

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KURUTMADA ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN TEORİK VE DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mak. Yük. Müh. Ahmet KAYA**

**MART 2008  
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

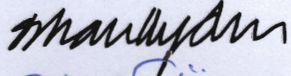
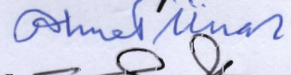

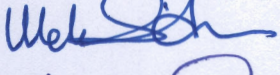
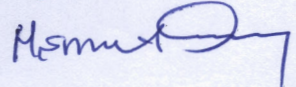
KURUTMADA ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN TEORİK VE DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ

Makina Yük. Müh. Ahmet KAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor (Makina Mühendisliği)”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26.02.2008

Tezin Savunma Tarihi : 28.03.2008

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan AYDIN   
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ahmet ÜNAL   
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Erhan ÇOŞKUN   
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Mehmet Emin ARICI   
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Haşmet TÜRKOĞLU 

Enstitü Müdür V. : Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2008

## ÖNSÖZ

“Kurutmada Isı ve Kütle Transferinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi” konulu bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora tezi olarak tamamlanmıştır.

Bu çalışma konusunun belirlenmesi ve çalışmanın gerçekleştirilmesinde bana her türlü desteği veren, yol gösterici, özverili ve bilimsel yaklaşımlarıyla tezin bu aşamaya gelmesinde en büyük katkıyı sağlayan değerli bilim insanı tez hocam sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN’a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir görev sayarım. Ayrıca, tez izleme jürimde bulunan ve önerileriyle çalışmalara katkı sağlayan sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL’a ve sayın Prof. Dr. Erhan ÇOŞKUN’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, KTÜ Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2004.112.003.01 kod numaralı ve Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) tarafından 2003K120750 kod numaralı projelerle desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi’ne ve Devlet Planlama Teşkilatı’na şükranlarımı sunarım.

Çalışma süresince moral ve motivasyonlarından dolayı başta Yrd. Doç. Dr. Mithat AKGUN olmak üzere, Yrd. Doç. Dr. Atakan Tuğkan YAKUT’a, Arş. Gör. Serkan KADER’e ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Uzun ve yorucu geçen çalışma boyunca her zaman yanımda olan eşim Elif KAYA’ya ve maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta ağabeyim Doç. Dr. Hasan KAYA olmak üzere aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ahmet KAYA

Trabzon 2008

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı .....	3
1.1.1.1. Amaç.....	3
1.1.1.2. Kapsam .....	4
1.1.2. Literatür Araştırması .....	5
1.1.2.1. Deneysel Çalışmalar .....	5
1.1.2.1.1. Kuruma Kinetiği .....	5
1.1.2.1.2. Sorpsiyon Eğrisi .....	8
1.1.2.1.3. C vitamini .....	9
1.1.2.2. Teorik Çalışmalar .....	10
1.1.3. Kurutulan Ürünler Hakkında Bilgi .....	13
1.1.3.1. Kivi .....	14
1.1.3.2. Karayemiş (Taflan).....	14
1.2. Kurutmanın Tanımı .....	15
1.2.1. Kurutma Periyodu .....	16
1.2.2. Difüzyon .....	18
1.2.2.1. Sıvı Difüzyon Modeli .....	19
1.2.2.2. Buhar Difüzyon Modeli.....	19
1.2.2.3. Kılcal (Kapiler) Akış .....	20
1.2.3. Nem İçeriği Tayini .....	20
1.2.4. Malzemelerin Sınıflandırılması .....	21

1.2.5.	Katılarda Nemin Bağlanış Şekilleri.....	21
1.2.6.	Su Aktivitesi ve Denge Nemi .....	22
1.2.7.	Kuru Gıdalarda Kalite Değişimleri .....	24
1.2.8.	Temel Kurutucu Tipleri.....	24
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	26
2.1.	Teorik Çalışma .....	26
2.1.1.	Matematiksel Modelleme .....	26
2.1.1.1.	İki-Boyutlu Dikdörtgen Şekilli Ürün.....	26
2.1.1.2.	Alternating Direction Implicit (ADI) Yöntemi .....	28
2.1.1.3.	Çözüm Yöntemi.....	29
2.1.1.4.	İki Boyutlu Silindir Şekilli Ürün .....	31
2.1.1.4.1.	Akışa Paralel Konumda.....	31
2.1.1.4.2.	Çözüm Yöntemi.....	32
2.1.1.4.3.	Akışa Dik Konumda .....	33
2.1.1.4.4.	Çözüm Yöntemi.....	35
2.1.1.5.	İki Boyutlu Küre Şekilli Ürün .....	36
2.1.1.5.1.	Çözüm Yöntemi.....	37
2.1.1.6.	Ürün Etrafındaki Hava Akışının İncelenmesi .....	37
2.1.1.6.1.	Dikdörtgen Şekilli Ürün .....	37
2.1.1.6.1.1.	Başlangıç ve Sınır Şartları .....	38
2.1.1.6.1.2.	Ağ Yapısı.....	39
2.1.1.6.2.	Akışa Dik Konumdaki Silindir Şekilli Ürün .....	41
2.1.1.6.3.	Kurutma Havaasının Kurutucuya Optimum Giriş ve Çıkış Konumu .....	42
2.1.1.6.4.	Kivi Kurutmanın Teorik İncelenmesi.....	44
2.1.1.6.5.	Karayemiş Kurutmanın Teorik İncelenmesi.....	45
2.2.	Deneysel Çalışma .....	46
2.2.1.	Test Bölgesi Düşey Konumda Tutulan Kurutucu.....	46
2.2.2.	Test bölgesi Yatay Konumda Tutulan Kurutucu.....	50
2.2.3.	Test Deneyleri .....	52
2.2.4.	Malzemelerin Hazırlanması.....	53
2.2.4.1.	Kivi .....	53
2.2.4.2.	Karayemiş.....	53

2.2.5.	Denge Nem İçeriğinin Belirlenmesi.....	53
2.2.5.1.	Kivinin Denge Nem İçeriğİ Tayini.....	54
2.2.5.2.	Karayemişin Denge Nem İçeriğİ Tayini.....	54
2.2.6.	C Vitamini (Askorbik Asit) Tayini.....	55
2.2.7.	Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi.....	55
2.2.8.	Kurutma Katsayılarının Belirlenmesi.....	57
2.2.8.1.	Eksponansiyel veya Lewis Modeli.....	58
2.2.8.2.	Henderson ve Pabis Modeli.....	58
2.2.8.3.	İki Terimli Eksponansiyel Model.....	59
2.2.9.	Belirsizlik Analizi.....	59
2.2.10.	Termoekonomik Analiz.....	60
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	62
3.1.	Teorik Çalışma Sonuçları.....	62
3.1.1.	Dikdörtgen Şekilli Ürün.....	62
3.1.2.	Silindirik Ürün.....	65
3.1.2.1.	Akışa Paralel Konumdaki Ürün.....	65
3.1.2.2.	Akışa Dik Konumdaki Ürün.....	68
3.1.3.	Küresel Ürün.....	70
3.1.4.	Ürün Etrafında Akışın İncelenmesi.....	72
3.1.4.1.	Dikdörtgen Şekilli Ürün.....	72
3.1.4.2.	Akışa Dik Konulmuş Silindir Şekilli Ürün.....	86
3.1.4.3.	Kurutma Havasının Optimum Giriş ve Çıkış Konumu.....	91
3.2.	Deneysel Çalışma Sonuçları.....	105
3.2.1.	Kivi Kurutma Sonuçları.....	105
3.2.1.1.	Test Bölgesi Düşey Konumda Tutulan Kurutucu.....	106
3.2.1.2.	Test Bölgesi Yatay Konumda Tutulan Kurutucu.....	113
3.2.1.3.	Kurutucuların Karşılaştırılması.....	120
3.2.1.4.	Kurutma Katsayılarının Belirlenmesi.....	121
3.2.2.	Karayemiş Kurutma.....	124
3.2.3.	Belirsizlik Analizinden Elde Edilen Bulgular.....	128
3.2.4.	Termoekonomik Analiz.....	129
4.	SONUÇLAR.....	131

5.	ÖNERİLER .....	135
6.	KAYNAKLAR.....	136
ÖZGEÇMİŞ		



## ÖZET

Bu çalışmada, kurutmada ısı ve kütle transferi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir.

Teorik çalışma kapsamında; dikdörtgen, silindir ve küre şekilli gıda ürünlerin kurumasını karakterize eden ısı ve kütle transferi denklemleri teorik olarak çözülmüştür. Öncelikle, dikdörtgen ve akışa dik konumda tutulan silindir şekilli ürün etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımları Fluent paket programı kullanılarak belirlenmiştir. Sıcaklık dağılımının elde edilmesiyle, ürün yüzeyi boyunca yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının değişimleri tespit edilmiştir. Yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının, kurutma havasının çarptığı ön yüzeyde daha yüksek, arka yüzeyde ise daha düşük olduğu görülmüştür.

Homojen kurumayı sağlamak amacıyla, kurutma havasının kurutucuya optimum giriş ve çıkış konumları araştırılmıştır. Bu amaçla, beş farklı durum karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kurutma havasının, kurutucunun alt yüzeyinden girip üst yüzeyinden çıktığı durum, homojen kuruma ve en az kurutma süresi açısından optimum giriş ve çıkış konumu olarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında ise, test bölgesi yatay ve dikey olmak üzere iki farklı konvektif kurutucuda, kurutma havası hızı, sıcaklığı ve bağıl neminin kivi ve taflanın kuruma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Artan kurutma havası hızı ve sıcaklığıyla ve azalan bağıl nem ile kurutma süresinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kurutma havası sıcaklık ve bağıl neminin kivi için C vitamini etkisi araştırılmıştır. Sabit bağıl nemde, artan sıcaklıkla ve sabit sıcaklıkta azalan bağıl nemle ürün C vitamini değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Nihai olarak, test bölgesi yatay konumda tutulan kurutucuda farklı kurutma havası koşullarında kurutulan kivi için termoekonomik analiz yapılmıştır. 50°C sıcaklık ve %25 bağıl nemdeki kurutma havasının en ekonomik kurutmayı sağladığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Konvektif Kurutma, Isı ve Kütle Transferi, Fluent, C vitamini, Kivi, Karayemiş.



## SUMMARY

### **Theoretical and Experimental Investigation of Heat and Mass Transfer in Drying**

In the present study, heat and mass transfer in drying are investigated theoretically and experimentally.

In the theoretical part, heat and mass transfer equations governing air drying of cubic, cylindrical and spherical food products are solved numerically. Flow and temperature fields around the rectangular and cylindrical products placed normal to the flow are analyzed at first using the FLUENT CFD package. Using the temperature profiles, the local distributions of the convective heat and mass transfer coefficients along the product surface are determined. It is shown that the local heat and mass transfer coefficients are higher at the left side wall than those at the right side due to the upstream of the drying air.

In order to obtain homogeneous drying for the product, the optimum location of inlet and outlet stations of drying air into the convective dryer are investigated. For this purpose, five different cases are comparatively examined. The optimum air inlet from the bottom of the convective dryer and outlet from the top of the convective dryer are determined to be the optimum locations in terms of homogeneous drying and the shortest drying time.

In the experimental part, the effects of air velocity, temperature and relative humidity on drying characteristic of kiwi and cherry laurel are investigated. It is observed that increasing the air velocity and temperature and decreasing the air relative humidity decreases the drying time. The effects of drying air temperature and relative humidity on the vitamin C are also investigated. It is observed that increasing the air temperature at a constant relative humidity or decreasing the relative humidity of air at a constant temperature decreases the content of vitamin C in the product. Finally, a thermoeconomic analysis is made for the horizontal convective dryer at different drying air conditions for drying of kiwi fruits. It is disclosed that the drying air with a temperature of 50°C and a relative humidity of 25% presented the most economical drying.

**Key Words:** Convective Drying, Heat and Mass transfer, Fluent, Vitamin C, Kiwi, Cherry Laurel.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Kurutma prosesinde eş zamanlı ısı ve kütle transferi .....	15
Şekil 1.2. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi.....	16
Şekil 1.3. Kuruma hızının ürün nem içeriğiyle değişimi .....	17
Şekil 1.4. Kuruma hızının kurutma süresi ile değişimi.....	17
Şekil 1.5. Adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi .....	23
Şekli 1.6. Isı transferi mekanizmasına göre temel kurutucuların sınıflandırılması ....	25
Şekil 2.1. İki boyutlu kartezyen koordinatlarda ürün geometrisi.....	27
Şekil 2.2. ADI yönteminde hesaplama şeklinin şematik gösterimi .....	28
Şekil 2.3. Dikdörtgen şekilli ürünün sayısal çözümünde kullanılan ağ yapısı .....	29
Şekil 2.4. İki boyutlu silindirik koordinatlarda ürün geometrisi.....	31
Şekil 2.5. Akışa paralel konulmuş silindir şekilli ürünün sayısal çözümünde kullanılan ağ yapısı .....	33
Şekil 2.6. İki boyutlu silindirik koordinatlarda ürün geometrisi.....	34
Şekil 2.7. Akışa dik konumda yerleştirilen silindirik şekle sahip ürünün sayısal çözümünde kullanılan ağ yapısı.....	35
Şekil 2.8. Dikdörtgen şekilli ürün etrafındaki akış alanı için tanımlanan problem ....	39
Şekil 2.9. Boyut oranı 1 (AR=1) olan ürün için GAMBIT programında oluşturulan ağ yapısı .....	40
Şekil 2.10. Akışa dik konumdaki silindir şekil ürün için tanımlanan problem.....	41
Şekil 2.11. GAMBIT programında oluşturulan ağ yapısı.....	42
Şekil 2.12. Kurutma havasının kurutucuya giriş ve çıkış konumları, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d) ve 5. Kurutucu (e).....	43
Şekil 2.13. Akış alanı modellenen test bölgesi .....	44
Şekil 2.14. Test bölgesi düşey konumda tutulan konvektif kurutucu .....	48
Şekil 2.15. Deney düzeneğinden bir görünüş .....	49
Şekil 2.16. Test bölgesi yatay konumda olan konvektif kurutucu .....	51
Şekil 2.17. Deneysel olarak elde edilen boyutsuz nem içeriği ile kurutma süresi değişiminin, Doymaz'ın (2004) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması....	52
Şekil 2.18. Test bölgesinde uygulanan iklimlendirme işlemlerin şematik gösterimi ...	61
Şekil 3.1. Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık dağılımının (a), Hussain'in (2001)'in teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b) .....	63

Şekil 3.2.	Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen nem dağılımının (a), Hussain'in (2001) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b).....	64
Şekil 3. 3.	Teorik olarak elde edilen boyutsuz nem içeriğiyle kurutma süresiyle değişiminin, Velic vd.'nin (2004) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması.	65
Şekil 3. 4.	Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık dağılımının (a), Hussain'in (2001) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b).....	66
Şekil 3. 5.	Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen nem dağılımının (a), Hussain (2001)'in teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b).....	67
Şekil 3. 6.	Teorik olarak elde edilen boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin, Simal vd.'nin (1998a) deneysel ve Hussain ve Dincer'in (2003) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması .....	68
Şekil 3.7.	Kurutmanın 500'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık (a) ve nem (b) dağılımı .....	69
Şekil 3.8.	Teorik olarak elde edilen boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin, Queiroz ve Nebra'nın (2001) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	70
Şekil 3.9.	Teorik olarak elde edilen ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklığın kurutma süresiyle değişiminin, Hussain ve Dincer'in (2003) teorik, Mc Laughlin ve Magee'nin (1999) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması .....	71
Şekil 3.10.	Teorik olarak elde edilen ürün merkez ve yüzeyindeki boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin, Hussain ve Dincer'in (2003) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması .....	71
Şekil 3.11.	Problem tanımı ve kullanılan sınır koşulları.....	73
Şekil 3.12.	Fluent çözümü ile elde edilen akım çizgilerinin (a) Sun (2001)'in teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b).....	74
Şekil 3.13.	Fluent paket programı (a) ve Fortran kodu (b) kullanılarak elde edilen iki boyutlu üründe sıcaklık ve nem dağılımlarının karşılaştırılması.....	75
Şekil 3.14.	Dikdörtgen şekilli ürün etrafındaki akım çizgileri, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e) .....	76
Şekil 3.15.	Dikdörtgen şekilli ürün etrafındaki sıcaklık dağılımı, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e).....	78
Şekil 3.16.	Yüzey boyunca ısı taşınım katsayısı değişimi, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e) .....	79
Şekil 3.17.	Yüzey boyunca kütle taşınım katsayısı değişimi, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e) .....	81
Şekil 3.18.	Kurutmanın 1000'inci saniyesinde ürünlerdeki sıcaklık dağılımı, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e) .....	84

Şekil 3.19.	Kurutmanın 1000'inci saniyesinde ürünlerdeki nem dağılımı, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e).....	85
Şekil 3.20.	Ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklık (a) ve nem içeriğinin (b) kurutma süresiyle değişimine boyut oranının (AR) etkisi .....	86
Şekil 3.21.	Silindirik şekilli ürün etrafındaki akım çizgileri (a) ve sıcaklık dağılımı (b).....	87
Şekil 3.22	Ürün yüzeyi boyunca yerel ısı (a) ve yerel kütle (b) taşınım katsayılarının değişimi.....	89
Şekil 3.23.	Kurutmanın 1000'inci saniyesinde ürün içerisindeki (a) sıcaklık ve (b) nem dağılımı .....	90
Şekil 3.24.	Ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklık (a) ve boyutsuz nem içeriğinin (b) kurutma süresiyle değişimi .....	91
Şekil 3.25.	Kurutma havasının giriş ve çıkış konumuna göre ürün etrafındaki akım çizgileri, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d), 5. Kurutucu (e) .....	94
Şekil 3.26.	Kurutma havasının giriş ve çıkış konumuna göre ürün etrafındaki sıcaklık dağılımı, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d), 5. Kurutucu (e).....	95
Şekil 3.27.	Kurutma havası giriş ve çıkış konumunun, ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı (a) ve kütle taşınım (b) katsayılarına etkisi.....	96
Şekil 3.28.	Ürün etrafındaki akım çizgilerinin değişimine boyut oranının (AR) etkisi, AR=1.66 (a), AR=0.66 (b).....	97
Şekil 3.29.	Ürün etrafındaki sıcaklık dağılımına boyut oranının (AR) etkisi, AR=1.66 (a), AR=0.66 (b).....	97
Şekil 3.30.	Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı taşınım katsayısına boyut oranının (AR) etkisi, AR=1.66 (a), AR=1 (b), AR=0.66 (c) .....	98
Şekil 3.31.	Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel kütle taşınım katsayısına boyut oranının (AR) etkisi, AR=1.66 (a), AR=1 (b), AR=0.66 (c) .....	99
Şekil 3.32.	Kurutmanın 1000'inci saniyesinde, kurutma havası giriş ve çıkış konumunun ürünlerdeki sıcaklık dağılımına etkisi, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d), 5. Kurutucu (e).....	100
Şekil 3.33.	Kurutmanın 1000'inci saniyesinde, kurutma havası giriş ve çıkış konumunun ürünlerdeki nem dağılımına etkisi, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d), 5. Kurutucu (e).....	101
Şekil 3.34.	Kurutma havasının optimum giriş ve çıkış konumunda ve kurutmanın 1000'inci saniyesinde, boyut oranının ürünlerdeki sıcaklık dağılımına etkisi, AR=1.66 (a), AR=0.66 (b).....	102
Şekil 3.35.	Kurutma havasının optimum giriş ve çıkış konumunda ve kurutmanın 1000'inci saniyesinde, boyut oranının ürünlerdeki nem dağılımına etkisi, AR=1.66 (a), AR=0.66 (b).....	102

Şekil 3.36.	Kurutma havasının giriş ve çıkış konumuna göre, ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklık (a) ve nem içeriğinin (b) kurutma süresiyle değişimi ..	103
Şekil 3.37.	Kuruma havasının optimum giriş ve çıkış konumunda, boyut oranının ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklık (a) ve nem içeriğinin (b) kurutma süresiyle değişimine etkisi .....	104
Şekil 3.38.	Kivinin denge nem içeriğinin denge bağıl nemiyle değişimine sıcaklığın etkisi.....	106
Şekil 3.39.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine hızın etkisi .....	107
Şekil 3.40.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine sıcaklığın etkisi.....	109
Şekil 3.41.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine bağıl nemin etkisi ....	110
Şekil 3.42.	Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine hızın etkisi .....	111
Şekil 3.43.	Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine sıcaklığın etkisi.....	111
Şekil 3. 44.	Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine bağıl nemin etkisi .....	112
Şekil 3.45.	Kurutma havası koşullarının kivinin C vitaminine etkisi .....	113
Şekil 3.46.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine hızın etkisi .....	114
Şekil 3.47.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine sıcaklığın etkisi.....	115
Şekil 3.48.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine bağıl nemin etkisi ....	115
Şekil 3.49.	Dikdörtgen şekilli ürün etrafında hız (a) ve sıcaklık alanları (b).....	116
Şekil 3.50.	Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı (a) ve kütle taşınım (b) katsayıları.....	118
Şekil 3. 51.	Kurutmanın 10. dakikasında üründeki sıcaklık dağılımı .....	119
Şekil 3.52.	Kurutmanın 30. dakikasındaki nem dağılımı.....	119
Şekil 3. 53.	Teorik ve deneysel olarak elde edilen ürün merkez sıcaklığının kurutma süresiyle değişiminin karşılaştırılması.....	120
Şekil 3. 54.	Teorik ve deneysel olarak elde edilen ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin karşılaştırılması.....	120
Şekil 3.55.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine test bölgesinin etkisi	121
Şekil 3.56.	Deneysel ve yarı-teorik modellerin kullanımıyla elde edilen boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimlerinin karşılaştırılması.....	122
Şekil 3.57.	Denge nem içeriğinin denge bağıl nemiyle değişimine sıcaklığın etkisi..	124
Şekil 3.58.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine hızın etkisi .....	125
Şekil 3.59.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine sıcaklığın etkisi.....	125
Şekil 3.60.	Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine bağıl nemin etkisi ....	126
Şekil 3.61.	Deneysel olarak elde edilen ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin teorik sonuçlarla karşılaştırılması .....	128

Şekil 3.62. Sabit sıcaklıkta tutulan havadan nem alma işleminin psikometrik diyagramda gösterimi .....	130
Şekil 3.63. Atmosferik havanın ısıtılma ve nemlendirme işleminin psikometrik diyagramda gösterilmesi .....	131
Şekil 3.64. Kivinin kurutulması sırasında kurutma havası koşullarına göre harcanan enerji miktarı.....	132

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Kuruma kinetiği üzerine yapılan çalışmalar .....	6
Tablo 2.1. Kullanılan ölçüm cihazları.....	50
Tablo 2.2. Sorpsiyon izotermini belirlemede kullanılan kimyasal maddeler ve karışım oranları .....	54
Tablo 3.1. Kurutma koşullarına göre ürünün C vitamini değişimi .....	113
Tablo 3.2. Belirlenen model katsayıları .....	123
Tablo 3.3. Difüzyon katsayısının kurutma havası koşullarına göre değişimi .....	127
Tablo 3.4. Kütle taşınım katsayısının kurutma havası koşullarına göre değişimi ....	128
Tablo 3.5. Belirsizlik analizi sonuçları .....	129
Tablo 3.6. Sabit sıcaklıkta nem alma işleminde harcanan enerji .....	131
Tablo 3.7. Sabit bağıl nemde ısıtma işlemi için harcanan enerji .....	132
Tablo 3.8. Atmosferik havanın iklimlendirilmesiyle harcanan enerji miktarı .....	132



## SEMBOLLER DİZİNİ

a	: kurutma katsayısı
A	: Alan ( $m^2$ )
AR	: boyut oranı ( $AR=L/H$ )
b	: kurutma katsayısı
D	: difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ )
DR	: kuruma hızı
h	: ısı taşınım katsayısı ( $W/m^2 K$ )
h	: (2.55) numaralı denklemde entalpi ( $kJ/kg$ )
H	: yükseklik (m)
k	: termal iletkenlik ( $W/mK$ )
k.m.	: kuru madde
k	: (2.47) numaralı denklemde kurutma sabiti ( $1/h$ )
L	: uzunluk (m)
Le	: Lewis sayısı ( $\alpha / D$ )
$\dot{m}$	: kütleli debi ( $kg/s$ )
M	: t anındaki nem içeriği, g $H_2O$ / g k.m.
$M_e$	: denge nem içeriği, g $H_2O$ / g k.m.
$M_i$	: başlangıçtaki nem içeriği, g $H_2O$ / g k.m.
n	: yüzeyin normali
Nu	: Nusselt sayısı
P	: basınç (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
Re	: Reynolds sayısı
r, z	: radyal ve aksenal doğrultudaki silindirik koordinatlar
r, $\phi$	: radyal ve açısal doğrultudaki silindirik koordinatlar
s	: yüzey koordinatı
t	: zaman (s)
T	: sıcaklık ( $^{\circ}C$ )
u, v	: x ve y doğrultusundaki hız ( $m/s$ )

V	: hacim (m <sup>3</sup> )
w	: bağımsız değişkenlerin belirsizi
w	: (2.55) numaralı denklemde özgül nem (g H <sub>2</sub> O/g kuru hava)
x, y	: kartezyen koordinatlar
y.m.	: yaş madde
Semboller	
a <sub>w</sub>	: su aktivitesi
α <sub>n</sub>	: Bessel fonksiyonunun kökü
C <sub>p</sub>	: sabit basınçta özgül ısı (J/kg K)
h <sub>m</sub>	: kütle taşınım katsayısı (m/s)
J <sub>0</sub> (x)	: sıfırıncı mertebeden birinci tür Bessel fonksiyonu
k <sub>0</sub>	: kurutma sabiti (1/h)
k <sub>1</sub>	: kurutma sabiti (1/h)
r <sub>c</sub>	: yarıçap, m
α	: ısı yayılım katsayısı (m <sup>2</sup> /s)
ρ	: yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
ε <sub>yk</sub>	: yakınsama parametresi
μ	: dinamik viskozite (Pa s)
θ	: boyutsuz sıcaklık, $\frac{T - T_i}{T_d - T_i}$
φ	: boyutsuz nem oranı, $\frac{M - M_e}{M_i - M_e}$
φ	: bağıl nem
Alt indis	
AB	: gaz fazı
cp	: merkez nokta
ç	: çıkış
d	: kurutma havası
eff	: efektif
g	: giriş
i	: ilk hal

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Ekolojik şartları ve coğrafi konumu sayesinde, ülkemizin meyve ve sebze üretimi önemli miktar ve çeşitlilikte olup; ülke ekonomisinde önemli yer tutar. Ege Bölgesi'nde üzüm ve incir, Doğu Anadolu Bölgesi'nde kayısı, Karadeniz Bölgesi'nde ise fındık ve çay üretimi yaygın bir şekilde yapılmaktadır. Birim fiyatının çaya göre daha yüksek olması ve iklim koşullarının elverişli olması sebebiyle, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde son zamanlarda kivi üretimi de giderek yaygınlaşmaktadır. Karayemiş (taflan) da, bu bölgeye özel ve yaygın olarak üretilen ürünlerden biridir.

Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de sezon sebze ve meyvelerini işletme imkanı yetersiz olduğundan, yaş haldeki sebze ve meyveler kısa sürede bozulup atılmakta ve büyük ölçüde ekonomik kayba uğranmaktadır (Karim ve Hawlader, 2005; URL-1). Gelişmiş ülkelerde sezonluk sebze ve meyvelerin %30-40'ı bozulup atılmaktadır (Karim ve Hawlader, 2005). Bunu önlemek için sezon meyvelerinin bir şekilde dayanım ömürlerinin artırılması gerekmektedir. Bu amaçla; konserveleme, dondurma ve kurutma işlemleri yapılmaktadır. Gıda ürünlerinde vitamin değerlerinin korunması, görüntünün bozulmaması, tadın muhafazası, azalan kütle ile paketleme, depolama ve nakliye imkanları bakımından; kurutma, en uygun prosestir (Doymaz, 1998; Hussain, 2001). Sebze ve meyvelerin kurutulmasıyla, mikroorganizmal etkiler en aza indirilebilir. Mikroorganizmaların tamamen etkisiz hale getirilebilmesi için, üründeki nem içeriğinin %10'un altına düşürülmesi gerekir (Hussain, 2001).

Ülkemizde üretilen ve ihraç edilen organik ürünlerin çoğunluğunu, yaş ve kuru sebze ve meyveler oluşturmaktadır (Atasaven Işık vd., 2002). Ülke ekonomisinde önemli paya sahip olan kuru sebze ve meyvelerin dünya pazarlarındaki yeri önemlidir. Mevcut pazarların elde tutulması ve yeni pazarlara girilebilmesi için ürünlerin; hijyenik koşullarda, homojen, kaliteli ve kısa sürede kurutulması son derece önemlidir.

Kurutma işlemi farklı şekillerde yapılabilmektedir. Bilinen en eski ve yaygın yöntem, doğrudan güneş altında yapılan doğal kurutmadır. Bu yöntemde kurutulan ürünlere kir, toz, böcek, çöp, v.b. maddeler karışabilir. Ayrıca, ürünlerin kuruması çok uzun sürdüğünden,

üründe mikrobiyal ve enzimatik üremeler oluşabilmektedir. Bu ise, ürün kalitesini önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir (Rajkumar vd., 2007).

Doğrudan güneş altında kurutmanın bir diğer olumsuz yanı ise kurutma işleminin tamamen iklim koşullarına bağlı olmasıdır. Ürünlerin hasat sezonlarında, meteorolojik şartların kararsızlığı kuruma işlemini etkilemektedir. Doğu Karadeniz Bölgesi gibi yaz ayları ortalama sıcaklığı 25 ile 35°C ve ortalama bağıl nem değeri % 60 ile 90 aralığında olan bir yerde, güneşe açık olarak kurutma yapmak oldukça uzun ve zahmetli bir süreçtir. Bu koşullarda kurutulan ürünlerde, gıda kalitesi önemli ölçüde zarar görebilmektedir. Ortam sıcaklığı 25 ile 35°C ve bağıl nemi %70 ve üzeri olan ortamlarda, insan sağlığı için son derece tehlikeli olan aflatoksin üreten küflerin oluştuğu belirlenmiştir (URL-2). Ortam bağıl neminin %70'den yüksek olduğu yerlerde, doğrudan güneşte kurutulan fındıkta aflatoksin oluştuğu, aflatoksin oluşumunun engellenmesindeki en önemli aşamalardan birinin kurutma prosesi olduğu TÜBİTAK tarafından yapılan bir çalışmayla rapor edilmiştir (TÜBİTAK, 2004).

Doğrudan güneşte kurutma ile ilgili yukarıda sıralanan sakıncalar dikkate alındığında, daha kısa sürelerde kaliteli kurutulmuş ürün elde edebilmek için yapay kurutucuların kullanılması kaçınılmazdır. Yapay kurutucular, kurutma prosesi için gerekli olan ısıyı ortama sağlama şekline göre; konvektif, kondüksiyon (iletim) ve radyasyonlu kurutma yöntemleri olmak üzere üçe ayrılır.

Uygulanabilirlik ve ekonomiklik gibi avantajları sebebiyle, gıda kurutmada konvektif kurutucular en çok tercih edilen kurutucu tipleridir (Baker, 1997). Konvektif kurutmada, kaliteli kurutulmuş ürün eldesi için, optimum kurutma havası şartlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Bu da ancak ısı ve kütle transferi parametrelerinin doğru bir şekilde tespiti ile mümkün olur. Transfer parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, kaliteli kurutulmuş gıda eldesinin yanı sıra enerji tasarrufu açısından da son derece önemlidir. Bu parametrelerin tespitiyle, ideal bir kurutma için harcanması gereken enerji miktarı belirlenerek, gereğinden fazla enerji harcanması önlenmiş olur. Böylece, çevreye atılan kullanılabilir ısı önemli ölçüde azaltılacak ve ekonomik kazanç sağlanacaktır (Hussain, 2001).

Endüstride enerjinin yoğun olarak harcandığı kurutma prosesi, kağıttan tekstile, seramikten gıdaya kadar çok geniş uygulama alanına sahiptir. Son yıllarda enerji tüketimindeki hızlı artışa, kurutma prosesinde harcanan enerji de önemli ölçüde katkı

sağlamıştır. Endüstriyel olarak gelişmiş ülkelerde, toplam enerjinin %25'lik gibi büyük bir kısmı kurutma prosesi için harcanmaktadır (Mujumdar, 1999; Hussain, 2001).

Kurutma, kompleks yapısıyla birçok bilim insanının uzun yıllardır ilgisini çekmiş ve hala da çekmeye devam etmektedir. Kurutma işleminde uzun yıllardan beri süregelen temel araştırma alanı; kurutma havası koşulları, kurutucu tipleri, enerji maliyeti ve gıda kalitesini etkileyen parametrelerin belirlenmesi olmuştur (Hussain, 2001).

### **1.1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı**

#### **1.1.1.1. Amaç**

Bu tez çalışması, teorik ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Teorik çalışma kapsamında; dikdörtgen, silindir ve küre şekilli ürünler için korunum denklemleri çözülerek ürün içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımları belirlenmiştir.

Literatürde, iki boyutlu dikdörtgen, silindirik, küre şekilli gıda ürünlerde ısı ve kütle transferi incelenirken, ürün yüzeyinde ısı ve kütle taşınım katsayılarının sabit olduğu kabul edilmiştir (Hussain ve Dincer, 2003a; 2003b; 2003c). Bu çalışmada ise ürün yüzeyi boyunca ısı ve kütle taşınım katsayılarının yerel değişimleri dikkate alınmıştır. Bu amaçla, bir dış akış problemi olarak ele alınan kurutma prosesinde, dikdörtgen ve silindir şekilli ürün etrafında hız ve sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Ayrıca, ürün boyut oranının, ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarına etkisi incelenmiştir.

Ürünlerin homojen kuruması, renk değişiminin olmaması, yüzeyde çatlama ve sertleşme olmaması, kuru ürün kalitesini artıran önemli özelliklerdir (Doymaz, 1998). Bir ürün konvektif kurutucuda kurutulurken, kurutma havasının çarptığı yüzeylerde kuruma daha hızlı gerçekleşirken, arka yüzeylerde daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu durum ise kuruma kusuru olarak kabul edilir. Homojen kuruma elde etmek için, ürünün bütün yüzeyleri kurutma havasına eş zamanlı olarak maruz kalmalıdır. Bu sebeple, kurutma havasının kurutucuya giriş ve çıkış konumu oldukça önemlidir. Bu çalışmada, homojen bir kurutma elde etmek ve kurutma süresini azaltmak amacıyla, kurutma havasının kurutucuya giriş ve çıkışının optimum konumu belirlenmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında ise; iki farklı konvektif kurutucuda, kivi ve karayemişin kuruma kinetiği incelenmiştir. Gıda ürünlerinin kurutulmasında, kurutma havası hızı ve

sıcaklığının kurutma süresi üzerine etkisi birçok araştırmada ele alınmışken, bağıl nemin etkisi üzerine yapılan çalışmalar yetersizdir. Bağıl nemi yüksek olan bölgelerde yapılan kurutma işleminde, ürünün son nem içeriği istenilen seviyelere indirilemediğinden, mikroorganizmalar daha hızlı harekete geçmekte ve ürün daha çabuk bozulmaktadır. Bu çalışmada, seçilen bazı yöresel gıda ürünlerinin kurumasına, kurutma havası hızı, sıcaklığı ve özellikle bağıl nemin etkisi incelenmiştir. Bunun yanısıra, kurutma havası koşullarının, kiviinin C vitaminine etkisi araştırılmıştır.

İdeal bir kurutma işlemi için, harcanması gereken enerjinin belirlenmesi önemli mühendislik problemlerinden biridir. Optimum kurutma havası koşullarının belirlenmesi, enerji maliyeti ve kurutma süresi açısından son derece önemlidir. Bir konvektif kurutucuda, istenilen sıcaklık ve bağıl nem değerlerine erişilebilmek için, atmosferik havanın iklimlendirilmesi şarttır. Bu işlem için, belirli miktarda enerji harcanması gerekir. Atmosferik havanın sıcaklığının yükseltilmesi, sıcaklığının düşürülmesi, neminin alınması veya nem verilmesi, iklimlendirme işlemleridir. Kurutma havası koşullarının, proses boyunca sabit kalabilmesi için, bu iklimlendirme işlemleri kurutma prosesi boyunca devam etmelidir. Doktora tez çalışmasının son aşamasında ise, kurutma havasının farklı sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde kurutulan kivi için harcanan enerji miktarı, termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak belirlenmiştir.

### **1.1.1.2. Kapsam**

Bu çalışma kapsamında bazı bölgesel gıda ürünlerinin kuruma davranışı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma kapsamında, dikdörtgen, silindirik ve küre şekilli ürünler için ısı ve kütle transferi denklemleri sonlu farklar yöntemi ile çözülmüştür. Ürün etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımı elde edilerek ürün yüzeyi boyunca yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının değişimi ve bu değişimlerin kuruma davranışına etkisi tespit edilmiştir. Ürün etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımı, akışkanlar mekaniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ticari bir CFD yazılımı olan Fluent paket programı ile belirlenmiştir. Ayrıca, ürün boyut oranının, ürün yüzeyi boyunca ısı ve kütle taşınım katsayılarının yerel değişimleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Homojen kuruma elde etmek için, kurutma havasının kurutucuya optimum giriş ve çıkış konumu araştırılarak, homojen kuruma ve kurutma süresi açısından optimum giriş ve çıkış konumu belirlenmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında ise iki adet konvektif kurutucu tasarlanarak KTÜ Termo-Akışkanlar Laboratuvarına kurulmuştur. Bu kurutuculardan birinin test bölgesi yatay konumda, diğeri ise düşey konumda tutulmuştur. Her iki kurutucuda da, kurutma havası şartlandırılmış olarak test bölgesine girmektedir. Seçilen gıda ürünlerinin kurutulmasında, kurutma havası hızı, sıcaklığı ve bağıl neminin kuruma süresine etkisi araştırılmıştır.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş, tezin amacı, kapsamı, literatür bilgisi ve genel bilgiler; ikinci bölümde yapılan çalışmalar; üçüncü bölümde bulgular ve irdeleme; dördüncü bölümde sonuçlar ve beşinci bölümde ise ileriye yönelik öneriler mevcuttur.

### **1.1.2. Literatür Araştırması**

Pratikte uygulama alanının geniş olması nedeniyle, kurutma birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Farklı ürünler için kuruma kinetiğinin araştırılması, farklı kurutma yöntemleri, farklı kurutucu tipleri, v.b. konularda birçok çalışma yapılmıştır. Konuyla ilgili çok kapsamlı bir literatür araştırması yapılmasına karşın; burada, yapılan tez çalışmasıyla doğrudan ilgili olan çalışmalara yer verilmiştir. Tez çalışmasıyla doğrudan ilgili olan çalışmalar şu başlıklar altında gruplandırılarak incelenmiştir:

- A) Deneysel çalışmalar
  - a) Kuruma kinetiği
  - b) Sorpsiyon eğrisi
  - c) C vitamini
- B) Teorik çalışmalar
  - a) Isı ve nem transferi

#### **1.1.2.1. Deneysel Çalışmalar**

##### **1.1.2.1.1. Kuruma Kinetiği**

Kurutma havası şartlarının, ürünün kuruma davranışı üzerine etkisinin belirlenmesine *kuruma kinetiği* adı verilmektedir. Kuruma kinetiğinin belirlenmesiyle, daha hızlı kuruma



gerçekleştirileceği için harcanan enerji miktarı da azalmakta ve daha kaliteli ürünler elde edilmektedir. Literatürde birçok araştırmacı tarafından kuruma kinetiği ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Konvektif kurutma ile sınırlandırdığımız kuruma kinetiği çalışmaları Tablo 1.1’ de gösterilmiştir. Tablo 1.1’de, çalışmayı yapan araştırmacı(lar), kurutulan ürün, kurutma havası şartları ve bulgular yer almaktadır.

Tablo 1.1. Kuruma kinetiği üzerine yapılan çalışmalar

Araştırmacı(lar)	Kullanılan Ürün	Kurutma havası karakteristikleri			Bulgular
		U(m/s)	T (°C)	RH(%)	
Hutcinson ve Otten, 1983	soya fasulyesi ve beyaz fasulye	0.25 ve 0.58	32.8-49.4	34-58	-
Hawlader vd., 1991	domates	0.4 - 0.8	40-80	-	$1.52- 9.12 \times 10^{-10}$
Veganas ve Marinos-Kouris, 1991	kayısı	0.5 ve 1.0	40 ve 60	-	$5.20 \times 10^{-7}$ - $6.10 \times 10^{-9}$
Sankat vd., 1996	muz	0.62	40-80	-	$8.80-34.80 \times 10^{-8}$
McMinn ve Magee, 1997	patates	1.5	30-60	-	-
Simal vd., 1997	elma	-	30-90	-	$1.98-12.67 \times 10^{-10}$
Kiranoudis vd., 1997	elma, armut, kivi ve muz	1-4.5	50-70	15 ve 40	-
Pal ve Chakraverty, 1997	mantar	0.9 ve 1.6	45-60	-	-
Johnson vd., 1998	sinirotu	3.6	40-70	-	$3.16-18.01 \times 10^{-10}$
Simal vd., 1998a	brokoli	2.7	90	-	$2.25 \times 10^{-9}$
Lopez vd., 1998	findık (kabuklu ve kabuksuz)	0.5-2	30-70	25 ve 40	$1.48-12.42 \times 10^{-9}$
Demirtas vd., 1998	findık	0.2 ve 0.3	25-45	60	-
Özdemir ve Devres, 1999	findık	-	100-160	-	$2.30-11.76 \times 10^{-7}$
Lopez vd., 2000	marul ve karnabahar	0.6	50-150	-	$6.03-31.5 \times 10^{-9}$
Pahlavanzadeh vd., 2001	üzüm	2	50-70	10 ve 30	$2.40-6.22 \times 10^{-10}$
Varadharaju vd., 2001	kahve meyvesi	1.5 ve 2	40-70	-	-
Maskan, 2001	kivi	1.29	60	-	-
Panchariya vd., 2002	siyah çay	0.25-0.65	80-120	-	$1.14-2.99 \times 10^{-11}$
Maskan vd., 2002a	pestil	1.27	55-75	-	-
Maskan vd., 2002b	pestil	0.86-1.82	55-75	-	$3.0-37.60 \times 10^{-11}$
Azzouz vd., 2002	üzüm	1-2.3	50-70	10-15	-
Diaz vd., 2003	portakal kabuğu	2	60	-	-
Senadeera vd., 2003	fasulye, bezelye ve patates	2.2	30-50	-	$5.0-15.0 \times 10^{-10}$
El-Aouar vd., 2003	papaya	1.25 ve 3.25	40 ve 70	-	$1.03-4.78 \times 10^{-9}$
Hatamipour ve Mowla, 2003	mısır ve fasulye	2.15-2.75	40-70	-	$0.48-7.14 \times 10^{-6}$
Iguaz vd., 2003	pirinç	0.75-2.5	5-32	-	$3.0-8.0 \times 10^{-5}$

Tablo 1.1.'in devamı

Araştırmacı(lar)	Kullanılan Ürün	Kurutma havası şartları aralığı			Bulgular
		U(m/s)	T (°C)	RH(%)	D <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> /s)
Krokida vd., 2003	patates, havuç, biber, sarımsak, mantar, kavun, pırasa, bezelye, mısır, kereviz, kabak, domates	1.5-2.6	65-85	20-40	-
Doymaz, 2004a	dut	1	50	-	2.23-6.91x10 <sup>-10</sup>
Doymaz, 2004b	havuç	0.5 ve 1	50-80	-	0.78-9.34x10 <sup>-9</sup>
Babalıs ve Belessiotis, 2004	incir	0.5-3	55-85	10	51.30-7.77 x10 <sup>-10</sup>
Demir vd., 2004	defne yaprağı	1.5	40-60	5-15	-
Simal vd., 2004	kivi	-	30-90	-	3.0-17.21 x10 <sup>-10</sup>
Erenturk vd., 2004	kuşburnu	1.67-3.1	50-80	4-60	-
Kashaninejad ve Tabil, 2004	semizotu	1.1	35-120	5	-
Chemkhi ve Zagrouba, 2005	kil	2	40-60	30-60	5.0-50.0x10 <sup>-9</sup>
Simal vd., 2005	ham ve olgun kivi	-	40-80	-	5.0-11.50 x10 <sup>-10</sup>
Hayaloglu vd., 2005	pelte yoğurt	1-2	40-50	-	9.50-13.00x10 <sup>-10</sup>
Desmorieux ve Decaen, 2005	deniz yosunu	1.65-3.8	37-50	-	-
Mohapatra ve Roa, 2005	buğday	3.7	40-60	-	1.22-2.86x10 <sup>-10</sup>
Akgun ve Doymaz, 2005	zeytin küspesi	1.2	50-110	-	0.30-1.10x10 <sup>-8</sup>
Mwithiga ve Olwal, 2005	lahana yaprağı	1	30-60	-	14.9-55.9x10 <sup>-10</sup>
Guine, 2006	armut	-	30-50	-	1.18-2.35x10 <sup>-9</sup>
Pathare ve Sharma, 2006	kavun	1.0-1.5	30-60	-	0.25-0.32x10 <sup>-10</sup>
Menges ve Ertekin, 2006	erik	1-3	60-80	-	1.20-4.55x10 <sup>-7</sup>
Göğüş ve Maskan, 2006	zeytin posası	1.5	60-80	-	1.84-3.94x10 <sup>-7</sup>
Sacilik ve Elicin, 2006	elma	-	40-60	-	2.27-4.97 x10 <sup>-10</sup>
Srikiatden ve Roberts, 2006	havuç ve patates	1.5 ve 3	40-70	-	5.94-13.73x10 <sup>-10</sup>
Babalıs vd., 2006	incir	0.5-3	55-85	-	-
Garau vd., 2006	portakal kabuğu	2.5	30-90	-	0.81-51.10x10 <sup>-10</sup>
Doymaz, 2006	siyah üzüm	1.1	60	-	0.38-1.28 x10 <sup>-9</sup>
Guine ve Fernandes, 2006	kestane	-	70-90	-	4.45-7.65x10 <sup>-9</sup>
Kaleemullah ve Kailappan, 2006	kırmızı biber	0.4	50-65	-	3.78-7.10 x10 <sup>-9</sup>
Menges ve Ertekin, 2006	elma	1-3	60-80	-	1.20-4.55x10 <sup>-7</sup>
Bozkır, 2006	kayısı	1.1-2	35-50	-	-
Marquez vd., 2006	kuşburnu	1-5	50-80	5-50	0.75-3.38 x10 <sup>-10</sup>
Giraldo-Zuniga vd., 2006	murici	1.5	50-70	-	1.28-2.91x10 <sup>-9</sup>

Tablo 1.1.'in devamı

Araştırmacı(lar)	Kullanılan Ürün	Kurutma havası şartları aralığı			Bulgular
		U(m/s)	T (°C)	RH(%)	D <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> /s)
Leeratanarak vd., 2006	patates cipsi	0.8	70-90	-	-
Koyuncu vd., 2006	kırmızı ve sarı aliç	0.25	60 ve 70	-	-
Wang vd., 2007	elma püresi	1.2	75-105	-	-
Kingsly vd., 2007	şeftali	0.8	55 ve 65	-	3.04-4.41x10 <sup>-9</sup>
Kaya vd., 2007a	ayva	0.2-0.6	35-55	40-70	0.65-6.92x10 <sup>-10</sup>
Kaya vd., 2007b	elma	0.2-0.6	35-55	40-70	0.48-2.02x10 <sup>-10</sup>
Can, 2007	kabak çekirdeği	-	40-46	-	1.23-1.43x10 <sup>-6</sup>
Kashaninejad vd., 2007	fıstık	0.5-1.5	25-70	5 ve 20	0.54- 9.29x10 <sup>-10</sup>
Lopes vd., 2007	yosun türü	1.5	40-60	-	8.10-18.80x10 <sup>-8</sup>
Singh ve Gupta, 2007	havuç	-	55-75	-	7.81-10.60x10 <sup>-10</sup>
Margaris ve Ghiaus, 2007	üzüm	-	65	-	6.44x10 <sup>-10</sup>
Vega vd., 2007	biber	2.5	50-80	-	3.20-11.20x10 <sup>-9</sup>

### 1.1.2.1.2. Sorpsiyon Eğrisi

Kurutulmuş ürünün depolama koşullarının belirlenmesinde son derece önemli olan ve denge nem içeriği ile denge bağıl nemi arasındaki ilişki olarak tanımlanan *sorpsiyon eğrisi* birçok araştırmacı tarafından farklı ürünler için incelenmiştir. Pal ve Chakraverty (1997) sabit sıcaklıkta (30°C) mantarın; McLaughlin ve Magee (1998), üç farklı sıcaklıkta (30, 45 ve 60°C) patatesin; Maskan ve Göğüş (1998), üç farklı sıcaklıkta (10, 20 ve 30°C) dutun; Iglesias ve Bueno (1999), dört farklı sıcaklıkta (25, 40, 60 ve 80°C) agar-agarın; Park vd. (2002), iki farklı sıcaklıkta (30 ve 40°C) nanenin; Giovanelli vd. (2002), sabit sıcaklıkta (20°C) domatesin; Kaymak-Ertekin ve Gedik (2004), üç farklı sıcaklıkta (30, 45 ve 60°C) üzüm, kayısı, elma ve patatesin; Pott vd. (2005), sabit sıcaklıkta (20°C) mangonun; Quirijns vd. (2005), dört farklı sıcaklıkta (30, 45, 60 ve 70°C) mısırın; Timoumi ve Zagrouba (2005), üç farklı sıcaklıkta (30, 40 ve 50°C) Tunus biberinin; Akanbi vd. (2006), üç farklı sıcaklıkta (25, 30 ve 40°C) domatesin; Jamali vd. (2006), üç farklı sıcaklıkta (30, 40 ve 50°C) mandalınanın; Hamdami vd. (2006), iki farklı sıcaklıkta (5 ve 25°C) ekmeğin sorpsiyon eğrisini, statik gravemetrik yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Yapılan çalışmaların tamamında, denge nem içeriğinin artan ortam sıcaklığıyla azaldığı, artan denge bağıl nemiyle arttığı tespit edilmiştir.

### 1.1.2.1.3. C Vitamini

İnsan vücudunun savunma mekanizmasını güçlendirmede en önemli bileşenlerinden biri de C vitamindir. Ancak, C vitaminince zengin olan gıda ürünleri uzun süreli depolanabilmeleri amacıyla kurutulduğunda, bünyelerindeki C vitaminini önemli ölçüde kaybetmektedirler. Erentürk vd. (2005), dört farklı sıcaklıkta (50-80°C aralığında) konvektif kurutucuda kurutulan kuşburnunda meydana gelen C vitamini değişimini araştırmıştır. Kurutma havası sıcaklığının artmasıyla ürünün denge nem içeriği azaldığından, C vitamini değerinin de azaldığını belirlemiştir. Gaula ve Adamopoulos (2006), konvektif kurutucuda, beş farklı sıcaklıkta (50-90°C aralığında) kurutulan domatesin C vitamini değişimini incelemiştir. Kurutma havası koşulları ve ürünün nem içeriğine bağlı olarak değişen C vitamini değerinin artan kurutma havası sıcaklığıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Kim vd. (2006), kırmızıbiberi iki farklı yöntemle ön kurutma işlemine tabii tutmuş ve bu yöntemlerin C vitaminine etkisini araştırmıştır. Bu yöntemlerin birincisinde, ürünü 6 saat süreyle ve dilimlenmiş halde 70°C sıcaklıkta kurutmuşlar, ikinci yöntemde ise, bütün haldeki ürünü önce 5 saat süreyle 80°C ortamda, hemen ardından 18 saat süreyle 60°C'lik ortamda kurutmuşlardır. Sonuçta, ikinci yöntemle kurutulan üründe C vitamini değerinin birinci yöntemle göre çok daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Hawlader vd. (2006), guava ve papayayı ısı pompalı kurutucu, vakum ve dondurarak kurutma yöntemlerini kullanarak kurutmuştur. Isı pompalı kurutucuda, karbondioksit, nitrojen ve hava olmak üzere üç farklı kurutucu gaz kullanmışlardır. Dondurarak kurutmada ve karbondioksitin kurutucu gaz olarak kullanıldığı durumda vitamin kaybının en az olduğunu tespit etmişlerdir. Kongsoontornkijkul vd. (2006), konvektif, vakum ve düşük basınçlı kızgın buharlı kurutucuların, hint üzümü yapraklarının C vitamini üzerine etkisini araştırmıştır. Düşük basınçlı kızgın buharlı kurutucuda kurutulan üründe, C vitamini kaybının diğer iki kurutucuya göre daha az olduğunu belirlemiştir. Quin-guo vd. (2006), fasulyeyi dört farklı kurutucuda (vakumlu mikrodalga, konvektif, dondurarak kurutma, konvektif ve vakumlu mikrodalga bileşeni) kurutup C vitamini değişimini incelemiştir. C vitamini kaybının en az dondurarak kurutmada olduğunu tespit etmişlerdir.

### 1.1.2.2. Teorik Çalışmalar

Kurutma prosesi ve kurutucu ekipmanının matematiksel modelini oluşturmak birçok araştırmacının çalışma konusu olmuştur. Dutta vd. (1988), küre şekilli tahıl ürünlerinin kurumasını karakterize eden bir boyutlu difüzyon denklemini çözmek için Crank-Nicholson yöntemini kullanmıştır. Difüzyon katsayısının kurutma havası sıcaklığına bağlı olarak değişimini veren bir ampirik bağıntı geliştirmişlerdir. Balaban ve Pigott (1988), levreğin kurumasını karakterize eden bir boyutlu ısı ve kütle transferi denklemlerini sonlu farklar yöntemini kullanarak çözmüştür. Kurutma prosesi boyunca meydana gelen hacim değişimini de teorik olarak belirlemişlerdir. Mulet vd. (1989), küp şeklinde kesilen havucun kuruma davranışını tanımlamada üç boyutlu difüzyon denklemini sayısal olarak çözmüştür. Çözümlemede üç farklı model kullanmışlardır. Birinci ve ikinci model; ürün sıcaklığının ortam sıcaklığıyla dengede ve difüzyon katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini kabul etmişken, üçüncü modelde ürün sıcaklığını zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlamışlar ve difüzyon katsayısını hem sıcaklığın hem de nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak vermişlerdir. Birinci modeli değişkenlerine ayırma yöntemiyle, ikinci ve üçüncü modelleri ise sonlu farklar yöntemi ile çözmüşlerdir. Wang ve Brennan (1995), patatesin kurumasını karakterize eden bir boyutlu ısı ve kütle transferi denklemlerini sonlu farklar yöntemini kullanarak çözmüştür. Ürün yüzeyinde konvektif sınır koşulunu kullanmış ve üründeki hacim değişimini göz önüne almışlardır. Ratti ve Crapiste (1995), bazı gıda ürünlerinde, ortam ile ürün yüzeyi arasında ki ısı taşınım katsayılarını belirlemiştir. Deneysel olarak elde edilen ısı taşınım katsayılarının kullanımıyla bir ampirik bağıntı geliştirmişler ve bu geliştirilen ampirik bağıntıyı mevcut bağıntılarla karşılaştırmışlardır. Dincer (1998); Dincer ve Dost (1995,1996) dikdörtgen, silindir ve küre şekilli ürünlerin kurumasını karakterize eden bir boyutlu kütle transfer denklemini analitik olarak çözmüştür. Hem karakteristik kökler hem de ısı ve kütle taşınım katsayılarını belirlemek için korelasyonlar geliştirmişlerdir. Ratti ve Mujumdar (1997), güneş enerjisi destekli konvektif bir kurutucuda kurutulan gıda ürünlerinin kurumasını matematiksel olarak tanımlamıştır. Markowski (1997), havuç dilimlerinin doğal taşınım ile kurumasını modellemek için bir boyutlu difüzyon denklemini çözmüştür. İki farklı sınır koşulu kullanmış (sabit konsantrasyon ve konvektif) ve hangi sınır koşulunun deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu araştırmıştır. Kütle taşınım katsayısının belirlenmesinde toplam kütle yaklaşımını kullanmıştır. Bon vd. (1997), yarıküresel ürünlerin kurumasını karakterize

etmede iki boyutlu difüzyon denklemini değişkenlerine ayırma yöntemiyle çözmüştür. Mhimid vd. (2000), konvektif kurutucuda kurutulan tahıl ürünlerinin matematiksel modelini, kurutucu test bölgesi duvarlarına ısı akısı uygulanması durumu için oluşturmuş ve sayısal olarak çözmüştür. Hernandez vd. (2000), mangonun kuruma davranışını modellemede bir boyutlu difüzyon denklemini çözmüştür. Hacim değişimini, nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak belirlemişler ve difüzyon denkleminin çözümünde göz önüne almışlardır. Anwar ve Tiwari (2001); Tiwari vd. (2004); Jain ve Tiwari (2004a, 2004b), havanın termofiziksel özelliklerini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak alıp, farklı gıda ürünleri ile ortam arasındaki ısı ve kütle taşınım katsayılarını ilgili ampirik bağıntıları kullanarak belirlemiştir. Herman vd. (2001), ürün ve kurutucunun matematiksel modelini oluşturmuş, elde edilen kısmi diferansiyel denklemleri Runge-Kutta yöntemiyle çözmüştür. Çözümlemede kullanılan ısı ve kütle taşınım katsayılarını, ilgili ampirik bağıntıları kullanarak belirlemişlerdir. Elbert vd. (2001), küresel ürünlerin kurutulmasını, bir boyutlu difüzyon denklemini analitik olarak incelemiştir. Kurutma prosesi boyunca difüzyon katsayısının nem içeriğine bağlı olarak değiştiğini kabul etmişler ve analitik çözümü bu koşula göre gerçekleştirmişlerdir. Youcef-Ali vd. (2001), güneş enerji destekli bir konvektif kurutucuda kurutulan ürünün kurumasını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Sayısal çalışmada, ürün ile ortam arasındaki enerji ve kütle dengesinden faydalanarak matematiksel model oluşturmuş ve sonlu farklar yöntemi ile çözmüşlerdir. Ürün ve havaya ait termofiziksel özelliklerin sıcaklık ve nem içeriğine bağlı olarak değiştiğini ve kurutma işlemi boyunca üründe hacim değişimi olduğunu kabul etmişlerdir. Lee vd. (2002), halının havayla kurumasını tanımlamada, zaman bağımlı bir boyutlu matematiksel model geliştirmiştir. Silindirik şekle sahip gözenekli ürünün ve ürün etrafında akan akışkanın ısı ve kütle transferi denklemlerini ayrı ayrı elde etmişler ve bu lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri sonlu farklar yöntemi ile çözmüşlerdir. Chua vd. (2002), gıda ürünlerinin kurumasında üründe meydana gelen sıcaklık ve nem dağılımını belirlemek amacıyla matematiksel denklemler geliştirmiştir. Nem transferinin hem sıvı hem de buhar fazda gerçekleştiğini kabul etmişler ve modele uygulamışlardır. Isı taşınım katsayısını boyutsuz sayıların korelasyonundan, kütle taşınım katsayısını ise termal ve konsantrasyon sınır tabakaların benzeşiminden faydalanarak belirlemişlerdir. Elde edilen iki boyutlu lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri sonlu kontrol hacim yöntemiyle çözmüşlerdir. Hussain ve Dincer (2003a, 2003b, 2003c), sırasıyla, akışa paralel konulmuş silindir, küre ve dikdörtgen şekilli ürünlerin kurumasını karakterize eden iki boyutlu ısı ve

kütle transferi denklemlerini sonlu farklar yöntemiyle çözmüştür. Simal vd. (2003), silindirik şekle sahip bir ürünün kuruma davranışı deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çalışmada, silindirik geometiriler için bir boyutlu Fick difüzyon denklemini ürün yüzeyinde iki farklı sınır koşuluyla (sabit konsantrasyon ve konvektif) çözmüşlerdir. Islam ve Mujumdar (2003), nemli ürünlerin kurutma prosesini tanımlamada bir boyutlu difüzyon denklemini sayısal olarak çözmüştür. Nem içeriğine bağlı olan hacim değişim etkisini, kütle transfer denkleminde göz önüne almışlardır. Yilbas vd. (2003), dikdörtgen şekle sahip bir katı içerisindeki sıcaklık ve nem dağılımını elde etmek için tek boyutlu ısı ve kütle transferi denklemlerini analitik olarak çözmüştür. McMinn vd. (2003), silindirik ve dikdörtgen şekilli patateslerin difüzyon ve kütle taşınım katsayılarını Dincer ve Dost (1995)'un geliştirdiği bağıntıları kullanarak belirlemiştir. Hatamipour ve Mowla (2003), akışkan yataklı bir kurutucuda mısır ve bezelyenin kuruma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Topuz vd. (2004), akışkan yataklı kurutucuda, fındığın kuruma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Kurutma havası ile ürün arasında eş zamanlı gerçekleşen ısı ve kütle dengesine dayanarak matematiksel model oluşturmuşlardır. Elde edilen ısı ve kütle transferi denklemlerini sonlu hacim yöntemiyle çözmüşlerdir. Wu vd. (2004), eliptik şekilli pirincin kurumasını karakterize eden üç boyutlu bir matematiksel model oluşturmuştur. Eliptik formda olan ürüne koordinat dönüşümü uygulamışlar ve kartezyen koordinat sistemine çevrilen modeli sonlu kontrol hacmi yöntemiyle çözmüşlerdir. Schmalko ve Alzamora (2005), kompozit bir malzemenin kurutulmasında, kütle transferini karakterize eden bir model önermiş ve bu modeli sonlu farklar yöntemini kullanarak çözmüştür. Karim ve Hawlader (2005), tropikal meyvelerin kurutulmasında, kurutucunun ve ürünün matematiksel modelini geliştirmiştir. Kurutucu için geliştirilen modelde kurutma esnasında değişen büyüklükleri (sıcaklık, bağıl nem, v.b), ürünün kurumasını karakterize eden modelde ise ürün içerisindeki sıcaklık ve nem dağılımını belirlemiştir. Demirkol vd. (2006), doğal ve zorlanmış taşınım ortamlarda kek pişirmiş ve pişirme sırasında ürünle ortam arasındaki kütle taşınım katsayısını belirlemiştir. Kütle taşınım katsayısını belirlemede toplam kütle yaklaşımını kullanmışlardır. Bialobrzewski (2007a), doğal taşınımda kök kerevizin kurutulmasında ortamla ürün arasındaki ısı taşınım katsayısını toplam kütle yaklaşımını kullanarak belirlemiş ve ilgili ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Bialobrzewski (2007b), doğal taşınımla kereviz kökünün kuruma davranışını belirlemek için bir boyutlu Fick difüzyon denklemini sonlu elemanlar yöntemiyle çözmüştür. Ürün



yüzeyinde konvektif sınır koşulu uygulamış ve kütle taşınım katsayısını belirlemede Chilton-Colburn benzeşimini ve toplam kütle yaklaşımını kullanmıştır. Toplam kütle yaklaşımının kullanımıyla elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu belirlemiştir.

