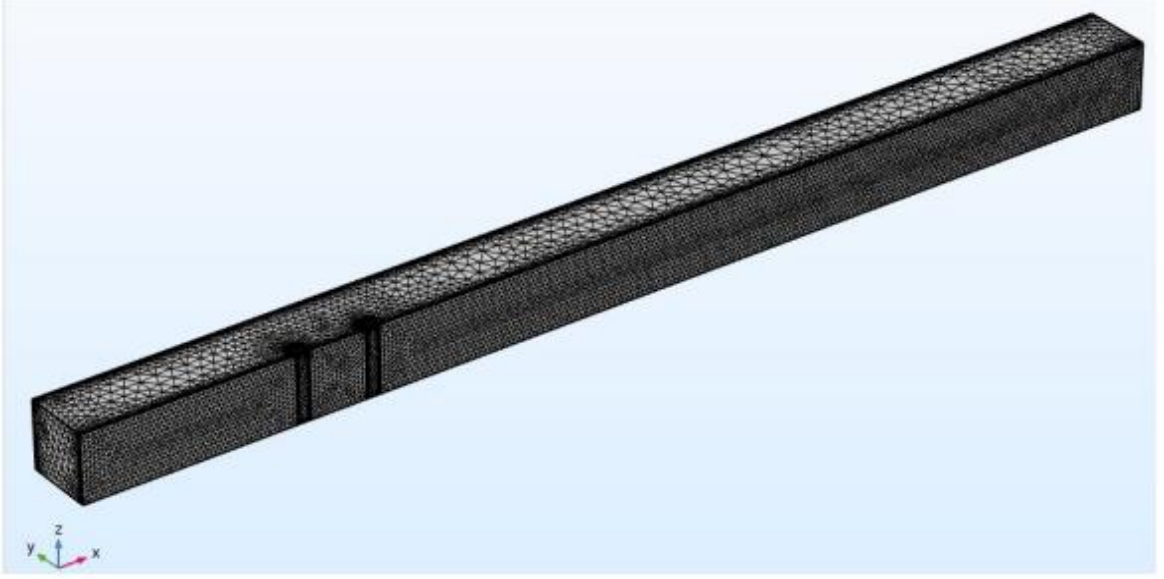
da özellikle ikinci gözenekli blok için kurutma işlemi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Gözenekli cisimlerin yüksekliği arttıkça blokaj etkisinden dolayı nem azalması olumsuz etkilenmiştir.

a. Sayısal model

Ele alınan problemin şematik gösterimi, Şekil 5.44'de sınır koşulları ile gösterilmiştir. Problem, üç boyutlu dikdörtgen kanalda bulunan iki dikdörtgen şekilli gözenekli cisimde ısı ve kütle aktarımı analizine dayanarak çözülür. Kanalin girişinde ve çıkışında tam gelişmiş akış koşulları geçerlidir. Kanalin duvarları adyabatiktir ve T_h sıcaklığına sahip akışkan türbülanslı olarak kanaldan akar.

Problem için uygun bir hesaplama süresi ile daha doğru sonuçlar elde etmek için bu taşıma sınırlarında daha ince bir ağ oluşturulmuştur. Modelin ağ örgüsü, toplam 293070 eleman ile uygun aralığa sahiptir ve Şekil 5.44 (b)' de gösterilmiştir.





Şekil 5.44 5.2.1 nolu çalışma için fiziksel model (a) ağ dağılımı (b)

b. Başlangıç ve Sınır koşulları

- Akışkan bölgesi için kanal girişinde, kurutucu hava eşit hıza ve sabit sıcaklığa sahiptir. Duvarlarda kaymaz koşullar ve kanalın giriş ve çıkışı için tam gelişmiş koşullar geçerlidir. Akış alanı için başlangıç koşulları:

$$cv(0) = 0, P(0) = Patm, T(0) = 293 K$$

- Kanal girişinde sıvı su konsantrasyonu: $c_l = c_l(0)$

- Kanal çıkışında konvektif akı: $n \cdot D_l \cdot \nabla c_l = 0$

- Gözenekli nesnenin başlangıç koşulları şu şekilde verilmiştir:

$$T(0) = 293 K, Sl(0) = 0.5$$

c. Çözüm metodolojisi

Yönetim denklemlerinin çözümü için sınır koşulları ile birlikte sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Denklemlerin zayıf formu Galerkin ağırlıklı sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilir. Lagrange polinomları, akış alanı değişken yaklaşımları için kullanılır. Tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Newton-Raphson yineleme algoritması, son doğrusal olmayan cebirsel denklem kümesini çözmek için kullanılmıştır. Çözümün yakınsaması, yakınsama kriterleri Denklem 5.20' deki gibi ayarlanarak elde edilmiştir.

Yerel ve mekansal ortalama Nusselt sayıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

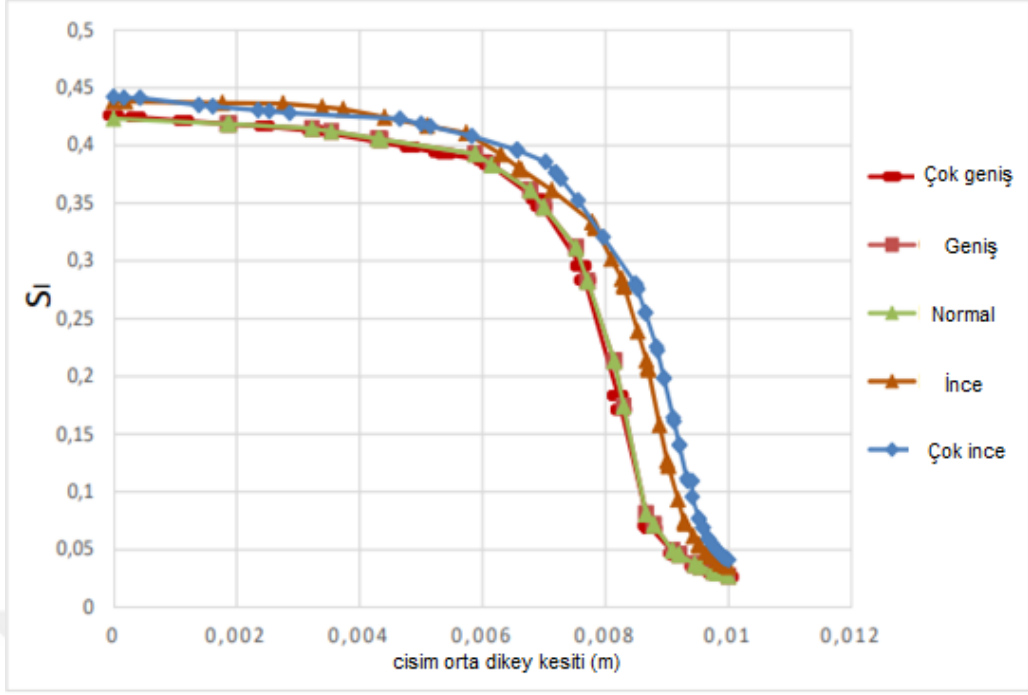
$$Nu_{x,t} = \frac{h_{x,t}}{k} H, \quad Nu_t = \frac{1}{S} \int_0^S Nu_{x,t} dS \quad (5.33)$$

Burada $h_{x,t}$ ısı transfer katsayısını ifade ederken, k , havanın ısıl iletkenliğıdir. Gözenekli blokların her yüzeyi için yerel ve uzamsal ortalama Nusselt sayısı değeriendirilebilir.

Önceki çalışmalarda nemli cisimler için ısı ve kütle transferi denklemleri kullanılmıştır; ancak, cisim sınırları için konvektif ısı ve kütle aktarımı koşulları sınır koşulları olarak alınır. Mevcut çalışmada kanaldaki akışkan akışı ile birlikte nemli gözenekli cisimlerde ve 3 boyutlu kanalda eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri çözülmüştür. Cisimlerin boyutlarını ve cisimler arasındaki boşlukları değeriştirerek gözlemlenebilen değerişken ısı transfer katsayıları ve zamana bağılı sınır koşullarının dikkate alınması daha uygundur.

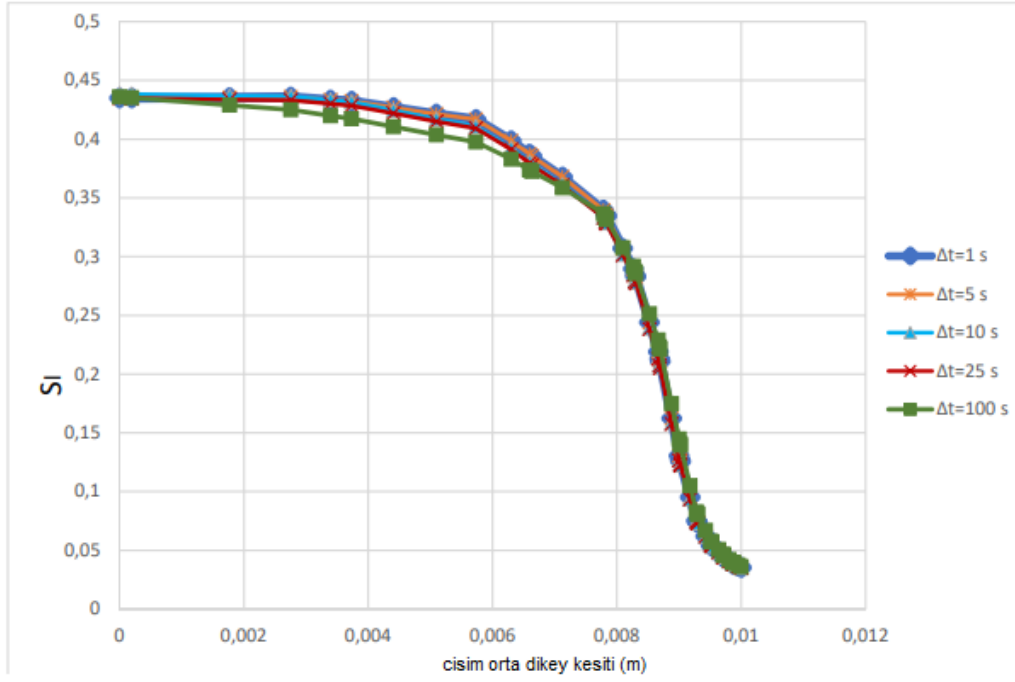
d. Ağ yapısının ve zaman adımının bağımsızlığı testleri

Bu çalışma, 3 boyutlu (3B) bir modelin doğrusal olmayan bir problemidir. Uygun bir ağ boyutu seçmek, gerekli tün parametreleri çözmek ve çalışma için iyi bir yakınsama elde etmek için önemlidir. Ağ, sınır katmanları dikkate alınarak manuel olarak oluşturulmuş ve modelin ayrıklaştırılmasını doğrulamak için beş farklı ağ boyutu oluşturulmuştur, 1. cisim için dikey orta hat S_1 değeri bu ağlarla hesaplanmıştır. Sonuçların karşılaştırması, tün ağ boyutları için Şekil 5.45' te gösterilmektedir ve 3B model için sınırlar üzerinde daha yoğun olacak şekilde tün geometri için ince bir ağ seçilmiştir. Ağ yapısı şekil 5.44 (b)' de görülebilmektedir.



Şekil 5.45 Farklı ağ boyutları için cismin 1'in y eksenine orta çizgisi boyunca S_I değerlerinin karşılaştırılması

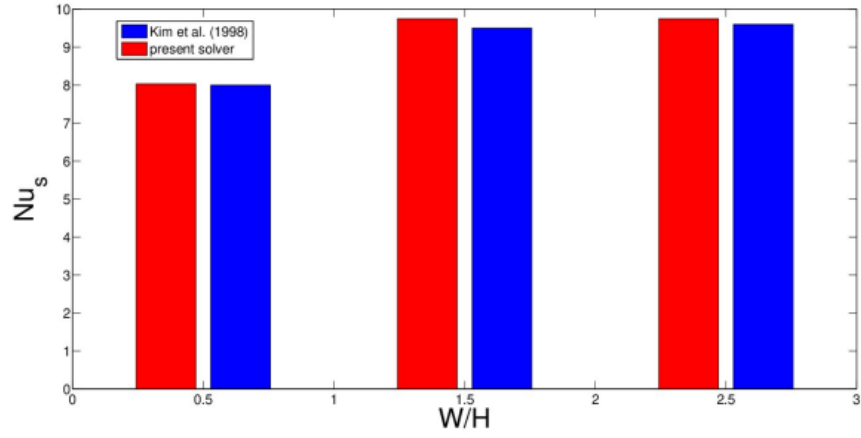
Isı ve kütle transferi denklemlerini çözmek için geçici koşullar geçerlidir ve doğru zaman adımını bulmak adına başlangıçtan itibaren ($t_0 = 0$ s), $t = 1000$ s olana kadar beş farklı zaman adımında cisim 1'in dikey orta çizgisi boyunca S_I değerleri hesaplanmıştır. Bu beş farklı zaman aralığı için sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.46' da gösterilmiş ve daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla hesaplama süresi de dikkate alınarak problem için $\Delta t = 10$ s zaman adımı seçilmiştir.



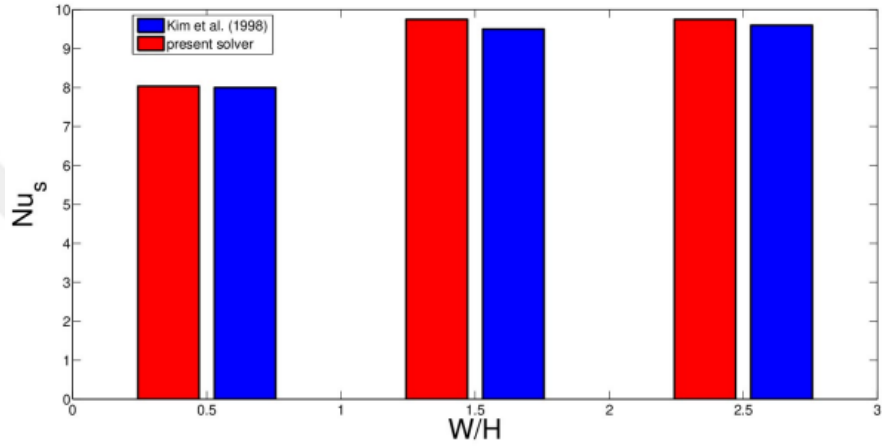
Şekil 5.46 Farklı zaman aralıkları için cisim 1'in y eksenine orta çizgisi boyunca S_1 değerlerinin karşılaştırılması

e. Sayısal kodun doğrulaması

Mevcut kod, Kim ve arkadaşlarının ısıtılmış bloklara sahip bir kanalda zorlanmış konveksiyonu incelediği sayısal çalışmanın sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır [337]. Şekil 5.47 kod doğrulama sonuçlarını gösterir. 750 Reynolds sayısında birinci blok ve ikinci blok için ortalama Nusselt sayısı karşılaştırılmıştır. Birinci ve ikinci blok için maksimum sapmaların %5'in altında olduğu görülmektedir. Başka bir doğrulama, patatesin konvektif kurutulmasının incelendiği Akpınar ve Dinçer' in çalışmasındaki [335] deneysel sonuçlar kullanılarak yapılmıştır ($V = 1 \text{ m / s}$, $AR = 2$ ve $T = 353 \text{ K}$). Boyutsuz nem oranı, dakika cinsinden çeşitli zaman örnekleri için Şekil 4.48' de gösterilmektedir.

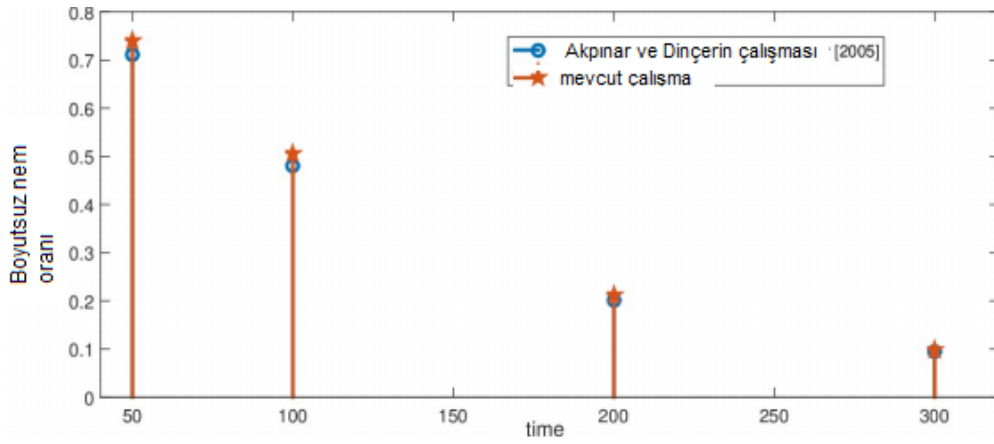


(a) İlk blok



(a) İkinci blok

Şekil 5.47 Kod doğrulama çalışması: bir kanaldaki ısıtılmış bloklar için ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırılması



Şekil 5.48 Farklı zaman örnekleri için (dakika cinsinden) konvektif akışta patateslerin kurutulması sırasında boyutsuz nem oranı karşılaştırmaları ($V = 1 \text{ m/s}$, $AR = 2$ ve $T = 353 \text{ K}$)

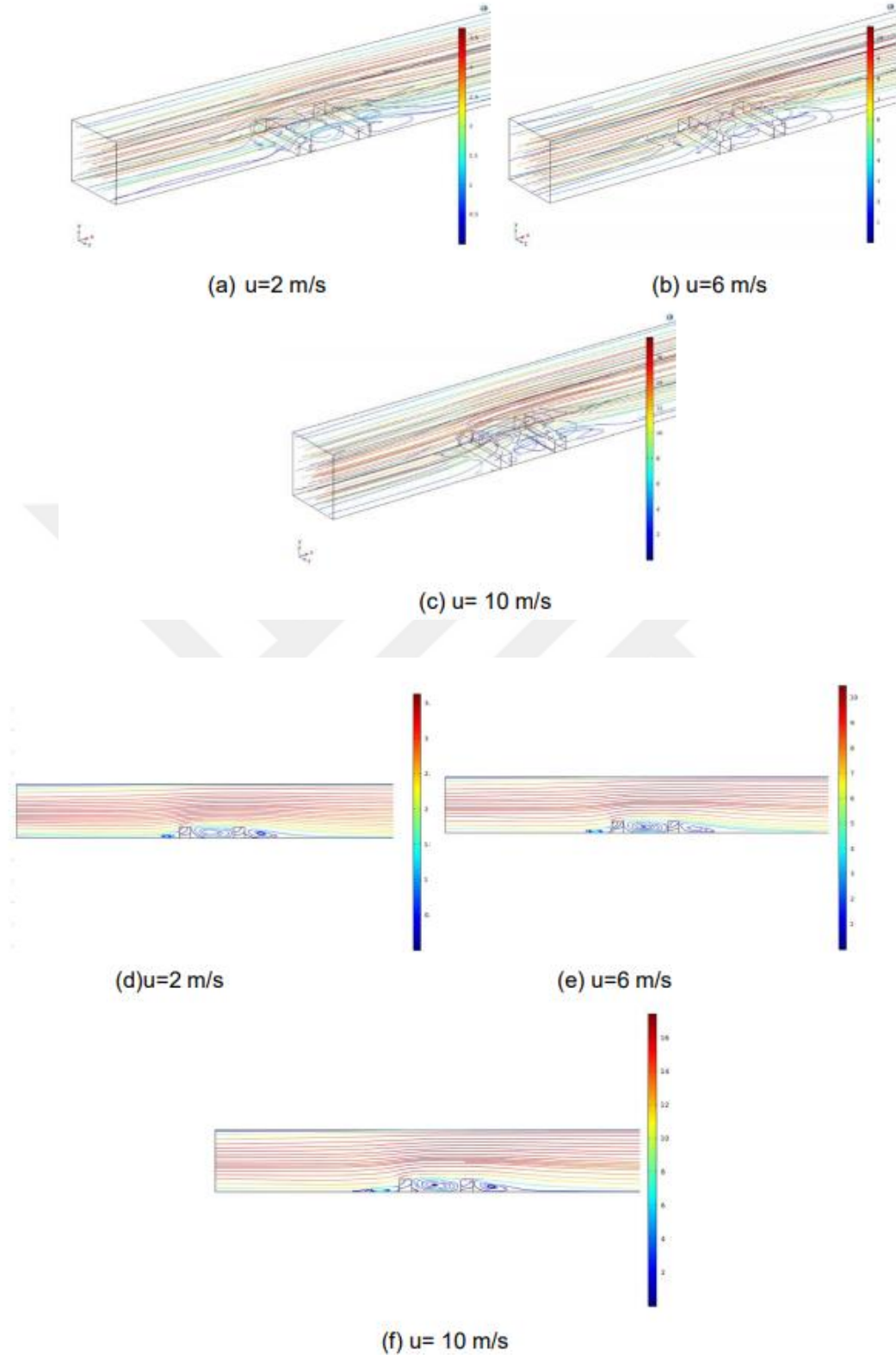
f. Sonuçlar ve tartişma

İki adet dikdörtgen gözenekli cisim türbölanslı akış koşullarında üç boyutlu konvektif kurutması çalışılmış ve değişen değerlerdeki çalışma parametrelerinin hava akışı, ısı ve kütle transferi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

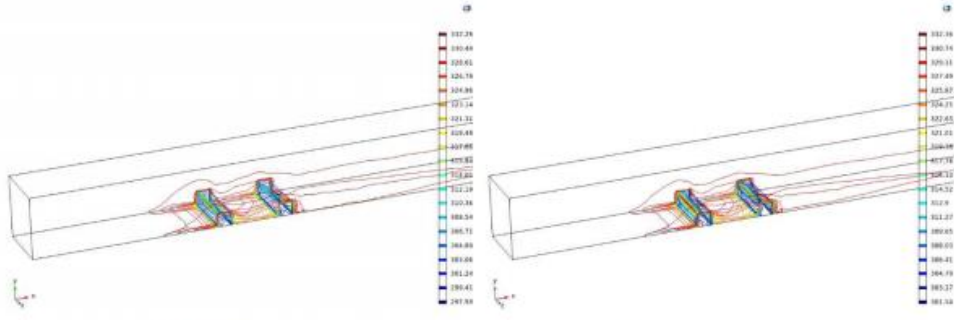
Giriş hızının etkileri

Sıcak hava kanaldan geçer ve havanın hızı beş farklı değere sahiptir. şekil 5.49' de z ekseninin ortasında 2 boyutlu bir düzlem oluşturulmuş ve kuru hava hızının etkileri, akış çizgileri, eş sıcaklık eğrileri ve buhar konsantrasyonu dağılımlarıyla 2B düzlemde ve 3B kanalda gösterilmiştir. Akış çizgilerinden görölebileceği gibi ana akışla birlikte alanlar içinde üç girdap oluşturulmuştur. Birinci bloğun önünde bir girdap görülür, bloklar arasındaki aralıkta bir diğeri oluşmuştur ve sonuncusu ikinci gözenekli cismin arkasında oluşur. Hız arttıkça, girdapların boyutu 3 boyutlu ve 2 boyutlu akış modellerinden görölebileceği gibi büyür. Farklı zaman örnekleri için eş sıcaklık eğrileri, 2 m / s hız için şekil 5.50' de gösterilmektedir. Zaman geçtikçe, gözenekli cisimler boyunca sınır tabakası azalırken gözenekli cisimler içindeki sıcaklık değişimleri de farklılık gösterir ve kurutma kinematikini etkiler.

Değişken hava hızları için iki cismin ortalama ısı transferi değerleri ortalama Nusselt sayıları karşılaştırılarak şekil 5.51' de gösterilmiştir (D1: birinci gözenekli cisim, D2: ikinci gözenekli cisim). Grafikte, duvar 1, duvar 2 ve duvar 3 girişe yakın birinci gözenekli cismin sırasıyla sol, üst ve sağ yüzeylerini gösterirken, duvarlar 4, duvar 5 ve duvar 6, 2. cisim için sırasıyla duvarın sol, üst ve sağ yüzeyleridir. Grafikte göröldüğü gibi, ısı transferinin çoğu ön duvarda meydana gelir ve ısı transferi tüm hızlarda arka duvarda fazla etkili değildir. En yüksek ısı transferi tüm hızlar için ilk blokta görülür.

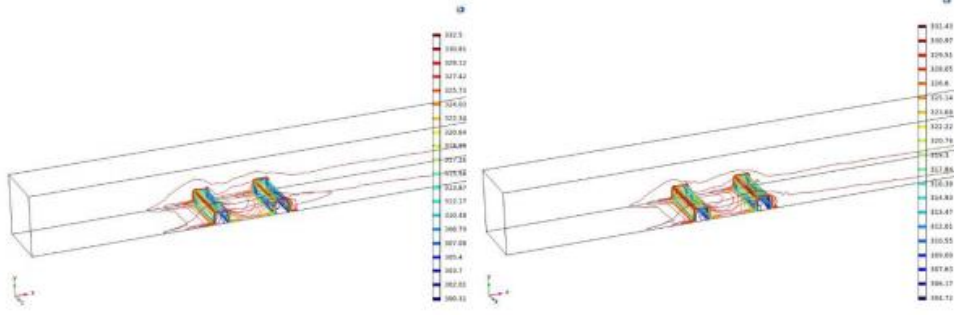


Şekil 5.49 3B ve 2B kesme düzlemi için farklı giriş hızları için hava akışının dağılımını düzene sokun ($h = 0.2H$, $l = 5h$, $T_{hava} = 60^{\circ}C$)



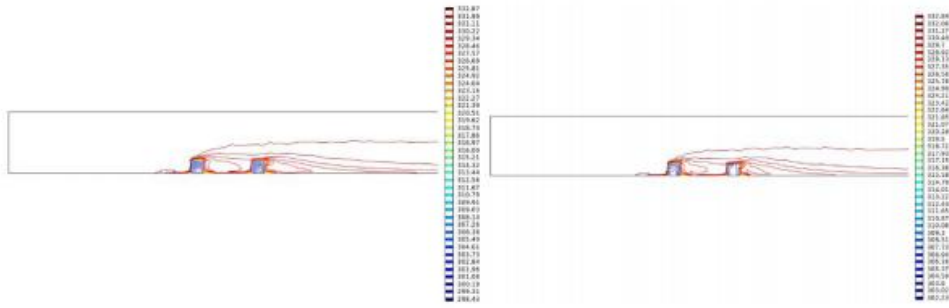
(a) $t=100$ s

(b) $t=300$ s



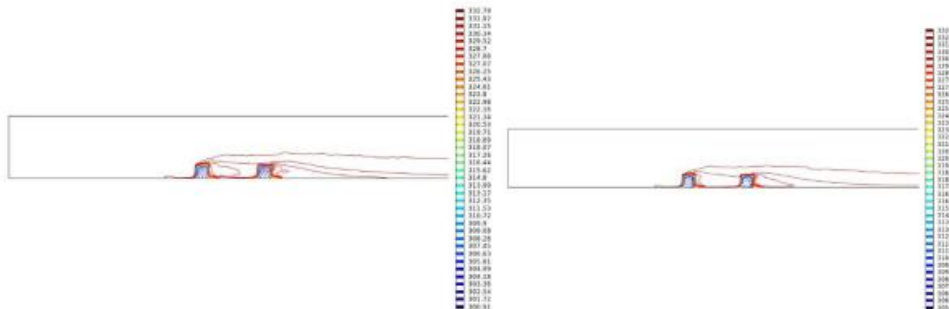
(c) $t=600$ s

(d) $t=1000$ s



(a) $t=100$ s

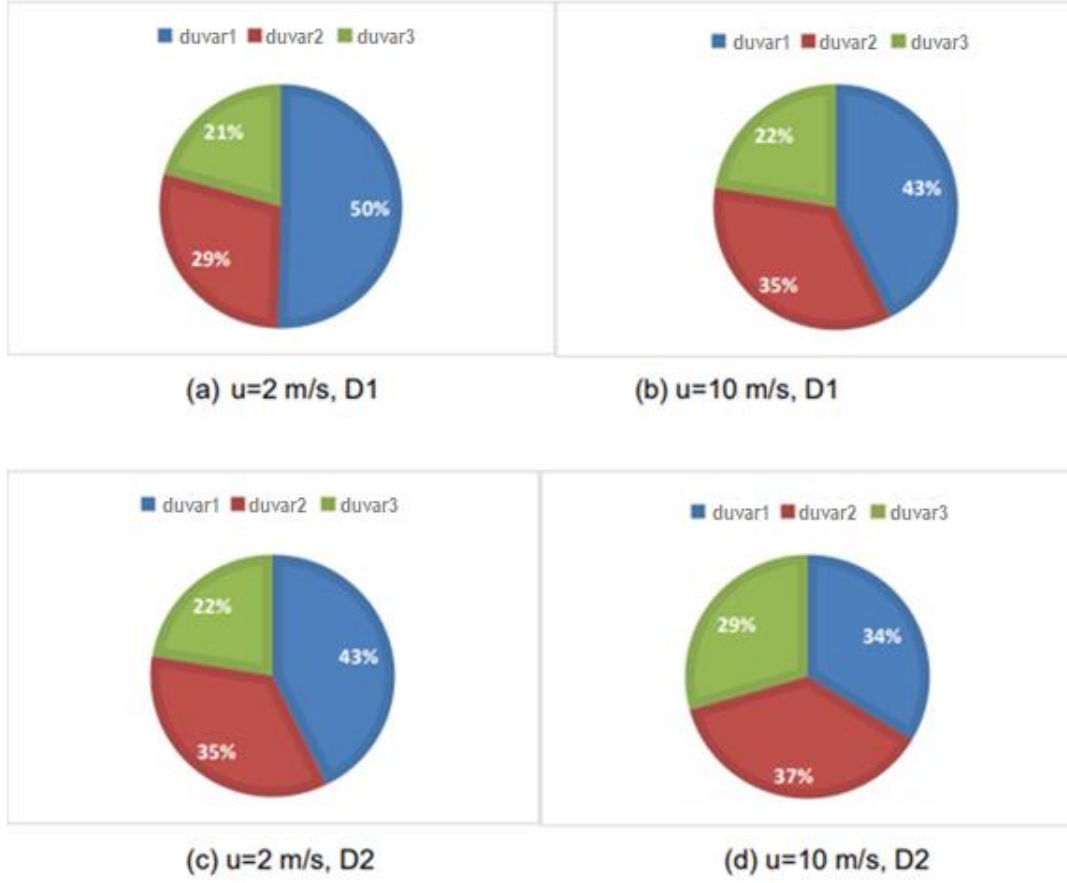
(b) $t=300$ s



(c) $t=600$ s

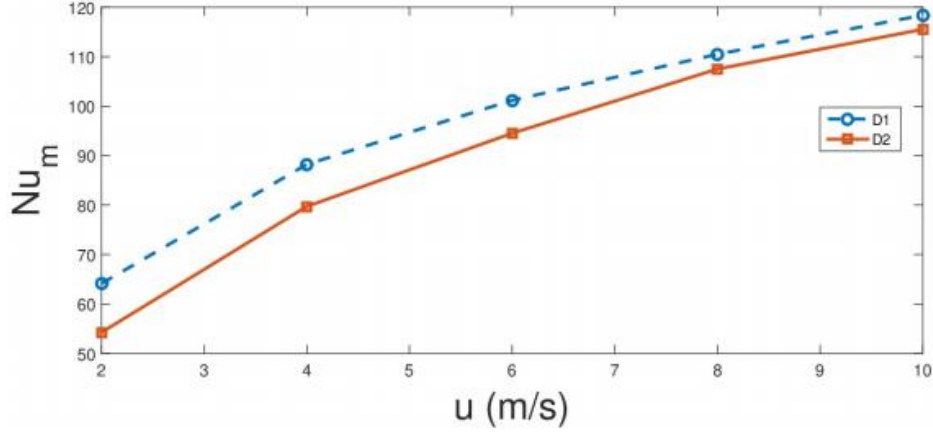
(d) $t=1000$ s

Şekil 5.50 Farklı zamanlarda $U= 10$ m/s için hava akışının 3D ve 2D kesim düzlemi eş sıcaklık eğrileri ($h = 0.2H$, $l = 5h$, $T_{hava} = 60^{\circ}C$)



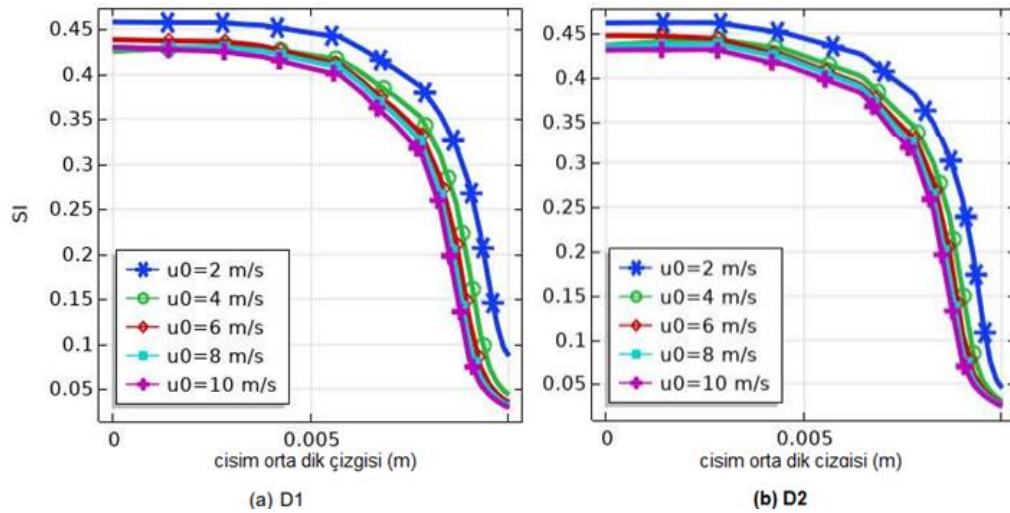
Şekil 5.51 Farklı giriş hızları için iki ürünün duvarları için ortalama ısı transferi katkısı ($h = 0.2H$, $l = 5h$, $T_{hava} = 60^{\circ}C$, $t = 250$ s)

Şekil 5.52, her iki cisim için $t=1000$ s için farklı hızlarda ortalama ısı transferi değerlerini gösterilmektedir. Hız artışının etkisi, beklendiği gibi her iki blok için de ısı transferi üzerinde etkili olmuştur. Bu etki blok 1' de daha fazla görülmüştür. Blokların ortasından z eksenini boyunca alınan düzlemden alınan orta dikey çizgi boyunca sıvı suyun doygunluğu Şekil 5.53' te değişen hızlarda $t = 1000$ s için verilmiştir. Her iki cisim için de artan hava hızlarında, sıvı su doygunluğunun benzer miktarda azaldığı görülmüştür. Bu azalma yüzeye yaklaştıkça çok daha fazlalaşmıştır. Bu sonuçlar artan hızın buharlaşma üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

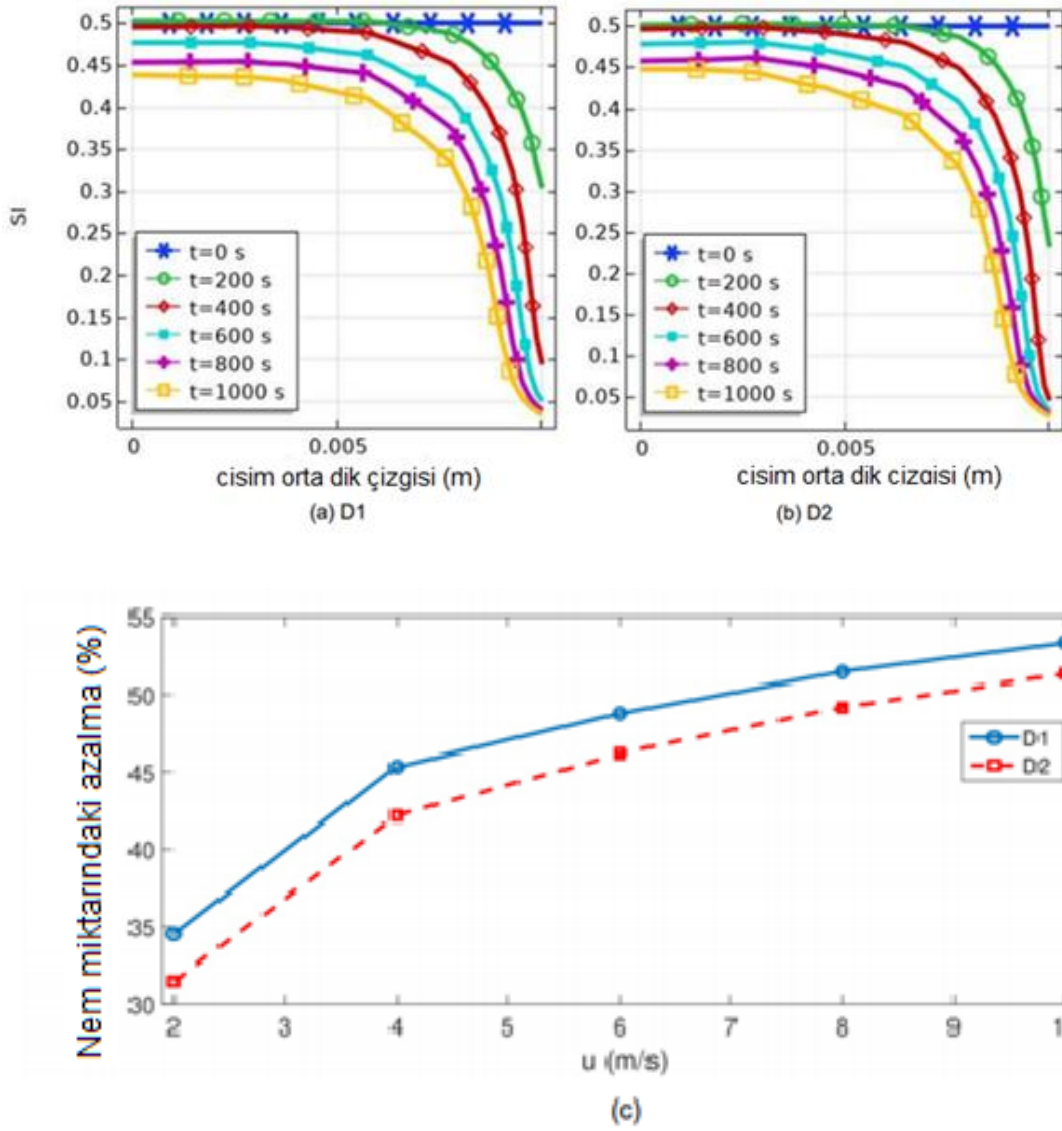


Şekil 5.52 Her cisim için ortalama ısı transfer değerlerinin ve farklı giriş hızları için iki alanın toplam ısı transferinin karşılaştırılması.

Şekil 5.54a-b, gözenekli bloklar 1 ve 2'nin (D1, D2) ortasındaki dikey eksen boyunca farklı zaman durumları için sıvı su doygunluğunun değişimini göstermektedir. Blokların üst yüzeyinin yakınında, bu bölgelerdeki yüksek konvektif etkiler nedeniyle sıvı miktarında ani bir azalma vardır. Zaman ilerledikçe, S_l her iki blok için de azalır. Şekil 5.54c, 1000 s kurutmada değişen hız değerleri için cisimlerin nem içeriğindeki azalma yüzdesinin sonuçlarını göstermektedir. Tabloda her iki cisim için de görülebileceği gibi, kurutma daha yüksek giriş hızları ile daha etkili hale gelir. Hız 2 m / s'den 10 m / s'ye yükseltildiğinde nem içeriğinde %18,3 ve %19,76 artış vardır.



