

**T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**KABİN TIPLI KURUTMA SİSTEMİNDE KURUMA  
KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE SİSTEMİN  
ENERJİ-EKSERJİ ANALİZİNİN YAPILMASI**

**Ramazan DEMİR**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN**

**YOZGAT 2019**



**T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**KABİN TIPLI KURUTMA SİSTEMİNDE KURUMA  
KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE SİSTEMİN  
ENERJİ-EKSERJİ ANALİZİNİN YAPILMASI**

**Ramazan DEMİR**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN**

**YOZGAT 2019**



## **TEZ BEYANI**

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Ramazan DEMİR

# KABİN TIPLİ KURUTMA SİSTEMİNDE KURUMA KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE SİSTEMİN ENERJİ-EKSERJİ ANALİZİNİN YAPILMASI

**RAMAZAN DEMİR**

**Yozgat Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**2019; Sayfa: 213**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN**

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, kapalı çevrimli ve kabin tipli bir konvektif kurutma sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem temel olarak tel kafesli kurutma kabini, soğutma-nem alma bölümü ve ısıtma bölümünden oluşmaktadır. Bu sistemde 100'er gramlık elma, kayısı ve patates numuneleri kurutulmuştur. Kurutma işlemi;  $V_1=0,2$  m/s,  $V_2=0,3$  m/s,  $V_3=0,4$  m/s,  $V_4=0,5$  m/s,  $V_5=0,6$  m/s,  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızları ve  $T_1=30$  °C,  $T_2=40$  °C,  $T_3=50$  °C,  $T_4=60$  °C,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklıkları şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyden elde edilen ham veriler işlenmiş ve kurutma kinetiğine ait parametreler bu veriler yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan veriler yardımıyla literatürde en çok rastlanan Kuruma Modelleri kullanılarak MATLAB programında optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda ürünler için en iyi sonuç veren model ve kurutma şartları  $R^2$  ve RMSE değerlerine bakılarak belirlenmiştir. Bu modeller ve kurutma şartları: elma için; Midilli ve ark.,  $V_5=0,6$  m/s,  $T_2=40$  °C, kayısı için; Verma ve ark.,  $V_3=0,4$  m/s,  $T_3=50$  °C, Patates için; Midilli ve ark.,  $V_5=0,6$  m/s,  $T_2=40$  °C olarak belirlenmiştir. Ürünler için en iyi sonuç veren modeller ve optimum kurutma şartları göz önünde bulundurduğunda elma için;  $NO=0,319$ ,  $KH=0,023$  m/s,  $Def=4,73 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, kayısı için;  $NO=0,633$ ,  $KH=0,022$  m/s,  $Def=1,26 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, patates için;  $NO=0,273$ ,  $KH=0,016$  m/s,  $Def=9,82 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, değerleri ortaya çıkmıştır. Kurutma kinetiği çalışması yanında konvektif kurutma sisteminin enerji-ekserji analizi de yapılmıştır. Ürünler için en iyi sonuç veren modeller ve optimum kurutma şartları dikkate alınarak kurutma kabini için enerji-ekserji sonuçları: elma için;  $\dot{Q}_{N\dot{C}O}=67,93$  gr-su/kW-h,  $COP=14,65$ ,  $COP_{Ex}=0,89$ ,  $Ex_{yo}=0,101$  kW, kayısı için;  $\dot{Q}_{N\dot{C}O}=39,41$  gr-su/kW-

h, COP =9,77 COP<sub>Ex</sub> =0,83, Ex<sub>yo</sub> =0,355kW, patates için; ÖNÇÖ=70,18 gr-su/kW-h, COP =14,56 COP<sub>Ex</sub> =0,86, Ex<sub>yo</sub> =0,00064 kW olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kurutma kinetiği, Enerji-ekserji analizi, Matematiksel modelleme



**INVESTIGATION OF DRYING KINETICS IN THE CABINET TYPE  
DRYING SYSTEM AND THE ENERGY-EXERGY PERFORMANCE  
ANALYSIS OF THE DRYER**