Hem ürün etrafında hem de kurutucuda, kurutma havasının davranışı birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Ürün etrafında ve kurutucudaki hız ve sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi, hem homojen kurutma hem de kurutucu tasarımı açısından son derece önemlidir. Tanımlanan bir akış alanında hız ve sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için akışkanlar mekaniğinde yaygın olarak kullanılan Navier-Stokes denklemlerinin sayısal olarak çözülmesi gerekmektedir. Suresh vd., (2001) ve Murugesan vd., (2001), tuğla kurutma prosesini teorik olarak incelemiştir. Tuğla etrafındaki akış alanını belirlemede, zaman bağımlı ve iki boyutlu Navier-Stokes denklemlerini sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak çözmüşlerdir. Sun (2001), ardışık şekilde yerleştirilen üç düzgün şekle sahip, yüzeyi naftalin kaplı olan bloklar etrafındaki akış ve kütle transferini sayısal olarak Fluent programında çözmüştür. Çözümlemede k-ε türbülans modelini ve SIMPLE algoritmasını kullanmıştır. Huang vd., (2003a), bir spray kurutucunun optimum hazne geometrisini araştırmıştır. Bu amaçla dört farklı geometri kullanmış ve haznedeki hız dağılımını Fluent programıyla sayısal olarak belirlemişlerdir. Huang vd., (2003b) ve Goula ve Adamopoulos (2004), bir spray kurutucunun farklı noktalarındaki hız, sıcaklık ve bağıl nem değerlerini belirlemiştir. Spray kurutucudaki hız ve sıcaklık dağılımını belirlemede Fluent programını kullanmışlardır. Szafran ve Kmiec (2004), tanecikli yapıya sahip ürünlerin spray kurutucuda kurutulması süresince meydana gelen ısı ve kütle transferini sayısal olarak hesaplamıştır. Akış alanının tanımlayan Navier-Stokes denklemlerinin çözümünde Fluent programını kullanmışlardır. Duarte vd., (2005), spray bir kurutucunun farklı noktalarındaki hız değerini belirlemek amacıyla iki boyutlu momentum denklemini Fluent programıyla çözmüştür.

### **1.1.3. Kurutulan Ürünler Hakkında Bilgi**

Deneysel çalışma kapsamında, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yaygın olarak yetiştirilen kivi ve karayemişin kuruma kinetiği farklı kurutma koşullarında incelenmiştir. Aşağıda, bu ürünler hakkında bazı bilgiler verilmiştir.

### 1.1.3.1. Kivi

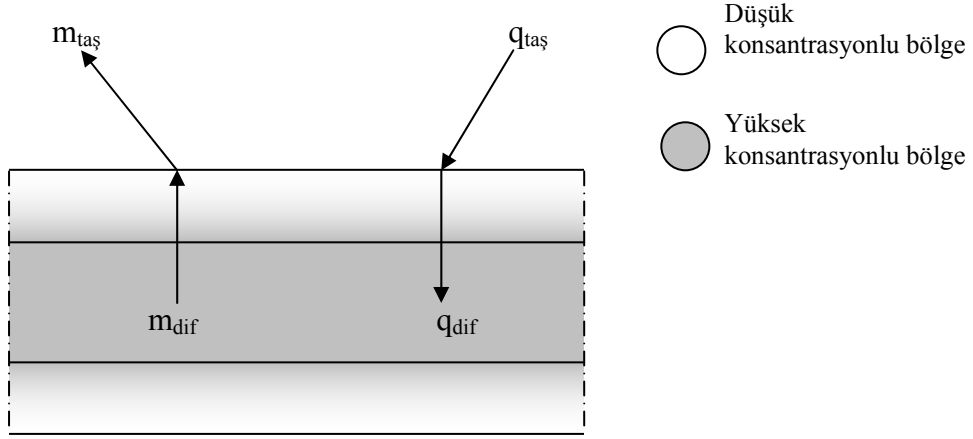
Kivi üretimi; Karadeniz Bölgesi sahili boyunca son yıllarda gelişmiş, fındık ve çay gibi, bölge halkı için çok önemli bir gelir kaynağı olmuştur (Ercişli vd., 2003). C vitamin değeri açısından portakal ve limondan 3-4 kat daha zengin olması, aranılan bir meyve olmasını sağlamıştır. Meyve yeşil renkli ve çok çekirdeklidir, yüksek oranda (100-300mg/100 gr.) C vitamini içerir (URL-3). Ayrıca P, Fe, K, ve Ca gibi mineraller ve bazı enzimlerce zengindir (URL-3). Meyvelerin C vitamini seviyesi çevre şartlarına, gelişme ve olgunlaşma durumuna hatta meyvenin bitkide bulunduğu yere göre de değişebilmektedir. Yetişkinlerin günlük alması gereken C vitamini oranı 75-100 mg arasındadır. Bir kivi meyvesi yetişkin bir insanın günlük C vitamini ihtiyacını fazlasıyla karşılar (URL-3). Ayrıca C vitamininin; dış etkenlere bağlı kanserojen maddelerle mücadele etme gibi bir özelliği bulunmaktadır (Besco vd., 2007).

### 1.1.3.2. Karayemiş (Taflan)

Bitkiye ülkemizde değişik yöresel adlar verilir. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılan karayemiştir. Bu meyvenin besin değeri oldukça yüksektir. Ayrıca yaprakları da ilaç hammaddesi olarak kullanılır. Karayemiş meyveleri bronşit, sinir bozuklukları, öksürük dindirici, spazm kesici, idrar sökücü ve mide ülseri tedavilerinde kullanılır (Baytop, 2001; Kolaylı v.d., 2003; Liyana-Pathirana v.d., 2006; Alasalvar v.d., 2005). Karayemiş meyveleri, hem taze hem de kurutularak tüketilebilmelerinin yanı sıra içki yapımında, pekmez, ezme, meyve suyu ve marmelat olarakta tüketilmektedir (Kolaylı v.d., 2003; Liyana-Pathirana v.d., 2006). Tek başına veya fındık ve cevizle birlikte çerez olarak yenen bu meyveler, pasta, kek ve özellikle hoşaf ve kompostolara koku ve tad kazandırmak için ilave edilir. Küresel şekle sahip karayemişin çapı 8 ile 20 mm arasında değişir (Kolaylı v.d., 2003).

## 1.2. Kurutmanın Tanımı

Kurutma; bir eş zamanlı ısı ve kütle transferi prosesidir. Şekil 1.1'de kurutma prosesinde meydana gelen ısı ve kütle transferi gösterilmiştir. Kurutma havasından kurutulan ürün yüzeyine taşınım ile ısı transferi gerçekleşirken ( $q_{\text{taş}}$ ), ürünün iç kısmına ise difüzyonla ısı transferi ( $q_{\text{dif}}$ ) gerçekleşir. Nem transferi ise, ısı transferinin tam tersi bir yol izler. Nem iç kısımdan ürün yüzeyine difüzyonla ( $m_{\text{dif}}$ ), ürün yüzeyinden kurutma havasına taşınım ile ( $m_{\text{taş}}$ ) transfer olur. Nem, ürün merkezinden yüzeye doğru ya sıvı difüzyonu ya da kılcal kuvvetlerin etkisiyle hareket eder. Genel olarak kılcal kuvvetlerin etkisi gözenekli maddelerde, sıvı difüzyonu ise gözenekli olmayan maddelerde meydana gelir (Geankoplis, 1993; Roberts, 1999).

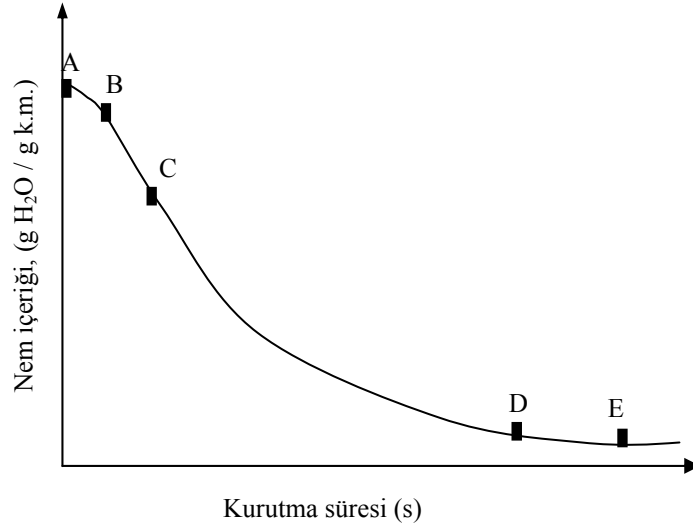


Şekil 1.1. Kurutma prosesinde eş zamanlı ısı ve kütle transferinin şematik gösterimi

Kurutma prosesine etki eden faktörler iç ve dış olmak üzere iki gruba ayrılabilir: iç faktörler; kurutulan ürüne ait özellikler olup, ürünün termofiziksel özellikleri, parçacık boyutu, katının gözenekliliği, kuruma sırasında ürün yüzeyinin sertleşmesi, ürünün başlangıç nem içeriği, su aktivitesi ve difüzyon katsayısını kapsar. Dış etkenler ise; sadece kurutma havasıyla ilgilidir. Kurutma havasının sıcaklığı, hızı, basıncı ve bağıl nemi dış etkenleri oluşturan parametrelerdir (Dincer ve Hussain, 2004). Kurutma çalışmalarında iç faktörlerden ziyade dış faktörlerin etkisi daha çok araştırma konusu olmuştur (Demirtaş, 1998).

### 1.2.1. Kurutma Periyodu

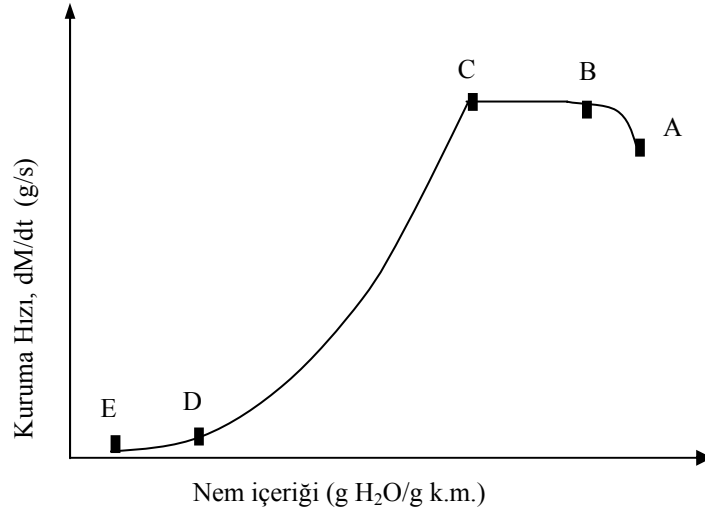
Kurutulan bir ürünün nem içeriği ile kurutma süresi arasındaki ilişki kuruma eğrileri ile belirlenir. Şekil 1. 2, 1. 3 ve 1. 4’ de kuruma eğrileri görülmektedir. Şekil 1.2’de, ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi gösterilmiştir. Kuruma hızı,  $DR=dM/dt$  birim zamanda üründen transfer edilen nem miktarı olarak tanımlanır. Herhangi bir ürünün kuruma oranı, o ürünün nem içeriğine, kurutma havası sıcaklığı ve bağıl nemine bağlıdır. Şekil 1.3 ve 1.4’ te, kuruma hızının ürün nem içeriği ve kurutma süresine göre değişimleri verilmiştir.



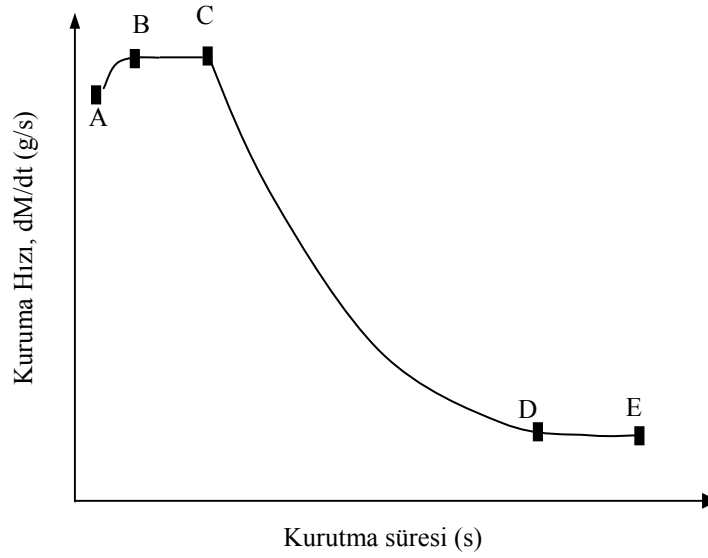
Şekil 1.2. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi (Doymaz, 1998; Demirtaş, 1998).

Kurutma eğrilerinden de kolayca anlaşılacağı gibi kurutmada üç önemli aşama meydana gelmektedir:

**A-B Bölgesi:** Gıda maddesinin yüzey sıcaklığının, ortam sıcaklığıyla dengeye gelmesi sürecidir. Genel olarak, bu bölümde kuruma hızında bir artma görülmekle birlikte tüm kuruma işleminin çok az bir bölümünü oluşturduğundan göz önüne alınmayabilir.



Şekil 1.3. Kuruma hızının ürün nem içeriğiyle değişimi (Doymaz, 1998; Demirtaş, 1998).



Şekil 1.4. Kuruma hızının kurutma süresi ile değişimi (Doymaz, 1998; Demirtaş, 1998).

B-C bölgesi: Bu bölge, sabit hızda kuruma periyodu olarak bilinir. Bu periyot sırasında, kuruyan ürün yüzeyinin tamamıyla ıslak olduğu kabul edilir. Bu bölgede kuruma hızı tamamıyla dış etkenlere bağlıdır. Kurutma havası ile ürün yüzeyi arasındaki ısı ve kütle taşınım katsayıları bu periyotda sürükleyici kuvvetlerdir. Sabit hızda kuruma periyodunda difüzyon etkileri ihmal edilebilir seviyededir. Bu periyot, kurutma prosesinin

başlangıcında etkindir. Bu sürecin, gıda ürünlerinin kurutulmasında çok kısa sürmesi ve süreç boyunca çok az miktarda nem transfer edilmesi sebebiyle, teorik çalışmalarda genellikle ihmal edilir (Carl ve Hall, 1980).

C-D bölgesi: Şekil 1.2'deki C değeri kurutulacak ürünün özellikleri ile ilgili birçok faktöre bağlı olan kritik nem miktarını göstermektedir. Yüzeyde ilk kuru noktanın olduğu duruma *kritik nokta* adı verilir. Kritik nokta sabit kuruma periyodunun sonunu ve azalan hızda kuruma periyodunun başlangıcını simgeler. Kritik nem, her gıda maddesi için farklı düzeyde olup, o gıda maddesinin bileşimiyle ilişkili bir değerdir. Kritik nemden itibaren yüzey sıcaklığı yükselmekte ve kuruma durumuna göre kuru termometre sıcaklığına doğru yaklaşmaktadır. Bu periyotda, malzeme yüzeyinde ıslak alan miktarında sürekli azalma söz konusudur. Bu devredeki ürünün kuruma hızı, iç gözenek yapısının ve katının içindeki nemin yüzeye doğru akmasına neden olan kuvvetlerin etkisi altındadır. Bu periyotda difüzyon etkileri hakimdir. Genellikle gıda ürünleri azalan kuruma periyodunda kururlar (Saravacos ve Charm, 1962; Roberts, 1999). Şekillerden de görüldüğü gibi azalan hız periyotları birinci (C-D bölgesi) ve ikinci (D-E bölgesi) olmak üzere ikiye ayrılır. Bu periyotda, kurutma havası hızının, kuruma hızına etkisi çok zayıf olup, onun yerini katının içyapı özellikleri almıştır. Kurutma prosesi bu devrede, ürün içerisindeki nemin sıvı difüzyonu yoluyla ürün yüzeyine erişmesi ve yüzeye ulaşan nemin uzaklaştırılması şeklinde gerçekleşir (Carl ve Hall, 1980).

D-E Bölgesi: İkinci azalan hız periyodu olarak bilinen bu bölgede, ürün içindeki su yüzeye çok yavaş difüze edilir.

Azalan hızda kuruma periyodunda, ürünlerdeki nem:

- a) Difüzyonla sıvı hareketi,
- b) Difüzyonla buhar hareketi,
- c) Kılcal sıvı hareketi,

şeklinde transfer edilebilir (Van Arsde vd., 1963).

### 1.2.2. Difüzyon

Difüzyonla kütle transferi, konsantrasyon farkından kaynaklanan moleküllerin gelişigüzel hareketidir. Kütle, konsantrasyonu yoğun olan bölgeden düşük olan bölgeye doğru hareket etmektedir. Kütle difüzyonuna basit bir örnek olarak, ürün yüzeyindeki su

buharının havada yayılması verilebilir. Burada, yüzeydeki su buharı konsantrasyonu ile havanın içindeki nem konsantrasyonu farklıdır.

Katılarda ısı ve kütle transferi mekanizmaları oldukça benzerdir. Isı transferinde sıcaklık gradyanı gerekirken, kütle transferinde konsantrasyon gradyanına gerek vardır. Aşağıda bu iki mekanizmanın benzerliği gösterilmektedir.

#### Isı Transferi

$$J_h = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

#### Kütle Transferi

$$J_m = -D \frac{\partial M}{\partial x} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (1.2)$$

Her iki mekanizmanın matematiksel gösterimi aynı olsa da gerçekte fiziksel mekanizmaları tamamen farklıdır. Difüzyonla ısı transferinde, yüksek enerjili moleküllerden düşük enerjili moleküllere, moleküller arasındaki etkileşimler sonucunda enerji aktarımı gerçekleşir. Difüzyonla kütle transferinde ise, moleküller; yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru hareket ederler.

#### **1.2.2.1. Sıvı Difüzyon Modeli**

Sıvı moleküllerinin, yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru katı içerisindeki hareketidir. Yapışkan suyun hareketi sıvı difüzyonuyla gerçekleşir. Difüzyon modelini kurutma prosesinde ilk olarak Lewis (1921) uygulamıştır. Sonra, Sherwood (1929), azalan hızda kuruma periyodu boyunca, kurutmayı karakterize etmede difüzyon denklemini kullanmıştır. Difüzyon denklemi, kurutma süresini belirlemede birçok ürün için başarıyla uygulanmıştır. Gıda maddeleri gibi higroskopik maddelerin kurutulmasında katı içerisinde sıvının difüzyonu söz konusudur ve difüzyon denklemi bu durumu tanımlamaktadır (Roberts, 1999).

#### **1.2.2.2. Buhar Difüzyon Modeli**

Buhar difüzyonu; gözenekli malzemelerde, gözenek içerisinde bulunan nemin buharlaşarak kurutma havasına transfer olmasıdır. Sıvı difüzyonunda olduğu gibi buhar

difüzyonunda da kütle transferini tanımlamada difüzyon denklemi uygulanır. Ancak, bu modelde difüzyon katsayısı buhar basıncına bağlı olarak değişir (Roberts, 1999).

### 1.2.2.3. Kılcal (Kapiler) Akış

Kılcal akış; katı ile sıvı molekülleri arasındaki etkileşim sonucu boşluklar (gözenekler) içindeki sıvının yüzeye doğru hareketi olarak tanımlanmaktadır. Sıvı molekülleri ile katı arasındaki bu etkileşimden kaynaklanan kuvvetlere *adhezyon kuvvetleri* denir. Adhezyon kuvvetleri, sıvının yüksek konsantrasyonlu olduğu yerden düşük konsantrasyonlu olduğu bölgeye doğru bir mini kanal içinde hareket etmesini sağlar (Roberts, 1999). Kılcal akışa doğada çok sık rastlanmaktadır. Suyun yerin altından yüzeye doğru çıkması, bir ağacın kökündeki suyun yapraklarına doğru hareketi, canlılarda kanın dolaşımı kılcal akışa örnek olarak verilebilir. Gıdalarda kuruma davranışı modellenirken, gıdaların azalan hız periyodunda kurumasından ve higroskopik malzemeler olmasından dolayı, kılcal etkilerin olmadığı düşünülür (Roberts, 1999).

### 1.2.3. Nem İçeriği Tayini

Bir maddenin nem içeriği, yaş madde (y.m.) ve kuru madde (k.m.) olarak iki şekilde belirlenebilir. Nem içeriği; yaş maddenin birim kütlesindeki su miktarı olarak tanımlanırsa:

$$M(\% y.m.) = \frac{M_i - M_d}{M_i} \times 100 \quad (1.3)$$

bağıntısı ile belirlenir. Eğer kuru maddenin birim kütlesindeki su miktarı olarak tanımlanırsa:

$$M(k.m.) = \frac{M_i - M_d}{M_d} \quad (1.4)$$

bağıntısı kullanılır. Bu çalışmada nem içeriği hem yaş madde (y.m.) hem de kuru madde (k.m.) olarak ölçülmüştür. Burada  $M_i$ ; ürünün ilk kütlesi (yaş),  $M_d$ : ürünün son (mutlak kuru) kütlesidir.



#### 1.2.4. Malzemelerin Sınıflandırılması

Kurutma prosesindeki kütle transferi mekanizması, ürünlerin doğasına bağlıdır. Bünyesinde barındırdığı nemin karakteristiğine göre maddeler higroskopik ve higroskopik olmayan maddeler olarak ikiye ayrılırlar. Higroskopik olmayan maddeler, kum, kil, cam, seramik, v.b. gibi maddelerdir. Bu maddeler bünyelerinde yapışkan su içermediklerinden dolayı, hangi ortamda bulunurlarsa bulunsunlar nem alış verişinde bulunmazlar. Çünkü malzeme içindeki suyun kısmi basıncı ile serbest halde bulunan suyun buhar basıncı birbirine eşittir (Roberts, 1999).

Higroskopik malzemeler ise organik ürünler v.b. gibi bünyelerinde yapışkan su içeren maddelerdir. Bu malzemelerdeki serbest suyun kısmi basıncı, çevreleyen havanın su buharı basıncından farklı olduğu için, buldukları ortamla nem alış verişinde bulunabilirler. Bu malzemeler ancak denge nem içeriğine erişinceye kadar kurutulabilirler.

Gözeneklilik (porozite),  $\epsilon$ , bir malzemede bulunan boşluk hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanabilir. Bir malzemenin gözenekli olabilmesi için gözeneklilik değerinin 0.25 den büyük olması gerekmektedir (Roberts, 1999). Gıda maddeleri düşük gözeneklilik değerlerinden dolayı ( $\epsilon < 0.25$ ) gözenekli değildir. Bir ürünün kurumasını tanımlayan matematiksel model oluşturulurken bu bilgiler göz önüne alınmalıdır. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan gıda maddeleri gözenekli olmayan maddelerdir ve elde edilen matematiksel denklemler gözenekli olmayan ürünler için çözülmüştür.

#### 1.2.5. Katılarda Nemin Bağlanış Şekilleri

Kurutma prosesinde transfer edilen nem, ürüne farklı şekillerde bağlanabilir. Kurutma prosesinde, hangi periyotda (ısınma, sabit hız ve azalan hız) hangi tür nemin üründen transfer edilmekte olduğu bu tip bağlı nemlerden anlaşılabilir. Aşağıda nemin ürüne bağlanış tipleri verilmiştir.

Yüzey nemi: Bu tip nem, ürünün dış yüzeyinde ince bir film tabakası şeklinde bulunur. Kurutma havası sıcaklığı ve bağlı neminin belli bir değerinde üründen ayrılan ilk nemdir. Gıda ürünlerinin kurutulmasında, bu şekilde bulunan su, sabit hızda kuruma periyodunda kısa sürede ürünü terk eder. Toplam kurutma süresinin yanında çok az bir zaman aldığı için teorik hesaplamalarda bu süre dikkate alınmamaktadır.

Yapışkan nem: Su moleküllerinin katı moleküllerine çok sıkı bir şekilde bağlanmasıdır. Bütün gözenekli olmayan higroskopik ürünlerin içyapısında bulunan nem türüdür (Karel, 1975). Bu tür nem, ancak kurutma havasının farklı koşullarında üründen ayrılabilir.

Yapışkan olmayan nem: Su moleküllerinin katı moleküllerine daha gevşek bağlanmasıdır. Higroskopik malzemelerdeki yapışkan olmayan su, kurutulan üründe bulunan ve denge nem içeriğinden yüksek olan nemdir (Quirijns vd., 2005).

Serbest nem: Toplam nem içeriği ile verilen kurutma havası koşullarındaki denge nem içeriği arasındaki farka eşittir. Üründe serbest nem olduğu müddetçe kurutma işlemi sürdürülebilir. Serbest su hem yapışkan suyu hem de yapışkan olmayan suyu içerebilir.

### 1.2.6. Su Aktivitesi ve Denge Nemi

Gıda maddelerinde, çeşitli tipte kimyasal reaksiyonların başlaması, sporların çimlenmesi, mikroorganizmaların büyümesi için gerekli olan suyun bünyede bulunması, üründeki suyun buhar basıncına veya su aktivitesine bağlıdır (Baker, 1997).

Su aktivitesi, gıda maddeleri tarafından tutulan suyun özelliğini gösteren bir terimdir ve gıda maddesinin içerdiği suyun buhar basıncının ( $p$ ), aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına ( $p_1$ ) oranı olarak tanımlanır (McLaughlin ve Magee, 1998; Baker, 1997; Fennema, 1981; Handami, 2006).

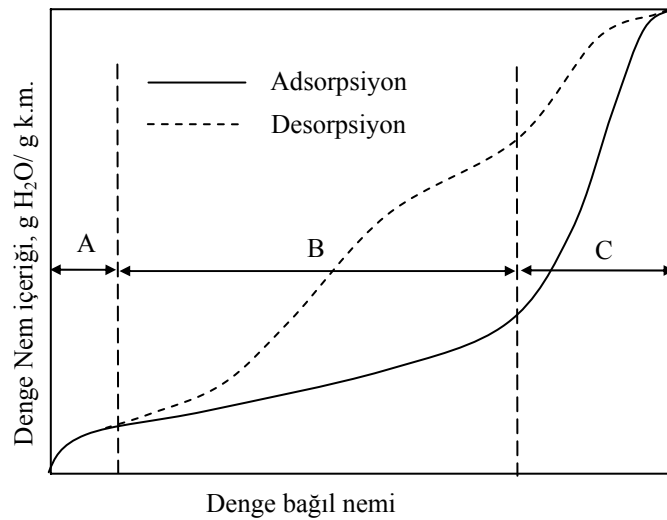
$$a_w = \frac{p}{p_1} = \frac{\text{Havanın denge bağıl nemi}}{100} \quad (1.5)$$

Nem içeriği bilinen bir gıda maddesi, sıcaklığı ve bağıl nemi sabit bir ortamda yeterli süre bekletilirse, havadaki su buharı basıncıyla üründeki suyun buhar basıncı dengeye erişinceye kadar nem alış verişinde bulunur. Denge halinde ise ürün tarafından tutulan suyun buhar basıncı ile havadaki suyun buhar basıncı eşittir. Denge halinde bulunan gıda maddesinin içerdiği nem miktarına *denge nemi*, denge halindeki ürünü çevreleyen havanın bağıl nemine de *denge bağıl nemi* denir. Kurutma işlemi sırasında denge nemi, kurutma havası sıcaklığına ve kurutma havası bağıl nemine bağlı olarak, kuru ürünün içerebileceği en az nem miktarını gösterir. Sadece higroskopik malzemeler, denge nem içeriğine sahiptir. Örneğin, sahil kumu higroskopik olmayan bir maddedir ve denge nem içeriği

sıfırdır (Roberts, 1999). Gıda maddelerinin belirli sıcaklık ve bağıl neme sahip ortamlarda ulaşacağı denge nemi değerlerinin bilinmesi, kurutma ve depolama işlemleri sırasında önemli kolaylıklar sağlamaktadır.

Denge nem içeriği ile denge bağıl nemi arasındaki ilişki olarak tanımlanan sorpsiyon eğrisinin belirlenmesinde, gıdanın yaş veya kuru olmasının etkisi vardır. Çünkü yaş gıdanın nem vermesi (desorpsiyon) ile kuru gıdanın nem alması (adsorpsiyon) olgusu tam olarak aynı yolu izleyen bir dönüşüm değildir. Islak maddenin farklı bağıl nemli ortamlarda tutulup denge nemine erişmesiyle elde edilen grafiğe “desorpsiyon eğrisi”, buna karşın kuru olan aynı maddenin, farklı bağıl nemli ortamlarda tutulup denge nemine erişmesiyle elde edilen eğriye “adsorpsiyon eğrisi” denir. Her ikisine beraber “sorpsiyon eğrisi” denir. Uygulamalarda genellikle kuru madde kullanılarak denge nem içeriği tayin edilmektedir.

Şekil 1.5’te, gıda maddelerinin sorpsiyon eğrisinin genel şekli gösterilmiştir. Ürün içindeki suyun bağlanış şekline göre sorpsiyon eğrisi üç bölgeye ayrılmıştır: A, B ve C. A bölgesinde, ürünün bünyesindeki su ürüne çok sıkı bir şekilde bağlanmıştır ve bu su üründe kimyasal reaksiyona giremeyecek ölçüde az miktardadır. Bu bölgede adsorpsiyon ve desorpsiyon çizgileri çakışmıştır, aralarında açıklık yoktur. B bölgesinde, bünyedeki su daha gevşek bağlıdır ve küçük gözeneklere hapsedilmiştir. Bu yüzden, ürün içindeki suyun buhar basıncı bulunduğu ortamın buhar basıncından farklıdır. C bölgesinde ise, su artık çok daha gevşek bağlıdır ve büyük gözenekler içinde tutulur. Bu bölgedeki su miktarının fazla olması sebebiyle reaksiyonlar hızlanır (Baker, 1997).



Şekil 1.5. Adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (Baker, 1997).

### 1.2.7. Kuru Gıdalarda Kalite Değişimleri

Kurutulmuş gıda maddelerinde büzülme, tekrar su alma yeteneğinin azalması, kuru madde kaybı ve sertleşme, kurutma sırasında sebze ve meyvelerin dokularında meydana gelen değişme, homojen kuruma olmayışı ve renk değişimleri kaliteyi düşüren etkenlerdir (Doymaz, 1998).

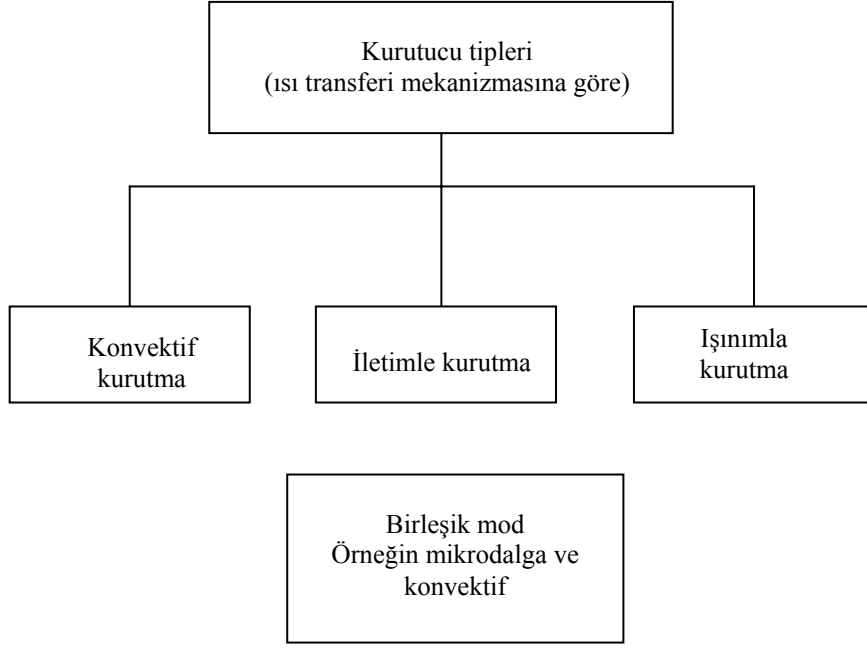
Yüksek sıcaklıklarda yapılan kurutmada ürün yüzeyi sertleşmekte, büzülmekte ve çatlamaktadır. Ürün yüzeyinin sertleşmesi ise, ürün merkezinden yüzeye doğru gerçekleşen kütle difüzyonuna karşı direnç oluşturacağı için kurutma süresinin uzamasına sebep olmaktadır (Brennan, 1976; Simal vd., 1997; Simal vd., 1998a).

Yüksek bağıl nemli ortamlarda yapılan kurutmada ise kuruma sonrasında ürünün son nem içeriği, mikroorganizmal etkileri harekete geçirebilecek ( $M_e > \%10$ ) düzeydedir (Hussain, 2001). Bu durumda ise, ürün daha çabuk bozulmaktadır. Bu sorunun giderilmesi ve daha kaliteli kurutulmuş gıda eldesi için, kurutma havası şartlarının belirlenmesi son derece önemlidir.

### 1.2.8. Temel Kurutucu Tipleri

Gıda, tekstil, ağaç v.b. gibi endüstride, kurutma çok önemli bir prosestir. Büyük ölçekte enerjinin harcandığı bu proseste, ürün kalitesi ve enerji tasarrufu açısından kurutucu seçimi oldukça önemlidir. Ayrıca, çevresel etkiler ve kurutma işleminin güvenli bir şekilde devam edebilmesi de kurutucu seçiminde önem arz etmektedir. Endüstride, çeşitli uygulamalarda kullanılan 200'ü aşkın kurutucu tipi mevcuttur. Ancak bunlardan yaklaşık 20 kadarı temel kurutucu tipleridir ve bu kurutucular yaygın olarak kullanılır (Baker, 1997).

Şekil 1.6' da ısı transferi mekanizmasına göre (konveksiyon, iletim, ışınlım) sınıflandırılmış temel kurutucu tipleri ile bunlardan birkaçının birlikte kullanıldığı birleşik kurutucu tipleri gösterilmiştir. Diğer kurutucu tipleri gıda kalitesi ve enerji tasarrufu yönünden daha avantajlı olmasına rağmen, kullanılabilirliğinin kolay olması sebebiyle, gıdaların kurutulmasında yaklaşık %90 oranında konvektif kurutucu tercih edilmektedir (Baker, 1997).



Şekil 1.6. Isı transferi mekanizmasına göre temel kurutucuların sınıflandırılması (Baker, 1997).

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Teorik Çalışma**

Kurutma teknolojisinde, kurutma prosesi ve ekipmanının matematiksel modelinin oluşturulması; uygun kurutma havası koşullarının belirlenmesi, kurutucu ekipmanı boyutunun ve kurutucu test bölgesinin akışa göre konumlandırılması açısından son derece önemlidir. Modellemede temel prensip; hem kurutucudaki hem de üründeki sıcaklık ve nem dağılımını ayrı ayrı karakterize eden matematiksel ifadelerin doğru bir şekilde oluşturulmasıdır. Elde edilen denklemlerin çözümüyle, zamana bağlı olarak üründe ve kurutucuda meydana gelen sıcaklık ve nem değişimleri belirlenir (Hussain, 2001).

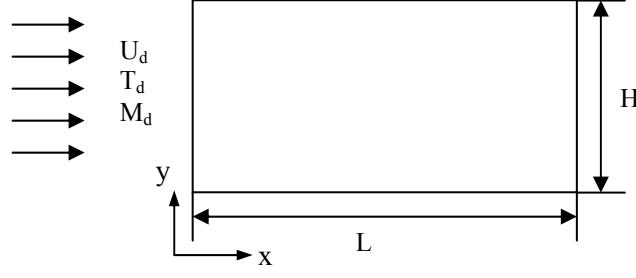
#### **2.1.1. Matematiksel Modelleme**

Bu bölümde, dikdörtgen, silindir ve küre şekilli gıda ürünlerinin kurumasını karakterize eden iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemlerinin teorik çözümleri gösterilmiştir. Bu ısı ve kütle transferi denklemlerinin çözümünde aşağıda verilen kabuller yapılmıştır:

- a) Proses boyunca kurutma havası hızı, sıcaklığı ve bağıl nemi sabittir.
- b) Kurutma müddetince üründe hacim değişimi olmamaktadır.
- c) Ürün içerisinde ısı üretimi yoktur.
- d) Ürüne ait üçüncü boyut etkileri ihmal edilmiştir.
- e) Ürün termofiziksel özellikleri sabittir.

##### **2.1.1.1. İki Boyutlu Dikdörtgen Şekilli Ürün**

Dikdörtgen şekle sahip ürünlerin kurumasını karakterize eden iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemleri ve ilgili başlangıç ve sınır koşulları aşağıda verilmiştir:



Şekil 2. 1. İki boyutlu kartezyen koordinatlarda ürün geometrisi

- Isı Transferi

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.1)$$

Başlangıç ve sınır koşulları:

$$t = 0 \text{ 'da} \quad T(x, y, 0) = T_i \quad (2.2a)$$

$t > 0$  için:

$$x = 0 \text{ ve } 0 \leq y \leq H \quad -k \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = h(T - T_d) \quad (2.2b)$$

$$x = L \text{ ve } 0 \leq y \leq H \quad k \frac{\partial T(L, y, t)}{\partial x} = h(T - T_d) \quad (2.2c)$$

$$y = 0 \text{ ve } 0 \leq x \leq L \quad -k \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = h(T - T_d) \quad (2.2d)$$

$$y = H \text{ ve } 0 \leq x \leq L \quad k \frac{\partial T(x, H, t)}{\partial y} = h(T - T_d) \quad (2.2e)$$

- Nem Transferi

$$\frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

Başlangıç ve sınır koşulları:

$$t = 0 \text{ 'da} \quad M(x, y, 0) = M_i \quad (2.4a)$$

$t > 0$  için:

$$x = 0 \text{ ve } 0 \leq y \leq H \quad -D \frac{\partial M(0, y, t)}{\partial x} = h_m (M - M_d) \quad (2.4b)$$

$$x = L \text{ ve } 0 \leq y \leq H \quad D \frac{\partial M(L, y, t)}{\partial x} = h_m (M - M_d) \quad (2.4c)$$

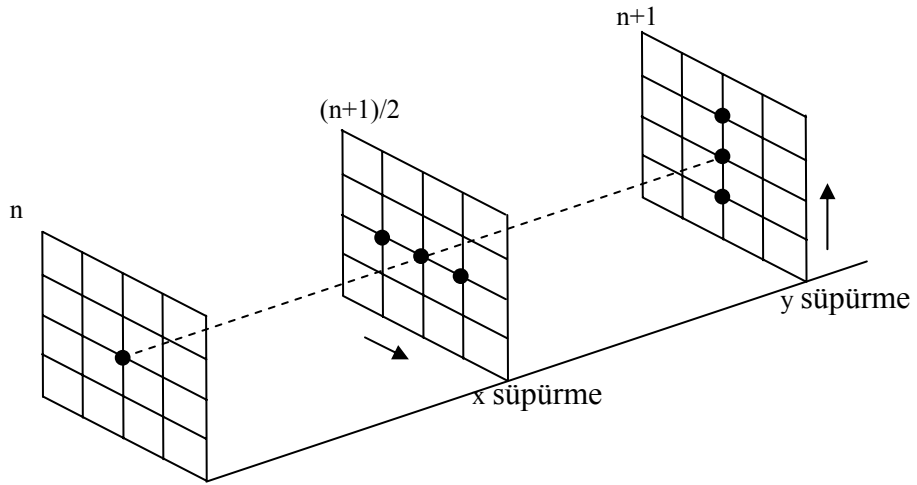
$$y = 0 \text{ ve } 0 \leq x \leq L \quad -D \frac{\partial M(x, 0, t)}{\partial y} = h_m (M - M_d) \quad (2.4d)$$

$$y = H \text{ ve } 0 \leq x \leq L \quad D \frac{\partial M(x, H, t)}{\partial y} = h_m (M - M_d) \quad (2.4e)$$

Burada;  $\alpha$ , termal difüzyon katsayısı;  $h$ , ısı taşınım katsayısı;  $D$  kütle difüzyon katsayısı ve  $h_m$ , kütle transfer katsayısıdır. İlgili başlangıç ve sınır koşulları altında, (2.1) ve (2.3) numaralı denklemler sonlu farklar yöntemiyle ayrıklaştırılmış ve Alternating Direction Implicit (ADI) yöntemi ile çözülmüştür.

### 2.1.1.2. Alternating Direction Implicit (ADI) Yöntemi

ADI, vortisite transport ve enerji denkleminin çözümünde en yaygın şekilde kullanılan yöntemdir. Bu yöntem, ilk olarak Peaceman ve Rachford (1955) tarafından önerilmiştir. ADI'daki yaklaşımın ana esası, bir zaman bağımlı problemi iki eşit zaman adımı üzerinden iki probleme bölmektir. Birinci yarı zaman adımında,  $x$  yönünde türevleri kapalı (implicit) şeklinde ifade edilirken;  $y$  yönündeki türevler açık (explicit) şekilde ifade edilmektedir. İkinci yarı zaman adımında ise,  $y$  yönündeki türevler kapalı olarak ifade edilirken,  $x$  yönündekiler açık olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.2). Bu şekil bir formülleme Thomas algoritması ile hızlı bir şekilde çözülebilecek tridiagonal matrislere yol vermektedir (Aydın, 1998).



Şekil 2.2. ADI yönteminde hesaplama şeklinin şematik gösterimi (Hoffmann, 1989; Aydın, 1998).

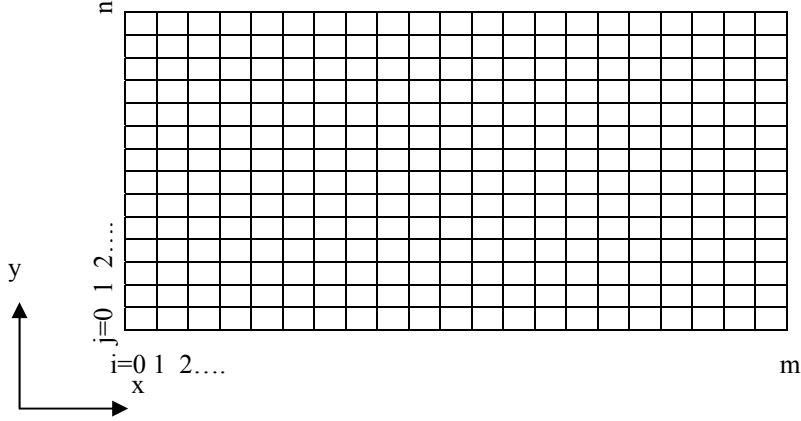


### 2.1.1.3. Çözüm Yöntemi

Dikdörtgen şekle sahip ürünün sayısal çözümünde kullanılan ağ yapısı Şekil 2.3' de gösterildiği gibi eş dağılıdır. Burada  $i$ ,  $x$  yönündeki ve  $j$ ,  $y$  yönündeki ağ noktalarını göstermektedir. Denklemlerin ADI ile açılımında,  $i=0$  da  $x$  yönündeki ilk sınır koşulu ve  $i=m$  de ikinci sınır koşulu uygulanırken  $j=0$  da  $y$  yönündeki ilk sınır koşulu ve  $j=n$  de ikinci sınır koşulu uygulanmaktadır. Buna göre ağ yapısının sonlu farklar gösterimi:

$$\begin{aligned} x_i &= i\Delta x, & i &= 0,1,2,\dots,m \\ y_j &= j\Delta y, & j &= 0,1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (2.5)$$

şeklindedir. Burada  $\Delta x$  ve  $\Delta y$ ,  $x$  ve  $y$  yönündeki iki nokta arasındaki mesafeyi göstermektedir.



Şekil 2.3. Dikdörtgen şekilli ürünün sayısal çözümünde kullanılan ağ yapısı

(2.1) numaralı ısı transferi denklemi, ADI yaklaşımıyla yazılacak olursa, her bir yarı zaman adımı için aşağıda verilen denklemler elde edilir:

Birinci yarı zaman adımı:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^* - T_{i,j}^n}{\Delta t/2} = \frac{T_{i+1,j}^* + T_{i-1,j}^* - 2T_{i,j}^*}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n}{\Delta y^2} \quad (2.6a)$$

İkinci yarı zaman adımı:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^*}{\Delta t/2} = \frac{T_{i+1,j}^* + T_{i-1,j}^* - 2T_{i,j}^*}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \quad (2.6b)$$

Burada, üst indis \* ile ara zaman adımıdaki değerler gösterilmektedir.

Aynı yöntem başlangıç ve sınır koşulları için uygulandığında:

$$t = 0 \text{ 'da} \quad T_{i,j} = T_i$$

$$x = 0 \text{ 'da} \quad -k \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x} = hT_{i,j} - hT_d \quad (2.7a)$$

$$x = L \text{ 'de} \quad k \frac{T_{N,M} - T_{N-1,M}}{\Delta x} = hT_{N,M} - hT_d \quad (2.7b)$$

$$y = 0 \text{ 'da} \quad -k \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta y} = hT_{i,j} - hT_d \quad (2.7c)$$

$$y = H \text{ 'da} \quad k \frac{T_{N,M} - T_{N,M-1}}{\Delta y} = hT_{N,M} - hT_d \quad (2.7d)$$

Isı transferi denkleminde uygulanan yöntem, (2.2) numaralı denkleminde verilen kütle transferi denkleminde de uygulanırsa:

Birinci yarı zaman adımı:

$$\frac{1}{D} \frac{M_{i,j}^* - M_{i,j}^n}{\Delta t/2} = \frac{M_{i+1,j}^* + M_{i-1,j}^* - 2M_{i,j}^*}{\Delta x^2} + \frac{M_{i,j+1}^n + M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n}{\Delta y^2} \quad (2.8a)$$

İkinci yarı zaman adımı:

$$\frac{1}{D} \frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^*}{\Delta t/2} = \frac{M_{i+1,j}^* + M_{i-1,j}^* - 2M_{i,j}^*}{\Delta x^2} + \frac{M_{i,j+1}^{n+1} + M_{i,j-1}^{n+1} - 2M_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \quad (2.8b)$$

Başlangıç ve sınır koşulları ise;

$$t = 0 \text{ 'da} \quad M_{i,j} = M_i$$

$$x = 0 \text{ 'da} \quad -D \frac{M_{i+1,j} - M_{i,j}}{\Delta x} = h_m M_{i,j} - h_m M_d \quad (2.9a)$$

$$x = L \text{ 'de} \quad D \frac{M_{N,M} - M_{N-1,M}}{\Delta x} = h_m M_{N,M} - h_m M_d \quad (2.9b)$$

$$y = 0 \text{ 'da} \quad -D \frac{M_{i,j+1} - M_{i,j}}{\Delta y} = h_m M_{i,j} - h_m M_d \quad (2.9c)$$

$$y = H \text{ 'da} \quad D \frac{M_{N,M} - M_{N,M-1}}{\Delta y} = h_m M_{N,M} - h_m M_d \quad (2.9d)$$

Çalışmada yakınsamayı kontrol etmede:

$$\text{ısı transferi için: } \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |T^* - T_{i,j}^n| \leq \varepsilon_{yk} \quad (2.10e)$$

$$\text{kütle transferi için: } \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |M^* - M_{i,j}^n| \leq \varepsilon_{yk} \quad (2.10f)$$

şeklinde bir yakınsama kriteri tanımlanmıştır. Burada  $\varepsilon_{yk}$ , seçilen bir yakınsama parametresi olup, bu çalışmada  $10^{-5}$ - $10^{-2}$  arasında değiştirilmiştir (Aydın, 1998). Yarı açık (explicit) türevlerde ise, zaman adımını kontrol etmede:

$$\text{ısı transferi için: } \Delta t \leq \frac{\Delta y^2}{2\alpha}$$

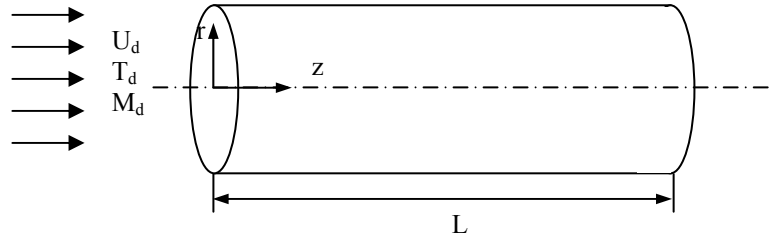
$$\text{kütle transferi için: } \Delta t \leq \frac{\Delta y^2}{2D}$$

şeklinde bir kriter tanımlanmıştır.

#### 2.1.1.4. İki Boyutlu Silindir Şekilli Ürün

##### 2.1.1.4.1. Akışa Paralel Konumda

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi akışa paralel olarak yerleştirilen bir ürünün kurumasını karakterize eden ısı ve kütle transferi denklemleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.4. İki boyutlu silindirik koordinatlarda ürün geometrisi

- Isı Transferi

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

Başlangıç ve sınır şartları:

$$t = 0 \text{ 'da} \quad T(r, z, 0) = T_i \quad (2.11a)$$

$t > 0$  için:

$$r = 0 \text{ 'da} \quad \frac{\partial T(0, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (2.11b)$$

$$r = R \text{ 'de} \quad -k \frac{\partial T(R, z, t)}{\partial r} = h(T - T_d) \quad (2.11c)$$

$$z = 0 \text{ 'da} \quad -k \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = h(T - T_d) \quad (2.11d)$$

$$z = L \text{ 'de} \quad k \frac{\partial T(r, L, t)}{\partial z} = h(T - T_d) \quad (2.11e)$$

- Kütle Transferi

$$\frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (2.12)$$

Başlangıç ve sınır şartları:

$$t = 0 \text{ 'da} \quad M(r, z, 0) = M_i \quad (2.13a)$$

$t > 0$  için:

$$r = 0 \text{ 'da} \quad \frac{\partial M(0, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (2.13b)$$

$$r = R \text{ 'de} \quad -D \frac{\partial M(R, z, t)}{\partial r} = h_m (M - M_d) \quad (2.13c)$$

$$z = 0 \text{ 'da} \quad -D \frac{\partial M(r, 0, t)}{\partial z} = h_m (M - M_d) \quad (2.13d)$$

$$z = L \text{ 'de} \quad D \frac{\partial M(r, L, t)}{\partial z} = h_m (M - M_d) \quad (2.13e)$$

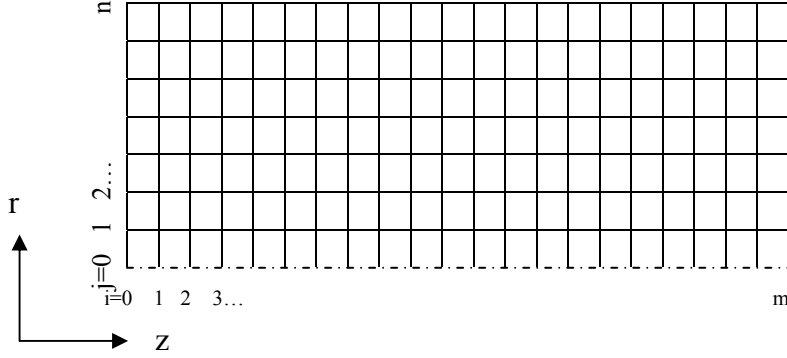
#### 2.1.1.4.2. Çözüm Yöntemi

İlgili başlangıç ve sınır koşulları altında, (2.10) ve (2.12) numaralı denklemler ADI yöntemiyle çözülmüştür. Şekil 2.5'te silindirik ürün için çözümde kullanılan ağ yapısı

gösterilmiştir. Burada  $i$ ,  $z$  yönündeki ağ noktalarını,  $j$  ise  $r$  yönündeki ağ noktalarını göstermektedir. Denklemlerin ADI ile açılımında,  $i=0$ 'da  $z$  yönündeki ilk sınır koşulu ve  $i=m$ 'de ise ikinci sınır koşulu uygulanır. Aynı şekilde  $j=0$ 'da  $r$  yönündeki ilk sınır koşulu,  $j=n$ 'de ise ikinci sınır koşulu uygulanmaktadır. Bu durumda, ağ yapısının sonlu farklar ile gösterimi:

$$\begin{aligned} z_i &= i\Delta z, & i &= 0, 1, 2, \dots, m \\ r_j &= j\Delta r, & j &= 0, 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.14)$$

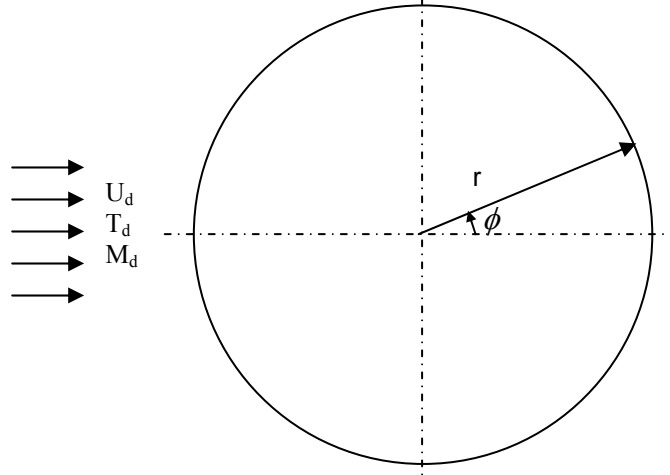
şeklinde olmaktadır. Burada  $\Delta z$  ve  $\Delta r$ ,  $z$  ve  $r$  yönündeki iki nokta arasındaki mesafeyi göstermektedir. (2.10) ve (2.12) numaralı denklemler, ilgili başlangıç ve sınır koşulları altında (2.6)-(2.9) numaralı denklem takımında gösterildiği gibi ayrıklaştırılır.



Şekil 2.5. Akışa paralel konumda yerleştirilen silindir şekilli ürünün sayısal çözümünde kullanılan ağ yapısı

#### 2.1.1.4.3. Akışa Dik Konumda

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, kurutma havasına dik konulmuş silindir şekilli ürünün kurumasını karakterize eden ilgili ısı ve kütle transferi denklemleri ile başlangıç ve sınır koşulları aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.6. İki boyutlu silindirik koordinatlarda ürün geometrisi

- Isı transferi

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \quad (2.15)$$

Başlangıç ve sınır koşulları:

$$t = 0 \text{ 'da} \quad T(r, \phi, 0) = T_i \quad (2.16a)$$

$t > 0$  için:

$$r = 0 \text{ 'da} \quad \frac{\partial T(0, \phi, t)}{\partial r} = 0 \quad (2.16b)$$

$$r = R \text{ 'de} \quad -k \frac{\partial T(R, \phi, t)}{\partial r} = h(T - T_d) \quad (2.16c)$$

$$\phi = 0 \text{ 'da} \quad T(r, 0, t) = T(r, 2\pi, t) \quad (2.16d)$$

$$\phi = 2\pi \text{ 'de} \quad \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial \phi} = \frac{\partial T(r, 2\pi, t)}{\partial \phi} \quad (2.16e)$$

- Kütle Transferi

$$\frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 M}{\partial \phi^2} \quad (2.17)$$

Başlangıç ve sınır koşulları:

$$t = 0 \text{ 'da} \quad M(r, \phi, 0) = M_i \quad (2.18a)$$

$t > 0$  için:

$$r = 0 \text{ 'da} \quad \frac{\partial M(0, \phi, t)}{\partial r} = 0 \quad (2.18b)$$

$$r = R' \text{ de} \quad -D \frac{\partial M(R, \phi, t)}{\partial r} = h_m (M - M_d) \quad (2.18c)$$

$$\phi = 0' \text{ da} \quad M(r, 0, t) = M(r, 2\pi, t) \quad (2.18d)$$

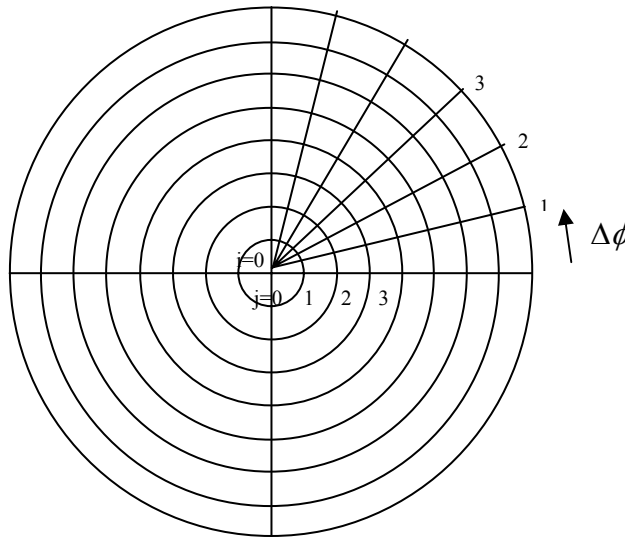
$$\phi = 2\pi' \text{ de} \quad \frac{\partial M(r, 0, t)}{\partial \phi} = \frac{\partial M(r, 2\pi, t)}{\partial \phi} \quad (2.18e)$$

#### 2.1.1.4.4. Çözüm Yöntemi

Akışa dik konulan silindir şekilli ürünün çözümünde kullanılan ağ yapısı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Burada,  $i$ ,  $\phi$  yönündeki ağ noktalarını,  $j$  ise  $r$  yönündeki ağ noktalarını göstermektedir. Denklemlerin ADI ile açılımında  $i=0$  da,  $\phi$  yönündeki ilk sınır koşulu ve  $i=m$ ’de, ikinci sınır koşulu uygulanır. Benzer şekilde;  $j$ ,  $r$  yönündeki ağ noktalarını göstermektedir ve denklemlerin açılımında  $j=0$ ’da  $r$  yönündeki ilk sınır koşulu,  $j=n$ ’de ise ikinci sınır koşulu uygulanmaktadır. Ağ yapısının sonlu farklar gösterimi:

$$\begin{aligned} \phi_i &= i\Delta\phi, & i &= 0, 1, 2, \dots, m \\ r_j &= j\Delta r, & j &= 0, 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.19)$$

şeklinde olmaktadır. (2.15) - (2.17) numaralı denklem takımı ilgili başlangıç ve sınır koşulları altında, (2.6) - (2.9) numaralı eşitliklerde gösterildiği gibi ayrıklaştırılır.