Şekil 5.53 $t = 1000$ s' de ($H = 0.2H$, $l = 5h$, $T = 60$ °C) D1 ve D2' nin orta bölümünün değişen hızları için sıvı su doygunluğu)



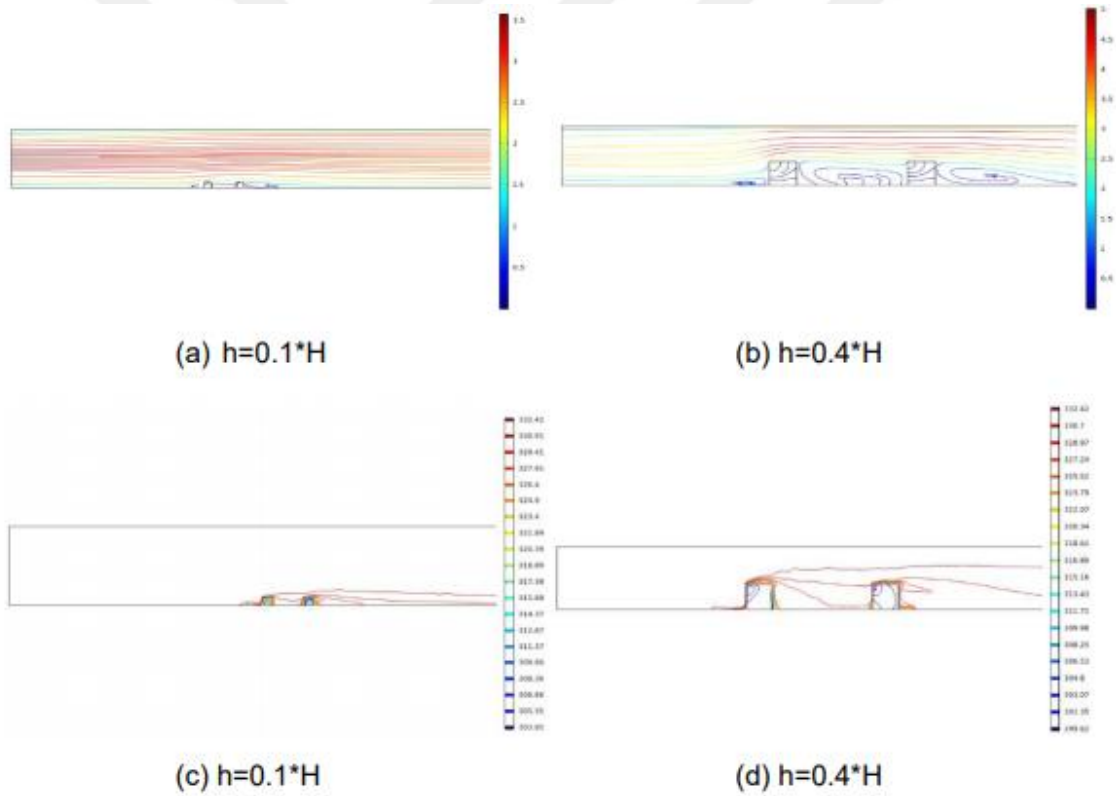
Şekil 5.54 $U=6$ m/s ($h=0.2H$, $l=5h$, $T_{hava}=60$ °C) (a-b) için farklı zamanlarda D1 ve D2'nin orta bölümü için sıvı su doygunluğu ve değişken giriş hızları için D1 ve D2 için % nem içeriğinde azalma ($t=1000$ s)

Cisim boyutunun etkileri

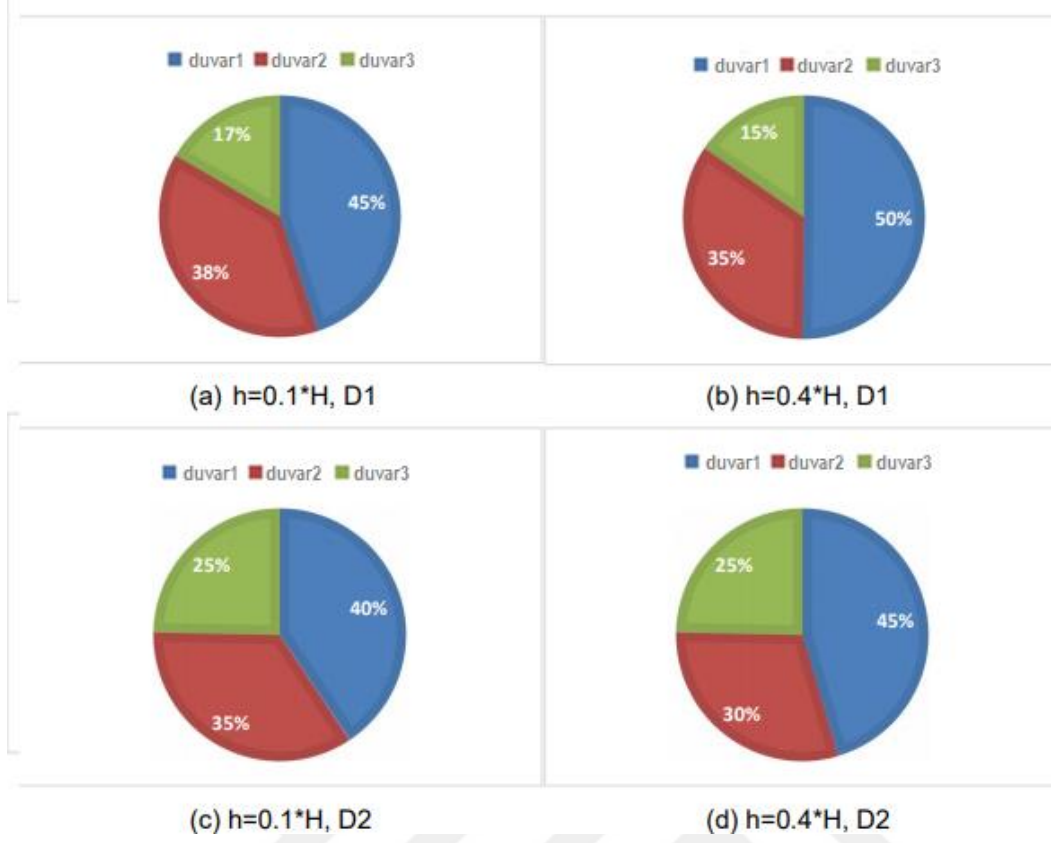
Gözenekli alanlar, dikdörtgen şekilli gıda örnekleri olarak kabul edilmiş ve blokların yüksekliği " h " olarak tanımlanmıştır. Yüksekliğin boyutu beş farklı parametrik değerle ($0.05 H$, $0.1 H$, $0.2 H$, $0.3 H$, $0.4 H$) değişmiştir ve cismi boyutunun akış çizgileri, eş sıcaklık eğrileri ve ortalama Nusselt sayı değerleri üzerindeki etkileri Şekil 5.55-5.57' de gösterilmiştir. Blok duvarların akım hatları üzerindeki baskılayıcı etkisi nedeniyle blokların artan boyutları, etraflarındaki girdapları büyütür (Şekil 5.55a, b).

Küçük boyutlar için özellikle gözenekli blokların üst kısımlarında eş sıcaklık eğrileri yoğunlaşır. Gözenekli cismin içinde de bir sıcaklık gradyanı oluşmuştur ve çeşitli boyutlar için farklıdır, küçük cisimlerde ($h = 0,1H$) bu gradyanlar iç kısımlara doğru girmiştir. (Şekil 5.14 c, d).

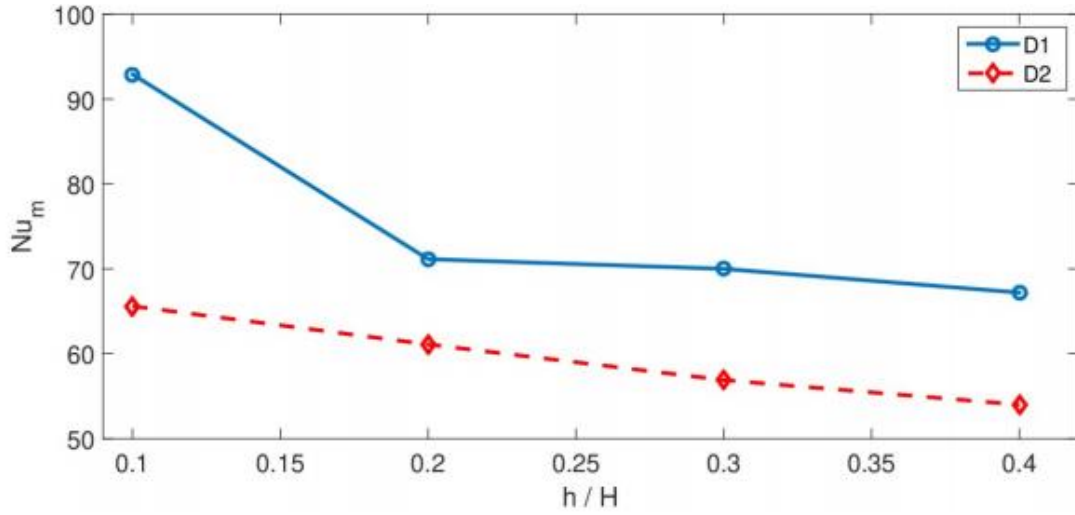
Her duvarın ısı transferine katkısı farklı blok boyutları için Şekil 5.56' da gösterilmiştir. D1'in ön duvarı, özellikle daha büyük blok boyutunda en fazla termal taşınmaya sahiptir (Şekil 5.56 b). D2 için de benzer sonuçlar görülmektedir. Farklı duvar yüzeylerinin toplam ısı transferine katkısı, gözenekli blokların büyük boyutları için önemli ölçüde farklılık gösterir. (Şekil 5. 57 b, d). Gözenekli blok boyutu arttıkça, blokaj etkisine atfedilebilecek ısı transferi azalır (Şekil 5.57). Tüm yüzeyler dikkate alındığında ısı transferi azaltma miktarı, D1 için %36,1 ve D2 için %20,4' tür.



Şekil 5.55 Farklı blok boyutları için akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri ($u = 2 \text{ m/s}$, $l = 5h$, hava sıcaklığı = 60°C)



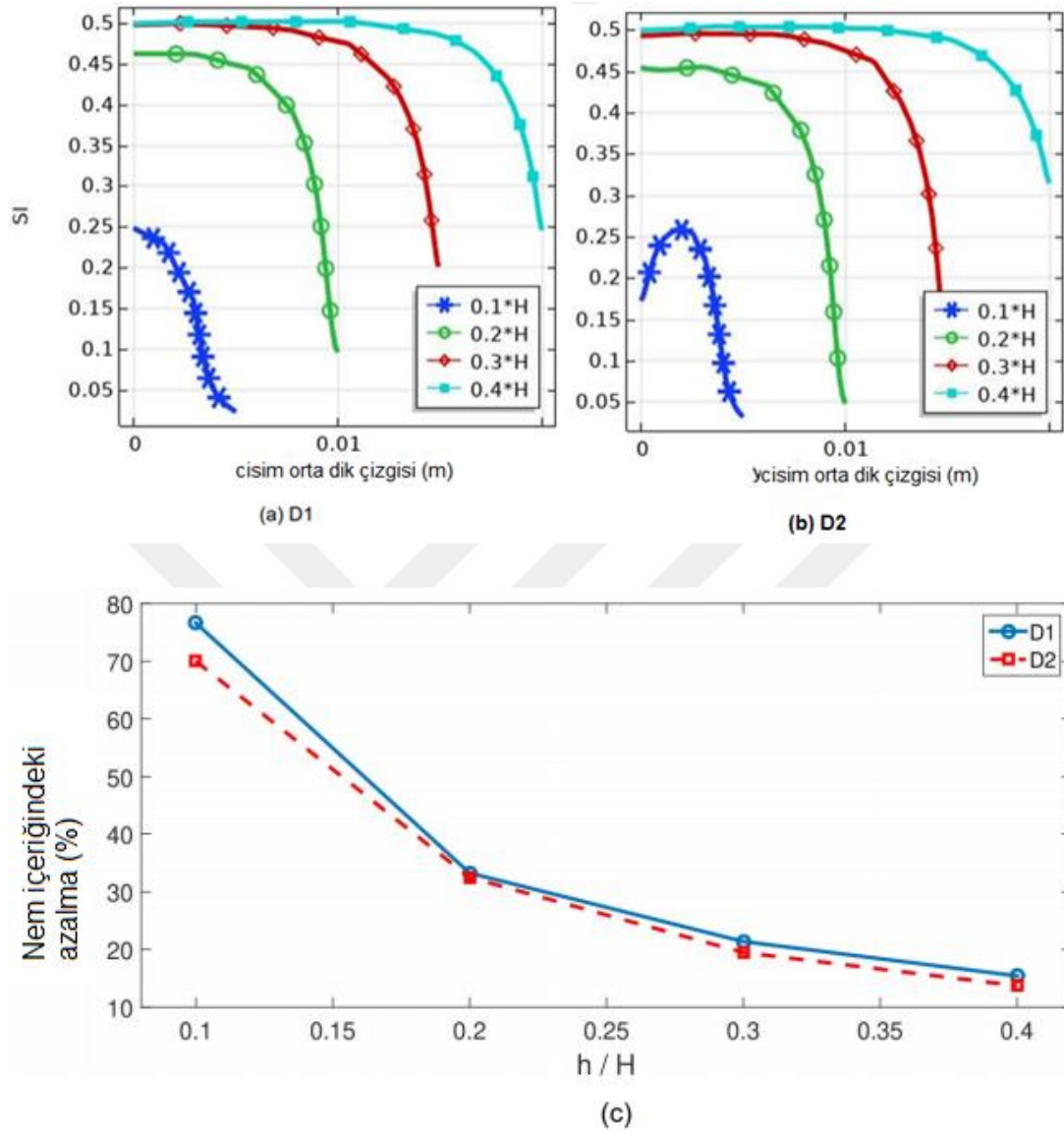
Şekil 5.56 Farklı blok boyutları için D1 ve D2 duvarlarının ortalama ısı transferi katkıları ($u = 2 \text{ m/s}$, $l = 5 \cdot h$, $t_{\text{hava}} = 60^\circ\text{C}$, $t = 250 \text{ s}$)



Şekil 5.57 $T=1000 \text{ S}$ 'de farklı blok boyutları için iki cüsmün ortalama ısı transferi.

Farklı boyutlar için iki bloğun ortasını kesen y eksenini çizgisi boyunca sıvı su doygunluk dağılımları Şekil 5.58' de gösterilmektedir. Her iki blok için de artan boyut, beklendiği gibi cisimden suyun toplu taşınmasını yavaşlatır. Bu etki Şekil 5.58c 'de nem oranının yüzde

olarak azalmasında da görülmektedir, en küçük boyut için nem içeriği hem D1 hem D2 için yaklaşık %97,4 azalır.



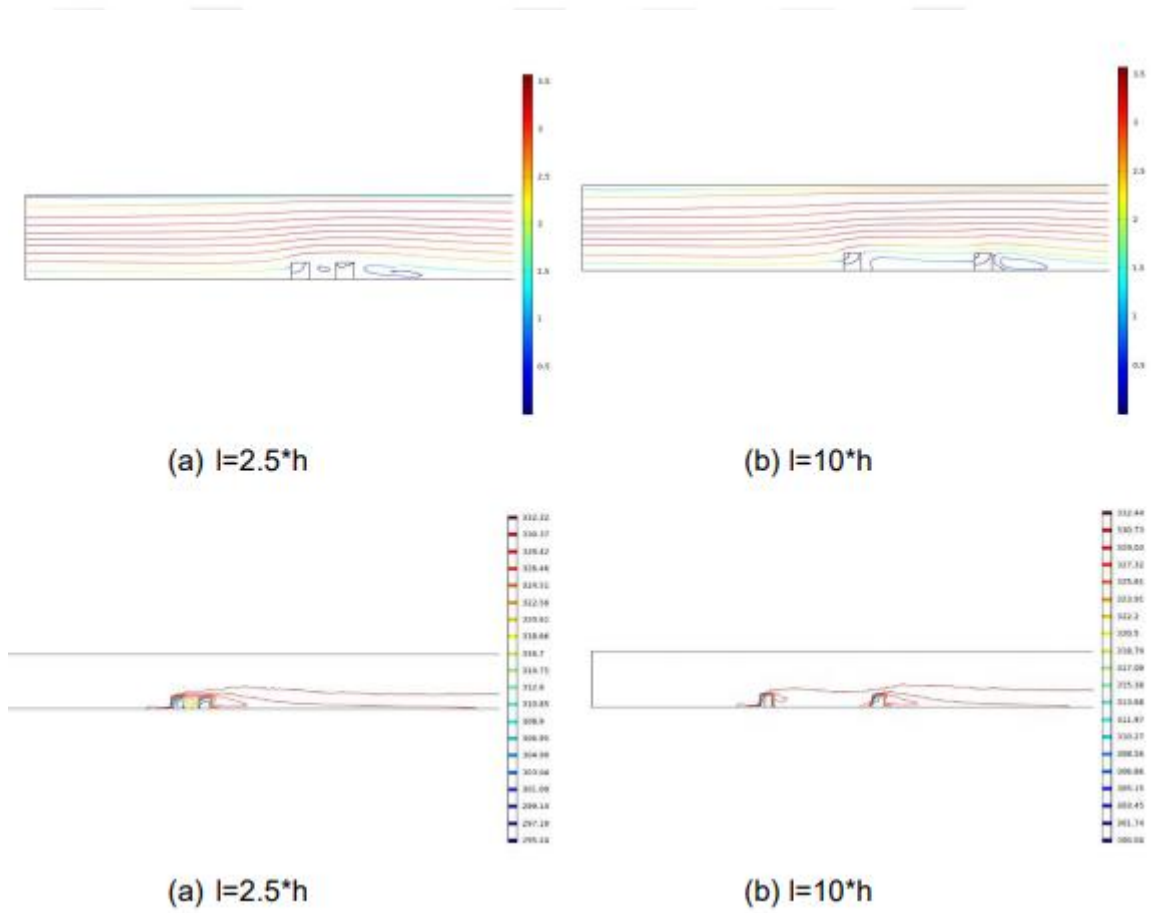
Şekil 5.58 İki cisim için orta bölümdeki farklı blok boyutları için sıvı su doygunluğu $t=1000$ s ($h=0.2*H$, $l=5*h$, $t_{hava}=60$ °C) (A-b) ve D1 ve D2 için nem içeriğinde azalma (%) blokların değişen yüksekliği için ($t=1000$ s) (c)

Gözenekli cisimler arasındaki mesafenin etkileri

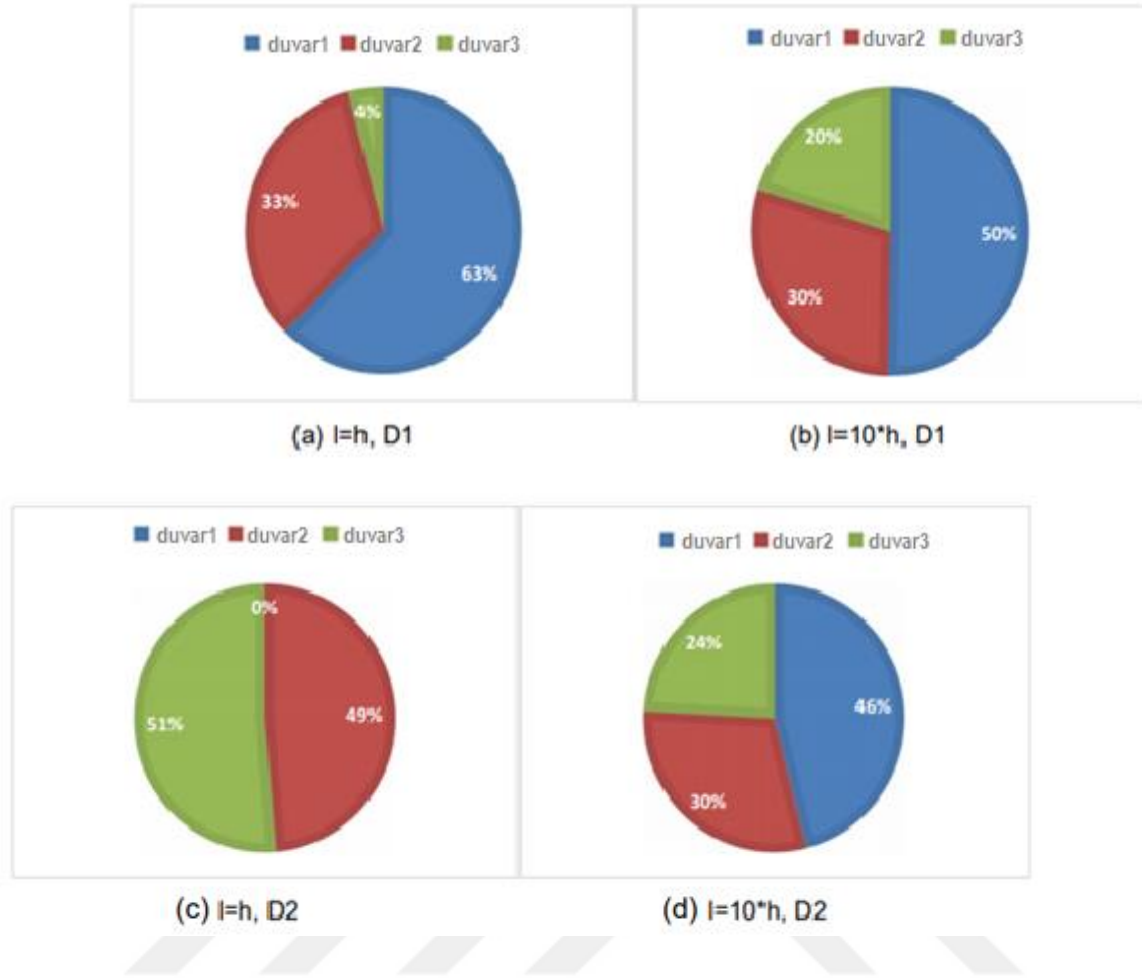
Gözenekli bloklar arasındaki aralıkların akış ve termal modeller üzerindeki etkileri, iki mesafe değeri için $h=0,2H$, $u=0,2m/s$, $T=60^{\circ}C$ şartları için Şekil 4.59'da gösterilmektedir. Mesafe arttıkça blokların etrafındaki girdaplar özellikle bloklar arasında

büyümektedir. Aralığın etkisi, özellikle birinci bloğun arka kısmı ve ikinci bloğun ön kısmı için sıcaklık değişimi üzerinde önemlidir. Sınır tabakanın mesafenin az olduğu durumda cisim yüzeylerinde daha kalın olduğu görülmektedir.

Blok duvarlarının ortalama ısı transferine katkıları farklı bloklar arası mesafe değerleri için $u = 2 \text{ m/s}$, $h = 0.2 H$, $T = 60^\circ\text{C}$ şartlarında Şekil 5.60' da gösterilmektedir. İlk bloğun arka yüzeyi için katkı, minimum ve maksimum aralık mesafeleri dikkate alındığında %4' ten %20' ye büyük ölçüde artmıştır. Benzer şekilde, ikinci gözenekli bloğun ön yüzeyi, daha yüksek bir mesafede genel ısı transferine önemli ölçüde katkıda bulunur. Şekil 5.60 (d)' de görüldüğü gibi boklar arası mesafe $l = h$ iken D2' nin ön duvarından ısı transferi neredeyse hiç olmamıştır.

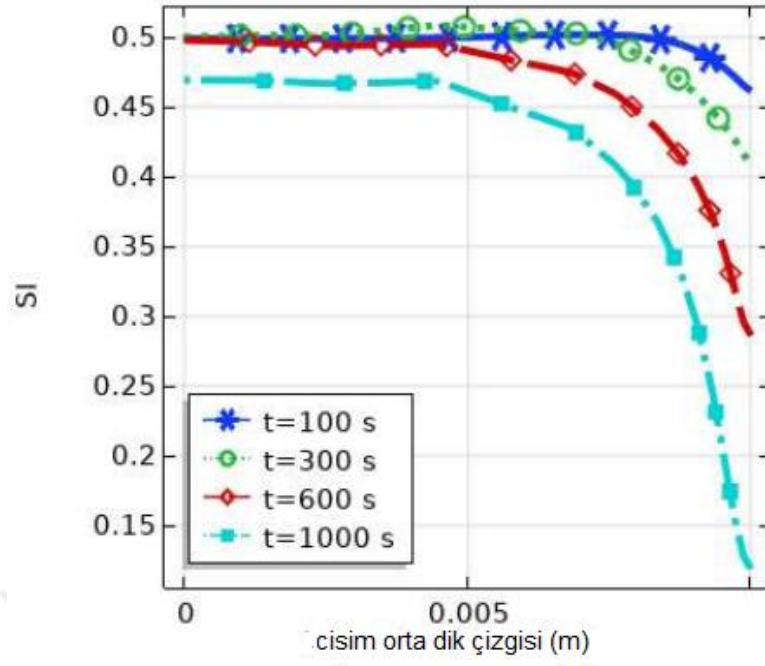


Şekil 5.59 Farklı blok mesafeleri için akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri ($h = 0.2H$, $u=2 \text{ m/s}$, $T_{\text{hava}} = 60^\circ\text{C}$)

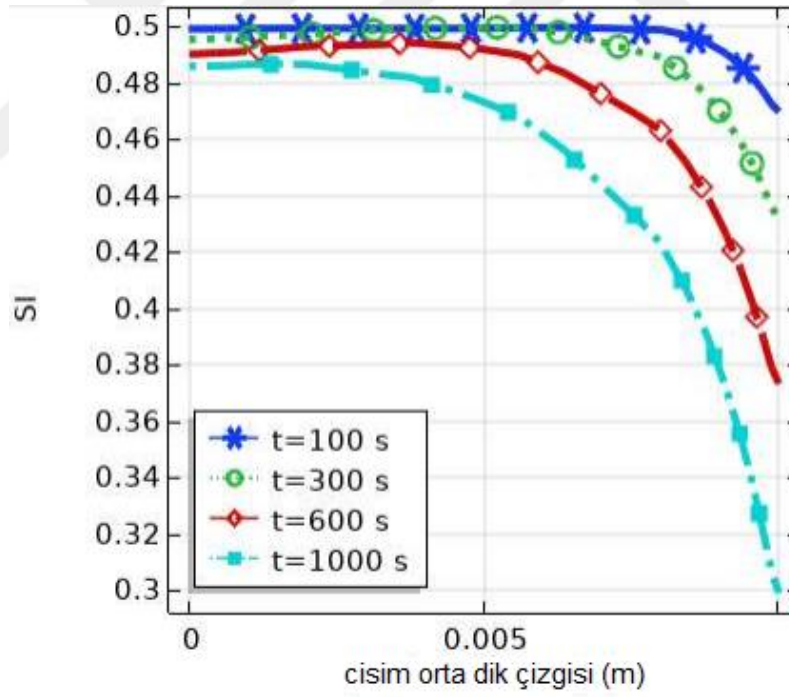


Şekil 5.60 Farklı blok mesafeleri için D1 ve D2 duvarları için ortalama ısı transfer oranları ($u = 2 \text{ m/s}$, $h = 0.2 \text{ H}$, $T_{\text{hava}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$)

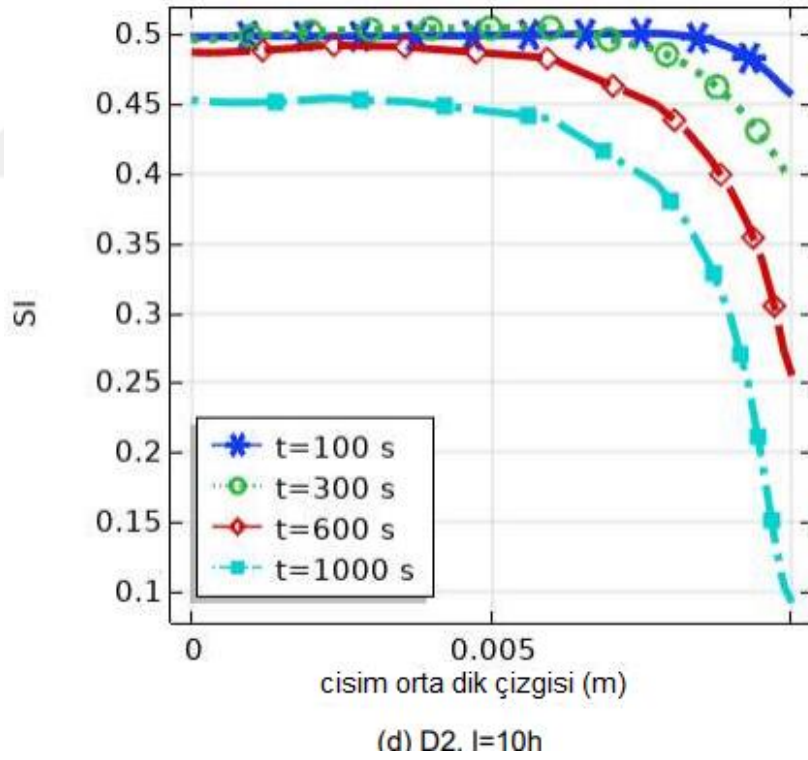
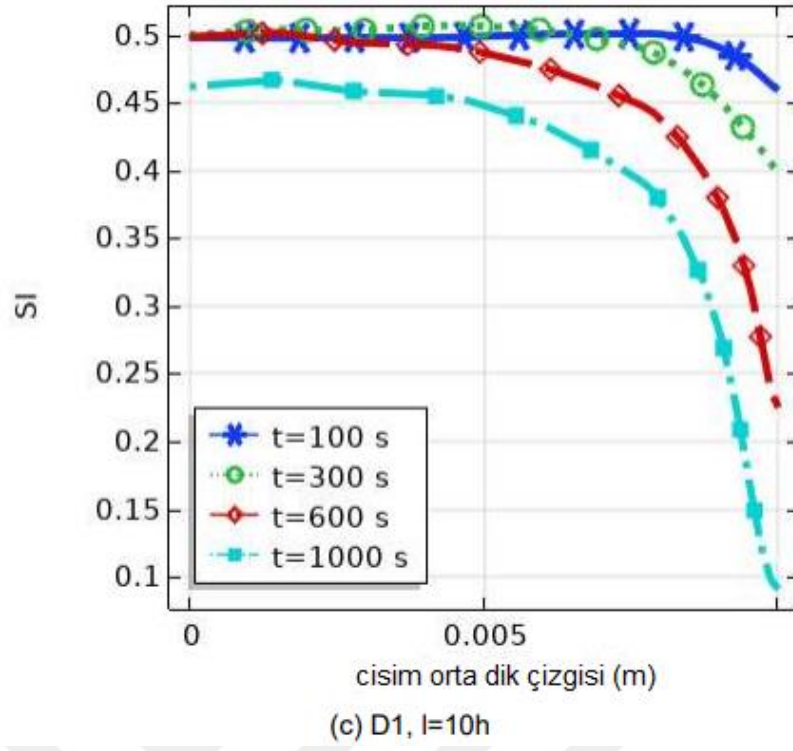
Şekil 5.61 D1 ve D2'nin orta düzleminin dikey çizgisi için farklı zaman ve iki aralıklı mesafe için sıvı su doygunluğunun değişimini gösterir. Zaman ilerledikçe ve aralık mesafesi arttıkça S_l azalır. Gözenekli blokların üst yüzeyine doğru S_l , mesafenin çok olduğu durumda (Şekil 5.61c-d) önemli ölçüde azalır. Bu, bloklar arasındaki mesafe arttığında, özellikle birinci bloğun arka kısmı ve ikinci bloğun ön kısmı için artan konveksiyon etkilerine atfedilir



(a) D1, $l=h$



(b) D2, $l=h$



Şekil 5.61 Farklı kuruma süreleri için iki blokta XY eksen kesme düzleminin orta bölümü boyunca su doygunluğu ($u = 2 \text{ m/s}$, $h = 0.2 H$, $T_{\text{hava}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

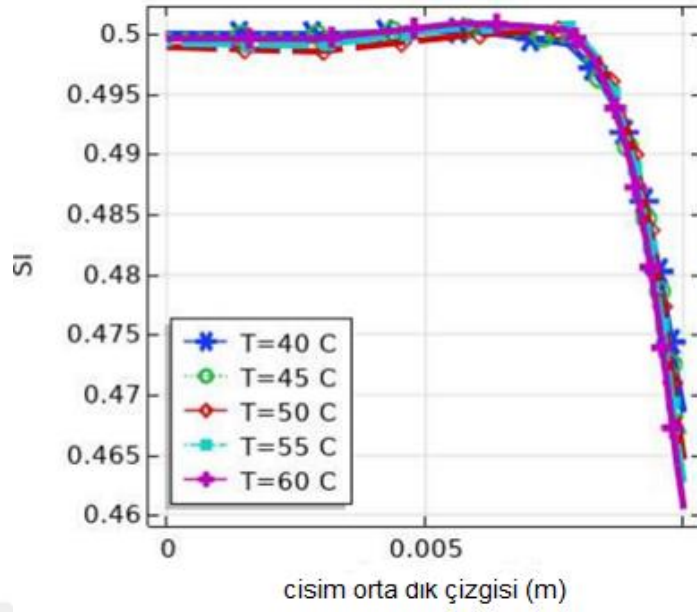
Tablo 5.10, hız veya boyut kadar etkili olmasa da bloklar arasındaki ara boşluğun arttırılmasının kurutma işleminde bir etkiye sahip olduğunu doğrulamaktadır. İki blok için de $t = 1000s, u = 2 m/s, h = 0.2 H, T_{hava} = 60 ^\circ C$ şartlarında, mesafenin nem düşüşüne etkisi tüm mesafe değerleri için tabloda görülmektedir. İkinci gözenekli cisim için mesafenin en dar ve en geniş olduğu durumlar arasındaki nem düşüşü arasındaki fark %12,96 iken, birinci cisim için bu sadece %7,97 olduğundan, ikinci cisim için kurutma işlemi üzerinde boşluk etkisi daha önemlidir denilebilir.

Kurutma havası sıcaklığının etkileri

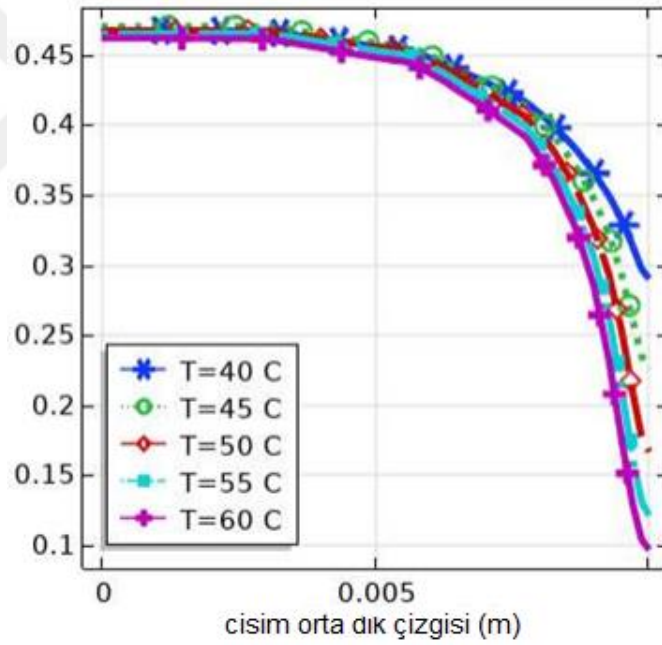
Kanaldan akan kuru hava ve havanın sıcaklığı beş farklı değerde ($40 ^\circ C, 45 ^\circ C, 50 ^\circ C, 55 ^\circ C, 60 ^\circ C$) değişmektedir. Gözenekli cisimlerin orta düzleminden alınan dikey eksen boyunca sıcaklığın S_l 'nin değişimi üzerindeki etkileri D1 için farklı zamanda Şekil 5.62' de ($u = 2 m/s, h = 0.2H, l = 5 h$) şartları için gösterilmiştir. Daha yüksek bir sıcaklık, daha düşük S_l ile sonuçlanmıştır ve bu etki blokların üst yüzeyinin yakınında çok daha belirgindir.

Tablo 5.10 Gözenekli cisimler arasındaki aralığı değiştirmek için D1 ve D2 için nem içeriğinde azalma (%) ($t = 1000s, u = 2 m/s, h = 0.2 H, T_{hava}=60 ^\circ C$)

<i>l</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>
<i>h</i>	25.77	18.06
2.5*h	32.66	29.45
5*h	33.17	32.43
7.5*h	35.19	31.63
10*h	33.74	31.02



(a) D1, $t=100$ s

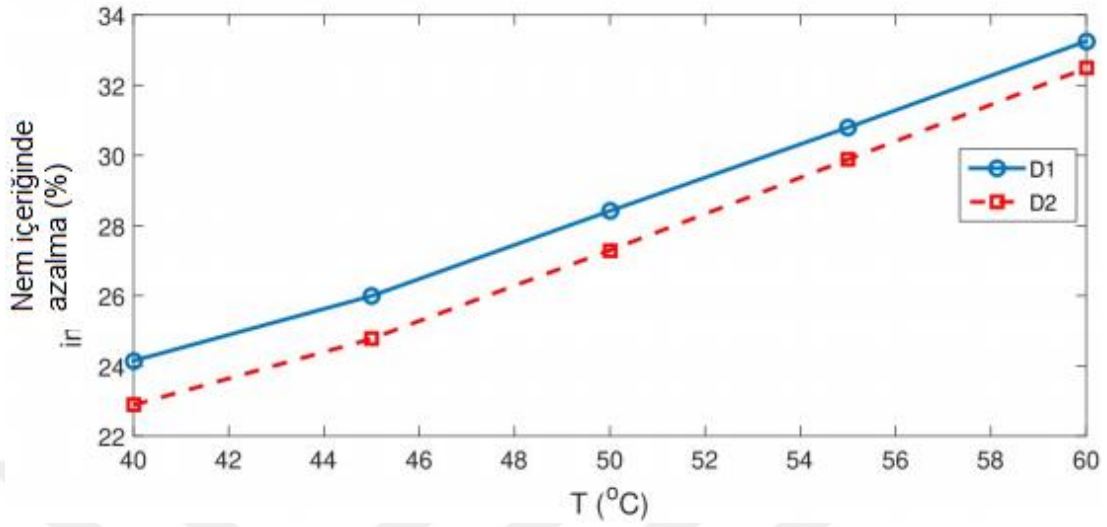


(b) D1, $t=1000$ s

Şekil 5.62 3D Farklı zamanlar ve hava sıcaklıkları için birinci cisimde XY eksen kesme düzleminin orta bölümü boyunca su doygunluğu. ($u = 2$ m/s, $h = 0.2H$, $l = 5$ h).

Farklı hava giriş sıcaklıklarında D1 ve D2' deki nem düşüşü Şekil 5.63' te ($t = 1000$ s, $u = 2$ m/s, $h = 0.2H$, $l = 5$ h) şartları için görülmektedir. Artan sıcak hava sıcaklığı, görüldüğü gibi cisimlerin nem içeriğini azaltmada dikkate değer bir etkiye

sahiptir. Her iki gözenekli cisim için sıcak havanın sıcaklığı 40°C'den 60°C' ye çıktığında azalma miktarında yaklaşık %9-10'luk bir artış olmaktadır.



Şekil 5.63 Değişken giriş sıcaklıkları için alan 1 ve alan 2 için nem içeriğinde azalma (%) ($t = 1000s$, $u = 2 \text{ m/s}$, $h = 0.2H$, $l = 5 \text{ h}$)

Bu çalışmada, dikdörtgen gözenekli cisimlerin çeşitli çalışma ve geometrik parametrelerle konvektif kurutulması, 3B türbülanslı akış koşullarında incelenmiştir. Kuru havanın farklı sıcaklık ve hızlarının, cisimlerin boyutlarının ve cisimler arasındaki mesafelerin ısı ve kütle aktarımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, konvektif kurutma uygulamaları için kodun doğruluğunu sağlamak için iki farklı deneysel doğrulama çalışması kullanılmıştır. Sonuçlar, kuru havanın giriş hızının kurutma işlemi için çok önemli bir faktör olduğunu ve hızın artmasının ısı transferini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Ayrıca hız arttıkça cisimlerin yüzey duvarları arasındaki ısı transfer değerlerinin farkı azalmaktadır. Cisim boyutlarının artırılması hem ısı hem de nem taşınması için kurutma üzerinde tıkanma etkisi yaratmış ve transfer oranını azaltmıştır. Bloklar arası boşluk arttığı için ikinci bloğun yüzeylerinde kurutucu hava daha fazla etkiye sahiptir ve bu bölgede ısı ve nem taşınması artar. Kuru havanın giriş sıcaklığının da ısı ve nem taşınması üzerinde belli bir etkisi vardır. Gözenekli cisimlerde sıvı doygunluğunun azaltılmasında önemli bir faktör olan kuruma süresi, ilgili parametrelerin değişiminden etkilenir. Yüzeyden iç kısımlara gözenekli cisimlerin sıvı doygunluğunda gözle görülür değişiklikler vardır. Ayrıca, öndeki cisim daha fazla etkilendiğinden, cisimlerin kanaldaki konumu kurutma performansına katkıda bulunan bir faktördür. Her bir gözenekli cismin

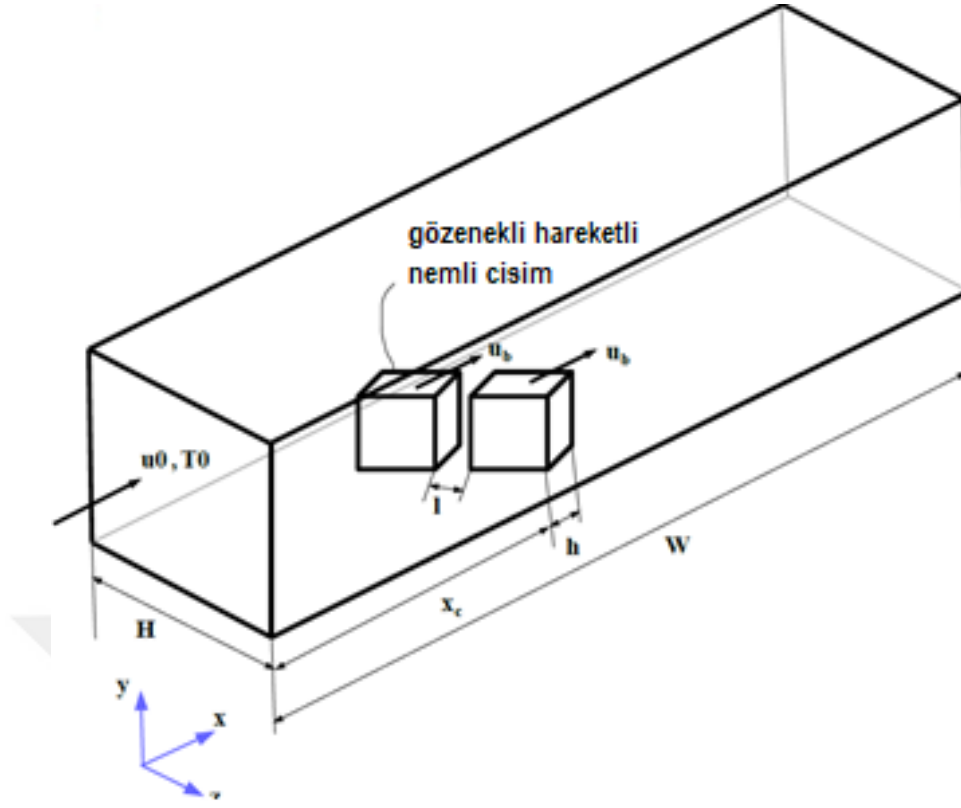
toplam ısı transfer hızına farklı katkı sağladığı, kurutma özelliklerinin ise çeşitli etki parametreleri için farklı olduğu görülmüştür.

5.2.2 Üç Boyutlu kanalda hareketli blokların konvektif kurutulması

Bu örnekte, sıcak kuru hava konveksiyonlu bir kanalda hareket eden iki nemli nesnenin ısı ve nem transferi sayısal olarak incelenmektedir. Akış alanı ve gözenekli nesneler için geçerli denklemler, 3B zamana bağlı problem için sonlu eleman ayrıklaştırma yöntemi ile çözülerek, cisme hava hareketine paralel yönde hareket verilmiştir. Kurutma havası hızı ve sıcaklığının etkisi, sıcaklık, cisimdeki nem miktarı ve ısı transfer dağılımları aracılığıyla simüle edilmektedir. Sonuçlar, kurutma davranışı üzerinde değişen parametrelerin önemini göstermiştir. Hava hızının artışının buharlaşmayı artırıcı bir etkiye sahip olduğu ve nem içeriğindeki en fazla azalmanın 0,8 m / s hava hızında %63,12 buharlaşma ile elde edildiği görülmüştür. Ayrıca sabit ve hareketli cisimler için ısı transfer değerleri arasında çok önemli olmayan farklar olduğu görülmüştür; statik yatak ve hareketli yatak için ortalama ısı transferleri arasında %6-13 değerlerinde farklılıklar görülmüştür.