**RAMAZAN DEMİR**

**Yozgat Bozok University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering  
Master of science Thesis**

**2019; Page: 213**

**Thesis Supervisor: Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN**

**ABSTRACT**

In this thesis, a closed loop and cabinet type convective drying system is designed. This system consists mainly of wire mesh drying cabinet, cooling-dehumidifying section and heating section. In this system, 100 grams of apple, apricot and potato samples were dried. Drying process was performed under the following conditions. Drying air velocities:  $V_1=0,2$  m/s,  $V_2=0,3$  m/s,  $V_3=0,4$  m/s,  $V_4=0,5$  m/s,  $V_5=0,6$  m/s,  $V_6=0,7$  m/s and drying air temperatures:  $T_1=30$  °C,  $T_2=40$  °C,  $T_3=50$  °C,  $T_4=60$  °C,  $T_5=70$  °C. The raw data obtained from the experiment were processed and parameters of drying kinetics were calculated with the help of these data. With the help of the calculated data, optimization studies were performed in MATLAB program by using the most common Drying Models in the literature. As a result of this study, the best model and drying conditions for the products were determined by examining  $R^2$  and RMSE values. These models and drying conditions were determined as Midilli et al.,  $V_5 = 0.6$  m / s,  $T_2 = 40$  °C: for apples; Verma et al.,  $V_3 = 0.4$  m / s,  $T_3 = 50$  °C for apricot; Midilli et al.,  $V_5 = 0.6$  m / s,  $T_2 = 40$  °C for potatoes. Considering the models that give the best results for the products and optimum drying conditions, the following results were obtained: For apples;  $MR = 0.319$ ,  $DR = 0.023$  m/s,  $Deff = 4.73 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s; for apricot;  $MR = 0.633$ ,  $DR = 0.022$  m/s,  $Deff = 1.26 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, for potatoes;  $MR = 0.273$ ,  $DR = 0.016$  m/s,  $Deff = 9,82 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. In addition to the drying kinetics study, energy-exergy analysis of the convective drying system was



performed. Energy-exergy results for the drying cabinet, considering the models that give the best results for the products and optimum drying conditions, are as follows: For apples; SMER = 67.93 g-water/kW-h, COP = 14.65, COP<sub>Ex</sub> = 0.89, Ex<sub>loss</sub> = 0.110 kW, for apricot; SMER = 39.41 g-water/kW-h, COP = 9.77 COP<sub>Ex</sub> = 0.83, Ex<sub>loss</sub> = 0.355kW, for potatoes; SMER= 70.18 g-water/kW-h, COP = 14.56 COPE<sub>x</sub> = 0.86, Ex<sub>loss</sub> = 0.00064 kW.

**Keywords:** Drying kinetics, Energy-exergy analysis, Mathematical modeling



## TEŞEKKÜR

Bu alıŐma sũresince özellikle kıymetli grũŐlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Mevlũt ARSLAN'a, tez jũrisinde yer alarak değerli katkılarını sunan Sayın Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN ve Dr. ÖĞr. Őyesi Halil ATALAY'a, deney dũzeneĐinin kurulmasında katkısı bulunan Sistem Klima Anonim Őirketine, manevi desteklerinden dolayı değerli mesai arkadaŐlarım, çalıŐmam boyunca beni bũyũk bir sabır ve özveri ile destekleyen eŐim BũŐra DEMİR'e, sevgili oğullarım mer Furkan DEMİR ve Osman Enes DEMİR'e, yaŐamım boyunca maddi-manevi hep yanımda olan AİLEME teŐekkũrũ bir borç bilirim.

Ramazan DEMİR

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xv
KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ.....	xx
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Kurutmanın Önemi .....	1
1.2 Kurutmanın Tarihçesi .....	2
1.3 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	4
1.3.1 Amaç.....	4
1.3.2 Kapsam .....	5
1.4 Literatür Araştırması.....	7
1.4.1 Kurutma Kinetiği ile İlgili Çalışmalar.....	7
1.4.2 Kurutma Modelleri ile İlgili Çalışmalar .....	10
1.4.3 Enerji ve Ekserji Analizi ile İlgili Çalışmalar.....	13
<b>2. KURUTMA VE KURUTMA TEORİSİ .....</b>	<b>15</b>
2.1 Kurutma ve Kurutma Sistemi .....	15
2.2 Kurutma Yöntemleri .....	17
2.3 Kurutma Prensibi .....	19
2.4 İçerdiği Nem Tipine Göre Kurutma Maddelerin Sınıflandırılması .....	20
2.4.1 Higroskopik Olmayan Maddeler .....	20
2.4.2 Higroskopik Maddeler .....	21