Şekil 2.7. Akışa dik konumda yerleştirilen silindirik şekle sahip ürünün sayısal çözümünde kullanılan ağ yapısı

### 2.1.1.5. İki Boyutlu Küre Şekilli Ürün

Küre şekilli ürünün kurumasını karakterize eden iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemleri ile ilgili başlangıç ve sınır koşulları aşağıda verilmiştir.

- Isı transferi

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \quad (2.20)$$

Başlangıç ve sınır koşulları:

$$t = 0 \text{ da} \quad T(r, \phi, 0) = T_i \quad (2.21a)$$

$t > 0$  için:

$$r = 0 \text{ da} \quad \frac{\partial T(0, \phi, t)}{\partial r} = 0 \quad (2.21b)$$

$$r = R \text{ de} \quad -k \frac{\partial T(R, \phi, t)}{\partial r} = h(T - T_d) \quad (2.21c)$$

$$\phi = 0 \text{ da} \quad T(r, 0, t) = T(r, 2\pi, t) \quad (2.21d)$$

$$\phi = 2\pi \text{ de} \quad \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial \phi} = \frac{\partial T(r, 2\pi, t)}{\partial \phi} \quad (2.21e)$$

- Kütle Transferi

$$\frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 M}{\partial \phi^2} \quad (2.22)$$

Başlangıç ve sınır koşulları:

$$t = 0 \text{ da} \quad M(r, \phi, 0) = M_i \quad (2.23a)$$

$t > 0$  için:

$$r = 0 \text{ da} \quad \frac{\partial M(0, \phi, t)}{\partial r} = 0 \quad (2.23b)$$

$$r = R \text{ de} \quad -D \frac{\partial M(R, \phi, t)}{\partial r} = h_m (M - M_d) \quad (2.23c)$$

$$\phi = 0 \text{ da} \quad M(r, 0, t) = M(r, 2\pi, t) \quad (2.23d)$$

$$\phi = 2\pi \text{ de} \quad \frac{\partial M(r, 0, t)}{\partial \phi} = \frac{\partial M(r, 2\pi, t)}{\partial \phi} \quad (2.23e)$$



### **2.1.1.5.1. Çözüm Yöntemi**

Yukarıda verilen (2.20) ve (2.22) numaralı denklemlerin çözümünde oluşturulan ağ yapısı ve kullanılan yöntem, Bölüm 2.1.1.4.4' te verilmiştir.

### **2.1.1.6. Ürün Etrafındaki Hava Akışının İncelenmesi**

Bir ürünün homojen kurumasını sağlamak için, kurutma havasının ürün etrafındaki davranışı bilinmelidir. Bu davranışın bilinmesiyle, yeni kurutucuların tasarlanması, kuru gıdalarda meydana gelen kuruma kusurlarının ortadan kaldırılması, homojen ve daha kaliteli kurutulmuş gıda elde edilmesi mümkündür. Çalışmanın bu kısmında, ilk olarak dikdörtgen ve akışa dik konumda tutulan silindirik şekilli ürün etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Ürün etrafında sıcaklık dağılımının belirlenmesiyle, ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları tespit edilmiştir.

Homojen kurumayı sağlamak amacıyla, kurutma havasının kurutucuya farklı konumlardan giriş ve çıkışı sağlanarak, ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanları belirlenmiştir. Ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanları belirlendikten sonra; üründeki sıcaklık ve nem dağılımları farklı zaman periyotları için araştırılmıştır. Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları dış akış çözümlerinden elde edilmiş ve üründeki sıcaklık ve nem transferini tespit etmek için kullanılmıştır. Dış akış probleminde, ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanlarının çözümünde Fluent programı kullanılmıştır.

#### **2.1.1.6.1. Dikdörtgen Şekilli Ürün**

Herhangi bir akış probleminin teorik çözümünde, akışkanlar mekaniğinin genel denklemleri olan Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri kullanılmaktadır. İkinci mertebeden kısmi türevli, lineer olmayan bu denklemlerle, uygun başlangıç ve sınır koşullarının kullanılmasıyla, akış alanının yaklaşık çözümleri elde edilebilmektedir.

Ürünün alt ve üst yüzeyi ile onu sınırlandıran yüzeyler arasındaki mesafe sonsuz genişlikte tutulmuştur. Bu sebeple, ürünün dış akış ortamında tutulduğu kabul edilmiştir. Dış akışta, akışın rejimi (laminer veya türbülans) ürünün karakteristik boyutuna göre tespit

edilmiş ve akışın laminar olduğu belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, akışkanın sıkıştırılmaz kabulü yapılırsa, kartezyen koordinatlarda, temel denklemler şu şekilde yazılır:

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.24)$$

Momentum denklemi:

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.25)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.26)$$

Enerji denklemi:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.27)$$

Bu denklemlerin çözümünde Fluent paket programı, denklemlerin ayrıklaştırılmasında sonlu kontrol hacmi ve iteratif çözücü olarak da SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Geometri ve ağ oluşturma işlemleri için, Fluent ile uyumlu çalışan diğer bir paket programı olan Gambit kullanılmıştır.

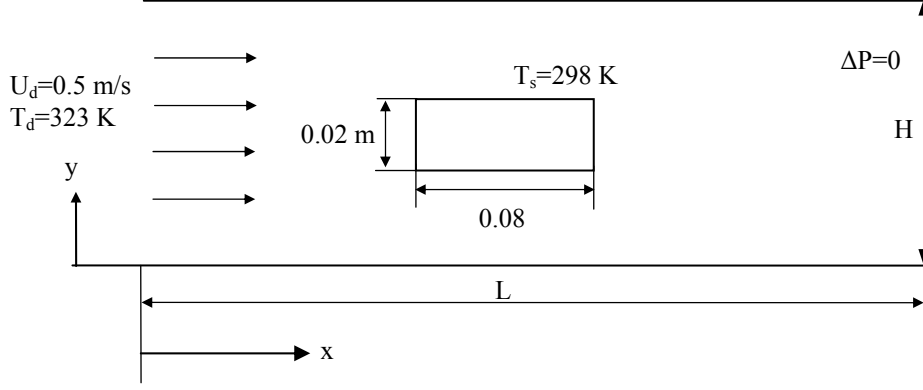
#### 2.1.1.6.1.1. Başlangıç ve Sınır Şartları

Teorik çalışma, iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Akış alanı ve geometrisi Şekil 2.8' de gösterilmiştir. Akış alanını çözmek için oluşturulan ağ yapısı Gambit programında oluşturulmuştur. Sınır şartları ise;

$$\begin{aligned} y = 0' da \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T(x, 0)}{\partial y} = 0 \\ y = H' da \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T(x, H)}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (2.28)$$

şeklinde tanımlanmış ve ürünün bütün yüzeyleri  $T_s$  sabit sıcaklığında tutulmuştur.

Beş farklı boyut oranı (AR=L/H=4, 2, 1, 0.5, 0.25) Gambit programında oluşturulmuş ve Fluentte ayrı ayrı çözülmüştür.

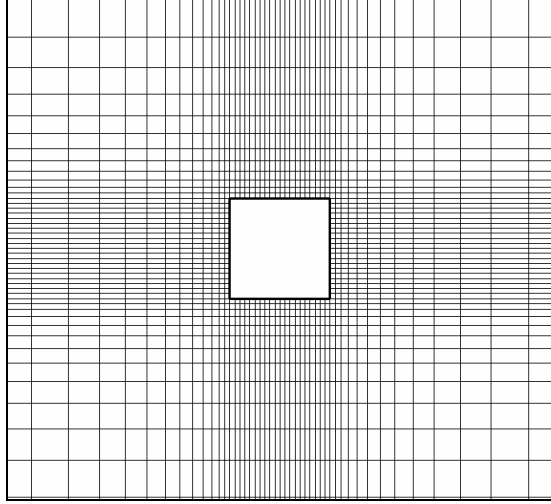


Şekil 2.8. Dikdörtgen şekilli ürün etrafındaki akış alanı için tanımlanan problem

Bu simülasyon çalışmasında; basınç denkleminin gevşetme faktörü 0.3, momentum denklemlerinin gevşetme faktörü 0.7, enerji denkleminin gevşetme faktörü 1 olarak seçilmiştir. Süreklilik ve momentum denklemlerinin yakınsama kriteri 0.001 ve enerji denklemlerinin yakınsama kriteri ise 0.000001 olarak alınmıştır. Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin yakınsama değerleri yukarıda ifade edilen değerlerin altında olduğu zaman, programın temel denklemlere ait cebirsel denklemleri, nümerik olarak doğru çözdüğü kabul edilmiştir.

#### 2.1.1.6.1.2. Ağ Yapısı

Gambit programında iki farklı ağ hücresi bulunmaktadır. Yapılandırılmış ağ olarak tanımlanan hücreler dörtgen, yapılandırılmamış olanlar ise üçgen şeklindedir. Çalışmada dörtgen şeklinde olan ağ hücreleri kullanılmıştır. Ayrıca, dörtgen ve üçgen ağ tipleri ile yapılan çözümlerin sonuçları arasındaki farkın ihmal edilebilir olduğu belirtilmiştir (Altaç ve Ünalın, 2007). Bu çalışmada, bütün boyut oranlarında yaklaşık 166 x 750'lik ağ kullanılmıştır.



Şekil 2.9. Boyut oranı 1 (AR=1) olan ürün için GAMBIT programında oluşturulan ağ yapısı

Ürün etrafındaki sıcaklık alanı belirlendikten sonra, yerel ısı taşınım katsayısı;

$$-k_f \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s = h(T_s - T_d) \quad (2.29)$$

bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir. Burada s yüzey boyunca koordinat, n yüzeyin normali,  $k_f$  akışkanın ısı iletim katsayısı,  $T_s$  ürün yüzey sıcaklığı ve  $T_d$  kurutma havası sıcaklığıdır.

Isı taşınım katsayısı belirlendikten sonra, termal ve konsantrasyon sınır tabakaları arasındaki benzeşim kullanılarak (Chilton-Colburn analogisi) kütle taşınım katsayısı:

$$h_m = h \left( \frac{D_{AB} Le^n}{k_f} \right) \quad (2.30)$$

bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir. Ürün yüzeyindeki suyun buharlaşarak hava içindeki yayılım hızı  $D_{AB}$  ise:

$$D_{AB} = 2.3056 \times 10^{-5} \frac{9.81 \times 10^4}{p} \left( \frac{T_{ort} + 273}{273} \right)^{1.81} \quad (2.31)$$

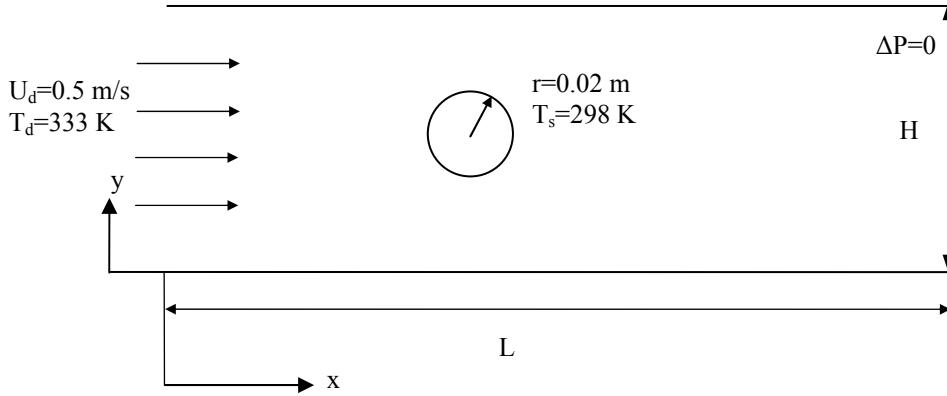
bağıntısı ile belirlenmiştir (Kneule, 1970; Bialobrzewski vd, 2005)

Burada  $Le$ , Lewis sayısıdır ve termal ve konsantrasyon sınır tabakalarının kalınlığı hakkında bilgi verir.  $D_{AB}$ , su buharının hava içindeki yayılım hızı;  $p$ , atmosfer basıncı ve  $T_{ort}$  ortalama sıcaklıktır. Zorlanmış taşınım durumlarında  $n=1/3$  olarak alınır (Incropera ve De Witt, 2001).

Ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanları belirlendikten sonra, üründe meydana gelen sıcaklık ve nem dağılımlarını belirlemek amacıyla iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemleri Bölüm 2.1.1 'de verildiği gibi çözülmüştür. Dış akış çözümlerinden elde edilen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları, ısı ve kütle transferi denklemlerinin çözümünde yüzeyde konvektif sınır koşulu olarak kullanılmıştır.

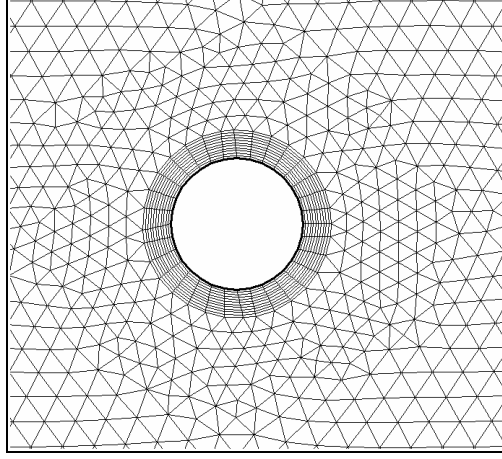
### 2.1.1.6.2. Akışa Dik Konumdaki Silindir Şekilli Ürün

Kurutma havası belirli bir hız ve sıcaklıkta silindir şekilli ürüne gönderilmiştir (Şekil 2.10). Gambit programında çizilip ağ yapısı Şekil 2.1.1.'de gösterildiği gibi oluşturulan bu geometrinin akış alanı çözümünde kullanılan sınır koşulları, (2.28) numaralı eşitlikteki gibi alınmıştır.



Şekil 2.10. Akışa dik konumdaki silindir şekil ürün için tanımlanan problem

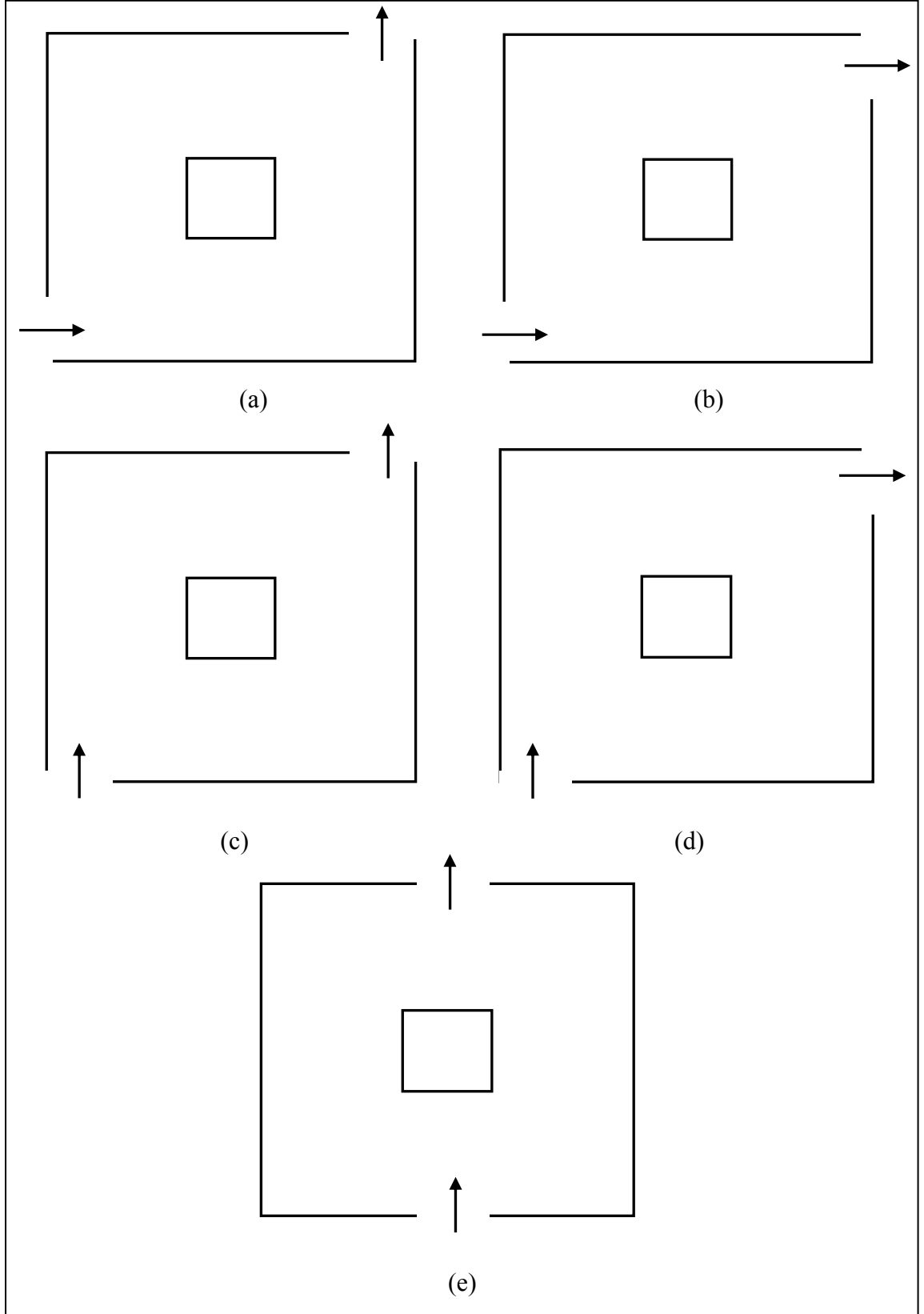
Akış alanı belirlendikten sonra, iki boyutlu silindir şekilli üründe meydana gelen sıcaklık ve nem dağılımı belirlenmiştir. Silindirik koordinatlarda iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemleri ve çözüm yöntemi Bölüm 2.1.1.4.3.'de verilmiştir.



Şekil 2.11. GAMBIT programında oluşturulan ağ yapısı

### 2.1.1.6.3. Kurutma Havaasının Kurutucuya Optimum Giriş ve Çıkış Konumu

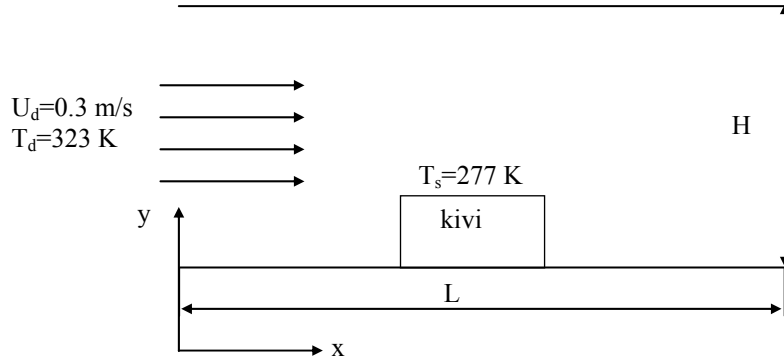
Uygulamada sık sık karşılaşılan problemlerden biri de, ürün yüzeylerinin kurutma havasına eşit maruz kalmayışı sebebiyle, homojen kurumunun sağlanamamasıdır. Bu durum, kurutma havasının ürünün bütün yüzeylerine temas etmesiyle çözülebilir. Çalışmanın bu bölümünde, Şekil 2.12’de gösterilen ve boyutları sabit tutulan kurutucuda, kurutma havasının optimum giriş ve çıkış konumu araştırılmıştır. Gambit programında çizilip ağ yapısı Şekil 2.9’deki gibi gösterilen geometride, ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanlarının belirlenmesi için yukarıda verilen Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır. Akış alanı belirlenip ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları tespit edildikten sonra, Bölüm 2.1.1.1’de verilen iki boyutlu dikdörtgen şekilli ürünlerin kurummasını karakterize eden ısı ve kütle transferi denklemleri çözülmüştür. Farklı giriş ve çıkış konumları için çözümler yapılmış, homojen ve daha kısa sürede kurumayı sağlayan kurutucu tespit edilmiştir. Optimum kurutucu belirlendikten sonra, boyut oranının, ürünün kuruma davranışı ile ısı ve kütle taşınım katsayılarına etkisi incelenmiştir.



Şekil 2.12. Kurutma havasının kurutucuya giriş ve çıkış konumları, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d) ve 5. Kurutucu (e)

#### 2.1.1.6.4. Kivi Kurutmanın Teorik İncelenmesi

Şekil 2.13’de gösterildiği gibi, test bölgesi yatay konumda tutulan konvektif kurutucuda dikdörtgen şekilli kivinın kuruma davranışı deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışmanın teorik kısmında, 25 x 45 mm boyutlarında kesilen dikdörtgen şekilli kivinın etrafındaki hız ve sıcaklık alanları Fluent paket programıyla belirlenmiştir. Bu problemde kullanılan ağ yapısı, Bölüm 2.1.1.6.1.2.’de verildiği gibidir. Akış alanı çözümünde kullanılan sınır koşulları ise (2.28) numaralı eşitlikte verildiği gibi alınmıştır.



Şekil 2.13. Akış alanı modellenen test bölgesi

Ürün etrafındaki akış ve sıcaklık alanı belirlendikten sonra, üründe meydana gelen ısı ve kütle transferi iki boyutlu olarak incelenmiştir. Bu amaçla, ısı yayılım katsayısı nem içeriği ve sıcaklığa bağlı olan ısı transfer denklemi aşağıda verilmiştir.

Isı transferi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha(M, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \alpha(M, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.32)$$

Başlangıç ve sınır koşulları:

$$t = 0 \text{ 'da} \quad T(x, y, 0) = T_i \quad (2.32a)$$

$t > 0$  için:

$$x = 0 \text{ ve } 0 \leq y \leq H \quad -k(M) \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = h(T - T_d) \quad (2.32b)$$

$$x = L \text{ ve } 0 \leq y \leq H \quad k(M) \frac{\partial T(L, y, t)}{\partial x} = h(T - T_d) \quad (2.32c)$$



$$y = 0 \text{ ve } 0 \leq x \leq L \quad \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (2.32d)$$

$$y = H \text{ ve } 0 \leq x \leq L \quad -k(M) \frac{\partial T(x, H, t)}{\partial y} = h(T - T_d) \quad (2.32e)$$

Verilen denklemler, sonlu farklar yöntemiyle ayrıklaştırılarak çözülmüştür. Nem transferini belirlemede ise (2.3) numaralı denklem, verilen başlangıç ve sınır koşulları altında çözülmüştür. Sınır koşullarında ki tek farklılık ürün alt yüzeyinin yalıtımlı olmasıdır. Bu durumda (2.4d) ile verilen sınır koşulu:

$$y = 0 \text{ ve } 0 \leq x \leq L \quad \frac{\partial M(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (2.33)$$

halini almaktadır.

Teorik modellemede kullanılan ürünün termofiziksel özellikleri, kurutma havası sıcaklığı ve ürün nem içeriğine bağlı olarak literatürden alınmıştır. Buna göre ürünün:

- ısı iletim katsayısı:

$$k = (0.148 + 0.493M) \quad (2.34)$$

- özgül ısı:

$$c_p = (0.837 + 1.256M) \times 1000 \quad (2.35)$$

- ısı yayılım katsayısı:

$$\alpha = (0.057363M + 0.000288(T + 273)) \times 10^{-6} \quad (2.36)$$

(Dincer, 1997) ve difüzyon katsayısı  $D=7.13 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (Simal vd., 2005) şeklinde alınmıştır. Burada M, ürünün yaş baza göre nem içeriğidir (g H<sub>2</sub>O/g y.m.).

#### 2.1.1.6.5. Karayemiş Kurutmanın Teorik İncelenmesi

Test bölgesi düşey konumda tutulan konvektif kurutucuda karayemişin kuruma davranışı deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Karayemişin kurumasını karakterize etmede iki boyutlu kütle transferi denklemi (2.22 denklemi) kullanılmıştır. Teorik çözümlerde, literatürde yaygın olarak sabit konsantrasyon sınır koşulu kullanılmışken (Dutta vd., 1988; Mulet vd., 1988; Yilbas vd., 2003), bu çalışmada, ürün yüzeyinde hem sabit konsantrasyon hem de konvektif sınır koşulu kullanılmıştır. Denklemin çözümünde başlangıç ve merkez sınır koşulları, Bölüm 2.1.1.5' te verildiği gibidir. Ürün yüzeyinde ise (r=R), iki farklı sınır koşulu kullanılmıştır:

i) konvektif sınır koşulu

$$-D \frac{\partial M(R, \phi, t)}{\partial r} = h_m (M - M_e) \quad (2.37)$$

ve

ii) sabit konsantrasyon sınır koşulu

$$M(R, \phi, t) = M_e \quad (2.38)$$

olarak alınmıştır. Denklemin çözümü için gerekli olan difüzyon katsayısı  $D_{\text{eff}}$  ve kütle taşınım katsayısı  $h_m$ , bu çalışmadaki deneysel veriler kullanılarak belirlenmiştir.

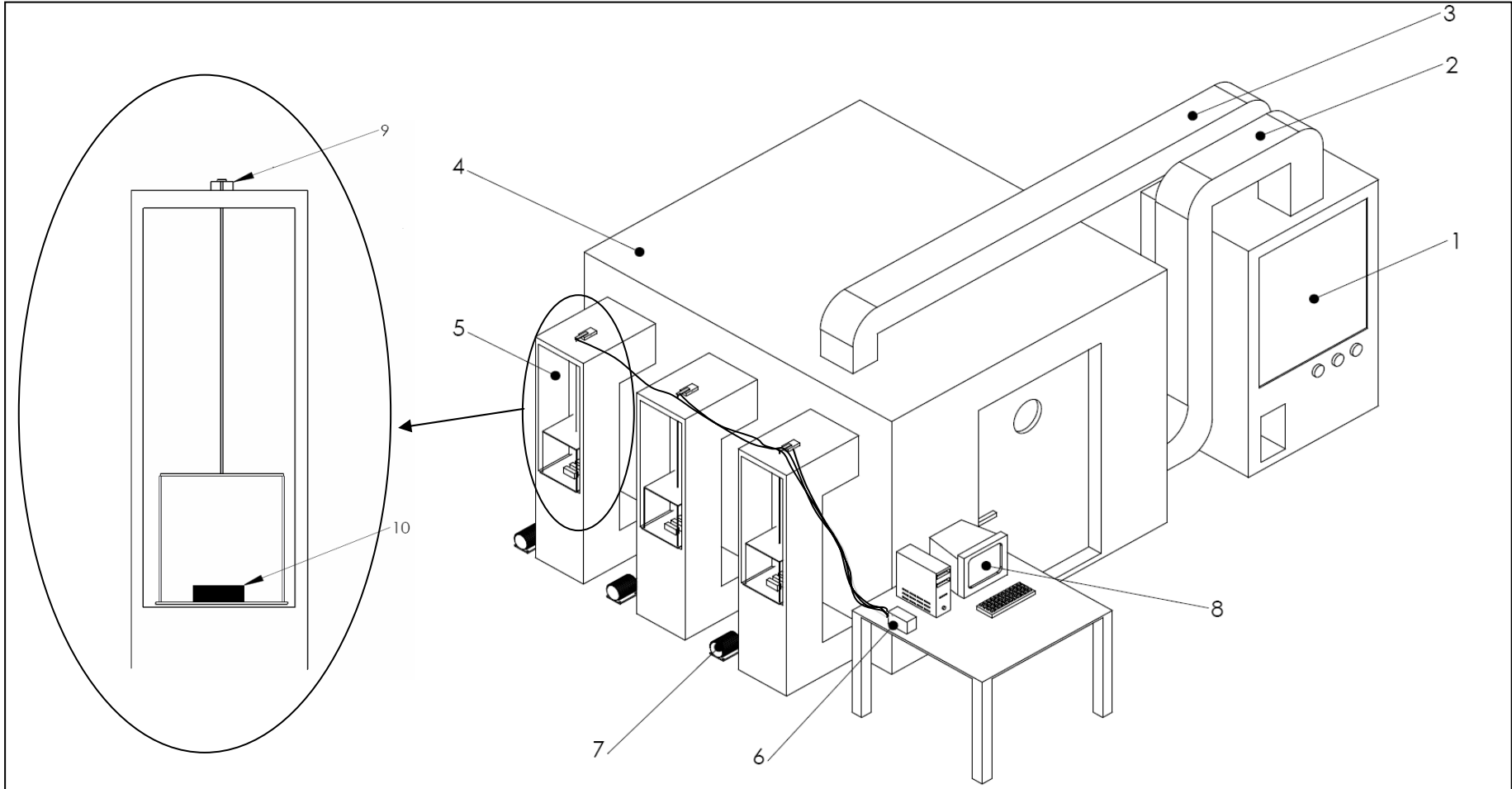
## 2.2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışma kapsamında, iki farklı konvektif kurutucu tasarlanarak KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Termo-Akışkanlar laboratuvarına kurulmuştur. Bu kurutuculardan birinin test bölgesi düşey konumda tutulurken diğerinin test bölgesi yatay konumda tutulmuştur.

### 2.2.1. Test Bölgesi Düşey Konumda Tutulan Kurutucu

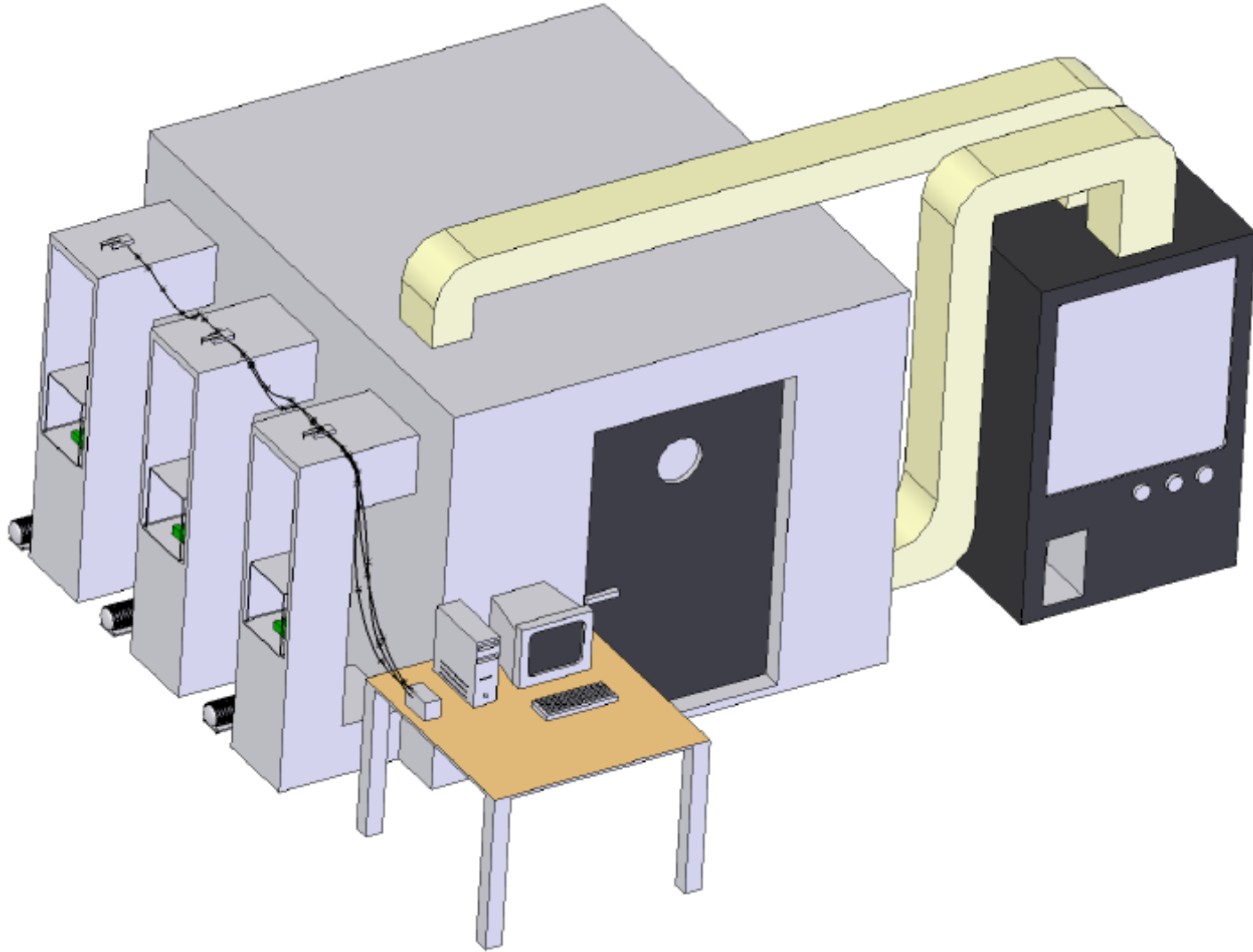
Test bölgesi düşey konumda tutulan deney düzeneği Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Bu deney düzeneği ile kurutma havası şartları kontrol edilebilmektedir. Deney düzeneğini; klima cihazı, şartlandırma odası ve kurutma kanalları (test bölgesi) oluşturmaktadır. Klima cihazı, boyutları 3 x 3 x 3 m<sup>3</sup> olan şartlandırma odasına, hava üfleme ve hava emme kanallarıyla bağlanmıştır. Şartlandırma odasında bulunan kurutma havası emme kanalıyla çekilmekte, klima cihazında işleme tabii tutulup üfleme kanalıyla tekrar şartlandırma odasına gönderilmektedir. Bu işlem, kurutma havası istenilen şartlara gelinceye kadar devam etmektedir. Klima cihazı üzerinde bulunan dijital göstergelere, kurutma havasına ait değerler (sıcaklık ve bağıl nem) girilmektedir. Otomatik kontrol sistemiyle ısıtıcı, nemlendirici veya nem alıcı sistemler devreye girerek veya devreden çıkarak şartlandırma odasının sıcaklık ve bağıl nem değerlerini sabitlemektedirler. Şartlandırma odasına bağlı olan, düşey konumda ve kesiti 35 x 35 cm olan test bölgesine kurutma havası, hızı kontrol edilebilir bir fan ile gönderilmektedir. Test bölgesinde bulunan kurutma tepsisi yük hücrelerine bağlanmış, yük hücreleri de veri okuma ve kaydetme

sistemi ile bilgisayara bağlanmıştır. Böylece kurutulan üründe meydana gelen anlık kütle değişimleri bilgisayar ortamına otomatik olarak kaydedilmektedir. Deney düzeneğinde çalışma sıcaklığı,  $T=5^{\circ}\text{C}$  ile  $65^{\circ}\text{C}$ ; kurutma havası hızı,  $U=0$  ile  $10$  m/s ve kurutma havası bağıl nemi ise  $\varphi=\%20$  ile  $95$  aralığındadır.



1-Klima cihazı, 2-Hava üfleme kanalı, 3-Hava emme kanalı, 4-Şartlandırma odası, 5-Test bölgesi, 6-Veri okuma ve kaydetme sistemi, 7- Hızı ayarlanabilir motor, 8-Bilgisayar, 9-Yük hücresi, 10-Ürün

Şekil 2.14. Test bölgesi düşey konumda tutulan konvektif kurutucu



Şekil 2. 15. Deney düzeneğinden bir görünüş

### 2.2.2. Test Bölgesi Yatay Konumda Tutulan Kurutucu

Çalışma kapsamında kullanılan ikinci deney düzeneği ise Şekil 2.16'da gösterilmiştir. İlk deney düzeneğinden farklı olarak, bu deney düzeneğinin test bölgesi yatay konumda tutulmuştur. Deney düzeneği, hızı kontrol edilebilir fan, ısıtıcı, soğutucu, nemlendirme ünitesi, hava girişi, hava çıkışı, kullanılmış ve taze hava karışım odacığı, kurutma tepsi, yük hücresi, veri okuma ve kaydetme sistemi ile bilgisayardan oluşmaktadır.

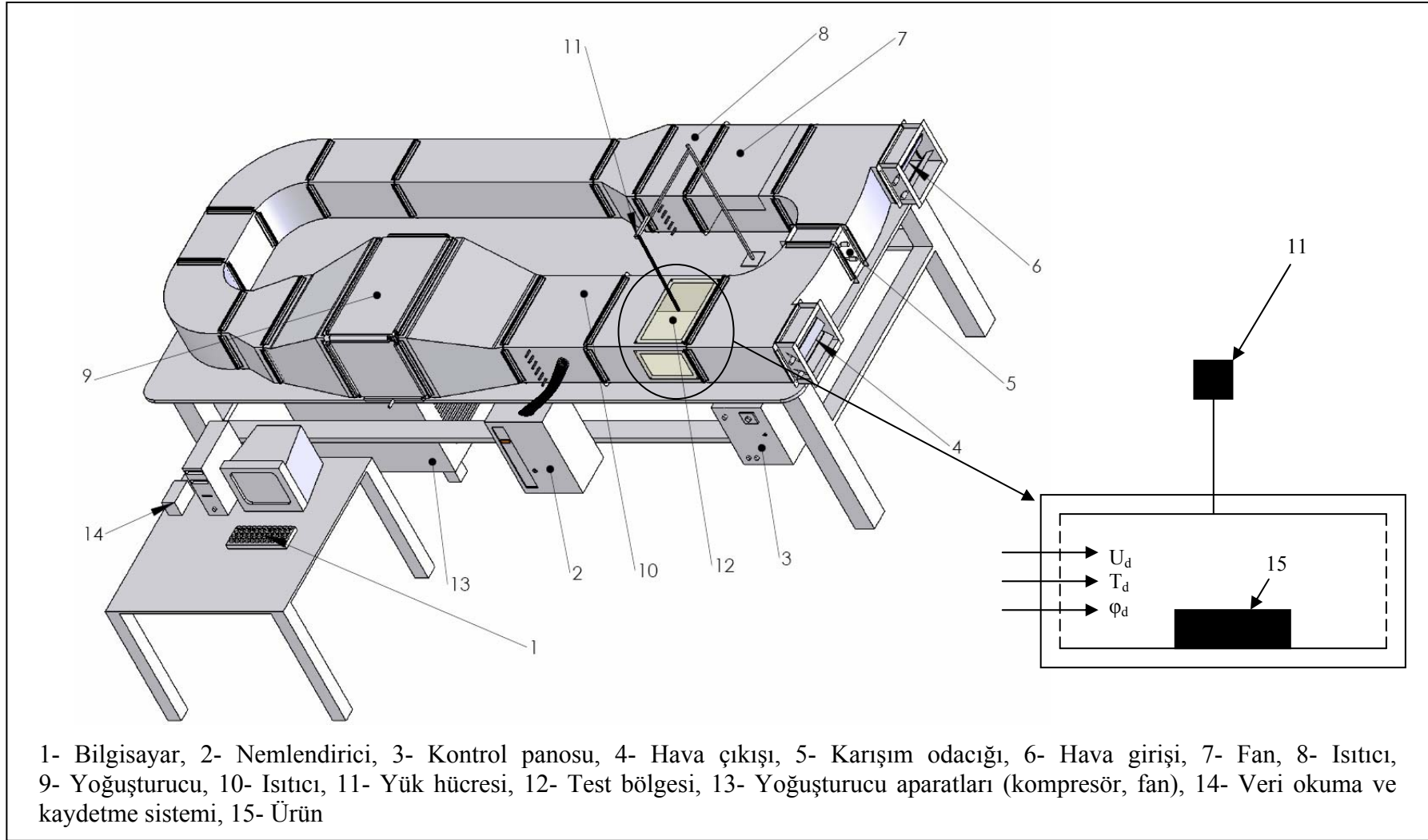
Isı yalıtımı iyi bir şekilde yapılan konvektif kurutucuda, proses boyunca kurutma havası şartlandırılmaktadır. Havanın şartlandırılması için, kurutucuda sıcaklık, hız, nem alma ve nem verme kontrol üniteleri kullanılmıştır. İstenilen şartlara erişmek amacıyla bu kontrol üniteleri devreye girmekte veya devre dışı kalmaktadır. Böylece, kurutma prosesi boyunca kurutma havası sıcaklığı ve bağıl nemi sabit kalmaktadır. Ayrıca sistem, hem kapalı, hem açık devre ve hem de belli oranda taze ve şartlanmış havanın karıştırılabildiği birleşik devrede çalışabilecek şekilde tasarlanıp imal edilmiştir. Sistemde, kurutma havası hız aralığı, 0-10 m/s; sıcaklığı -30-90°C ve bağıl nemi ise %0-95 aralığındadır.

Test bölgesinde, akışa paralel olarak yerleştirilmiş ve alt yüzeyi yalıtılmış kurutma tepsi bulunmaktadır. Bu tepsi, akışın özelliğini bozmayacak şekilde test bölgesine yerleştirilmiştir. Kurutma tepsi, kurutulan ürünler üzerine yerleştirildikten sonra yük hücresine bağlanmış, yük hücresi de veri okuma ve kaydetme sistemine bağlanmıştır. Böylece, kurutma işlemi boyunca üründe meydana gelen anlık değişimler, veri okuma ve kaydetme sistemi ile bilgisayara doğrudan kaydedilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm cihazları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kullanılan ölçüm cihazları

Cinsi	Kodu	Ölçüm aralığı	Hassasiyeti
Nem tayin cihazı	MB45	0-45 g	±0.001 g
Yük hücresi	Lama tip	10000 g	±0.01 g
Anomometre	LUTRON 4202 HT ve 4204 HT	0.2-40 m/s	±0.05 m/s
Termometre	OMEGA HH21	0-400°C	±0.1°C

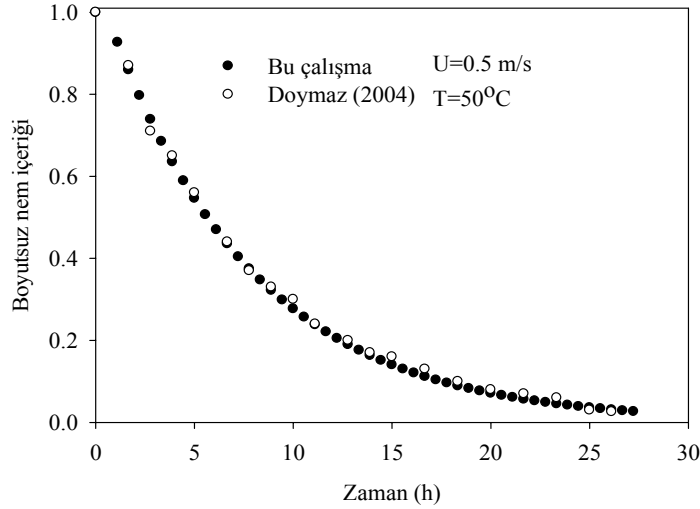


Şekil 2.16 Test bölgesi yatay konumda olan konvektif kurutucu

### 2.2.3. Test Deneyleri

Kullanılan deney düzeneğinden alınan ölçümlerin doğruluğu, başka bir deneysel çalışmanın verileri kullanılarak sorgulanmıştır. Doymaz (2004), nem içeriği %87.5 olan havucu küp şeklinde kesmiş ve test bölgesi düşey konumda tutulan konvektif kurutucuda kurutmuştur. Bu çalışma sonucu ile karşılaştırma yapmak amacıyla, ilk nem içeriği yaklaşık % 87.5 y.m. (6.9 k.m.) olan havuç, 2 x 2 x 2 cm boyutlarında küp şeklinde kesilmiş ve 50°C sıcaklıktaki düşey test bölgesi konvektif kurutucuda kurutulmuştur. Deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi Şekil 2.17’de verilmiştir. Elde edilen ölçümlerle literatür sonuçlarının son derece uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sonuç, kurulan deney düzeneğinden alınan ölçümlerin doğruluğunu göstermiştir.

Ölçümler sırasında oluşabilecek hataları en aza indirmek amacıyla, deney düzeneğinden çeşitli test ölçümleri alınmış, bağlantılar sağlamlaştırılmış ve ölçümler arasındaki fark % 2 gibi düşük bir seviyeye indirilmiştir.



Şekil 2.17. Deneysel olarak elde edilen boyutsuz nem içeriği ile kurutma süresi değişiminin, Doymaz'ın (2004) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



## **2.2.4. Malzemelerin Hazırlanması**

### **2.2.4.1. Kivi**

Ordu ilinin Mersin köyünde ağaçtan toplanan kivi, laboratuvar ortamında olgunlaşması için 10 gün bekletildikten sonra, olgunluğunu muhafaza ve ortamla nem alış-verişini engellemek için, buzdolabında 4°C’de saklanmıştır. Test bölgesi düşey konumda tutulan konvektif kurutucuda yapılan çalışmada, kabuğu soyulmuş ve 7 mm kalınlığında kesilmiş kivi dilimleri kullanılmıştır. Yapılan bütün deneylerde, ürün ağırlığı 500 g olarak alınmıştır. Test bölgesi yatay konumda tutulan konvektif kurutucuda yapılan çalışmalarda ise dikdörtgen şeklinde kesilen kivi (25 mm x 25 mm x 45 mm) dilimleri kullanılmıştır.

### **2.2.4.2. Karayemiş**

Trabzon’da marketlerden temin edilen karayemiş çöplerinden temizlenmiş, aynı boyda ve olgunlukta olanlar seçilmiş ve ortamla nem alış-verişini engellemek için buzdolabında 4°C’de saklanmıştır. Çalışmada kullanılan küresel şekle sahip karayemişin çapı 10 mm olarak seçilmiştir.

## **2.2.5. Denge Nem İçeriğinin Belirlenmesi**

Kurutulan ürünlerin denge nem içeriğini belirlemede Keey (1972) tarafından önerilen Statik Gravemetrik yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, farklı denge bağıl nem değerlerine sahip dokuz ayrı kimyasal tuzdan hazırlanan doymuş tuz çözeltileri ile saf suyun kullanımına dayanır. Tablo 2.2’de verilen değerlerle hazırlanan her bir doymuş çözelti kavanoza konulmuş, kavanozda sıcaklığı sabit tutulan şartlandırma odasına yerleştirilmiştir. Kavanozlar iki bölmeden oluşmuştur. Kavanozların alt kısımlarına, hazırlanan kimyasal çözelti, üst kısımlara ise alüminyum folyodan yapılan küçük kaplar yerleştirilmiştir. Alüminyum folyodan yapılan bu kaplara, denge nem içeriği belirlenecek olan kuru ürünler konulmuştur. Her gün kap içerisindeki ürünün ağırlık ölçümü yapılmış ve ürünün nem alış-verişi takip edilmiştir. Son iki ölçüm arasında ağırlık değişimi ihmal edilebilir durumda olduğunda işlem sonlandırılmış ve her bir ürünün son nem içeriği

OHAUS marka infrared nem tayin cihazıyla belirlenmiştir. Sabit sıcaklıklarda yapılan bu deneyle, ürün denge nem içeriği ile kurutma havası koşulları arasındaki ilişki olan sorpsiyon eğrisi belirlenmiştir.

Tablo 2.2. Sorpsiyon izotermini belirlemede kullanılan kimyasal maddeler ve karışım oranları (Keey,1972; Demirtaş, 1998).

Tuz Adı	Kimyasal Formülü	Denge bağıl nemi	Madde Miktarı (g)	Su miktarı (ml)
Lidyum Klorur	LiCl	0.12	200	65
Potasyum Asetat	CH <sub>3</sub> COOK	0.28	200	25
Potasyum Karbonat	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.38	200	30
Magnezyum Klorur	MgCl <sub>2</sub>	0.42	200	30
Magnezyum Nitrat	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.57	200	80
Sodyum Nitrat	NaNO <sub>3</sub>	0.63	200	50
Stronsyum Klorur	SrCl <sub>2</sub>	0.7	200	60
Sodyum Klorur	NaCl	0.75	200	60
Amonyum Sulfat	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (SO) <sub>4</sub>	0.80	200	60
Saf Su	H <sub>2</sub> O	1.0	250	70

### 2.2.5.1. Kivinin Denge Nem İçeriği Tayini

Kuru kivinin denge nem içeriği Statik Gravemetrik yöntemiyle beş farklı sıcaklıkta (25, 35, 45, 55 ve 65°C) belirlenmiştir. Konvektif kurutucuda kurutulan ürün, küçük parçacıklar haline getirildikten sonra 110°C sıcaklığındaki fırında 3 saat kadar bekletilmiştir. Bölüm 2.2.5.'de anlatılan işlemler takip edilerek kivinin denge nem içeriği belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklarda kivinin denge nem içeriği tayini toplam 40 gün sürmüştür.

### 2.2.5.2. Karayemişin Denge Nem İçeriği Tayini

Önceki ürün için uygulanan işlemler, kuru karayemiş için dört farklı sıcaklıkta (35, 45, 55 ve 65°C) gerçekleştirilmiştir. Dört farklı sıcaklık için yapılan deneyler toplam 32 gün sürmüştür.

### 2.2.6. C Vitamini (Askorbik Asit) Tayini

Gıda maddelerinde bulunan C vitaminini (askorbik asit) belirlemede, literatürde yaygın olarak kullanılan ve titrimetrik bir yöntem olan 2.6-diklorofenol indofenol (2.6-DCIP) renk reaktifi ile yapılan kantitatif analiz yöntem kullanılmıştır (Boyer, 1986). Metot; askorbik asidin koyu mavi renge sahip 2.6-DICP reaktifini indirgeyerek mavi rengin kaybolması (açık pembe renge dönüşmesi) esasına dayanır. 1 mol askorbik asit 1 mol 2.6-DCIP yi indirgendiğinden dolayı titrasyonda harcanan boyanın miktarında ne kadar askorbik asit bulunduğu tespit edilir.

Kurutulmuş kivi numuneleri analiz edilmeden önce hassas terazide tartılmış (yaklaşık 10 g) ve içinde 100 mL saf su bulunan 250 mL lik bir behere konularak 2 saat bekletilmiştir. Sonra bir el blenderi (parçalayıcı) ile iyice homojenize edilmiş ve numune bir ince gözenekli süzgeç kağıdından süzülmüştür. Kivinin posası 2-3 kez saf su ile yıkanarak meyvede bulunan tüm C vitamininin çözeltiye alınması sağlanmıştır. Elde edilen meyve suyunun hacmi ölçülü bir cam kapla (mezür) ölçülüp kaydedilmiştir. Toplam meyve suyu hacminin belirlenmesiyle de C vitamin (askorbik asit) miktarı belirlenmiştir. C vitamini tayini deneyleri üç kez tekrarlanmıştır.

### 2.2.7. Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi

Difüzyonla kütle transferinde en önemli parametrelerden biri de difüzyon katsayısıdır. Dikdörtgen, silindir ve küre şekilli ürünlerin difüzyon katsayısını belirlemede kullanılan bir boyutlu Fick difüzyon denklemi;

$$\frac{\partial M(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n D_{eff} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (2.39)$$

şeklinde verilir. Burada;

$$n = \begin{cases} 0 & \text{dikdörtgen şekilli ürünleri} \\ 1 & \text{silindir şekilli ürünleri} \\ 2 & \text{küre şekilli ürünleri} \end{cases}$$

ifade eder.

Başlangıç ve sınır koşulları ise;

$$M(t=0, 0 \leq r < R) = M_i$$

$$M(t \geq 0, R) = M_e \quad (2.40)$$

$$\left( \frac{\partial M}{\partial r} \right)_{r=0} = 0$$

ile verilmiştir.

Üründe başlangıçta nem içeriğinin eşdağılı, yüzey neminin denge nem içeriğine eşit olduğu ve difüzyonun sadece radyal yönde olduğu kabulü yapılmıştır. Bu kabuller altında (2.39) numaralı denklem, değişkenlerine ayırma yöntemiyle çözümlenerek gerekli sadeleştirmeler yapıldığında;

Dikdörtgen şekilli ürünler için;

$$\phi = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{L^2} D_{eff} t\right) \quad (2.41)$$

Silindir şekilli ürünler için;

$$\phi = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 \alpha_n^2} \exp(-D_{eff} \alpha_n^2 t), J_0(r \alpha_n) = 0 \quad (2.42)$$

Küre şekilli ürünler için;

$$\phi = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{r^2} D_{eff} t\right) \quad (2.43)$$

denklemleri elde edilir (Crank, 1975; Özdemir ve Devres, 1999; Azzouz vd., 2002; Senadeera vd., 2003; Srikiatden ve Roberts, 2006). Burada; M, t anındaki nem içeriği; M<sub>e</sub>, denge nem içeriği; M<sub>i</sub>, ilk nem içeriği; L, dikdörtgensel ürünün karakteristik boyutu; t, kurutma süresi; r, silindirik ve küresel ürünlerin yarıçapı; J<sub>0</sub>, sıfırıncı mertebeden birinci tür Bessel fonksiyonu; α<sub>n</sub>, fonksiyonun kökü ve D<sub>eff</sub>, efektif difüzyon katsayısıdır.

Uzun kurutma periyotlarında serinin birinci terimi açılır ve en küçük kareler yöntemiyle difüzyon katsayısı hesaplanır (Hawlder vd., 1991; Sankat vd., 1996; Simal vd., 1997; Özdemir ve Devres, 1999; Lopezvd., 2000; Pahlavanzadeh vd., 2001; Varadharaju vd., 2001; Azzouz vd., 2002; Senadeera vd., 2003; Babalis ve Belessiotis, 2003; El-Aouar vd., 2003; Hatamipour ve Mowla, 2003; Iguaz vd., 2003; Simal vd., 2004; Doymaz, 2004a; Doymaz, 2004b; Chemkhi ve Zagrouba, 2005; Mohapatra ve Rao, 2005; Akgun ve Doymaz, 2005; Karim ve Hawlder, 2005; Guine, 2006; Pathare ve Sharma, 2006; Menges ve Ertekin, 2006; Göğüş ve Maskan, 2006; Sacilik ve Elicin, 2006; Srikiatden ve Roberts, 2006; Babalis vd., 2006; Doymaz, 2006; Guine ve Fernandes, 2006; Kaleemullah ve Kailappan, 2006; Marquez vd., 2006; Giraldo-Zuniga vd., 2006; Kaya vd.,

2007 a; Kaya vd., 2007 b; Can, 2007; Wang vd., 2007; Lopes vd., 2007; Kashaninejad vd., 2007; Singh ve Gupta, 2007; Margaris ve Ghiaus, 2007; Vega vd., 2007).

### **2.2.8. Kurutma Katsayılarının Belirlenmesi**

Gıda ürünlerindeki sıcaklık ve nem dağılımını belirlemek için, ince tabakalı model olarak adlandırılan birçok model geliştirilmiştir. Kompleks teorik modellerde olduğu gibi bilinmesi ve belirlenmesi gereken parametreler olmadığından, ince tabakalı kurutma modellerinin kullanımı oldukça kolaydır ve yaygın olarak kullanılır.

İnce tabakalı kurutma modelleri üç ana kategoriye ayrılmıştır. Bunlar; teorik, yarı-teorik ve ampirik modellerdir (Özdemir ve Devres, 1999). Teorik modeller, Fick difüzyon denkleminin analitik çözümüne dayanmıştır. Bu çözüm yöntemi literatürde geniş bir şekilde kullanılmıştır. Bunlardan bazıları; soya (Suarez vd., 1980), fıstık (Karatas ve Battalbey, 1991), çeltik (Ece ve Cihan, 1993) ve fındık kurutmadır (Demirtas vd., 1998). Bu modellerden, sadece teorik modellerde difüzyon etkileri göz önüne alınırken, yarı teorik ve ampirik modellerde ürün ile ortam arasındaki dış etkiler göz önüne alınmıştır (Whitaker vd., 1969; Henderson 1974; Fortes ve Okas, 1981; Bruce, 1985; Parti, 1993, Özdemir ve Devres, 1999; Lopes vd., 2007).

Yarı teorik modeller; Fick difüzyon denkleminin genel seri çözümlerinin basitleştirilmesiyle türetilmiş veya basitleştirilmiş modellerin modifiye edilmesiyle elde edilmiştir (Özdemir ve Devres, 1999). Geliştirilen bu yarı teorik modeller, sıcaklığın, hızın, bağıl nemin ve ürün nem içeriğinin belirli aralığında geçerlidir. Literatürde yaygın olarak kullanılan yarı teorik matematiksel modeller Henderson ve Pabis, iki-terimli eksponansiyel ve Page modelleridir (Özdemir ve Devres, 1999).

Ampirik modeller ise, doğrudan kurutma süresi ve nem içeriği ilişkisinden türetilen yaklaşımlardır ve kurutma işleminin fiziksel mekanizmasını ve matematiğini göz ardı eden ifadelerdir. Bu tür modeller, deneysel olarak elde edilen kuruma eğrilerini tanımlasa da, matematiksel modeli oluşturulurken, kurutma prosesinin fiziksel mekanizması göz ardı edildiğinden, kurutma prosesini net bir şekilde açıklayamamaktadır (Keey, 1972; Irudayaraj vd., 1992; Özdemir ve Devres, 1999).

Kivinin kuruma davranışını belirlemede; Eksponansiyel veya Lewis, Henderson ve Pabis ve iki terimli eksponansiyel yarı teorik modelleri kullanılmıştır.

### 2.2.8.1. Ekspansiyel veya Lewis Modeli

Lewis (1921), gıda ve tarım ürünlerinin kurumasını tanımlamada, soğuk akışkana daldırılan bir cisimde meydana gelen ısı transferi benzeşiminden (toplam kütle yaklaşımı) faydalanmıştır. Bu modelde, ürün merkezinden yüzeye doğru olan nem hareketine bir engel olmadığı kabul edilmiştir. Kütle transferinin, ürün nem içeriği ile ortam koşullarındaki denge nem içeriği arasındaki farktan dolayı gerçekleştiğini kabul etmiştir.

Bu kabule göre ortam koşulları ile ürün nem içeriğinin değişimi aşağıda verilmiştir.

$$V \frac{dM}{dt} = -h_m A (M_i - M_e) \quad (2.44)$$

(2.44) numaralı denklemin çözülmesiyle;

$$\phi = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \exp\left(-\frac{h_m A}{V} t\right) \quad (2.45)$$

denklemini elde edilmiştir.

Lewis tarafından önerilen bu bağıntı literatürde yaygın olarak kullanılmıştır. Elde edilen (2.45) numaralı denklem, aşağıdaki gibi yazılarak Lewis modeli oluşturulmuştur.

$$\phi = \exp(-kt) \quad (2.46)$$

Burada,  $k = \frac{h_m A}{V}$  kurutma sabitidir.