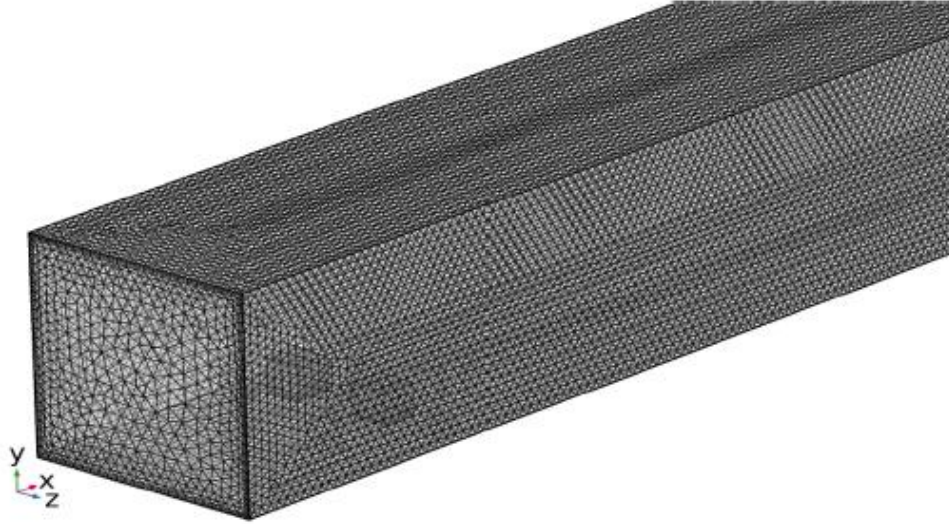
a. Sayısal model

Sıcak kuru hava akışlı kanalda özdeş iki kübik nemli nesnenin konvektif kurutulması, sıvı akışı, ısı transferi ve nemin nesnelerden kanal havasına taşınmasını içeren üç boyutlu fiziksel model olarak ele alınmıştır. Şekil 5.64, fiziksel modeli şematik olarak göstermektedir (ölçeklendirilmemiştir). Kare kesitli kanal yüksekliği ve genişliği $H = 0,08$ iken uzunluğu $W = 20H$ ' dir. Hareket eden özdeş nesneler, $h = 0.15H$ boyutunda kübik şekle sahiptir. Bu nesneler arasındaki mesafe $l = 0.4H$ iken, kanalın girişine olan mesafe $x_c = 0.1W$ ' dir. Nesneler, kurutucu havayla aynı yönde kanalın başlangıcından itibaren $u_b = 10^{-4} m / s$ yatay hıza sahiptir. Blokların boyutları dilimlenmiş gıda numunelerine benzer olarak oluşturulur ve kanal uzunluğu ve yüksekliği, kanal akışı için tam gelişmiş koşullar geçerli olacak şekilde seçilir. Kurutma havasının hızı için $u_a = 0,2, 0,4, 0,6$ ve $0,8, 1 m / s$ olmak üzere beş değer verilmiş, sıcaklık için $T = 30, 40, 50, 55$ ve $60 ^\circ C$ olacak şekilde beş farklı değer dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin nesnelerin kurutma performansına etkisi araştırılmıştır.

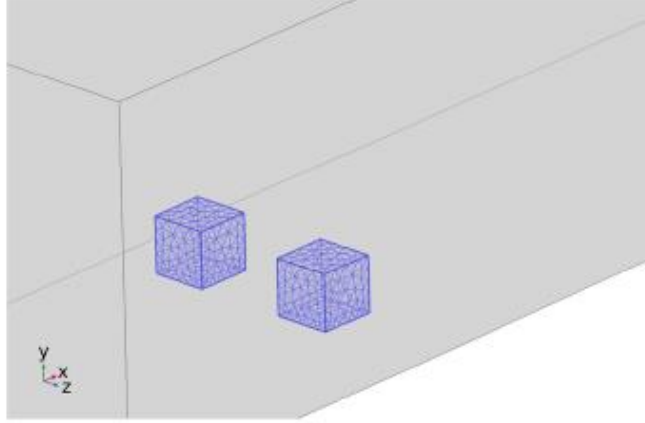


Şekil 5.64 5.2.2 nolu çalışmanın fiziksel gösterimi

Çalışmada kullanılan yönetsel denklemler, dış akış alanında üç boyutlu laminar akış koşulları için geçerli olan denklemlerdir ve gözenekli alan denklemleri, başlangıç ve sınır şartları bir önceki çalışmayla aynıdır. Hava, suyun fazları ve gözenekli cisme ait termofiziksel özellikler Tablo 5.1’ deki gibidir. Bu çalışmayla ilgili bir önceki çalışmaya benzer bir kod doğrulama ve ağ bağımsızlaştırma çalışması gerçekleştirilmiş olup, ayrıntılar [338] referans çalışmasında yer almaktadır. Problemde uygulanana ince ağ yapısı hem dış alan hem de cisimler için Şekil 5.65’ te gösterilmektedir.



(a)



Şekil 5.65 Problem geometrisine ait ağ yapısı

b. Sonuçlar ve tartışma

Belli bir harekete sahip iki bloğun sıcak havayla kurutulmasının 3 boyutlu simülasyonu için birleştirilmiş ısı ve kütle transfer mekanizması incelenmiştir. Cisimler gıda ürünleri ile benzer olarak nemli ve gözeneklidir.

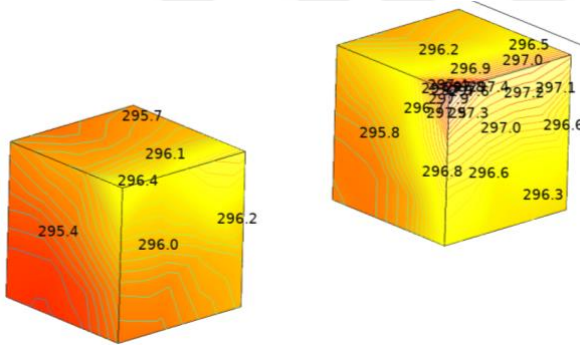
Bu çalışmayla aşağıdaki sonuçların elde edilmesi beklenmiştir:

1- Kurutma havası sıcaklığı için farklı değerler verilmesi, cisim içerisindeki sıcaklık dağılımı ve buharlaşmayı etkileyeceği için hem ısı hem de nem transferini önemli ölçüde etkilemelidir.

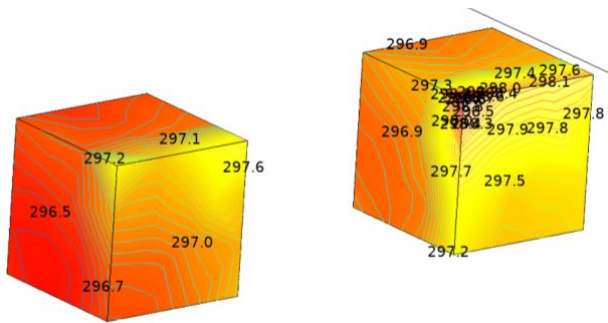
2- Cisim içerisindeki nem transferi, kurutma havasının hızının değiştirilmesinden etkilenecektir.

3- Nispeten düşük hızlarından dolayı blokların hareketinin kuruma performansını olumsuz etkileyeceği düşünülmemektedir.

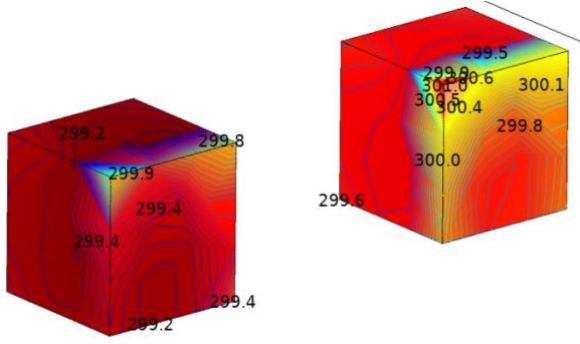
Şekil 5.66, farklı kuruma sürelerinde nesne yüzeylerinin eş sıcaklık eğrilerini ($u = 0.6 \text{ m/s}$, $T = 333 \text{ K}$) şartları için göstermektedir. Zaman ilerledikçe, havadan nesneye aktarılan ısı nedeniyle ürün yüzeyinin sıcaklığı artar ve sıcaklık dağılımı homojen değildir, bu durum özellikle ürünlerin hava akımına bakan yüzeylerinde en yüksek sıcaklığa sahip olan üst ön köşelerde görülmektedir, bu da ısı transferinin çoğunun bu bölgelerde meydana geldiğini göstermektedir.



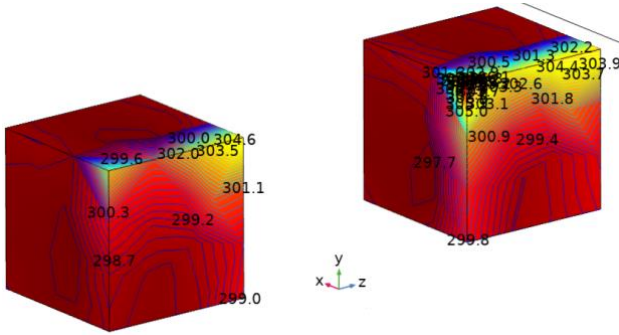
a) $t = 100 \text{ s}$



b) $t = 400 \text{ s}$

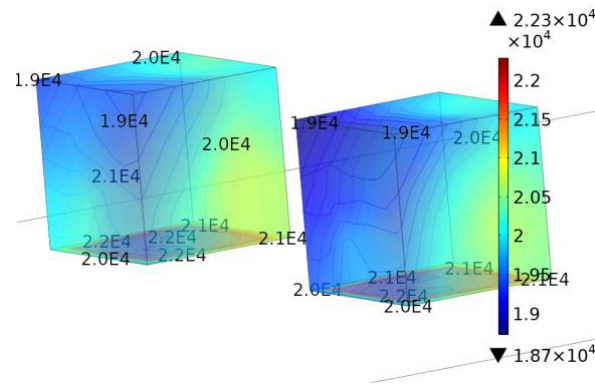


c) $t = 600$ s

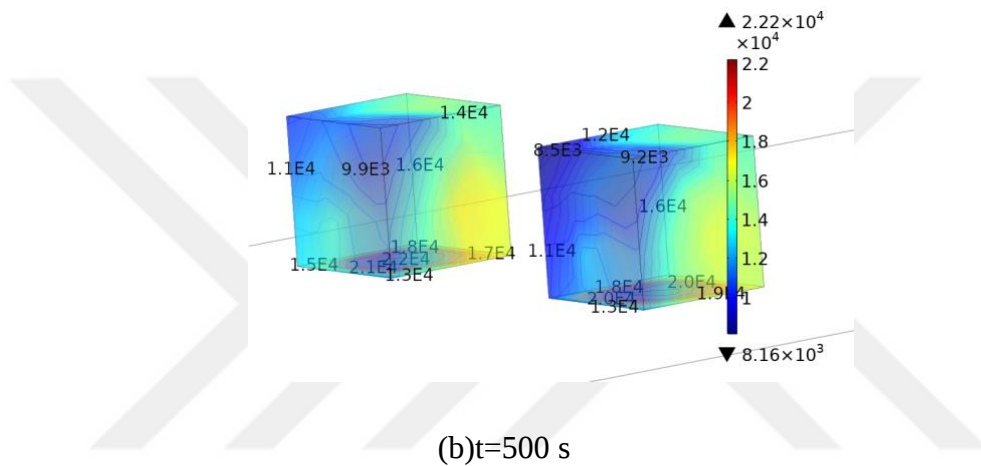


d) $t = 800$ s

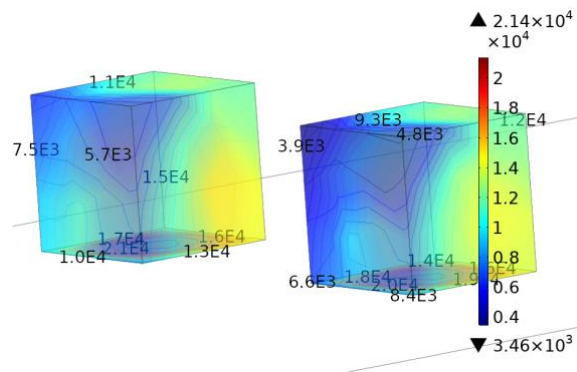
Şekil 5.66 Farklı zamanlarda eş sıcaklık eğrileri ($u=0,6$ m/s, $T= 333$ K)



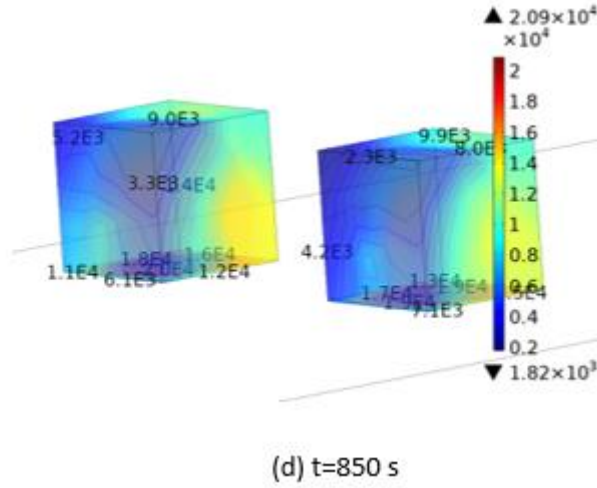
(a) $t=100$ s



(b) $t=500$ s



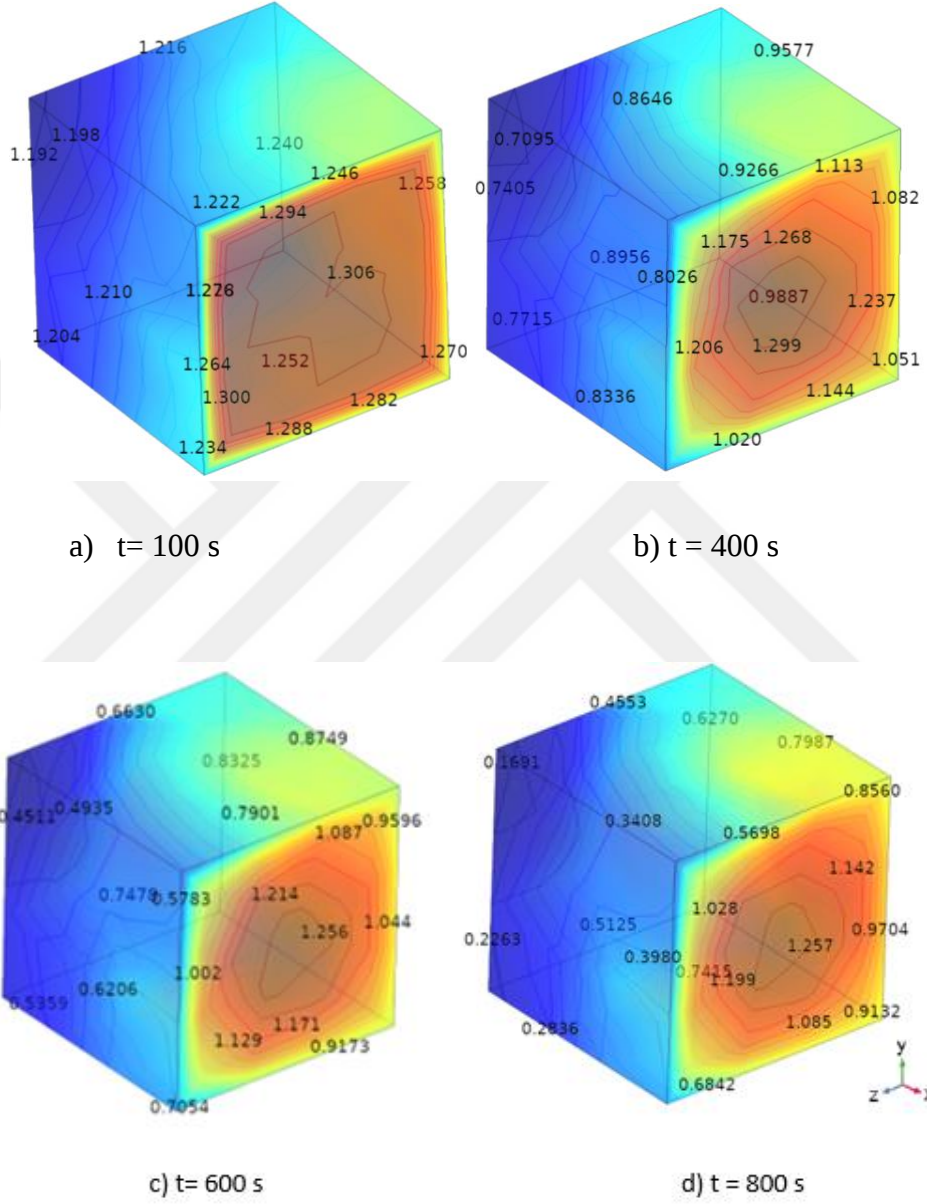
(c) $t=700$ s



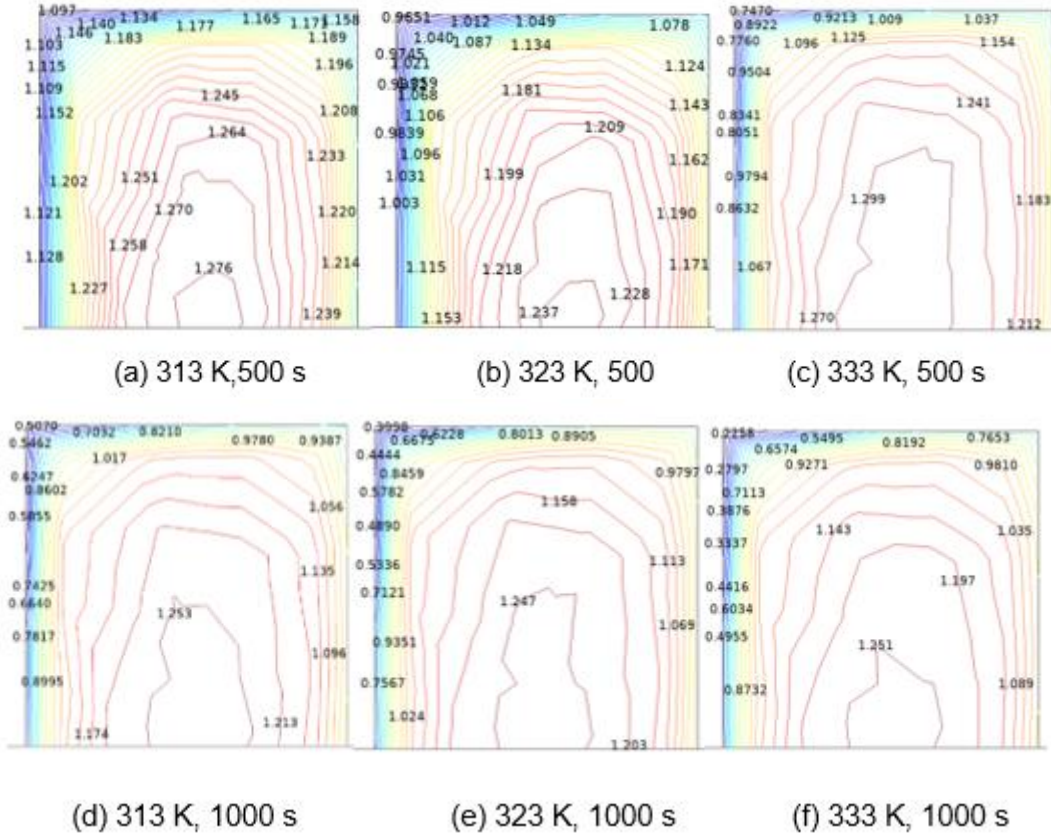
Şekil 5.67 Farklı zamanlarda nesnelerin içindeki sıvı su konsantrasyonları ($u = 0,6 \text{ m / s}$, $T = 333\text{K}$)

Farklı zamanlarda gözenekli cisimlerin içindeki sıvı su konsantrasyonları Şekil 5.67' de gösterilmektedir. Konsantrasyon değerindeki minimum azalma miktarı $t=100$ saniyede $1.87 \times 10^4 \text{ mol / m}^3$ ve $t = 850$ s'de $1.82 \times 10^3 \text{ mol / m}^3$ olarak görülmektedir. Bu, ilk kuruma döneminde yüzeylerden serbest suyun buharlaşmasının meydana geldiği ve sonraki dönemlerde daha iç kısımlardaki suyun difüzyon ve basınç gradyanları nedeniyle havaya buharlaştığı anlamına gelir. Buharlaşma, ürünün nem içeriği denge nem içeriği değerine ulaşmaya kadar gerçekleşir. Şekil 5.68, farklı kuruma sürelerinde cisim 1'in yüzeyleri için nem içeriği dağılımlarını gösterir. Nem içeriği, hava akımına bakan koyu mavi rengin yoğunlukta olduğu ön kısımdan, olduğu nesne yüzeyinin arkasına doğru artmaktadır. Bunun nedeni ürünlerin konumu ve yerleşimi, ayrıca ürünlerin hareketi olabilir. Farklı zamanlardaki farklı kuru hava sıcaklıkları için nem içeriği dağılımları, Şekil 5.69' da blok 1' in orta kesim düzlemindeki konturlar olarak gösterilmektedir. Şekilde üç farklı hava sıcaklığı için nem içeriği değerlerine bakıldığında, maksimum buharlaşmanın en yüksek sıcaklıkta olduğu ve nem transferinin en fazla cismin ön üst köşesinde gerçekleştiği görülmektedir. $t=1000 \text{ s}$ ' de cisim kanalın daha arka kısmındadır, ve bu konumda cisimdeki buharlaşmanın yüksek olduğu görülmektedir. Buharlaşmanın çoğu, yüzeydeki serbest suyun varlığı nedeniyle bu bölgelerde meydana gelmektedir, bu nedenle nem içeriği, her iki cisim için köşelerde ve yüzeylerin yakınında daha düşüktür. İki kurutma havası hızı karşılaştırıldığında, daha yüksek hız ($0,8 \text{ m / s}$) iki cisim için de daha fazla

buharlaşmaya neden olurken, her iki hava hızı için iki cisim arasında nem içeriği değerlerinde hafif bir fark görülmektedir. Ayrıca, her iki hız için, nem içerikleri, düzlemlerin tüm bölgeleri için blok 2'de blok 1'den daha düşüktür (Şekil 5.70).

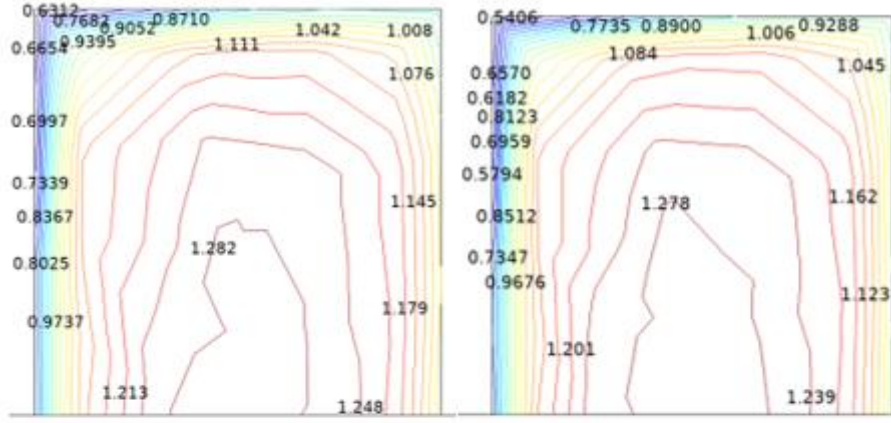


Şekil 5.68 Blok 1'in yüzeyleri için farklı kurutma sürelerindeki nem içeriği ($u = 0.6$ m / s, $T = 333$ K, $X_m(0) = 1.31$ kg / kgdb)

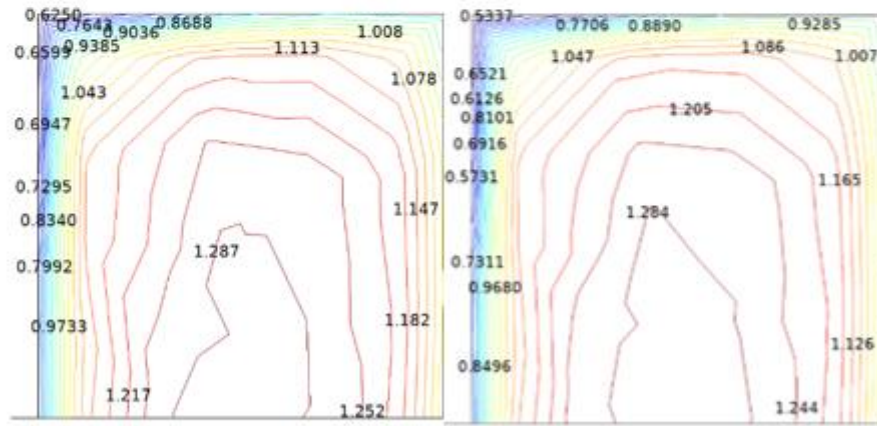


Şekil 5.69 Blok 1 için farklı zamanlarda farklı kuru hava sıcaklıkları için nem içeriği dağılımları ($u = 0,6 \text{ m/s}$)

Şekil 5.70, $t = 500 \text{ s}$ ' de farklı hava hızlarına sahip a) blok 1 b) blok 2 için dikey orta hat boyunca sıvı su doygunluk değerlerini $T=333 \text{ K}$ sıcaklık için göstermektedir. Sıvı suyun doygunluğu, kurutma işlemi sırasında ürünün nem içeriği ile doğru orantılı olarak değişen boyutsuz bir parametredir. Sıvı su doygunluğunun başlangıç değeri $S_1 = 0,5$ 'tir. Azalan doygunluk değerleri ürün yüzeylerine yakın yerlerde yükselir; bu da daha önce de açıklandığı gibi yüzeylerin yakınında buharlaşmanın daha yüksek olduğu anlamına gelir. İki cisim çok benzer kurutma davranışı gösterir ve artan hava hızı, farklı hızlar için düzlemlerdeki nem içeriği dağılımlarında görülebileceği gibi her iki nesne için de buharlaşmayı olumlu yönde etkiler. Şekil 5.71, farklı hava giriş hızlarında her iki bloğun dikey hattı boyunca sıvı su doygunluğunun değişimini göstermektedir ($T = 333 \text{ K}, t = 1000 \text{ s}$). Görüldüğü gibi artan hava hızının cisimden olan buharlaşmayı her iki blokta da olumlu etkisi olmuştur.



a) $u = 0.6 \text{ m/s}$

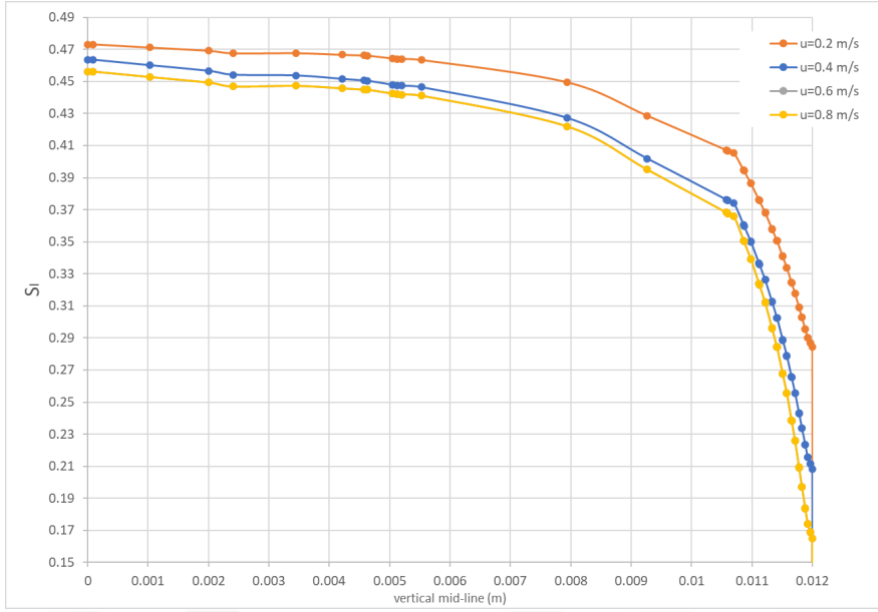


b) $u = 0.8 \text{ m/s}$

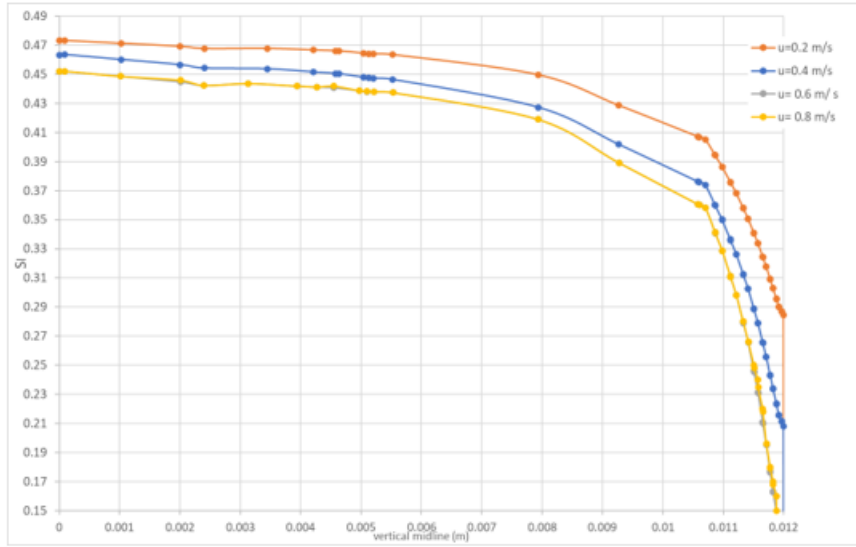
B1

B2

Şekil 5.70 Her iki bloğun orta düzlemi için farklı hızlarda nem içeriği dağılımları $t = 500 \text{ s}$ ($T = 333 \text{ K}$)



(a) Blok 1



(b) Blok 2

Şekil 5.71 (a) Blok 1 (b) Blok 2' nin dikey orta hattı boyunca farklı hava hızlarıyla ($T = 333 \text{ K}$) sıvı su doygunluğu

Nem içeriğinde azalma:

Tablo 5.11' de her iki nesne için değişen parametrelerle bazı kurutma zaman adımlarında kuru maddedeki nem içeriğinde azalma yüzdesi gösterilmektedir. Buharlaşma miktarının zamana bağlı olarak arttığı tüm koşullar için görülmektedir. Kurutma havası sıcaklığının artması, buharlaşma artışına etki eder ve hava hızının da artışı, sıcaklıkla benzer etkiyi

gösterir. Kanal akışı için laminar koşulların geçerli olduğu ve sıcaklıkların çok yüksek olmadığı düşünüldüğünde, nesnelerin içinde boyutları küçük olduğu için tatmin edici buharlaşma vardır. Daha büyük boyutlar ve daha yüksek nem için kuruma süresi, hava hızı ve sıcaklığı bu özelliklere göre değiştirilmelidir.

Değişen sıcaklıklar arasındaki nem içeriğindeki en büyük düşüş, 1000 saniyelik kurutmada sıcaklık 333 K olduğunda, cisim 2'de %60,87 azalma olarak görülmüştür. Farklı kurutma hızları için $t=1000$ s' deki kurutmada, nem içeriğindeki en yüksek azalma %63,12 kayıp ile $u=0,8$ m/s olarak görülmüştür. Bunun yanı sıra, optimum kurutma koşullarını seçmek için enerji kayıplarının hesaba katılması gerektiğine dikkat edilmelidir.

Tablo 5.11 Her iki blok için değişen hızlarda (a) sıcaklıklarda (b) nem içeriğindeki yüzde azalma

	t=100 s		t=500 s		t= 1000 s	
u (m/s)	B1	B2	B1	B2	B1	B2
0.2	6.44	7.09	20.31	19.01	36.82	37.83
0.4	8.64	9.61	29.74	27.95	54.22	57.07
0.6	9.63	10.79	32.55	31.16	58.36	60.87
0.8	10.89	11.65	35.35	33.46	62.55	63.12

(a)

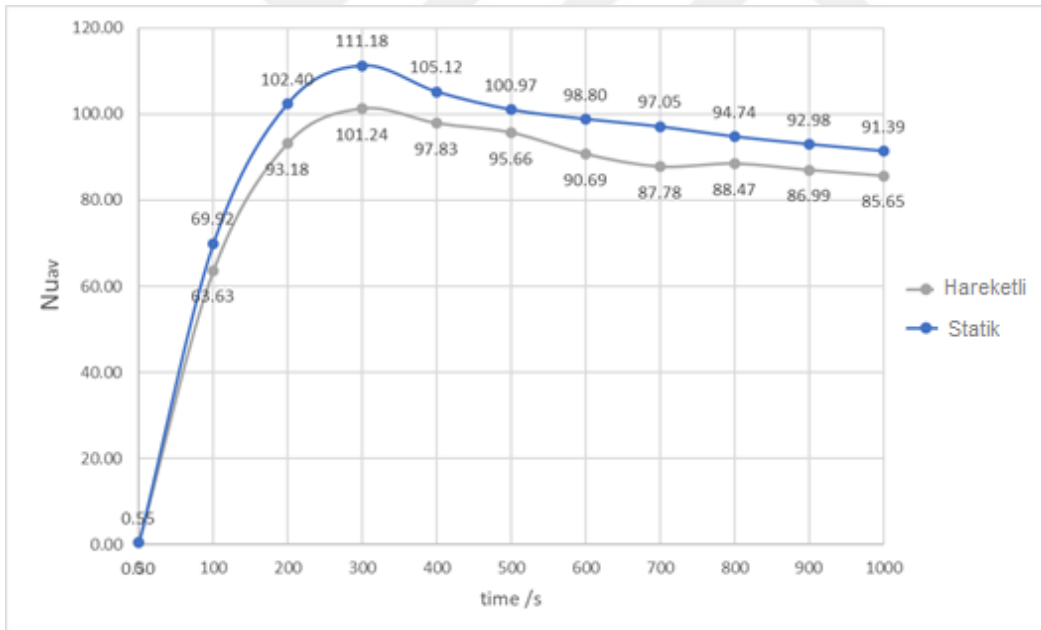
	t=100 s		t=500 s		t= 1000 s	
T(K)	B1	B2	B1	B2	B1	B2
303	4.22	5.23	16.34	15.91	35.24	32.23
313	7.12	8.34	20.13	22.32	50.42	51.24
323	7.42	8.52	26.52	23.42	59.94	59.23
328	8.02	10.01	28.31	26.42	61.42	60.42
333	9.63	10.79	32.55	31.16	58.36	60.87

(b)

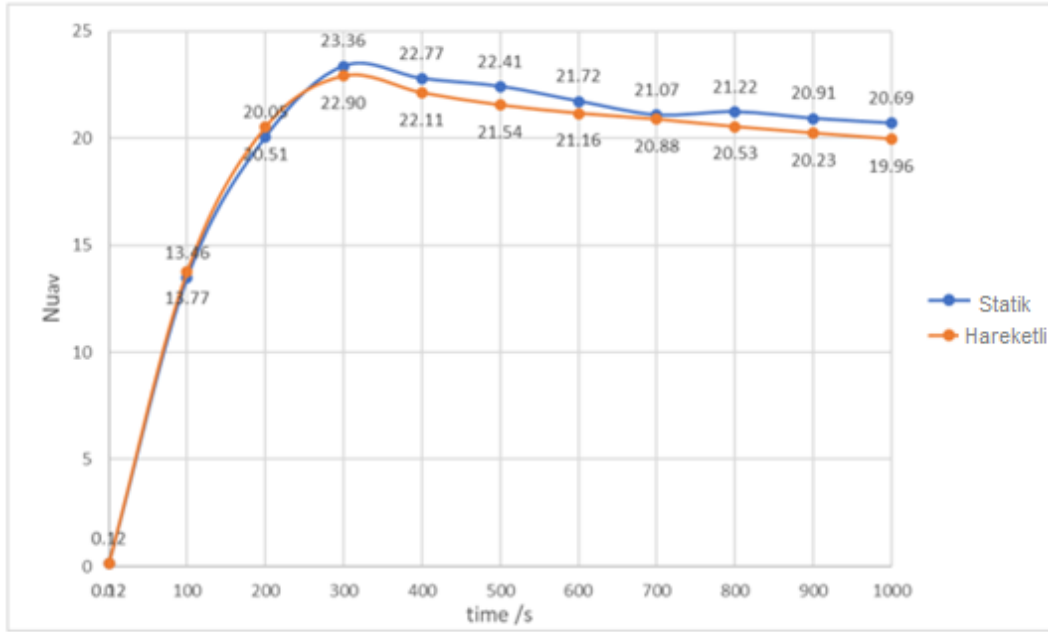
Statik yatak ve hareketli yatak ile iki cismin karşılaştırılması:

Devamlı ve çabuk bir kurutma sağlamak için, kurutma yatağına hareket verilmektedir, ancak bu hareket bazen homojen olmayan sıcaklık ve konsantrasyon dağılımlarına yol açar ve bu da cisim içerisinde kurutma düzensizliğine neden olur. Ürünün hızının dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekir, yüksek hızlarda hareket eden nesnelerde kurutma düzgün gerçekleşmeyebilir ve ürünlerin içinde kalan istenmeyen nem içeriği özellikle gıdalarda bozulmalara sebep olur. Şekil 5.72, statik ve hareketli koşullar için $T = 303\text{ K}$ (a) ve $T = 333\text{ K}$ (b) için zamanla ortalama ısı transferi değişimlerini göstermektedir. Yüzeylerden ısı transferi statik duruma göre hareketli yatak koşullarında daha yüksektir.

Statik ve hareketli yatak arasındaki fark, daha yüksek hava sıcaklığı değerlerinde daha düşüktür ve ihmal edilebilir. Kanal üzerinde aynı boyutlardaki iki blok için sıcaklık ve nem içeriği değişimlerinin karşılaştırması Şekil 5.73'te gösterilmektedir. Şekil 5.73 (a)'da iki blok için ortalama sıcaklık değişimleri gösterilmektedir ve blok 2 için daha yüksek sıcaklık değerleri görülmektedir. Şekil 5.73b' de de zamanla ortalama nem içeriğindeki azalma blok 2' de blok 1 ile karşılaştırıldığında daha yüksektir.

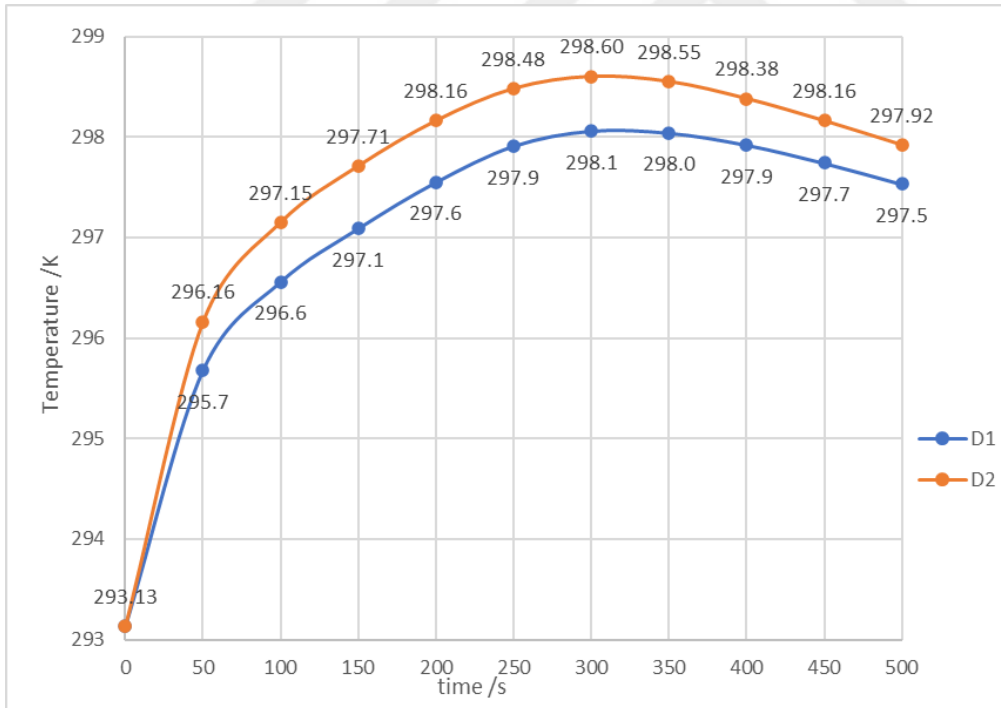


a) $T=303\text{ K}$

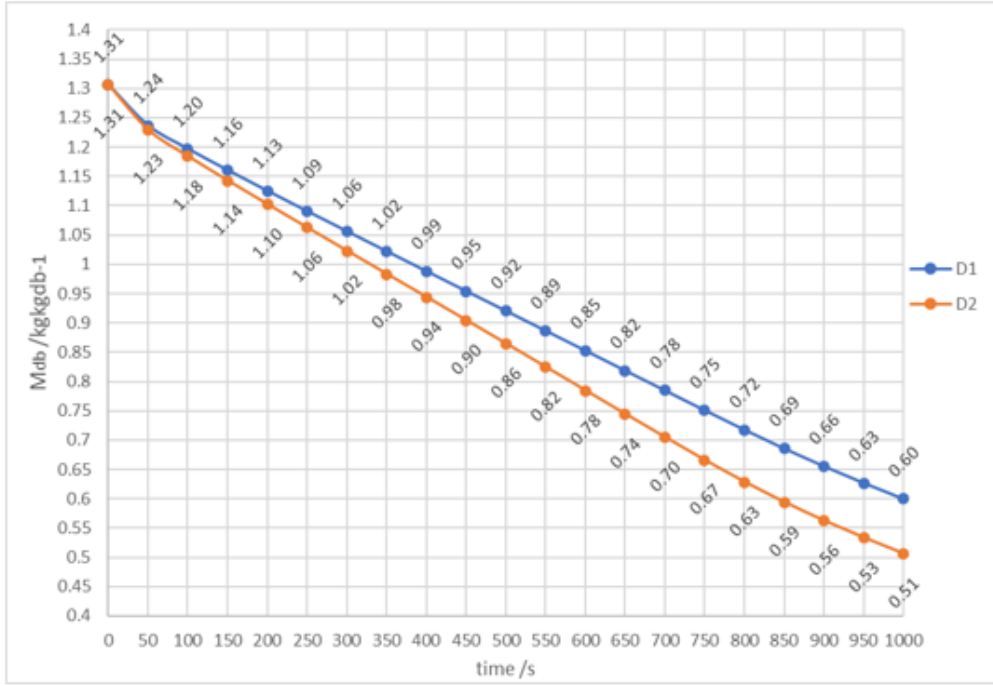


b) $T = 333 \text{ K}$

Şekil 5.72 Farklı sıcaklıklarda hareketli ve statik koşullar için zamanla ısı transferi gelişimi



(a)



(b)

Şekil 5.73 Ortalama sıcaklık (a) ve nem içeriği (b) zamana göre dağılımları ($u = 0,6 \text{ m / s}$, $T = 333 \text{ K}$)

Bu çalışmada, sabit hareketli iki blok için konvektif kurutma işleminin 3 boyutlu simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Kurutma havası parametreleri hız ve sıcaklığın değişen değerleri ve bu parametrelerin kurutma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda kısaca yazılmıştır:

- Artan hava sıcaklığının, kurutma artışına etkisi vardır.
- Artan hava hızının da buharlaşmayı artırıcı etkisi vardır, nem içeriğindeki en fazla azalma $0,8 \text{ m / s}$ hava hızında %63,12 kayıp ile görülmektedir.
- Konveyör bantlı kurutucularda ürünün yeri ve yerleşim şekli önemlidir, ön tarafa göre ürünlerin arka tarafında daha düşük buharlaşma görülür, ayrıca kurutma havasının akış yönü ve hareket eden nesnelerin yapısı da kurutmada etkilidir.
- Ürünlerin hareketi buharlaşma oranında azalmaya neden olabilir, fakat mevcut çalışmada hareketli yatak herhangi bir olumsuz etkiyi sebep olmamıştır.