Bu model basit olduğundan, birçok gıda ürününün kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hansen vd., 1983; Bruce, 1985; Carbonell vd., 1986; Ajibola, 1989; Ayensu, 1997; Liu ve Bakker-Arkema, 1997; Panchariya vd., 2002).

### 2.2.8.2. Henderson ve Pabis Modeli

Gıda ürünlerinin kurutulmasında, ürünün kurumasını karakterize eden çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu yaklaşımlardan en basit olanı, (2.41), (2.42) ve (2.43) numaralı denklemlerde verilen sonlu serinin sadece birinci terimi açıldığı zaman elde edilen modeldir. Buna göre, Henderson ve Pabis modeli (Henderson ve Pabis, 1961);

$$\phi = a \exp(-kt) \quad (2.47)$$

şeklini almıştır.

Bu model birçok gıda ve tarım ürününün kurumasını tanımlamada kullanılmıştır (Henderson ve Pabis, 1961; Watson ve Bhargava, 1974; Wang ve Singh, 1978; Sharaf-Elden vd., 1980; Chinnan, 1984; Moss ve Otten, 1989; Özdemir ve Devres, 1999).

### 2.2.8.3. İki Terimli Ekspansiyel Model

Difüzyon denkleminin bir boyutlu çözümlerinde (2.41, 2.42 ve 2.43 numaralı denklemler), serinin ilk iki teriminin açılımından oluşan bir model önerilmiştir (Henderson, 1974). Buna göre iki terimli kurutma modeli;

$$\phi = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t) \quad (2.48)$$

şeklinde basitleştirilmiştir.

İki terimli ekspansiyel model literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan modellerden biridir (Sharaf-Elden vd., 1980; Rahman vd., 1998; Yaldiz vd., 2001; Togrul ve Pehlivan, 2002; Dandamrongrak vd., 2002).

### 2.2.9. Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmalarda, elde edilen sonuçların doğruluğunu etkileyen hata miktarlarının belirlenmesi önemlidir. Literatürde belirtilen standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde yapılan deneylerde, elde edilen veriler değerlendirildiğinde, hatalar iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlar; deney düzeneğinin ve ölçüm araçlarının yapısından kaynaklanan kaçınılmaz hatalar ve deney yapan kişinin ihmallerinden kaynaklanan hatalardır (Holman, 1989). Bu hataların değerlendirilmesi için yapılan *Belirsizlik Analizi*, sonuçların yorumlanması açısından oldukça önemlidir.

Belirsizlik analizi kısaca şöyle yapılabilir;

Sonuç R,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  şeklinde bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu olarak,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.49)$$

şeklinde tanımlanabilir.  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  sözü edilen bağımsız değişkenlerin belirsizleri olmak üzere R için toplam belirsizlik,

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.50)$$

ifadesi ile belirlenebilir (Holman, 1989).

Bu çalışmada, kurutulan üründe meydana gelen anlık kütle değişimi ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler kullanılarak difüzyon katsayısı ( $D_{eff}$ ) ve kütle taşınım katsayısı ( $h_m$ ) hesaplanmıştır.

Difüzyon katsayısını hesaplamada (2.41), (2.42) ve (2.43) numaralı denklemler kullanılmıştır. Dikdörtgen şekilli ürünün difüzyon katsayısı için toplam belirsizlik,

$$\frac{w_R}{D_{eff}} = \left[ \left( \frac{w_L}{L} \right)^2 + \left( \frac{w_M}{M} \right)^2 + \left( \frac{w_{Me}}{M_e} \right)^2 + \left( \frac{w_{Mi}}{M_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.51)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Benzer işlemler, kütle taşınım katsayısı için tekrarlanırsa,

$$\frac{w_R}{h_m} = \left[ \left( \frac{w_A}{r_c} \right)^2 + \left( \frac{w_M}{M} \right)^2 + \left( \frac{w_{Me}}{M_e} \right)^2 + \left( \frac{w_{Mi}}{M_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.52)$$

eşitliği elde edilir.

Yukarıda elde edilen belirsizlik ifadelerindeki her bir bağımsız değişken için hatanın belirlenmesi gerekmektedir. Bu hata değerleri için çeşitli kaynaklarda benzer ölçümlerdeki hataların esas alınması dışında, ölçü aletlerinin kullanım kılavuzundaki hata değerleri esas alınmıştır. Bunların ışığında (2.51) ve (2.52) numaralı eşitlikler kullanılarak difüzyon katsayısı ve kütle taşınım katsayısındaki belirsizlik miktarları belirlenmiş olur.

Kütle kaybının ölçülmesinde ortaya çıkabilecek hatalar; kütle kaybı ölçüm ünitesi nem tayin cihazı, yük hücresi, veri okuma ve kaydetme sistemi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Sistem bir bütün halinde kalibre edilerek tek bir hata değerine indirgenmiştir.

(b<sub>1</sub>) yük hücresi ve veri okuma ve kaydetme sisteminden kaynaklanan hata:

$$500 \pm 0.01 \text{ g}$$

(b<sub>2</sub>) nem tayin cihazından kaynaklanan hata:  $10 \pm 0.01 \text{ g}$

(b<sub>3</sub>) ürün boyutunu dilimlemeden kaynaklanan hata:  $45 \pm 0.01 \text{ mm}$

(b<sub>4</sub>) ürün çapının belirlenmesinden kaynaklanan hata:  $10 \pm 0.01 \text{ mm}$

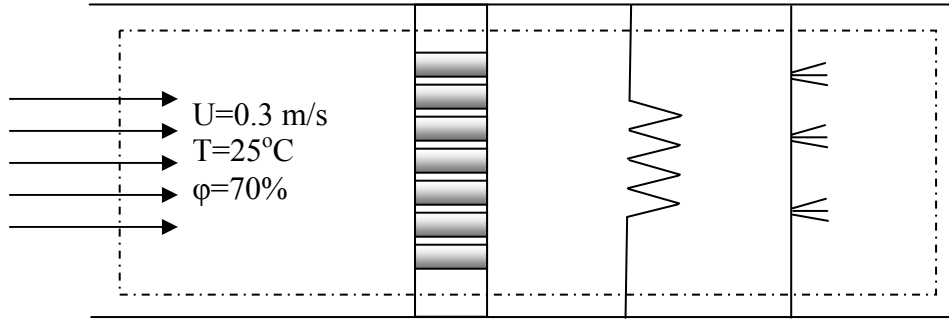
### 2.2.10. Termoekonomik Analiz

Sürekli akışlı açık sistemde yapılan kurutma işleminde (Şekil 2.18), kurutma havasının belirli bir sıcaklık ve bağıl nem değerinde sabit tutulabilmesi için, iklimlendirme işlemlerine gerek duyulur. Bu işlemler sıcaklığın yükseltilmesi (duyulur ısıtma), sıcaklığın



düşürülmesi (duyulur soğutma), su buharının eklenmesi (nemlendirme) ve nem alma (su buharının havadan ayrılması) işlemleridir.

Test bölgesi yatay konumda tutulan konvektif kurutucuda (Şekil 2.16) dikdörtgen şeklinde dilimlenen kivinin (25 mm x 25 mm x 45 mm) kuruma davranışı incelenmiştir. Farklı kurutma havası koşullarında kurutulan bu ürün için, maliyet analizi yapılmıştır. Hesaplamalara başlayabilmek için atmosferik havanın sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Trabzon’da yaz aylarının (Haziran-Temmuz-Ağustos) gündüz ortalama sıcaklığı 25°C ve bağıl nemi %70 olarak alınmış ve bu değerler hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 2.18. Test bölgesinde uygulanan iklimlendirme işlemlerin şematik gösterimi

Sürekli akışlı açık sistemlerde gerçekleştirilen kurutma işleminde kütle korunumu (hem kuru hava hem de su için) ve enerjinin korunumu denklemleri aşağıdaki gibi yazılır (Çengel ve Boles, 1996).

Kuru hava kütlesi:

$$\sum \dot{m}_{a,g} = \sum \dot{m}_{a,\zeta} \quad (2.53)$$

Su kütlesi:

$$\sum \dot{m}_{a,g} w_g + \dot{m}_{su,g} = \sum \dot{m}_{a,\zeta} w_{\zeta} + \dot{m}_{su,\zeta} \quad (2.54)$$

Enerji:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{\zeta} h_{\zeta} - \sum \dot{m}_g h_g \quad (2.55)$$

burada g ve ç indisleri sırasıyla giriş ve çıkış durumlarını göstermektedir.

İklimlendirme işlemine tabii tutulan kurutma havasının değerleri psikrometrik diyagramdan okunarak kurutma prosesinde harcanan enerji miktarı hesaplanmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Teorik Çalışma Sonuçları

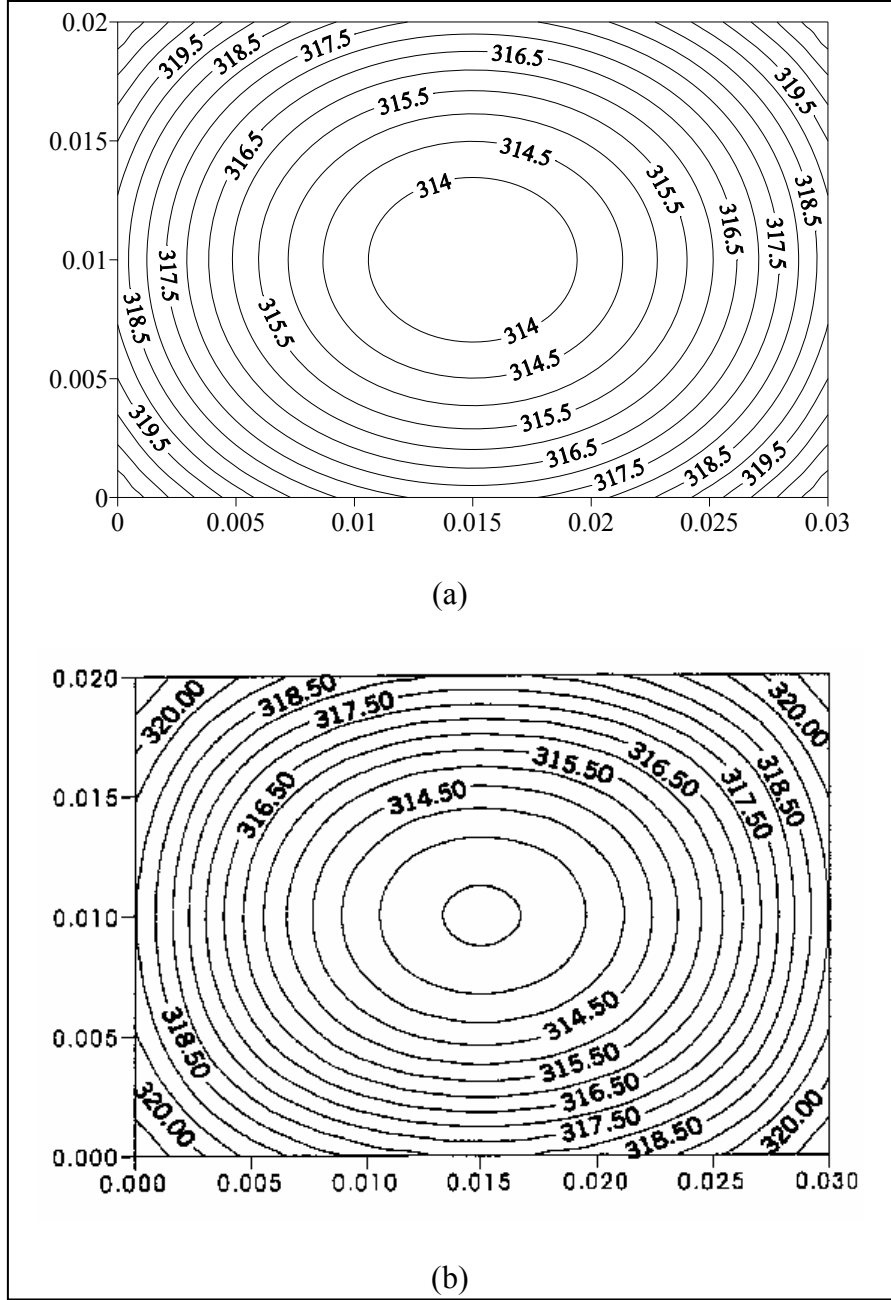
Bu bölümde, dikdörtgen, silindir (akışa dik ve paralel konumda) ve küre şekilli ürünlerin iki boyutlu ısı ve kütle transferi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Ayrıca dikdörtgen ve akışa dik konumdaki silindir şekilli ürün etrafında hız ve sıcaklık alanları ve ısı ve kütle taşınım katsayılarının ürün yüzeyi boyunca yerel değişimleri belirlenmiştir.

##### 3.1.1. Dikdörtgen Şekilli Ürün

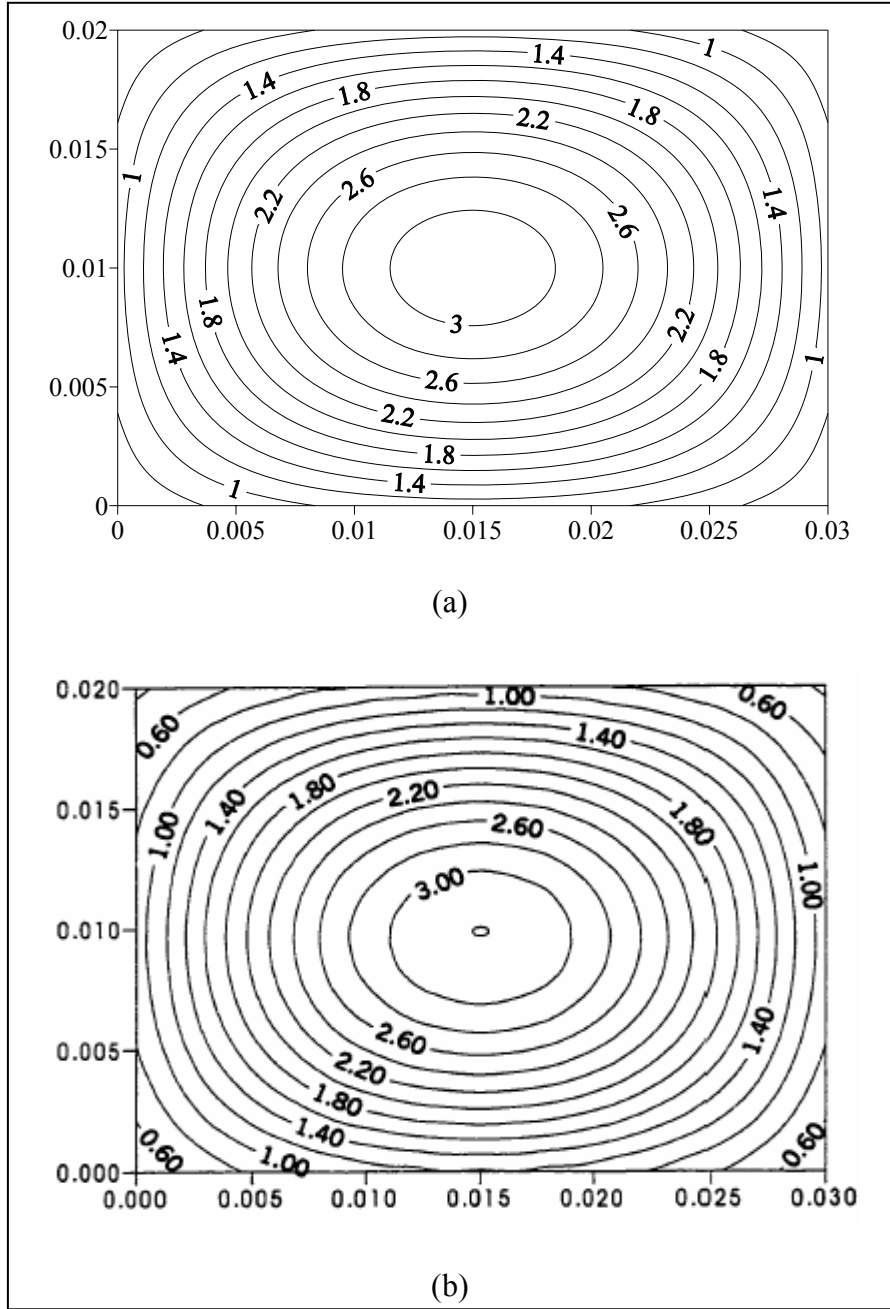
İlk olarak dikdörtgen şekilli ürünlerin kurumasını tanımlayan ve ADI yöntemiyle çözülen iki boyutlu ısı ve kütle transfer denklemlerinin sonuçları elde edilmiştir. Çözümlemede FORTRAN programlama dilinde bir kod geliştirilmiştir. Geliştirilen kodun doğruluğu, Hussain'in (2001) teorik ve Velic vd.'nin (2004) deneysel sonuçları ile sorgulanmıştır.

Hussain (2001), 0.02 x 0.03 m boyutlarında olan iki boyutlu bir elmanın kuruma davranışını teorik olarak incelemiş ve ürünlerdeki sıcaklık ve nem dağılımlarını elde etmiştir. Çalışmada, ürün ve havanın termofiziksel özelliklerini  $M_i = 7.196 \text{ kg/kg}$  (k.b.),  $k = 0.576 \text{ W/mK}$ ,  $\rho = 856 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = 1929 \text{ J/kgK}$ ,  $T_i=298 \text{ K}$ ,  $T_d=323 \text{ K}$ ,  $h=25-250 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve  $h_m=0.0001 \text{ m/s}$  olarak almıştır. Aynı ürünün termofiziksel özellikleri, geliştirilen koda girilmiş ve elde edilen sıcaklık ve nem dağılımları Şekil 3.1 ve 3.2'de gösterilmiştir. Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık ve nem dağılımlarının, Hussain'in (2001) teorik çalışma sonuçlarıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

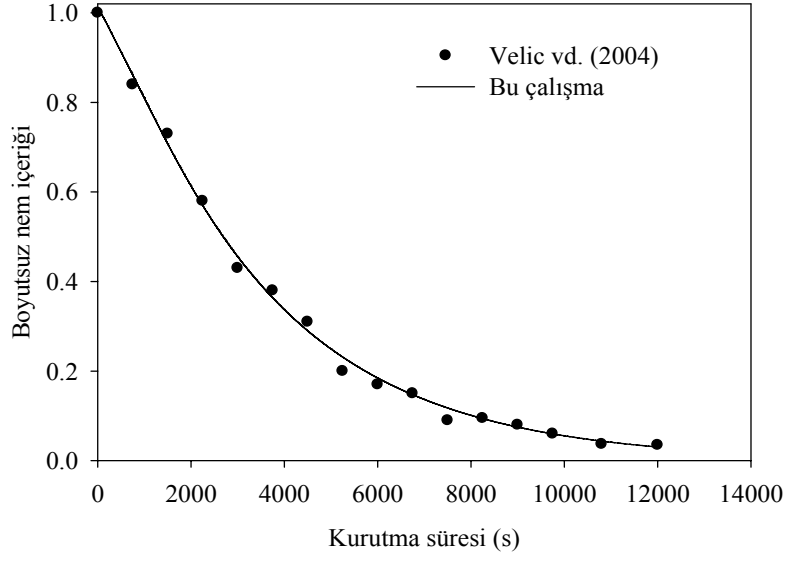
Velic vd. (2004), 20 x 20 x 5 mm boyutlarında kesilen elmanın kuruma davranışını deneysel olarak incelemiş ve boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimini elde etmiştir. Aynı ürünün, boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimini teorik olarak elde etmek için, ürün ve havanın termofiziksel özellikleri koda girilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Sonuçta, geliştirilen matematiksel model ve programın, Velic vd.'nin (2004) deneysel sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık dağılımının (a), Hussain'in (2001) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b)



Şekil 3.2. Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen nem dağılımının (a), Hussain'in (2001) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b)



Şekil 3. 3. Teorik olarak elde edilen boyutsuz nem içeriğiyle kurutma süresiyle değişiminin, Velic vd.'nin (2004) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

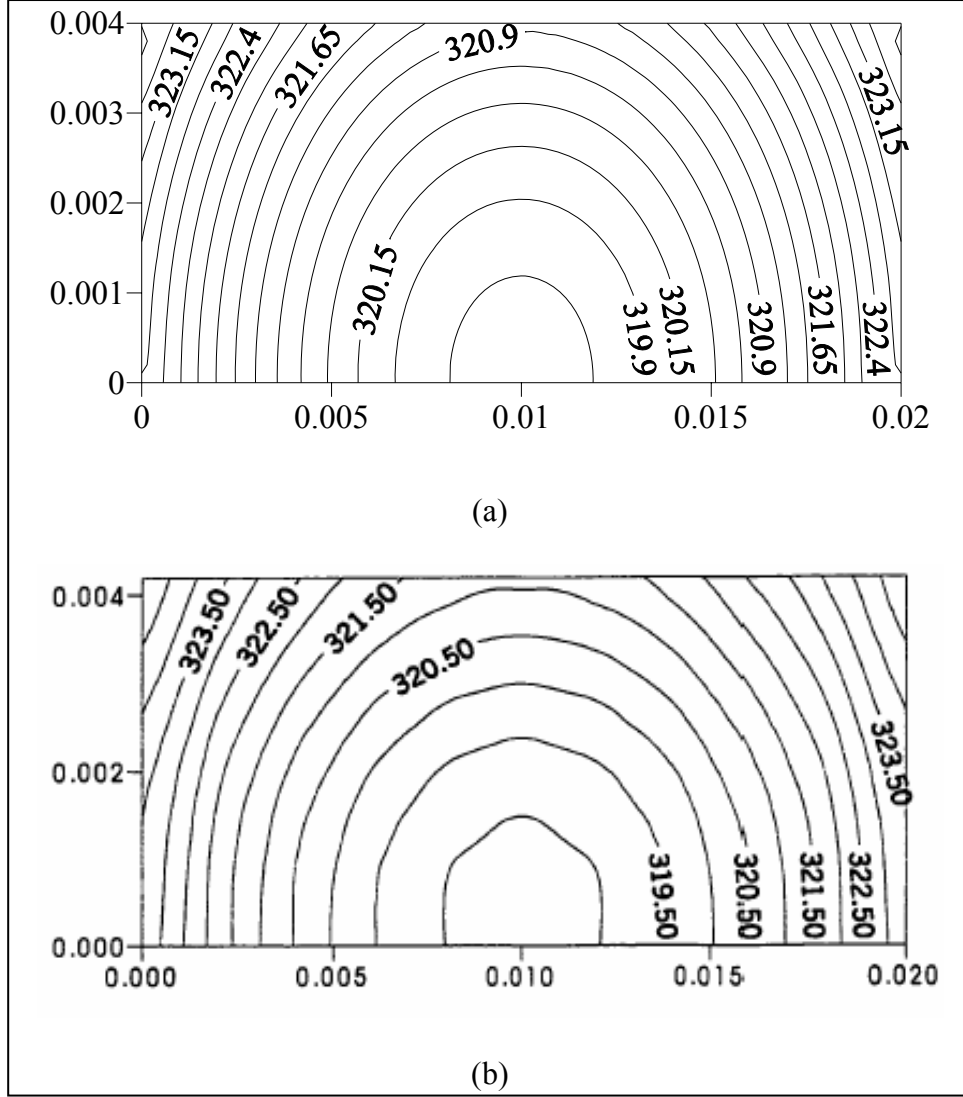
### 3.1.2. Silindirik Ürün

#### 3.1.2.1. Akışa Paralel Konumdaki Ürün

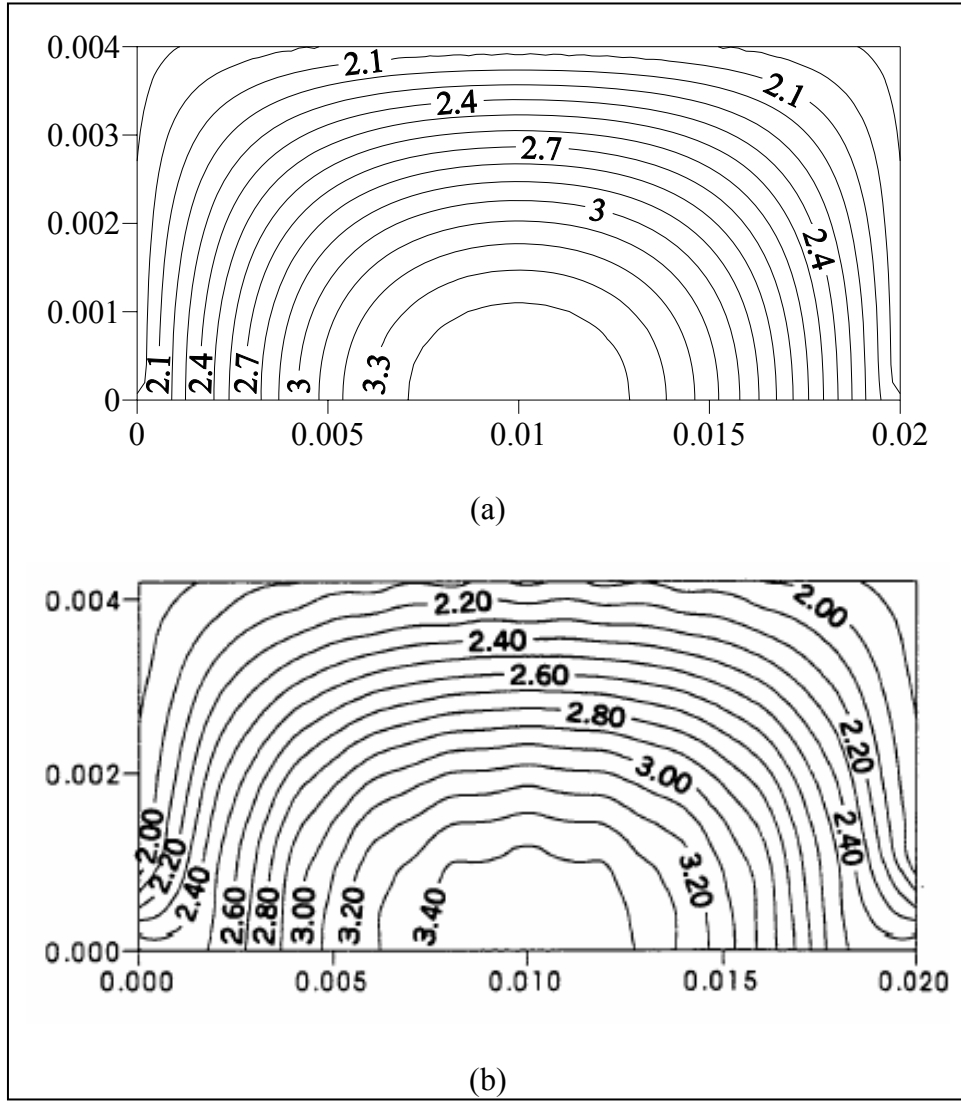
Hussain (2001), 0.08 çapında ve 0.02 m uzunluğunda, akışa paralel olan silindir şekilli brokolinin kuruma davranışını teorik olarak incelemiş ve kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık ve nem dağılımlarını elde etmiştir. Çalışmada, ürünün termofiziksel özelliklerini  $M_i = 9.57 \text{ kg/kg (k.b.)}$ ,  $k = 0.148 + 0.493 M \text{ W/mK}$ ,  $\rho = 2195.27 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = (0.837 + 1.256 M) \times 1000 \text{ J/kgK}$ ,  $T_i = 298 \text{ K}$ ,  $T_d = 333 \text{ K}$ ,  $h = 25 - 250 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $h_m = 0.0001 \text{ m/s}$  olarak almıştır. Silindirik ürünlerde ısı ve kütle transferini elde etmek için geliştirilen kodun doğruluğunu tespit etmek için aynı değerler, geliştirilen koda girilmiş ve elde edilen sıcaklık ve nem dağılımları Şekil 3.4 ve 3.5'de gösterilmiştir. Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık ve nem dağılımlarının, Hussain'in (2001) teorik çalışmasıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Silindir şekilli brokolinin boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimini, Simal vd. (1998a) deneysel ve Hussain ve Dincer (2003) teorik olarak elde etmiştir. Aynı ürün ve havanın termofiziksel özellikleri koda girilmiş ve boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, akışa paralel

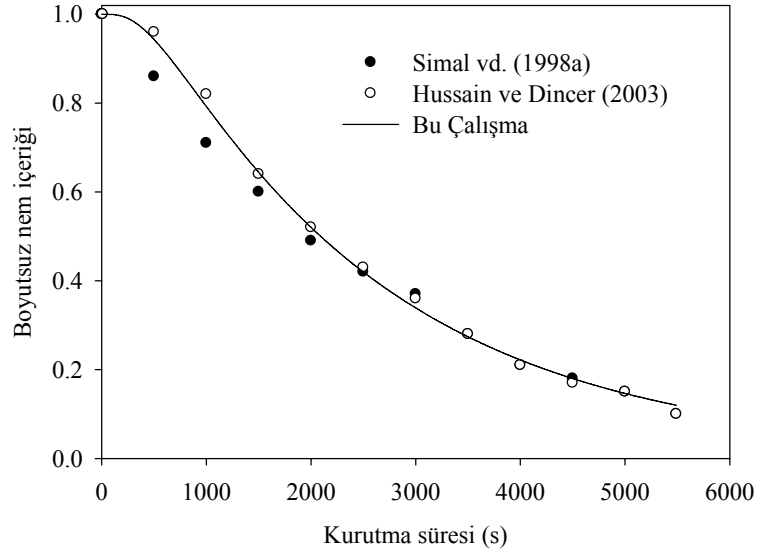
konumdaki silindirik ürünlerin kurumasını karakterize eden denklemlerin çözümü ve geliştirilen kod literatürle uyumludur.



Şekil 3. 4. Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık dağılımının (a), Hussain'in (2001) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b)



Şekil 3. 5. Kurutmanın 200'üncü saniyesinde üründe meydana gelen nem dağılımının (a), Hussain'in (2001) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b)



Şekil 3. 6. Teorik olarak elde edilen boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin, Simal vd. (1998a)'nin deneysel ve Hussain ve Dincer'in (2003) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması

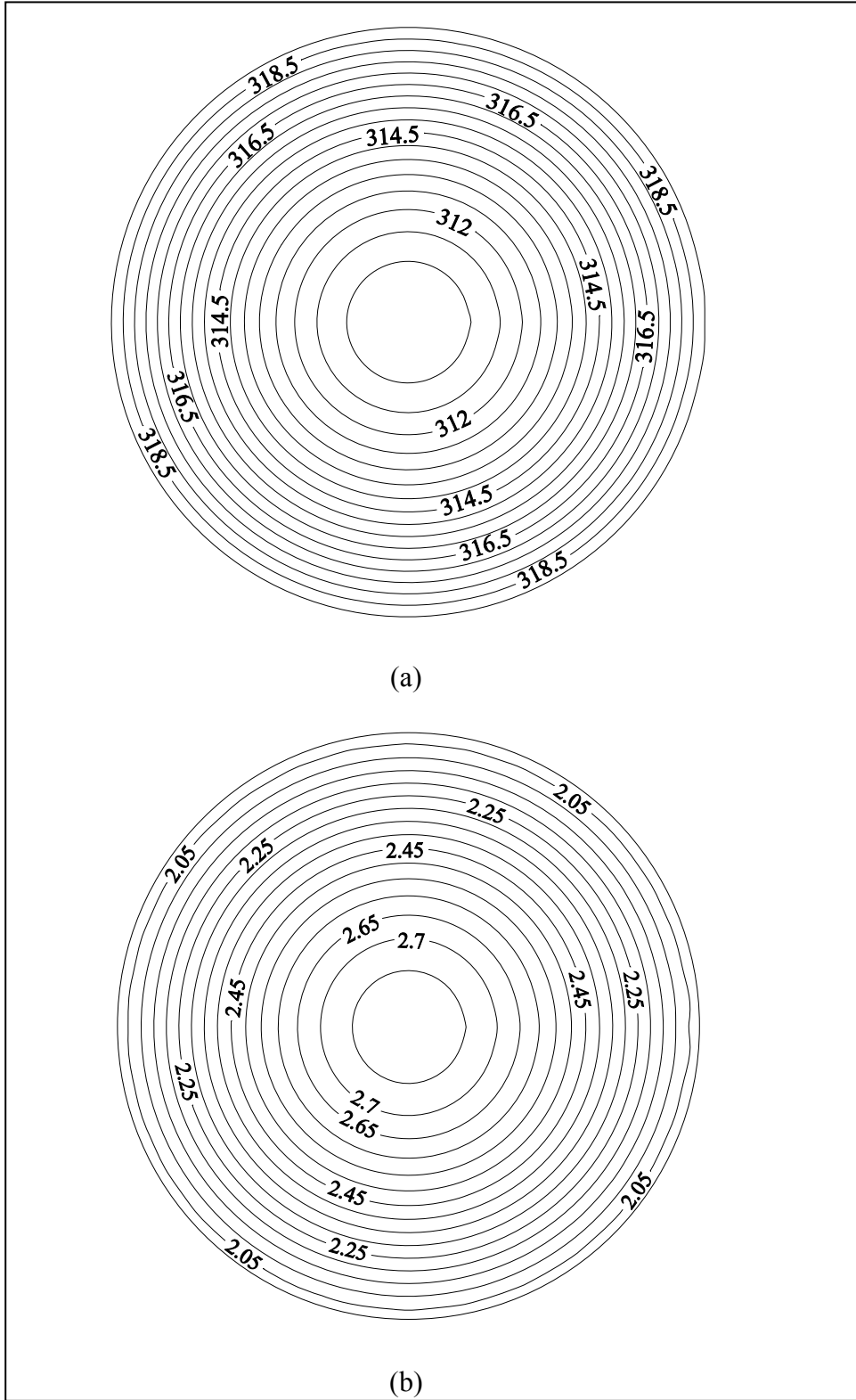
### 3.1.2.2. Akışa Dik Konumdaki Ürün

Şekil 3.7'de, akışa dik konumdaki silindirik bir üründe, kurutmanın 500'üncü saniyesinde meydana gelen sıcaklık ve nem dağılımı gösterilmiştir. Bu geometride kurutulan ürün için, elde edilen sıcaklık ve nem dağılımının karşılaştırılabileceği teorik bir kaynak literatürde mevcut değildir.

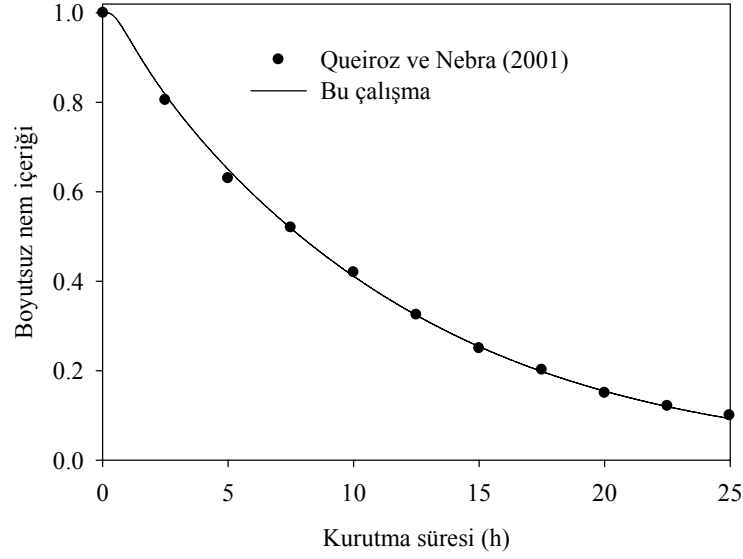
Akışa dik olarak yerleştirilen silindirik ürünün kurumasını karakterize eden matematiksel ifadelerin çözümü için geliştirilen kodun doğruluğu, Queiroz ve Nebran'nın (2001) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Queiroz ve Nebra (2001), akışa dik konumdaki muzun kuruma davranışını deneysel ve teorik olarak inceleyerek, boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimini belirlemiştir. Aynı ürün ve havanın termofiziksel özellikleri geliştirilen koda girilmiş ve boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi elde edilerek Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Akışa dik konumdaki silindirik ürünlerin ısı ve kütle transferini karakterize eden denklemler ve geliştirilen kodun literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.





Şekil 3.7. Kurutmanın 500'üncü saniyesinde üründe meydana gelen sıcaklık (a) ve nem dağılımı (b)



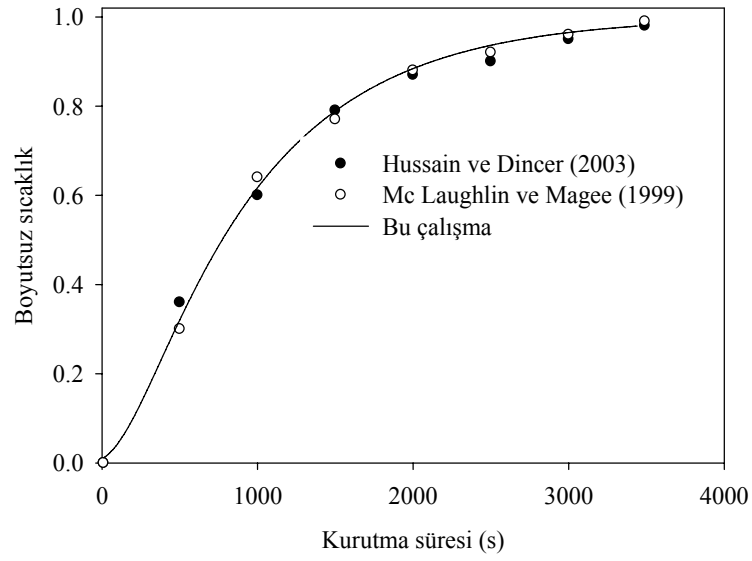
Şekil 3.8. Teorik olarak elde edilen boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin, Queiroz ve Nebra'nın (2001) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

### 3.1.3. Küresel Ürün

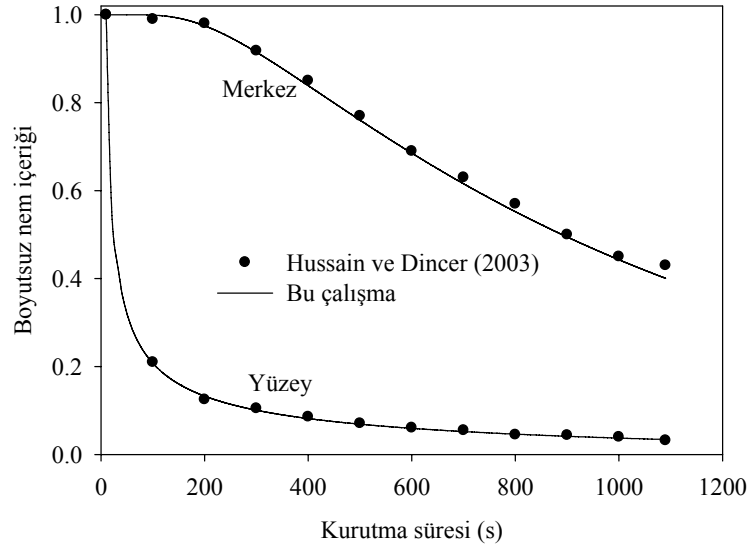
İki boyutlu küresel ürünlerdeki sıcaklık ve nem değişimini belirlemek için geliştirilen kodun doğruluğu, Hussain ve Dincer'in (2003) teorik ve Mc Laughlin ve Magee'nin (1999) deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Hussain ve Dincer (2003), küre şekilli patatesin kuruma davranışını teorik, Mc Laughlin ve Magee (1999) ise deneysel olarak incelemiş ve boyutsuz sıcaklığın kurutma süresiyle değişimini elde etmiştir. Ayrıca Hussain ve Dincer (2003), ürün merkez ve yüzey boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimini teorik olarak belirlemiştir.

Aynı ürün ve havanın termofiziksel özellikleri geliştirilen koda girilmiş, hem ürün boyutsuz sıcaklığının hem de ürün merkez ve yüzey boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi elde edilmiş ve Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, geliştirilen kod sonuçlarının her iki çalışmayla da son derece uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.9. Teorik olarak elde edilen ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklığın kurutma süresiyle değişiminin, Hussain ve Dincer'in (2003) teorik, Mc Laughlin ve Magee'nin (1999) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



Şekil 3.10. Teorik olarak elde edilen ürün merkez ve yüzeyindeki boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin, Hussain ve Dincer'in (2003) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması

### 3.1.4. Ürün Etrafında Akışın İncelenmesi

#### 3.1.4.1. Dikdörtgen Şekilli Ürün

Kurutma havasının çarptığı ön yüzeyin diğer yüzeylere göre daha çabuk kuruması, homojen kurumaya engel teşkil etmektedir. Bu duruma örnek olarak pestil üreticilerinin uyguladıkları yöntem verilebilir. Pestil üreticileri, kurutma yaptıkları ortamda, kurutma havasının çarptığı yüzeyin erken kuruması sebebiyle, belirli bir süre sonra, ürünün arka kısmını ön tarafa çevirerek homojen kurutmayı amaçlamaktadırlar. Birçok işletmede, bu işlem otomasyona bağlanmadığı için, kuruma işleminde homojenlik sağlanamamaktadır.

Ürün etrafındaki akışın kurutma üzerindeki önemi belirlendiğinde, bir kuruma kusuru olan *homojen kurumama* problemi çözülebilecektir. Bu problemin çözümüyle, ürünün bütün yüzeylerinin aynı hızda kurumasını sağlayacak kurutucu tasarımları geliştirilecek ve daha kaliteli ve homojen kurutulmuş gıda eldesi mümkün olacaktır.

Bu bölümde, Şekil 2.8' de gösterilen konvektif kurutucuda, dikdörtgen şekilli ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanları ile ürünün kuruma davranışı incelenmiştir. Ürün etrafındaki sıcaklık dağılımının belirlenmesiyle, ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları belirlenmiştir.

Ürünün karakteristik boyutunun kuruma davranışı üzerine etkisi teorik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, iki boyutlu ürünün yüksekliği sabit tutularak uzunluğu değiştirilmiş ve farklı boyut oranlarında ürünler elde edilmiştir. Farklı boyut oranının ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarına ve ürünün kuruma davranışına etkisi belirlenmiştir. Ürünler etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımını belirlemede bir ticari yazılım olan Fluent paket programı kullanılmıştır.

Farklı boyut oranına sahip ürünlerin, yüzeyi boyunca değişimi belirlenen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları, iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemlerinin çözümünde yüzeyde konvektif sınır koşulu olarak kullanılmıştır.

Öncelikle, çözümler sonucunda elde edilen verilerin doğruluğundan emin olmak için, dış akış problemlerinin çözümlerinde kullanılan Fluent paket programının doğruluğu sınanmıştır. Dikdörtgen şekilli ürün için, sınama üç ayrı şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak; Şekil 2.8'de gösterilen problem, ağ yapısı oluşturulduktan sonra (Şekil 2.9) Fluent programıyla çözülmüştür. Çözümleme, boyut oranı 4 ( $AR=4$ ) olan ürün için zorlanmış taşınım koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ürünün üst yüzeyi bir levha gibi düşünülmüş ve

ortalama ısı taşınım katsayısı  $9.76 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer,  $Nu_L = hL/k$  formülünde yerine konulmuş ve ortalama Nusselt sayısı  $Nu_L = 28.875$  olarak belirlenmiştir.

Zorlanmış taşınımında, bir levha üzerinden akış için ortalama Nusselt sayısı,

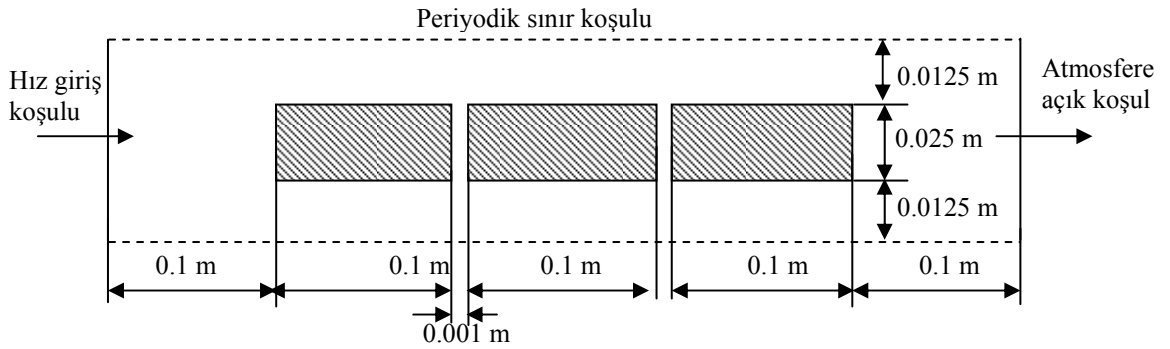
$$Nu_L = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.1)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır (Incropera ve De Witt, 2001). Burada  $Re$ ; Reynolds sayısı ve  $Pr$ ; Prandtl sayısıdır.

Kurutma havası hızı, levha (ürün üst yüzey) boyu ve havanın termofiziksel özellikleri (3.1) numaralı bağıntıda yerine yazılmış ve ortalama Nusselt sayısı  $Nu_L = 28.756$  olarak belirlenmiştir.

Teorik çalışma (Fluent) ile bağıntı sonuçları arasında %0.41 oranında fark olduğu belirlenmiştir.

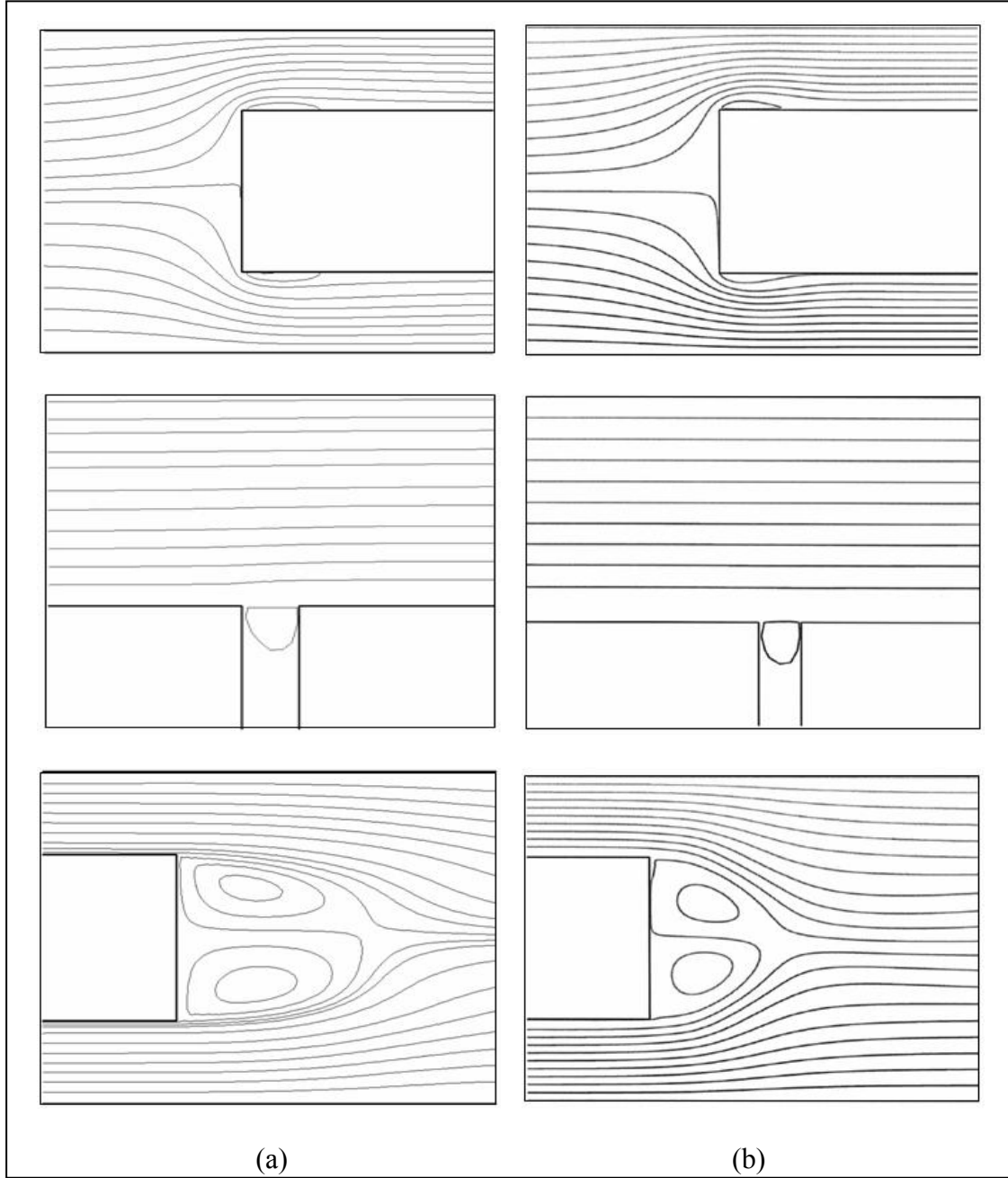
Fluent paket programının doğruluğunu sınamada ikinci adım, Sun (2001) tarafından yapılan bir çalışmanın tekrar modellenmesidir. Sun (2001); Şekil 3.11’de boyutları ve şekli verilen problemin akış alanını Fluent programını kullanarak çözmüştür. Aynı problem, Gambit’te tekrar modellenerek Fluent programı ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Akım çizgilerinin, ilk blok yüzeyinde, iki blok arasında ve üçüncü blok arkasındaki davranışlarının birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Problem tanımı ve kullanılan sınır koşulları (Sun, 2001).

Fluent çalışmalarında, ağ yapısının (yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ağ hücresi) sonucu etkilemediği buna karşın ağ sayısının sonuca az da olsa tesir ettiği ifade edilmiştir (Altaç ve Ünal, 2007). Ağ sayısında çok yüksek değerlere çıkabilecek kapasitede

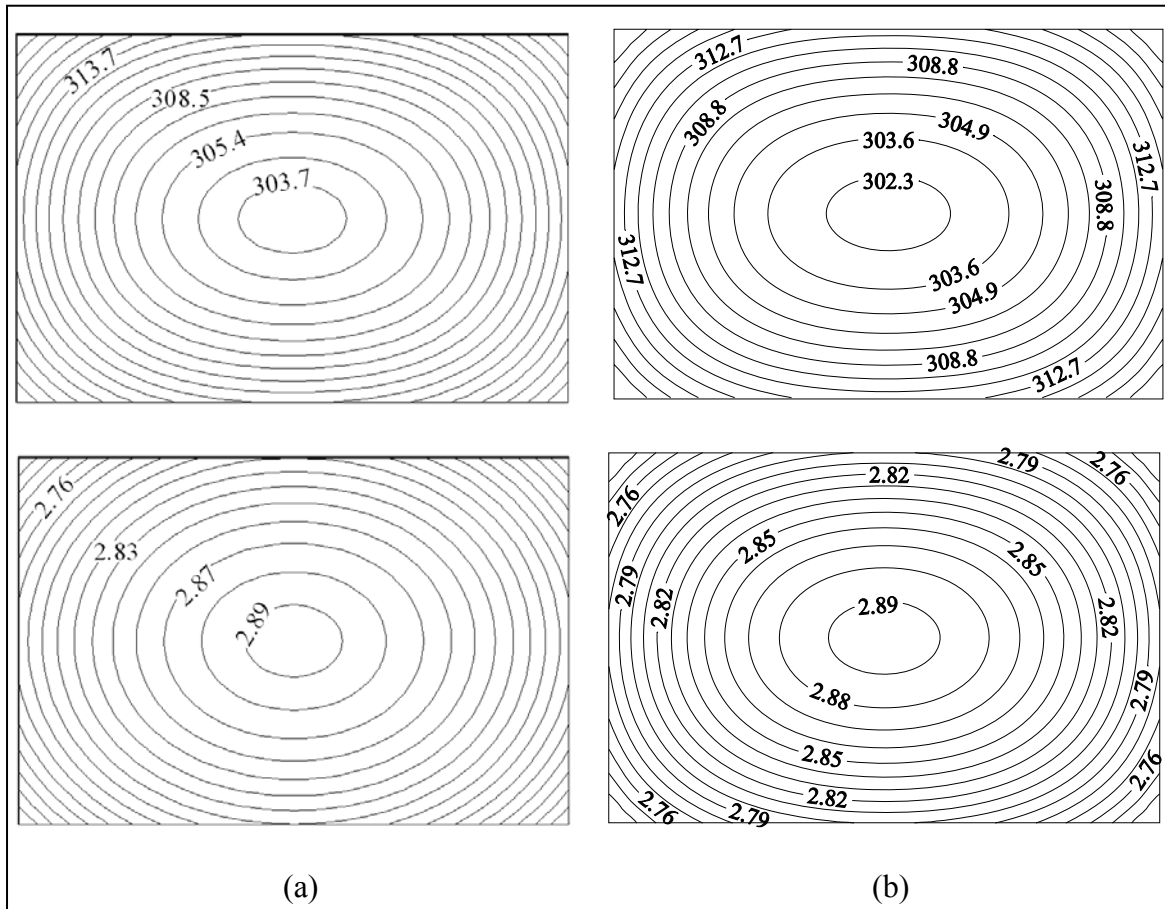
bilgisayarların olmayışı sebebiyle, daha az ağ için yapılan çözümler karşılaştırılmış ve sonuçlarda az da olsa farklılığın olduğu görülmüştür. Cismin ön yüzeyinde ve iki cisim arasındaki akım çizgileri uyumlu iken, cismin arka yüzeyi için elde edilen sonuçlarda az da olsa farklılık olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.12. Fluent çözümü ile elde edilen akım çizgilerinin (a) Sun'ın (2001) teorik sonuçlarıyla karşılaştırılması (b)

Fluent programını sınamada üçüncü adım ise, iki boyutlu, dikdörtgen şekilli bir katıdaki sıcaklık ve nem dağılımlarının elde edilmesidir. Boyutları ve termofiziksel özellikleri aynı olan dikdörtgen şekilli bir üründe sıcaklık ve nem dağılımı hem Fluent paket programıyla hem de Fortran kodu kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların uyumlu olduğu Şekil 3.13’de gösterilmiştir.

Yapılan bu üç karşılaştırma sonucunda, Fluent sonuçlarının *tanımladığımız problemler kapsamında* güvenilir olduğu belirlenmiştir.



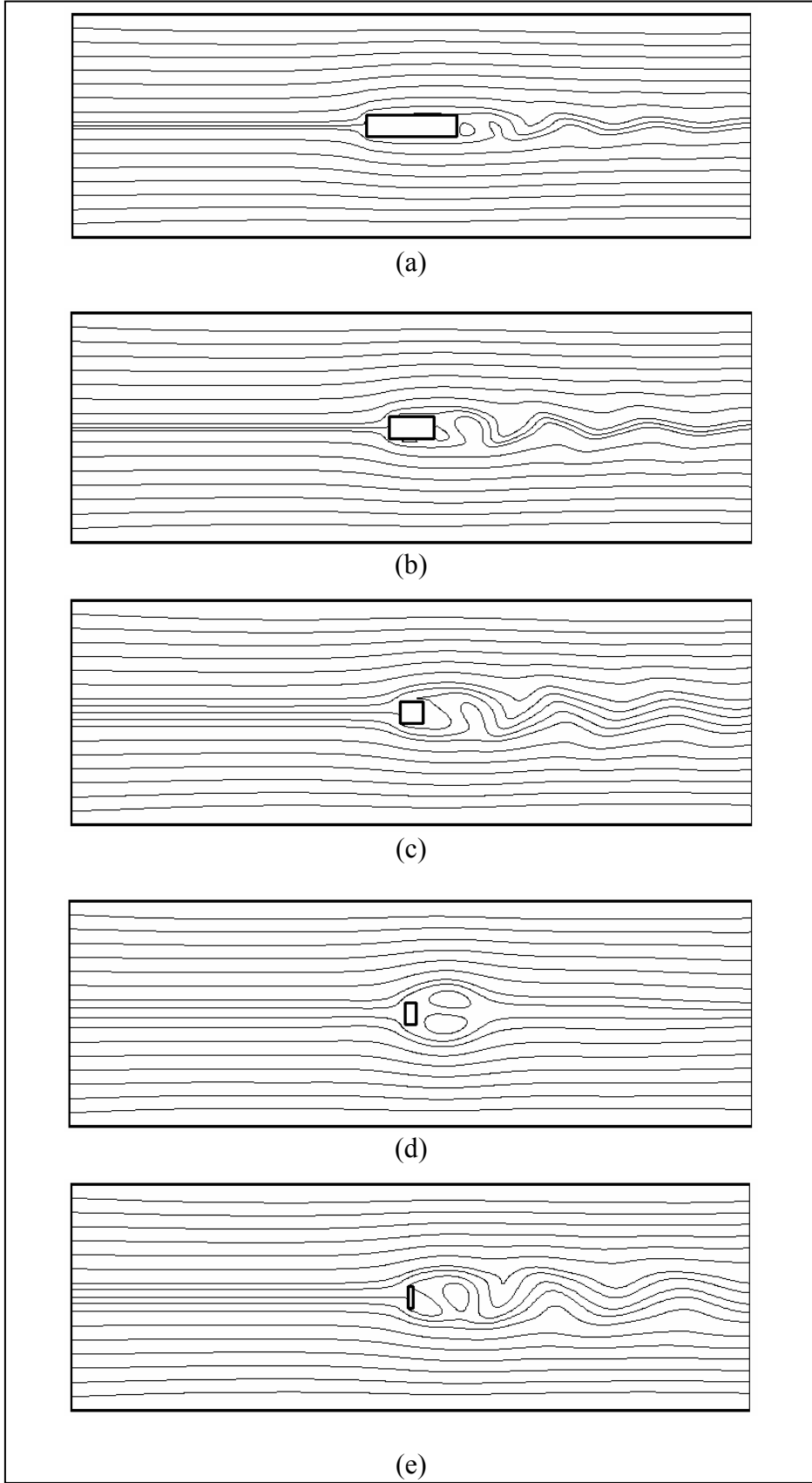
Şekil 3.13. Fluent paket programı (a) ve Fortran kodu (b) kullanılarak elde edilen iki boyutlu üründe sıcaklık ve nem dağılımlarının karşılaştırılması

Fluent paket programı kullanılarak elde edilen sonuçların güvenilir olduğu görüldükten sonra, Şekil 2.8’ de tanımlanan problem, verilen giriş şartlarında ve her bir boyut oranı için çözülmüştür. Çözümde, ürün etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Ürünün arka yüzeyindeki akışta girdaplar oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 3.14). Ürün yüzeyi boyunca, eşdağılı sıcaklık alanı oluşmadığı Şekil 3.15’ten görülmektedir.

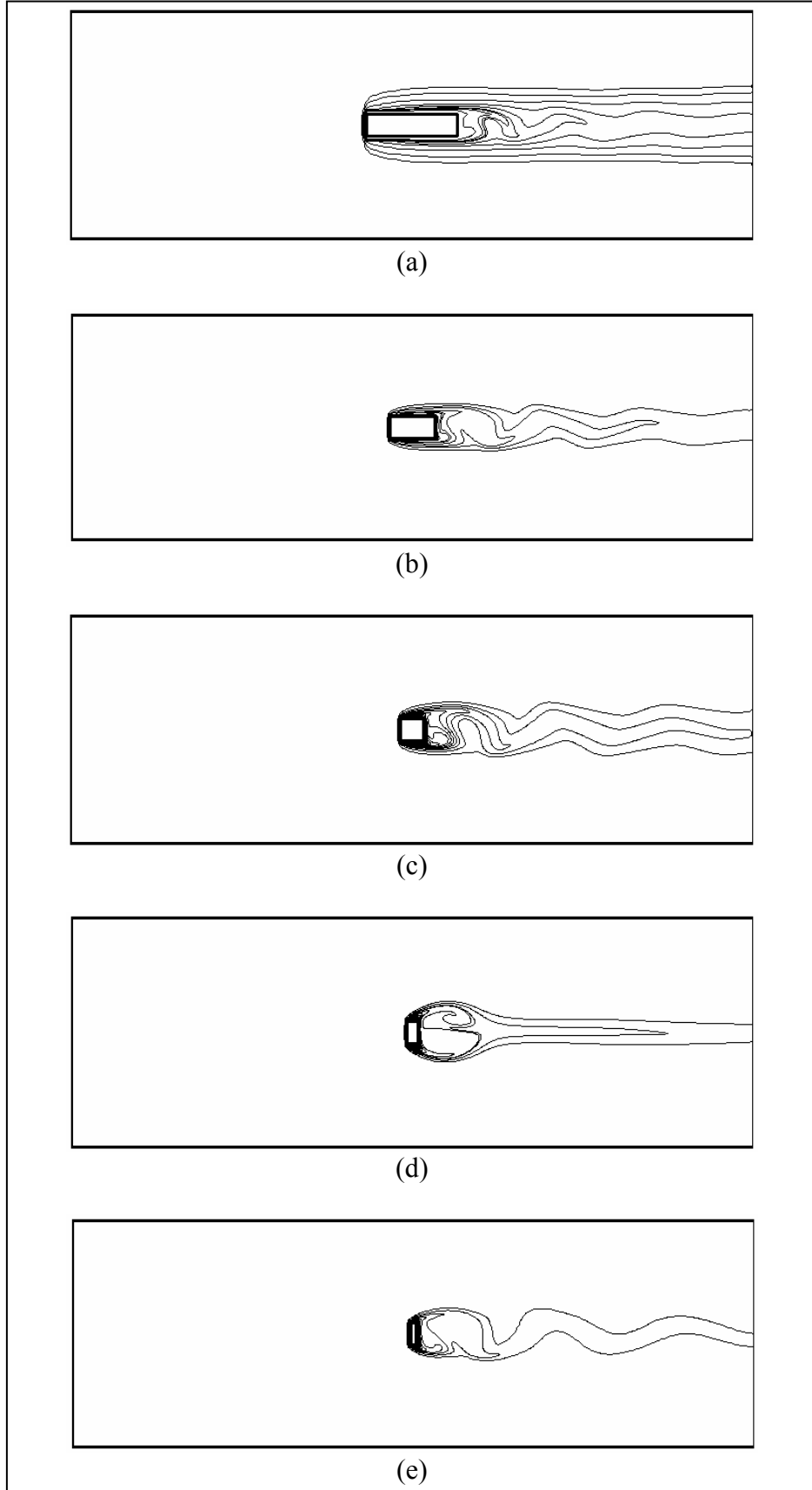
Eşdağılı sıcaklık alanının oluşmamasıyla ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının da eşdağılı olmadığı belirlenmiştir. Ürün yüzeyi boyunca yerel ısı taşınım katsayısı (2.29) numaralı bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Yerel ısı taşınım katsayısı belirlendikten sonra, termal ve konsantrasyon sınır tabakalarının benzeşiminden faydalanarak, yüzey boyunca değişen yerel kütle taşınım katsayısı (2.30) numaralı bağıntı kullanılarak tespit edilmiştir. Yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının ürün yüzeyi boyunca değişimi Şekil 3.16 ve 3.17’de gösterilmiştir. Kurutma havasının ürüne çarptığı yüzeyde ısı ve kütle taşınım katsayılarının daha yüksek, ürün arkasında ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sınır tabaka kalınlığının artmasıyla ısı ve kütle taşınım katsayılarının azaldığı boyut oranı 4 ( $AR=4$ ) olan üründe net bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Her bir boyut oranı için ürün etrafındaki hız ve sıcak dağılımı elde edilmiş, ürünün alt ve üst yüzeylerinde sınır tabakaların aynı olduğu görülmüştür. Yerel ısı taşınım katsayısının ürün yüzeyi boyunca değişimi elde edilmiş, ürün üst ve alt yüzeylerinde bu değerlerin eşit olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ürün boyut oranının küçülmesiyle, ürün arkasında, akışa etkiyen ters basınç gradyanının artmasıyla girdap etkisi artmış ve arka yüzeyde yerel ısı taşınım katsayısı artırmıştır. Kurutma havasının çarptığı yüzeyde, tüm boyut oranları için yerel ısı ve kütle taşınım katsayısı eşitken, boyut oranının azalmasıyla, ürün üst, alt ve arka yüzeylerinde bu değerler artmıştır.

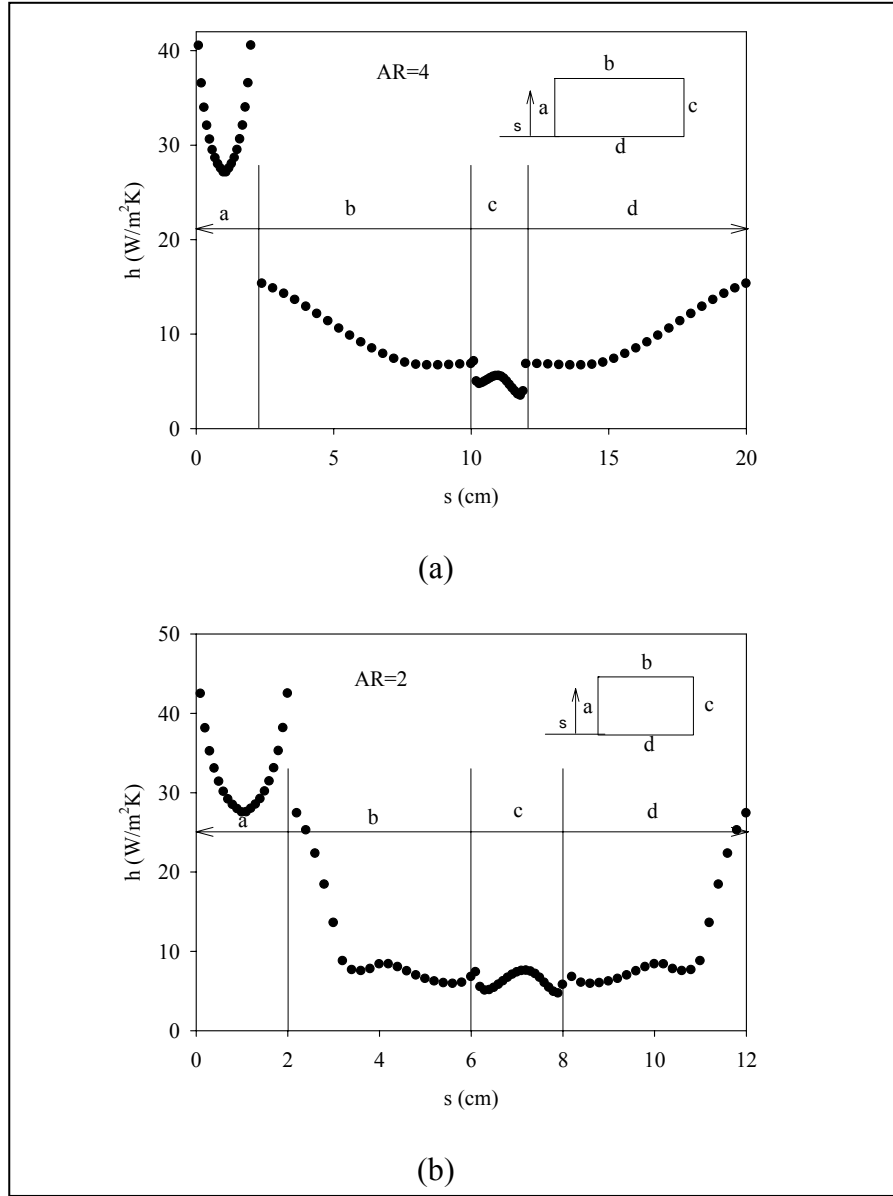




Şekil 3.14. Dikdörtgen şekilli ürün etrafındaki akım çizgileri, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e)

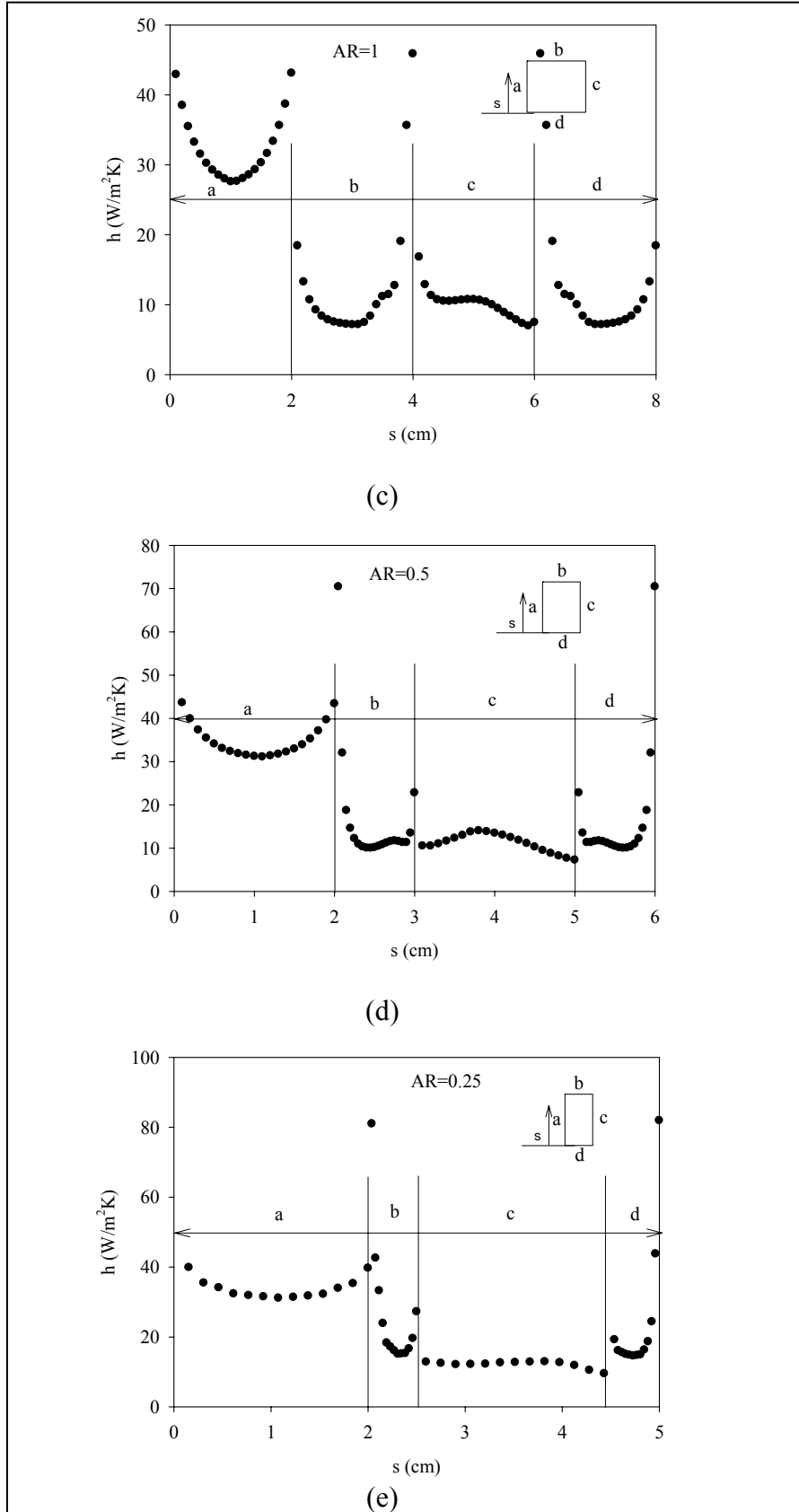


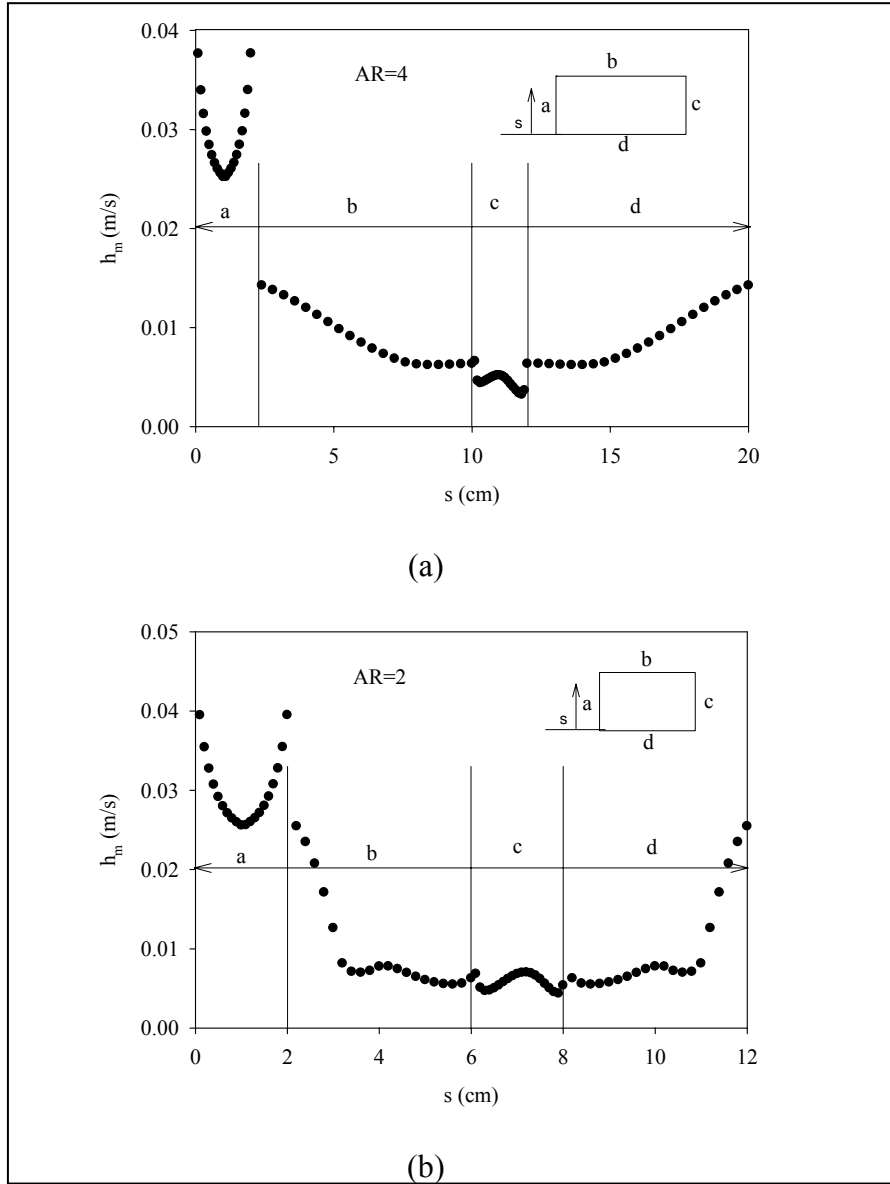
Şekil 3.15. Dikdörtgen şekilli ürün etrafındaki sıcaklık dağılımı  $AR=4$  (a),  $AR=2$  (b),  $AR=1$  (c),  $AR=0.5$  (d),  $AR=0.25$  (e)



Şekil 3.16. Yüzey boyunca ısı taşınım katsayısı değişimi, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e)

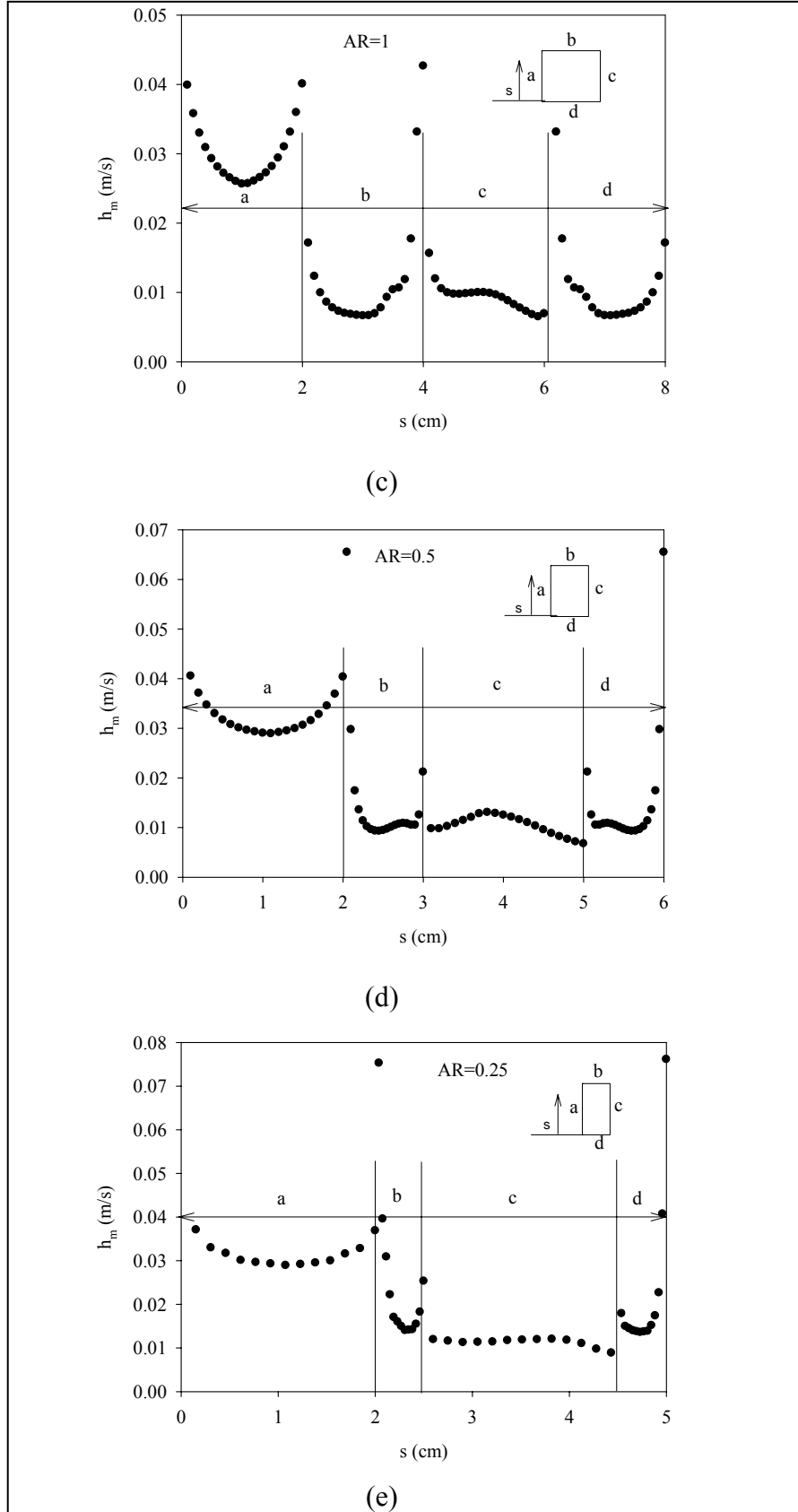
Şekil 3.16'nin devamı





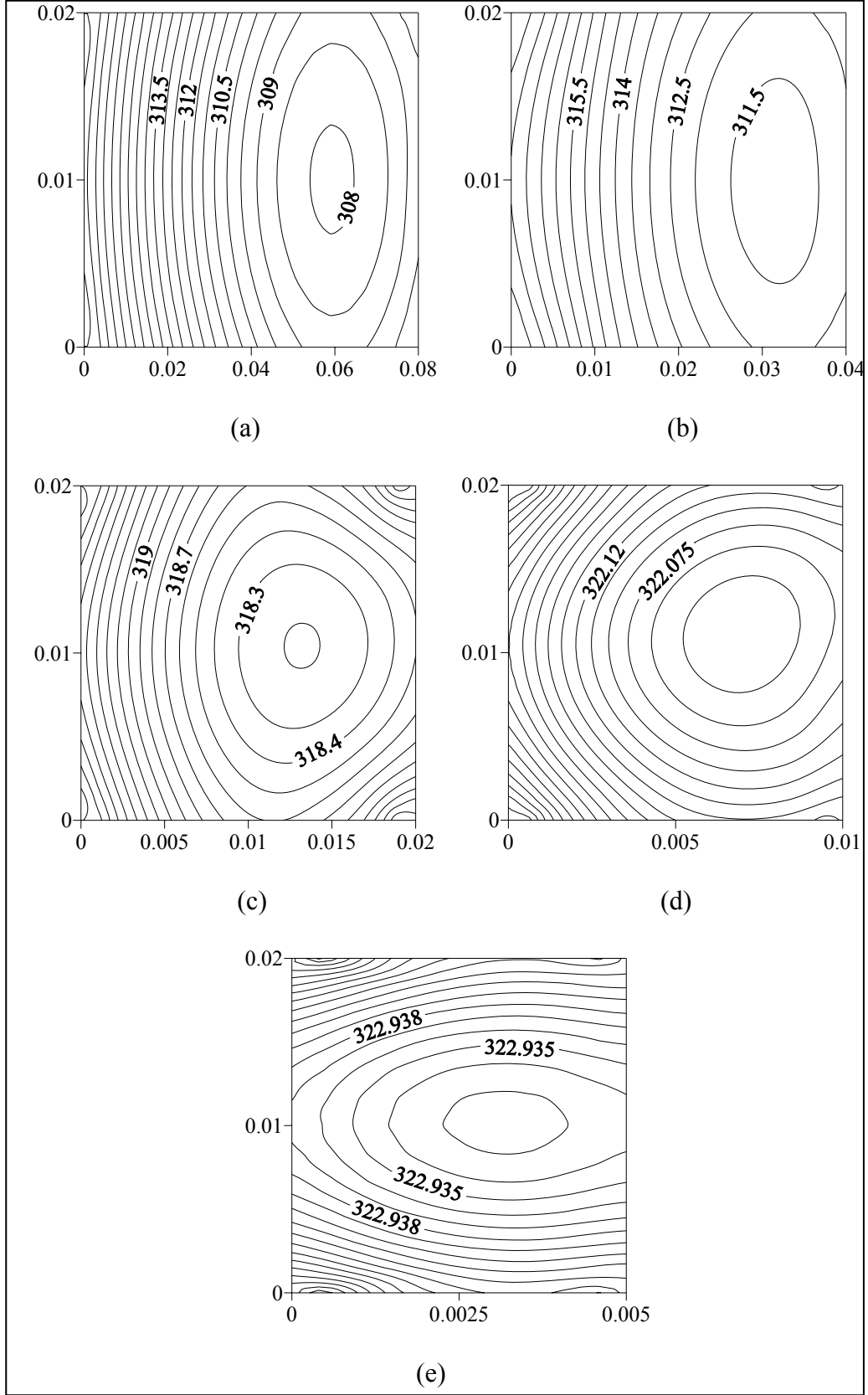
Şekil 3.17. Yüzey boyunca kütle taşınım katsayısı değişimi, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e)

Şekil 3.17'nin devamı



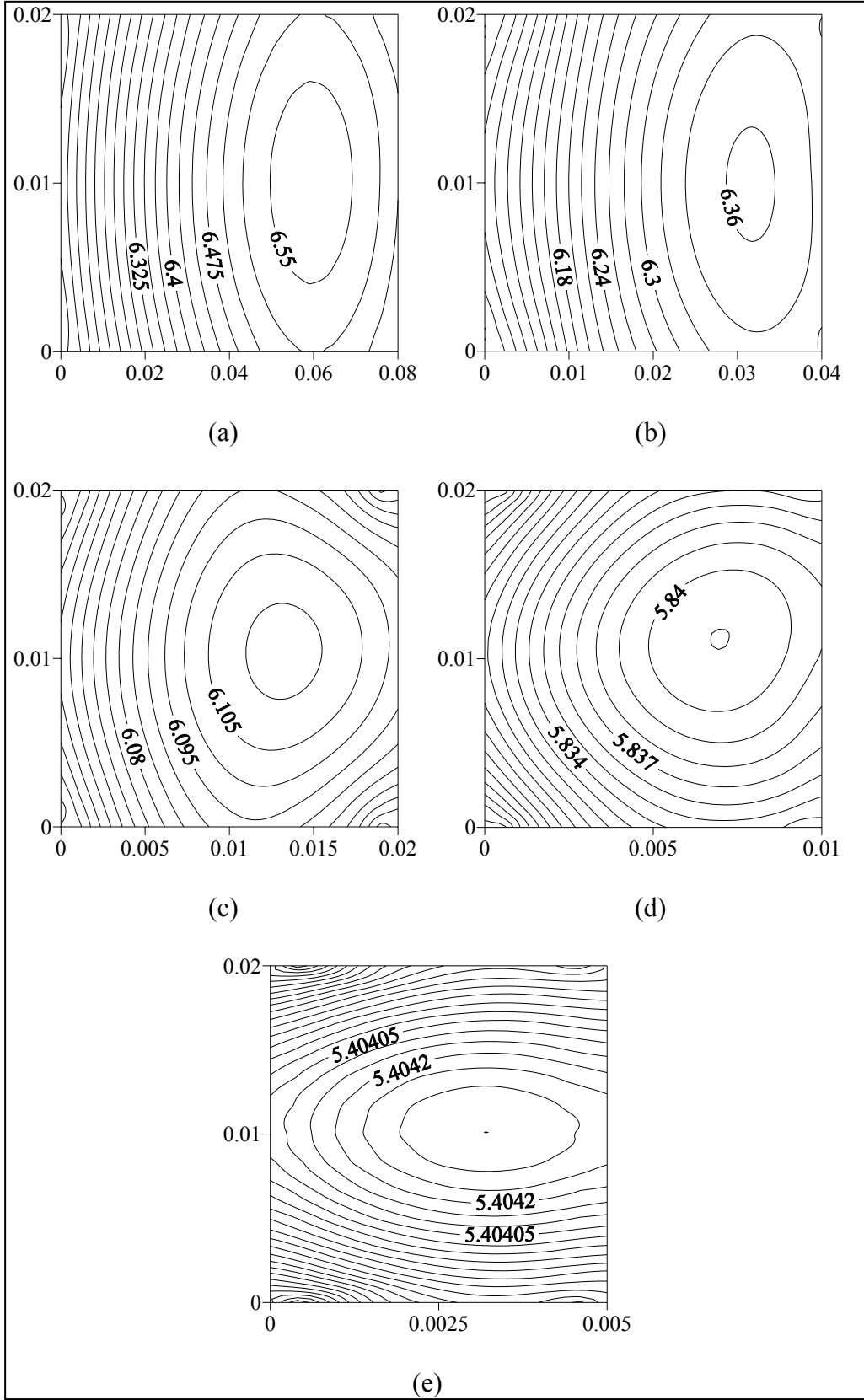
Hussain ve Dincer (2003a, 2003b, 2003c) silindir, küre ve dikdörtgen şekilli ürünlerin kurumasını karakterize eden ısı ve kütle transferi denklemlerinin çözümünde, ısı ve kütle taşınım katsayılarını sabit almış ve üründe sıcaklık ve nem dağılımının simetrik olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışmada ise, dikdörtgen şekilli üründeki sıcaklık ve nem dağılımını belirlemek amacıyla, iki boyutlu kartezyen koordinatlardaki ısı ve kütle transferi denklemleri konvektif sınır koşulu altında çözülmüştür (Bölüm 2.1.1.1). Ürünün termofiziksel özellikleri;  $M_i = 7.196 \text{ kg/kg}$  (k.b.),  $k = 0.576 \text{ W/mK}$ ,  $\rho = 856 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = 1929 \text{ J/kgK}$  olarak literatürden (Hussain, 2001) alınmış ve havanın hızı ve sıcaklığı ile ürünün yüzey sıcaklığı ise, sırasıyla,  $U_d=0.5 \text{ m/s}$ ,  $T_d=323 \text{ K}$  ve  $T_s=298 \text{ K}$  olarak seçilmiştir. Bu değerler ile ürün yüzeyi boyunca değişimi belirlenen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları geliştirilen koda girilmiş ve üründeki sıcaklık ve nem dağılımları elde edilmiştir. Şekil 3.18 ve 3.19'da, kurutma süresinin 1000'inci saniyesinde üründeki sıcaklık ve nem dağılımları gösterilmiştir. Literatürde yapılan çalışmaların aksine, kurutma havasının çarptığı ön yüzeyde yüksek ısı ve kütle taşınım katsayılarından dolayı kuruma işleminin daha hızlı, arka yüzeyde ise düşük ısı ve kütle taşınım katsayılarından dolayı daha yavaş gerçekleştiği belirlenmiştir. Ürün üst ve alt yüzeylerinde, sınır tabakanın aynı olması ve bu yüzeylerde elde edilen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının eşit olması sebebiyle, ürünün üst ve alt yüzeylerinde, kurumanın aynı olduğu görülmüştür.

Boyut oranının, ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarına ve kuruma davranışına etkisi incelenmiştir. Ürün boyut oranının küçülmesiyle, ürün yüzeyi boyunca değişimi belirlenen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları arttığından, kuruma işleminin hızlandığı ve buna bağlı olarak kurutma süresinin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.20 a ve b).

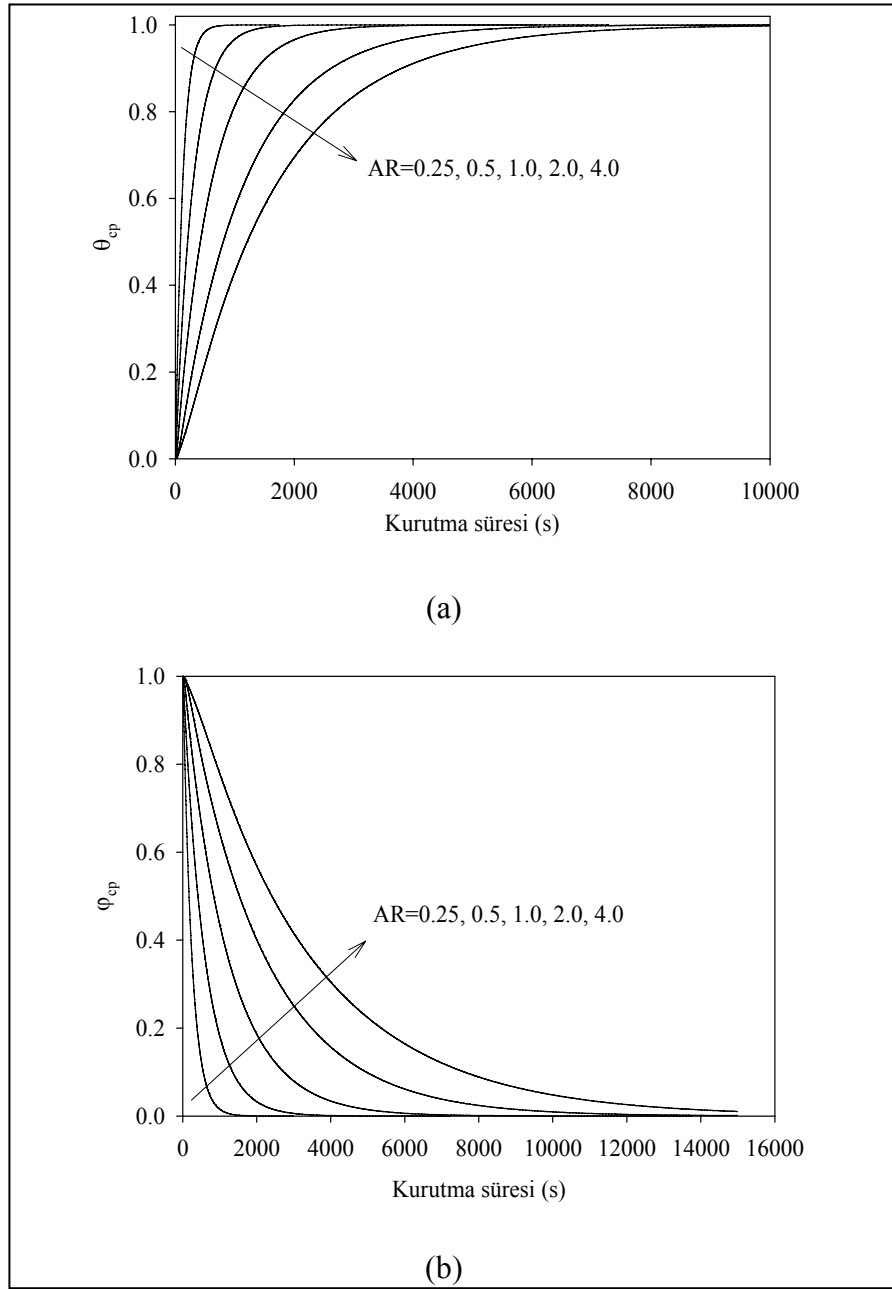


Şekil 3.18. Kurutmanın 1000'inci saniyesinde üründeki sıcaklık dağılımı, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e)





Şekil 3.19. Kurutmanın 1000'inci saniyesinde üründeki nem dağılımı, AR=4 (a), AR=2 (b), AR=1 (c), AR=0.5 (d), AR=0.25 (e)

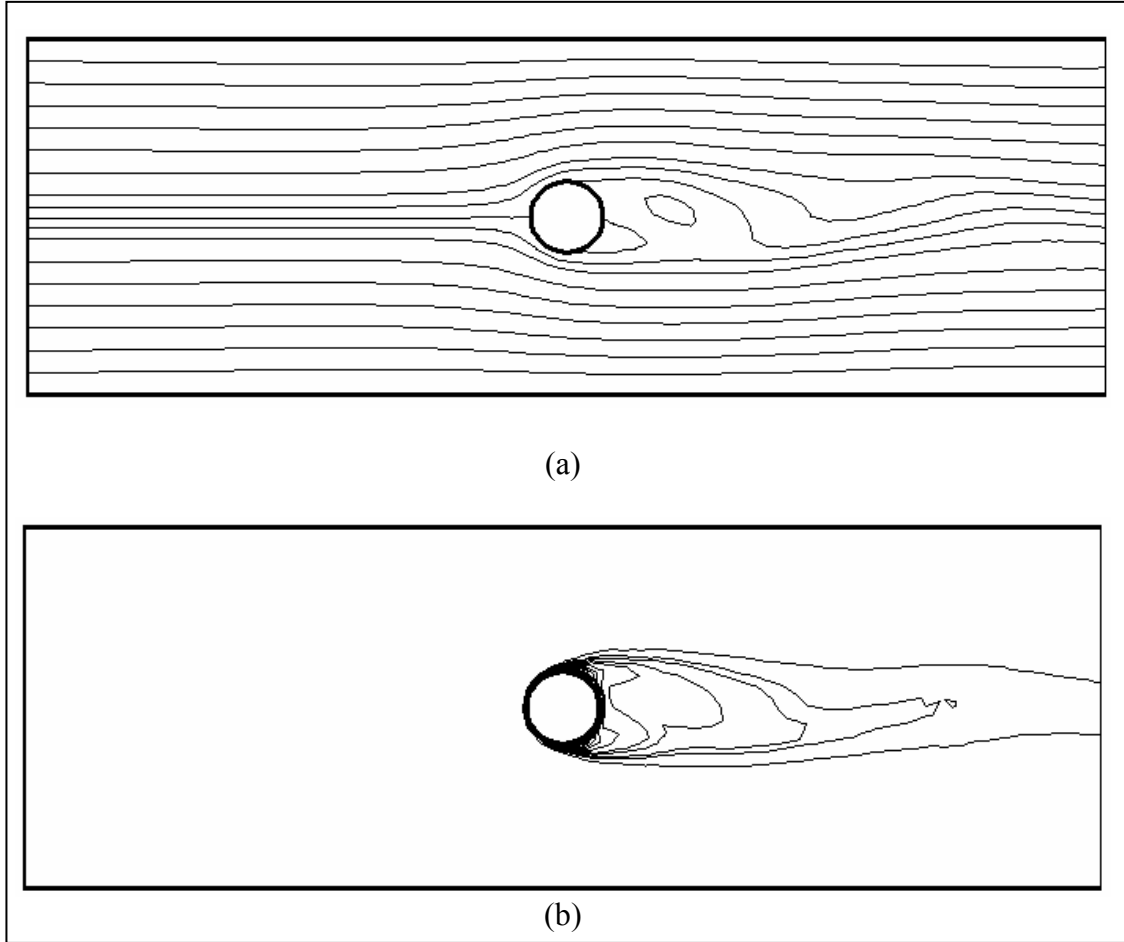


Şekil 3.20. Ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklık (a) ve nem içeriğinin (b) kurutma süresiyle değişimine boyut oranının (AR) etkisi

### 3.1.4.2. Akışa Dik Konumda Tutulan Silindirik Şekilli Ürün

Akışa dik konumdaki silindirik ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanlarını elde etmek için, iki boyutlu Navier-Stokes denklemleri teorik olarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.21a ve b'de gösterilmiştir. Elde edilen akım çizgilerinden, basınç gradyanının etkisiyle ürünün arkasında girdapların oluştuğu ve düzensiz akışların gerçekleştiği tespit

edilmiştir (Şekil 3.21a). Ürün yüzeyi boyunca elde edilen sıcaklık profillerinin ise eşdağılı olmadığı görülmüştür. Ürün ön yüzeyinde sıcaklık gradyanı daha büyükken, bu gradyan yüzey boyunca küçülmüş ve ürünün arkasında tekrar bir miktar artış göstermiştir.



Şekil 3.21. Silindirik şekilli ürün etrafındaki akım çizgileri (a) ve sıcaklık dağılımı (b)

Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının, yüzeyde oluşan sınır tabakanın gelişiminden önemli ölçüde etkilendiği belirlenmiştir. Yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları, durma noktasından başlayarak, laminar sınır tabaka gelişimi sonucu olarak, yüzey boyunca azalmıştır. Ancak, ürünün arka bölgesindeki girdap oluşumu ve karışma nedeniyle bu bölgedeki ısı ve kütle taşınım katsayılarının artmaya başladığı belirlenmiştir (Şekil 3.22 a ve b).

Literatürde, yüksek Reynolds sayılarında silindir etrafında akış ve ısı transferi çalışmaları yapılmış, ısı taşınım katsayısının silindir boyunca değişimi belirlenmiştir. Giedt (1949),  $0.71 \times 10^5 < Re_D < 2.19 \times 10^5$  aralığında yaptığı çalışmada, ısı taşınım katsayısının, silindirin ön durma noktasından itibaren yüzey boyunca azaldığını, silindirik cismin arka

tarafında ise artış gösterdiğini tespit etmiştir. Yüksek Reynolds sayılarında ( $Re > 10^5$ ) silindirin arka tarafındaki artış çok daha fazlayken, düşük Reynolds sayılarında ( $Re < 10^5$ ) daha az olmuştur. Buna benzer çalışmalar Adachi vd. (1979), Small (1935) ve Khan vd. (2005) tarafından da yapılmıştır. Fluent paket programıyla elde edilen ısı taşınım katsayısının silindirik ürün yüzeyi boyunca değişiminin Giedt (1949), Adachi vd. (1979), Small (1935) ve Khan vd. (2005)'in çalışmalarıyla benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.

Silindirik şekle sahip ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanlarını belirlemede kullanılan Fluent paket programının doğruluğu sorgulanmıştır. Sınamada, literatürde zorlanmış taşınımında ön çarpma noktası için tanımlanan Nusselt sayısını veren bağıntı kullanılmıştır. Bu bağıntı:

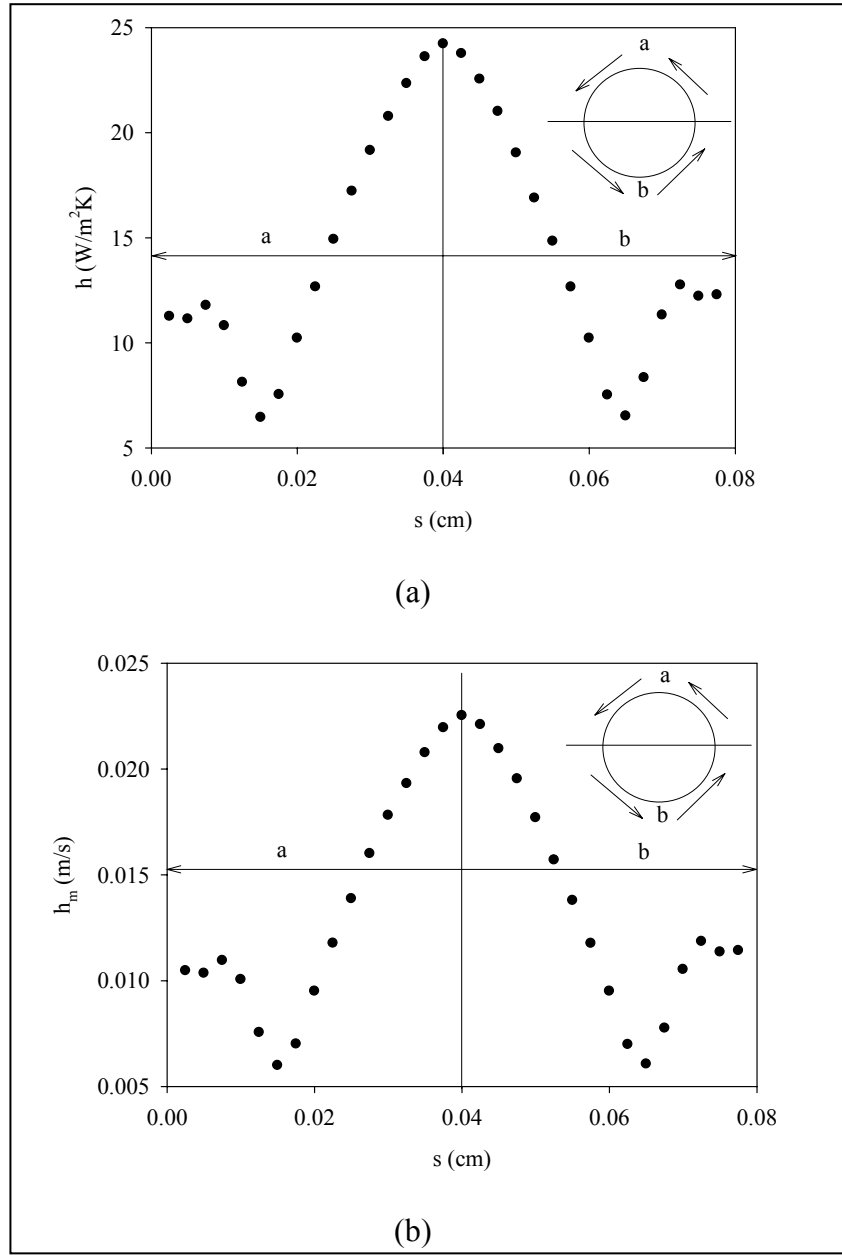
$$Nu_D(\theta = 0) = 1.15 Re_D^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.2)$$

ile verilmiştir (Incropera ve De Witt, 2001).

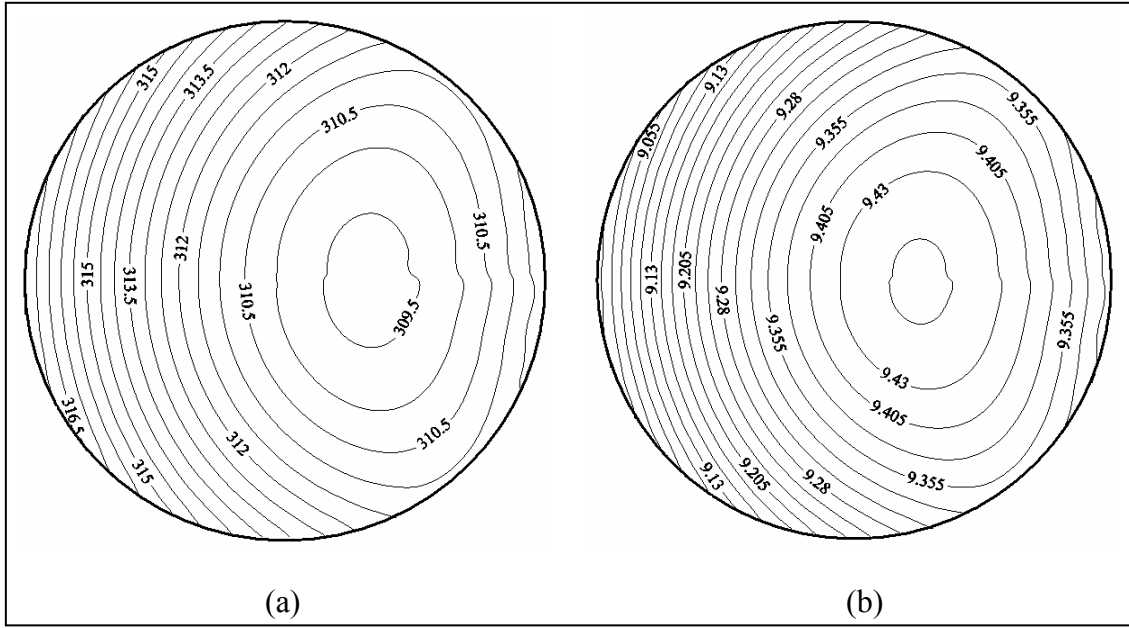
Verilen akış şartları için belirlenen Reynolds ve Prandtl sayıları bağıntıda yerine konulduğunda, ön çarpma noktası için Nusselt sayısı  $Nu_D(\theta = 0) = 34.65$  olarak elde edilmiştir.

Teorik çalışmada, ürünün ön durma noktasında ısı taşınım katsayısı  $23.7 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak elde edilmiştir. Bu değer,  $Nu_D = hD/k$  formülünde yerine konulduğunda ön durma noktası için Nusselt sayısı  $Nu_D(\theta = 0) = 34.54$  olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlere bakıldığında, literatürde verilen ampirik bağıntı ile bu çalışmadan elde edilen sonucun oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Silindirik şekilli ürün yüzeyi boyunca ısı ve kütle taşınım katsayıları belirlendikten sonra, üründeki sıcaklık ve nem dağılımı belirlenmiştir. Bu amaçla, silindir şekilli ürünlerin kurumasını modelleyen denklemler konvektif sınır koşulu altında çözülmüştür (Bölüm 2.1.1.4.3.). Ürünün termofiziksel özellikleri;  $M_i = 9.57 \text{ kg/kg}$  (k.b.),  $k = 0.148 + 0.493 M \text{ W/mK}$ ,  $\rho = 2195.27 \text{ kg/m}^3$ ,  $D = 3.41 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $c_p = 0.837 + 1.256 M \text{ J/kgK}$  olarak literatürden alınmış (Hussain, 2001); kurutma havası hızı, sıcaklığı ve ürün yüzey sıcaklığı ise, sırasıyla,  $U_d = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $T_d = 323 \text{ K}$ ,  $T_s = 298 \text{ K}$  olarak seçilmiştir. Bu değerler ile ürün yüzeyi boyunca değişimi belirlenen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları geliştirilen koda girilmiş ve üründeki sıcaklık ve nem dağılımları elde edilmiştir. Denklemler çözüldüğünde, ısı ve kütle taşınım katsayılarının yüksek olduğu ön yüzeyde daha hızlı, düşük olduğu arka yüzeyde ise daha geç kuruma olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.23a ve b).

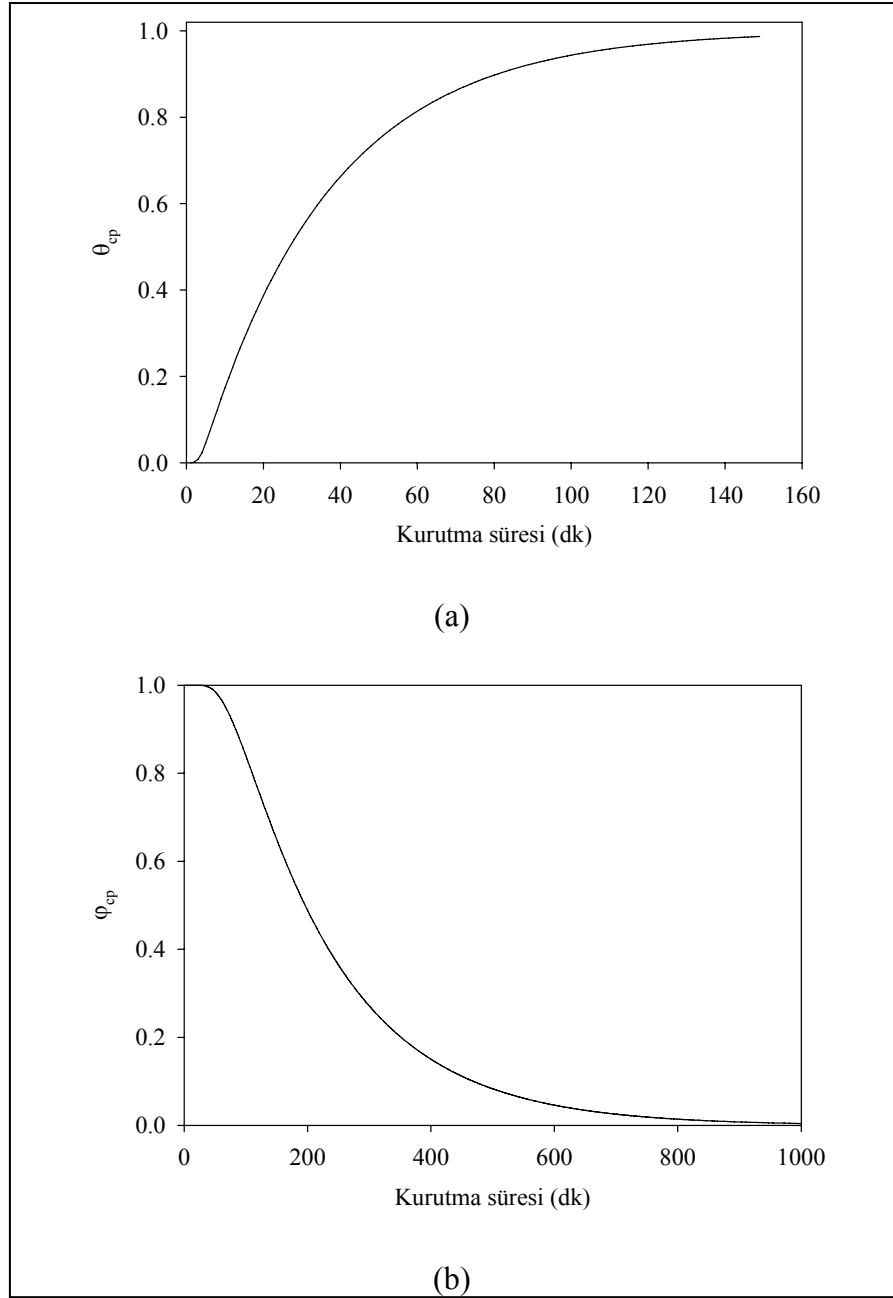


Şekil 3.22. Ürün yüzeyi boyunca yerel ısı (a) ve kütle (b) taşınım katsayılarının değişimi



Şekil 3.23. Kurutmanın 1000'inci saniyesinde ürün içerisindeki sıcaklık (a) ve nem (b) dağılımı

Şekil 3. 24 a ve b' de ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklık ve nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimleri gösterilmiştir. Kurutma prosesinin ilerlemesiyle, ürün merkez sıcaklığının kurutma havası sıcaklığına eriştiği görülmektedir (Şekil 3.24 a). Şekil 3.24b'de ise kurutma süresinin ilerlemesiyle nem içeriğinin hızla azaldığı görülmüştür. Ürün sıcaklığının ortam sıcaklığına erişmesi, nem içeriğinin denge nem içeriğine erişmesinden çok daha hızlı gerçekleştiği Şekil 3.24 a ve b'den açıkça görülmektedir.



Şekil 3.24. Ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklık (a) ve boyutsuz nem içeriğinin (b) kurutma süresiyle değişimi

### 3.1.4.3. Kurutma Havaasının Optimum Giriş ve Çıkış Konumu

Bu bölümde, Şekil 2.12’de gösterilen, kurutma havası giriş ve çıkış konumu farklı olan kurutucularda, ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanları çözülmüştür. Bu amaçla, beş farklı konfigürasyon incelenmiş, her bir konfigürasyonda kurutma havasının kurutucuya giriş ve çıkış konumu farklı tutulmuştur. Her konfigürasyonda hız ve sıcaklık alanları

çözülerek, kurutma havası giriş ve çıkış konumunun, homojen kurumaya ve ürünün kuruma davranışına etkisi araştırılmıştır. Çözümlemede, daha önceki dış akış problemlerinde de kullanılan Fluent paket programı kullanılmıştır.

Çalışmada elma dilimi kurutulmuş ve elmaya ait termofiziksel özellikler;  $M_i = 7.196$  kg/kg (k.b.),  $k = 0.576$  W/mK,  $\rho = 856$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_p = 1929$  J/kgK olarak literatürden (Hussain, 2001) alınmış ve havanın hızı, sıcaklığı ve ürün yüzey sıcaklığı, sırasıyla,  $U_d=0.5$  m/s,  $T_d=333$  K,  $T_s=298$  K olarak seçilmiştir.

Kurutma havası giriş ve çıkış konumuna bağlı olarak, ürün etrafında hız ve sıcaklık dağılımları tespit edilmiş, birinci ile ikinci konfigürasyonda; ürünün sol ve üst yüzeylerindeki ve üçüncü ile dördüncü konfigürasyonda; ürünün sağ ve alt yüzeylerindeki hız ve sıcaklık dağılımlarının benzer olduğu görülmüştür (Şekil 3.25 a-d ve Şekil 3.26 a-d). Eşdağlı hız ve sıcaklık alanlarının oluşmadığı, buna bağlı olarak ürün yüzeyi boyunca değişimi elde edilen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının eşdağlı olmadığı belirlenmiştir. Beşinci konfigürasyonda ise, hız ve sıcaklık dağılımları elde edildiğinde, ürün etrafındaki hız ve sıcaklık profillerinin simetrik olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.25 e ve Şekil 3.26 e). Bu durumda ise, ürünün sağ ve sol yüzeyleri boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının aynı olduğu belirlenmiştir.

Ürün etrafındaki akış alanı belirlendikten sonra, (2.29) ve (2.30) numaralı bağıntılar kullanılarak ürün yüzeyi boyunca yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının değişimi belirlenmiştir. Her bir konfigürasyon için ürün yüzeyi boyunca belirlenen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları Şekil 3.27’de gösterilmiştir. Kurutma havasının, kurutucunun alt orta kısmından girip üst orta kısmından çıktığı beşinci konfigürasyonda, yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının en yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Birinci ile ikinci ve üçüncü ile dördüncü konfigürasyonlarda, ürün yüzeyi boyunca değişimi elde edilen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının hemen hemen aynı olduğu, beşinci konfigürasyonda ise bu katsayıların en yüksek değerde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.27).

Kurutma havasının, kurutucuya optimum giriş ve çıkış konumu belirlendikten sonra, ürün boyut oranının kuruma davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ürünün alt ve üst yüzeyleri küçültülerek ve yan yüzeyleri yükseltilerek farklı boyut oranları ( $AR=L/H$ ) elde edilmiştir. Üç farklı boyut oranına sahip ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanı belirlenerek Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da gösterilmiştir. Hız ve sıcaklık profillerinin, ürün sağ ve sol yüzeylerinde simetrik olduğu tespit edilmiştir.



Her bir boyut oranında, ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları belirlenmiş ve elde edilen dağılım Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de gösterilmiştir. Alt ve üst yüzeyler küçültülüp sağ ve sol yüzeyler artırıldığında (boyut oranı azaldıkça) ısı ve kütle taşınım katsayılarının yerel değişimleri artmış, yan yüzeylerde ise azalmıştır. Alt ve üst yüzeylerde artış miktarının daha fazla olması sebebiyle, kuruma hızı boyut oranı küçüldükçe artmış ve kuruma süresi kısalmıştır.

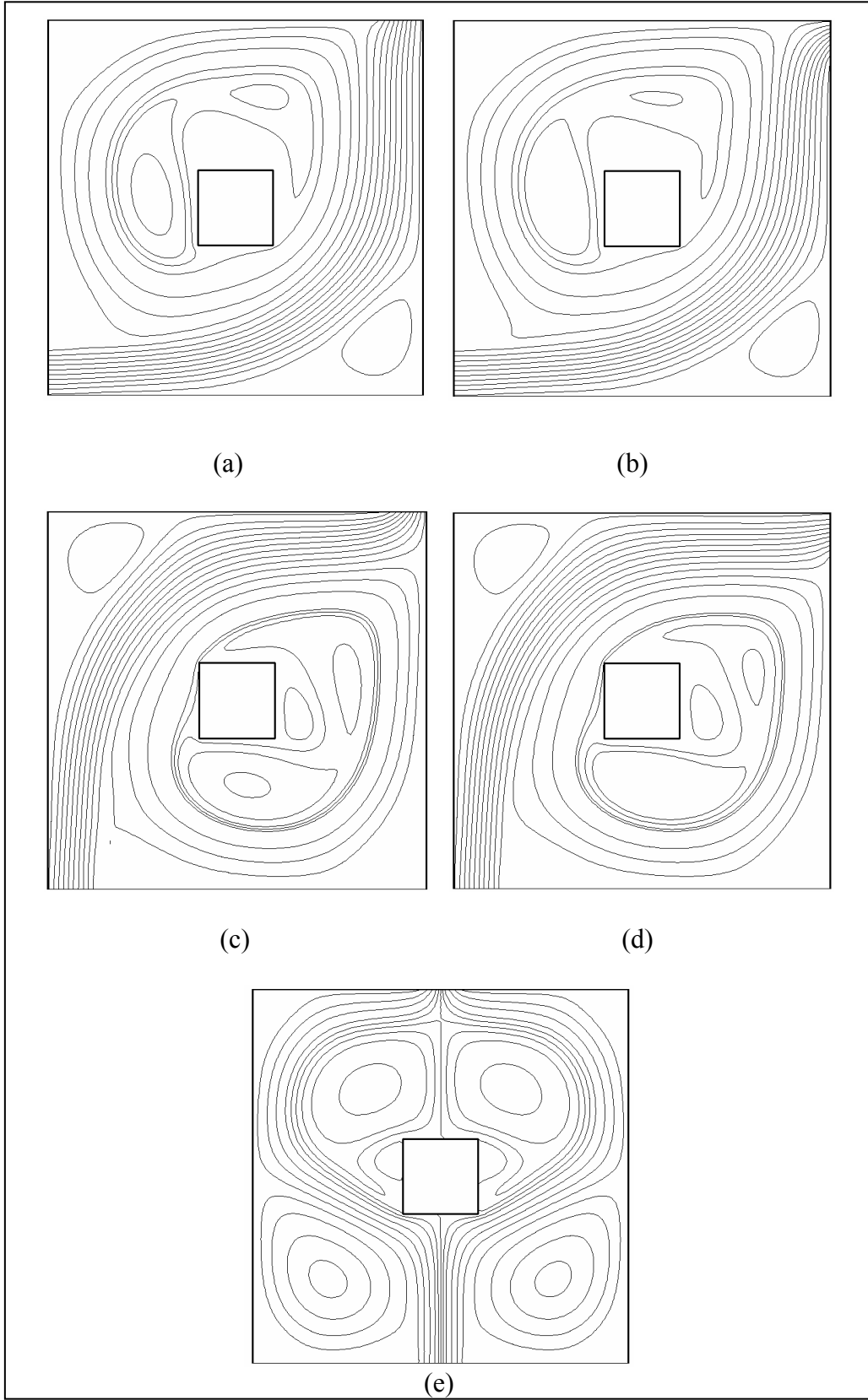
Yüzey boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları belirlendikten sonra, üründe sıcaklık ve nem dağılımını belirlemek için, kartezyen koordinatlarda iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemleri, Bölüm 2.1.1.1’de anlatıldığı gibi çözülmüştür. Her bir konfigürasyon için belirlenen ısı ve kütle taşınım katsayıları, geliştirilen koda girilmiş, kurutmanın belirli bir süresinde, üründeki sıcaklık ve nem dağılımları belirlenmiştir.