5.2.3 Üç Boyutlu bir kanalda gözenekli çok ayda nemli nesnenin konvektif kurutma performansının optimizasyonu

Bu çalışmada, çoklu gözenekli nemli nesnelerin üç boyutlu konvektif kurutma performansını optimize etmek için bir yöntem önerilmektedir. İlk olarak, problemin sayısal çözümü sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmış (bir önceki problem de olduğu gibi) ve COBYLA optimizasyon çalışmasıyla nesneler arasındaki optimum mesafe kütle transferinin hesaba katmadan belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen optimum mesafe için kanal akış denklemleri ile cisimlere ait ısı transferi denklemleri arasında bağlantı kurularak en iyi kurutma performansı belirlenmiştir. Sonuç olarak cisimler arası mesafelerin değişimi akış devridaimi ve karmaşıklığına sebep olarak cisimler etrafında farklı termal gradyanlar oluşmuştur. Cisim grupları arasındaki mesafenin farklılaşmasıyla ortalama Nusselt sayısı ikinci blokta artarken, ilk blok için diğer bloklarla aradaki mesafenin değişmesiyle monoton olmayan değerler elde edilmiştir. İkinci ile üçüncü nesneler arasındaki mesafe tüm nesneler için ortalama Nu varyasyonunu etkilemiştir.

a. Fiziksel model

Şekil 4.74, problemin 2 ve 3 boyutlu olarak gösterimini vermektedir. Kanalin akış yönündeki yüksekliği ve uzunluğu sırasıyla L_y ve $L_x = 50L_y$ olarak belirlenmiştir, kanal genişliği de L_y ' dir. Üç adet birbirine eş bir kenarı h_c olan kübik nesne kanal içerisine yerleştirilmiştir. Üç boyutlu kanal girişinde sıcak kurutma havası hızı u_i ve sıcaklığı T_i olarak tanımlanmaktadır. Simülasyonda, birinci blok (C1) ile diğer bloklar (C2, C3) arasındaki mesafe d_1 , ikinci ve üçüncü cisim arasındaki mesafe d_2 ve birinci cisim ile diğer cisimler arasındaki yanal mesafe ise d_3 olarak tanımlanmıştır, ikinci ve üçüncü nesne arasında bu mesafe sıfırdır. Çalışmada, kütle transferinin hesaba katmadan ortalama ısı transferinin maksimize eden cisimler arası mesafe miktarını bulmak amacıyla bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. İkinci aşamada belirlenen optimum parametredeki akış denklemleri cisimlerden olan ısı ve kütle transferi denklemleriyle birleştirilir.

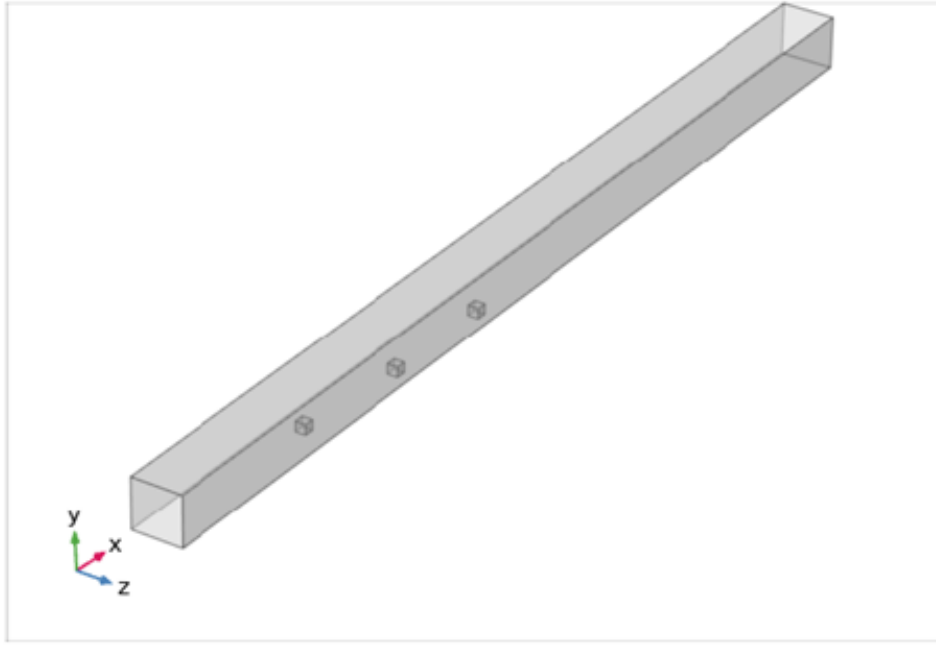
Bu çalışmada termo-akışkan sisteminin parametrelendirilmesi için kontrol değişkenleri kullanılır ve PDE kısıtlama optimizasyonunda üç cismin ısı transferi hızlarının ortalama olarak toplamını veren kısmi diferansiyel denklemin (PDE) bir fonksiyonu elde edilir.

Genel optimizasyon probleminde, PDE problemi çalışma 5.1.4' te uygulanan prosedürle çözülmüştür.

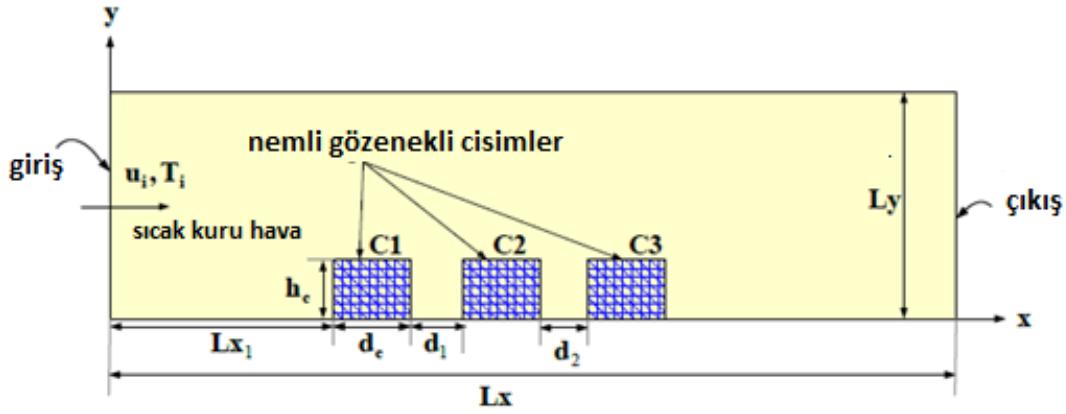
COBYLA, amaç ve kısıtlama fonksiyonlarına doğrusal yaklaşımlar için kullanılır. Bu optimizasyon yönteminde, enterpolasyon her yineleme adımında bir simpleksin köşelerinde yürütülür, problemin optimizasyonu bir güven bölgesi içinde gerçekleştirilir. İlgili parametreler için alt ve üst sınırlar (nesneler arasındaki boşluk) şu şekilde verilmiştir:

$$2h_c \leq d_1 \leq 7h_c, \quad 2h_c \leq d_2 \leq 7h_c, \quad 0 \leq d_3 \leq 7h_c$$

Kanal ve bloklar için kütle transferi hesaba katılmadan ortalama Nusselt sayısının maksimum değerini veren optimum aralık belirlenir. Cisimler arası mesafenin en iyi kurutma performansının veren optimum değerinde kararsız durum için bağlantılı ısı ve kütle transferi ve kanal akışı denklemleri kullanılır.



(a)

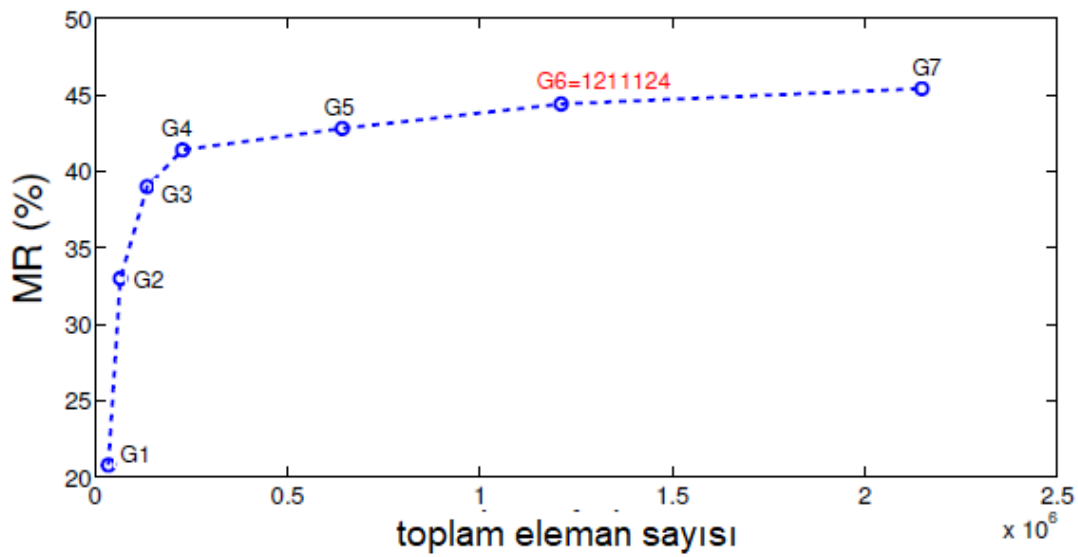


Şekil 5.74 Üç adet nemli gözenekli cismi içeren 5.2.3 nolu problemin, Üç boyutlu (a) İki boyutlu (b) şematik gösterimi

Sisteme ait yönetici denklemler 3 boyutlu sistem için olan denklemlerdir. Sayısal çözüm olarak sistemi yöneten denklemler uygun sınırlar ve başlangıç koşullarına göre Galerkin ağırlıklı artık sonlu eleman yöntemi ile çözülmüştür. Bu yöntemde, denklemler zayıf bir formülasyona dönüştürülür ve alan değişkenlerinin yaklaşık formları yönetsel denklemlerine eklenir. Alan değişkenlerinin tahmini için, Lagrange sonlu elemanları kullanılmıştır. Denklemlerin çözümü için doğrudan PARDISO çözücü seçilirken zamana bağlı kısmın çözümünde 2. derece geriye doğru farklılaşma formülü (BDF) kullanılır. Hesaplamalarda, 10^{-6} 'lık bir yakınsama kriteri belirlenmiştir.

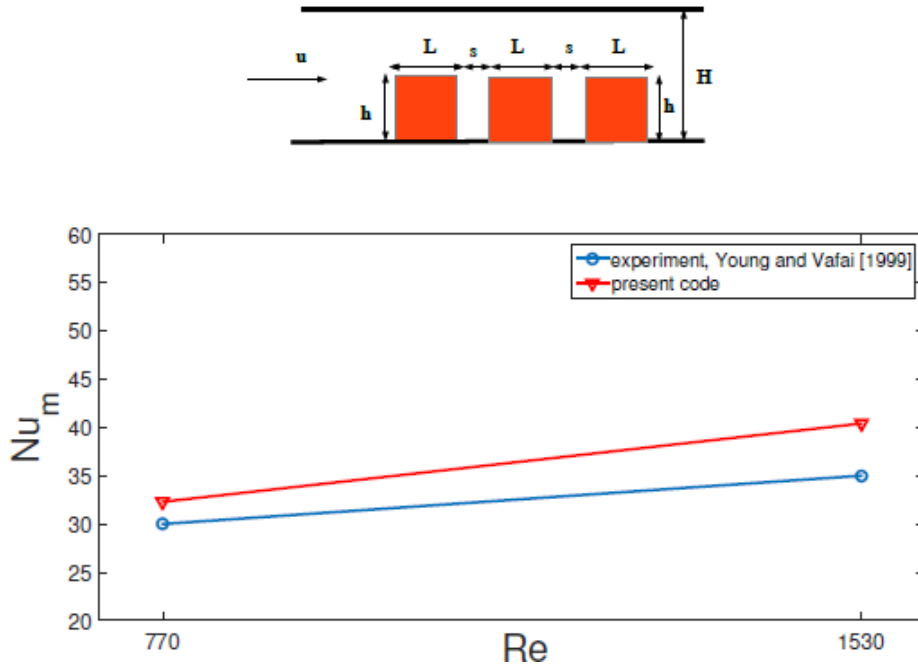
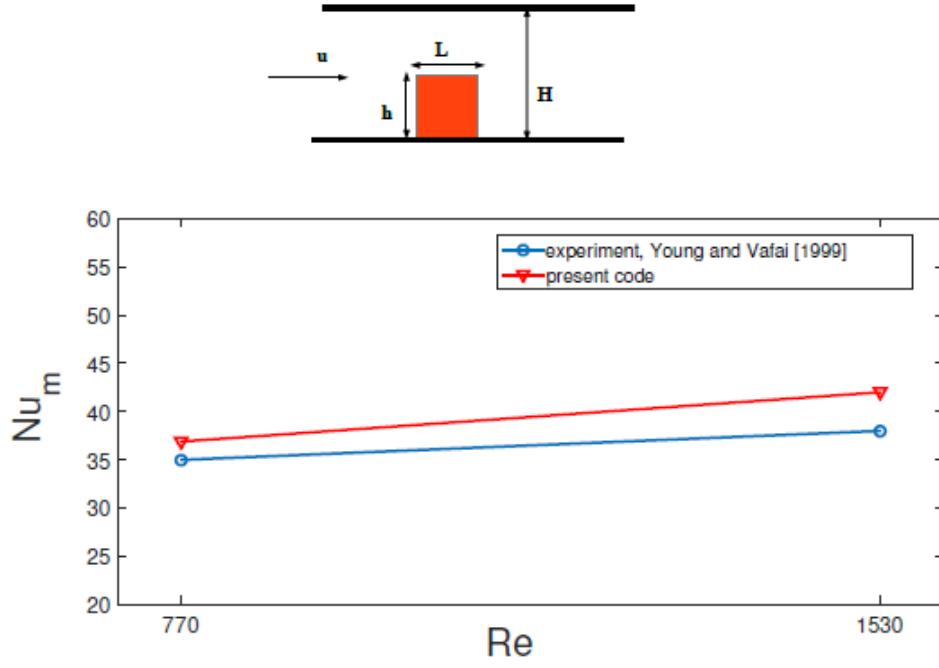
Optimizasyon için yukarıda bahsedildiği gibi COBYLA kullanılmıştır.

Birçok farklı parametrenin analiz edilmesi gereken bu problemde, kesinliği yüksek HAD hesaplamalarının maliyeti açısından, problemin ağ bağımsızlaştırma çalışması önemlidir. Bunun için, farklı ağ boyutlarındaki çözümler karşılaştırılarak yapılmıştır. Ağ örüntüsü duvar yakınları ve ara yüzlerde sıklaştırılmıştır. Şekil 5.75’ de farklı ağ boyutlarında $d_1 = 4h_c$, $d_2 = 4h_c$ ve $d_3 = 0,5h_c$ aralıklarda nem içeriğindeki azalmayı yüzde olarak göstermektedir. 1211124 dörtyüzlü (tetrahedral) eleman sayısına sahip G6 ağı hesaplamalar için seçilmiştir.



Şekil 5.75 Çeşitli ızgara boyutları için yüzde nem oranındaki azalma (MR) cinsinden nem azalma miktarı

Mevcut kodun doğrulanması için literatürdeki benzer çalışmalar kullanılmıştır. Kod doğrulama çalışmasının biri, tek ve birden fazla cismin kanala monte edildiği zorlanmış taşınım etkilerinin deneysel olarak araştırıldığı Young ve Vafai [339] çalışmasıyla yapılmıştır. Şekil 5.76’ da, iki farklı Reynolds sayısında tek cisim ve üç cisimli kanal için elde edilen Nusselt sayılarının karşılaştırılması yapılmıştır. Reynolds sayısının 770 olduğu durumda tekli ve çoklu nesne durumu için tutarsızlıklar sırasıyla %5,5 ve %8 olurken bu değerler Reynolds sayısı 1530 iken %10,5 ve %15 olmuştur. Aynı çalışmada, deneysel ve sayısal çalışmalar arasında da farklılıklar belirtilmiştir. Bu farklılıkların nedeni: 3 boyutlu akışın etkilerine ve düşük Reynolds sayılarında türbülansa geçişe bağlanabilir.



Şekil 5.76 Kanala monte edilmiş tek (üstte) ve çoklu (altta) nesnelerin olduğu durumlarda iki farklı Reynolds sayısı için ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırması. Yound ve Vafai (1999) deneysel çalışmasıyla kıyaslama yapılmıştır.

b. Sonuçlar ve tartışma

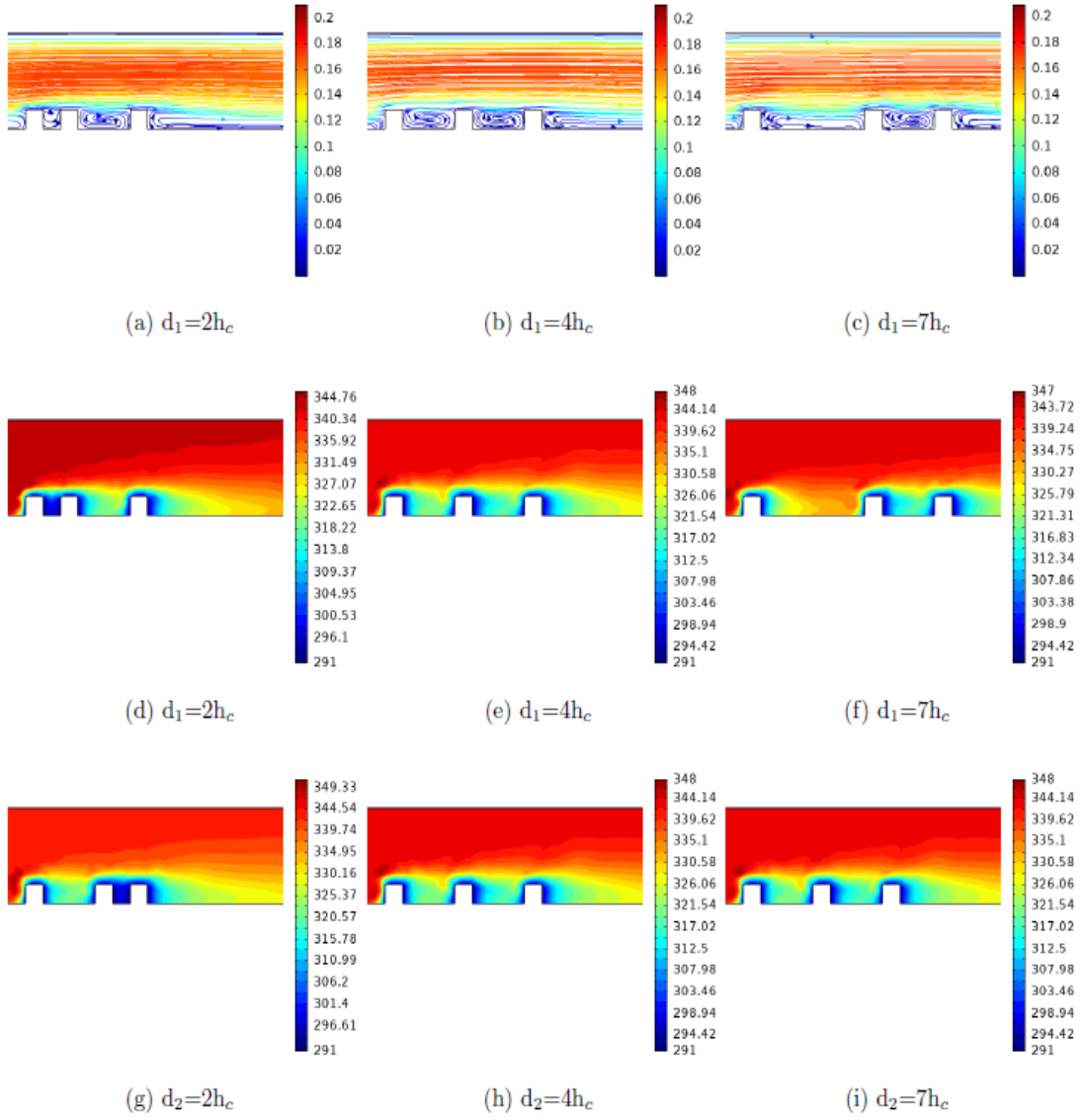
Bu çalışmada, üç adet nemli ve gözenekli cismin üç boyutlu laminar akış koşullarında konvektif kurutma koşullarını optimize etmek için sayısal bir problem oluşturulmuştur. Cisimler arası mesafe kanal boyunca değişim göstermiş, kanal yüksekliğine bağlı Reynolds sayısıysa 350 olarak belirlenmiştir. Cisimler arası mesafe şu şekilde alınmıştır: d_1 , $2h_c$ ile $7h_c$ arasında; d_2 , $2h_c$ ile $7h_c$ arasında ve d_3 , 0 ile h_c arasında olacaktır. Cisimler arası akış yönündeki ve yanıl yönündeki mesafenin ısı transferinin en yüksek olduğu optimum değerini kütle transferinin hesaba katmadan elde etmek için COBYLA optimizasyon metodu kullanılmıştır. İşlemin ikinci aşamasında kararsız ısı ve üç boyutlu gözenekli nemli nesnelerdeki kütle taşıma denklemleri optimum aralık değerlerindeki kanal akış denklemleriyle birleştirilir. Bu prosedür, gözenekli nemli nesnelerin her biri için en iyi konvektif performansı sağlamıştır.

HAD ve optimizasyon çalışması

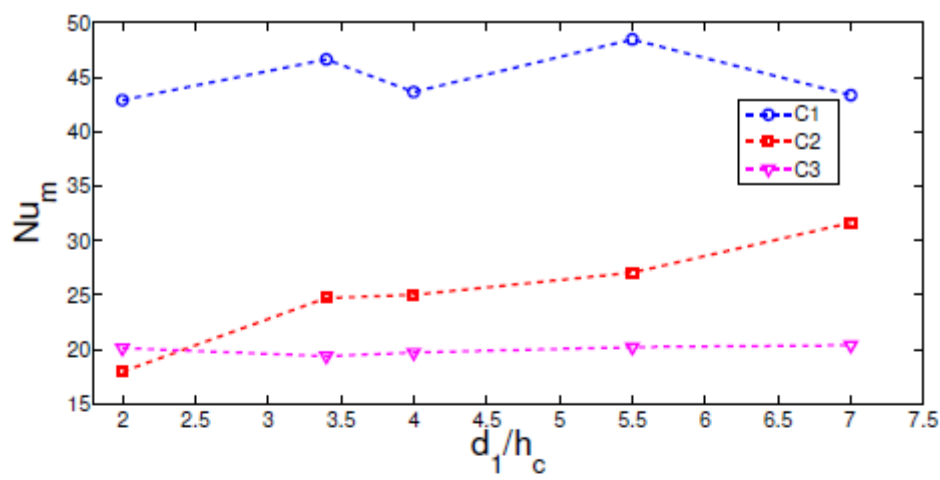
Birinci cisim (C1) ve diğer cisimler (C2, C3) arasındaki mesafenin etkisini göstermek için 3 boyutlu modelin orta düzlemindeki eş akış ve eş sıcaklık eğrileri Şekil 5.77 a-i' de gösterilmiştir. Bu durum için, ikinci ve üçüncü cisimler arası uzaklık $d_2 = 4h_c$ de, C1 cismi ile ve C2, C3 cisimleri arasındaki yanıl mesafeyse $d_3 = 0,5h_c$ de sabit tutulmuştur. Aralık d_1 ' in değeri arttığında, akış birinci cisimle diğer cisimler arasındaki bölgeye daha rahat sızarak bu bölgedeki resirkülasyon bölgesinin genişlemesine sebep olmuştur. Bu durum ayrıca ilk bloğun arka yüzeyi ve ikinci bloğun ön yüzeyi boyunca akış sirkülasyonundan dolayı termal gradyanların da büyümesine sebep olmuştur. Akış yönünde ikinci cisim C2 ve üçüncü cisim C3 arasındaki mesafelerin artmasıyla cisimlerin yüzeyleri boyunca akışın karmaşıklaşması ve termal sınır tabakanın bozulması sebebiyle benzer etki görülür. C1, C2 ve C3 bloklarının tüm yüzeylerinden olan ortalama ısı transferine yatay mesafelerin etkisi yanıl yüzey $d_3 = 0,5h_c$ için Şekil 5.78'de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, d_1 mesafesinin artmasıyla C1 bloğu için ortalama Nu sayısı değeri düzensiz bir biçimde artarken C2 bloğu için düzenli bir artış gözlenmiştir. Bunun sebebi, cisimler arası bölgedeki akış devirdaimi ve geri dönüşü sebebiyle akışkanın soğuması ayrıca birinci cismin soğuk arka yüzeyini süpürmesidir. Tahmin edilebildiği gibi, d_1 mesafesinin değişimi üçüncü blok C3 üzerinde fazla bir etki oluşturmamaktadır. Mesafe d_2 ' nin $d_2 = 5,5h_c$ aralığına kadar değişimi C2 ve C3 bloklarındaki ortalama Nusselt sayısı değerinin artmasını sağlamıştır, bunun sebebi bu cisimler arasındaki mesafenin artmasıyla akışkanın ara bölgeye rahatça sızabilmesi olarak görülebilir. Fakat bu aralığın $d_2 = 5,5h_c$

'den $d_2=7h_c$ ' ye artması akışın tersine dönüşüne sebep olduğu için ortalama Nu sayısı değeri azalmaktadır. C1 bloğuyla (C2, C3) blokları arasındaki yanal mesafenin değişimiyle ortalama Nusselt sayısı değerinin değişimi, C2 ve C3 arasındaki mesafeyle Nusselt sayısının değişimine kıyasla zıt etkiler göstermektedir. C2 bloğu için, mesafenin $d_3= 0,3h_c$ ' ye kadar olan aralığında, ilk cismin blokaj etkisinden dolayı ortalama Nusselt sayısı azalırken, daha sonra ikinci cisim C2 yüzeyine daha fazla sıcak hava temasından dolayı bu değer artmaktadır.

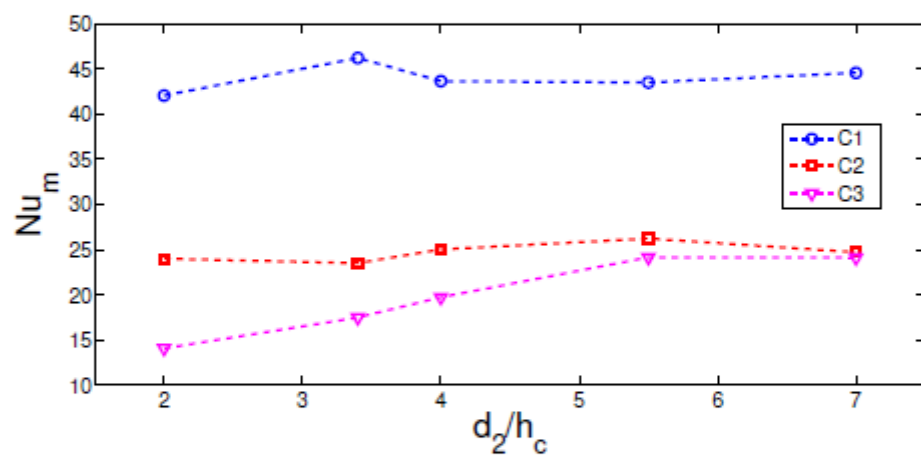
Aralığın en düşük ve en yüksek değerleri arasında ortalama Nu sayısı C2 bloğu için %50,3 değişirken, bu değişim C3 bloğu için yalnızca %26'dır. Yukarıdaki sonuçlar belirtilen parametrenin değişimiyle Nusselt sayısının monoton olmayan değişimler gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca, cisimler arası mesafenin ısı transferinin en yüksek değerini veren optimum aralığını bulmak için bir optimizasyon metodu uygulanmıştır. Şekil 5.79, 3 boyutlu kanalda, mesafe aralıkları d_1 , d_2 ve d_3 ' ün parametrik varyasyonlarıyla Nusselt sayısı değerlerini vermekte, ısı transferinin en yüksek değerini veren aralık aranmaktadır. Buna göre optimum aralık değeri $d_1=5.93h_c$, $d_2=7h_c$ ve $d_3=0.584h_c$ olarak belirlenmiştir. Şekil 5.80, mesafe parametrelerindeki değişimlere göre cisimlerin tüm yüzeylerinden olan ortalama Nusselt sayılarının değişimini vermektedir. Şekle göre, Nusselt sayısı varyasyonlarında düzenli olmayan değişimler görülmektedir ve ortalama Nusselt sayısının en yüksek değerinin optimum mesafelerde olduğu saptanmıştır. Ortalama Nusselt sayısının en yüksek fark değerleri olan %9,4, %11,3, % ve %11,4 oranlarının karşılık geldiği mesafe değerlerinde bakıldığında, bu değerlerin optimum aralıklarda elde edildiği anlaşılmıştır. Belirlenen optimum aralıklarda cisimler etrafındaki akış biçimi ve sıcaklık değişimleri Şekil 5.81' de gösterilmektedir.



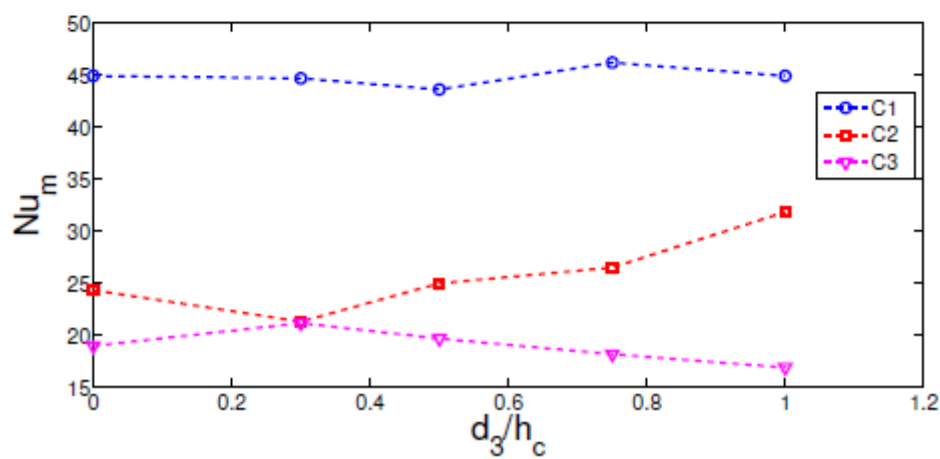
Şekil 5.77 C1 ve diğer (C2, C3) nesneler arasındaki mesafenin akış (a-c) ve ısı (d-f) davranışları olarak etkisi. C2 ve C3 nesneleri arasındaki mesafenin etkisi ise eş sıcaklık eğrilerinde (g-i) 'de gösterilmiştir



(a) $d_2=4h_c, d_3=0.5h_c$

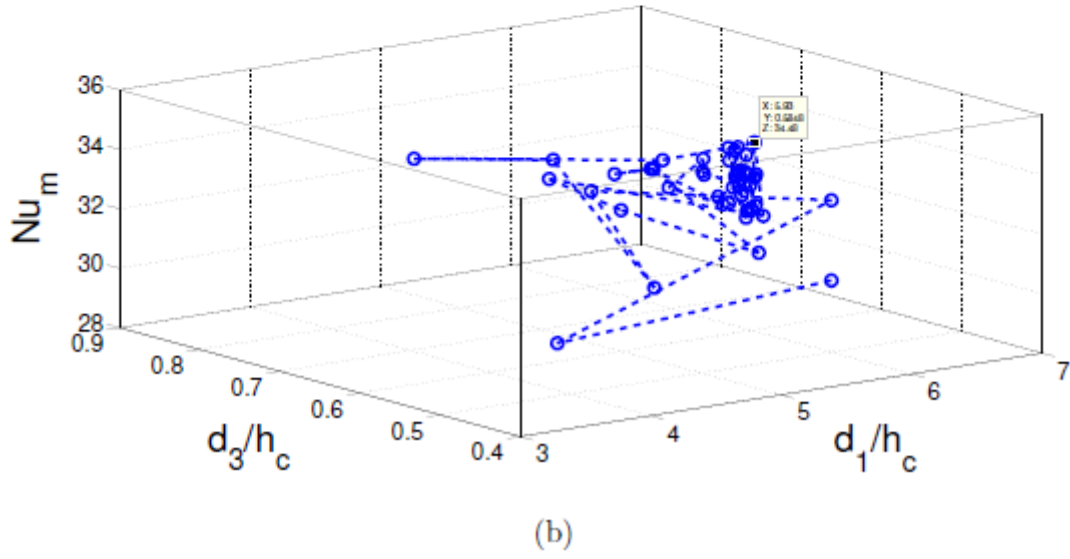
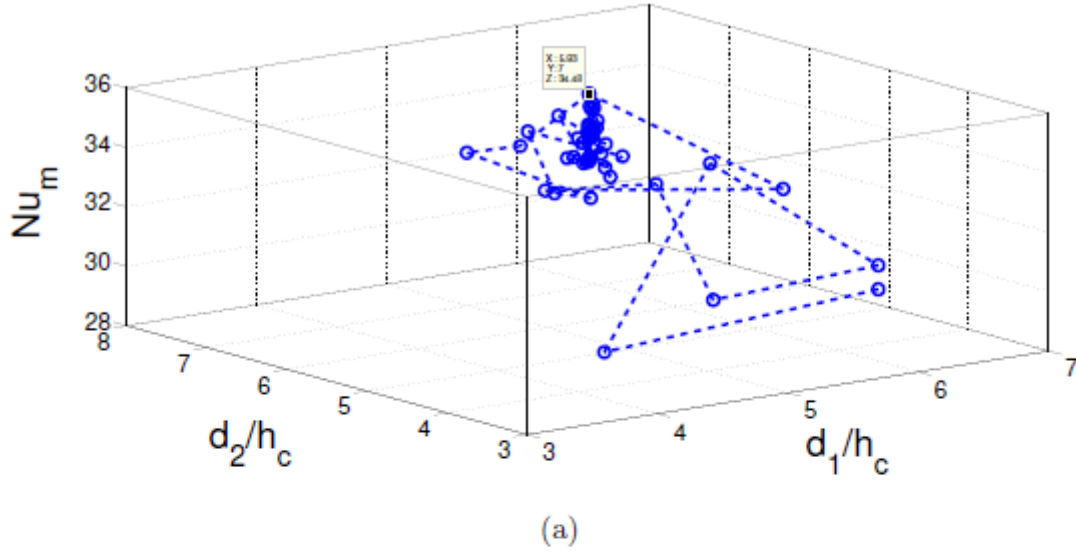


(b) $d_1=4h_c, d_3=0.5h_c$

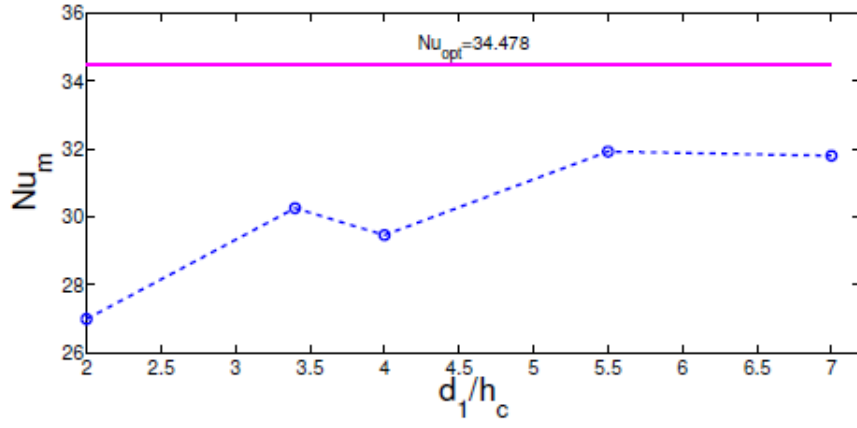


(c) $d_1=4h_c, d_2=4h_c$

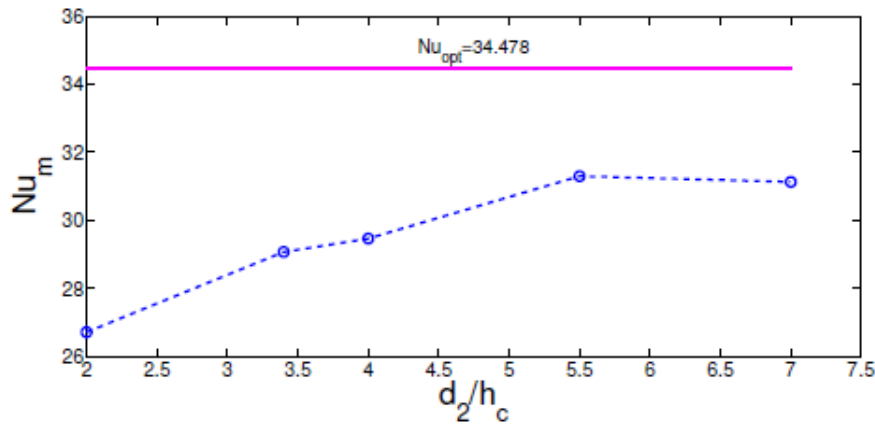
Şekil 5.78 Ortalama Nusselt sayısının C1, C2 ve C3 cisminin her biri için yatay uzaklığın değişmesiyle (a, b), C1 cismi ile (C2, C3) cisimleri arası yanal mesafenin değişimiyle (c) değişimi



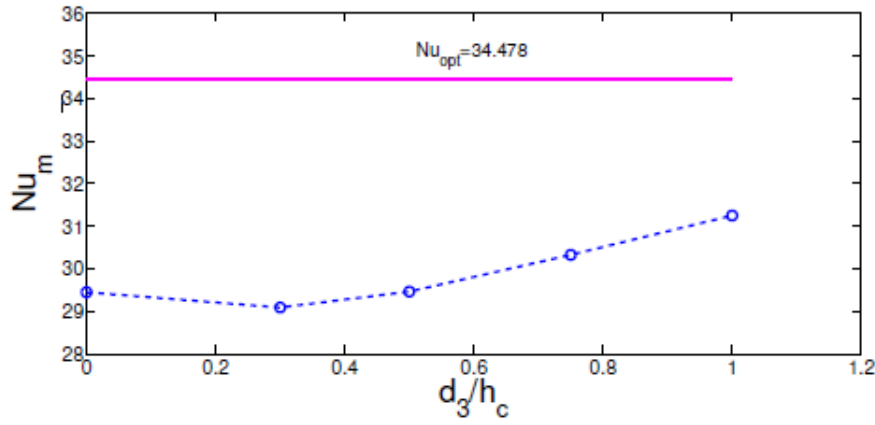
Şekil 5.79 Cisimler arası uzaklığın optimum değerinin (d_1 , d_2) için (a) ve (d_1 , d_3) için (b) aranması



(a) $d_2=4h_c$, $d_3=0.5h_c$



(b) $d_1=4h_c$, $d_3=0.5h_c$



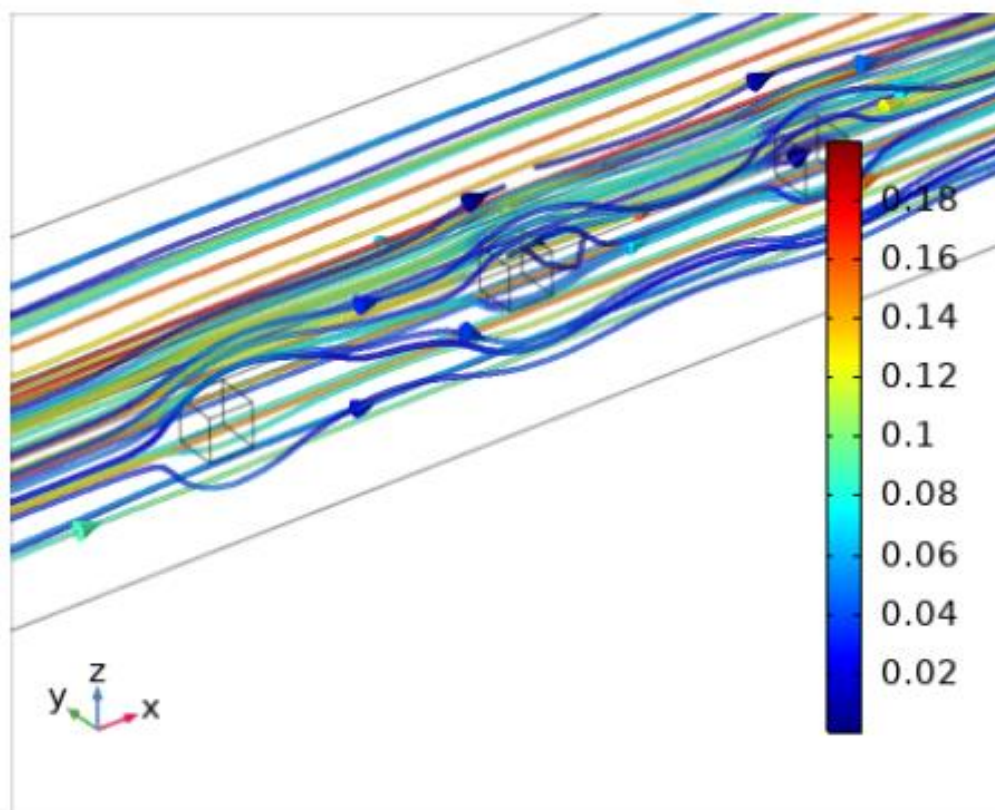
(c) $d_1=4h_c$, $d_2=4h_c$

Şekil 5.80 Nesneler arasındaki çeşitli mesafelerin tüm bloklar dikkate alındığında ortalama Nusselt sayısının değişimi üzerindeki etkileri. Optimum değer de grafiklere dahildir.