Şekil 3.32 ve 3.33’te, kurutma prosesinin 1000’inci saniyesinde, üründeki sıcaklık ve nem dağılımları belirlenmiştir. Birinci ile ikinci ve üçüncü ile dördüncü konfigürasyonlarda, ürün yüzeyi boyunca elde edilen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları değerlerinin birbirine çok yakın olması sebebiyle, elde edilen sıcaklık ve nem dağılımlarının hemen hemen aynı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.32 ve 3.33, a-b, c-d). Bu konfigürasyonlarda elde edilen sıcaklık ve nem profillerinde, ürün alt ve sol yüzeylerinin daha çabuk kuruduğu, kuruma işleminin ise homojen olmadığı görülmüştür.

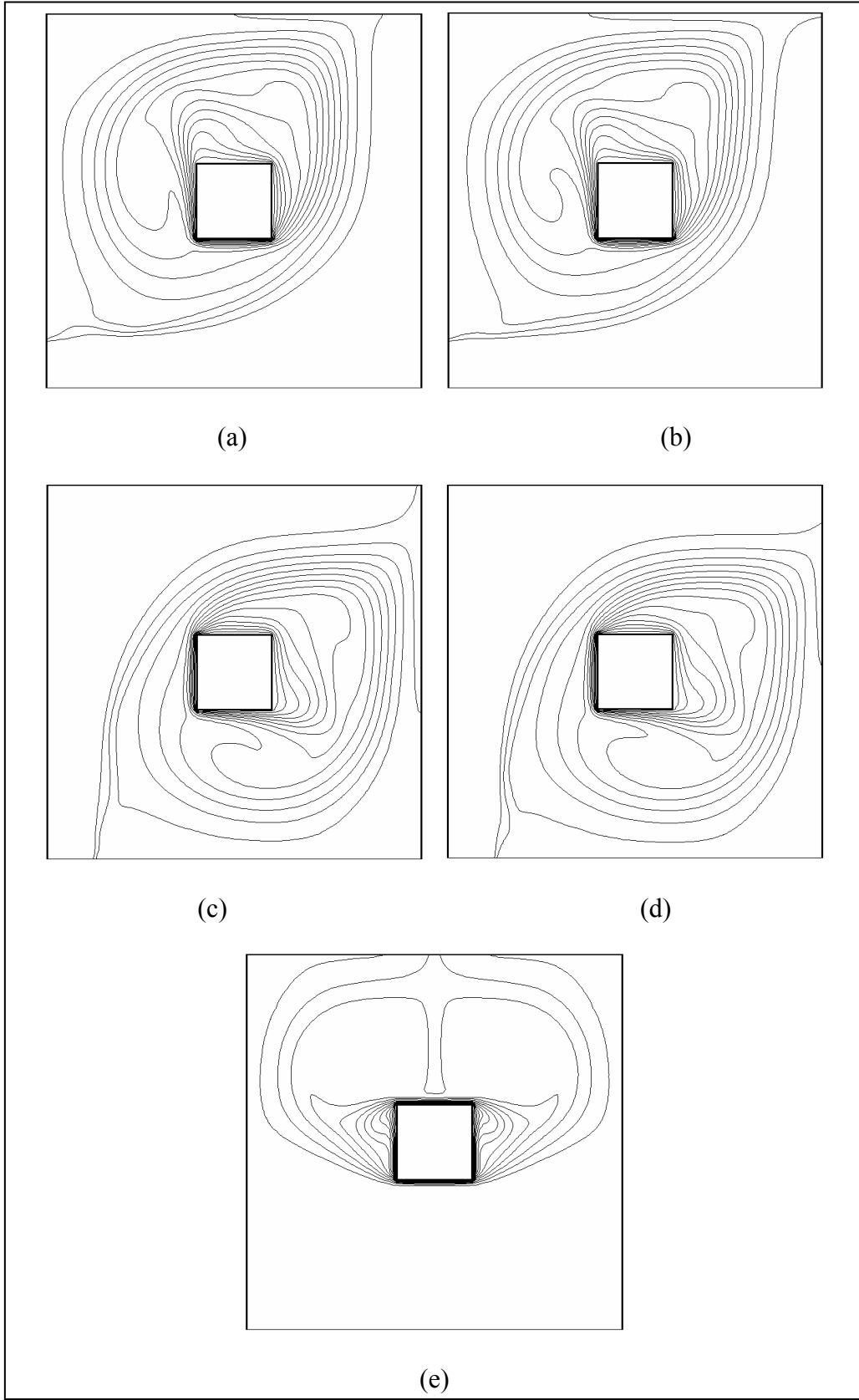
Beşinci kurutucuda kurutulan ürünün alt yüzeyinde yüksek ısı ve kütle taşınım katsayısı, yan yüzeylerde ise bu katsayıların birbirine eşit olduğu daha önce verilmişti (Şekil 3.29). Bu yüzden, yüksek ısı ve kütle taşınım katsayılarının olduğu alt yüzeyde kurumanın daha hızlı olduğu, yan yüzeylerde ise kuruma hızının eşit olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.32e ve Şekil 3.33e). Beş konfigürasyon içinde, homojen kurumaya en yakın sonucun, bu konfigürasyonda gerçekleştiği belirlenmiştir. Homojen kuruma açısından, ürünün alt yüzeyinin artırılmasının (boyut oranının artırılmasının) daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir (Şekil 3.34 ve 3.35).

Ürün merkezinde, boyutsuz sıcaklık ve nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi Şekil 3.36’da gösterilmiştir. Merkezde, ilk dört konfigürasyonda sıcaklık ve nem içeriği değişiminin aynı olduğu, beşinci konfigürasyonda ise kurutma süresinin daha kısa olduğu görülmüştür.

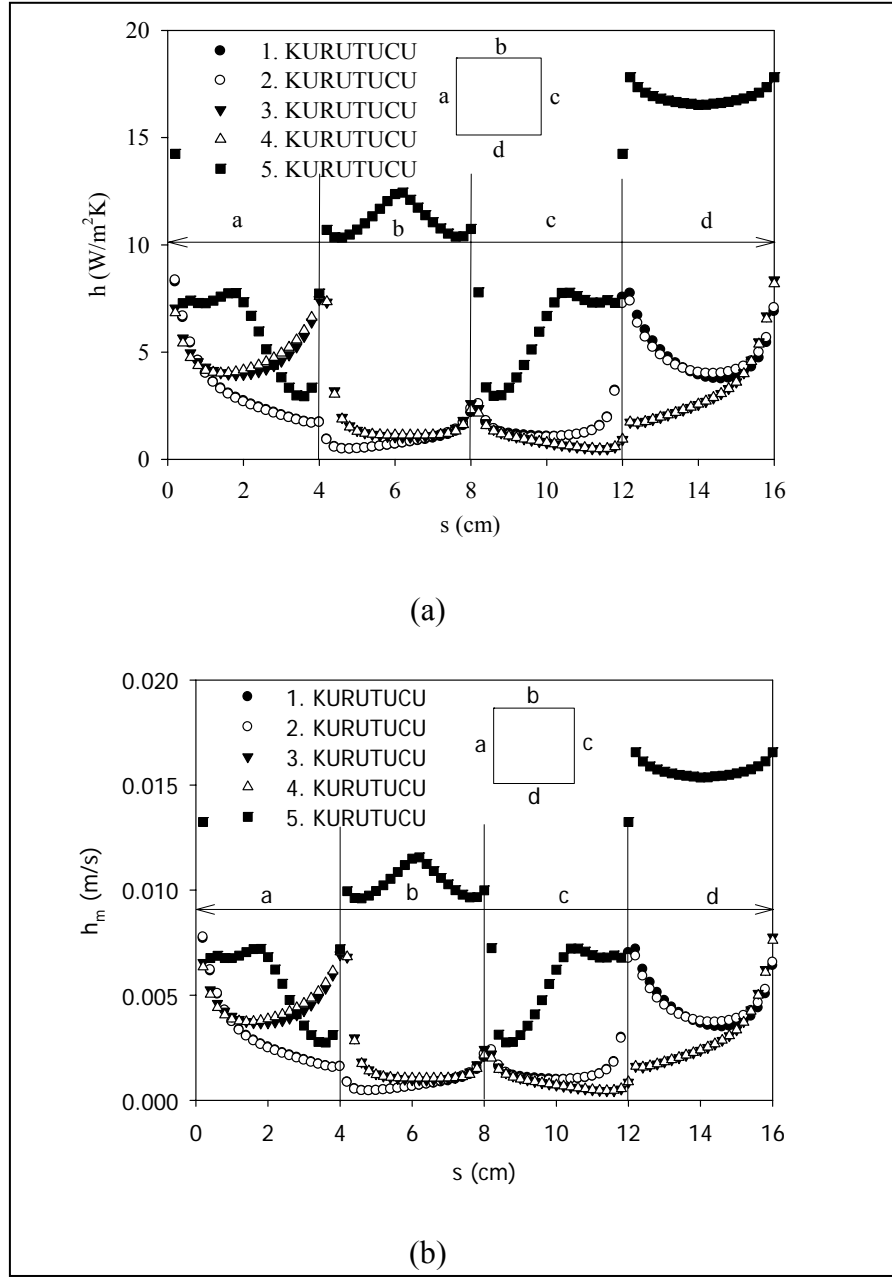
Şekil 3.37’de boyutsuz merkez sıcaklık ve nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine ürün boyut oranının etkisi gösterilmiştir. Artan boyut oranı ile kurutma süresinin bir miktar artış gösterdiği tespit edilmiştir.



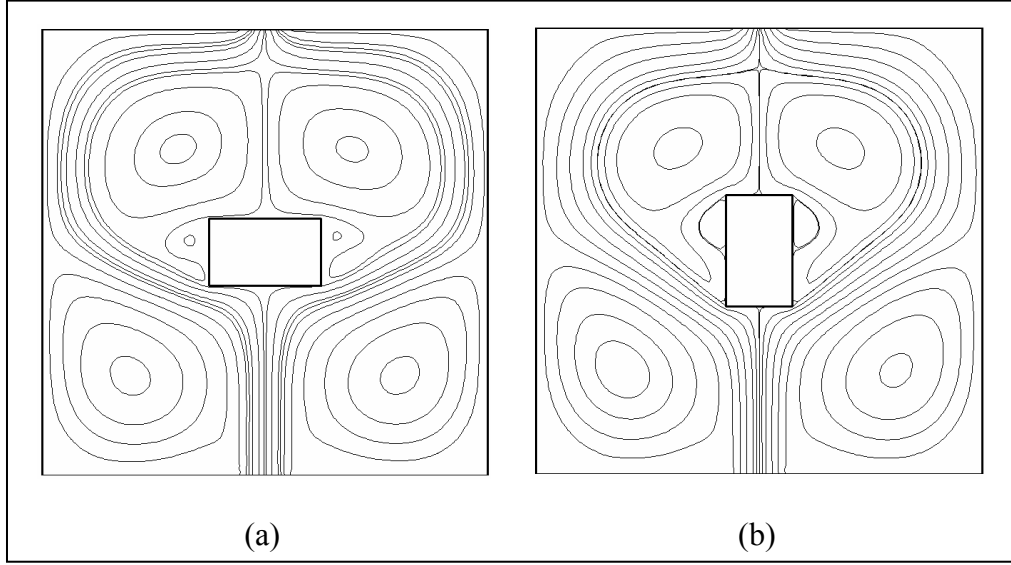
Şekil 3.25. Kurutma havasının giriş ve çıkış konumuna göre ürün etrafındaki akım çizgileri, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d), 5. Kurutucu (e)



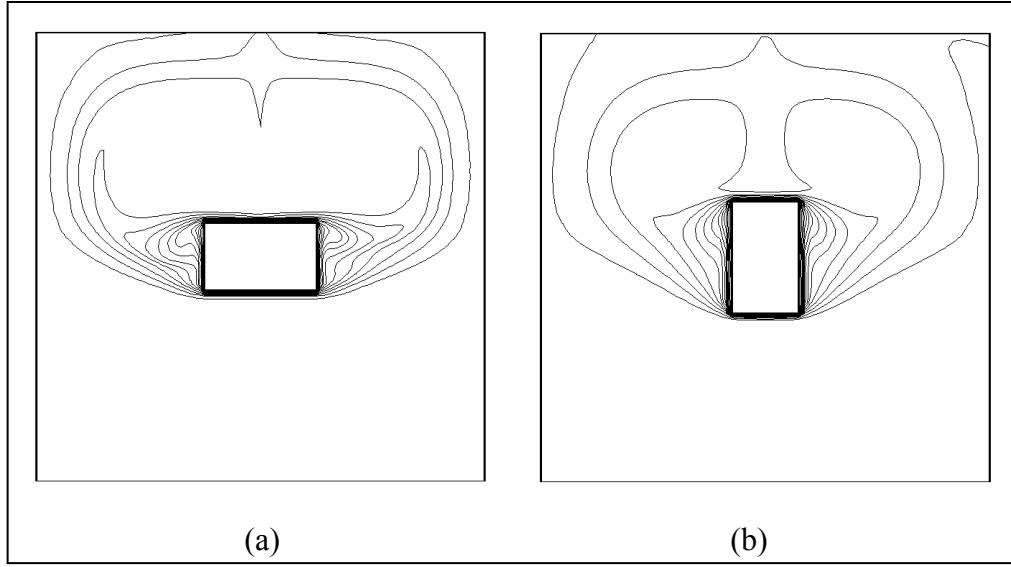
Şekil 3.26. Kurutma havasının giriş ve çıkış konumuna göre ürün etrafındaki sıcaklık dağılımı, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d), 5. Kurutucu (e)



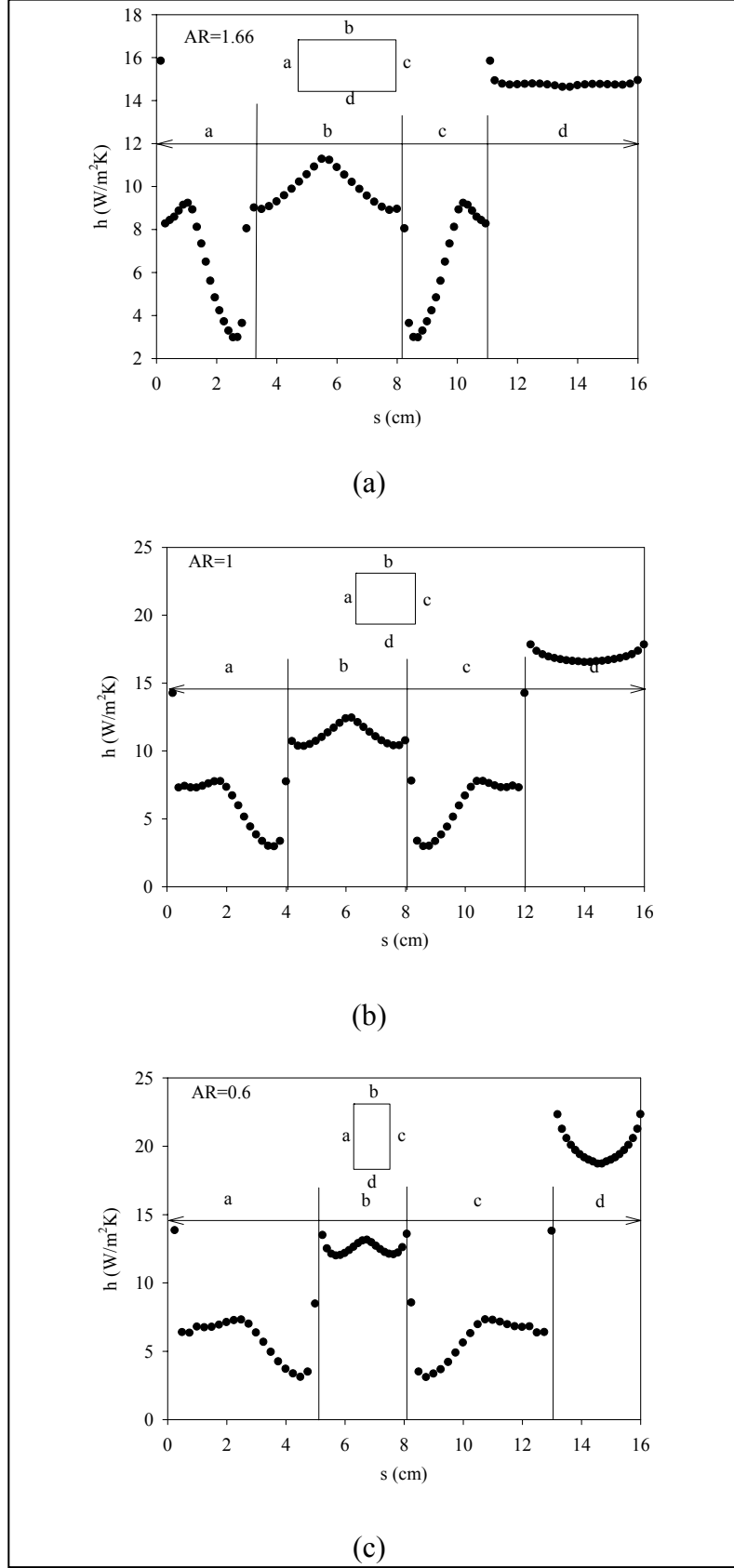
Şekil 3.27. Kurutma havası giriş ve çıkış konumunun, ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı (a) ve kütle (b) taşınım katsayılarına etkisi



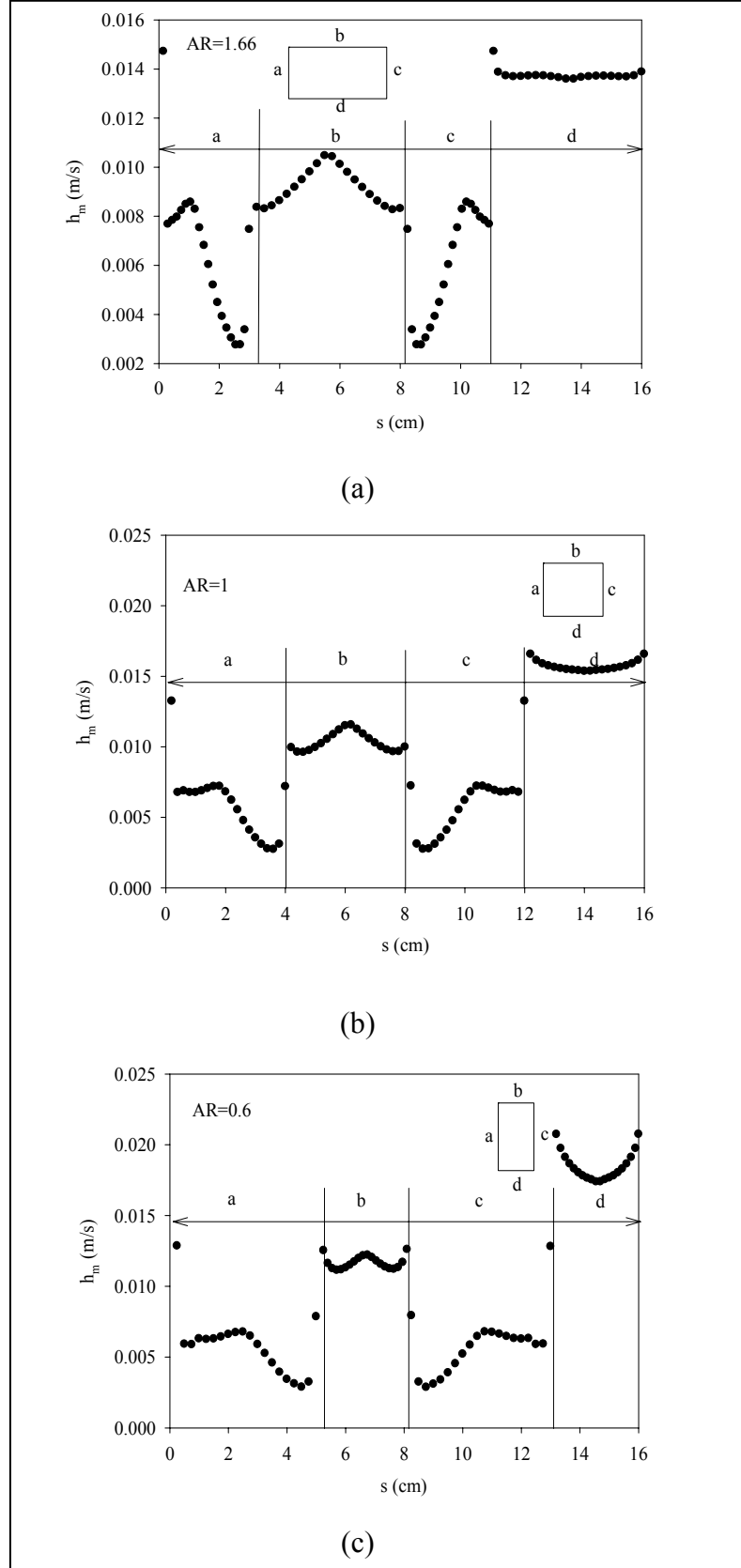
Şekil 3.28. Ürün etrafındaki akım çizgilerinin değişimine boyut oranının (AR) etkisi, AR=1.66 (a), AR=0.66 (b)



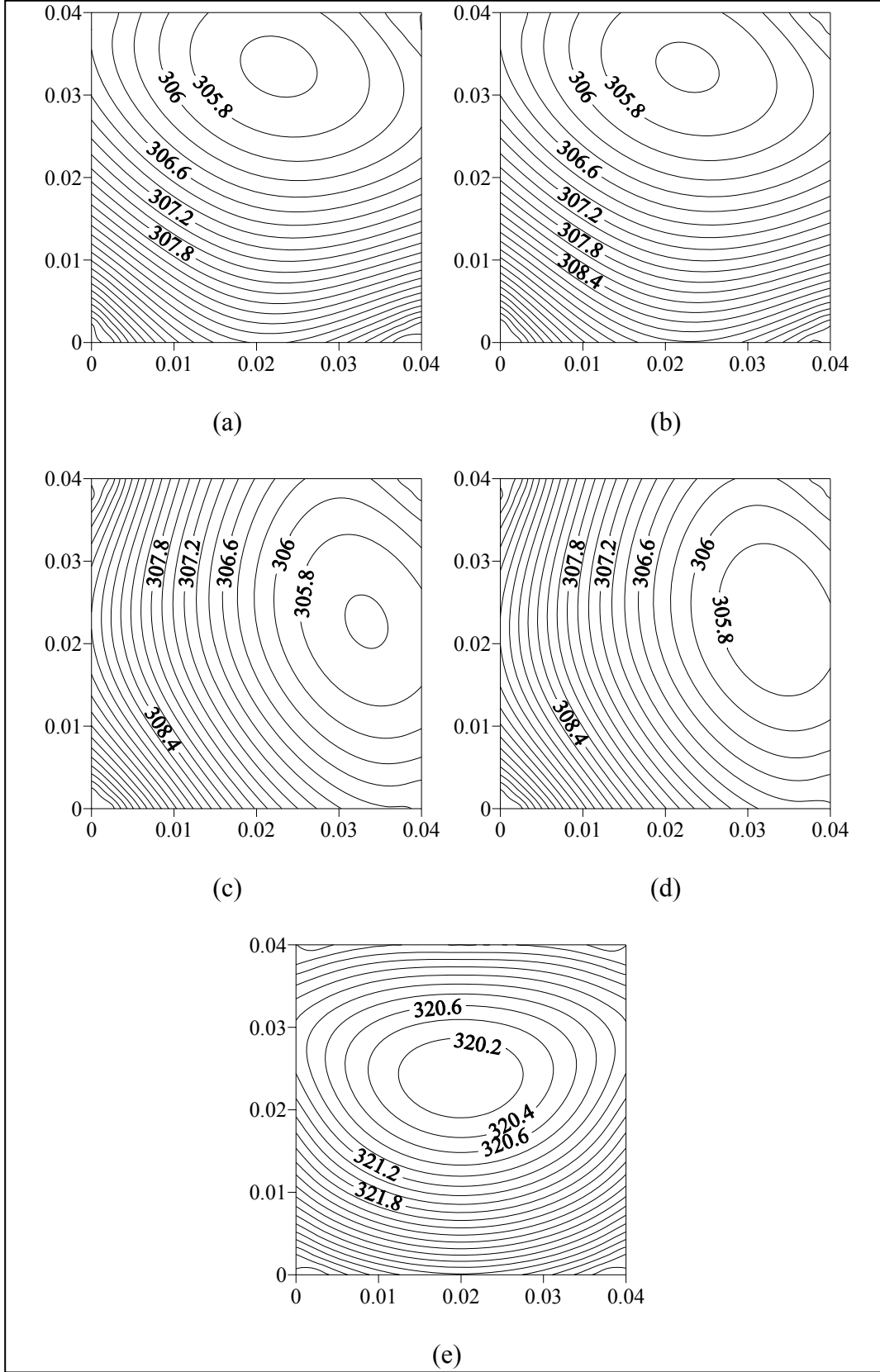
Şekil 3.29. Ürün etrafındaki sıcaklık dağılımına boyut oranının (AR) etkisi, AR=1.66 (a), AR=0.66 (b)



Şekil 3.30. Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı taşınım katsayısına boyut oranının (AR) etkisi, AR=1.66 (a), AR=1 (b), AR=0.66 (c)

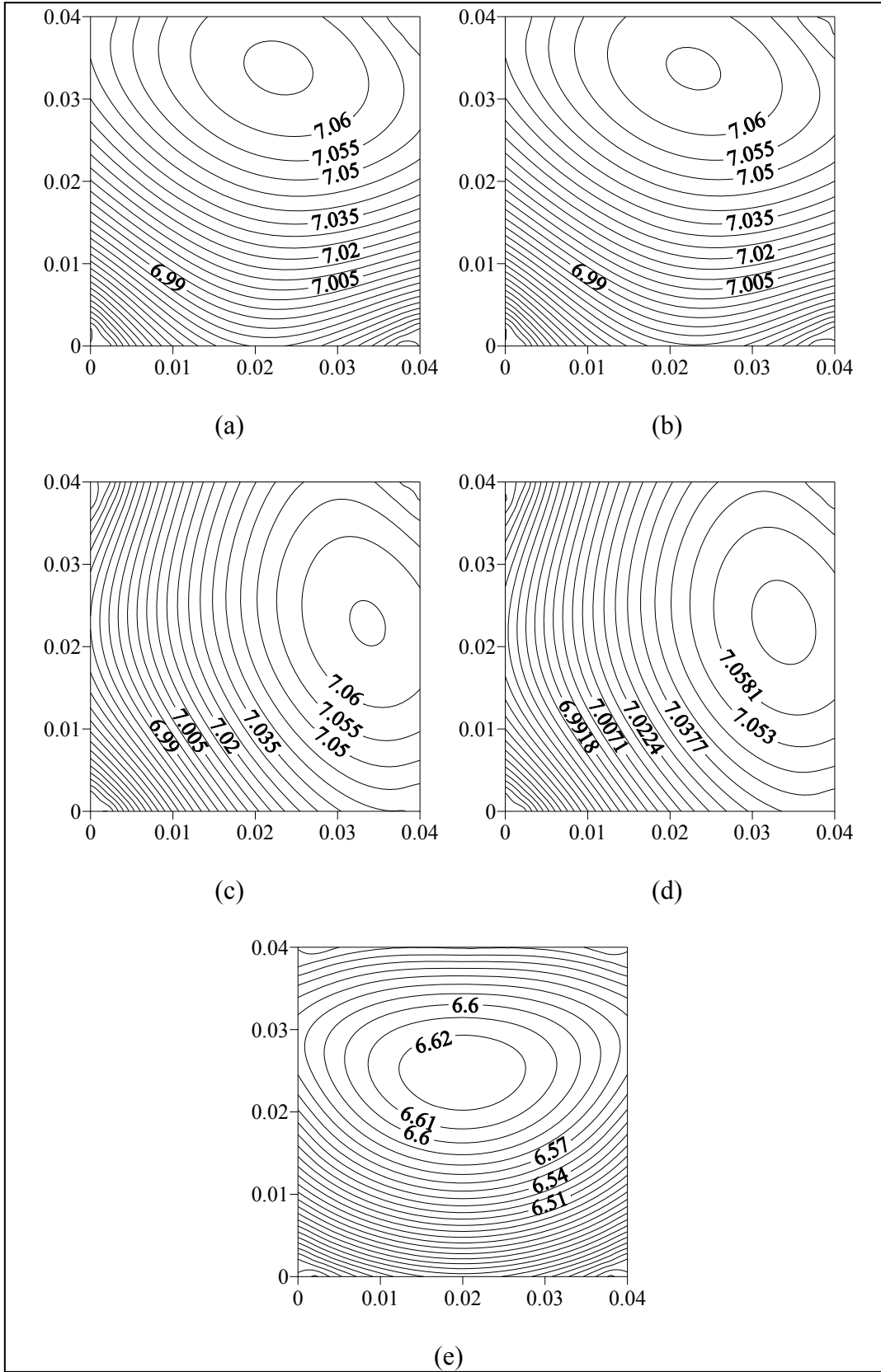


Şekil 3.31. Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel kütle taşınım katsayısına boyut oranının (AR) etkisi,  $AR=1.66$  (a),  $AR=1$  (b),  $AR=0.66$  (c)

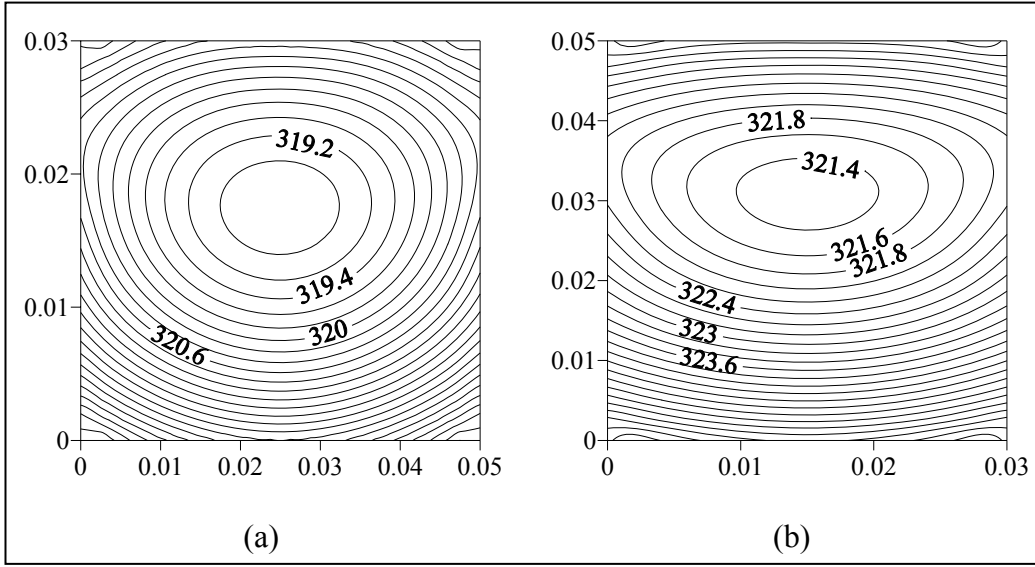


Şekil 3.32. Kurutmanın 1000'inci saniyesinde, kurutma havası giriş ve çıkış konumunun üründeki sıcaklık dağılımına etkisi, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d), 5. Kurutucu (e)

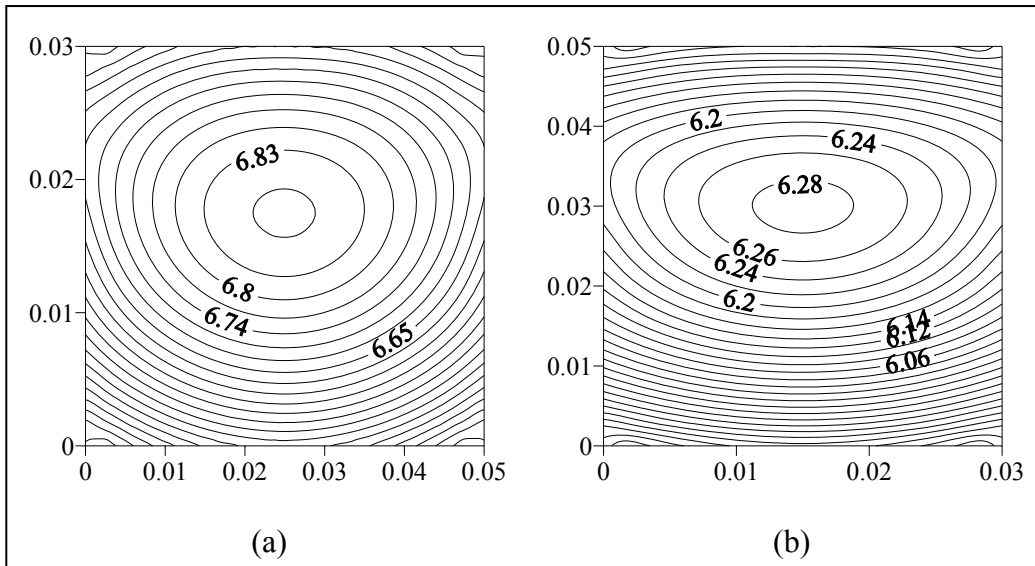




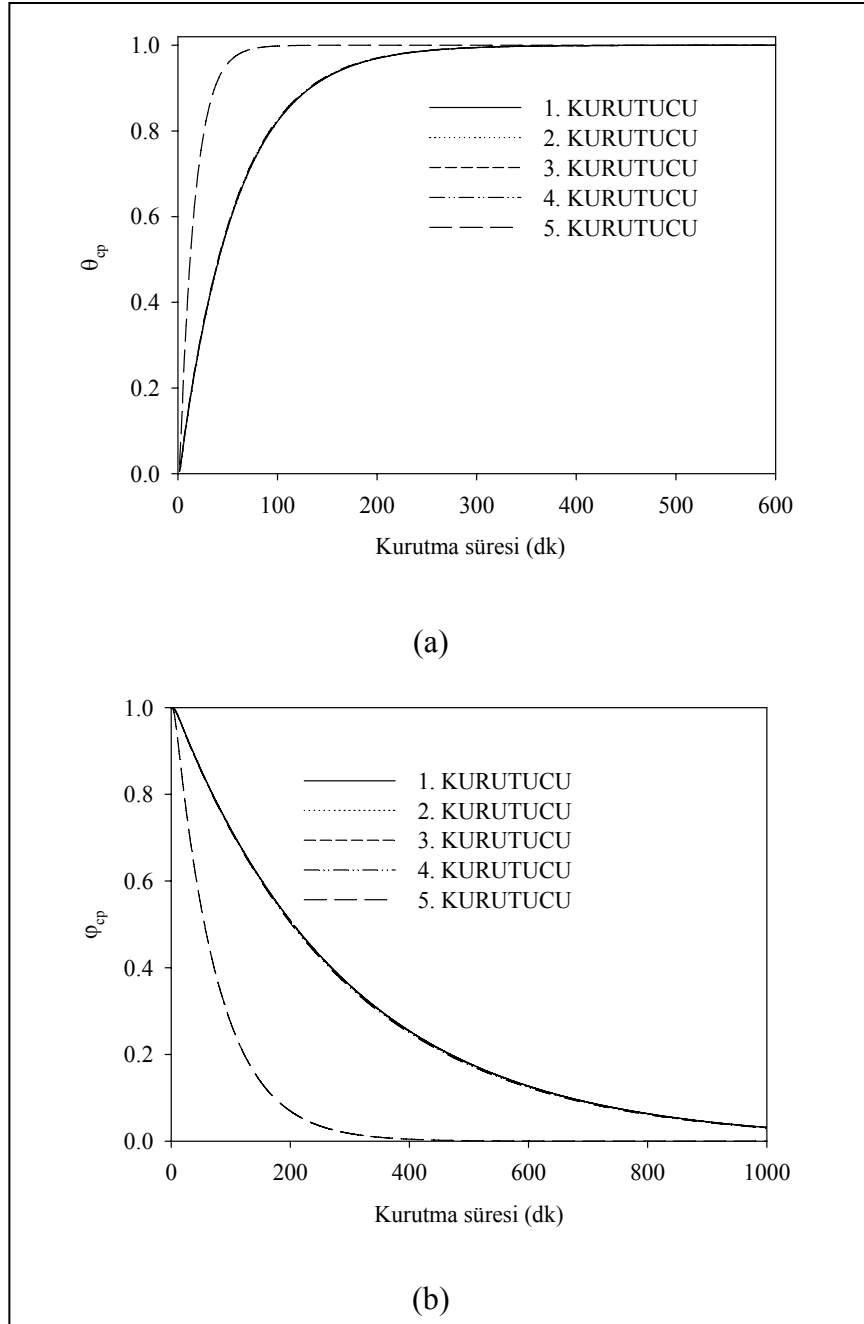
Şekil 3.33. Kurutmanın 1000'inci saniyesinde, kurutma havası giriş ve çıkış konumunun ürünlerdeki nem dağılımına etkisi, 1. Kurutucu (a), 2. Kurutucu (b), 3. Kurutucu (c), 4. Kurutucu (d), 5. Kurutucu (e)



Şekil 3.34. Kurutma havasının optimum giriş ve çıkış konumunda ve kurutmanın 1000'inci saniyesinde, boyut oranının ürünlerdeki sıcaklık dağılımına etkisi, AR=1.66 (a), AR=0.66 (b)

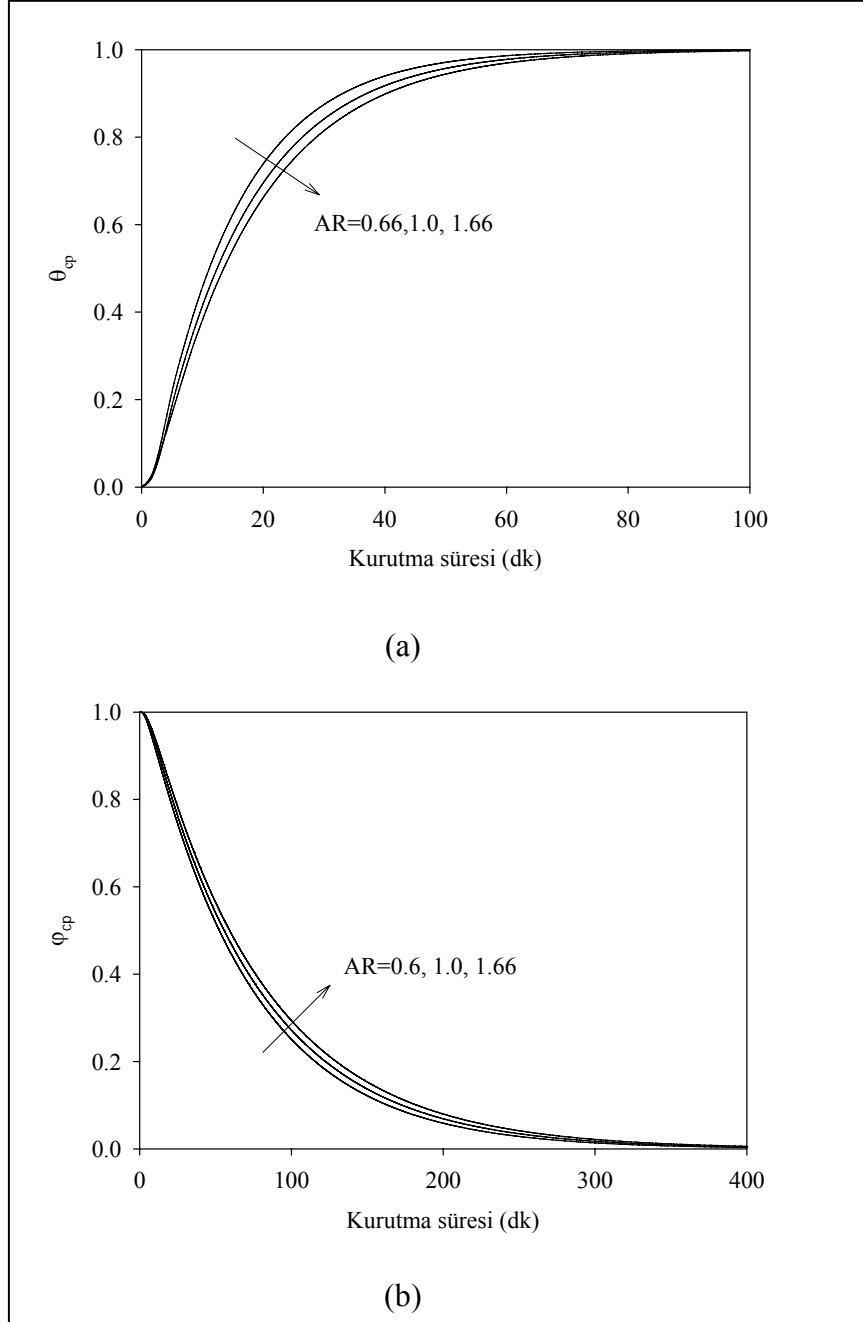


Şekil 3.35. Kurutma havasının optimum giriş ve çıkış konumunda ve kurutmanın 1000'inci saniyesinde, boyut oranının ürünlerdeki nem dağılımına etkisi, AR=1.66 (a), AR=0.66 (b)



Şekil 3.36. Kurutma havasının giriş ve çıkış konumuna göre, ürün merkezindeki boyutsuz sıcaklık (a) ve nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi (b)

Prakash vd. (2004), güneşe açık ortamda, mikrodalga ve akışkan yataklı kurutucularda, havucun kuruma davranışını, gıda kalitesini ve kurutucu tiplerinin ürünün homojen kurumasına etkisini araştırmıştır. Akışkan yataklı kurutucuda kurutulan ürünlerin, diğerlerine göre daha homojen kurduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 3.37. Kuruma havasının optimum giriş ve çıkış konumunda, boyut oranının ürün merkezindeki boyusuz sıcaklık (a) ve nem içeriğinin (b) kurutma süresiyle değişimine etkisi

Araştırılan kurutucu tiplerinden beşinci tip kurutucunun, diğer kurutucu tiplerine göre daha homojen ve daha kısa sürede kuruma sağlaması, bu kurutucunun akışkan yataklı kurutucu özelliği taşıdığını göstermiştir.

### 3.2. Deneysel Çalışma Sonuçları

Karadeniz Bölgesinde yaygın olarak yetiştirilen kivi ve karayemişin kuruma davranışı ve denge nem içeriği deneysel olarak belirlenmiştir. Geometrik yapıları farklı olan bu ürünler; farklı hız, sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde kurutulmuştur. Kurutma havası şartlarının kuruma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmış ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

Kurutma işlemine başlamadan önce, her iki kurutucu bir saat kadar çalıştırılarak istenilen sıcaklık ve bağıl nem değerlerine getirilmiştir. Kurutulan ürünlerin deneye hazırlanışı Bölüm 2.2.5’de anlatıldığı gibi yapılmıştır.

#### 3.2.1. Kivi Kurutma Sonuçları

Deneye hazırlanan kiviler, test bölgesi hem düşey hem de yatay konumda tutulan kurutucularda kurutulmuştur. Test bölgesi düşey konumda tutulan konvektif kurutucuda, 7 mm dilim kalınlığındaki kivinın kuruma davranışı üç farklı hız (0.3, 06 ve 0.9 m/s), dört farklı sıcaklık (35, 45, 55 ve 65°C) ve dört farklı bağıl nemde (%40, 55, 70 ve 85) araştırılmış ve bu parametrelerin kuruma süresine etkisi belirlenmiştir.

Test bölgesi yatay konumda tutulan konvektif kurutucuda ise dikdörtgen (25 x 45 mm) şeklinde kesilen kivi test bölgesine yerleştirilmiş ve kuruma davranışı deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, dikdörtgen şekilli kivinın kuruma davranışı üç farklı kurutma havası hızı (0.3, 06 ve 0.9 m/s), beş farklı sıcaklık (25, 30, 40, 50 ve 60°C) ve dört farklı bağıl nemde (%25, 40, 55 ve 70) araştırılmıştır. Teorik çalışma kapsamında ise, test bölgesinde kurutma havasının ürün etrafındaki hız ve sıcaklık alanları teorik olarak çözülmüş ve ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları belirlenmiştir.

Test bölgesinin, ürünün kuruma davranışına etkisini belirlemek amacıyla, dikdörtgen (25 mm x 45 mm) şeklinde kesilen kivi sabit hız ( $U=0.3$  m/s), sabit sıcaklık ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ) ve sabit bağıl nemde (%25) kurutulmuştur. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve test bölgesi konumunun kurutma süresine etkisi belirlenmiştir.

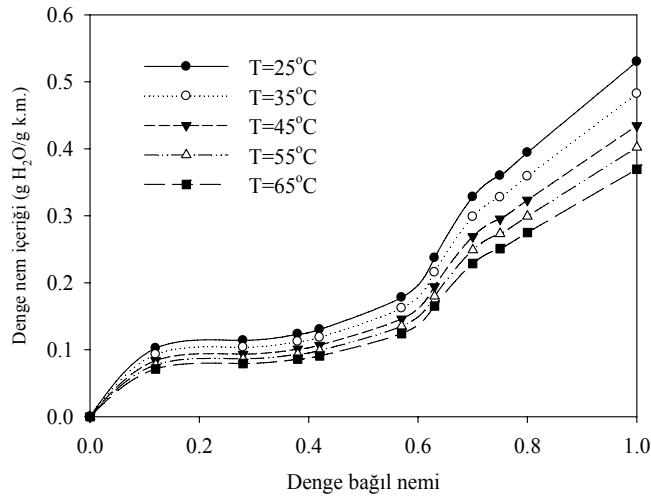
### 3.2.1.1. Test Bölgesi Düşey Konumda Tutulan Kurutucu

Deneye hazırlanan kivi dilimleri (7 mm), kurutucunun dengeye gelmesiyle kurutma tepsilerine yerleştirilmiştir. Veri okuma ve kaydetme sistemiyle her 10 dakikada bir alınan ölçümler 60 dakikalık zaman dilimlerinde bilgisayara doğrudan aktarılmıştır.

Yapılan deneylerde, kurutma havası hızı 0.3, 0.6 ve 0.9 m/s, kurutma havası sıcaklığı 35, 45, 55 ve 65°C ve kurutma havası bağıl nemi %40, 55, 70 ve 85 olarak alınmıştır.

Nem tayin cihazıyla ilk nem içeriği %81 y.m. (4.26 g H<sub>2</sub>O/g k.m.) olarak belirlenen kivinin kuruma davranışı, farklı havası koşullarında incelenmiş ve kurutma havası şartlarının C vitamini üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kurutma havası sıcaklığı sabit tutularak bağıl nem etkisi ve bağıl nem sabit tutularak sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Her iki durumda da, üç farklı kurutma kanalı olduğundan, aynı şartlarda, üç farklı hızda deney yapmak mümkün olmuştur.

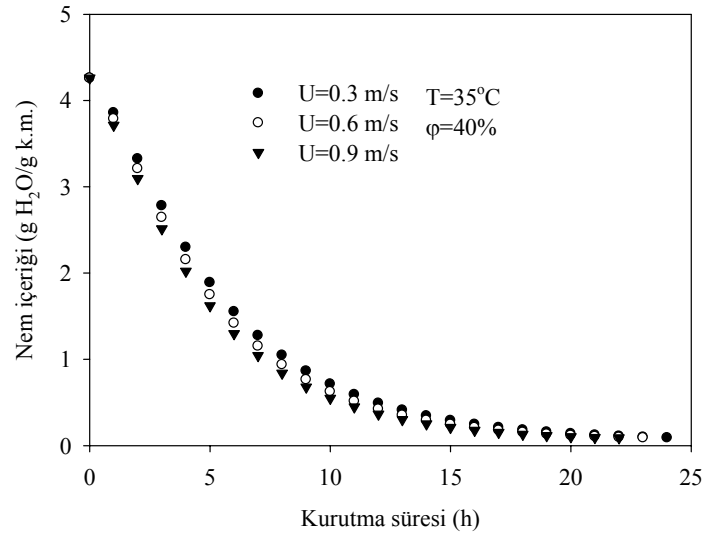
Öncelikle, kuru kivi için denge nem içeriği, Bölüm 2.2.6.1’de anlatıldığı gibi Statik Gravimetrik yöntemiyle tayin edilmiştir. Kivinin denge nem içeriğinin sıcaklıkla değişimi Şekil 3.38’de gösterilmiştir. Artan sıcaklıkla denge nem içeriği azalırken, artan denge bağıl nemiyle denge nem içeriğinin arttığı tespit edilmiştir. Bu beklenen bir durumdur ve benzer sonuçlara birçok gıda ürününde rastlanmıştır (Lopez vd., 1998; McLaughlin ve Magee, 1998; Palipane ve Driscoll, 1992; Litchfield ve Okos, 1992; Sogi vd., 2003; Nogueira-Terrones vd., 2004; Roman vd., 2004; Wadsö vd., 2004; Cordeiro vd., 2006; Abalone vd., 2006; Kaur, vd., 2006).



Şekil 3.38. Kivinin denge nem içeriğinin denge bağıl nemiyle değişimine sıcaklığın etkisi

Gıda ürünlerinin kurutulmasında, kurutma havası hızının 1 m/s üzerinde olduğu durumlarda, hızın kuruma süresine tesiri olmadığı birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur (Simal vd., 1998 a; Hatamipour ve Mowla, 2003; Babalis ve Belessiotis, 2004; Bozkır, 2006; Marquez vd., 2006; Kashaninejad vd., 2007). Bu bilgiler ışığında, deneysel çalışma kapsamında, kurutma havası hızı 0.3 m/s ile 0.9 m/s aralığında alınmış, daha yüksek hızlara çıkılmamıştır.

Sabit hızda kuruma periyodunda, ürün yüzeyi tamamen ıslaktır ve bu periyotta yalnızca taşınım etkileri hakimdir. Bu periyotta kurutma havası hızı önemli bir parametredir. Ancak, gıda ürünlerinin kurumasında, sabit kuruma periyodu ya çok kısa sürmekte veya hiç rastlanmamaktadır (Simal vd., 1997; Bon vd., 1997; Simal vd., 1998 a; Roberts, 1999; Lopez vd., 2000; Senadeera vd., 2003; Akgun ve Doymaz, 2005; Göğüş ve Maskan, 2006; Srikiatden ve Roberts, 2006; Wang vd., 2007; Kashaninejad vd., 2007). Bu yüzden de kurutma havası hızının, gıda ürünlerinin kurumasında önemli bir parametre olmadığı belirlenmiştir. Denge nem içeriği belirlendikten sonra, sabit sıcaklık ve bağıl nemde kurutma havası hızının, kurutma süresine etkisi araştırılmıştır. Artan kurutma havası hızıyla ısı ve kütle taşınım katsayılarının bir miktar arttığı ve toplam kurutma süresinin %8.33 oranında azaldığı belirlenmiştir (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine hızın etkisi

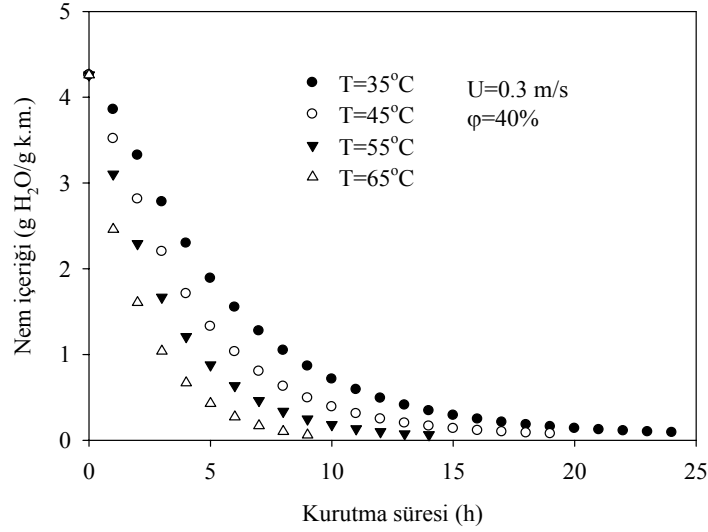
Kurutma havası sıcaklığının yüksek değerlerinde, ürün yüzeyi sertleştiğinden istenmeyen kusurlar ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, sertleşen kabuk nemin yüzeye difüzyonuna karşı bir direnç oluşturmaktadır. Simal vd. (1997), kurutma havası sıcaklığının 30°C ile 90°C değerleri arasında elmanın kuruma davranışını incelemiştir. Sıcaklığın 30°C' den 60°C'ye çıkartılmasıyla, kurutma süresinin önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir. Kurutma havası sıcaklığının 70°C'den büyük değerlerinde ise, sıcaklığın kurutma süresi üzerindeki etkisinin önemli ölçüde azaldığını ve ürün yüzeyinde sertleşme olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışma ile gıda ürünlerinin 70°C üzerinde kurutulmalarını gerektiği belirtilmiştir. Aynı şekilde Simal vd. (1998 a), brokolinin kuruma davranışını incelerken, kurutma havası sıcaklığının 80°C ve üzeri değerlerinde, sıcaklığın kuruma süresine etkisinin önemli ölçüde azaldığını belirlemiştir. Deneysel çalışma kapsamında, gıda ürünlerinin kuruma davranışını incelerken, kurutma havası sıcaklığı, yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda maksimum 65°C olarak seçilmiştir.

Şekil 3.40'da, sabit bağıl nem ( $\phi=40\%$ ) ve sabit hızda ( $U=0.3$  m/s), kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine etkisi gösterilmiştir. Kurutma havası sıcaklığının artması, hem ürün denge nem içeriğini azaltmakta hem de ürün içindeki nemin yüzeye hareketini hızlandırmaktadır. Bu durumda ise kurutma süresi oldukça kısalmaktadır. Kurutma havası sıcaklığı, kurutma işlemindeki en önemli parametredir. Artan kurutma havası sıcaklığıyla, hem ısı ve kütle taşınım katsayıları, hem de difüzyon katsayısı artarken, denge nem içeriği azalmaktadır. Bu parametreler ise doğrudan kurutma süresiyle alakalıdır. Kurutma havasının sabit hız ve bağıl neminde, sıcaklık 35°C den 65°C ye çıkartıldığında, toplam kurutma süresinin % 62.5 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu oranda azalma, zaman tasarrufu açısından son derece önemlidir.

Kurutma süresi ve kuru gıda kalitesini önemli ölçüde etkileyen kurutma havası bağıl nemi, yapılan çalışmaların çoğunda göz ardı edilmiştir. Karadeniz Bölgesi'nin yaz aylarında, atmosferik havanın bağıl nemi % 60 ile 90, sıcaklığı ise 25 ile 35°C aralığındadır. Bölgede, yaz aylarında bu kadar yüksek bağıl nem olmasına rağmen, güneş altında ve açıkta kurutma işlemi hala yaygın olarak yapılmaktadır.

Gıda kurutma işleminde, kurutma havası bağıl neminin %5 ile %20 değerleri arasında yapılan deneylerde, bağıl nemin kuruma süresine etkisinin olmadığı (Kashaninejad vd., 2007), bağıl nemin %20 ile %40 değerleri arasında ise kuruma süresini azda olsa etkilediği görülmüştür (Krokida vd., 2003).





Şekil 3.40. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine sıcaklığın etkisi

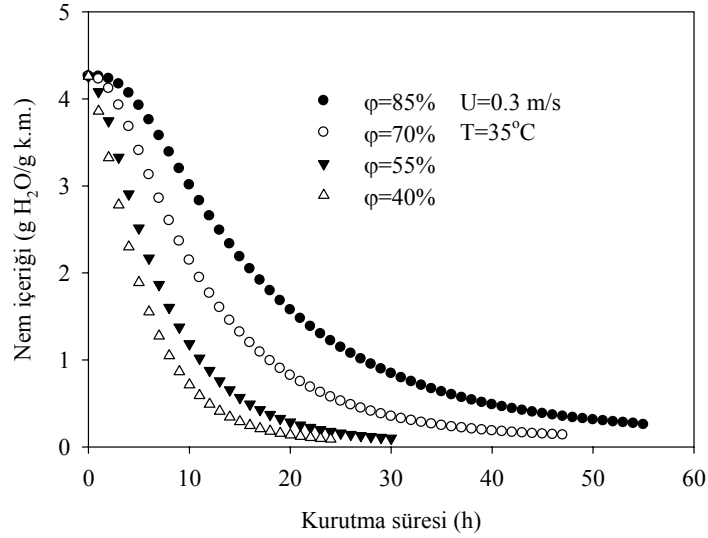
Kurutma havası bağıl neminin, kuşburnunun kuruma davranışı üzerindeki etkisi araştırılırken, bağıl nemin %4 ve %15 olmasının kuruma süresi üzerinde bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bağıl nemin %60 dan %45' e indirilmesi durumunda ise kuruma süresinin kısaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, bağıl nemin azaltılan her değerinde, denge nem içeriğinin de azaldığı tespit edilmiştir (Erentürk vd., 2004).

Bu çalışmalar ile kurutma havası bağıl neminin %45 ve altındaki değerlerinde, kurutma süresi üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı, %45 ve üzerindeki değerlerde ise etkinin arttığı tespit edilmiştir (Krokida vd., 2003; Erentürk vd., 2004; Kashaninejad vd., 2007). Bağıl nem etkisi çalışılırken, bu bilgiler ışığında çalışma aralığı seçilmiştir.

Şekil 3.41'de kurutma havası sıcaklığı 35°C ve kurutma havası hızı 0.3 m/s de sabit tutularak, bağıl nemin kivi'nin kuruma davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Kurutma havası bağıl neminin %85 den %40'a indirilmesiyle, toplam kuruma süresinin % 56.36 oranında azaldığı belirlenmiştir.

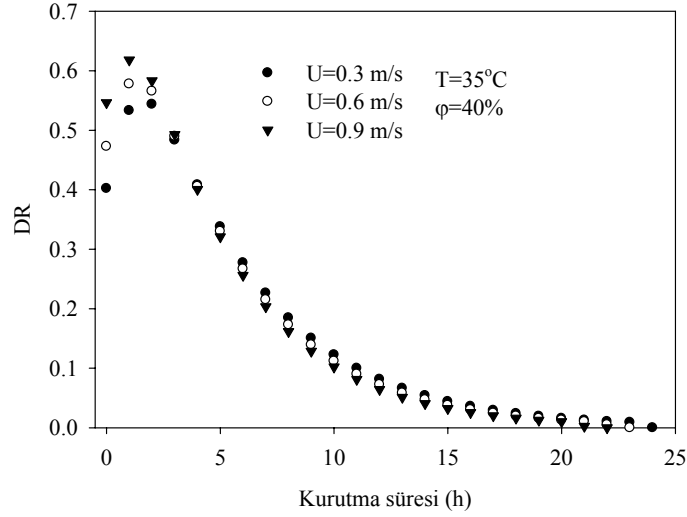
Isı transferi için potansiyel sıcaklık farkı iken, kütle transferinde konsantrasyon farkıdır. Yüksek bağıl nemli ortamlarda, ürün yüzeyi ile ortam arasındaki konsantrasyon farkının az olması, ürün ile ortam arasındaki kütle transferini önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Kütle transferinin yavaş olması, ürün yüzeyindeki su molekülünün ortama taşınmasını etkilemektedir. Ürün yüzeyindeki su molekülünün geç transfer olması, merkezdeki su molekülünün ürün yüzeyine difüzyonunu da yavaşlatmaktadır. Dolayısıyla,

bağıl nemin yüksek olması difüzyon katsayısını da etkilemektedir. Ayrıca, bağıl nemin yüksek olması, ürün denge nem içeriğini de artırmaktadır. Bütün bunlar nem transfer mekanizmasını yavaşlatmakta ve kurutma süresini uzatmaktadır.



Şekil 3.41. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine bağlı nemin etkisi

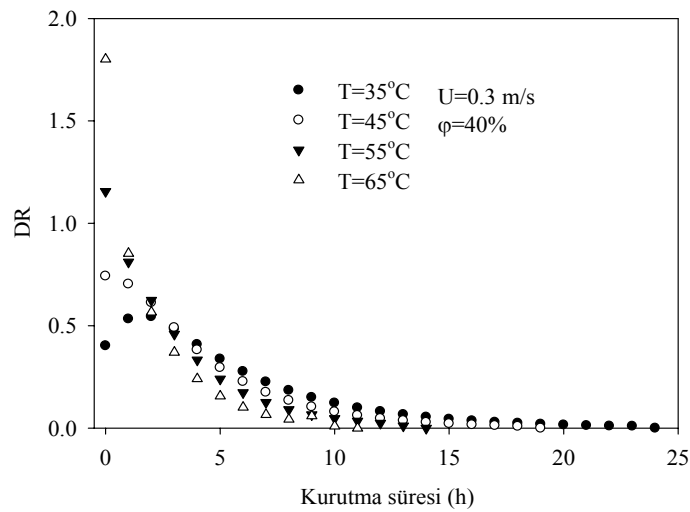
Birim zamanda üründen transfer edilen nem miktarı, o ürünün kuruma hızı (DR) olarak tanımlanır. Kivinin kuruma hızı, daha önce elde edilen kuruma eğrilerinden türetilmiştir. Şekil 3.42'de, kurutma havası hızının, ürünün kuruma hızına olan etkisi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, birçok gıda ürününde olduğu gibi kivinin kuruma sürecinde de, sabit hızda kuruma periyoduna rastlanılmamıştır. Kurutma, tamamen azalan kuruma hızı periyodunda gerçekleşmiştir. Azalan kuruma periyodunda ise kütle transferi tamamen sıvı difüzyonuyla gerçekleşmektedir (Özdemir ve Devres, 1999; Panchariya vd., 2002; Doymaz, 2004b; Chemkhi ve Zagrouba, 2005; Simal vd., 2004; Kaya vd., 2007b). Kurutma süresinin ilerlemesiyle, ürün nem içeriği azaldığından, üründen transfer olan nem miktarı da azalmaktadır. Ürün denge nem içeriğine erişince, artık üründen nem transferi olmayacağı için kuruma hızı sıfır olmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, kurutma havası hızı arttıkça, kuruma hızı artmaktadır.



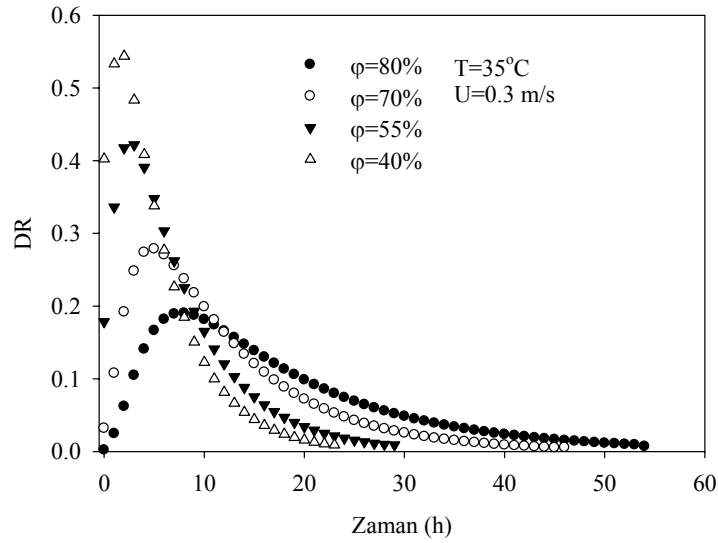
Şekil 3.42. Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine hızın etkisi

Kurutma havası sıcaklığının, kuruma hızına etkisi Şekil 3.43'te gösterilmiştir. Kurutma havası sıcaklığının artması, kuruma hızını artırmakta ve kurutma süresini azaltmaktadır.

Yüksek bağıl nemli ortamda, ortam ile ürün arasındaki konsantrasyon farkının az ve denge nem içeriğinin yüksek olması sebebiyle, kuruma hızı oldukça yavaştır. Şekil 3.44'de kurutma havası bağıl neminin kuruma hızına etkisi gösterilmiştir. Bağıl nemin artması kütle taşınım katsayısını azaltıp denge nem içeriğini artırdığı için kuruma hızı azalmakta ve kurutma süresi artmaktadır.



Şekil 3.43. Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine sıcaklığın etkisi

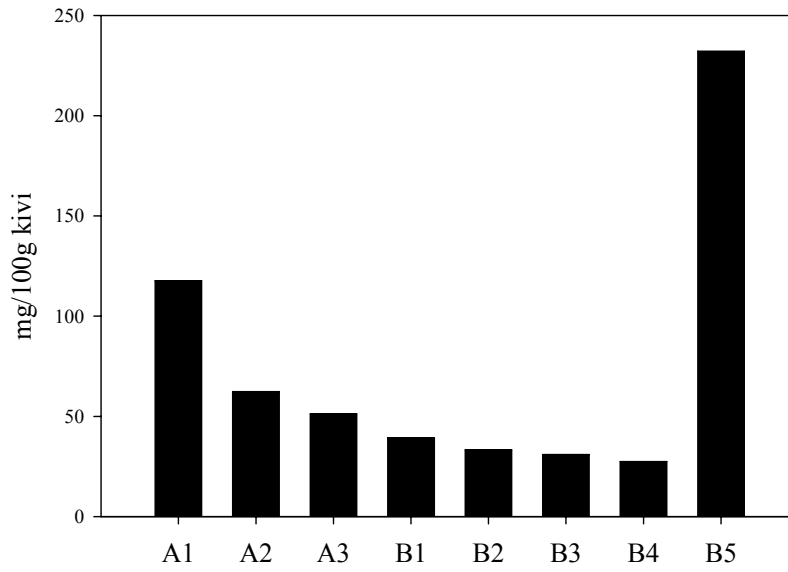


Şekil 3. 44. Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine bağlı nemin etkisi

Farklı kurutma havası koşullarının, kivi'nin C vitaminine etkisi araştırılmıştır. C vitamininin, kurutma havası sıcaklığı ve ürünün nem içeriğine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Benzer sonuçlara literatürde de rastlanmıştır (Erentürk vd., 2005; Qing-guo vd., 2006; Erentürk vd., 2006; Goula ve Adamopoulos, 2006; Al-Zubaidy ve Khalil, 2007). Kurutma havası sıcaklığının artması ve nem içeriğinin azalmasıyla, ürün C vitamini değerinde azalma olduğu, en az C vitamin kaybının ürün nem içeriğinin en yüksek değerinde olduğu (%85 bağıl nem, 35°C sıcaklık) belirlenmiştir. Yaş halde, 100 g kivi'de 232.18 mg C vitamini olduğu tespit edilmiş, her bir kurutma koşulu sonrasında, üründe kalan C vitamin değeri tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Sabit bağıl nemde, sıcaklığın artmasıyla C vitamininin azaldığı; sabit sıcaklıkta, bağıl nemin artmasıyla C vitamininin arttığı tespit edilmiştir. Şekil 3.45'de, kurutma havası şartlarıyla C vitamini değişimi daha açık bir şekilde gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kurutma koşullarına göre ürünün C vitamini değişimi

Parametre	T (°C)	$\phi$ (%)	Ürün Bünyesinde tutulan C Vitamini (mg/100g kivi)
A1	35	85	117.65
A2	35	70	62.31
A3	35	55	51.26
AB	35	40	39.25
B2	45	40	33.29
B3	55	40	30.98
B4	65	40	27.47
B5	yaş		232.18



Şekil 3.45. Kurutma havası koşullarının kiviinin C vitaminine etkisi

### 3.2.1.2. Test Bölgesi Yatay Konumda Tutulan Kurutucu

Test bölgesi yatay konumda tutulan konvektif kurutucuda, dikdörtgen şekilli kiviinin kuruma davranışı deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, dikdörtgenler prizması şeklinde kesilen kiviinin (25 mm x 25 mm x 45 mm) kuruma davranışı, beş farklı sıcaklık (25, 30, 40, 50 ve 60°C), dört farklı bağıl nem (%25, 40, 55 ve 70) ve üç farklı hızda (0.3, 0.6 ve 0.9 m/s) araştırılmıştır.

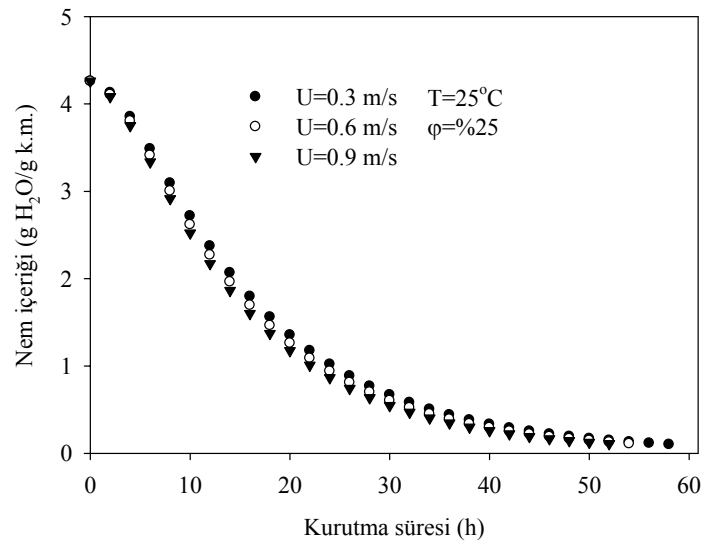
Sistem hazır hale geldikten sonra 500 gr ağırlığındaki dikdörtgen şekilli ürünler, yük hücrelerine asılan kurutma tepsilerine yerleştirilmiştir. Veri okuma ve kaydetme sistemiyle her 10 dakikada bir alınan ölçümler 120 dakikalık zaman dilimlerinde bilgisayara doğrudan aktarılmıştır. Ürün merkezindeki sıcaklık ise her 2.5 dakika aralıkla

termoelemanla ölçülerek kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçların doğruluğundan emin olmak için deneyler üç kez tekrarlanmıştır. Kurutma işlemi, ürünün denge nem içeriğine erişmesiyle sonlandırılmıştır. Kivinin denge nem içeriği daha önceki çalışmada tespit edilmiş ve Şekil 3.38’de gösterilmiştir.

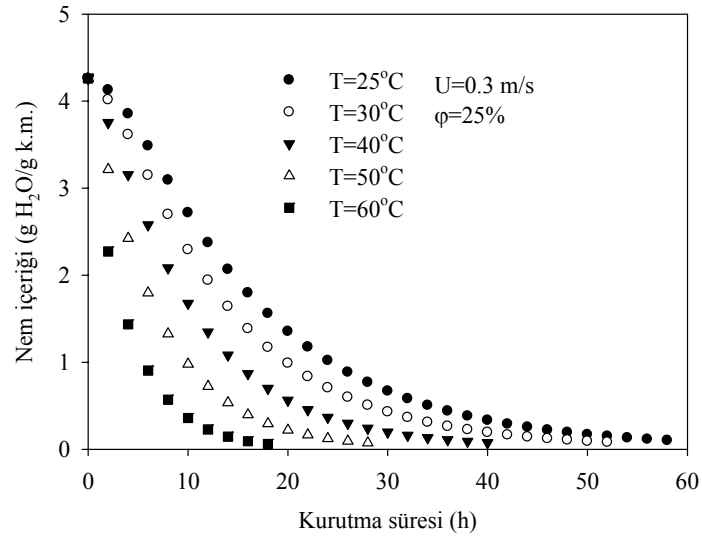
İlk olarak, sabit kurutma havası sıcaklığı ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) ve sabit bağıl nemde ( $\varphi=\%25$ ), kurutma havası hızının kurutma süresine etkisi araştırılmıştır. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi davranış olarak, test bölgesi düşey konumda tutulan kurutucudaki gibidir. Ancak kivi dilim boyutları farklı olduğundan, kurutma süreleri birbirinden farklıdır. Ürün karakteristik boyutunun kurutma süresine etki eden bir başka parametre olduğu bilinmektedir. Ürün boyutunun artmasıyla, kurutma süresinin arttığı birçok araştırmacı tarafından deneysel olarak ortaya konulmuştur (Maskan vd., 2002 b; Mwithiga ve Olwal, 2005; Göğüş ve Maskan, 2006; Sacilik ve Elicin, 2006; Lopes vd., 2007).

Kurutma havası hızının kurutma süresine olan etkisi Şekil 3.46’da gösterilmiştir. Gıda ürünlerin kurutulmasında kurutma havası hızının, sıcaklık ve bağıl nem kadar etkin olmadığı görülmüştür.

Kurutma işleminde en önemli dış etkenlerden biri de sıcaklıktır. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine etkisi Şekil 3.47’de gösterilmiştir. Artan kurutma havası sıcaklığıyla kurutma süresinin azaldığı tespit edilmiştir.

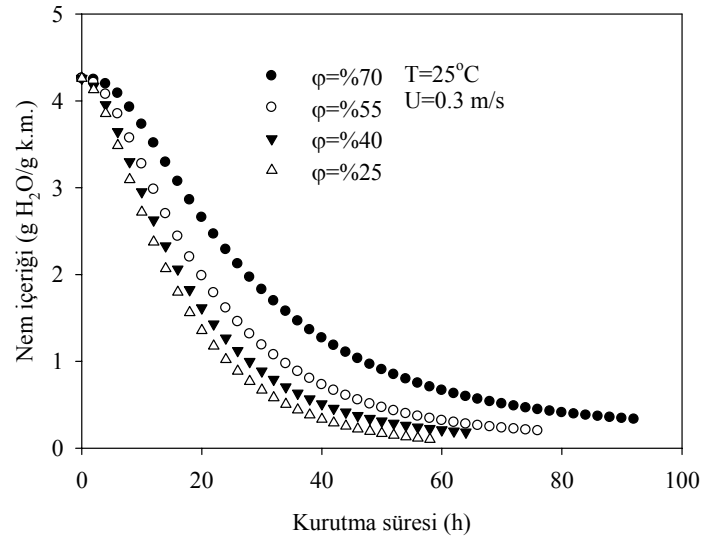


Şekil 3.46. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine hızın etkisi



Şekil 3.47. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine sıcaklığın etkisi

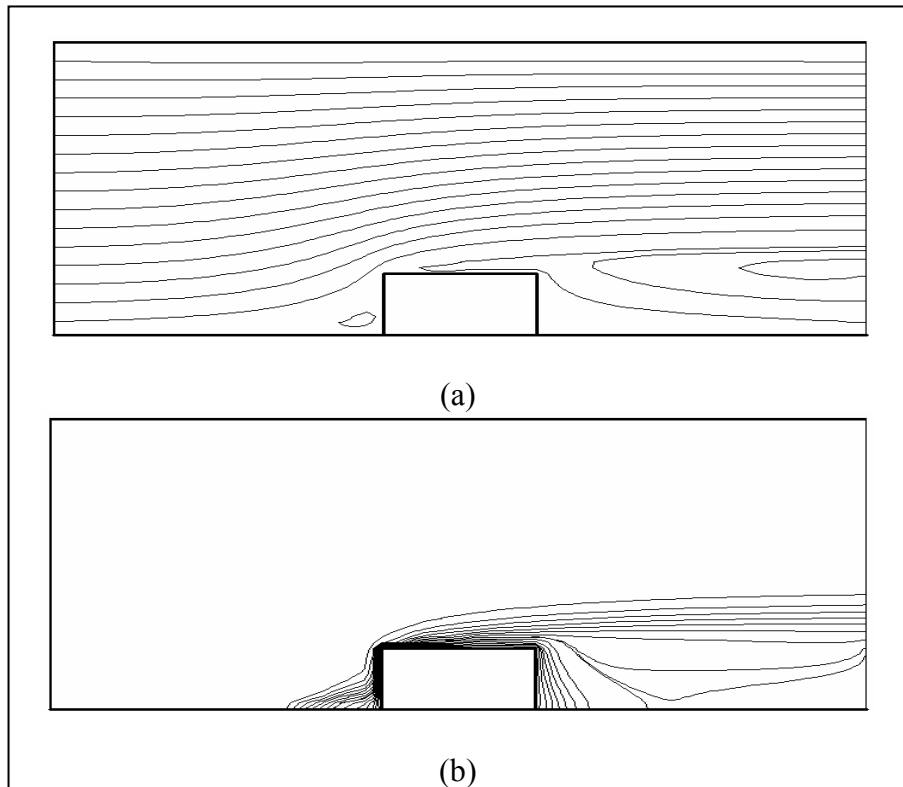
Sabit kurutma havası hızında ( $U=0.3$  m/s) ve sabit sıcaklıkta ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ), kurutma havası bağıl neminin, kurutma süresine etkisi Şekil 3.48’de gösterilmiştir. Kurutma havası bağıl neminin azalmasıyla hem kurutma süresi hem de ürün denge nem içeriğinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 3.48. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine bağıl nemin etkisi

Teorik çalışma kapsamında ise ürün etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımı tespit edilirken, üç farklı kurutma havası hızı (0.3, 0.6 ve 0.9 m/s) ve sabit sıcaklık (50°C) kullanılmıştır. Elde edilen hız ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.49a ve b'de gösterilmiştir. Ürün etrafında hız dağılımı elde edilmiş ve ürün arkasında ise girdapların oluştuğu görülmüştür. Aynı şekilde ürün etrafında sıcaklık dağılımı elde edilmiş ve bu dağılımının eşdağılı olmadığı belirlenmiştir.

Ürün etrafında sıcaklık dağılımı belirlendikten sonra, yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları (2.29) ve (2.30) numaralı bağıntılar kullanılarak elde edilmiştir. Kurutma havası sıcaklığı 50°C, kurutma havası hızı 0.3, 0.6 ve 0.9 m/s ve kuru hava için yüzey boyunca değişimi elde edilen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları Şekil 3.50'de verilmiştir. Hızın artmasıyla, yüzey boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının arttığı tespit edilmiştir. Ürünün ön yüzeyinde, yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları hızla artmış, arka yüzeyinde ise hızla azalmıştır. Ürünün üst yüzeyi düz levha gibi düşünüldüğünde, literatürden bilinen davranışa Şekil 3.50'de de rastlanılmıştır. Sınır tabaka kalınlığıyla ısı ve kütle taşınım katsayılarının azaldığı belirlenmiştir. Ürünün alt yüzeyi yalıtımlı olduğundan, ısı ve kütle taşınım katsayıları bu yüzeyde sıfırdır.



Şekil 3.49. Dikdörtgen şekilli ürün etrafında hız (a) ve sıcaklık (b) dağılımı

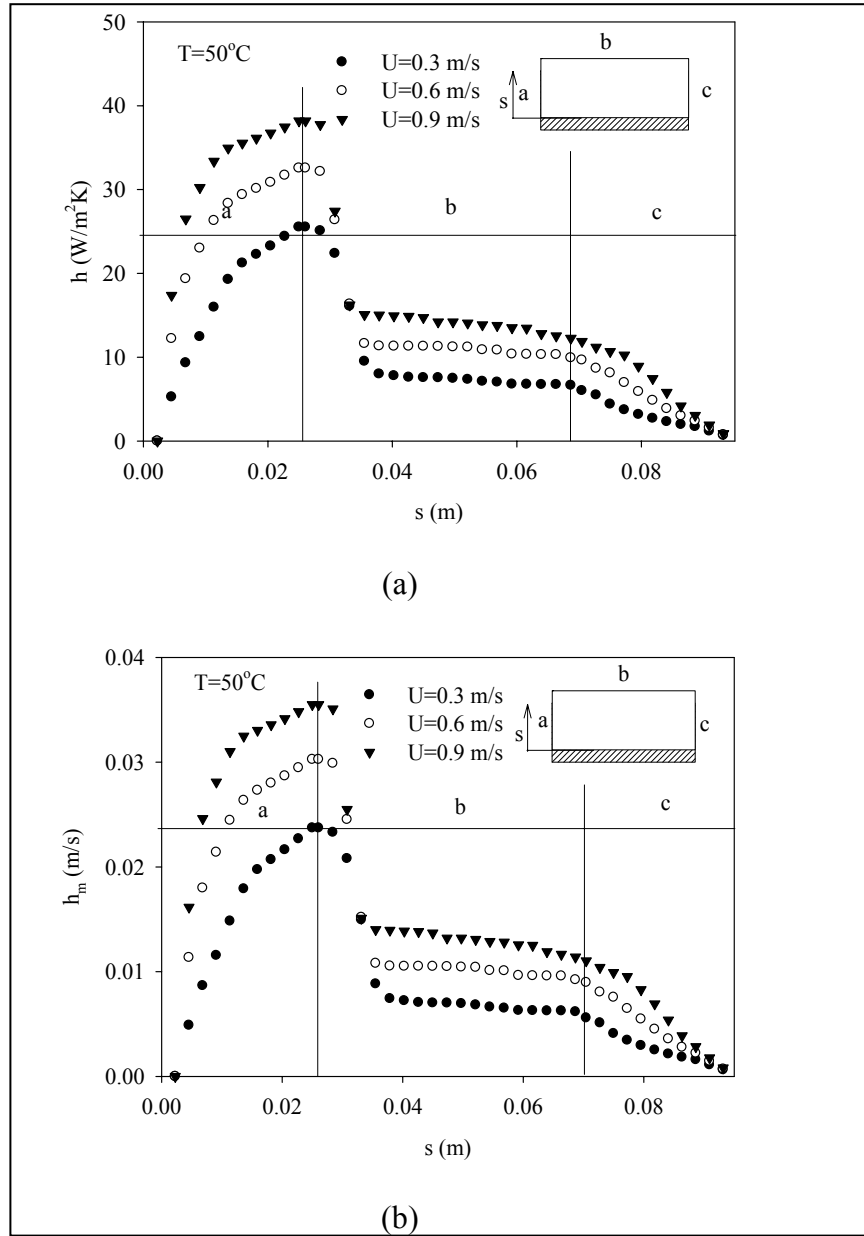


Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları elde edildikten sonra, kurutulan üründeki ısı ve kütle transferi incelenmiştir. Ürün yüzeyi boyunca değişimi belirlenen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları yüzeyde konvektif sınır koşulu olarak kullanılmış ve üründe sıcaklık ve nem dağılımı belirlenmiştir.

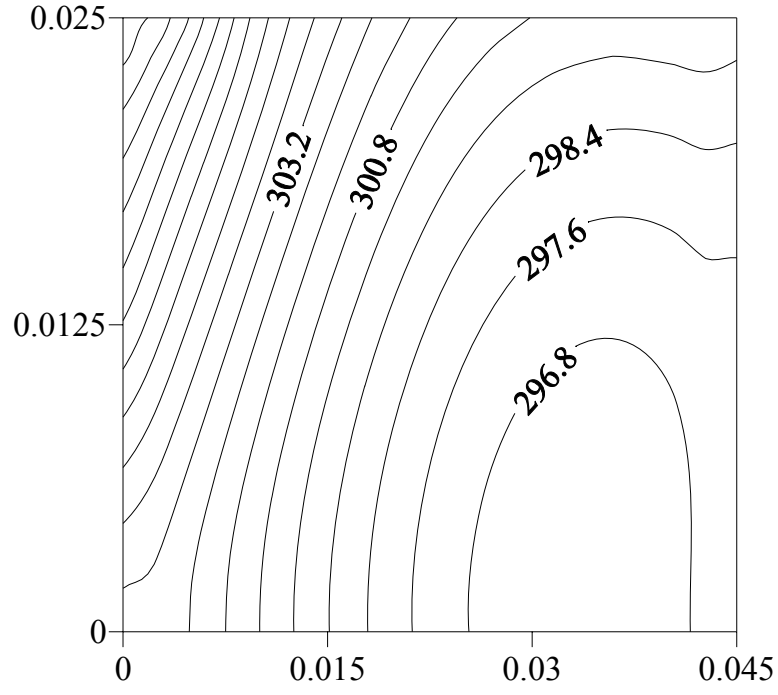
Teorik çözüm sonucunda elde edilen sıcaklık ve nem dağılımları Şekil 3.51 ve Şekil 3.52'de gösterilmiştir. Beklendiği gibi, ısı ve kütle taşınım katsayılarının yüksek olduğu yüzeylerde daha hızlı kuruma (ön ve üst), daha düşük olduğu yüzeyde ise (arka) daha geç kuruma gerçekleşmiştir.

Elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak, bu tür problemlerde hem Fluent paket programının hem de ürüne ait termofiziksel özelliklerin belirlendiği ampirik bağıntıların ((2.34), (2.35) ve (2.36) numaralı bağıntılar) doğruluğu gösterilmiştir. Ürün merkezine yerleştirilen termoelemanla her 2.5 dakikada alınan sıcaklık ölçümleriyle teorik sonuçlar karşılaştırılmış ve Şekil 3.53'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, artan kuruma süresiyle merkez sıcaklığı hızla yükselmekte ve kurutma havası sıcaklığına yaklaşmaktadır.

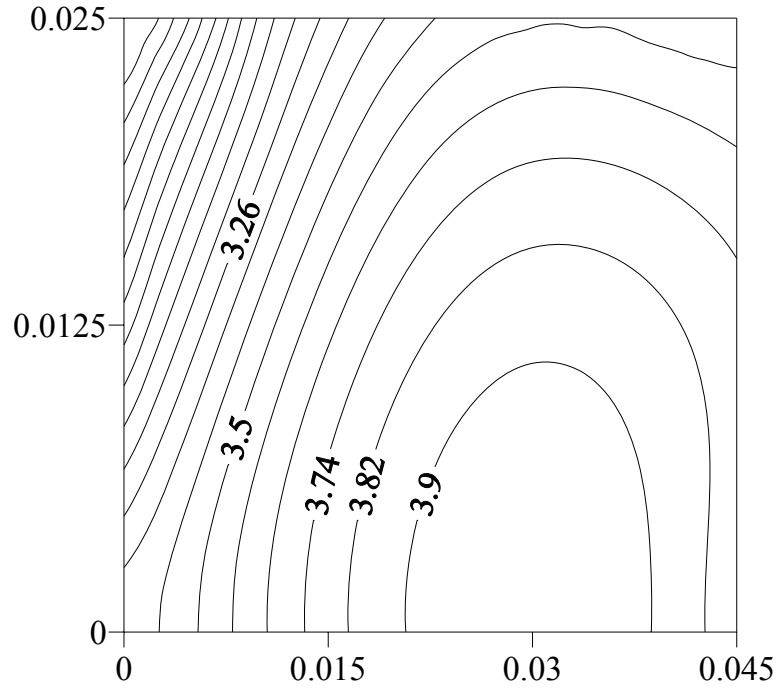
Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi deneysel ve teorik olarak elde edilmiş ve Şekil 3.54'de gösterilmiştir. Deneysel çalışma; kurutma havası sıcaklığı 50°C, kurutma havası hızı 0.3 m/s ve kurutma havası bağıl nemi %25 olan ortamda gerçekleştirilmişken, teorik çözümün kuru hava koşullarında gerçekleştirildiği göz önüne alındığında, elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.



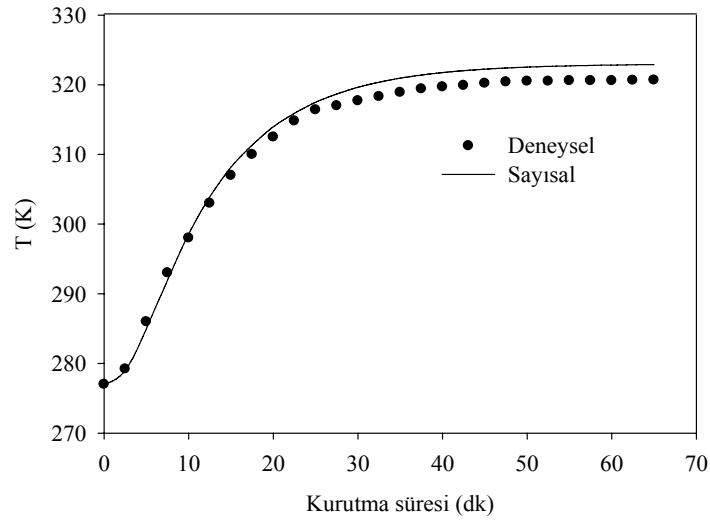
Şekil 3.50. Ürün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı (a) ve kütle taşınım (b) katsayıları



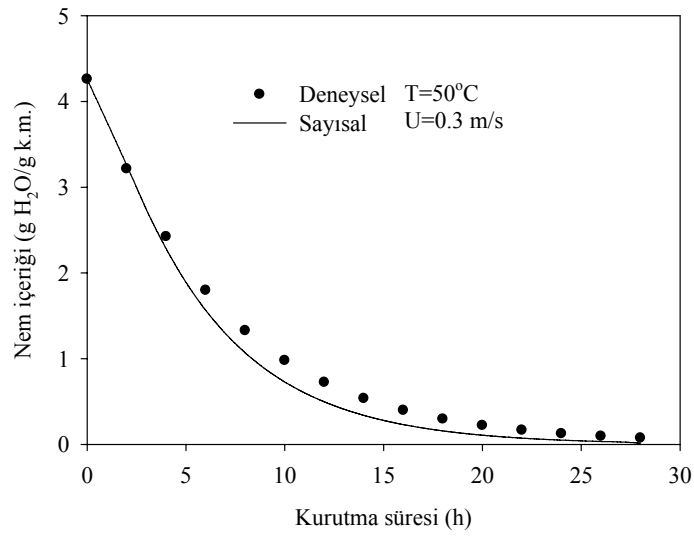
Şekil 3. 51. Kurutmanın 10'uncu dakikasında üründeki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.52. Kurutmanın 30'uncu dakikasındaki nem dağılımı



Şekil 3. 53. Teorik ve deneysel olarak elde edilen ürün merkez sıcaklığının kurutma süresiyle değişiminin karşılaştırılması



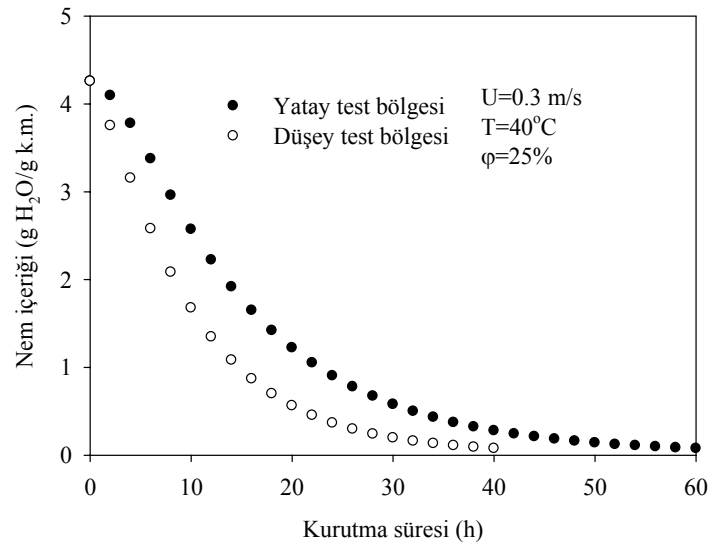
Şekil 3. 54. Teorik ve deneysel olarak elde edilen ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin karşılaştırılması

### 3.2.1.3. Kurutucuların Karşılaştırılması

Kurutma çalışmalarında, kurutulan ürünün homojen kuruması, kuru ürün kalitesini artıran en önemli özelliklerden biridir. Bunun yanında, kurutulan bir ürünün, kısa sürede kuruması zaman ve enerji tasarrufu açısından son derece önemlidir. Dikdörtgen şeklinde kesilen kivinin (25 x 45mm) kuruma davranışı farklı kurutucu tiplerinde araştırılmıştır. Her

iki deney düzeneğinde de kurutma havası hızı 0.3 m/s, kurutma havası sıcaklığı 40°C ve kurutma havası bağıl nemi %25 olarak alınmıştır.

Şekil 3.55’de, iki farklı kurutucuda kurutulan dikdörtgen şekilli kivinin kuruma eğrisi gösterilmiştir. Test bölgesi düşey konumda tutulan kurutucuda, kurutma havası ürünün bütün yüzeylerine temas ederken, test bölgesi yatay konumda tutulan kurutucuda, ürünün alt yüzeyine temas etmemiştir. Bu durumda beklendiği ve teorik çalışmalarda da belirlendiği gibi, test bölgesinin düşey konumda olduğu durumda daha kısa sürede ve daha homojen kuruma elde edilmiştir.



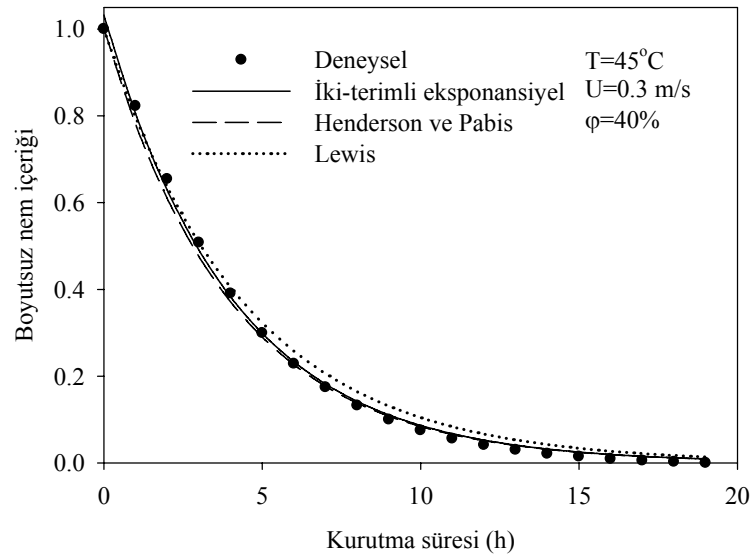
Şekil 3.55. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine test bölgesinin etkisi

#### 3.2.1.4. Kurutma Katsayılarının Belirlenmesi

Farklı kurutma havası şartları için, Bölüm 2.2.8’de verilen ince tabakalı kurutma modellerindeki kurutma katsayıları regresyon analiziyle belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Kurutma havası sıcaklığının ve hızının artmasıyla ve kurutma havası bağıl neminin azalmasıyla kurutma sabitlerinin azaldığı (a,b) ve kurutma katsayılarının arttığı (k,k<sub>0</sub>,k<sub>1</sub>) tespit edilmiştir. Bu kurutma katsayıları, difüzyon ve kütle transferi katsayılarının fonksiyonu olduğundan, dış etkenlere bağlı olarak değişmiştir. Aynı tür davranışa literatürde yapılan birçok çalışmada rastlanmıştır (Lopez vd., 2000; Varadharaju vd., 2001; Doymaz, 2004; Prakash vd., 2004; Mwithiga, G., Olwal, 2005; Hayaloglu vd.,

2005; Menges ve Ertekin, 2006; Kaleemullah ve Kailappan, 2006; Toğrul, 2006; Lopes vd., 2007). Katsayıların doğruluğunu belirlemede en önemli parametre olan regresyon katsayısı  $r^2$ , bütün modellerde 0.96' nın üstünde olduğu tespit edilmiştir. Regresyon katsayısının 0.90'dan büyük olması, elde edilen katsayıların kullanılabilirliğini göstermektedir (Madamba vd., 1996; Erenturk vd., 2004).

Deneysel verilerden elde edilen kurutma katsayıları, verilen kurutma modellerine yerleştirilmiş ve deneysel sonuçlara en yakın sonucu iki-terimli eksponansiyel modelin verdiği tespit edilmiştir (Şekil 3.56).



Şekil 3.56. Deneysel ve yarı-teorik modellerin kullanımıyla elde edilen boyutsuz nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimlerinin karşılaştırılması

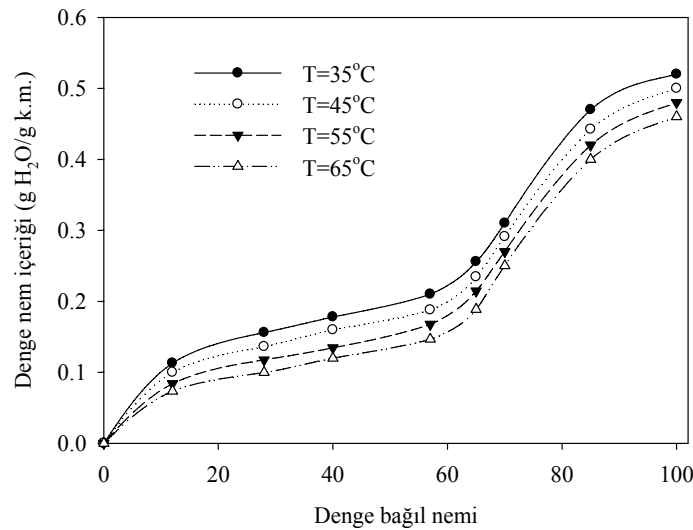
Tablo 3.2. Belirlenen model katsayıları

Kurutma havası koşulları	İki-terimli eksponansiyel				Kor. kat. r <sup>2</sup>	Henderson ve Pabis				Kor. kat. r <sup>2</sup>	Lewis				Kor. kat. r <sup>2</sup>
	Parametre	U, m/s				Parametre	U, m/s				Parametre	U, m/s			
		0.3	0.6	0.9			0.3	0.6	0.9			0.3	0.6	0.9	
T=35°C φ=40%	a	0.5564	0.5493	0.5434	0.9957	a	1.0667	1.0583	1.0505	0.9953	k	0.1764	0.1901	0.2042	0.9935
	k <sub>0</sub>	0.1873	0.2004	0.2139		k	0.1873	0.2004	0.2139						
	b	0.5103	0.5090	0.5071											
	k <sub>1</sub>	0.1873	0.2004	0.2139											
T=45°C φ=40%	a	0.5278	0.5226	0.5179	0.9987	a	1.0024	1.0261	1.0202	0.9983	k	0.2310	0.2466	0.2527	0.9983
	k <sub>0</sub>	0.2483	0.2629	0.2779		k	0.2483	0.2629	0.2779						
	b	0.5046	0.5035	0.5023											
	k <sub>1</sub>	0.2483	0.2629	0.2779											
T=55°C φ=40%	a	0.5059	0.5014	0.4960	0.9997	a	1.0072	1.0032	0.9981	0.9991	k	0.3278	0.3461	0.3747	0.9995
	k <sub>0</sub>	0.3301	0.3472	0.3740		k	0.3301	0.3472	0.3740						
	b	0.5013	0.5008	0.4872											
	k <sub>1</sub>	0.3301	0.3472	0.3740											
T=65°C φ=40%	a	0.4856	0.4821	0.4795	0.9977	a	0.9887	0.9871	0.9867	0.9970	k	0.5052	0.5452	0.5907	0.9972
	k <sub>0</sub>	0.4136	0.4232	0.4358		k	0.4998	0.5385	0.5833						
	b	0.4823	0.4801	0.4745											
	k <sub>1</sub>	0.4136	0.4232	0.4358											
φ=55% T=35°C	a	0.5847	0.5811	0.5774	0.9913	a	1.1020	1.0973	1.0925	0.9906	k	0.1290	0.1352	0.1414	0.9841
	k <sub>0</sub>	0.1411	0.1473	0.1535		k	0.1411	0.1473	0.1535						
	b	0.5173	0.5161	0.5151											
	k <sub>1</sub>	0.1411	0.1473	0.1535											
φ=70% T=35°C	a	0.6190	0.6147	0.6109	0.9880	a	1.1442	1.1390	1.1340	0.9874	k	0.0799	0.0854	0.0909	0.9740
	k <sub>0</sub>	0.0905	0.0962	0.1021		k	0.0905	0.0962	0.1021						
	b	0.5252	0.5243	0.5232											
	k <sub>1</sub>	0.0905	0.0962	0.1021											
φ=85% T=35°C	a	0.6210	0.6174	0.6147	0.9863	a	1.1475	1.1429	1.1394	0.9854	k	0.0581	0.0610	0.0641	0.9698
	k <sub>0</sub>	0.0661	0.0691	0.0724		k	0.0661	0.0691	0.0724						
	b	0.5265	0.5255	0.5247											
	k <sub>1</sub>	0.0661	0.0691	0.0724											

### 3.2.2. Karayemiş Kurutma

Karadeniz bölgesinde yaygın olarak yetişen karayemişin kuruma davranışı, üç farklı kurutma havası hızı (0.3, 0.6 ve 0.9 m/s), dört farklı kurutma havası sıcaklığı (35, 45, 55 ve 65°C) ve dört farklı kurutma havası bağıl neminde (%40, 55, 70 ve 85) araştırılmıştır. Nem tayin cihazıyla ilk nem içeriği %77.78 y.m. (3.5 g H<sub>2</sub>O/g k.m.) olarak belirlenen karayemiş, kurutucunun istenilen sıcaklık ve bağıl nem değerlerine erişmesiyle, kurutma tepsilerine yerleştirilmiştir. Veri okuma ve kaydetme sistemiyle her 10 dakikada bir alınan ölçümler 120 dakikalık zaman dilimlerinde bilgisayara doğrudan aktarılmıştır. Deneyler, test bölgesi düşey konumda tutulan konvektif kurutucuda yapılmıştır.

İlk olarak, kuru karayemişin denge nem içeriği dört farklı sıcaklıkta (35, 45, 55 ve 65°C) araştırılmıştır. Sabit denge bağıl neminde, artan kurutma havası sıcaklığıyla denge nem içeriğinin azaldığı, sabit sıcaklıkta ise artan denge bağıl nemiyle, denge nem içeriğinin arttığı belirlenmiştir (Şekil 3.57).

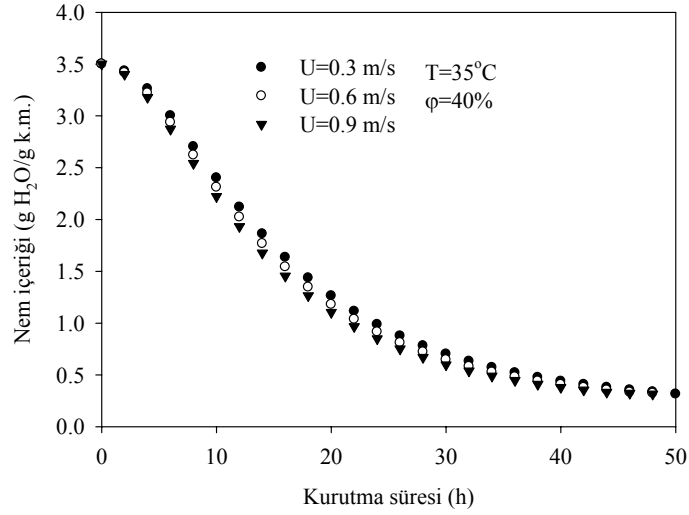


Şekil 3.57. Denge nem içeriğinin denge bağıl nemiyle değişimine sıcaklığın etkisi

Konvektif kurutucuda, sabit kurutma havası sıcaklığı (T=35°C) ve sabit kurutma havası bağıl neminde ( $\phi=40\%$ ), kurutma havası hızının, karayemişin kuruma davranışı üzerine olan etkisi Şekil 3.58'de gösterilmiştir. Karayemişin kurumasında da, kurutma havası hızının artırılmasının, kuruma süresine çok az etkisi olduğu belirlenmiştir. Kabuklu

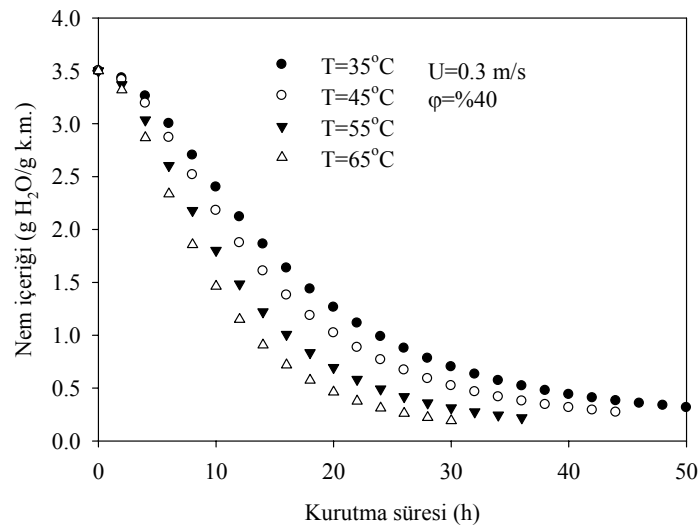


ve zarlı gıda ürünleri kurutulurken, kabuk ve zarın nemin difüzyonuna bir engel teşkil ettiği, bu etkinin kurutma süresini uzattığı belirlenmiştir (Lopez vd., 1998; Prachayawarakorn vd., 2006). Ürün yüzeyinin zarla kaplı olmasının kurutma süresine etkisi olduğu düşünülmüştür.



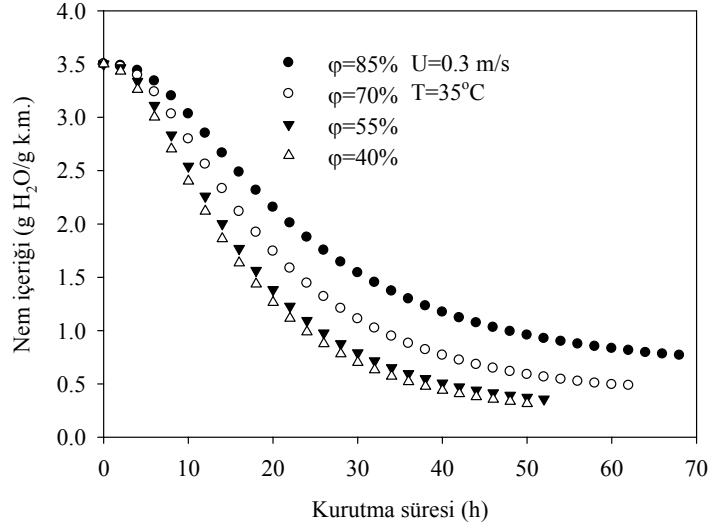
Şekil 3.58. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine hızın etkisi

Kurutma havasının sabit hız ( $U=0.3$  m/s) ve sabit bağıl neminde ( $\phi=40\%$ ), kurutma havası sıcaklığının kuruma süresine etkisi Şekil 3.59'da gösterilmiştir. Kurutma havası sıcaklığının artmasıyla kurutma süresinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.59. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine sıcaklığın etkisi

Kurutma havası bağıl neminin kuruma süresine etkisi Şekil 3.60'da gösterilmiştir. Kurutma havası bağıl neminin azalmasıyla, kurutma süresinin kısaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.60. Ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimine bağlı nemin etkisi

Karayemişin kuruma davranışının teorik olarak belirlenebilmesi için, denge nem içeriği  $M_e$ , difüzyon katsayısı  $D_{eff}$  ve kütle taşınım katsayısı  $h_m$ 'in bilinmesi gerekir. Ürün denge nem içeriği, Şekil 3.57 ile verilen sorpsiyon eğrisinden kolaylıkla elde edilebilir. Difüzyon katsayısı  $D_{eff}$  ise; literatürde küresel ürünler için önerilen (2.43) numaralı denklemin kullanımıyla belirlenmiştir. Literatürde birçok gıda ürününün difüzyon katsayısını belirlemede (2.41), (2.42) ve (2.43) numaralı denklemler kullanılmış ve difüzyon katsayısının  $10^{-11}$  ile  $10^{-9}$   $m^2/s$  aralığında değiştiği belirlenmiştir (Mujumdar, 1987; Madamba vd., 1996; Kaleemullah ve Kailappan, 2006; Kingsly vd., 2007; Wang vd., 2007).

Karayemişin kurutulmasıyla elde edilen kuruma eğrilerinden faydalanarak difüzyon katsayısı belirlenmiş ve kurutma havası şartlarına göre değişimi Tablo 3.3'de gösterilmiştir. Difüzyon katsayısının, artan kurutma havası sıcaklığıyla ve hızıyla arttığı, artan kurutma havası bağıl nemiyle azaldığı tespit edilmiştir. Kurutma havası koşullarına göre difüzyon katsayısını değişimini veren birçok çalışma mevcuttur (Chemkhi ve Zagrouba, 2005; Karim ve Hawlader, 2005; Babalis ve Belessiotis, 2004; Johnson vd., 1998; Vegenas ve Marinos-Kouris, 1991; Hawlader vd., 1991). Elde edilen sonuçların literatürde belirtilen aralıkta olduğu görülmüştür.

Tablo 3.3. Difüzyon katsayısının kurutma havası koşullarına göre değişimi

		$D_{eff} \times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$				
		T(°C)	U=0.3 m/s	U=0.6 m/s	U=0.9 m/s	$r^2$
$\phi=40\%$		35	1.896	2.101	2.327	0.991
		45	2.192	2.373	2.581	0.993
		55	2.634	2.910	3.217	0.992
		65	3.186	3.437	3.728	0.996
		$\phi$ (%)	U=0.3 m/s	U=0.6 m/s	U=0.9 m/s	$r^2$
T=35°C		40	1.896	2.101	2.327	0.991
		55	1.785	1.984	2.221	0.994
		70	1.572	1.773	2.005	0.996
		85	1.287	1.490	1.716	0.998

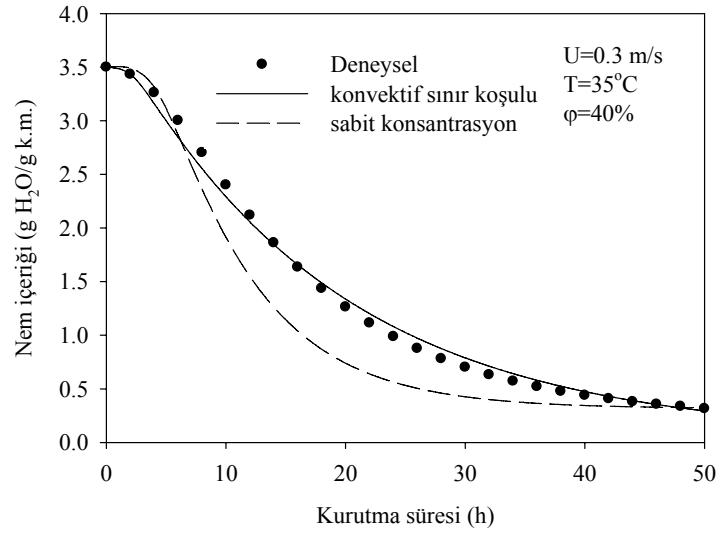
Ortam ile ürün yüzeyi arasındaki kütle taşınım katsayısı  $h_m$ , toplam kütle yaklaşımının ((2.45) numaralı denklem) kullanımıyla belirlenmiştir. Kurutma havası koşullarına göre değişim gösteren kütle taşınım katsayısı Tablo 3.4'te gösterilmiştir. Kütle taşınım katsayısının, artan kurutma havası hızı ve sıcaklığıyla arttığı, artan kurutma havası bağıl nemiyle azaldığı tespit edilmiştir.

Bazı araştırmacılar, farklı gıda ürünlerinin kütle taşınım katsayısını, hem toplam kütle yaklaşımı ile hem de ilgili ampirik bağıntılarla belirlemişlerdir. Literatürde, havuç diliminin kütle taşınım katsayısı  $1.371 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  (Markowski, 1997); farklı sıcaklık koşullarında pişirilen kekin kütle taşınım katsayısı  $4.05\text{-}7.10 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  aralığında (Demirkol vd., 2006); patatesin kütle taşınım katsayısı  $2.99 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  (McMinn vd., 2003); kereviz kökünün kütle taşınım katsayısı  $1.2 \times 10^{-4}$  ile  $7.9 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  aralığında (Bialobrzewski, 2007b); muzun kütle taşınım katsayısı  $6.96 \times 10^{-7}$  -  $9.19 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  aralığında (Queiroz ve Nebra, 2001); kavun diliminin kütle taşınım katsayısı  $1.226 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  olarak belirlenmiştir (Dincer ve Hussain, 2004).

Denge nem içeriği,  $M_e$ , difüzyon katsayısı,  $D_{eff}$  ve kütle taşınım katsayısı,  $h_m$ , belirlendikten sonra, iki boyutlu kütle transferi denklemi ((2.17) numaralı denklem) sabit konsantrasyon ve konvektif sınır koşulları altında çözülmüştür. Yüzeyde konvektif sınır koşulunun uygulanmasıyla elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.64). Benzer sonuçlara, Markowski (1997) ve Demirkol vd.'nin (2006) çalışmalarında da rastlanmıştır.

Tablo 3.4. Kütle taşınım katsayısının kurutma havası koşullarına göre değişimi

		$h_m \times 10^8$ m/s				
		T(°C)	U=0.3 m/s	U=0.6 m/s	U=0.9 m/s	$r^2$
$\phi = 40\%$	35	1.628	1.724	1.822	0.998	
	45	1.861	1.938	2.013	0.995	
	55	2.292	2.406	2.522	0.996	
	65	2.757	2.908	3.020	0.994	
		$\phi$ (%)	U=0.3 m/s	U=0.6 m/s	U=0.9 m/s	$r^2$
T=35°C	40	1.628	1.724	1.822	0.998	
	55	1.529	1.637	1.746	0.995	
	70	1.296	1.368	1.446	0.994	
	85	1.098	1.171	1.244	0.996	



Şekil 3.61. Deneysel olarak elde edilen ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişiminin teorik sonuçlarla karşılaştırılması

Her ürünün kuruma davranışının farklı olacağı bir gerçektir. Bu yüzden, kivi'nin kuruma davranışı ile karayemişin kuruma davranışı aynı yolu izlememiştir. Karayemişin ortam sıcaklığıyla dengeye gelmesi daha uzun sürmüştür. Ürün sıcaklığı ortam sıcaklığıyla dengeye gelince (kurutmanın ilk iki saatinde) kurutma işleminin hızlandığı Şekil 3.61'den görülmektedir.

### 3.2.3. Belirsizlik Analizinden Elde Edilen Bulgular

Deneylerin yapılışı esnasında, deney araçlarının hassasiyetinden ve ölçüm hatalarından kaynaklanabilecek hatalar (2.51) ve (2.52) numaralı denklemler kullanılarak

hesap edilmiştir. Ölçüm cihazlarının hassasiyetinin çok küçük olması ve ölçülen büyüklüklerin fazla olmaması sebebiyle, elde edilen belirsizlik değerleri de küçük çıkmıştır. Tablo 3.5’te, difüzyon ve kütle taşınım katsayılarının hesaplanması sonucu ortaya çıkan belirsizlik değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi hesaplanan değerlerin %1–2 arasında değişebilmektedir.

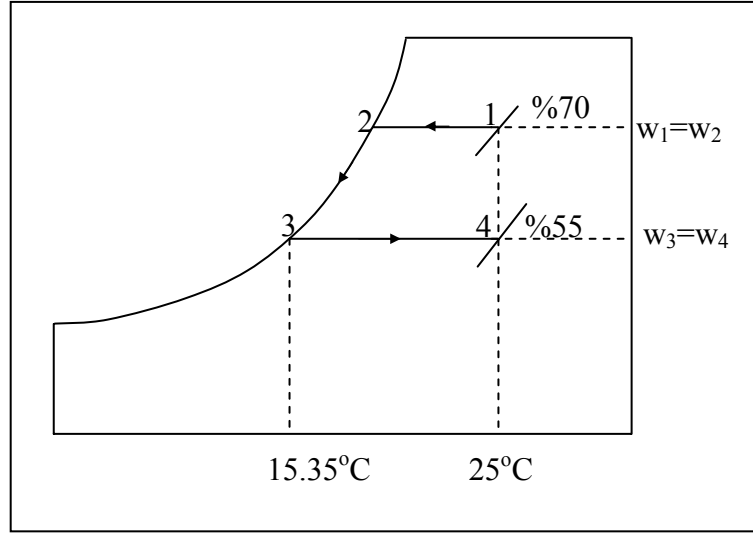
Tablo 3.5. İlgili parametrelerin belirsizlik düzeyi

Belirsizlik tipleri	Hesaplanan değerler (%)
Difüzyon katsayısı, $D_{eff}$	1.18
Kütle taşınım katsayısı, $h_m$	1.56
Tekrarlanabilirlik	2.0

### 3.2.4. Termoekonomik Analiz

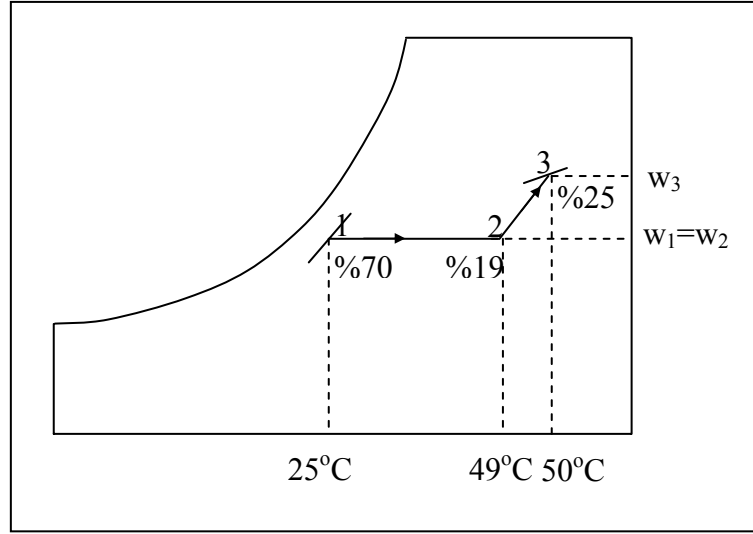
Kurutma işlemi süresince, kurutma havası sıcaklık ve bağıl neminin sabit değerlerde tutulması için, kurutma havası bazı iklimlendirme işlemlerine tabii tutulmuştur. Sabit sıcaklıkta tutulan havanın bağıl neminin azaltılması için, kurutma havasının tabii tutulduğu iklimlendirme işlemi Şekil 3.62’de psikrometrik diyagram üzerinde gösterilmiştir. Ortam bağıl nemini düşürmek için kurutma havası önce soğutulmuş ve ardından ısıtılmıştır. Bu iklimlendirme işleminde; başlangıçtaki atmosferik hava (1), doyma noktasına kadar sabit özgül nemde soğutulmuştur (2). Doyma noktasında ise istenilen bağıl nem seviyesine kadar soğutulmaya devam edilmiştir (3). Sonrasında ise başlangıçtaki sıcaklık değerine kadar sabit özgül nemde ısıtılmıştır (4). Böylece kurutma havası bağıl nem değeri düşürülmüştür. Bu proses boyunca, hem soğutma hem de ısıtma işlemi için enerji harcanmıştır.

Atmosferik havanın ısıtılması ise sabit özgül nemde gerçekleştirilir. Şekil 3.63’te havanın istenilen özelliklere erişmesi için ısıtılması (1-2) gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, sabit özgül nemde ısıtılan kurutma havası bağıl nemi azalmaktadır. Bağıl nemin bir miktar artırılabilmesi için özgül nemin yükseltilmesi gerekmektedir. Bu da ancak kurutma havasına su buharı püskürtmekle mümkündür. Isınan havanın sıcaklığına, püskürtülen buharın sıcaklığının da bir miktar katkı yapacağı hesaplamalarda göz önüne alınmıştır (2-3). Bu proseste de hem ısıtma hem de su buharı eklemek için enerji harcanmıştır.