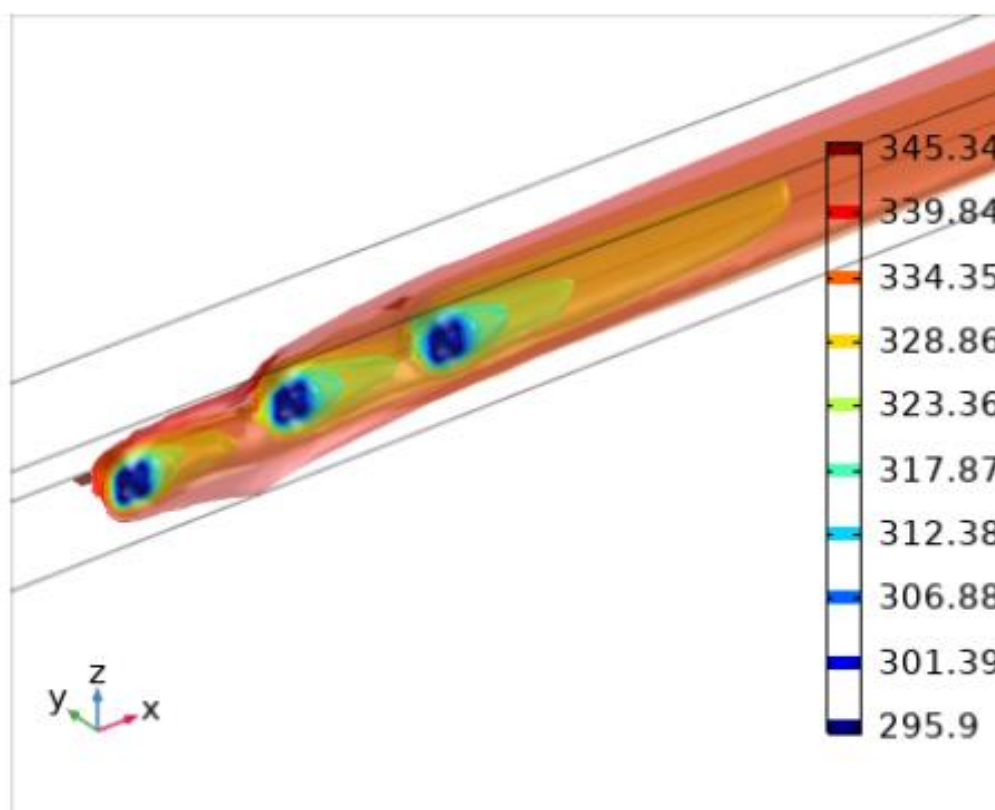
Çalışmanın ikinci kısmında, bir önceki aşamada elde edilen optimum aralık parametrelerinde kanal akış denklemleriyle gözenekli cisimler için ısı ve kütle transferi

denklemleri eşleştirilir. Ayrıca parametrik konvektif kurutma performansındaki aralık varyasyonları optimum aralıktaki değerlerle karşılaştırılır. Şekil 5.82, sıvı doygunluğu S_l 'nin optimum aralıktaki d_1 değeri için C1 ve C2 blokları boyunca zamanla değişimini vermektedir. Şekilde, S_l değerinin zamanla azaldığı görülmektedir. Aralık d_1 değerinin artmasıyla, C1 bloğu için S_l değerinin azaldığı görülmektedir. Fakat C3 bloğu için aynı durumda S_l değerinde düzenli olmayan bir değişim gözlenmiştir. Kurutmanın ilerleyen zamanlarındaysa çok küçük değişimler görülürken optimum aralıkta en iyi kurutma performansının sergilendiği S_l değerlerinin buralarda en düşük olmasından anlaşılmaktadır. Şekil 5.83, sıvı doygunluğu S_l 'nin optimum aralıktaki d_2 değeri için C1 ve C2 blokları boyunca zamanla değişimini vermektedir. Aralık d_2 değerinin artmasıyla, suyun sıvı haldeki doygunluğu değerinin C3 bloğu için azaldığı görülürken, C1 bloğu için çok önemli olmayan ufak değişimler gösterdiği gözlenmiştir. Farklı d_2 değerleri karşılaştırıldığında, doygunluk miktarındaki en fazla düşüşün optimum aralıkta olduğu görülmektedir. Şekil 5.84' te sıvı doygunluğunun gözenekli cisim içerisindeki değişimi ve üç boyutlu kanaldaki sıcaklık değişimleri optimum mesafeler için farklı zaman aralıklarında gösterilmiştir. S_l değerinin birinci cisim için ve tüm cisimlerin üst yüzeylerinde hızlı bir şekilde azaldığı, bu bölgelerde konvektif kurutmanın daha etkili olması dolayısıyla görülebilmektedir. Kurutmanın erken zamanlarında, cisimlerin arka taraflarında ısı alışverişini zayıf olmasından dolayı sıcaklıklar daha düşük olmaktadır. Konvektif kurutma performansı, aşağıdaki formülde verildiği gibi nem miktarının yüzde olarak azalmasıyla ölçülebilir:

$$MR(\%) = \frac{S_l^t - S_l^0}{S_l^0} \times 100 \quad (5.34)$$



(a)

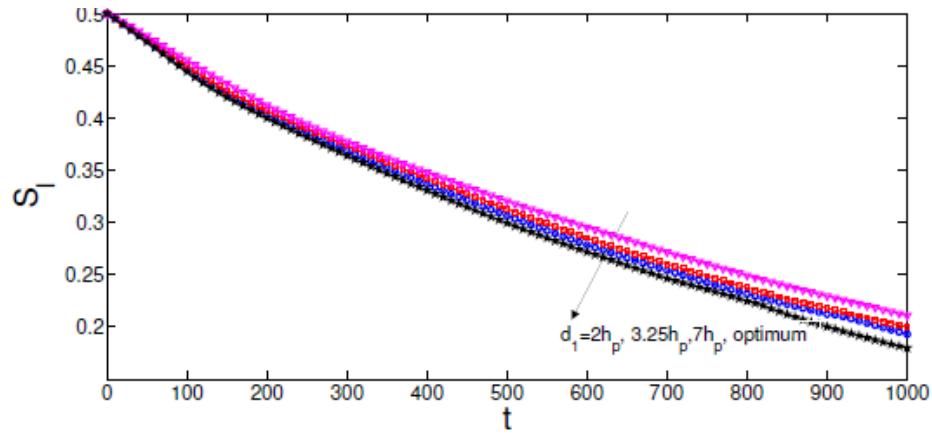


(b)

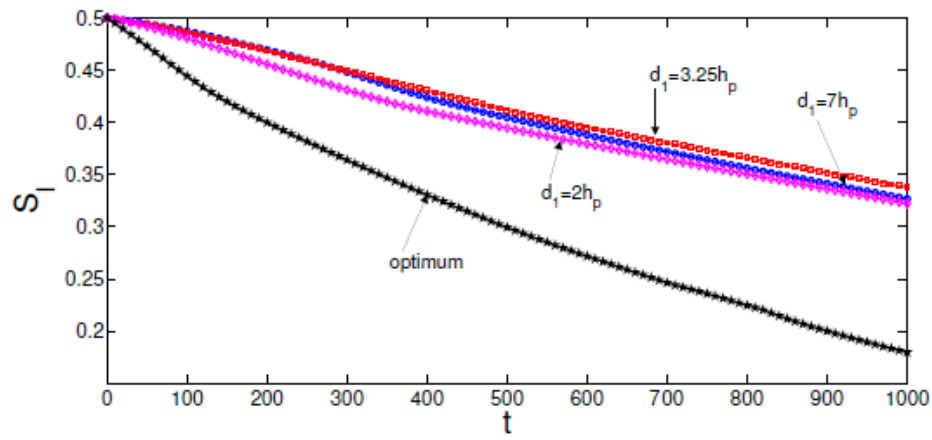
Şekil 5.81 Optimum aralıkta akış çizgileri (a) ve eş sıcaklık çizgileri (b) ($d_1=5.93h_c$, $d_2=7h_c$ and $d_3=0.584h_c$)

Burada ‘t’ indisi zamanı temsil etmektedir. Şekil 5.85, cisimler arası mesafeye göre nem miktarındaki azalmayı göstermekte, optimum aralıktaki değerler de gösterilmektedir. C1 bloğu için en yüksek konvektif kurutma performansı $d_1= 3h_c$ konumunda %62,46 değerinde elde edilirken bu değer optimum aralıkta aynı blok için %64,06’dır.

Uzaklık değeri arttıkça C2 bloğu için nemdeki azalma miktarı artmış ve MR (yüzde nem azalması) en uzak aralıkta %46,94 olarak hesaplanmıştır. Bunun sebebi uzaklığın artmasıyla ikinci bloğun ön yüzeyindeki taşınım etkilerini artmasıdır. MR değerinin %46,94 ile en yüksek olduğu noktadaki uzaklık değeri, optimum aralığa çok yakındır. Üçüncü blok için, MR değerinin en yüksek değeri %35,5 ile $d_1= 2h_c$ mesafesinde görülmüştür ve bu değer optimum aralıkta elde edilenden %7,5 daha düşüktür. C2 ve C3 blokları arası mesafenin değişimine bakıldığında, C1 bloğunun bu değişimden fazla etkilenmediği MR değerlerine bakıldığında anlaşılmaktadır. C2 ve C3 cisimlerinde MR değerinin değişimi düzensizlik göstermektedir, optimum aralıktaki değerin C2 için %6, C3 için ise %2 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. C1 bloğu ve diğer bloklar (C2, C3) arası yanal mesafenin nem içeriğine etkisi incelendiğinde, C2 ve C3 blokları için bu etkinin daha fazla olduğu görülmüştür. Aralık d_3 değerinin değişimiyle MR değerinde %7’ ye kadar olan bir değişim görülmüştür, en yüksek değişimin olduğu uzaklıksa C2 bloğu için $d_3= 0,5h_c$ noktasındadır. Farklı d_3 uzaklıkları arasında MR değerinin en yüksek olduğu noktaların optimum uzaklıkla karşılaştırması yapıldığında, MR değerinde C2 bloğu için %6, C3 bloğu için de %3’ lük bir azalma olduğu görülmüştür.

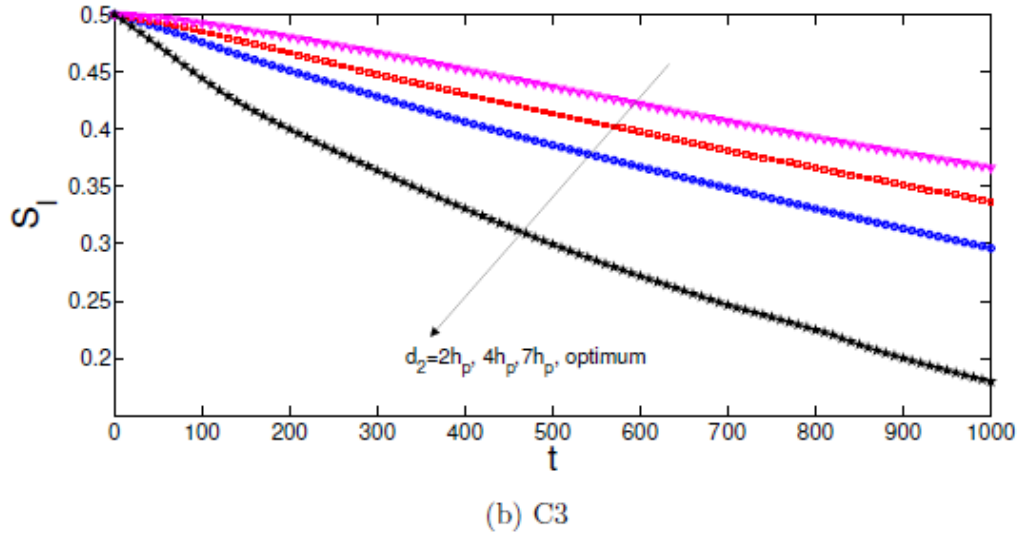
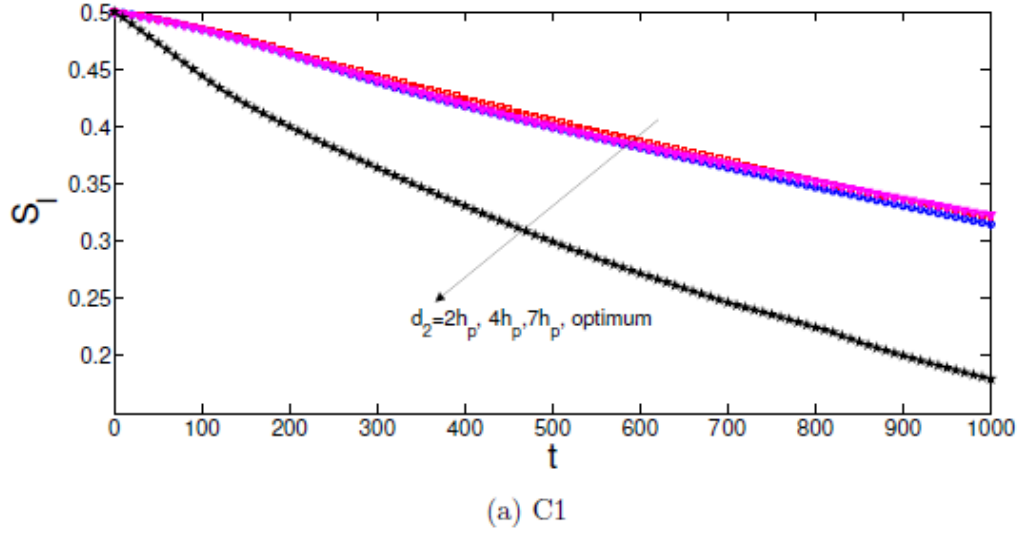


(a) C1

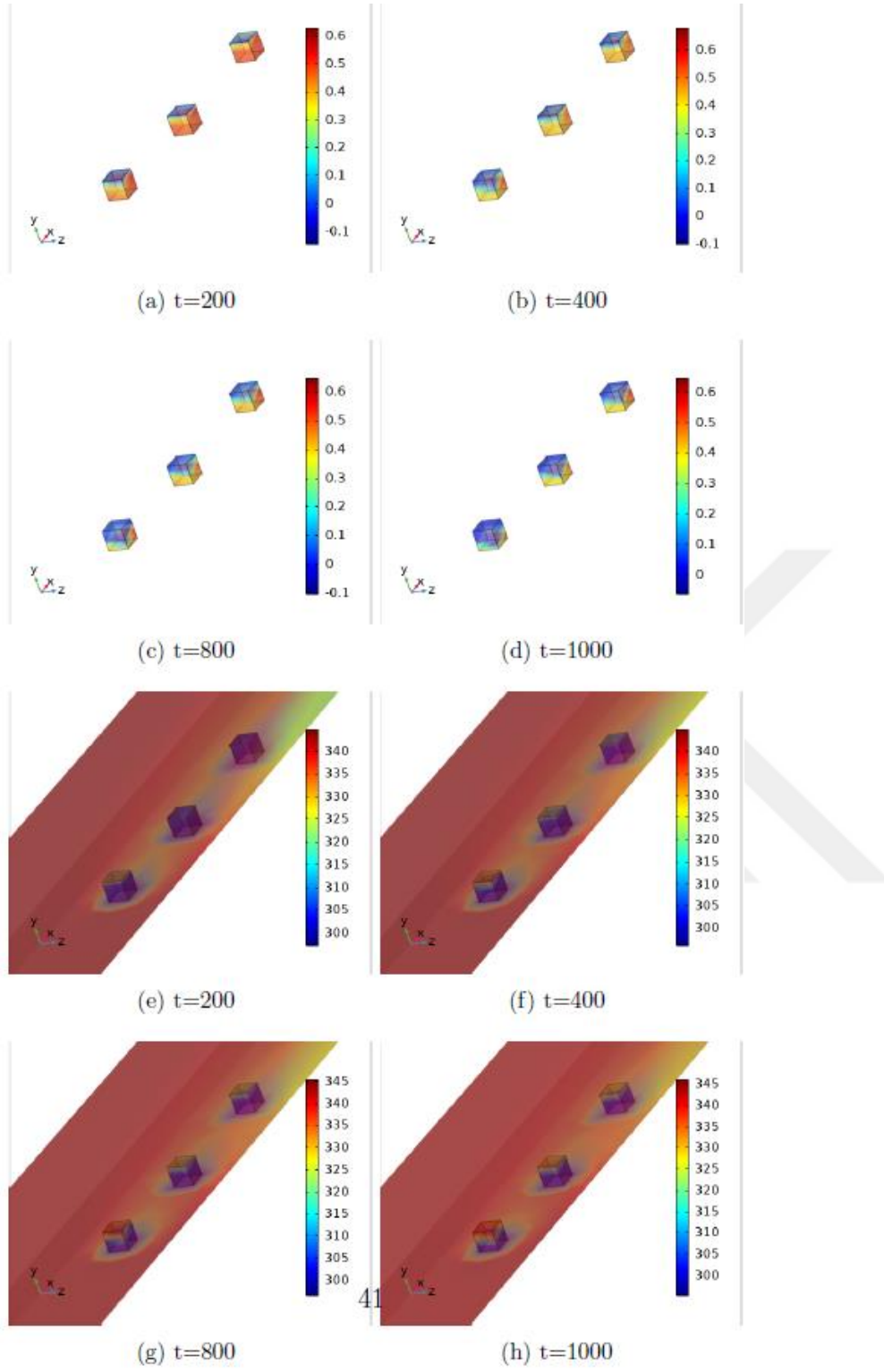


(b) C3

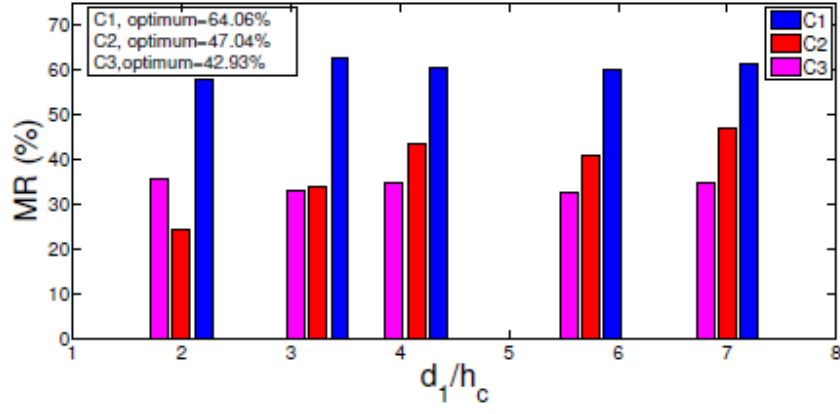
Şekil 5.82 Optimum aralık için d_1 uzaklığının C1 (a) ve C3 (b) cisimlerinin sıvı doygunluğu değişimine etkisi



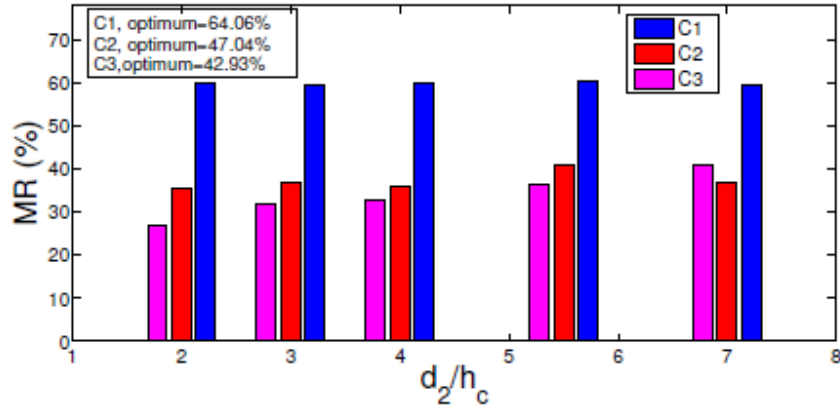
Şekil 5.83 Optimum aralık için d_2 uzaklığının C1 (a) ve C3 (b) cisimlerinin sıvı doygunluğu değişimine etkisi



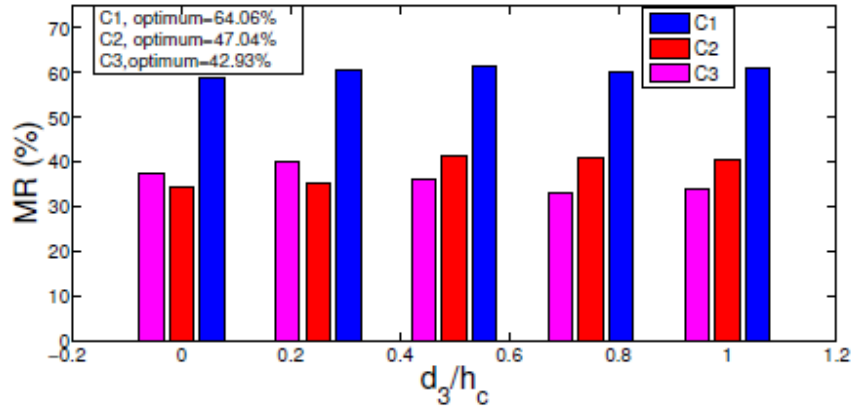
Şekil 5.84 Optimum aralık değeri için cisimler içindeki sıvı konsantrasyonu (a-d), sıcaklık değişimleri (e-h) ($d_1=5.93h_c$, $d_2=7h_c$ and $d_3=0.584h_c$)



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.85 Nesneler arası mesafenin nem miktarındaki yüzdelik değişime etkisi. Optimum aralık değerleri de eklenmiştir.

Yukarıda ele alınan iki örnek çalışma için COBYLA optimizasyon algoritması sürekli rejimde akış için kullanılmış ve optimum çalışma parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler, zamana bağlı ısı ve kütle transferi problemine entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu konfigürasyonda konvektif kurutmada doğru sonuçlar verdiği ve etkili bir yöntem olduğu görülmektedir.

5.2.4 Yapay sinir ağları ile konvektif kurutma performansı tahmini

a. Problem tanımı

Bu çalışmada, zamana bağlı konvektif kurutma performansının tahmini yapay sinir ağı (YSA) tabanlı modelleme kullanılarak elde edilmiştir. YSA ve diğer makine öğrenme yöntemleri yaygın olarak çeşitli termal mühendislik sistemlerinin modellemesinde, tanımlanmasında ve kontrolünde kullanılır. Önceki 5.2.3 nolu problemde (Şekil 5.74), konvektif kurutma performansının optimizasyonu yapılmıştır ve blokların her biri için optimum aralıkta zamana bağlı sıvı doygunluğu bu çalışmada YSA ile modellenmiştir. Yapay sinir ağının çıktısı girdi değişkenleri ve ağın ağırlığı yardımıyla elde edilir, YSA uygulaması boyunca ağ ağırlıklarıysa değişmektedir. Kurutma performansı üzerinde önemli etkileri bulunan kurutma süresi (t) ve sıcaklık parametreleri ağ girdileri olarak belirlenir. Zaman aralığı 0 s ile 1000 s arasında 10 saniyelik aralıklarla oluşturulurken, kurutma havası sıcaklığıysa 300 K ile 350 K arasında altı farklı değer almıştır.

Toplam 606 girdi-çıkı veri seti YSA modelinin inşası için kullanılmıştır. Şekil 5.86, yapay sinir ağları yapısını, farklı katmanlar ve girdi-çıkı değişkenleriyle şematik olarak göstermektedir. Gizli katmanda kullanılan nöron sayısı 12 olarak belirlenmiş, gizli katmandaki aktivasyon fonksiyonu hiperbolik tansig fonksiyonu olarak şu şekilde belirlenmiştir: $f(x) = 1 / (1 + e^{-x})$. Levenberg-Marquardt (LM), Geri yayımlı (BP) YSA öğrenme algoritması olarak seçilmiştir.

Ağ modelinde, LM optimizasyonu güncelleme için ağ ağırlıkları ve sapma terimleri kullanılır. Zamana bağlı problem modelinin oluşturulması için, YSA araç kutusu içeren MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Yazılımın rastgele veri bölme özelliği, verilerin %60'ını öğrenme, %20'sini doğrulama ve %20'sini test için seçmiş ve kullanmıştır. Şekil 5.87, inşa edilen ağ özelliklerini, algoritmaları ve öğrenme, test ve doğrulama aşamaları için kullanılan data seti sayılarını göstermektedir.

Hata kareler ortalaması (HKO/ MSE), eğitim / doğrulama süreçleri boyunca ağ modelinin performans ölçütü olarak kullanılır ve aşağıdaki gibi verilir:

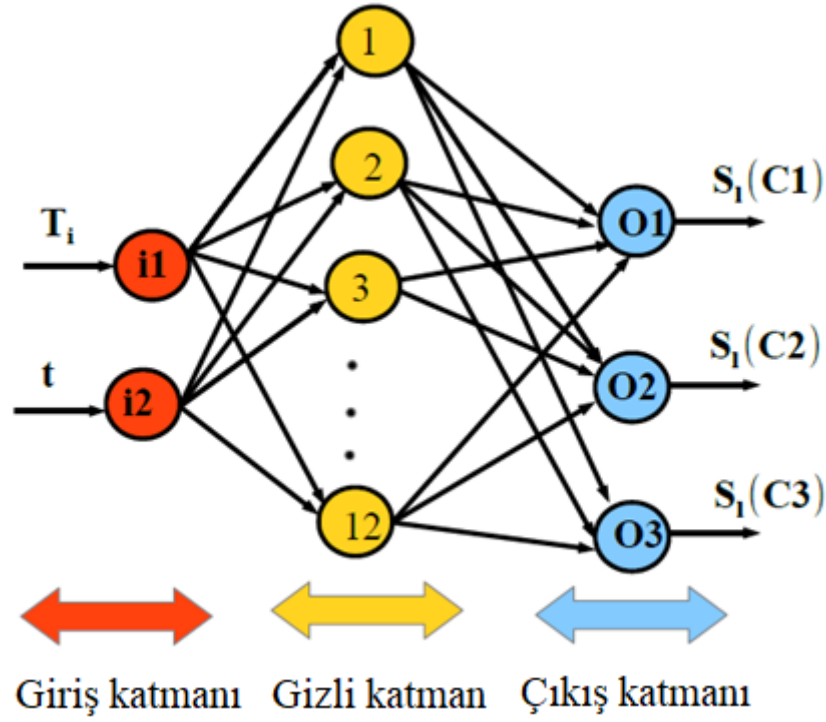
$$MSE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i^{CFD} - y_i^{ANN})^2 \quad (5.35)$$

Ağın performans ölçütü için kullanılabilecek başka bir parametre model, aşağıdaki gibi verilen korelasyon katsayısıdır (R):

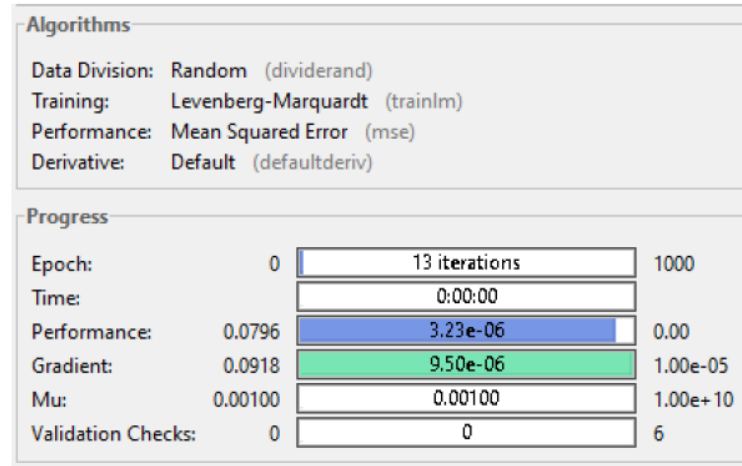
$$R = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i^{CFD} - \bar{y}^{CFD})(y_i^{ANN} - \bar{y}^{ANN})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^{CFD} - \bar{y}^{CFD})^2 (y_i^{ANN} - \bar{y}^{ANN})^2}} \quad (5.36)$$

M, çalışmadaki sayısal simülasyon veri seti sayısını, $\bar{y}$ ortalama değeri temsil etmektedir. Eğitim aşaması boyunca MSE azaltılır ve sapma terimleriyle ağ ağırlığı buna göre ayarlanır. CFD, HAD kodunu ANN ise YSA algoritmasını temsil eder. Farklı veri kümeleri için MSE ve R değerleri Şekil 5.87b’ de verilmiştir. Burada, MSE değerlerinin sıfıra, R değerlerinin de bire yakın olması tahminlerin doğruluğunu göstermektedir.

Şekil 5.88 ve Şekil 5.89’ da T=317 K ve T=346.5 K kurutma havası giriş sıcaklıklarında, sıvı doygunluğunun zamana bağlı değişimi için HAD ve YSA yöntemlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Konvektif kurutma performansının dinamik özellikleri, sınır ağları yöntemiyle daha doğru bir şekilde yakalanmıştır. Bu grafiklerde ayrıca, YSA ve HAD arasındaki sapmalar verilmiştir. Farklı modeller arasındaki en yüksek sapma %1,5 olarak belirlenmiştir, bu da YSA’nın yüksek doğruluk içerdiğini göstermektedir.



Şekil 5.86 Girdi, çıktı ve katmanları içeren bir sinir ağı mimarisi



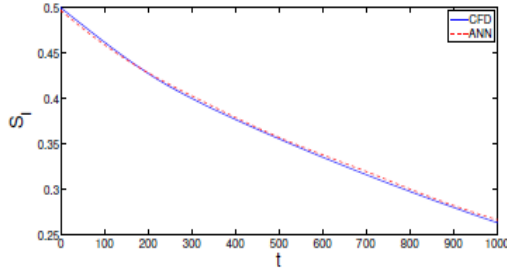
(a)

Results

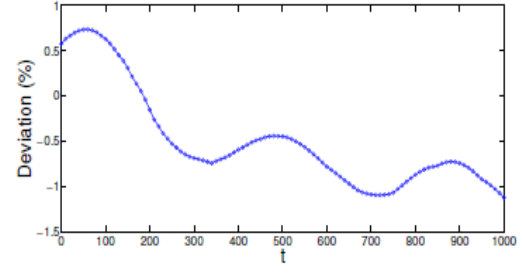
	Samples	MSE	R
Training:	364	3.22973e-6	9.99693e-1
Validation:	121	3.97300e-6	9.99647e-1
Testing:	121	4.06628e-6	9.99574e-1

(b)

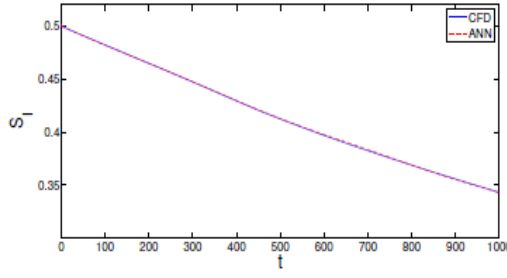
Şekil 5.87 Sinir ağı modeli algoritması (a) ve eğitim, doğrulama ve test için numune sayısı, ortalama kare hatası (MSE) ve R değerleri (b)



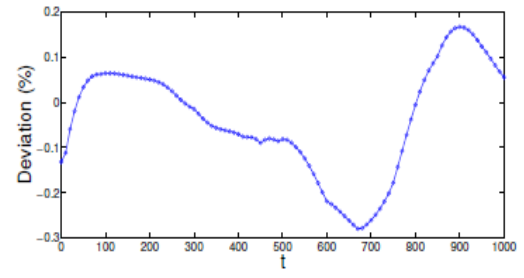
(a) C1, $T_i=317$ K



(b) C1, $T_i=317$ K

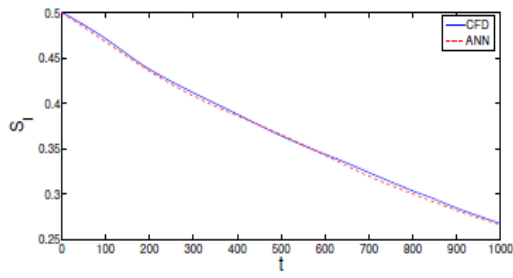


(c) C3, $T_i=317$ K

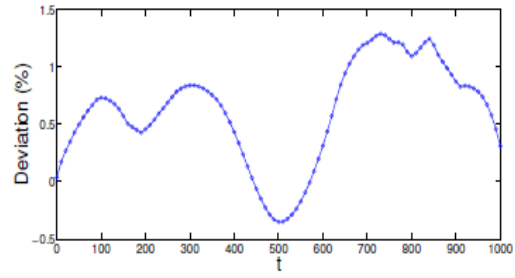


(d) C3, $T_i=317$ K

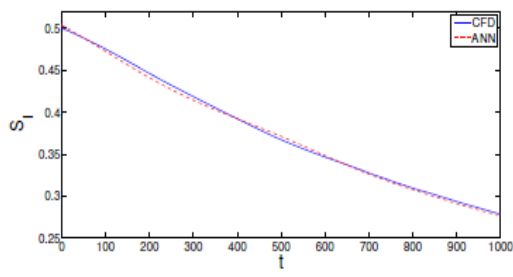
Şekil 5.88 C1 ve C3 cisimleri için 317 K kurutma sıcaklığında S_l değerlerinin zamana bağlı değişimi (a, c) ve YSA ve HAD sonuçlarının karşılaştırılması (b, d)



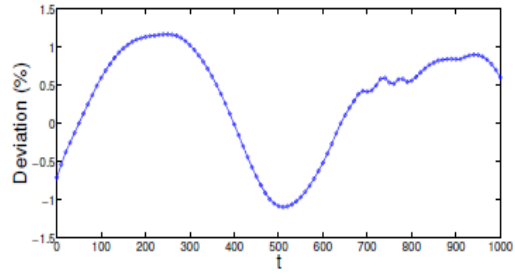
(a)



(b)



(c)



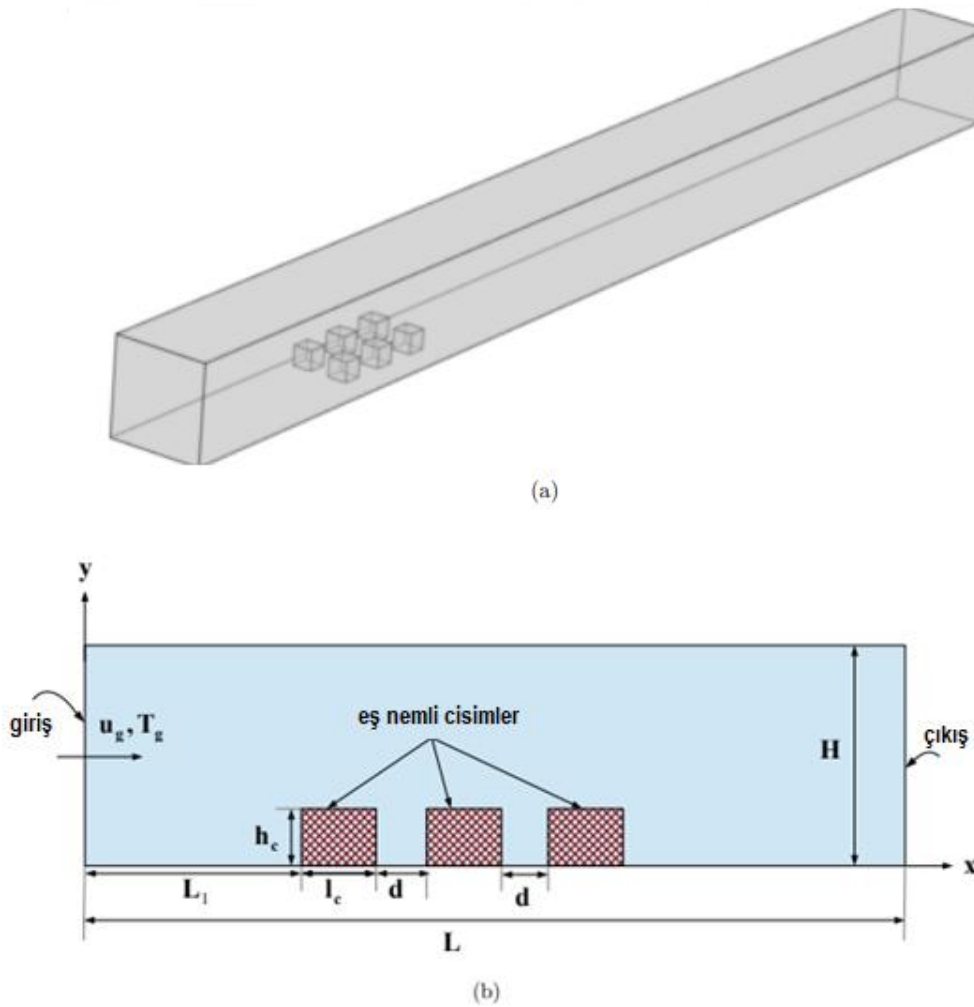
(d)

Şekil 5.89 C1 ve C3 cisimleri için 346,5 K kurutma sıcaklığında S_l değerlerinin zamana bağlı değişimi (a, c) ve YSA ve HAD sonuçlarının karşılaştırılması (b,d)

5.2.5 POD tekniği kullanarak konvektif kurutma için zamana bağlı matematiksel model geliştirme

a. Problem tanımı

şekil 5.90' da 2B ve 3B gösterimler uygulanan sayısal çalışma için verilmiştir. Kanal içerisinde altı adet gözenekli cisim dşnlmş ve küp şeklindeki cisimlerin boyutları $l_c = h_c = 0.2H$ olarak alınmıştır. Sıcak hava hızı u_g , sıcaklığı T_g , kanal yüksekliği $H = 0,05$ m, kanal yüksekliği $L = 0,15$ m ve kanal derinliği $H = 0,05$ m' dir. Cisimler arası mesafe akış yönünde d olarak gösterilmiş olup simlsyon süresinde değiştirilmiştir. Cisimsel arası yanal mesafe ise $z = 0,4$ olarak alınmıştır.



şekil 5.90 çalışma 4.2.5 için geometri Görünümleri (a) 3B ve (b) 2B

b. POD yöntemi ve elde edilen sonuçlar

Çalışmada, uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) yaklaşımı kullanılmıştır. Zamana bağlı üç boyutlu birleştirilmiş yüksek doğruluklu simülasyonlar ciddi zaman gerektirmektedir. HAD çözümleri için, Intel (R) Xeon (R) CPU E5-1650 v3 3.50 GHz 32 GB RAM özelliklerindeki iş istasyonu kullanılmış olup 0,1 saniye zaman aralığında yaklaşık 70 saat neticesinde sonuç alınmıştır.

Uzun hesaplama süreleri ve hafıza gereksinimlerinin azaltmak için, POD tekniği baz alınarak düşük mertebeli modeller kurulmuş ve gözenekli nemli bloklar için sıcaklık ve alan değişkenleri çözülmüştür. Farklı parametreler için alan değişkeninin tahmini 3 boyutlu bütünleşik simülasyonlarına göre çok daha kolaydır. Denklem 5.38'de POD modları ve modal katsayıları içeren data takımı verilmektedir.

$$\begin{aligned} T &= \bar{T} + \sum_{k=1}^{NT} aT_k(t, u_g, T_g) \psi^T(x, y, z) \\ c_v &= \bar{c}_v + \sum_{k=1}^{NC_v} aC_{vk}(t, u_g, T_g) \psi^{c_v}(x, y, z) \end{aligned} \quad (5.37)$$

Burada NT ve NC_v modülleri kullanılmıştır. Çözücü tarafından bir sonraki adımda özdeğerlere ait oluşturulan integral şu şekildedir:

$$\int_v \langle T'(x) \otimes T'(x') \rangle \psi(x') d' = \psi(x) \quad (5.38)$$

Bu eşitlik yoluyla POD modları elde edilir. Mevcut çalışmada, POD modlarını ve tekil değerleri elde etmek için tekil değer ayrıştırması kullanılmıştır. Birinci mod, enerji içeriğinin en yüksek fraksiyonuna sahiptir, ikinci mod, enerjinin en büyük ikinci kısmına sahiptir ve bu böyle devam eder. Mod katsayıları, verilerin POD modlarına yansıtılması ve mod ortogonalite koşulunun kullanılmasıyla elde edilir.