Şekil 3.62. Sabit sıcaklıkta tutulan havadan nem alma işleminin psikrometrik diyagramda gösterimi

İklimlendirme işlemine tabi tutulan kurutma havasının bütün değerleri psikrometrik diyagramdan okunmuştur. (2.53), (2.54) ve (2.55) numaralı denklemlerinin kullanımıyla yoğuşan/ püskürtülen su/buhar ve harcanan elektrik enerjisi belirlenmiştir. Tablo 3.6'da kurutma havası bağıl neminin düşürülmesiyle havadan yoğuşan su ve harcanan enerji miktarı sonuçları gösterilmiştir. Kurutma havasının hem soğutulup hem de tekrar ısıtılmasıyla oldukça fazla miktarda enerji tüketimi olduğu görülmüştür. Yüksek bağıl nemden daha düşük bağıl nem değerlerine ulaşabilmek için, kurutma havasından yoğuşan su miktarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca verilen şartlarda kurutma işlemi yapılmış ve bütün proses boyunca harcanan enerji miktarı da belirlenerek Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Kurutma havası bağıl neminin azaltılmasıyla, harcanan toplam enerji miktarında artma olduğu görülmüştür. Enerjinin en çok harcandığı iklimlendirme işleminin, havanın sabit sıcaklıkta tutulup ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) bağıl nemin en aza indirildiği ( $\phi = \%25$ ) durumda olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.63. Atmosferik havanın ısıtılma ve nemlendirme işleminin psikrometrik diyagramda gösterilmesi

Tablo 3.6. Sabit sıcaklıkta nem alma işleminde harcanan enerji

Parametreler	$\phi=0.55$	$\phi=0.40$	$\phi=0.25$
Yoğuşan su, kg/h	0.492	0.979	1.462
Yoğuşturucunun harcadığı enerji, kW	-0.784	-1.346	-2.000
Isıtıcının harcadığı enerji, kW	0.445	0.665	0.974
Harcanan toplam enerji, kW	1.229	2.011	2.974
Kurutma süresi, h	76	64	58
Proses boyunca harcanan enerji, kWh	93.40	128.70	172.49

Sabit bağıl nemde yapılan kurutma işleminde, atmosferik havanın ısıtılmasıyla harcanan enerji miktarı Tablo 3.7’de gösterilmiştir. Kurutma havası sabit özgül nemde ısıtılarak 49°C’ye getirildiğinde, ortam bağıl nemi azalmaktadır (%19). Bağıl nemi yükselterek %25’e getirmek için ortama su buharı püskürtülmelidir. Suyun buhar fazına getirilmesi için de enerji harcanmaktadır. Tablo 3.7’de görüldüğü gibi, kurutma havasının en yüksek sıcaklığında, suyun buharlaştırılması için harcanan enerji, atmosferik havanın ısıtılması için harcanan enerjiden daha fazla olmuştur. Atmosferik havanın iklimlendirilmesi kurutma işlemi boyunca sürdüğünden, suyun buharlaştırılarak kurutma havasına püskürtülmesi enerji maliyetini artırmıştır.

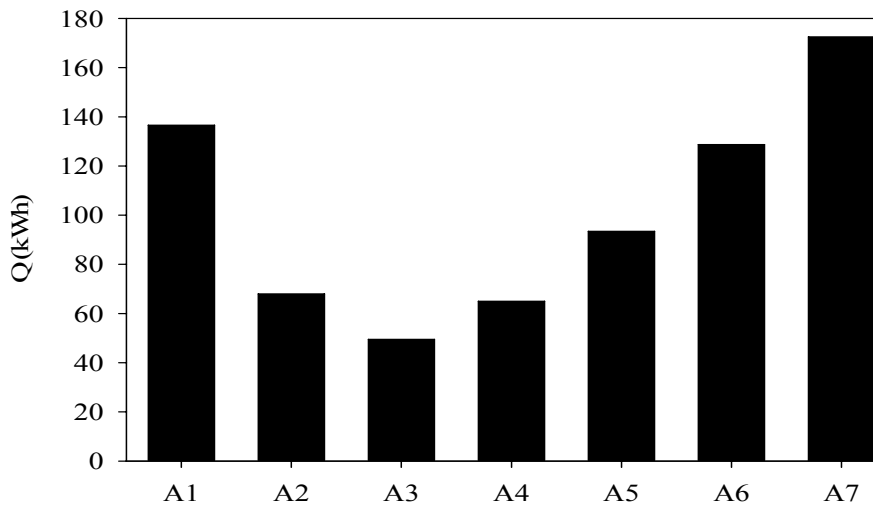
Tablo 3.7. Sabit bağıl nemde ısıtma işlemi için harcanan enerji

Parametreler	T=30°C	T=40°C	T=50°C	T=60°C
Eklenen buhar miktarı, kg/h	-1.188 (yoğuşan su)	-0.396 (yoğuşan su)	0.9	2.952
Buharlaştırıcının harcadığı enerji, kW	-1.614 (yoğuş. en.)	-0.602 (yoğuş. en.)	0.643	2.108
Isıtıcının harcadığı enerji, kW	1.013	1.097	1.125	1.500
Harcanan toplam enerji, kW	2.627	1.699	1.768	3.608
Kurutma süresi, h	52	40	28	18
Proses boyunca harcanan toplam enerji, kWh	136.60	67.96	49.50	64.94

Atmosferik havanın iklimlendirilmesiyle, harcanan enerji miktarı Tablo 3.8 ve Şekil 3.64'te ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Tablo 3.8 ve Şekil 3.64'ten de görüldüğü gibi, proses boyunca harcanan toplam enerjinin, atmosferik havanın iklimlendirilerek, sıcaklığı 50°C ve bağıl nemi %25 olan kurutma havası koşullarında yapılan kurutma işleminde en az olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3.8. Atmosferik havanın iklimlendirilmesiyle harcanan enerji miktarı

Parametre	Kurutma havası şartları		Harcanan toplam elektrik enerjisi
	T (°C)	$\phi$	Q (kWh)
A1	30	25	136.60
A2	40	25	67.96
A3	50	25	49.50
A4	60	25	64.94
A5	25	55	93.40
A6	25	40	128.70
A7	25	25	172.49



Şekil 3.64. Kivinin kurutulması sırasında kurutma havası koşullarına göre harcanan enerji miktarı



#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kurutmada ısı ve kütle transferi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen teorik ve deneysel bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1. Literatürde yapılan çoğu çalışmada, bir boyutlu ısı ve kütle transferi denklemleri kullanılarak kurutma prosesi tanımlanmıştır. Bu çalışmada ise, ürünlerin kurumasını karakterize etmede iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemleri kullanılmıştır. İkinci boyut etkilerinin analize dahil edilmesiyle, kurutma prosesinde üründe meydana gelen sıcaklık ve nem dağılımının daha kolay tespit edildiği görülmüştür.
2. Dikdörtgen ve akışa dik konulmuş ürünler etrafında hız ve sıcaklık dağılımını belirlemede bir ticari yazılım olan Fluent paket programı kullanılmıştır. Fluent paket programıyla elde edilen çözüm sonuçlarının doğruluğunu sınamak için:
  - i. Teorik çalışma sonucu ile elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı, mevcut ampirik bağıntılarla karşılaştırılmıştır.
  - ii. Literatürde yapılan bir çalışma tekrar modellenerek çözülmüştür.
  - iii. Termofiziksel özellikleri aynı olan dikdörtgen şekilli bir üründe, sıcaklık ve nem dağılımı hem Fortran kodu ile hem de Fluent paket programı ile çözülmüştür.

Elde edilen sonuçların oldukça uyumlu olduğu gösterilmiştir.

3. Fluent paket programının kullanımıyla, dikdörtgen şekilli ürünün yüzeyi boyunca değişen yerel ısı taşınım katsayısı tespit edilmiştir. Kurutma havasının çarptığı ön yüzeyde yerel ısı taşınım katsayısının yüksek, arka yüzeyde ise bu katsayıların düşük olduğu belirlenmiştir.
4. Termal ve konsantrasyon sınır tabakaları benzeşiminden faydalanarak, dikdörtgen şekilli ürünün yüzeyi boyunca değişen yerel kütle taşınım katsayısı tespit edilmiştir. Yerel kütle taşınım katsayısının ürün yüzeyi boyunca değişiminin de, yerel ısı taşınım katsayısına benzer bir davranış gösterdiği görülmüştür.
5. Her bir boyut oranı için, ürün etrafında hız ve sıcaklık dağılımı belirlenmiş, boyut oranının küçülmesiyle, üst, alt ve arka yüzeylerde ısı ve kütle taşınım katsayılarının yerel değişimlerinin arttığı, ön yüzeyde ise değişmediği belirlenmiştir.

6. Ürün yüzeyi boyunca değişimi elde edilen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları, iki boyutlu ısı ve kütle transferi denklemlerinin çözümünde yüzeyde konvektif sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Kurutmanın herhangi bir zamanında, üründeki sıcaklık ve nem dağılımı tespit edildiğinde, ısı ve kütle taşınım katsayılarının yüksek olduğu ön yüzeylerde daha hızlı kuruma, düşük olduğu arka yüzeylerde daha yavaş kuruma olduğu görülmüştür.
7. Boyut oranının azalmasıyla, ürünün üst, alt ve arka yüzeylerindeki yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının artması sebebiyle kuruma süresi azalmış, en kısa sürede kuruyan ürünün boyut oranı en küçük olan ( $AR=0.25$ ) ürün olduğu belirlenmiştir.
8. Akışa dik konumdaki silindir şekilli ürün etrafında hız ve sıcaklık dağılımı belirlenmiş, yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının, laminer sınır tabakanın gelişimine bağlı olarak, ürünün ön durma noktasından başlayarak azaldığı tespit edilmiştir. Ürün arka yüzeyinde ise, yüzeyden ayrılmaların etkisiyle oluşan girdaplar sebebiyle, bu katsayıların tekrar artış gösterdiği belirlenmiştir.
9. Üründe sıcaklık ve nem dağılımı elde etmek için belirlenen yerel ısı ve kütle taşınım katsayıları yüzeyde konvektif sınır koşulu olarak kullanılmış, ısı ve kütle taşınım katsayılarının yüksek olduğu ön yüzeyde daha hızlı kuruma, düşük olduğu arka yüzeyde ise daha yavaş kuruma olduğu tespit edilmiştir.
10. Homojen kurumayı sağlamak amacıyla, kurutma havasının kurutucuya optimum giriş ve çıkış konum araştırılmıştır. Bu amaçla, beş farklı konfigürasyon karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kurutma havasının, kurutucuya alt orta yüzeyden girip üst orta yüzeyden çıktığı durum, homojen kurutma ve kurutma süresi açısından optimum giriş ve çıkış konumu olarak belirlenmiştir.
11. Deneysel çalışma kapsamında iki farklı konvektif kurutucu tasarlanarak Termo-Akışkanlar laboratuvarına kurulmuştur.
12. Kivi test bölgesi düşey konumda tutulan kurutucuda kurutulmuş ve kurutma havası koşullarının kurutma süresine etkisi araştırılmıştır. Toplam kurutma süresi; kurutma havası hızının 0.3 m/s den 0.9 m/s'ye ye çıkartılmasıyla %8.3, kurutma havası sıcaklığının 35°C den 65°C ye çıkartılmasıyla %62.5 ve kurutma havası bağıl neminin %85'ten %40'a indirilmesiyle %56.36 oranında azaldığı belirlenmiştir.
13. Kurutma havası bağıl neminin %70 ve üzeri değerlerinde ve sıcaklığın 65°C olan ortamda yapılan kurutmada, üründe renk değişimi olduğu görülmüştür.

14. Denge nem içeriği ile denge bağıl nemi arasındaki ilişki olan sorpsiyon eğrisi, kuru kivi ve karayemiş için, farklı sıcaklık koşullarında belirlenmiştir. Sabit ortam sıcaklığında, artan denge bağıl nemiyle ürünün denge nem içeriği artmıştır. Sabit denge bağıl neminde ise, artan ortam sıcaklığıyla denge nem içeriği azalmıştır. Bu sonuca göre, kuru ürün yüksek bağıl nemli ortamlarda saklanmamalıdır.
15. Kivinin C vitamini değerine kurutma havası sıcaklığı ve bağıl nemin etkisi araştırılmıştır. C vitamininin, kurutma havası sıcaklığı ve ürün nem içeriğine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. En az vitamin kaybının, kurutma havası sıcaklığı 35°C ve kurutma havası bağıl nemi %85 olan ortamda gerçekleştiği belirlenmiştir.
16. Test bۆlgesi dűřey konumda tutulan kurutucuda kurutulan kivi için maliyet analizi yapılmıştır. Hesaplamalarda, Trabzon'da yaz aylarının ortalama sıcaklık ve bağıl nem değeri, atmosferik hava koşulları olarak alınmıştır. Sıcaklığın sabit bağıl nemde yükseltilmesi ve bağıl nemin sabit sıcaklıkta azaltılması sırasında harcanan enerji miktarı hesaplanmıştır. Kivinin kurutulması sırasında harcanan toplam enerji maliyeti hesaplanmış, sıcaklığı 50°C ve bağıl nemi %25 olan ortamının en ekonomik kurutma havası olduğu tespit edilmiştir.
17. Kivide C vitamin kaybını en aza indirmek, kurutma süresini kısaltmak ve harcanan enerji maliyetini azaltmak için, kurutma havası sıcaklığı 50°C olmalı ve kivinin son nem içeriği, denge nem içeriğine erişmeden kurutma işlemi sonlandırılmalıdır.
18. Kivi, test bۆlgesi hem dűřey hem de yatay konumda tutulan kurutucularda, aynı kurutma havası řarlarında kurutulmuş, test bۆlgesi dűřey konumda tutulan kurutucuda daha hızlı kuruma olduđu belirlenmiřtir.
19. Literatüre kazandırılan taflan kurutma çalışmasında, difüzyon katsayısı ve kütle taşınım katsayısı belirlenmiştir. Difüzyon ve kütle taşınım katsayılarının, artan kurutma havası hızı ve sıcaklığıyla ve azalan bağıl nem ile arttığı belirlenmiştir.
20. Taflanın kuruma davranışını teorik olarak belirlemek amacıyla, iki boyutlu küresel ürünler için kütle transferi denklemi iki farklı sınır koşulu altında (sabit konsantrasyon ve konvektif) özölmüştür. Konvektif sınır koşulunun uygulanmasıyla elde edilen sonuçların, deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görölmüştür.

## 5. ÖNERİLER

1. Doğadaki bütün ürünler üç boyutludur. Bu çalışmada, iki boyutlu durum için kullanılan matematiksel formülasyonlar ve sayısal çözümleme yöntemi, üç boyutlu durum için düzenlenmelidir.
2. Sayısal çalışmada hacim değişimi etkisi göz önüne alınabilir.
3. Çalışmada kullanılan Fluent paket programıyla, çok daha farklı fiziksel geometri ve farklı sınır koşulları altında kurutma çalışmaları yapılabilir (örneğin; titreşimli giriş koşulunda kurutma, kurutucuda farklı şekilde konumlandırılan ürünlerin kurutulması, vb.).
4. Disiplinler arası ortak çalışmayla, konvektif kurutucuda kurutulan ürünlerde, gıdanın besin değerlerinin (protein, yağ, A, B ve C vitaminleri, vb.) kurutma koşullarıyla değişimi araştırılabilir.
5. Disiplinler arası ortak çalışmayla, farklı kurutma yöntemlerinin (mikrodalga, konvektif, akışkan yataklı, vakum), hem kurutma süresine hem de ürünün besin değerlerine etkisi incelenmelidir.
6. Kivinin konvektif kurutucuda kurutulmasında oldukça fazla enerji harcandığı tespit edilmiştir. Konvektif kurutucularda, kurutma havasının ısıtılmasında atık enerji ve güneş enerjisi kullanımı araştırılmalıdır.

## 6. KAYNAKLAR

- Abalone, R., Gaston, A., Cassinera, A. ve Lara, M.A., 2006. Thin Layer Drying of Amaranth Seeds, Biosyst. Eng., 93, 2, 179–188.
- Adachi T., Okamoto, S. ve Adachi, M., 1979. The Effect of Sound on The Rate of Heat Transfer from A Cylinder Placed Normal to an Air Stream, Bulletin JSME, 22, 1407-1415.
- Ajibola, O. O., 1989. Thin Layer Drying of Melon Seed, J. Food Eng., 9, 4, 305–320.
- Akanbi, C.T., Adeyemi, R.S. ve Ojo, A., 2006. Drying Characteristics and Sorption Isotherm of Tomato Slices, J. Food Eng., 73, 157–163.
- Akgun, N.A. ve Doymaz, İ., 2005. Modelling of Olive Cake Thin Layer Drying Process, J. Food Eng., 68, 455-461.
- Alasalvar, C., Al-Farsi, M. ve Shahidi, F., 2005. Compositional Characteristics and Antioxidant Components of Cherry Laurel Varieties and Pekmez, J. Food Sci., 70, 1, 47-52.
- Altaç, Z. ve Ünalın, A., 2007. Eliptik Borularda Sabit Duvar Sıcaklığı ve Sabit Isı Akısı İçin Tam Gelişmiş ve Gelişmekte Olan Laminar Akışın İncelenmesi, 16.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniğı Kongresi, 30 Mayıs-2 Haziran 2007, Kayseri, Bildiriler Kitabı, 225-230.
- Al-Zubaidy, M.M.I. ve Khalil, R.A., 2007. Kinetic and Prediction Studies of Ascorbic Acid Degradation in Normal and Concentrate Local Lemon Juice during Storage, Food. Chem., 101, 254-259.
- Anwar, S.I. ve Tiwari, G.N., 2001. Convective Heat Transfer Coefficient of Crops in Forced Convection Drying - An Experimental Study, Energ. Convers. Manage., 42, 687-1698.
- Ataseven Işık, E., Şahin, A. ve Yazıcı, K., 2002. Bazı Üzümsü Meyvelerin (Frenküzümü, ahududu, böğürtlen ve nar) Ekolojik Yetiştiriciliğe Uygunluğu, Türkiye 2. Ekolojik Tarım Sempozyumu, Antalya, 286-295.
- Aydın, O., 1998. Komşu Duvarları Farklı Sıcaklıkta Tutulan Dikdörtgensel Kapalı Ortamlarda Doğal Taşınım, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen-Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Ayensu, A., 1997. Dehydration of Food Crops Using A Solar Dryer with Convective Heat Flow, Sol. Energy, 59, 121–126.
- Azzouz, S., Guazini, A., Jomaa, W. ve Belghith, A., 2002. Moisture Diffusivity and Drying Kinetic Equation of Convective Drying of Grapes, J. Food Eng., 55, 323-330.

- Babalıs S.J. ve Belessiotıs V.G., 2004. Influence of The Drying Conditions on The Drying Constants and Moisture Diffusivity During The Thin-Layer Drying of Figs, J. Food Eng., 65, 449-458.
- Babalıs S.J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., ve Belessiotıs V.G., 2006. Evaluation of Thin Layer Drying Models for Describing Drying Kinetics of Figs, J. Food Eng., 75, 205-214.
- Baker, C.G.J., 1997. Industrial Drying of Foods, First edition, Blackie Academic and Professional, New York.
- Balaban, M. ve Pigott, G.M., 1988. Mathematical Model of Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food with Dimensional Changes and Variable Transport Parameters, J. Food Sci., 53, 3, 935-939.
- Baytop, T., 2001. Therapy with Medicinal Plants in Turkey (Past and Present), Istanbul University: Istanbul, Turkey.
- Besco, E., Braccioli, E., Vertuani, S., Ziosi, P., Brazzo, F., Bruni, R., Sacchetti, G. ve Manfredini, S., 2007. The Use of Photochemiluminescence for The Measurement of The Integral Antioxidant Capacity of Baobab Products, Food. Chem., 102, 4, 1352-1356.
- Bialobrzewski I., Myhan R., Cydzik R., 2005. Effective Water Diffusion Coefficient in Faba Bean Seeds During Drying. Part I. Determination of Values, Electronic Journal of Polish Agricultural Universities., 8, 2, 29-33, <http://www.ejpau.media.pl/volume8/issue2/art-29.html>. 04 Nisan 2008.
- Bialobrzewski, I., 2007a. Determination of The Heat Transfer Coefficient by Inverse Problem Formulation During Celery Root Drying, J. Food Eng., 74, 383-391.
- Bialobrzewski, I., 2007b. Determination of The Mass Transfer Coefficient During Hot-Air-Drying of Celery Root, J. Food Eng., 78, 1388-1396.
- Bon, J., Simal, S., Rossell, O. C. Ve Mulet, A., 1997. Drying Characteristics of Hemispherical Solids, J. Food Eng., 34, 109-122.
- Boyer, R.F., 1986. Modern Experimental Biochemistry, The Benjamin/ Cummings Publishing Company, INC., Menlo Park, California.
- Bozkır, O., 2006. Thin Layer Drying and Mathematical Modelling for Washed Dry Apricots, J. Food Eng., 77, 146-151.
- Brennan, J.G., Butters, J.R., Cowell, N.D. ve Lilly, A.E.V., 1976. Dehydration, Food Engineering Operations, Applied Science Publishers Limited, London.
- Broker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. ve Hall, C.W., 1974. Drying Cereal Grains, Conn.: AVI Publishing Company Inc, Westport.

- Bruce, D. M., 1985. Exposed Thin Layer Drying, Three Models Fitted to New Data up to 150°C, J. Agr. Eng. Res., 32, 337–347.
- Can, A., 2007. An Analytical Method for Determining The Temperature Dependent Moisture Diffusivities of Pumpkin Seeds During Drying Process, Appl. Therm. Eng., 27, 682-687.
- Carbonell, J. V., Pinaga, F., Yusa, V. ve Pena, J. L., 1986. Dehydration of Paprika and Kinetics of Color Degradation. J. Food Eng., 5, 3, 179–193.
- Carl, P.E. ve Hall, W., 1980. Drying and Storage of Agricultural Crops, The Avi Publishing Company, INC., Westport.
- Chemkhi, S. Ve Zagrouba, F., 2005. Water Diffusion Coefficient in Clay Material From Drying Data, Desalination, 185, 491-498.
- Chinnan, M. S., 1984. Evaluation of Selected Mathematical Models for Describing Thin Layer Drying of in-Shell Pecans, Transactions of The ASAE, 27, 2, 610–615.
- Chua, K.J., Chua, S.K., Hawlader, M.N.A., Mujumdar, A.S. ve Ho, J.C., 2002. Modelling The Moisture and Temperature Distribution within An Agricultural Product Undergoing Time-Varying Drying Schemes, Biosyst. Eng., 81, 1, 99-111.
- Cordeiro, D.S., Raghavan, G.S.V. ve Oliveira, W.P., 2006. Equilibrium Moisture Content Models for Maytenus Ilicifolia Leaves, Biosyst. Eng., 94, 2, 221–228.
- Crank, J., 1975. The Mathematics of Diffusion, Second Edition, Oxford University Press, London.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, McGraw-Hill-Literatür, İstanbul.
- Dandamrongrak, R., Young, G. ve Mason, R., 2002. Evaluation of Various Pre-Treatment for Dehydration of Banana and Selection of Suitable Drying Models, J. Food Eng., 55, 139–146.
- Demir, V., Gunhan, T., Yagcioglu, A.K. ve Degirmencioglu, A., 2004. Mathematical Modelling and The Determination of Some Quality Parameters of Air-Dried Bay Leaves, Biosyst. Eng., 88, 3, 325–335.
- Demirkol, E., Erdoğan, F. ve Palazoğlu, T.K., 2006. Experimental Determination of Mass Transfer Coefficient: Moisture Content and Humidity Ratio Driving Force Approaches During Baking, J. Food. Process Eng., 29, 188-201.
- Demirtas, C., Ayhan, T. ve Kaygusuz, K., 1998. Drying Behaviour of Hazelnuts, J. Sci. Food Agr., 76, 559-564.
- Demirtaş, C., 1998. Fındık Kurutma Şartlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Desmorieux, H. ve Decaen, N., 2005. Convective Drying of Spirulina in Thin Layer, J. Food Eng., 66, 497-503.
- Diaz, G.R., Monzo, J.M., Fito, P. ve Chiralt, A., 2003. Modelling of Dehydration-Rehydration of Orange Slices in Combined Microwave/Air Drying, Inn. Food Sci. Emer. Tech., 4, 203-209.
- Dincer, I. ve Dost, S., 1995. An Analytical Model for Moisture Diffusion in Solid Objects During Drying, Dry. Technol., 13, 1-2, 425-435.
- Dincer, I. ve Dost, S., 1996. A Modelling Study for Moisture Diffusivities and Moisture Transfer Coefficients in Drying of Solid Objects, Int. J. Energ. Res., 20, 531-539.
- Dincer, I. ve Hussain, M.M., 2004. Development of A New Biot Number and Lag Factor Correlation for Drying Applications, Int. J. Heat Mass Tran., 47, 653-658.
- Dincer, I., 1997. Heat Transfer in Food Cooling Applications, Taylor & Francis, Washington, D.C.
- Dincer, I., 1998. Moisture Loss from Wood Products During Drying- Part I: Moisture Diffusivities and Moisture Transfer Coefficients, Energ. Source., 20, 67-75.
- Doymaz, İ., 2006. Thin-Layer Drying Behaviour of Mint Leaves, J. Food Eng., 74, 370-375.
- Doymaz, İ., 1998. Üzüm ve Kahramanmaraş Biberinin Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Y.T. Ü., Fen-Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doymaz, İ., 2006. Drying Kinetics of Black Grapes Treated with Different Solutions, J. Food Eng., 76, 212-217.
- Doymaz İ., 2004a. Drying Kinetics of White Mulberry, J. Food Eng., 61, 341-346.
- Doymaz, İ., 2004b. Convective Air Drying Characteristics of Thin Layer Carrots, J. Food Eng., 61, 359-364.
- Duarte, C.R., Murata, V.V. ve Barroza, M.A.S., 2005. A Study of The Fluid Dynamics of The Spouted Bed Using CFD, Braz. J. Chem. Eng., 22, 2, 263-270.
- Dutta, S.K, Nema, V.K. ve Bhardwaj, R.K., 1988. Drying Behaviour of Spherical Grains, Int. J. Heat Mass Tran., 31, 4, 855-861.
- Ece, M. C. ve Cihan, A., 1993. A Liquid Diffusion Model for Drying Rough Rice, Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 36, 837-840.
- El-Aouar, A.A., Azoubel, A.M. ve Murr, F.E.X., 2003. Drying Kinetics of Fresh and Osmotically Pre-Treated Papaya (*Carica Papaya L.*), J. Food Eng., 59, 85-91.



- Elbert, G., Tolaba, M.P., Aguerra, R.J. ve Suarez, C., 2001. A Diffusion Model with A Moisture Dependent Diffusion Coefficient for Parboiled Rice, Dry. Technol., 19, 1, 155-166.
- Ercisli, S., Esitken, A., Cangi, R. ve Sahin, F., 2003. Adventitious Root Formation of Kiwifruit in Relation to Sampling Date, IBA and Agrobacterium Rubi Inoculation, Plant Growth Regul., 41, 133–137.
- Erenturk, S., Gulaboglu, M.S. ve Gultekin, S., 2004. The Thin-Layer Drying Characteristics of Rosehip, Biosyst. Eng., 89, 2, 159–166.
- Erenturk, S., Gulaboglu, M.S. ve Gultekin, S., 2005. The Effects of Cutting and Drying Medium on The Vitamin C Content of Rosehip During Drying, J. Food Eng., 68, 513-518.
- Fennema, O., 1981. Water Activity of Subfreezing Temperatures. In: “Water Activity: Influences on Food Quality.” (Edited By L.B. Rockland ve G.F. Stewart), Academic Pres, New York.
- Fluent 6 User’s Guide, Fluent Inc., Lebanon, Nh.
- Fortes, M. ve Okos, M. R., 1981. Non-Equilibrium Thermodynamics Approach to Heat and Mass Transfer in Corn Kernels, Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 22, 761-769.
- Gambit 2 User’s Guide, Fluent Inc., Lebanon, Nh.
- Garau, M.C., Simal, S., Femenia, A. ve Rossello, C., 2006. Drying of Orange Skin: Drying Kinetics Modelling and Functional Properties, J. Food Eng., 75, 288-295.
- Geankoplis, C.J., 1993. Transport Processes and Unit Operations, 3rd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, London.
- Giedt, W. H., 1949. Investigation of Variation of Point Unit Heat-Transfer Coefficient Around A Cylinder Normal to An Air Stream, Trans. ASME, 71, 375–381.
- Giovanelli, G., Zanoni, B., Lavelli, N. ve Nani, R., 2002. Water Sorption, Drying and Antioxidant Properties of Dried Tomato Products, J. Food Eng., 52, 135-141.
- Giraldo-Zuniga, A., Arevalo-Pinedo, A., Rezende, J. R., Silva, C.S. ve Monteiro, J.A., 2006. Drying Kinetics of Murici (Byrsonima Crassifolia) Fruit, J. Food. Process Eng., 30, 699-705.
- Goula, A.M. ve Adamopoulos, K.G., 2006. Retention of Ascorbic Acid During Drying of Tomato Halves and Tomato Pulp, Dry. Technol., 24, 57-64.
- Goula, A.M. ve Adamopoulos, K.G., 2004. Influence of Spray Drying Conditions on Residue Accumulation-Simulation Using CFD, Dry. Technol., 22, 5, 1107-1128.

- Göğüş, F. ve Maskan, M., 2006. Air Drying Characteristics of Solid Waste (Pomace) of Olive Oil Processing, J. Food Eng., 72, 378-382.
- Guine, R.P.F. ve Fernandes, R.M.C., 2006. Analysis of The Drying Kinetics of Chestnuts, J. Food Eng., 76, 460-467.
- Guine, R.P.F., 2006. Moisture Diffusivity in Pears: Experimental Determination and Derivation of A Mathematical Prediction Model, Int. J. Food Sci. Tech., 41, 1117-1181.
- Hamdami, N., Monteau, J.Y. ve Bail, A.L., 2006. Moisture Diffusivity and Water Activity of Part-Baked Bread at Above and Sub-Freezing Temperatures, Int. J. Food Sci. Tech., 41, 33-44.
- Hansen, R. C., Keener, H. M. ve Elsohly, H. N., 1993. Thin-Layer Drying of Cultivated Taxus Clippings, Transactions of The ASAE, 36, 6, 1873–1877.
- Hatamipour, M.S. ve Mowla, D., 2003. Correlations for Shrinkage, Density, and Diffusivity for Drying of Maize and Gren Peas in A Fluidized Bed with Energy Carrier, J. Food Eng., 59, 221-227.
- Hatamipour, M.S. ve Mowla, D., 2003. Experimental and Theoretical Investigation of Drying of Carrots in A Fluidized Bed with Energy Carrier, Dry. Technol., 21, 1, 83-101.
- Hawtlader, M.N.A., Perera, C.O., Tian M. ve Yeo, K.L., 2006. Drying of Guava and Papaya: Impact of Different Drying Methods, Dry. Technol., 24, 77-87.
- Hawtlader, M.N.A., Uddin, M.S., Ho, J.C. ve Teng, A.B.W., 1991. Drying Characteristics of Tomatoes, J. Food Eng., 14, 259-268.
- Hayaloglu, A.A., Karabulut, I., Alpaslan, M. ve Kelbaliyev, G., 2005. Mathematical Modeling of Drying Characteristics of Strained Yoghurt in A Convective Type Tray-Dryer, J. Food Eng., 78, 109-117.
- Henderson, S. M. ve Pabis, S., 1961. Grain Drying Theory I. Temperature Effect on Drying Coefficient, J. Agr. Res. Eng., 6, 3, 169–174.
- Henderson, S.M., 1974. Progress in Developing The Thin Layer Drying Equation, Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 17, 1167-1172.
- Herman E., Rodriguez, G.C. ve Garcia, M.A., 2001. Mathematical Modeling for Fixed-Bed Drying Considering Heat and Mass Transfer Interfacial Phenomena, Dry. Technol., 19, 1, 137-154.
- Hernandez, J.A., Pavon, G. ve Garcia, M.A., 2000. Analytical Solution of Mass Transfer Equation Considering Shrinkage for Modeling Food-Drying Kinetics, J. Food Eng., 45, 1-10.

- Hoffmann, K.A., 1989. Computational Fluid Dynamics for Engineering, Engineering Education System Pub., Austin, Texas.
- Holman, J.P., 1989. Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill, New York.
- Huang, L., Kumar, K. ve Mujumdar, A.S., 2003a. Use of Computational Fluid Dynamics to Evaluate Alternative Spray Dryer Chamber Configurations, Dry. Technol., 21, 3, 385-412.
- Huang, L., Kumar, K. ve Mujumdar, A.S., 2003b. A Parametric Study of The Gas Flow Patterns and Drying Performance of Co-Current Spray Dryer: Results of A Computational Fluid Dynamics Study, Dry. Technol., 21, 6, 957-978.
- Hussain, M.M. ve Dincer, I., 2003a. Two-Dimensional Heat and Moisture Transfer Analysis of A Cylindrical Moist Object Subjected to Drying: A Finite-Difference Approach, Int. J. Heat Mass Tran., 46, 4033-4039.
- Hussain, M.M. ve Dincer, I., 2003b. Analysis of Two-Dimensional Heat and Moisture Transfer During Drying of Spherical Objects, Int. J. Energ. Res., 27, 703-713.
- Hussain, M.M. ve Dincer, I., 2003c. Numerical Simulation of Two-Dimensional Heat and Moisture Transfer During Drying of A Rectangular Object, Numer. Heat Tr.r, Part A, 43, 867-878.
- Hussain, M.M., 2001. Investigation of Heat and Moisture Transfer During Solids Drying, Yüksek Lisans Tezi, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Suudi Arabia.
- Hutchinson, D. ve Otten, L., 1983. Thin-Layer Air Drying of Soybeans and White Beans, J. Food Tech., 18, 507-522.
- Iglesias, O. ve Bueno, J.L., 1999. Water Agar-Agar Equilibrium: Determination and Correlation of Sorption Isotherms, Int. J. Food Sci. Tech., 34, 209-216.
- Iguaz, A., San Martin, M.B., Mate, J.I., Fernandez, T. ve Virseda, P., 2003. Modelling Effective Moisture Diffusivity of Rough Rice (Lido Cultivar) at Low Drying Temperatures, J. Food Eng., 59, 253-258.
- Incropera, F.P. ve De Witt, D.P., 2001. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd Edition, John Wiley&Sons, New York.
- Irudayaraj, J., Haghghi, K. ve Strohshine, R. H., 1992. Finite Element Analysis of Drying with Application to Cereal Grains, J. Agr. Res. Eng., 53, 209-229.
- Islam, Md.R. ve Mujumdar, A.S., 2003. Role of Product Shrinkage in Drying Rate Predictions Using A Liquid Diffusion Model, Int. Commun. Heat Mass., 30, 3, 391-400.

- Jain, D. ve Tiwari, G.N., 2004. Effect of Greenhouse on Crop Drying under Natural and Forced Convection I: Evaluation of Convective Mass Transfer Coefficient, Energ. Convers. Manage., 45, 765-783.
- Jain, D. ve Tiwari, G.N., 2004. Effect of Greenhouse on Crop Drying under Natural and Forced Convection II: Thermal Modelling and Experimental Validation, Energ. Convers. Manage., 45, 2777-2793.
- Jamali, A., Kouhila, M., Mohamed, L.A., Idlimam, A. ve Lamharrar, A., 2006. Moisture Adsorption-Desorption Isotherm of Citrus Reticulate Leaves at Three Temperatures, J. Food Eng., 77, 71-78.
- Johnson, P.N.T., Brennan, J.G. ve Yobo, F.Y.A., 1998. Air-Drying Charecteristics of Plantain (Musa AAB), J. Food Eng., 37, 233-242.
- Kaleemullah, S. ve Kailappan, R., 2006. Modelling of Thin-Layer Drying Kinetics of Red Chillies, J. Food Eng., 76, 531-537.
- Karatas, S. ve Battalbey, F. M., 1991. Determination of Moisture Diffusivity of Pistachio Nut Meat During Drying, Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, 24, 484-487.
- Karel M., 1975. Dehydration of Foods. In: "Principles of Food Science, Part II, Physical Principles of Food Preservation." (Edited by O.R. Fennema, D.B. Lund ve M.Karel). Marcel Dekker, Inc., New York.
- Karim, M.A. ve Hawlader, M.N.A., 2005. Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Tropical Fruits Drying, Int. J. Heat Mass Tran., 48, 4914-4925.
- Kashaninejad, M. ve Tabil, L.G., 2004. Drying Characteristics of Purslane (Portulaca Oleracea L.), Dry. Technol., 22, 9, 2183-2200.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. ve Tabil, L.G., 2007. Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Pistachio Nuts, J. Food Eng., 78, 98-108.
- Kaur, D., Wani, A.A., Sogi, D.S. ve Shivhare, U. S., 2006. Sorption Isotherms and Drying Characteristics of Tomato Peel Isolated from Tomato Pomace, Dry. Technol., 24, 1515-1520.
- Kaya, A., Aydin, O., Demirtas, C. ve Akgun, M., 2007a. An Experimental Study on The Drying Kinetics of Quince, Desalination, 212, 328-343.
- Kaya, A., Aydın, O. ve Demirtaş, C., 2007b. Drying Kinetics of Red Delicious Apple, Biosyst. Eng., 96, 4, 517-524.
- Kaymak-Ertekin, F. ve Gedik, A., 2000. Sorption Isotherms and Isosteric Heat of Sorption for Grapes, Apples and Potatoes, LWT: J. Food Sci., 37, 429-438.
- Keey, R.B., 1972. Drying Principles and Practice, Pergamon Press, Oxford.

- Khan, W. A., Culham, J. R. ve Yovanovich, M. M., 2005. Fluid Flow Around and Heat Transfer From an Infinite Circular Cylinder, Journal of Heat Transfer, 127, 785-790.
- Kim, S., Lee, K.W., Park, J., Lee, H.J. ve Hwang, I.K., 2006. Effect of Drying in Antioxidant Activity and Changes of Ascorbic Acid and Colour by Different Drying and Storage in Korean Red Pepper (*Capsicum Annum*, L.), Int. J. Food Sci. Tech., 41, 90–95.
- Kingsly, R.P., Goyal, R.K., Manikantan, M.R. ve Ilyas, S.M., 2007. Effects of Preatreatments and Drying Air Temperature on Drying Behaviour of Peach Slice, Int. J. Food Sci. Tech., 42, 65-69.
- Kiranoudis, C.T., Tsami, E., Maroulis, Z.B. ve Marinos-Kouris, D., 1997. Drying Kinetics of Some Fruits, Dry. Technol., 15, 5, 1399-1418.
- Kneule F., 1970. Suszenie [Drying], Arkady, Warsaw.
- Kolayli, S., Küçük, M., Duran, C., Candan, F. ve Dinçer, B., 2003. Chemical and Antioxidant Properties of *Laurocerasus Officinalis* Roem. (Cherry Laurel) Fruit Grown In Black Sea Region, J. Agr. Food Chem., 51, 7489-7494.
- Kongsoontornkijkul, P., Ekwongsupasarn, P., Chiewchan, N. ve Devahastin, S., 2006. Effects of Drying Methods and Tea Preparation Temperature on The Amount of Vitamin C in Indian Gooseberry Tea, Dry. Technol., 24, 1509-1513.
- Konishi, Y., Horiuchi, J.I. ve Kobayashi, M., 2001. Dynamic Evaluation of The Dehydration Response Curves of Food Characterized by A Poultice-up Process Using A Fish-Paste Sausage. II. A New Tank Model for Computer Simulation, Dry. Technol., 19, 1271–1285.
- Koyuncu, T., Pınar, Y. ve Lule, F., 2006. Convective Drying Characteristics of Azarole Red (*Crataegus Monogyna* Jacq.) and Yellow (*Crataegus Aronia* Bosc.) Fruits, J. Food Eng., 78, 1471-1475.
- Krokida M.K., Karathanos V.T., Maroulis Z.B. ve Kouris D.M., 2003. Drying Kinetics of Some Vegetables, J. Food Eng., 59, 391-403.
- Lee, H.S., Carr, W.W., Beckham H.W. ve Leisen, J., 2002. A Model of Through-Air Drying of Tufted Textile Materials, Int. J. Heat Mass Tran., 45, 357-366.
- Leeratanarak, N., Devahastin, S. ve Chiewchan, N., 2006. Drying Kinetics and Quality of Potato Chips Undergoing Different Drying Techniques, J. Food Eng., 77, 645-643.
- Lewis, W. K., 1921. The Rate of Drying of Solid Materials, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 13, 5, 427–432.
- Lewis, W. K., 1921. The Rate of Drying of Solid Materials, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 13, 5, 427–432.

- Litchfield, B.J. ve Okos, M., 1992. Moisture Diffusion in Pasta During Drying, J. Food Eng., 17, 117-142.
- Liu, Q. ve Bakker-Arkema, F. W., 1997. Stochastic Modeling of Grain Drying, Part 2: Model Development, J. Agr. Eng. Res., 66, 275–280.
- Liyana-Pathirana, C.M., Shahidi, F. ve Alasalvar, C., 2006. Antioxidant Activity of Cherry Laurel Fruit (*Laurocerasus Officinalis* Roem.) and its Concentrated Juice, Food Chem., 99, 121–128.
- Lopes, E. J., Zepka, L. Q., Pinto, L. A. A. ve Queiroz, M. I., 2007. Characteristics of Thin Layer Drying of The Cyanobacterium *Aphanothece Microscopica* Nageli, Chem. Eng. Process., 46, 63-69.
- Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A. ve Virseda, P., 2000. Thin Layer Drying Behaviour of Vegetable Wastes from Wholesale Market, Dry. Technol., 18, 4-5, 995-1006.
- Lopez, A., Pique, M.T., Boatella, J., Ferran, A., Garcia, J. ve Romera, A., 1998. Drying Characteristics of The Hazelnut, Dry. Technol., 16, 3-5, 627-649.
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H. ve Buckle, K. A., 1996. The Thin Layer Drying Characteristic of Garlic Slices, J. Food Eng., 29, 75–97.
- Margaris, D.P. ve Ghiaus, A.G., 2007. Experimental Study of Hot Air Dehydration of Sultana Grapes, J. Food Eng., 79, 1115-1121.
- Markowski, M., 1997. Air Drying of Vegetables: Evaluation Coefficient of Mass Transfer, J. Food Eng., 34, 55-62.
- Marquez, C.A., De Michelis, A. ve Giner, S.A., 2006. Drying Kinetics of Rose Hip Fruits, J. Food Eng., 77, 566-574.
- Maskan, A., Kaya, S. ve Maskan, M., 2002a. Effect of Concentration and Drying Process on Color Change of Grape Juice and Leather (Pestil), J. Food Eng., 54, 75-80.
- Maskan, A., Kaya, S. ve Maskan, M., 2002b. Hot Air Drying of Grape Leather (Pestil), J. Food Eng., 54, 81-88.
- Maskan, M. ve Göğüş, F., 1998. Sorption Isotherm and Drying Characteristics of Mulberry, J. Food Eng., 37, 437-449.
- Maskan, M., 2001. Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits During Hot Air and Microwave Drying, J. Food Eng., 48, 177-182.
- Mclaughlin C.P. ve Magee T.R.A., 1999. The Effects of Air Temperature, Sphere Diameter and Puffing with CO<sub>2</sub> on The Drying of Potato Spheres, Dry. Technol., 17, 119–136.
- Mclaughlin, C.P. ve Magee, T.R.A., 1998. The Determination of Sorption Isotherm and The Isothermic Heats of Sorption for Potatoes, J. Food Eng., 35, 267-280.

- McMinn, W.A.M. ve Magee, T.R.A., 1997. Physical Characteristics of Dehydrated Potatoes-Part 1, J. Food Eng., 33, 37-48.
- McMinn, W.A.M., Khraisheh, M.A.M. ve Magee, T.R.A., 2003. Modelling The Mass Transfer During Convective, Microwave and Combined Microwave-Convective Drying of Solid Slabs and Cylinders, Food Res. Int., 36, 977-983.
- Menges, H. O. ve Ertekin, C., 2006. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Golden Apples, J. Food Eng., 77, 119-125.
- Menges, H. O. ve Ertekin, C., 2006. Thin Layer Drying Model for Treated and Untreated Stanley Plums, Energ. Convers. Manage., 47, 2337-2348.
- Mhimid, A., Nasrallah, S.B. ve Fohr, J.P., 2000. Heat and Mass Transfer During Drying of Granular Products –Simulation with Convective and Conductive Boundary Conditions, Int. J. Heat Mass Tran., 43, 2779-2791.
- Mohapatra, D. ve Rao, P.S., 2005. A Thin Layer Drying Model of Parboiled Wheat, J. Food Eng., 66, 513-518.
- Moss, J. R. ve Otten, L., 1989. A Relationship Between Color Development and Moisture Content During Roasting of Peanut, Can. Ins. Food Sci. Tech. J., 22, 34-39.
- Mujumdar, A. S., 1987. Handbook of Industrial Drying. Marcel Dekker, New York
- Mujumdar, A.S., 1999. Energy and Environment Aspects in Industrial Drying, The International Symposium on Energy & Environment, Yokohama and Hakone, Japan.
- Mulet, A., Berna, A. ve Rossello, C., 1989. Drying of Carrots. I. Drying Models, Dry. Technol., 7, 3, 537-557.
- Murugesan, K., Suresh, H.N., Seetharamu, K.N., Narayana, P.A.A. ve Sundararajan, T., 2001. A Theoretical Model of Brick Drying as A Conjugate Problem, Int. J. Heat Mass Tran., 44, 4075-4086.
- Mwithiga, G. ve Olwal, J. O., 2005. The Drying Kinetics of Kale ( Brassica Oleracea) in A Convective Hot Air Dryer, J. Food Eng., 71, 373-378.
- Nogueira-Terrones, H., Herman-Lara, E., Garcia-Alvarado, M.A. ve Monroy-Rivera, J.A., 2004. Drying Kinetics and Sorption Isotherms of The Nejayote, Dry. Technol., 22, 9, 2173-2182.
- Özdemir, M. ve Devres, Y. O., 1999. The Thin Layer Drying Characteristics of Hazelnuts During Roasting, J. Food Eng., 42, 225-233.
- Pabis, S., Jayas, S.D. ve Cenkowski, S., 1998. Grain Drying: Theory and Practice, John Wiley & Sons. Inc., New York.

- Pahlavanzadeh, H., Basiri, A. ve Zarrabi, M., 2001. Determination of Parameters and Pretreatment Solution for Grape Drying, Dry. Technol., 19, 1, 217-226.
- Pal, U.S. ve Chakraverty, A., 1997. Thin Layer Convection-Drying of Mushrooms, Energ. Convers. Manage., 38, 2, 107-113.
- Palipane, K.B. ve Driscoll, R.H., 1992. Moisture Sorption Characteristics of in-Shell Macadamia Nuts, J. Food Eng., 18, 63-76.
- Panchariya, P.C., Popovic, D. ve Sharma, A.L., 2002. Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying Process, J. Food Eng., 52, 349-357.
- Park, K.J., Vohnikova, Z. ve Brod, F.P.R., 2002. Evaluation of Drying Parameters and Desorption Isotherms of Garden Mint Leaves (*Mentha Crispa L.*), J. Food Eng., 51, 193-199.
- Parti, M., 1993. Selection of Mathematical Models for Drying Grain in Thin Layers, J. Agr. Eng. Res., 54, 339-352.
- Pathare, P. B. ve Sharma, G.P., 2006. Effective Moisture Diffusivity of Onion Slices Undergoing Infrared Convective Drying, Biosyst. Eng., 93, 3, 285–291.
- Peaceman, D. ve Rachford, H., 1955. The Numerical Solution of Parabolic and Elliptic Equations, J. Soc. Ind. App. Math., 3, 28-41.
- Pott, I, Neidhart, S., Mühlbauer, W. ve Carle, R., 2005. Quality Improvement of Non-Sulphited Mango Slices by Drying at High Temperatures, Inn. Food Sci. Emer. Tech., 6, 412-419.
- Prachayawarakorn, S., Kaewnin, N., Nathakaranakule, A. ve Soponronnarit, S., 2006. Effects of Peeled and Unpeeled Garlic Cloves on The Changes of Drying Rate and Quality, Dry. Technol., 24, 65–75.
- Prakash, S., Jha, S.K. ve Data, N., 2004. Performance Evaluation of Blanched Carrots Dried by Three Different Driers, J. Food Eng., 62, 305-313.
- Qing-Guo, H., Min, Z., Mujumdar, A.S., Wei-Hua, D. ve Jin-Cai, S., 2006. Effects of Different Drying Methods on The Quality Changes of Granular Edamame, Dry. Technol., 24, 1025–1032.
- Queiroz M.R. ve Nebra S.A., 2001. Theoretical and Experimental Analysis of The Drying Kinetics of Bananas, J. Food Eng., 47, 127-132.
- Quirijns, E.J., Boxtel, A.J.B., Loon, W.K.P ve Straten G., 2005. Sorption Isotherms, GAB Parameters and Isotheric Heat of Sorption, J. Sci. Food Agr., 85, 1805-1814.
- Rahman, M. S., Perera, C. O. ve Theband, C., 1998. Desorption Isotherm and Heat Pump Drying Kinetics of Peas, Food Res. Int., 30, 485–491.



- Rajkumar, P., Kulanthaisami, S., Raghavan, G.S.V., Gariepy, Y. ve Orsat, V., 2007. Drying Kinetics of Tomato Slices in Vacuum Assisted Solar and Open Sun Drying Methods, Dry. Technol., 25, 1349-1357.
- Ramallo, L.A., Pokolenko, J.J., Balmaceda, G.Z. ve Schmalko, M. F., 2001. Moisture Diffusivity, Shrinkage, and Apparent Density Variation During Drying of Leaves at High Temperatures, Int. J. Food Prop., 4, 163–170.
- Ratti, C. ve Crapiste, G.H., 1995. Determination of Heat Transfer Coefficients During Drying of Foodstuffs, J. Food Process Eng., 18, 41-53.
- Ratti, C. ve Mujumdar, A., S., 1997. Solar Drying of Foods: Modeling and Numerical Simulation, Sol. Energy, 60, 3-4, 151-157.
- Rizvi, S.S.H., 1986. Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. In: “Engineering Properties of Foods.” (Edited By M.A. Rao ve S.S.H. Rizvi), Marcel Dekker, New York.
- Roberts, J.S., 1999. Understanding The Heat and Mass Transfer of Hygroscopic Porous Materials, Doktora Tezi, The State University Of New Jersey, Food Science, New Brunswick, New Jersey.
- Roman, A.D., Herman-Y-Lara, E., Salgado-Cervantes, M.A. ve Garcia-Alvarado, M.A., 2004. Food Sorption Isotherms Prediction Using The Ross Equation, Dry. Technol., 22, 8, 1829–1843.
- Sacilik, K. ve Elicin, A.K., 2006. The Thin Layer Drying Characteristics of Organic Apple Slices, J. Food Eng., 73, 281-289.
- Sankat, C.K., Castaigne, F. ve Maharaj, R., 1996. The Air Drying Behaviour of Fresh and Osmotically Dehydrated Banana Slices, Int. J. Food Sci. Tech., 31, 123-135.
- Saravacos, G.D. ve Charm, S.E., 1962. A Study of The Mechanism of Fruit and Vegetable Dehydration, Food Tech., 16, 1, 78-81.
- Schmalko, M.E. ve Alzamora, S.M., 2005. Modelling The Drying of A Twig of “Yerba Mate” Considering as A Composite Material Part II: Mathematical Model, J. Food Eng., 67, 267–272.
- Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G. ve Wijesinghe, B., 2003. Influence of Shapes of Selected Vegetable Materials on Drying Kinetics During Fluidized Bed Drying, J. Food Eng., 58, 277-283.
- Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L. ve Hamdy, M. Y., 1980. A Model For Ear Corn Drying, Transactions of The ASAE, 23, 5, 1261–1265.
- Sherwood, T.K., 1929. The Drying of Solids-I, Ind. Eng. Chem., 21, 1,12-16

- Simal, S., Deya, E., Frau, M. ve Rossello, C., 1977. Simple Modelling of Air Drying Curves of Fresh and Osmotically Pre-Dehydrated Apple Cubes, J. Food Eng., 33, 139-150.
- Simal, S., Femenia, A., Carcel, J.A. ve Rossello, C., 2005. Mathematical Modelling of The Drying Curves of Kiwi Fruits: Influence of The Ripening Stage, J. Sci. Food Agr., 85, 425-432.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C. ve Rossello, C., 2004. Use of Exponential, Page's and Diffusional Models to Simulate The Drying Kinetics of Kiwi Fruit, J. Food Eng., 66, 323-328.
- Simal, S., Femenia, A., Pascual, P.G. ve Rossello, C., Simulation of Drying Curves of A Meat-Based Product: Effect of The External Resistance to Mass Transfer, J. Food Eng., 58 (2003) 193-199.
- Simal, S., Rossello, C., Berna, A. ve Mulet, A., 1998a. Drying of Shrinking Cylinder-Shaped Bodies, J. Food Eng., 37, 423-435.
- Singh, B. ve Gupta, A.K., 2007. Mass Transfer Kinetics and Determination of Effective Diffusivity During Convective Dehydration of Pre-Osmosed Carrot Cubes, J. Food Eng., 79, 459-470.
- Small, J., 1935. The Average and Local Rates of Heat Transfer from The Surface of A Hot Cylinder in A Transverse Stream of Fluid, Philosophical Magazine, 7, 49, 251-260.
- Sogi, D.S., Shivhare, U.S., Garg, S.K. ve Bawa A.S., 2003. Water Sorption Isotherm and Drying Characteristics of Tomato Seeds, Biosyst. Eng., 84, 3, 297-301.
- Srikiatden, J. ve Roberts, J.S., 2006. Measuring Moisture Diffusivity of Potato and Carrot (Core And Cortex) During Convective Hot Air and Isothermal Drying, J. Food Eng., 74, 143-152.
- Suarez, C., Viollaz, P. ve Chirife, J., 1980. Kinetics of Soybean Drying, In: "Drying'80." (Edited by A. S. Mujumdar), Hemisphere, Washington, D.C.
- Sun, Z.F., 2001. Numerical Simulation of Flow in An Array of in-Line Blunt Boards: Mass Transfer and Flow Patterns, Chem. Eng. Sci., 56, 1883-1896.
- Suresh, H.N., Narayana, P.A.A. ve Seetharamu, K.N., 2001. Conjugate Mixed Convection Heat and Mass Transfer in Brick Drying, Heat Mass Trans., 37, 205-213.
- Szafran, R.G. ve Kmiec, A., 2004. CFD Modeling of Heat and Mass Transfer in A Spouted Bed Dryer, Ind. Eng. Chem. Research, 43, 1113-1124.
- Timoumi, S. ve Zagrouba, F., 2005. Water Sorption and Dehydration Kinetics of Tunisian Rosemary Leaves, Desalination, 185, 517-521.
- Tiwari, G.N., Kumar, S. ve Prakash, O., 2004. Evaluation of Convective Mass Transfer Coefficient During Drying of Jaggery, J. Food Eng., 63, 219-227.

- Togrul, I. T. ve Pehlivan, D., 2002. Mathematical Modeling of Solar Drying of Apricots in Thin Layers, J. Food Eng., 55, 3, 209–216.
- Toğrul, H., 2006. Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot, J. Food Eng., 77, 610-619.
- Topuz, A., Gur, M. ve Gul, M.Z., 2004. An Experimental and Numerical Study of Fluidized Bed Drying of Hazelnuts, Appl. Therm. Eng., 24, 1535-1547.
- Tubitak Gıda Bilimi ve Teknolojisi Enstitüsü, Fındıklarda Aflatoksin Oluşumuna Etki Eden Faktörlerin ve Önleyici Tedbirlerin Belirlenmesi Projesi, Tubitak Sonuç Raporu, Mayıs 2002 – Mayıs 2005
- URL-1, <http://www.kobifinans.com.tr/tr/sector/011302/10198>, Türkiye’de Sebze Meyve Üretimi, 31 Ocak 2008
- URL-2, [http://www.tb-yayin.gov.tr/basili/2002/tarimda\\_insan\\_sagligi\\_1\\_orta.htm](http://www.tb-yayin.gov.tr/basili/2002/tarimda_insan_sagligi_1_orta.htm), Kırmızı Biberde Aflatoksin, 31 Ocak 2008.
- URL-3, [http://www.tarim.gov.tr/arayuz/10/icerik.asp?efl=uretim/bitkisel/bitkisel.htm&curdir=%5curetim%5cbitkisel&fl=yetistiricilik\\_bilgi/kivi/kivi.htm](http://www.tarim.gov.tr/arayuz/10/icerik.asp?efl=uretim/bitkisel/bitkisel.htm&curdir=%5curetim%5cbitkisel&fl=yetistiricilik_bilgi/kivi/kivi.htm), Kivi Yetiştiriciliği. 14 Aralık 2007.
- Van Arsdel, W.B., Copley, M.J. ve Morgan, A.I., 1963, Food Dehydration, AVI Publishing, Co., Westport, CT.
- Varadharaju, N., Karunanidhi, C. ve Kailappan, R., 2001. Coffe Cherry Drying : A Two-Layer Model, Dry. Technol., 19, 3-4, 709-715.
- Vega, A., Fito, P., Andres, A. ve Lemus, R., 2007. Mathematical Modeling of Hot-Air Drying Kinetics of Red Bell Pepper (Var. Lamuyo), J. Food Eng., 79, 1460-1466.
- Veganas, G.K. ve Marinos-Kouris, D., 1991. Drying Kinetics of Apricots, Dry. Technol., 9, 3, 735-752.
- Velic, D., Planinic, M., Tomas, S. ve Bilic, M., 2004. Influence of Airflow Velocity on Kinetics of Convection Apple Drying, J. Food Eng., 64, 97-102.
- Wadsö, L., Svennberg, K. ve Dueck, A., 2004. An Experimentally Simple Method for Measuring Sorption Isotherms, Dry. Technol., 22, 10, 2427-2440.
- Wang, C. Y. ve Singh, R. P., 1978. Use of Variable Equilibrium Moisture Content in Modeling Rice Drying, ASAE Paper 78-6505, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
- Wang, N. ve Brennan, J.G., 1995. A Mathematical Model of Simultaneous Heat and Moisture Transfer During Drying of Potato, J. Food Eng., 24, 47-60.
- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. ve Hu, X., 2007. Mathematical Modeling on Hot Air Drying of Thin Layer Apple Pomace, Food Res. Int., 40, 39-46.

- Watson, E. L. ve Bhargava, V. K., 1974. Thin Layer Studies on Wheat, Can. Agr. Eng., 16, 18-22.
- Whitaker, T., Barre, H. J. ve Hamdy, M. Y., 1969. Theoretical and Experimental Studies of Diffusion in Spherical Bodies with A Variable Diffusion Coefficient, Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 11, 668-672.
- Wu, B., Yang, W. ve Jia, C., 2004. A Three-Dimensional Numerical Simulation of Transient Heat and Mass Transfer Inside A Single Kernel During The Drying Process, Biosyst. Eng., 87, 2, 191-200.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. ve Uzun, H. I., 2001. Mathematical Modeling of Thin Layer Solar Drying of Sultana Grapes, Energy, 26, 457-465.
- Yilbas, B.S., Hussain, M.M. ve Dincer, I., 2003. Heat and Moisture Diffusion in Slab Products Due to Convective Boundary Condition, Heat Mass Trans., 39, 471-476.
- Youcef-Ali, S., Moumni, N., Desmons, J.Y., Abene, A., Messaoudi, H. ve Ray, M.L., 2001. Numerical and Experimental Study of Dryer in Forced Convection, Int. J. Energ. Res., 25, 537-553.

## ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Kaya, 1978 yılında Kayseri'nin Sarız ilçesinde doğdu. 1995 yılında Kayseri Lisesi'nden mezun oldu. 1999 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden lisans, 2001 yılında ise Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan yüksek lisans derecesini aldı. 1999-2002 yılları arasında Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2002 yılında Yüksek Öğretim Kurumu'nun 35/b maddesi uyarınca Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'na doktora öğrenimi için görevlendirildi. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Yurt içi ve yurt dışı bildirileri ve makaleleri vardır. Gerekli kaynakları kullanabilecek düzeyde İngilizce bilmektedir.