Sıcaklık (T) ve konsantrasyon (c_v) verileri, 303 ile 343 arasında değişen T_g giriş sıcaklıkları ve 0.15 ile 0.5 arasındaki giriş hızı u_g değerleri için kanaldan ve gözenekli bloklardan toplanır. Parametrik varyasyon sıcaklık için 5 K aralıkla (9 değer), hız için 0,05 m / s (8 değer) aralıkla T_g' den alınmıştır. 0 ile 2000 arasındaki zaman anlık görüntüleri 5 saniyelik aralıklarla alınmıştır (401 değer). Sıcaklık ve konsantrasyon için toplam veri seti, 129336 uzamsal veri noktasına sahip 28800 anlık görüntüden oluşur. Tekil değerler ve

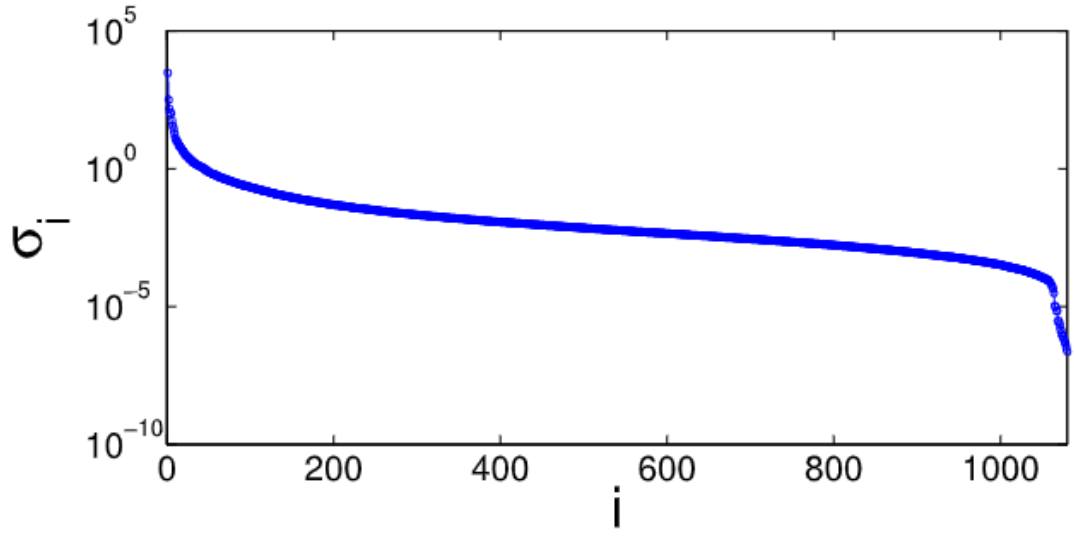
modsal katıklar Şekil 5.91' de gösterilmektedir. Verileri temsil etmek ve doğru bir düşük sıra modeli elde etmek için yeterli sayıda mod olması önemlidir. Sıcaklık verilerine kıyasla konsantrasyon verileri için aynı kümülatif enerji içeriğini elde etmek için daha fazla moda ihtiyaç vardır. Modal katkı (MC) şu şekilde verilir:

$$MC = \frac{\sum_{k=1}^{NT} \sigma_k}{\sum_{k=1}^m \sigma_k} \quad (5.39)$$

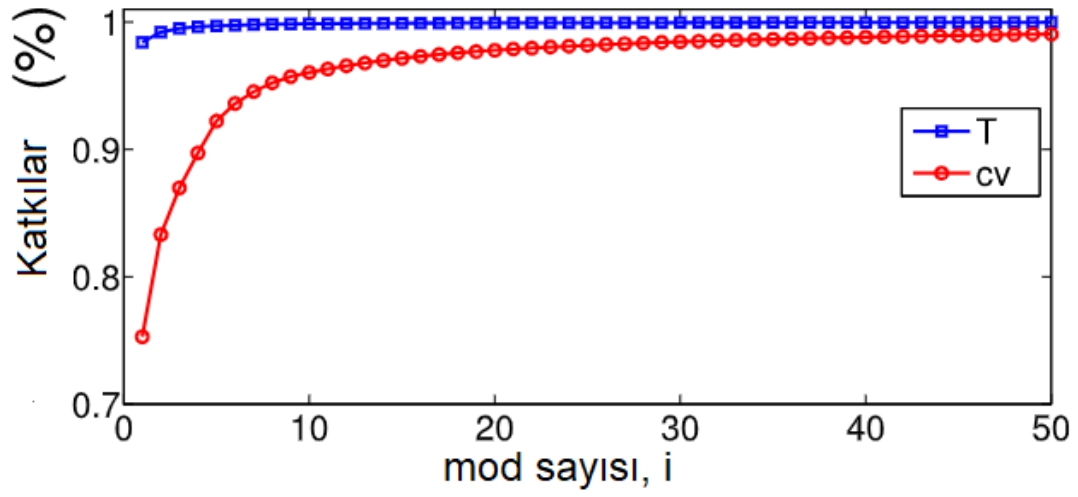
MC'nin 0,999'a eşit olduğu modların sayısı sıcaklık (NT = 10) ve c_v (NCv = 45) için mod sayısı olarak alınır.

Zamana bağlı mod katsayıları, sıcak kuru hava giriş hızına ve sıcaklığa bağlıdır. Şekil 5.92, u_g 'nin 2., 3. ve 5. c_v -POD mod katsayılarının değişimi üzerindeki etkisini göstermektedir. T_g 'nin ikinci c_v -POD ve T-POD modal katsayılarının değişimi üzerindeki etkileri Şekil 5.93' de verilmiştir. Modal katsayılar, POD modları uzamsal bilgiye sahip olduktan sonra tahmin yapmanın daha kolay olduğu u_g ve T_g değerlerine bağlıdır. İlgili herhangi bir alan değişkeni, POD modal katsayılarının doğru tahminiyle elde edilebilir. Bu katsayılar daha sonra POD modları ile çarpılarak hesaplama alanı içindeki herhangi bir konumda bir sıcaklık veya evre tahmini elde edilir.

Şekil 5.94, 5.95 ve 5.96 çeşitli konumlar ve POD ile tahmin edilen ve yüksek doğrulukta HAD simülasyonları ile elde edilen sıcak havanın farklı giriş sıcaklıkları ve hızları için x eksenini boyunca konsantrasyon ve sıcaklık dağılımlarını karşılaştırılmıştır. HAD simülasyonu ve POD arasındaki genel uyumun iyi olduğu görülmektedir.

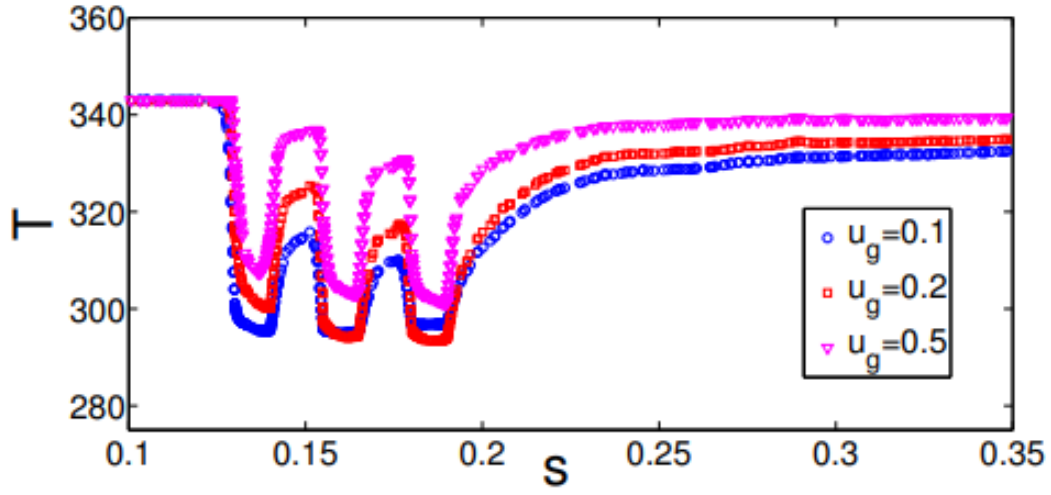


(a)

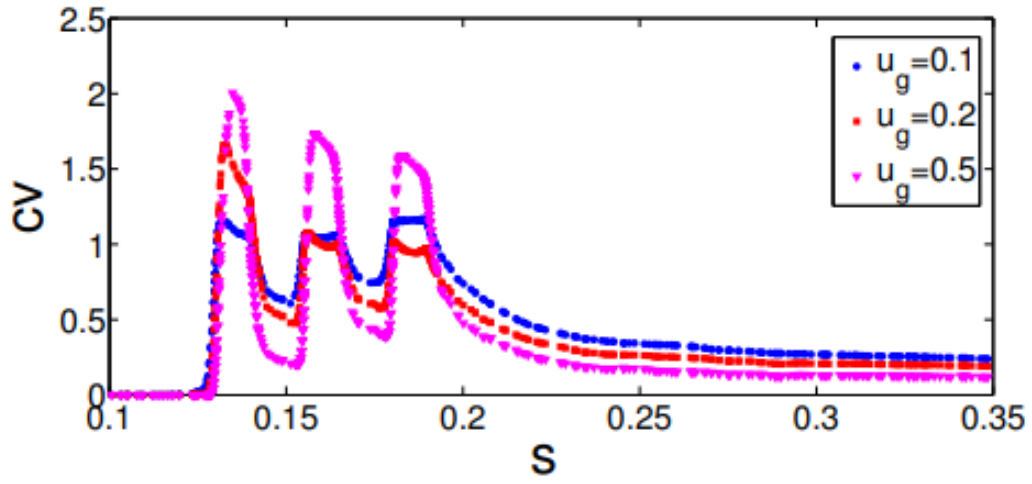


(b)

Şekil 5.91 Buhar konsantrasyonu için tekil etkiler (a) ve modal katkılar (b)

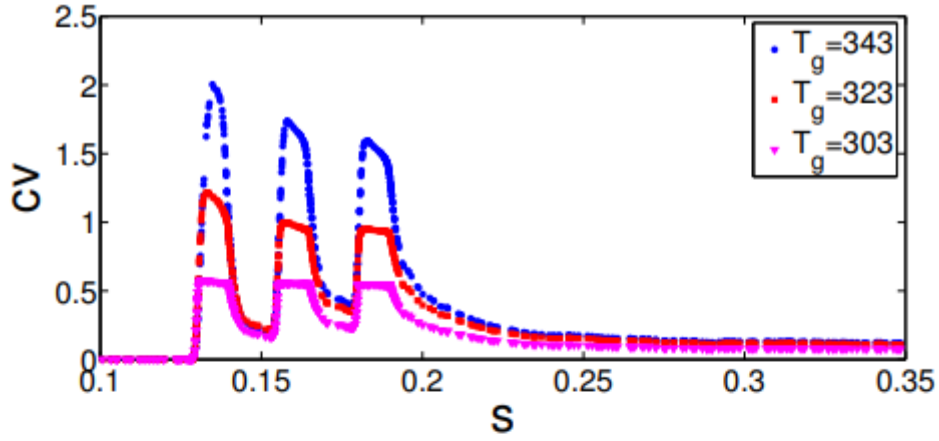


(a) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $T_g=343$, $t=2000$

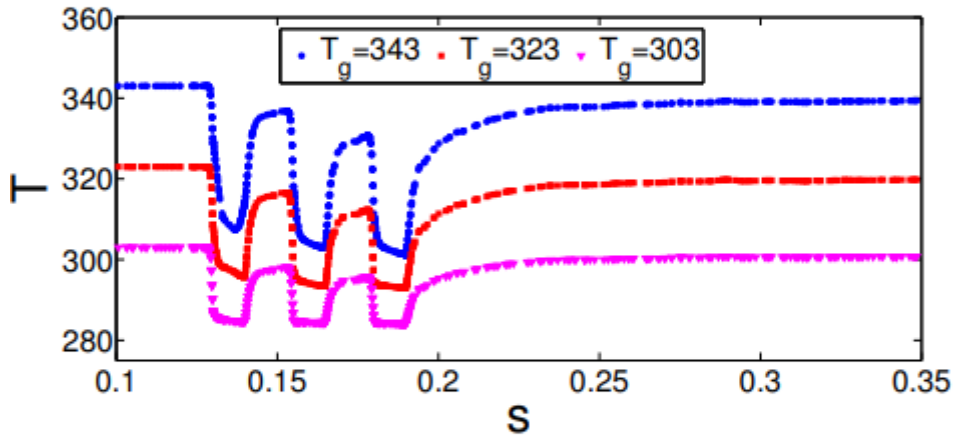


(b) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $T_g=343$, $t=2000$

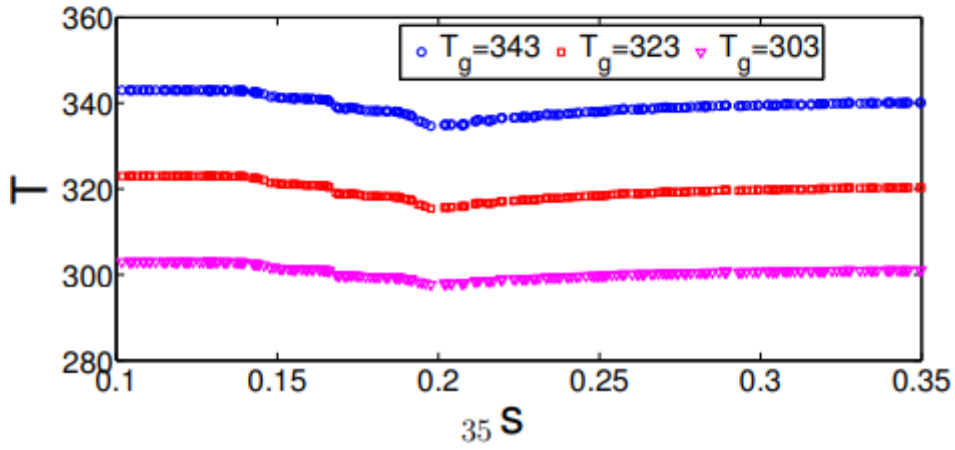
Şekil 5.92 Kuru hava hızının, $t=2000$ s ve $d=0.5$ H zamanında $T=343$ kuru hava sıcaklığı için $Y=0.15$ H, $z=0.2$ H konumundaki sıcaklık ve c_v değişimi Üzerindeki Etkileri.



(a) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $u_g=0.5H$, $t=2000$

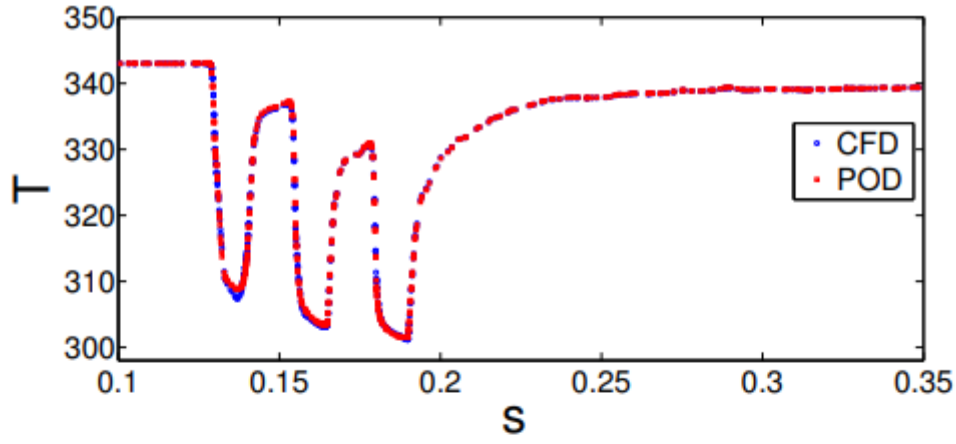


(b) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $u_g=0.5H$, $t=2000$

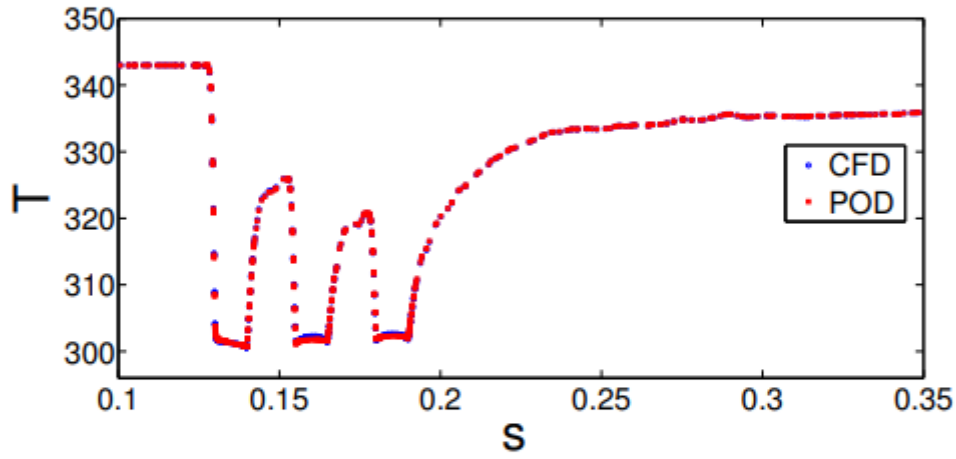


(c) $y=0.15H$, $z=0.4H$, $u_g=0.5H$, $t=2000$

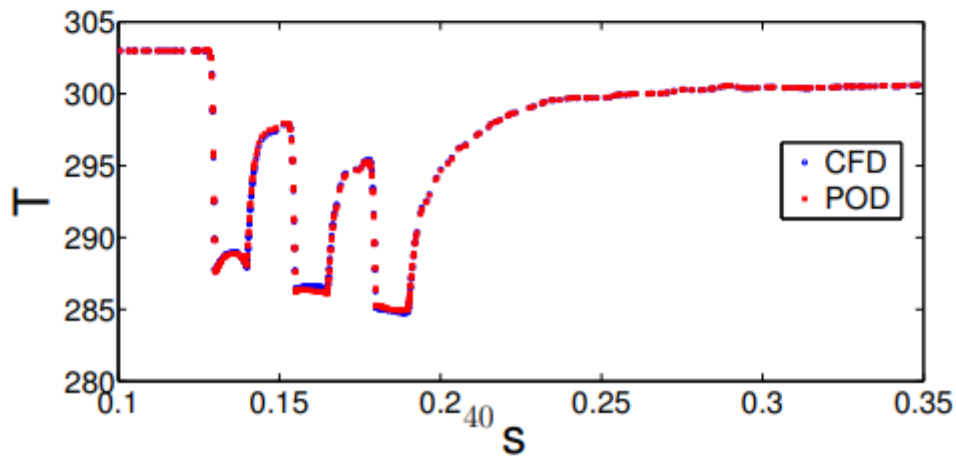
Şekil 5.93 Hava sıcaklığının $z = 0,2 H$ ve $z = 0,4 H$ ($u_g = 0,5 m/s$ K, $d = 0,5 H$) için iki konum için C_v ve sıcaklık değişimi Üzerindeki Etkileri)



(a) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $u_g=0.5$, $T_g=343$, $t=2000$

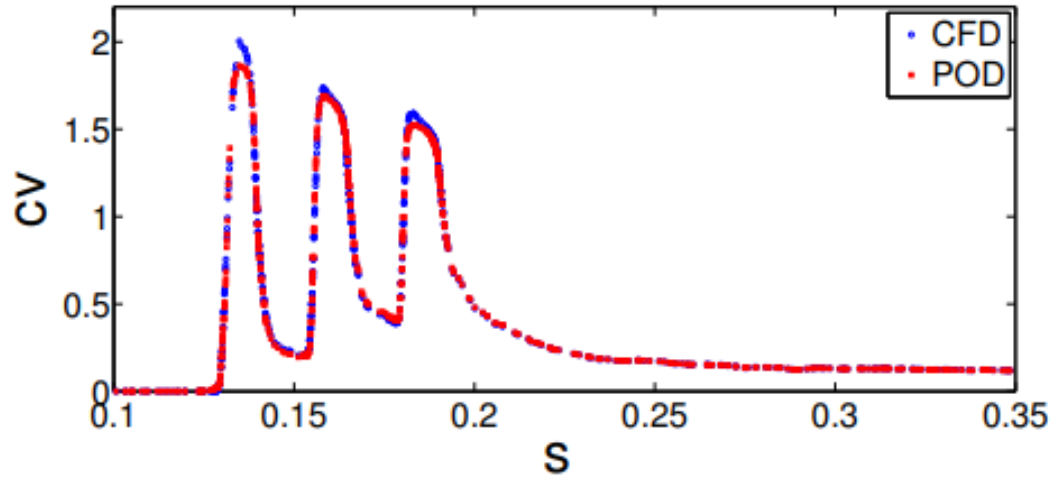


(b) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $u_g=0.25$, $T_g=343$, $t=1000$

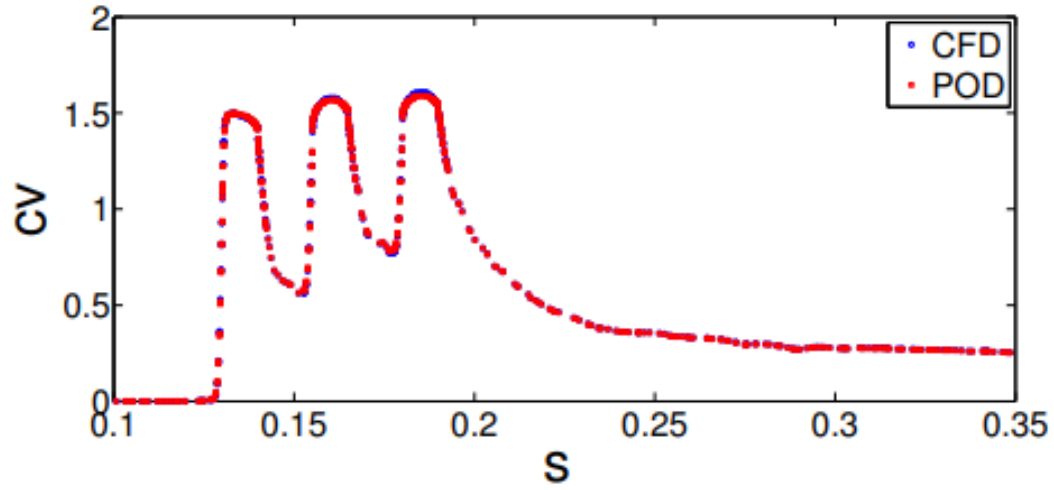


(c) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $u_g=0.35$, $T_g=343$, $t=1500$

Şekil 5.94 Farklı giriş hızları ve süreleri için POD ile $y=0,15 H$, $z=0,2 H$ 'de x eksenini boyunca yaklaşık sıcaklıkların değişimi

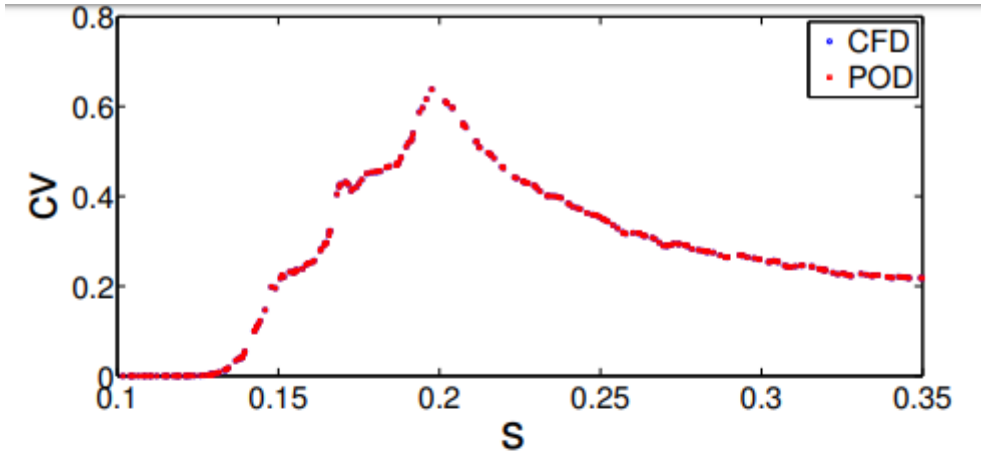


(a) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $u_g=0.5$, $T_g=343$, $t=2000$

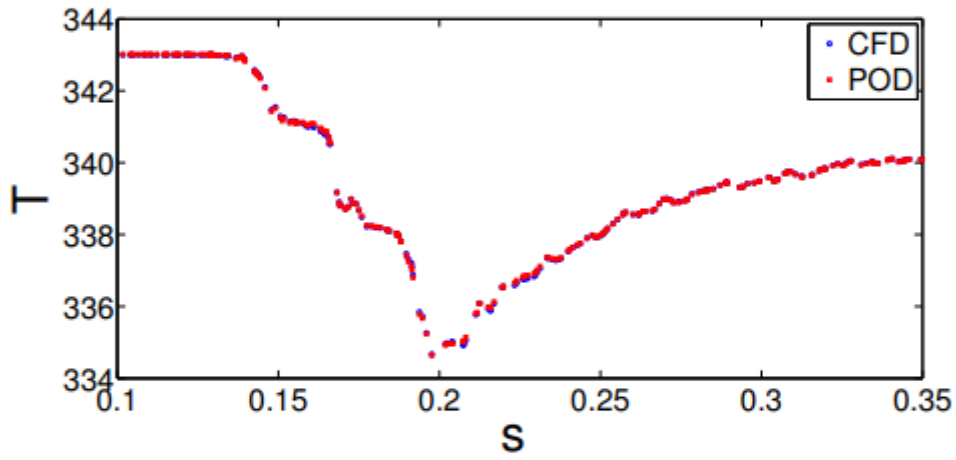


(b) $y=0.15H$, $z=0.2H$, $u_g=0.5$, $T_g=343$, $t=1000$

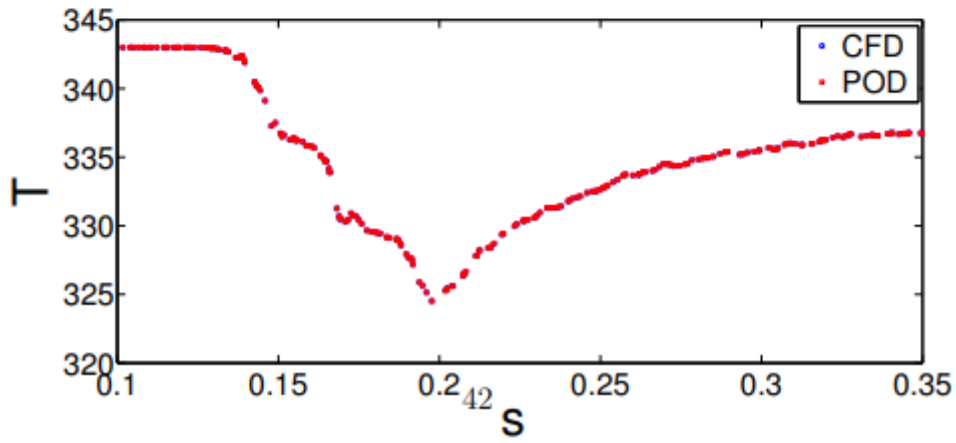
Şekil 5.95 $u_g=0,5$ ve $T_g=343$ 'te iki farklı kez POD ile $y=0,15 H$, $z=0,2 H$ 'de x eksenini boyunca yaklaşık cv 'nin karşılaştırılması



(a) $y=0.15H$, $z=0.4H$, $u_g=0.5$, $T_g=343$, $t=1000$



(b) $y=0.15H$, $z=0.4H$, $u_g=0.5$, $T_g=343$, $t=2000$



(c) $y=0.15H$, $z=0.4H$, $u_g=0.25$, $T_g=343$, $t=1000$

Şekil 5.96 $y=0,15$ H'de x eksenini boyunca yaklaşık c_v (a) ve T (b, c), $T_g=343$ 'te iki farklı zaman ve hız için POD ile $Z=0,4$ H'de x eksenini boyunca yaklaşık c_v 'nin karşılaştırılması

Çalışma kapsamında kurutma dinamiğinin konvektif kurutma durumu için özellikle üç boyutlu çok sayıda gözenekli nemli cisim içeren konfigürasyon durumunda YSA ve POD metotları kullanılarak modellenmesi yapılmıştır. Kurutma dinamiği farklı parametrik girdiler için (hava hızı, sıcaklığı vb.) hem YSA hem de POD ile elde edilmiş ve sayısal akışkanlar dinamiğinden elde edilen sonuçlara uyumlu değerler elde edilmiştir. Üç boyutlu konfigürasyonlarda kurutma analizi farklı kanal geometrilerinde çok zaman almakta ve veri depolama için yüksek kapasitede saklama alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Halbuki YSA ve POD ile yapılacak modellemede farklı parametrik kombinasyonlarda tahmini değerler hem yer hem de zamana bağlı olarak çok kısa bir zamanda elde edilebilmekte ve hesaplama maliyeti yüksek HAD çalışmalarında bu yöntemlerin kullanılması büyük avantaj sağlamaktadır. Isı ve kütle transferinin bütünleşik olarak HAD modellemesi ile parametrik şekilde çözüldüğü çalışmalar doğruluğu yüksek sonuçlar verse de uygulama süresi olarak çok uzun zaman gerektirmektedir (yaklaşık 70-75 saat). Endüstrideki farklı kurutma senaryolarının benzerlerinin sayısal modellemelerinin yapılması gerektiği durumlarda, uzun süreler ek maliyetlere sebep olacak ve sonuca ulaşımı zorlaştıracaktır. HAD modellemesi yerine YSA ve POD modellemesinin yapıldığı çalışmalarda hesaplama süresinin 2 saat gibi kısa bir süreye inerek minimum 1/35 oranında tasarruf sağlandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlardaki uyum da göz önüne alındığında bu yöntemle çok daha pratik şekilde net sonuçların elde edildiği anlaşılmıştır. Bu çalışmalarda, 3 boyutlu HAD modeli yerine kullanılabilecek YSA ve POD' ye dayalı modeller ortaya çıkarılmış ve hesaplama zamanındaki avantaj açıkça ortaya konulmuştur. Tez çalışmasında elde edilen çıktılar 3 boyutlu çok sayıda cisim ihtiva eden durumda sistemlerin kurutma dinamiğinin anlaşılmasında ve ileri tasarım aşamalarında ve hatta deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlardan da yararlanılabileceğini göstermektedir. Bu tür pratik yöntemler sayesinde, endüstride uygulanan pek çok kurutma biçiminin sayısal olarak farklı parametrelerle hesaplanması yapıp, en iyi performansı gösteren senaryonun uygulamaya konulması sağlanabilir. Bu şekilde zaman ve maliyet girdileri de indirgenmiş olacak, yüksek verimli kurutma proseslerine geçiş kolaylaşacaktır.

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, endüstride birçok alanda kullanılan termal bir proses olan kurutma işleminin en yaygın kullanılan tekniğini, konvektif kurutma prosesini incelemek ve bu proseste meydana gelen fiziksel olayları hem kurutucuyu hem de kurutulan ürünü ele alarak ortaya koymak, kurutma işlemini etkileyen önemli fiziksel parametreleri belirlemek ve bu parametrelerin kurutma performansı üzerinde ne yönde etkileri olduğunu anlamak, sonuç olarak da en verimli kurutma prosesini elde edebilmektir. Bu sebeple konvektif kurutma işlemi fiziksel bir model olarak ele alınmış ve doğruluğu yüksek yöntem ve kodlar kullanılarak prosesin aşamaları sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel yöntemlerdeki yüksek maliyetler ve istenilen sonuca ulaşmada kat edilen emek ve zaman kayıpları göz önüne alındığında, yüksek doğruluklu sayısal çalışmalar birçok fiziksel problem için hızlı ve kullanışlı birer araştırma ve analiz yöntemi olmuşlardır. Yapılan sayısal çalışmalarda etkin bir yol ve metotla ilerlenecek olursa, hem fiziksel problemi derinlemesine anlamak kolaylaşmakta hem de daha tutarlı ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Sayısal çalışmalarda öncelikle gereksiz ve problem üzerinde fazla etkisi olmayan parametreler belirlenerek problemin karmaşıklığını ve hesaplama süresini azaltmak amacıyla bu parametreler problemde ihmal edilebilmelidir. Bu sayede problem daha anlaşılır ve amaca yönelik olur ve gereksiz hesaplama süreleri de engellenmiş olur. Mevcut çalışmada da bu tür durumlar göz önüne alınarak çalışmalar kademe kademe ilerletilmiş ve sonuca ulaşılmıştır. Tez kapsamında aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır:

- İki boyutlu hareketsiz nesnenin laminar akışta kurutulması, hava hızının etkisi
- İki boyutlu hareketli nesnenin laminar akışta kurutulması, hız ve sıcaklığın etkisi
- Üç boyutlu kanalda sabit cisimlerin kurutulması, boyut ve kanal içi yerleşim etkisi
- Üç boyutlu kanalda hareketli cisimlerin kurutulması, hız, sıcaklık, kanal içi yerleşim etkisi
- Üç boyutlu cisimlerin konvektif kurutulmasında boyut ve şekil etkisi
- İki boyutlu kanalda iki nesnenin kurutulmasında konvektif kurutma için optimizasyon çalışması
- Üç boyutlu kanalda birden çok cismin kurutulmasında konvektif kurutma için optimizasyon çalışması

Tez kapsamında konvektif kurutma işlemi HAD analizleriyle çeşitli konfigürasyonlar için hem iki boyutlu hem de üç boyutlu sistemler için ele alınmıştır. Nemli cisimler için gözenekli olması durumu ele alınmış ve cismin hareketi de bazı çalışmalarda göz önünde bulundurulmuştur. Yapay sinir ağları ve POD tekniğine dayalı yöntemler konvektif kurutmada önemli araçlar olarak HAD analizleriyle başarıyla kullanılmıştır. Konvektif kurutma dinamiğinin etkin bir şekilde tahmin edilmesi ve HAD analizlerinde çok uzun zaman gerektirecek çözümlerde bu yöntemlerin kurutma prosesinde performans tahminleri için kullanılabileceği gösterilmiştir. Yine tez çalışmasında optimizasyon algoritması HAD ile birlikte kullanılmış ve zamana bağlı çok uzun hesaplama süresi gerektiren konvektif kurutmada en iyi performansı veren optimum geometrik ve çalışma koşullarının belirlenmesini sağlamıştır. Tez içerisinde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1- Kurutma havasının akış hızı ve sıcaklığı konvektif kurutmadaki önemli parametrelerdendir. Yapılan çalışmalarda kurutma havası hızının ve sıcaklığının hem iki boyutlu hem de üç boyutlu ve çok sayıda gözenekli ve nemli cisim içeren sistemlerde kurutma performansı üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Ele alınan çalışmaların birinde, [340], 303 K kuru hava sıcaklığı değerinde, nem içeriğindeki azalma hava hızının 0.1 m/s olduğu durumda % 19,3 iken, 0.55 m/s hava hızı için % 49,4'e çıkmıştır. Yine aynı çalışmada 343 K kuru hava sıcaklığı değerinde, nem içeriğindeki azalma hava hızının 0,1 m/s olduğu durumda 44,8 iken, 0,55 m/s hava hızında %85,7'ye çıkmıştır. 343 K sıcaklıkta 0,1 m/s için elde edilen yaklaşık kurutma oranı, 303 K sıcaklıkta ancak 0,55 m/s hava hızıyla elde edilebilmiştir. Hava hızının olumlu etkisi çalışmaların çoğunluğunda görülmekle birlikte, nesnelerin birbirine çok yakın olduğu bazı konfigürasyonlarda, hava akımı cisimlerin yüzeylerini süpürüp geçmekte ve ara alanlarda çok düşük hız bölgeleri oluşmaktadır bu yüzden de yüksek hızlar özellikle arkadaki nesnelerden olan nem kaybını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durum için yapılabilecek çözüm mümkünse cisimler arası mesafeyi bir miktar açmak ya da hava sıcaklığını kabul edilebilir düzeyde arttırmak olabilir. Aynı çalışmada [341], gözenekli ve nemli cisimler arası mesafenin 5 katına çıkarılması durumunda kanalın arka kısmındaki nesnedeki toplam nem kaybının %18,06' dan % 32,43' e çıktığı görülmüştür. Hava hızının etkisinin cisimlerin kanal içindeki yerleşiminden etkilendiği görülmüştür.

2- Kurutulacak gözenekli nemli cisimlerin kanal içinde hareketli olması konvektif kurutmada duran cisimlere göre hava hızı ve sıcaklığının performans etkisi farklılıklar göstermektedir. Üç boyutlu kanalda çok sayıda gözenekli nemli cisimlerle yapılan çalışmada 313 K ve 333 K kurutma sıcaklıkları arasında nem içeriği azalmasında %2'ye varan artış vardır, bu fark yüksek sıcaklığa duyarlı gıda ürünleri için ihmal edilebilir düzeydedir [338]. Ancak artan hava hızı da buharlaşma üzerinde artan bir etkiye sahiptir, nem içeriğindeki en fazla azalma %63,12 kayıpla 0,8 m/s hava hızında görülmektedir. Hareket halindeki gözenekli cisimlerin konvektif kurutulmasında, hava hızının etkisinin, sıcaklığın etkisinden daha görünür olduğu gösterilmiştir [338,340].

3- Kurutulacak cisimlerin boyutunun kurutma performansı üzerinde etkisi vardır, tahmin edildiği gibi, küçük boyutlu cisimler daha çabuk kururken büyük boyutlular için özellikle iç kısımlarda nemi yüksek bölgeler kalabilmektedir. Bu durumda büyük boyutlar için kurutma süresini bir miktar arttırmak bir çözüm olabilir. Üç boyutlu şekil ve boyut etkisinin incelendiği bir çalışmada, silindir cisimde cisim boyutunun 1/4 oranında küçültülmesiyle nem kaybının %20,69' dan %97,49' a çıktığı görülmüştür. [341].

4- Kurutma kanalı içerisinde ürünlerin dizilişi de kurutma performansı üzerinde etkilidir. Yapılan optimizasyon çalışmasında arkadaki cisimlerin yatay mesafede öndeki üründen uzaklığının artması kurutma performansını olumlu etkilemektedir [342]. Üç boyutlu çalışmada, optimizasyon çalışması sonucunda en iyi kurutma performansını veren dikey, yatay ve yanal cisimler arası mesafe hesaplanmış, elde edilen sonuçlara göre nem kaybının optimum aralıklarda en yüksek olduğu görülmüştür. Optimum aralıkta cisimlerdeki nem kaybı ile aralığın maksimum olduğu durumda cisimlerdeki nem kaybı karşılaştırıldığında, birinci cisim için %2,6, ikinci cisim için %0,2 ve üçüncü cisim içinse %7,5 daha fazla nem kaybı optimum aralıkta görülmüştür. Dikey mesafede de arkadaki cismin öndekinin tam arkasında olması, arkadaki cismin kurutulması açısından olumsuz etki oluşturmaktadır. Ürünler arası dikey mesafe ayarlanırken, ürünlerin kanal duvarlarına olan mesafesinin de belli ölçüde tutulması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır.

5- Kurutulacak ürünün şeklinin, kurutma performansı üzerinde etkisi görülmüştür. Keskin ve çok köşeli geometrilerde bölgesel olarak nem içeriklerinde yüksek farklar görülebilmektedir. Kübik ya da dikdörtgen prizma şeklindeki cisimlerde köşelerde nem

kaybının çok yüksek olduğu görölse de ortalama nem kaybına bakıldığında dairesel cisimlerin daha homojen ve ortalama olarak daha fazla nem kaybı yaşadığı görölmüştür. Konvektif kurutmada nem azalması ele alınan tüm şekiller için daha yüksek hızlar için yüksek olarak bulunmuştur. Farklı şekildeki cisimlerin kanal için kurutulmasında en yüksek hava hızında ($u = 2 \text{ m/s}$ 'de), nem miktarındaki azalama dikdörtgen için %88,84, üçgen için %98.07 ve dairesel cisim için %99,38 olarak elde edilmiştir [343].

6- Kanal içerisinde cisme hareket kazandırmadaki temel amaç, konveyörlü kurutucularda olduğu gibi kurutma işleminin sürekliliğini sağlamak ve böylece daha kısa sürede daha fazla ürünü kurutmaktır. Bu sebeple sayısal çalışmada kurutulan cisimlere hareket kazandırılmış, sabit cisimlerle hareketli cisimler arasında kurutma performansı farkının kabul edilebilir düzeyde olduğu görölmüştür [338,340].

7- Cismin başlangıçtaki nem içeriği, gözenekliliği, ısı iletkenliği, yoğunluğu gibi fiziksel özellikleri kurutma prosesinde önemli parametrelerdir. Kurutma havası sıcaklığı, hızı, süresi, cisimlerin şekli, boyutu kanaldaki biçimi gibi değişkenlere karar verilirken cisme ait belirtilen özellikler göz önünde bulundurulmalıdır.

8- Kurutma prosesinin süresi de verimli ve etkin bir kurutma işlemi gerçekleştirebilmek için önemli bir etkidir. Kurutulacak ürünün nem miktarı, boyutu, hava hızı, sıcaklığı, kurutma odası hacmi gibi parametreler kurutma süresini etkileyen faktörlerdir.

9- Tez çalışması kapsamında önemli parametrelerin farklı biçimlerde kurutmaya etkileri yapılan çalışmalarda incelenmiş ve hangi parametrenin ne şartlarda ne tür etki gösterdiği analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, endüstri uygulamaları için faydalı bir kaynak niteliği taşıma amacıyla literatüre sunulmuş olup, uygulamadaki maliyetleri indirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmaların farklı kurutma proseslerine adapte edilerek uygulayıcıya kolaylık sağlaması hedeflenmiş, bu sayede yüksek verimli kurutma proseslerinin gerçekleşmesi amaçlanmıştır.

10- Optimizasyon çalışmaları, zamana bağlı ve birçok farklı parametrenin değerlendirildiği lineer olmayan problemlerin çözümü için, doğruluğu yüksek ve pratik

özmler ortaya koymuştur. Yapılan optimizasyon yöntemleri çalışma sürelerini önemli miktarda azaltmıştır (yaklaşık 1/38 oranına kadar azalma), sonuçlar parametrik HAD çözümleriyle karşılaştırıldığında yüksek uyum ortaya çıkmaktadır. Bu sayede kurutma ile ilgili endüstrideki farklı senaryoların uygulanabilirliğini kolayca test edilebilmesi ve optimum kurutma performansına ulaşmayı kolaylaştırması sağlanmıştır.

11- Gözenekli cisimlerin konvektif kurtulmasında HAD analizleri hem kanal içinde hem de gözenekli cisim içinde sistemi yöneten denklemlerin eş zamanlı olarak özölmesi sonucu elde edilmiştir. Literatürde daha önceki çalışmalara bakıldığında kanal içinde akış ve ısı transferi özölmesinin önce yapıldığı ve nemli cisim için sınırlarda ısı ve kütle transfer katsayılarının belirlendiği görölmüştür. Daha sonra nemli cisim içinde sistemi yöneten denklemler belirlenen kütle ve ısı transfer katsayılarının sınır şartı olarak ele alınarak özölünmüştir. Bu ise tez çalışmasında ele alınan üç boyutlu, zamana bağlı ve çok sayıda nemli cismin bir arada bulunduğu bir konvektif kurutma sisteminde uygulanabilir değildir. Herbir nemli cismin sınırlarında ısı ve kütle transferinin belirlenmesi ve zamana bağlı olarak ifade edilmesindeki zorluklardan hem kanal içinde hem de nemli cisimlerdeki denklemlerin birlikte eş zamanlı özölmesi daha uygundur ve bu çalışma kapsamında ele alınan farklı sistemler için uygulanmıştır.

12- Çok sayıda parametre içeren gözenekli konvektif kurutma prosesinde HAD analizleri özellikle üç boyutlu durumda denklem takımlarının (kanal ve gözenekli cisim için) eş zamanlı özölümü çok uzun zaman almaktadır. Zamana bağlı proses için küçük zaman adımlarında her bir özölümün (zaman adımının) saklanması da problem teşkil etmektedir. Bu tip durumlarda HAD simölasyonlarına yardımcı olacak yöntemler geliştirmek önemlidir. Bu tez çalışmasında önce yapay sinir ağlarına (YSA) daha sonra da POD yöntemine dayanan konvektif kurutma performansının etkili şekilde tahminini sağlayan metotlar kullanılmıştır. YSA yönteminde kurutma dinamiğini modellemek için zaman fazladan bir parametre olarak gözönüne alınmış ve ileri beslemeli sinir ağları geri yayılım algoritması kullanılarak kurutma hava hızı ve sıcaklığı gibi parametreler girdi olacak şekilde tahminler yapılmıştır ve kurutma dinamiği üç boyutlu çok sayıda gözenekli cisim içeren konfigürasyonda başarılı bir şekilde ortaya konulmuştur [344].

13- POD yönteminde ise YSA yönteminden farklı olarak mekâna bağlı değerlerin tahmini için de kullanılabilir. Kanal içinde ve kanal/cisim ara yüzeyindeki sıcaklık ve nem değerlerinin HAD analiz sonuçları kullanılarak parametrik olarak elde edilebilir. Elde edilen zaman bağlı POD modları ve modal katsayıların çarpımından elde edilen ara yüzey sıcaklıkları sınır şartı girdisi olacak şekilde sadece gözenekli ve nemli cisimdeki denklem takımının çözümü için kullanılabilir [345].

14- Çalışma kapsamında ayrıca zamana bağlı konvektif kurutma prosesinde optimizasyon algoritması da entegre edilmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu kanal konfigürasyonda çok sayıda nemli cisim içeren durumda HAD analizleriyle birlikte optimizasyon algoritması kullanılmıştır. İlk aşamada kütle aktarımı olmadan gözenekli cisimler arasındaki optimum aralığı bulmak için COBYLA optimizasyon algoritması kullanılmıştır [344,346]. Daha sonra, gözenekli nemli nesneler için ısı ve kütle transfer denklemleri, en iyi konvektif kurutma performansını sağlayan optimum aralıkta kanal akış denklemleriyle birleştirilmiştir. Zamana bağlı parametrik varyasyonunla yapılan denklemlerin eş zamanlı olarak çözüldüğü simülasyon sonuçlarının optimum değeri vermediği ve tez çalışması içerisinde önerilen bu yöntemle en iyi konvektif kurutma performansının sağlandığı gösterilmiştir. Kanalda ve gözenekli nemli nesnelerde parametrik zaman bağlı birleştirilmiş ısı ve kütle taşınım denklemlerinin hesaplama zamanı 75 saat 12 dakika iken optimizasyon destekli simülasyon yöntemde hesaplama zamanı 2 saat 33 dakikaya indirilmiştir.

15- HAD analizleri kullanarak modelleme ve simülasyon, yeni kurutucular geliştirmede, mevcut sistemlerin modifikasyonunda, enerji tasarrufunda ve proses optimizasyonu gibi konularda yardımcı olabilir. Yeni ortaya çıkan kurutma teknolojilerinde akışkan akışı, ısı ve kütle transferi ve ayrıca ürün kalitesi niteliklerini tahmin etmek için de kullanılabilir. HAD analizleri, son yıllarda gıda endüstrisinde çok fazla ilgi gören ve kullanılan modelleme tekniğidir. Gıda ve tarım ürünlerinin kurutulmasında ve farklı kurutma türlerinde HAD uygulamasında büyük bir ilerleme kaydedilmiştir. HAD yönteminin farklı türlerinde, kurutma kinetiği modelleri gibi yeni modelleme teknikleri ile birleştirilmesi, enerji, zaman ve en önemli faktör olan “kalite” ile ilgili proses optimizasyonunda kullanılması son yıllarda mümkün olmuştur.

16- HAD yöntemlerinin konvektif kurutmada endüstriyel ve ticari ölçekte kullanılmasında pratikte birtakım zorluklar mevcuttur. Daha gerçekçi konfigürasyonlar (kurutulacak cisimlerin gözenekli olması, üç boyutlu akış etkileri, cisimlerin hareketleri, karmaşık geometriler vb.) ile yapılan HAD analizlerinde modellemede ve simülasyonda zorluklar vardır. Özellikle çok sayıda parametrenin ele alındığı üç boyutlu simülasyonlarda hesaplama zamanı ve maliyeti önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla HAD analizlerinin pratikte yararlı kılacak gerekçi modellemeye imkân sağlayacak yöntemlerin HAD analizleriyle birlikte geliştirilmesi ve modelleme süreçlerine entegre edilmesi, yapılacak simülasyonların başarısı açısından elzemdir. Bu tez çalışmasında geliştirilen modelleme teknikleri HAD modellemesinde yardımcı olmak üzere etkili simülasyonlar yapılmasına yöneliktir ve konvektif kurutma prosesinde ele alınan konfigürasyonlar için etkili sonuçlar vermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] T. Defraeye, Advanced computational modelling for drying processes – A review, *Appl. Energy*. 131 (2014) 323–344.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.06.027>.
- [2] A.J. Mujumdar, ed., *Handbook of Industrial Drying*, 3rd ed., CRC Press, New York, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>.
- [3] T.J. Jamaledine, M.B. Ray, *Application of Computational Fluid Dynamics for Simulation of Drying Processes: A Review*, <Http://Dx.Doi.Org/10.1080/07373930903517458>. 28 (2010) 120–154.
<https://doi.org/10.1080/07373930903517458>.
- [4] A.S. Mujumdar, Principles, classification, and selection of dryers, in: S. Mujumdar, Arun (Ed.), *Handb. Ind. Dry.*, 4th ed., CRC Press, 2006.
https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=82_OBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=Principles,+Classification,+and+Selection+of+Dryers.+In:+Mujumdar,+AS,+editor.+Handbook+of+industrial+drying,&ots=Mfs3vavPg&sig=IQ8i8T2XAMn_6rjsZp_hCM851EY (accessed August 31, 2021).
- [5] S.J. Kowalski, On the motion of a fluid-saturated porous solid, *Transp. Porous Media*. 9 (1992) 39–47. <https://doi.org/10.1007/BF01039624>.
- [6] I.C. Kemp, Fundamentals of Energy Analysis of Dryers, in: *Mod. Dry. Technol.*, Wiley-VCH, 2012: pp. 1–45. <https://doi.org/10.1002/9783527631681.ch1>.
- [7] C.M. Van't Land, Drying in the Process Industry, *Dry. Process Ind.* (2012).
<https://doi.org/10.1002/9781118105818>.
- [8] N.R. Nwakuba, S.N. ASOEGWU, K.N. NWAIGWE, Energy Consumption Requirements of Agricultural Dryers: An Overview, *Agric. Eng. Int. CIGR J.* 18 (2016) 119–132. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/3863> (accessed August 31, 2021).
- [9] S.R.S. Dev, V.G.S. Raghavan, Advancements in Drying Techniques for Food, Fiber, and Fuel, *Dry. Technol.* 30 (2012) 1147–1159.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2012.692747>.
- [10] *Handbook of Industrial Drying*, CRC Press, 2006.
<https://doi.org/10.1201/9781420017618>.
- [11] J.A. Moses, T. Norton, K. Alagusundaram, B.K. Tiwari, Novel Drying Techniques for the Food Industry, *Food Eng. Rev.* 6 (2014) 43–55.
<https://doi.org/10.1007/S12393-014-9078-7>.
- [12] D.A. Gross, *Edible films and coatings : advances in research and applications*, (n.d.).
- [13] *Handbook of Vegetable Preservation and Processing*, *Handb. Veg. Preserv. Process.* (2015). <https://doi.org/10.1201/B19252/HANDBOOK-VEGETABLE-PRESERVATION-PROCESSING-HUI->.

- [14] Handbook of Vegetable Preservation and Processing, CRC Press, 2015.
<https://doi.org/10.1201/b19252>.
- [15] G. Adiletta, P. Russo, W. Senadeera, M. Di Matteo, Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment, *J. Food Eng.* 172 (2016) 9–18.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.031>.
- [16] G. Adiletta, C. Wijerathne, W. Senadeera, P. Russo, A. Crescitelli, M. Di Matteo, Dehydration and rehydration characteristics of pretreated pumpkin slices, *Ital. J. Food Sci.* 30 (2018) 684–706. <https://doi.org/10.14674/IJFS-1176>.
- [17] I. Doymaz, Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.), *Energy Convers. Manag.* 56 (2012) 199–205.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.027>.
- [18] S.M. Hendorson, Grain Drying Theory (I) Temperature Effect on Drying Coefficient, Undefined. (1961).
- [19] W. Senadeera, G. Adiletta, B. Önal, M. Di Matteo, P. Russo, Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices, *Foods*. 9 (2020). <https://doi.org/10.3390/foods9010101>.
- [20] A.K. Yagcioglu, A. Degirmencioglu, F. Cagatay, Drying Characteristics of Laurel Leaves Under Different Drying Conditions, 7th Int Congr. Agric. Mech. Energy. (1999) 565–569.
- [21] D.A. van Meel, Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, *Chem. Eng. Sci.* 9 (1958) 36–44. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(58\)87005-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(58)87005-0).
- [22] M. Vintilă, A.G. Ghiauş, V. Fătu, Prediction of Air Flow and Temperature Profiles Inside Convective Solar Dryer, *Bull. Univ. Agric. Sci. Vet. Med. Cluj-Napoca. Food Sci. Technol.* 71 (2014). <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-fst:10868>.
- [23] Z. Pakowski, A. Mujumdar, Basic Process Calculations and Simulations in Drying, in: *Handb. Ind. Drying*, Third Ed., CRC Press, 2006.
<https://doi.org/10.1201/9781420017618.ch3>.
- [24] C. Strumillo, T. Kudra, Drying: Principles, Applications, and Design, CRC Press, New York, 1986.
https://books.google.com.tr/books?id=rDSVDACG6GAC&dq=Strumillo,+C,+Kudra,+T.+Drying:+Principles,+Applications+and+Design&lr=&hl=tr&source=gbs_navlinks_s (accessed May 12, 2021).
- [25] J. Crank, THE MATHEMATICS OF DIFFUSION, 2nd ed., OXFORD UNIVERSITY PRESS, OXFORD, 1975.
- [26] S.N. MAROUSIS, V.T. KARATHANOS, G.D. SARAVACOS, EFFECT of PHYSICAL STRUCTURE of STARCH MATERIALS ON WATER DIFFUSIVITY, *J. Food Process. Preserv.* 15 (1991) 183–195.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1991.tb00165.x>.
- [27] A. Mulet, A. Berna, C. Rosselló, Drying of carrots. I. drying models., *Dry. Technol.* 7 (1989) 537–557. <https://doi.org/10.1080/07373938908916608>.

- [28] D.M. Bruce, Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150°C, *J. Agric. Eng. Res.* 32 (1985) 337–348. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90098-8).
- [29] D.S. Jayas, S. Cenkowski, S. Pabis, W.E. Muir, Review of thin-layer drying and wetting equations, *Dry. Technol.* 9 (1991) 551–588. <https://doi.org/10.1080/07373939108916697>.
- [30] W.A.M. McMinn, T.R.A. Magee, Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs, *Food Bioprod. Process. Trans. Inst. Chem. Eng. Part C.* 77 (1999) 175–193. <https://doi.org/10.1205/096030899532466>.
- [31] C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, Model selection in air drying of foods, *Dry. Technol.* 10 (1992) 1097–1106. <https://doi.org/10.1080/07373939208916497>.
- [32] A.A. Pesaran, A.F. Mills, Moisture transport in silica gel packed beds-II. Experimental study, *Int. J. Heat Mass Transf.* 30 (1987) 1051–1060. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90035-4).
- [33] F. Singh, R.P. Lund, D.B. Buelow, An experimental technique using regular regime theory to determine moisture diffusivity, *Eng. Food.* 1 (1984) 415–423.
- [34] J.F. Steffe, R.P. Singh, Diffusion coefficients for predicting rice drying behaviour, *J. Agric. Eng. Res.* 27 (1982) 489–493. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(82\)90087-7](https://doi.org/10.1016/0021-8634(82)90087-7).
- [35] X. Xiong, G. Narsimhan, M.R. Okos, Effect of composition and pore structure on binding energy and effective diffusivity of moisture in porous food, *J. Food Eng.* 15 (1992) 187–208. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(92\)90050-G](https://doi.org/10.1016/0260-8774(92)90050-G).
- [36] Y. İşker, B. Yeşilata, Yapı Malzemelerinin Isı İletim Katsayılarının Tespitine Yönelik Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi, *Harran Üniversitesi Mühendislik Derg.* (2017) 14–21. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/346164> (accessed July 17, 2022).
- [37] N.N. Mohsenin, Thermal properties of foods and agricultural materials, (1980) 407.
- [38] I. Andrianov, V. Danishevskiy, S. Tokarzewski, Two-point quasifractional approximants for effective conductivity of a simple cubic lattice of spheres, *Int. J. Heat Mass Transf.* 39 (1996) 2349–2352. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00247-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00247-2).
- [39] J.K. Carson, Review of effective thermal conductivity models for foods, *Int. J. Refrig.* 29 (2006) 958–967. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2006.03.016>.
- [40] A. Halder, A. Dhall, A.K. Datta, Modeling transport in porous media with phase change: Applications to food processing, *J. Heat Transfer.* 133 (2011). <https://doi.org/10.1115/1.4002463>.
- [41] A. Ebrahimi, M. Haghighi, S. Aghamohammadi, Effect of calcination temperature and composition on the spray-dried microencapsulated nanostructured SAPO-34 with kaolin for methanol conversion to ethylene and propylene in fluidized bed

- reactor, *Microporous Mesoporous Mater.* 297 (2020) 110046.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110046>.
- [42] A. Ciurzyńska, A. Mieszkowska, I. Olsinski, A. Lenart, The effect of composition and aeration on selected physical and sensory properties of freeze-dried hydrocolloid gels, *Food Hydrocoll.* 67 (2017) 94–103.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.042>.
 - [43] E.A. Kosasih, A. Zikri, M.I. Dzaky, Effects of drying temperature, airflow, and cut segment on drying rate and activation energy of elephant cassava, *Case Stud. Therm. Eng.* 19 (2020) 100633. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100633>.
 - [44] M. Woo, O. Deutschmann, M. Wörner, Influence of liquid composition on diffusive mass transfer in the lubricating film of Taylor flow—A study related to the hydrogenation of nitrobenzene, *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 149 (2020) 107835. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107835>.
 - [45] A. Umerska, K.J. Paluch, M.J. Santos-Martinez, O.I. Corrigan, C. Medina, L. Tajber, Freeze drying of polyelectrolyte complex nanoparticles: Effect of nanoparticle composition and cryoprotectant selection, *Int. J. Pharm.* 552 (2018) 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.09.035>.
 - [46] M.S. Rahman, *Food Properties Handbook*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009. <https://doi.org/10.1201/9781420003093>.
 - [47] M.K. Krokida, Z.B. Maroulis, Effect of drying method on shrinkage and porosity, *Dry. Technol.* 15 (1997) 2441–2458. <https://doi.org/10.1080/07373939708917369>.
 - [48] S.N. Marousis, G.D. Saravacos, Density and Porosity in Drying Starch Materials, *J. Food Sci.* 55 (1990) 1367–1372. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1990.TB03939.X>.
 - [49] A.K. Datta, Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results, *J. Food Eng.* 80 (2007) 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.012>.
 - [50] S.N. MAROUSIS, G.D. SARAVACOS, Density and Porosity in Drying Starch Materials, *J. Food Sci.* 55 (1990) 1367–1372. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1990.TB03939.X>.
 - [51] J.E. LOZANO, E. ROTSTEIN, M.J. URBICAIN, Shrinkage, Porosity and Bulk Density of Foodstuffs at Changing Moisture Contents, *J. Food Sci.* 48 (1983) 1497–1502. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1983.TB03524.X>.
 - [52] J.E. LOZANO, E. ROTSTEIN, M.J. URBICAIN, TOTAL POROSITY AND OPEN-PORE POROSITY IN THE DRYING OF FRUITS, *J. Food Sci.* 45 (1980) 1403–1407. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1980.TB06564.X>.
 - [53] M.K. Krokida, V.T. Karathanos, Z.B. Maroulis, Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products, *J. Food Eng.* 35 (1998) 369–380. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00031-4).
 - [54] B. Koç, I. Eren, F. Kaymak Ertekin, Modelling bulk density, porosity and shrinkage

- of quince during drying: The effect of drying method, *J. Food Eng.* 85 (2008) 340–349. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2007.07.030>.
- [55] H. Ni, Multiphase moisture transport in porous media under intensive microwave heating., Cornell University, 1997. https://books.google.com/books/about/Multiphase_Moisture_Transport_in_Porous.html?hl=tr&id=MrdOAAAAYAAJ (accessed October 7, 2021).
- [56] A.K. Datta, Hydraulic permeability of food tissues, *Int. J. Food Prop.* 9 (2006) 767–780. <https://doi.org/10.1080/10942910600596167>.
- [57] H.G. Schwartzberg, Expression of fluid from biological solids, *Sep. Purif. Methods.* 26 (1997) 1–213. <https://doi.org/10.1080/03602549708014156>.
- [58] G.W. Jackson, D.F. James, The permeability of fibrous porous media, *Can. J. Chem. Eng.* 64 (1986) 364–374. <https://doi.org/10.1002/CJCE.5450640302>.
- [59] J. Bear, *Dynamics of Fluids in Porous Media* (Dover Civil and Mechanical Engineering), Dover Publications, New York, 1972. https://books.google.com/books/about/Dynamics_of_Fluids_in_Porous_Media.html?hl=tr&id=lurmlFGhTEC (accessed June 3, 2022).
- [60] H. Ni, A.K. Datta, K.E. Torrance, Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model, *Int. J. Heat Mass Transf.* 42 (1999) 1501–1512. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00123-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00123-9).
- [61] M. Fatouh, M.N. Metwally, A.B. Helali, M.H. Shedid, Herbs drying using a heat pump dryer, *Energy Convers. Manag.* 47 (2006) 2629–2643. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.022>.
- [62] C. Fiorentini, S.M. Demarchi, N.A. Quintero Ruiz, R.M. Torrez Irigoyen, S.A. Giner, Arrhenius activation energy for water diffusion during drying of tomato leathers: The concept of characteristic product temperature, *Biosyst. Eng.* 132 (2015) 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.02.004>.
- [63] A. Fudholi, M. Othman, M.H. Ruslan, M. Yahya, A. Zaharim, K. Sopian, The effects of drying air temperature and humidity on the drying kinetics of seaweed, *Undefined*. (2011).
- [64] P. Correia, A. Leitão, M.L. Beirão-da-Costa, The effect of drying temperatures on morphological and chemical properties of dried chestnuts flours, *J. Food Eng.* 90 (2009) 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.040>.
- [65] V. Ziegler, N. da S. Timm, C.D. Ferreira, J.T. Goebel, R.S. Pohndorf, M. de Oliveira, Effects of drying temperature of red popcorn grains on the morphology, technological, and digestibility properties of starch, *Int. J. Biol. Macromol.* 145 (2020) 568–574. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.198>.
- [66] R. Kaur, K. Kaur, P. Ahluwalia, Effect of drying temperatures and storage on chemical and bioactive attributes of dried tomato and sweet pepper, *LWT.* 117 (2020) 108604. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108604>.
- [67] G.H. Lang, I. da S. Lindemann, C.D. Ferreira, J.F. Hoffmann, N.L. Vanier, M. de

- Oliveira, Effects of drying temperature and long-term storage conditions on black rice phenolic compounds, *Food Chem.* 287 (2019) 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.028>.
- [68] G.O. Sigge, C.F. Hansmann, E. Joubert, Effect of temperature and relative humidity on the drying rates and drying times of green bell peppers (*Capsicum annuum* L.), *Dry. Technol.* 16 (1998) 1703–1714. <https://doi.org/10.1080/07373939808917487>.
- [69] T. Poós, E. Varju, Drying characteristics of medicinal plants, in: *Int. Rev. Appl. Sci. Eng., Akademiai Kiado Rt.*, 2017: pp. 83–91. <https://doi.org/10.1556/1848.2017.8.1.12>.
- [70] T. Inazu, K.I. Iwasaki, T. Furuta, Effect of temperature and relative humidity on drying kinetics of fresh Japanese noodle (udon), *LWT - Food Sci. Technol.* 35 (2002) 649–655. <https://doi.org/10.1006/fstl.2002.0921>.
- [71] S.J. Kowalski, J. Szadzińska, A. Pawłowski, Ultrasonic-Assisted Osmotic Dehydration of Carrot Followed by Convective Drying with Continuous and Intermittent Heating, *Dry. Technol.* 33 (2015) 1570–1580. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1012265>.
- [72] S.B. Sasongko, H. Hadiyanto, M. Djaeni, A.M. Perdanianti, F.D. Utari, Effects of drying temperature and relative humidity on the quality of dried onion slice, *Heliyon*. 6 (2020) e04338. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04338>.
- [73] S. Sabudin, M.Z. Hakimi Remlee, M.F. Mohideen Batcha, Effect of Relative Humidity on Drying Kinetics of Agricultural Products, *Appl. Mech. Mater.* 699 (2014) 257–262. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.699.257>.
- [74] D.R. Tapia-Blácido, P.J. d. A. Sobral, F.C. Menegalli, Effect of drying conditions and plasticizer type on some physical and mechanical properties of amaranth flour films, *LWT - Food Sci. Technol.* 50 (2013) 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.008>.
- [75] M. Balaban, G.M. Pigott, Mathematical Model of Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food with Dimensional Changes and Variable Transport Parameters, *J. Food Sci.* 53 (1988) 935–939. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1988.TB08990.X>.
- [76] D. Demirel, M. Turhan, Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices, *J. Food Eng.* 59 (2003) 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00423-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00423-5).
- [77] M.I.H. Khan, Z. Welsh, Y. Gu, M.A. Karim, B. Bhandari, Modelling of simultaneous heat and mass transfer considering the spatial distribution of air velocity during intermittent microwave convective drying, *Int. J. Heat Mass Transf.* 153 (2020) 119668. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.119668>.
- [78] M.A. Karim, M.N.A. Hawlader, Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation, *J. Food Eng.* 70 (2005) 35–45. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.09.010>.

- [79] D. Demirel, M. Turhan, Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices, *J. Food Eng.* 59 (2003) 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00423-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00423-5).
- [80] A. Mulet, A. Berna, M. Borrás, F. Piñaga, EFFECT OF AIR FLOW RATE ON CARROT DRYING, <Http://Dx.Doi.Org/10.1080/07373938708916538>. 5 (2007) 245–258. <https://doi.org/10.1080/07373938708916538>.
- [81] D. Velić, M. Planinić, S. Tomas, M. Bilić, Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying, *J. Food Eng.* 64 (2004) 97–102. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2003.09.016>.
- [82] I. Zlatanović, M. Komatina, D. Antonijević, Low-temperature convective drying of apple cubes, *Appl. Therm. Eng.* 53 (2013) 114–123. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.01.012>.
- [83] M.M. Rahman, M.U.H. Joardder, M.I.H. Khan, N.D. Pham, M.A. Karim, Multi-scale model of food drying: Current status and challenges, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 58 (2018) 858–876. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1227299>.
- [84] M. Jaskulski, P. Wawrzyniak, I. Zbiciński, CFD simulations of droplet and particle agglomeration in an industrial counter-current spray dryer, *Adv. Powder Technol.* 29 (2018) 1724–1733. <https://doi.org/10.1016/J.APT.2018.04.007>.
- [85] F. de Melo Ramos, J. Ubbink, V. Silveira Júnior, A.S. Prata, Drying of Maltodextrin solution in a vacuum spray dryer, *Chem. Eng. Res. Des.* 146 (2019) 78–86. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2019.03.036>.
- [86] H. Caglayan, Y. Şöhret, H. Caliskan, Thermo-Ecologic Evaluation of a Spray Dryer for Ceramic Industry, *Energy Procedia.* 144 (2018) 164–169. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.06.022>.
- [87] M.J. Atkins, M.R.W. Walmsley, J.R. Neale, Integrating heat recovery from milk powder spray dryer exhausts in the dairy industry, *Appl. Therm. Eng.* 31 (2011) 2101–2106. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.03.006>.
- [88] B. Lan, P. Zhao, J. Xu, B. Zhao, M. Zhai, J. Wang, CFD-DEM-IBM simulation of particle drying processes in gas-fluidized beds, *Chem. Eng. Sci.* 255 (2022) 117653. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2022.117653>.
- [89] Z.H. Wang, G. Chen, Heat and mass transfer in batch fluidized-bed drying of porous particles, *Chem. Eng. Sci.* 55 (2000) 1857–1869. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00446-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00446-7).
- [90] T. Zhang, Z. Wan, Y. Lu, Particle convective heat transfer near the wall in a supercritical water fluidized bed by single particle model coupled with CFD-DEM, *Particuology.* 73 (2023) 47–58. <https://doi.org/10.1016/J.PARTIC.2022.03.005>.
- [91] R. Guo, J. Bai, F. Wu, J. Wang, X. Ma, Z. Hui, CFD–DEM simulation of wet granular-fluid flows and heat transfer in an integral multi-jet spout-fluidized bed, *Powder Technol.* 403 (2022) 117384. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2022.117384>.

- [92] A. Sanghi, R.P.K. Ambrose, D. Maier, CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer, *Dry. Technol.* 36 (2018) 859–870.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1359622>.
- [93] A.F. Baroni, M.D. Hubinger, Drying of onion: effects of pretreatment on moisture transport, *Dry. Technol.* 16 (1998) 2083–2094.
<https://doi.org/10.1080/07373939808917513>.
- [94] P. Demissie, M. Hayelom, A. Kassaye, A. Hailesilassie, M. Gebrehiwot, M. Vanierschot, Design, development and CFD modeling of indirect solar food dryer, *Energy Procedia.* 158 (2019) 1128–1134.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.278>.
- [95] M. Simo-Tagne, M.C. Ndukwu, A. Zoulalian, L. Bennamoun, F. Kifani-Sahban, Y. Rogaume, Numerical analysis and validation of a natural convection mix-mode solar dryer for drying red chilli under variable conditions, *Renew. Energy.* 151 (2020) 659–673. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.055>.
- [96] A. Kumar, P. Kandasamy, I. Chakraborty, L. Hangshing, Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer, *Biosyst. Eng.* 219 (2022) 85–102.
<https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2022.04.026>.
- [97] A. Kaya, O. Aydin, I. Dincer, Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects, *Int. J. Heat Mass Transf.* 49 (2006) 3094–3103. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.043>.
- [98] J. Wanot, Computational fluid dynamics in ship design, McGraw-Hill Education, Germany, 1996. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.YB001340>.
- [99] B. Xia, D.W. Sun, Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: A review, *Comput. Electron. Agric.* 34 (2002) 5–24.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00177-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00177-6).
- [100] J.H. Ferziger, M. Perić, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer Berlin Heidelberg, 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>.
- [101] T. Norton, D.W. Sun, An overview of CFD applications in the food industry, in: *Comput. Fluid Dyn. Food Process.*, CRC Press, 2007: pp. 1–42.
<https://doi.org/10.1201/9781420009217.ch1>.
- [102] A.K. Datta, Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations, *J. Food Eng.* 80 (2007) 80–95.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>.
- [103] A. Bakker, A.H. Haidari, L.M. Oshinowo, Realize greater benefits from CFD, *Chem. Eng. Prog.* 97 (2001) 45–53.
- [104] W.M. H K Versteeg, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, 1995. www.pearsoned.co.uk/versteeg (accessed May 12, 2021).
- [105] Examining Spatial (Grid) Convergence, (n.d.).

- <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/spatconv.html> (accessed June 7, 2022).
- [106] E. Dick, Introduction to finite element methods in computational fluid dynamics, *Comput. Fluid Dyn.* (2009) 235–274. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85056-4_10.
 - [107] Q. Kong, T. Siau, A.M. Bayen, Finite Difference Method, in: *Python Program. Numer. Methods*, 1st ed., Academic Press Inc., 2021: pp. 3–25.
 - [108] Q. Kong, T. Siau, A.M. Bayen, Finite Difference Approximating Derivatives, in: *Python Program. Numer. Methods*, 1st ed., Academic Press Inc., 2021: pp. 3–25.
 - [109] F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*, Springer International Publishing, Cham, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>.
 - [110] Finite volume -- CFD-Wiki, the free CFD reference, (n.d.). https://www.cfd-online.com/Wiki/Finite_volume (accessed June 12, 2022).
 - [111] S. Mazumder, The Finite Volume Method (FVM), in: *Numer. Methods Partial Differ. Equ.*, Academic Press, 2016: pp. 277–338. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849894-1.00006-8>.
 - [112] Detailed Explanation of the Finite Element Method (FEM), (n.d.). <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method> (accessed June 9, 2022).
 - [113] Q. Li, K.H. Luo, Q.J. Kang, Y.L. He, Q. Chen, Q. Liu, Lattice Boltzmann methods for multiphase flow and phase-change heat transfer, *Prog. Energy Combust. Sci.* 52 (2016) 62–105. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2015.10.001>.
 - [114] G.T. Zachariah, D. Panda, V.K. Surasani, Lattice Boltzmann simulations for invasion patterns during drying of capillary porous media, *Chem. Eng. Sci.* 196 (2019) 310–323. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.11.003>.
 - [115] R.G.M. Van Der Sman, Soft condensed matter perspective on moisture transport in cooking meat, *AIChE J.* 53 (2007) 2986–2995. <https://doi.org/10.1002/AIC.11323>.
 - [116] H.C.P. Karunasena, W. Senadeera, Y.T. Gu, R.J. Brown, A coupled SPH-DEM model for micro-scale structural deformations of plant cells during drying, *Appl. Math. Model.* 38 (2014) 3781–3801. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2013.12.004>.
 - [117] H.C.P. Karunasena, W. Senadeera, R.J. Brown, Y.T. Gu, A particle based model to simulate microscale morphological changes of plant tissues during drying, *Soft Matter*. 10 (2014) 5249–5268. <https://doi.org/10.1039/C4SM00526K>.
 - [118] R. Kuriakose, C. Anandharamakrishnan, Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products, *Trends Food Sci. Technol.* 21 (2010) 383–398. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.009>.
 - [119] C. Anandharamakrishnan, J. Gimbut, A.G.F. Stapley, C.D. Rielly, A study of particle histories during spray drying using computational fluid dynamic

- simulations, *Dry. Technol.* 28 (2010) 566–576.
<https://doi.org/10.1080/07373931003787918>.
- [120] L. Huang, K. Kumar, A.S. Mujumdar, Use of computational fluid dynamics to evaluate alternative spray dryer chamber configurations, *Dry. Technol.* 21 (2003) 385–412. <https://doi.org/10.1081/DRT-120018454>.
- [121] S. Lo, Application of computational fluid dynamics to spray drying, in: *Lait*, 2005: pp. 353–359. <https://doi.org/10.1051/lait:2005024>.
- [122] M. Rüger, S. Hohmann, M. Sommerfeld, G. Kohnen, Euler/Lagrange calculations of turbulent sprays: The effect of droplet collisions and coalescence, *At. Sprays*. 10 (2000) 47–81. <https://doi.org/10.1615/atomizspr.v10.i1.30>.
- [123] J.J. Nijdam, B. Guo, D.F. Fletcher, T.A.G. Langrish, Lagrangian and Eulerian models for simulating turbulent dispersion and coalescence of droplets within a spray, *Appl. Math. Model.* 30 (2006) 1196–1211.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.02.001>.
- [124] A.A. Mostafa, H.C. Mongia, On the modeling of turbulent evaporating sprays: Eulerian versus lagrangian approach, *Int. J. Heat Mass Transf.* 30 (1987) 2583–2593. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90139-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90139-6).
- [125] M. Mezhericher, A. Levy, I. Borde, Modeling of droplet drying in spray chambers using 2D and 3D computational fluid dynamics, *Dry. Technol.* 27 (2009) 359–370.
<https://doi.org/10.1080/07373930802682940>.
- [126] R.E. Oakley, D.E., Bahu, Spray/gas mixing behavior within spray dryers, in: I. Mujumdar, A.S., Fikova (Ed.), *Dry. '91*, Elsevier, Amsterdam, 1991: pp. 303–313.
- [127] M.R. Assari, H. Basirat Tabrizi, M. Saffar-Avval, Numerical simulation of fluid bed drying based on two-fluid model and experimental validation, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.07.028>.
- [128] I. Schmitz-Schug, U. Kulozik, P. Foerst, Modeling spray drying of dairy products – Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss, *Chem. Eng. Sci.* 141 (2016) 315–329.
<https://doi.org/10.1016/J.CES.2015.11.008>.
- [129] T. Norton, B. Tiwari, D.W. Sun, Computational Fluid Dynamics in the Design and Analysis of Thermal Processes: A Review of Recent Advances,
[Http://Dx.Doi.Org/10.1080/10408398.2010.518256](http://Dx.Doi.Org/10.1080/10408398.2010.518256). 53 (2012) 251–275.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2010.518256>.
- [130] T.J. Jamaledine, M.B. Ray, Application of Computational Fluid Dynamics for Simulation of Drying Processes: A Review,
[Http://Dx.Doi.Org/10.1080/07373930903517458](http://Dx.Doi.Org/10.1080/07373930903517458). 28 (2010) 120–154.
<https://doi.org/10.1080/07373930903517458>.
- [131] R. Kuriakose, C. Anandharamakrishnan, Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products, *Trends Food Sci. Technol.* 21 (2010) 383–398. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2010.04.009>.

- [132] S. Lo, Application of computational fluid dynamics to spray drying, *Lait*. 85 (2005) 353–359. <https://doi.org/10.1051/LAIT:2005024>.
- [133] A.S. Mujumdar, L.X. Huang, X. Dong Chen, An overview of the recent advances in spray-drying, *Dairy Sci. Technol.* 2010 902. 90 (2010) 211–224. <https://doi.org/10.1051/DST/2010015>.
- [134] Z. Abdullah, F.S. Taip, M.K. Siti Mazlina, R.Z. Abdul Rahman, Fundamental and empirical modelling of co-current spray drying process - A review, *Acta Hortic.* 1152 (2017) 219–228. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2017.1152.30>.
- [135] Y. Kumar, S. a. Belorkar, Fluidized Bed Drying of Fruits and Vegetables: An Overview, *Int. J. Eng. Stud. Tech. Approach*. 01 (2015).
- [136] J.F. Davidson, Fluidized Particles, in: *Mob. Part. Syst.*, Springer Netherlands, 1995: pp. 173–196. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8518-7_12.
- [137] D. Kunii, O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*, 2nd ed., John-Wiley, New York, 1969.
- [138] C. Loha, S. Gu, J. De Wilde, P. Mahanta, P.K. Chatterjee, Advances in mathematical modeling of fluidized bed gasification, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 40 (2014) 688–715. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.199>.
- [139] P. Lettieri, L. Mazzei, Challenges and issues on the CFD modeling of fluidized beds: A review, *J. Comput. Multiph. Flows*. 1 (2009) 83–131. <https://doi.org/10.1260/175748209789563937>.
- [140] E. Hajidavaloo, F. Hamdullahpur, Mathematical modelling of simultaneous heat and mass transfer in fluidized bed drying of large particles, *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.* 23 (1999) 129–145. <https://doi.org/10.1139/tcsme-1999-0009>.
- [141] I. Zbiciński, Development and experimental verification of momentum, heat and mass transfer model in spray drying, *Chem. Eng. J. Biochem. Eng. J.* 58 (1995) 123–133. [https://doi.org/10.1016/0923-0467\(94\)02943-1](https://doi.org/10.1016/0923-0467(94)02943-1).
- [142] D.B. Southwell, T.A.G. Langrish, D.F. Fletcher, Process intensification in spray dryers by turbulence enhancement, *Chem. Eng. Res. Des.* 77 (1999) 189–205. <https://doi.org/10.1205/026387699526098>.
- [143] D.J.E. Harvie, T.A.G. Langrish, D.F. Fletcher, A computational fluid dynamics study of a tall-form spray dryer, *Food Bioprod. Process. Trans. Inst. Chem. Eng. Part C*. 80 (2002) 163–175. <https://doi.org/10.1205/096030802760309188>.
- [144] L.X. Huang, M.L. Passos, K. Kumar, A.S. Mujumdar, A three-dimensional simulation of a spray dryer fitted with a rotary atomizer, *Dry. Technol.* 23 (2005) 1859–1873. <https://doi.org/10.1080/07373930500210176>.
- [145] L. Bennamoun, A. Belhamri, Numerical simulation of drying under variable external conditions: Application to solar drying of seedless grapes, *J. Food Eng.* 76 (2006) 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.005>.
- [146] N. Ben Hassine, X. Chesneau, A.H. Laatar, Numerical Simulation of Heat and Mass

- Transfers during Solar Drying of Sewage Sludge: Solar Radiation Effect, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017: pp. 804–809.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.292>.
- [147] M. Kuan, Y. Shakir, M. Mohanraj, Y. Belyayev, S. Jayaraj, A. Kaltayev, Numerical simulation of a heat pump assisted solar dryer for continental climates, *Renew. Energy*. 143 (2019) 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.119>.
- [148] A. Topuz, M. Gur, M.Z. Gul, An experimental and numerical study of fluidized bed drying of hazelnuts, *Appl. Therm. Eng.* 24 (2004) 1535–1547.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.11.020>.
- [149] F.R.G.B. Da Silva, M. De Souza, A.M. de S. Da Costa, L.M. de M. Jorge, P.R. Paraíso, Experimental and numerical analysis of soybean meal drying in fluidized bed, *Powder Technol.* 229 (2012) 61–70.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.06.008>.
- [150] M. Khanali, A. Khakpour Giglou, S. Rafiee, Model development for shelled corn drying in a plug flow fluidized bed dryer, *Eng. Agric. Environ. Food*. 11 (2018) 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.eaef.2017.09.002>.
- [151] M. Mohseni, A. Kolomijtschuk, B. Peters, M. Demoulling, Biomass drying in a vibrating fluidized bed dryer with a Lagrangian-Eulerian approach, *Int. J. Therm. Sci.* 138 (2019) 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.038>.
- [152] P. Demissie, M. Hayelom, A. Kassaye, A. Hailesilassie, M. Gebrehiwot, M. Vanierschot, Design, development and CFD modeling of indirect solar food dryer, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019: pp. 1128–1134.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.278>.
- [153] C. Ratti, A.S. Mujumdar, Solar drying of foods: Modeling and numerical simulation, *Sol. Energy*. 60 (1997) 151–157. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00002-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00002-9).
- [154] A.R.H. Rigit, P.T.K. Low, Heat and mass transfer in a solar dryer with biomass backup burner, *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 62 (2010) 115–118.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1329412>.
- [155] P. Krawczyk, K. Badyda, Two-dimensional CFD modeling of the heat and mass transfer process during sewage sludge drying in a solar dryer, *Arch. Thermodyn.* 32 (2011) 3–16. <https://doi.org/10.2478/v10173-011-0028-y>.
- [156] V.M. Romero, E. Cerezo, M.I. Garcia, M.H. Sanchez, Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2014: pp. 1651–1658.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.156>.
- [157] M. Simo-Tagne, L. Bennamoun, Numerical study of timber solar drying with application to different geographical and climatic conditions in Central Africa, *Sol. Energy*. 170 (2018) 454–469. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.070>.
- [158] P. Haseley, G.-W. Oetjen, *Freeze-drying*, 3rd ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.

KGaA, 2018.

- [159] N.P. Varma, Computational Fluid Dynamics Analysis of Freeze Drying Process and Equipment Recommended Citation, (2014).
https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/392 (accessed May 12, 2021).
- [160] A.A. Alexeenko, A. Ganguly, S.L. Nail, Computational Analysis of Fluid Dynamics in Pharmaceutical Freeze-Drying, *J. Pharm. Sci.* 98 (2009) 3483–3494.
<https://doi.org/10.1002/JPS.21862>.
- [161] A.A. Barresi, D.L. Marchisio, Computational Fluid Dynamics data for improving freeze-dryers design, *Data Br.* 19 (2018) 1181–1213.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.05.141>.
- [162] A.A. Barresi, V. Rasetto, D.L. Marchisio, Use of computational fluid dynamics for improving freeze-dryers design and process understanding. Part 1: Modelling the lyophilisation chamber, *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 129 (2018) 30–44.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2018.05.008>.
- [163] D.L. Marchisio, M. Galan, A.A. Barresi, Use of computational fluid dynamics for improving freeze-dryers design and process understanding. Part 2: Condenser duct and valve modelling, *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 129 (2018) 45–57.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2018.05.003>.
- [164] A.A. Alexeenko, A. Ganguly, S.L. Nail, Computational analysis of fluid dynamics in pharmaceutical freeze-drying, *J. Pharm. Sci.* 98 (2009) 3483–3494.
<https://doi.org/10.1002/jps.21862>.
- [165] A. Ganguly, S.L. Nail, A.A. Alexeenko, Rarefied gas dynamics aspects of pharmaceutical freeze-drying, *Vacuum.* 86 (2012) 1739–1747.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.03.025>.
- [166] A. Ganguly, A.A. Alexeenko, S.G. Schultz, S.G. Kim, Freeze-drying simulation framework coupling product attributes and equipment capability: Toward accelerating process by equipment modifications, in: *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, Elsevier, 2013: pp. 223–235. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2013.05.013>.
- [167] L.C. Capozzi, A.A. Barresi, R. Pisano, A multi-scale computational framework for modeling the freeze-drying of microparticles in packed-beds, *Powder Technol.* 343 (2019) 834–846. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.067>.
- [168] T. Kudra, A.S. Mujumdar, *Advanced drying technologies*, Marcel Dekker Inc., New York, 2002.
- [169] K.H. Le, E. Tsotsas, A. Kharaghani, Continuum-scale modeling of superheated steam drying of cellular plant porous media, *Int. J. Heat Mass Transf.* 124 (2018) 1033–1044. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.032>.
- [170] X. Jia, S. Clements, P. Jolly, Study of Heat Pump Assisted Microwave Drying, *Dry. Technol.* 11 (1993) 1583–1616. <https://doi.org/10.1080/07373939308916920>.
- [171] X.L. Huai, X.F. Peng, G.X. Wang, D.Y. Liu, Multi-phase flow and drying characteristics in a semi-circular impinging stream dryer, *Int. J. Heat Mass Transf.*

- 46 (2003) 3061–3067. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00051-6).
- [172] P. Jolly, X. Jia, S. Clements, Heat pump assisted continuous drying part 1: Simulation model, *Int. J. Energy Res.* 14 (1990) 757–770. <https://doi.org/10.1002/er.4440140707>.
- [173] X. Jia, P. Jolly, S. Clements, Heat pump assisted continuous drying part 2: Simulation results, *Int. J. Energy Res.* 14 (1990) 771–782. <https://doi.org/10.1002/er.4440140708>.
- [174] M. Ranjbaran, D. Zare, CFD Modeling of Microwave-Assisted Fluidized Bed Drying of Moist Particles Using Two-Fluid Model, *Dry. Technol.* 30 (2012) 362–376. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.642913>.
- [175] Z.F. Xiao, F. Zhang, N.X. Wu, X.D. Liu, CFD modeling and simulation of superheated steam fluidized bed drying process, in: *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, Springer New York LLC, 2013: pp. 141–149. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36124-1_18.
- [176] T. Gulati, H. Zhu, A.K. Datta, K. Huang, Microwave drying of spheres: Coupled electromagnetics-multiphase transport modeling with experimentation. Part II: Model validation and simulation results, *Food Bioprod. Process.* 96 (2015) 326–337. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.08.001>.
- [177] H. Zhu, T. Gulati, A.K. Datta, K. Huang, Microwave drying of spheres: Coupled electromagnetics-multiphase transport modeling with experimentation. Part I: Model development and experimental methodology, *Food Bioprod. Process.* 96 (2015) 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.08.003>.
- [178] M. Aktaş, S. Şevik, A. Amini, A. Khanlari, Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer, *Sol. Energy.* 137 (2016) 500–515. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.036>.
- [179] R.P. Ramachandran, J. Paliwal, S. Cenkowski, Computational modelling of superheated steam drying of compacted distillers' spent grain coated with solubles, *Food Bioprod. Process.* 116 (2019) 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.04.011>.
- [180] C. Si, J. Wu, Y. Zhang, G. Liu, Q. Guo, Experimental and numerical simulation of drying of lignite in a microwave-assisted fluidized bed, *Fuel.* 242 (2019) 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.002>.
- [181] M.A. Stanish, G.S. Schajer, F. Kayihan, A mathematical model of drying for hygroscopic porous media, *AIChE J.* 32 (1986) 1301–1311. <https://doi.org/10.1002/aic.690320808>.
- [182] A.G. Yiotis, I.N. Tsimpanogiannis, A.K. Stubos, Y.C. Yortsos, Coupling between external and internal mass transfer during drying of a porous medium, *Water Resour. Res.* 43 (2007) 6403. <https://doi.org/10.1029/2006WR005558>.
- [183] C. Gavrilă, A.G. Ghiaus, I. Gruia, *Heat and Mass Transfer in Convective Drying Processes*, 2008.

- [184] M. Heydari, K. Khalili, S.Y. Ahmadi-Brooghani, Studying the importance of heat transfer induced stresses in convective drying, in: *Procedia Manuf.*, Elsevier B.V., 2018: pp. 811–817. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.115>.
- [185] M.A. Daza Gomez, C.A. Gómez Velasco, N. Ratkovich, J.C. Gomez Daza, Numerical Analysis of a Convective Drying Chamber from Drying Air Velocity and Temperature Perspective, in: *Proc. 3rd World Congr. Momentum, Heat Mass Transf.*, 2018. <https://doi.org/10.11159/icmfht18.134>.
- [186] C. Kumar, M.U.H. Joardder, T.W. Farrell, G.J. Millar, A. Karim, A porous media transport model for apple drying, *Biosyst. Eng.* 176 (2018) 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.021>.
- [187] D.A. Tzempelikos, D. Mitrakos, A.P. Vouros, A. V. Bardakas, A.E. Filios, D.P. Margaritis, Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices, *J. Food Eng.* 156 (2015) 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017>.
- [188] S. Curcio, M. Aversa, V. Calabrò, G. Iorio, Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation, *J. Food Eng.* 87 (2008) 541–553. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.01.016>.
- [189] J.A. Esfahani, H. Majdi, E. Barati, Analytical two-dimensional analysis of the transport phenomena occurring during convective drying: Apple slices, *J. Food Eng.* 123 (2014) 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.019>.
- [190] M. Zhang, B. Bhandari, Z. Fang, *Handbook of drying of vegetables and vegetable products*, 2017. <https://doi.org/10.4324/9781315152677>.
- [191] H.T. Sabarez, Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes, *J. Food Eng.* 111 (2012) 279–288. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2012.02.021>.
- [192] P.M. Cârlescu, V. Arsenoaia, R. Roşca, I. Țenu, CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying, *LWT - Food Sci. Technol.* 85 (2017) 479–486. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2017.03.015>.
- [193] M.U.H. Joardder, C. Kumar, M.A. Karim, Multiphase transfer model for intermittent microwave-convective drying of food: Considering shrinkage and pore evolution, *Int. J. Multiph. Flow.* 95 (2017) 101–119. <https://doi.org/10.1016/J.IJMULIPHASEFLOW.2017.03.018>.
- [194] A. Kaya, O. Aydin, I. Dincer, Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch), *J. Food Eng.* 88 (2008) 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.017>.
- [195] V.P. Chandra Mohan, P. Talukdar, Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53 (2010) 4638–4650. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.029>.
- [196] A. Pasban, H. Sadrnia, M. Mohebbi, S.A. Shahidi, Spectral method for simulating

- 3D heat and mass transfer during drying of apple slices, *J. Food Eng.* 212 (2017) 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.013>.
- [197] S. Lal, F. Lucci, T. Defraeye, L.D. Poulikakos, M.N. Partl, D. Derome, J. Carmeliet, CFD modeling of convective scalar transport in a macroporous material for drying applications, *Int. J. Therm. Sci.* 123 (2018) 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.010>.
- [198] F.J. Gómez-de la Cruz, J.M. Palomar-Carnicero, Q. Hernández-Escobedo, F. Cruz-Peragón, Determination of the drying rate and effective diffusivity coefficients during convective drying of two-phase olive mill waste at rotary dryers drying conditions for their application, *Renew. Energy*. 153 (2020) 900–910. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.062>.
- [199] H.F. Oztop, E.K. Akpınar, Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 35 (2008) 169–177. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2007.06.005>.
- [200] E. Kavak Akpınar, I. Dincer, Application of moisture transfer models to solids drying, (n.d.). <https://doi.org/10.1243/095765005X7538>.
- [201] N.P. Zogzas, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying, *Dry. Technol.* 12 (1994) 1653–1666. <https://doi.org/10.1080/07373939408962191>.
- [202] J. Srikiatden, J.S. Roberts, Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity, *J. Food Eng.* 84 (2008) 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.009>.
- [203] I. Dryden, Drying, conditioning and industrial space heating, *Effic. Use Energy*. (1982) 166–198. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01250-8.50018-0>.
- [204] C. Cevoli, S.S. Nallan Chakravartula, M.D. Rosa, A. Fabbri, Drying of coating on bun bread: Heat and mass transfer numerical model, *Biosyst. Eng.* 181 (2019) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.009>.
- [205] D.I. Onwude, N. Hashim, K. Abdan, R. Janius, G. Chen, C. Kumar, Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato, *J. Food Eng.* 228 (2018) 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.006>.
- [206] L. Seremet, E. Botez, O.V. Nistor, D.G. Andronoiu, G.D. Mocanu, Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices, *Food Chem.* 195 (2016) 104–109. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.03.125>.
- [207] M. Kaveh, V. Rasooli Sharabiani, R. Amiri Chayjan, E. Taghinezhad, Y. Abbaspour-Gilandeh, I. Golpour, ANFIS and ANNs model for prediction of moisture diffusivity and specific energy consumption potato, garlic and cantaloupe drying under convective hot air dryer, *Inf. Process. Agric.* 5 (2018) 372–387. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2018.05.003>.
- [208] C. Chen, C. Venkitasamy, W. Zhang, R. Khir, S. Upadhyaya, Z. Pan, Effective

- moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air, *Int. J. Heat Mass Transf.* 150 (2020) 119283.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2019.119283>.
- [209] D. Kim, G. Son, S. Kim, Numerical analysis of convective drying of a moving moist object, *Int. J. Heat Mass Transf.* 99 (2016) 86–94.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.025>.
- [210] A. Sanghi, R.P.K. Ambrose, D. Maier, CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer, *Dry. Technol.* 36 (2018) 859–870.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1359622>.
- [211] M. Ateeque, Udayraj, R.K. Mishra, V.P. Chandramohan, P. Talukdar, Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field, *Int. J. Therm. Sci.* 78 (2014) 145–157.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.12.003>.
- [212] S. Curcio, M. Aversa, Transport Phenomena and Shrinkage Modeling During Convective Drying of Vegetables., *COMSOL Conf. 2009 Milán.* (2009).
- [213] M.N.O. Sadiku, O.I. Fagbolhungde, S.M. Musa, Artificial Intelligence in Food Industry, *Int. J. Eng. Res. Adv. Technol.* (2020) 12–19.
<https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64814435/3649-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1659857423&Signature=GeR-P4icgbrE~3e5-1i3CShR0vvzRN0Oor7ILr03zE4E8BczuDT0aPHm7Yk9kumjAeDc-96mVklFWYA63dLZ9fp8PWK9xZFft-mlygaCmJQyLesHJkJtl6SF5nDgrLoglZgQ4VTcpnzg3kVyG4~Zl3> (accessed August 7, 2022).
- [214] N.R. Mavani, · Jarinah, M. Ali, S. Othman, M.A. Hussain, H. Hashim, · Norliza, A. Rahman, Application of Artificial Intelligence in Food Industry-a Guideline, *Food Eng. Rev.* (n.d.). <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09290-z>.
- [215] W.P. Wagner, Trends in expert system development: A longitudinal content analysis of over thirty years of expert system case studies, *Expert Syst. Appl.* 76 (2017) 85–96. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2017.01.028>.
- [216] M.R.H. Mohd Adnan, A. Sarkheyli, A. Mohd Zain, H. Haron, Fuzzy logic for modeling machining process: a review, *Artif. Intell. Rev.* 43 (2015) 345–379.
<https://doi.org/10.1007/S10462-012-9381-8/FIGURES/5>.
- [217] A. Dai, X. Zhou, X. Liu, Design and simulation of a genetically optimized fuzzy immune PID controller for a novel grain dryer, *IEEE Access.* 5 (2017) 14981–14990. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2733760>.
- [218] H. Tavakolipour, M. Mokhtarian, A. Kalbasi-Ashtari, Intelligent monitoring of zucchini drying process based on fuzzy expert engine and ANN, *J. Food Process Eng.* 37 (2014) 474–481. <https://doi.org/10.1111/JFPE.12101>.
- [219] M.H. Nadian, M.H. Abbaspour-Fard, A. Martynenko, M.R. Golzarian, An intelligent integrated control of hybrid hot air-infrared dryer based on fuzzy logic and computer vision system, *Comput. Electron. Agric.* 137 (2017) 138–149.

- <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2017.04.001>.
- [220] M. Sugeno, An introductory survey of fuzzy control, *Inf. Sci. (Ny)*. 36 (1985) 59–83. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(85\)90026-X](https://doi.org/10.1016/0020-0255(85)90026-X).
 - [221] T.I. Liu, A. Kumagai, Y.C. Wang, S.D. Song, Z. Fu, J. Lee, On-line monitoring of boring tools for control of boring operations, *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 26 (2010) 230–239. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2009.11.002>.
 - [222] G.S.V. Raghavan, Z. Li, N. Wang, Y. Gariépy, Control of microwave drying process through aroma monitoring, *Dry. Technol.* 28 (2010) 591–599. <https://doi.org/10.1080/07373931003788049>.
 - [223] Z. Li, G.S.V. Raghavan, N. Wang, Y. Gariépy, Real-time, volatile-detection-assisted control for microwave drying, *Comput. Electron. Agric.* 69 (2009) 177–184. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2009.08.002>.
 - [224] W. Zhang, H. Ma, S.X. Yang, A neuro-fuzzy decoupling approach for real-time drying room control in meat manufacturing, *Expert Syst. Appl.* 42 (2015) 1039–1049. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2014.09.013>.
 - [225] Q. Sun, M. Zhang, A.S. Mujumdar, Recent developments of artificial intelligence in drying of fresh food: A review, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 59 (2019) 2258–2275. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1446900>.
 - [226] A.N. Samatin Njikam, H. Zhao, A novel activation function for multilayer feed-forward neural networks, *Appl. Intell.* 45 (2016) 75–82. <https://doi.org/10.1007/S10489-015-0744-0/TABLES/7>.
 - [227] A. Taheri-Garavand, V. Meda, L. Naderloo, Artificial neural Network–Genetic algorithm modeling for moisture content prediction of savory leaves drying process in different drying conditions, *Eng. Agric. Environ. Food.* 11 (2018) 232–238. <https://doi.org/10.1016/J.EAEF.2018.08.001>.
 - [228] A. Durak, Konvektif bir kurutma prosesinin yapay sinir ağları ile modellenmesi, Namık Kemal Üniversitesi, 2012. <http://acikerisim.nku.edu.tr/xmlui/handle/20.500.11776/895>.
 - [229] V. Martínez-Martínez, J. Gomez-Gil, T.S. Stombaugh, M.D. Montross, J.M. Aguiar, Moisture Content Prediction in the Switchgrass (*Panicum virgatum*) Drying Process Using Artificial Neural Networks, *Dry. Technol.* 33 (2015) 1708–1719. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1005228>.
 - [230] Q. Sun, M. Zhang, A.S. Mujumdar, P. Yang, Combined LF-NMR and Artificial Intelligence for Continuous Real-Time Monitoring of Carrot in Microwave Vacuum Drying, *Food Bioprocess Technol.* 12 (2019) 551–562. <https://doi.org/10.1007/S11947-018-2231-1>.
 - [231] T.P. Krishna Murthy, B. Manohar, Microwave drying of mango ginger (*Curcuma amada* Roxb): prediction of drying kinetics by mathematical modelling and artificial neural network, *Int. J. Food Sci. Technol.* 47 (2012) 1229–1236. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2012.02963.X>.

- [232] S. Erenturk, K. Erenturk, Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot, *J. Food Eng.* 78 (2007) 905–912. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2005.11.031>.
- [233] K. Movagharnejad, M. Nikzad, Modeling of tomato drying using artificial neural network, *Comput. Electron. Agric.* 59 (2007) 78–85. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2007.05.003>.
- [234] A. Omari, N. Behrooz-Khazaei, F. Sharifian, Drying kinetic and artificial neural network modeling of mushroom drying process in microwave-hot air dryer, *J. Food Process Eng.* 41 (2018) e12849. <https://doi.org/10.1111/JFPE.12849>.
- [235] A. Tarafdar, N.C. Shahi, A. Singh, R. Sirohi, Artificial Neural Network Modeling of Water Activity: a Low Energy Approach to Freeze Drying, *Food Bioprocess Technol.* 11 (2018) 164–171. <https://doi.org/10.1007/S11947-017-2002-4/FIGURES/5>.
- [236] R.P.F. Guiné, M.J. Barroca, F.J. Gonçalves, M. Alves, S. Oliveira, M. Mendes, Artificial neural network modelling of the antioxidant activity and phenolic compounds of bananas submitted to different drying treatments, *Food Chem.* 168 (2015) 454–459. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.07.094>.
- [237] J.A. Hernández-Pérez, M.A. García-Alvarado, G. Trystram, B. Heyd, Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 5 (2004) 57–64. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2003.10.004>.
- [238] E. Seyedabadi, M. Khojastehpour, M.H. Abbaspour-Fard, Online measuring of quality changes of banana slabs during convective drying, *Eng. Agric. Environ. Food.* 12 (2019) 111–117. <https://doi.org/10.1016/J.EAEF.2018.10.004>.
- [239] N. Behrooz Khazaei, T. Tavakoli, H. Ghassemian, M.H. Khoshtaghaza, A. Banakar, Applied machine vision and artificial neural network for modeling and controlling of the grape drying process, *Comput. Electron. Agric.* 98 (2013) 205–213. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2013.08.010>.
- [240] M. Aghbashlo, H. Mobli, S. Rafiee, A. Madadlou, The use of artificial neural network to predict exergetic performance of spray drying process: A preliminary study, *Comput. Electron. Agric.* 88 (2012) 32–43. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2012.06.007>.
- [241] S. Kerdpi boon, W.L. Kerr, S. Devahastin, Neural network prediction of physical property changes of dried carrot as a function of fractal dimension and moisture content, *Food Res. Int.* 39 (2006) 1110–1118. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2006.07.019>.
- [242] M.H. Nadian, S. Rafiee, M. Aghbashlo, S. Hosseinpour, S.S. Mohtasebi, Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying, *Food Bioprod. Process.* 94 (2015) 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.03.005>.
- [243] B. Li, C. Li, J. Huang, C. Li, Application of Artificial Neural Network for Prediction

- of Key Indexes of Corn Industrial Drying by Considering the Ambient Conditions, *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10, Page 5659. 10 (2020) 5659.
<https://doi.org/10.3390/APP10165659>.
- [244] B. Huang, A.S. Mujumdar, Use of neural network to predict industrial dryer performance, *Dry. Technol.* 11 (1993) 525–541.
<https://doi.org/10.1080/07373939308916842>.
- [245] V.K. Chasiotis, D.A. Tzempelikos, A.E. Filios, K.P. Moustris, Artificial neural network modelling of moisture content evolution for convective drying of cylindrical quince slices, *Comput. Electron. Agric.* 172 (2020).
<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.105074>.
- [246] S.M. Jafari, M. Ganje, D. Dehnad, V. Ghanbari, Mathematical, Fuzzy Logic and Artificial Neural Network Modeling Techniques to Predict Drying Kinetics of Onion, *J. Food Process. Preserv.* 40 (2016) 329–339.
<https://doi.org/10.1111/JFPP.12610>.
- [247] M. Azadbakht, H. Aghili, A. Ziaratban, M.V. Torshizi, Application of artificial neural network method to exergy and energy analyses of fluidized bed dryer for potato cubes, *Energy*. 120 (2017) 947–958.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.12.006>.
- [248] T.P. Krishna Murthy, B. Manohar, Microwave drying of mango ginger (*Curcuma amada* Roxb): prediction of drying kinetics by mathematical modelling and artificial neural network, *Int. J. Food Sci. Technol.* 47 (2012) 1229–1236.
<https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2012.02963.X>.
- [249] R.A. Chayjan, M. Kaveh, S. Khayati, (14) (PDF) Modeling some drying characteristics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) under infrared radiation using mathematical models and artificial neural networks, *Agric. Eng. Int. CIGR e-Journal*. 16 (2014) 265–279.
https://www.researchgate.net/publication/286324430_Modeling_some_drying_characteristics_of_sour_cherry_Prunus_cerasus_L_under_infrared_radiation_using_mathematical_models_and_artificial_neural_networks (accessed August 10, 2022).
- [250] S. Jena, A. Sahoo, ANN modeling for diffusivity of mushroom and vegetables using a fluidized bed dryer, *Particuology*. 11 (2013) 607–613.
<https://doi.org/10.1016/J.PARTIC.2012.07.015>.
- [251] L. Momenzadeh, A. Zomorodian, D. Mowla, Applying Artificial Neural Network for Drying Time Prediction of Green Pea in a Microwave Assisted Fluidized Bed Dryer, *J. Agric. Sci. Technol.* 14 (2012) 513–522.
https://www.researchgate.net/publication/269404250_Applying_Artificial_Neural_Network_for_Drying_Time_Prediction_of_Green_Pea_in_a_Microwave_Assisted_Fluidized_Bed_Dryer (accessed August 10, 2022).
- [252] M.B. Özdemir, M. Aktaş, S. Şevik, A. Khanlari, Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process, *Int. J. Hydrogen Energy*. 42 (2017) 18005–18013.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.01.012>.
- [253] R.P.F. Guiné, A.C. Cruz, M. Mendes, Convective drying of apples: Kinetic study,

- evaluation of mass transfer properties and data analysis using artificial neural networks, *Int. J. Food Eng.* 10 (2014) 281–299. <https://doi.org/10.1515/IJFE-2012-0135>.
- [254] L.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [255] P. Verboven, N. Scheerlinck, J. De Baerdemaeker, B.M. Nicolaï, Sensitivity of the food centre temperature with respect to the air velocity and the turbulence kinetic energy, *J. Food Eng.* 48 (2001) 53–60. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00145-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00145-X).
- [256] N. Malekjani, S.M. Jafari, Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches, *Trends Food Sci. Technol.* 78 (2018) 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>.
- [257] J.E. Lira-Teco, F. Rivera, O. Farías-Moguel, J. Torres-González, Y. Reyes, R. Antaño-López, G. Orozco, F. Castañeda-Zaldivar, Comparison of experimental and CFD mass transfer coefficient of three commercial turbulence promoters, *Fuel* 167 (2016) 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.053>.
- [258] S.J. Kowalski, *Thermomechanics of Drying Processes*, 8 (2003). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-36405-4>.
- [259] A.K. Datta, Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations, *J. Food Eng.* 80 (2007) 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>.
- [260] M.A.V. Silva Júnior, J.A. Rabi, R. Ribeiro, G.C. Dacanal, Modeling of convective drying of cornstarch-alginate gel slabs, *J. Food Eng.* 250 (2019) 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.01.015>.
- [261] Y. Choi, M.R. Okos, Thermal properties of liquid foods: review, (1986). <https://doi.org/10.3/JQUERY-UI.JS>.
- [262] G.D. Saravacos, Mass Transfer Properties of Foods, in: M. Rao (Ed.), *Eng. Prop. Foods*, CRC Press, 2014: pp. 349–402. <https://doi.org/10.1201/9781420028805-12>.
- [263] M. Shafiur Rahman, P. Lal Potluri, Shrinkage and density of squid flesh during air drying, *J. Food Eng.* 12 (1990) 133–143. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(90\)90024-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(90)90024-3).
- [264] S. Üler, *Sciences Finite Element Analysis of a Vertical Machining Center With Aluminum Finite Element Analysis of a Vertical*, Dokuz Eylül Ün., 2013.
- [265] A. ÇALIK, Finite Element Optimization for Estimating Homogeneous and Inhomogeneous Material Properties of Linear and Nonlinear Biphasic Soft Tissues, Çukurova Ün., 2016.
- [266] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.M. Too, Reduced integration technique in general analysis of plates and shells, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 3 (1971) 275–290. <https://doi.org/10.1002/NME.1620030211>.

- [267] J.N. (Junuthula N. Reddy, Introduction to the finite element method, (n.d.) 782.
- [268] T. Basak, S. Roy, A.R. Balakrishnan, Effects of thermal boundary conditions on natural convection flows within a square cavity, *Int. J. Heat Mass Transf.* 49 (2006) 4525–4535. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2006.05.015>.
- [269] C. Sert, Chapter 6 Petrov-Galerkin Formulations for Advection Diffusion Equation, *ME 582 Finite Elem. Anal. Thermofluids.* (n.d.). <http://users.metu.edu.tr/csert/me582/ME582 Ch 06.pdf>.
- [270] T.E. Tezduyar, J. Liou, D.K. Ganjoo, M. Behr, Solution techniques for the vorticity–streamfunction formulation of two-dimensional unsteady incompressible flows, *Int. J. Numer. Methods Fluids.* 11 (1990) 515–539. <https://doi.org/10.1002/fld.1650110505>.
- [271] M.F. Benedetto, S. Berrone, A. Borio, S. Pieraccini, S. Scialò, Order preserving SUPG stabilization for the virtual element formulation of advection–diffusion problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 311 (2016) 18–40. <https://doi.org/10.1016/J.CMA.2016.07.043>.
- [272] T.E. Tezduyar, T.J.R. Hughes, FINITE ELEMENT FORMULATIONS FOR CONVECTION DOMINATED FLOWS WITH PARTICULAR EMPHASIS ON THE COMPRESSIBLE EULER EQUATIONS., *AIAA Pap.* (1983). <https://doi.org/10.2514/6.1983-125>.
- [273] V. John, J. Novo, A robust SUPG norm a posteriori error estimator for stationary convection–diffusion equations, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 255 (2013) 289–305. <https://doi.org/10.1016/J.CMA.2012.11.019>.
- [274] A.N. Brooks, T.J.R. Hughes, Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 32 (1982) 199–259. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(82\)90071-8](https://doi.org/10.1016/0045-7825(82)90071-8).
- [275] M.R. Nived, S.S.C. Athkuri, V. Eswaran, On the application of higher-order Backward Difference (BDF) methods for computing turbulent flows, *Comput. Math. with Appl.* 117 (2022) 299–311. <https://doi.org/10.1016/J.CAMWA.2022.05.007>.
- [276] S.S.C. Athkuri, V. Eswaran, A new auxiliary volume-based gradient algorithm for triangular and tetrahedral meshes, *J. Comput. Phys.* 422 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.JCP.2020.109780>.
- [277] A. Joshi, A. Assam, M.R. Nived, V. Eswaran, A generalised wall function including compressibility and pressure-gradient terms for the Spalart–Allmaras turbulence model, *J. Turbul.* 20 (2019) 626–660. <https://doi.org/10.1080/14685248.2019.1691730>.
- [278] N. Kalkote, A. Assam, V. Eswaran, Toward the implementation of a multi-component framework in a density-based flow solver for handling chemically reacting flows, *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow.* 31 (2021) 3169–3195. <https://doi.org/10.1108/HFF-11-2019-0860>.

- [279] W. Shao, T. Bogaard, M. Bakker, How to Use COMSOL Multiphysics for coupled dual-permeability hydrological and slope stability modeling, *Procedia Earth Planet. Sci.* 9 (2014) 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.06.018>.
- [280] Choosing the Right Linear System Solver, (n.d.). https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/comsol_ref_solver.27.118.html (accessed October 5, 2022).
- [281] Y. Saad, M.H. Schultz, GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems, *Http://Dx.Doi.Org/10.1137/0907058*. 7 (2006) 856–869. <https://doi.org/10.1137/0907058>.
- [282] A. Greenbaum, Iterative Methods for Solving Linear Systems, *Iterative Methods Solving Linear Syst.* (1997). <https://doi.org/10.1137/1.9781611970937>.
- [283] M.R. Hestenes, E. Stiefel, Methods of conjugate gradients for solving linear systems, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* (1934). 49 (1952) 409. <https://doi.org/10.6028/JRES.049.044>.
- [284] H.A. van der Vorst, Bi-CGSTAB: A Fast and Smoothly Converging Variant of Bi-CG for the Solution of Nonsymmetric Linear Systems, *Http://Dx.Doi.Org/10.1137/0913035*. 13 (2006) 631–644. <https://doi.org/10.1137/0913035>.
- [285] O. Awodele, O. Jegede, Neural Networks and Its Application in Engineering, in: *Proc. Informing Sci. Educ. IT Educ. Conf.*, 2009. https://www.researchgate.net/publication/268046687_Neural_Networks_and_Its_Application_in_Engineering (accessed July 23, 2022).
- [286] E. Seyyarer, F. Ayata, T. Uçkan, A. Karci, Derin Öğrenmede Kullanılan Optimizasyon Algoritmalarının Uygulanması ve Kıyaslanması, *Anatol. J. Comput. Sci.* 5 (2020) 90–98.
- [287] A.K. Jain, J. Mao, K.M. Mohiuddin, Artificial neural networks: A tutorial, *Computer (Long. Beach. Calif.)*. 29 (1996) 31–44. <https://doi.org/10.1109/2.485891>.
- [288] F. Bayır, Yapay Sinir Ağları ve Tahmin Modellemesi Üzerine Bir Uygulama, *İstanbul Üniversitesi*, 2006. <http://nek.istanbul.edu.tr:4444/ekos/TEZ/41491.pdf> (accessed July 27, 2022).
- [289] S. Haykin, *Neural Network: A comprehensive foundation*, 2. Baskı, MacMillan College Publishing Co., New York, 1994. https://cdn.preterhuman.net/texts/science_and_technology/artificial_intelligence/Neural_Networks_-_A_Comprehensive_Foundation_-_Simon_Haykin.pdf (accessed July 27, 2022).
- [290] J. Freeman, D. Skapura, *Neural Networks: Algorithms, Applications and Programming Techniques*, Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, 1991. <https://doi.org/10.1057/JORS.1992.170>.
- [291] S. Sun, Z. Cao, H. Zhu, J. Zhao, A Survey of Optimization Methods from a Machine Learning Perspective, (2019).

- [292] B.T. Polyak, Some methods of speeding up the convergence of iteration methods, USSR Comput. Math. Math. Phys. 4 (1964) 1–17. [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(64\)90137-5](https://doi.org/10.1016/0041-5553(64)90137-5).
- [293] H. Robbins, S. Monro, A Stochastic Approximation Method, Ann. Math. Stat. 22 (1951) 400–407. <https://doi.org/10.1214/AOMS/1177729586>.
- [294] Z. Şen, Yapay sinir ağları ilkeleri, Su Vakfı, 2004.
- [295] H. Salehinejad, S. Sankar, J. Barfett, E. Colak, S. Valaee, Recent Advances in Recurrent Neural Networks, (2017). <http://arxiv.org/abs/1801.01078> (accessed August 3, 2022).
- [296] J. Nocedal, S.J. Wright, Numerical Optimization, in: Springer Ser. Oper. Res. Financ. Eng., 2nd edition, Springer , New York, 2006. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>.
- [297] B. Arseven, Yapay Sinir Ağları ile Öngörü Modellemesi, Öneri Derg. 10 (2013).
- [298] W.C. Davidon, Variable Metric Method for Minimization, SIAM J. Optim. 1 (1991) 1–17. <https://doi.org/10.1137/0801001>.
- [299] R. Fletcher, M.J.D. Powell, A rapidly convergent descent method for minimization, (n.d.).
- [300] D. Goldfarb, A Family of Variable-Metric Methods Derived by Variational Means, Math. Comput. 24 (1970) 23. <https://doi.org/10.2307/2004873>.
- [301] R. Fletcher, A new approach to variable metric algorithms, Comput. J. 13 (1970) 317–322. <https://doi.org/10.1093/COMJNL/13.3.317>.
- [302] C.G. Broyden, The Convergence of a Class of Double-rank Minimization Algorithms 1. General Considerations, IMA J. Appl. Math. 6 (1970) 76–90. <https://doi.org/10.1093/IMAMAT/6.1.76>.
- [303] D.C. Liu, J. Nocedal, On the limited memory BFGS method for large scale optimization, Math. Program. 1989 451. 45 (1989) 503–528. <https://doi.org/10.1007/BF01589116>.
- [304] J. Nocedal, Updating Quasi-Newton Matrices With Limited Storage, Math. Comput. 35 (1980) 773–782. <http://www.ams.org/journal-terms-of-use> (accessed August 4, 2022).
- [305] H. Yu, B. Wilamowski, Levenberg–Marquardt Training, in: Intell. Syst., 2011: pp. 1–16. <https://doi.org/10.1201/B10604-15>.
- [306] Levenberg-Marquardt (trainlm) :: Backpropagation (Neural Network Toolbox), (n.d.). <http://matlab.izmiran.ru/help/toolbox/nnet/backpr12.html> (accessed August 4, 2022).
- [307] T. Sevine, Reconstruction of Atmospheric Flows Based on Proper Orthogonal Decomposition Method, Ortadoğu Teknik Üniv., 2017.
- [308] L. Sirovich, Turbulence and the dynamics of coherent structures. I. Coherent

- Structures, Q. Appl. Math. 45 (1987) 561–571.
<https://doi.org/10.1090/QAM/910463>.
- [309] A.N. Micro, P. Energy, İ stanbul technical university □ institute of science and technology protein engineering applications on, (2010).
 - [310] E.S. Hung, S.D. Senturia, Generating efficient dynamical models for microelectromechanical systems from a few finite-element simulation runs, J. Microelectromechanical Syst. 8 (1999) 280–289. <https://doi.org/10.1109/84.788632>.
 - [311] V. Lenaerts, G. Kerschen, J.C. Golinval, Proper orthogonal decomposition for model updating of non-linear mechanical systems, Mech. Syst. Signal Process. 15 (2001) 31–43. <https://doi.org/10.1006/MSSP.2000.1350>.
 - [312] B.F. Fenny, R. Kappagantu, On the physical interpretation of Proper Orthogonal Modes in Structural Vibration, J. Sound Vib. 211 (1998) 607–616.
 - [313] B.-T. Tan, Proper Orthogonal Decomposition Extensions and Their Applications in Steady Aerodynamics, MS Thesis, Massachusetts Inst. Technol. (2003).
 - [314] B.R. Noack, P. Papas, P.A. Monkewitz, The need for a pressure-term representation in empirical Galerkin models of incompressible shear flows, J. Fluid Mech. 523 (2005) 339–365. <https://doi.org/10.1017/S0022112004002149>.
 - [315] X. Ma, G.E. Karniadakis, A low-dimensional model for simulating three-dimensional cylinder flow, J. Fluid Mech. 458 (2002) 181–190. <https://doi.org/10.1017/S0022112002007991>.
 - [316] B. Galletti, C.H. Bruneau, L. Zannetti, A. Iollo, Low-order modelling of laminar flow regimes past a confined square cylinder, J. Fluid Mech. 503 (2004) 161–170. <https://doi.org/10.1017/S0022112004007906>.
 - [317] A.E. Deane, L. Sirovich, A computational study of Rayleigh-Benard convection. Part 1. Rayleigh-number scaling, J. Fluid Mech. 222 (1991) 231–250. <https://doi.org/10.1017/S0022112091001088>.
 - [318] D. Amsallem, C. Farhat, Interpolation method for adapting reduced-order models and application to aeroelasticity, AIAA J. 46 (2008) 1803–1813. <https://doi.org/10.2514/1.35374>.
 - [319] T. Lieu, C. Farhat, Aerodynamic parameter adaptation of CFD-based reduced-order models, Collect. Tech. Pap. - 45th AIAA Aerosp. Sci. Meet. 6 (2007) 4025–4040. <https://doi.org/10.2514/6.2007-328>.
 - [320] A. Qamar, S. Sanghi, Steady supersonic flow-field predictions using proper orthogonal decomposition technique, Comput. Fluids. 38 (2009) 1218–1231. <https://doi.org/10.1016/J.COMPFLUID.2008.11.011>.
 - [321] B.-T. Tan, K. Willcox, M. Damodaran, Applications of Proper Orthogonal Decomposition for Inviscid Transonic Aerodynamics, AIAA Pap. 4231 (2003). <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/3694/HPCES002.pdf?sequence=2>.
 - [322] L. Sirovich, Turbulence and the dynamics of coherent structures. II. Symmetries and

- transformations, *Q. Appl. Math.* 45 (1987) 573–582.
<https://doi.org/10.1090/qam/910463>.
- [323] A. Chatterjee, An introduction to the proper orthogonal decomposition, *Curr. Sci.* 78 (2000) 808–817.
- [324] D. Luchtenburg, An introduction to the POD Galerkin method for fluid flows with analytical examples and MATLAB source codes, ... *Und Tech. Akust.* (2009).
<http://www.berndnoack.com/publications/Luchtenburg2009romfc.PDF>.
- [325] Durmaz, Dynamical Modeling of the Flow Over Flapping Wing By applying POD, (2011).
- [326] Y. Zhu, P. Wang, D. Sun, Z. Qu, B. Yu, Multiphase porous media model with thermo-hydro and mechanical bidirectional coupling for food convective drying, *Int. J. Heat Mass Transf.* 175 (2021) 121356.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121356>.
- [327] S. Sahin, S.G. Sumnu, Water Activity and Sorption Properties of Foods, *Phys. Prop. Foods.* (2006) 193–228. https://doi.org/10.1007/0-387-30808-3_5.
- [328] A. Bejan, Heat transfer , John Wiley & Sons, Inc, 1993.
https://books.google.com/books/about/Heat_Transfer.html?hl=tr&id=TgtRAAAAMAAJ (accessed August 21, 2022).
- [329] A. Halder, A. Dhall, A.K. Datta, An Improved, Easily Implementable, Porous Media Based Model for Deep-Fat Frying: Part I: Model Development and Input Parameters, *Food Bioprod. Process.* 85 (2007) 209–219.
<https://doi.org/10.1205/FBP07033>.
- [330] Y.A. Cengel, M.A. Boles, Thermodynamics: an engineering approach, McGraw-Hill Higher Education, New York City, 2006.
- [331] B. Ghanbarian, A.G. Hunt, R.P. Ewing, M. Sahimi, Tortuosity in Porous Media: A Critical Review, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77 (2013) 1461–1477.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ2012.0435>.
- [332] T. Basak, S. Roy, D. Ramakrishna, B.D. Pandey, Analysis of heat recovery and heat transfer within entrapped porous triangular cavities via heatline approach, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53 (2010) 3655–3669.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2010.03.040>.
- [333] R. Roslan, H. Saleh, I. Hashim, Effect of rotating cylinder on heat transfer in a square enclosure filled with nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 55 (2012) 7247–7256. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2012.07.051>.
- [334] H.F. Oztop, E.K. Akpınar, Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 35 (2008) 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.06.005>.
- [335] E.K. Akpınar, I. Dincer, Application of moisture transfer models to solids drying, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy.* 219 (2005) 235–244.
<https://doi.org/10.1243/095765005X7538>.

- [336] E. Akpınar, A. Midilli, Y. Bicer, Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling, *Energy Convers. Manag.* 44 (2003) 1689–1705. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00171-1).
- [337] S.Y. Kim, B.H. Kang, J.M. Hyun, Forced convection heat transfer from two heated blocks in pulsating channel flow, *Int. J. Heat Mass Transf.* 41 (1998) 625–634. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00138-5).
- [338] S.Ö. Çoban, F. Selimefendigil, H.F. Öztop, 3D numerical study of heat and mass transfer of moving porous moist objects, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 24 (2021) 100939. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2021.100939>.
- [339] T.J. Young, K. Vafai, Experimental and Numerical Investigation of Forced Convective Characteristics of Arrays of Channel Mounted Obstacles, *Undefined*. 121 (1999) 34–42. <https://doi.org/10.1115/1.2825962>.
- [340] F. Selimefendigil, S.O. Coban, H.F. Öztop, Numerical analysis of heat and mass transfer of a moving porous moist object in a two dimensional channel, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 121 (2021) 105093. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2020.105093>.
- [341] F. Selimefendigil, S.Ö. Çoban, H.F. Öztop, Investigation of time dependent heat and mass transportation for drying of 3D porous moist objects in convective conditions, *Int. J. Therm. Sci.* 162 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106788>.
- [342] F. Selimefendigil, S.O. Coban, H.F. Öztop, Optimization of convective drying performance of multiple porous moist objects in a 3D channel, *Int. J. Therm. Sci.* 172 (2022) 107286. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2021.107286>.
- [343] S.O. Coban, F. Selimefendigil, H. Oztop, Convective drying performance of porous moist objects under turbulent flow conditions: effects of object shape and material, *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow.* 32 (2022) 2454–2475. <https://doi.org/10.1108/HFF-06-2021-0408>.
- [344] F. Selimefendigil, S.O. Coban, H.F. Öztop, Optimization of convective drying performance of multiple porous moist objects in a 3D channel, *Int. J. Therm. Sci.* 172 (2022) 107286. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2021.107286>.
- [345] F. Selimefendigil, S.O. Coban, H.F. Öztop, Comparative study and hybrid modeling approach with POD for convective drying performance of porous moist object with multi-impinging jet and channel flow configurations, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 132 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105897>.
- [346] F. Selimefendigil, S.O. Coban, H.F. Öztop, An efficient method for optimizing the unsteady heat and mass transport features for convective drying of two porous moist objects in a channel, *Int. J. Mech. Sci.* 200 (2021) 106444. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2021.106444>.