2.5	Kurutmanın Statiği.....	21
2.5.1	Denge Bağıl Nemi .....	22
2.5.2	Sorbsiyon İzotermi ve Nemin Ürüne Bağlanması.....	23
2.6	Kurumanın Kinetiği .....	26
2.6.1	Kurutma Evreleri .....	28
2.6.2	Ürün Nem İçeriği ve Büzülme.....	32
2.6.3	Kuruma Hızını Etkileyen Faktörler .....	34
2.7	Kurutma Sistemleri .....	34
2.7.1	İletimle Kurutma.....	35
2.7.2	Sıcak Havalı (Konveksiyon) Kurutucular .....	36
2.7.3	Işınım ile Kurutma.....	37
2.7.4	Vakum Kurutucular .....	37
2.7.5	Dondurarak Kurutma.....	38
2.7.6	Mikrodalgalı Kurutucular .....	39
2.7.7	Dielektrik Kurutma.....	40
2.7.8	Ozmotik Kurutma .....	40
2.8	Kurutma Sistemlerinin Seçimi.....	40
<b>3.</b>	<b>TEORİK ANALİZ.....</b>	<b>42</b>
3.1	Tanım ve Kavramlar .....	42
3.1.1	Kurutulacak Ürüne ait Tanım ve Kavramlar .....	42
3.1.1.1	Ürünün Gözenekliliği .....	42
3.1.1.2	Ürün Nem İçeriği.....	42
3.1.1.3	Ürün Nem Oranı .....	43
3.1.1.4	Kuruma Hızı .....	43
3.1.2	Nemli Hava (Kurutma Havası) ile İlgili Tanım ve Kavramlar.....	44
3.1.2.1	Özgül Nem.....	44

3.1.2.2	Bagıl Nem .....	44
3.1.2.3	Buhar Basıncı.....	45
3.1.2.4	Mutlak Nem .....	45
3.1.2.5	Kuru Termometre Sıcaklığı .....	45
3.1.2.6	Yaş Termometre Sıcaklığı .....	45
3.1.2.7	Çiğ Noktası Sıcaklığı .....	45
3.1.2.8	Nemli Havanın Entalpisi.....	45
3.1.2.9	Nemli Havanın Özgül Isısı .....	46
3.2	Kurutma Prosesinin Psikrometri Diyagramları Üzerinde Gösterilmesi.....	47
3.3	Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri.....	49
3.3.1	Korunum Denklemleri Kütlenin Korunuyla İlgili Denklemler .....	49
3.3.1.1	Kütlenin Korunumu Denklemi .....	49
3.3.1.2	Enerjinin Korunumu Denklemi .....	49
3.3.1.3	Genel Ekserji Denklemi.....	49
3.3.2	Isıtma Bölümü Kontrol Hacmi İçin Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri	50
3.3.3	Kurutma Kabini Kontrol Hacmi İçin Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri .....	52
3.3.4	Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri .....	64
3.3.5	Kurutma Sistemi Performans Tesir Katsayıları.....	66
3.3.5.1	Isıtma Bölümü Performans Denklemleri .....	66
3.3.5.2	Kurutma Kabini Bölümü Performans Denklemleri .....	66
3.3.5.3	Soğutma Bölümü Performans Denklemleri.....	67
3.3.5.4	Sistemin Enerji ve Ekserji Performans Denklemleri .....	68
3.3.5.5	Sistemin Özgül Nem Çekme Oranı Denklemi.....	68
3.4	Difüzyon Katsayısının Hesaplanması .....	69
3.5	Belirsizlik (Hata) ve Regresyon (Doğruluk) Analizi.....	70

3.5.1	Hata ve belirsizlik .....	70
3.5.2	Regresyon (Doğruluk) Analizinde Kullanılan Denklemler .....	73
<b>4.</b>	<b>MATERYAL VE METOD (DENEYSEL ÇALIŞMA).....</b>	<b>75</b>
4.1	Deneyde Kullanılan Ürünler .....	75
4.1.1	Deneyde Kullanılan Ürünler ve Hazırlanışları .....	75
4.1.2	Ürün Başlangıç Neminin Belirlenmesi ve Kuru Madde Tayini .....	76
4.2	Deney Düzeneği.....	76
4.2.1	Deney Düzeneğinin Kurulması ve Tanıtılması.....	77
4.2.2	Deney Düzeneğini Oluşturan Bölümler ve Bu Bölümlerin Tanıtılması..	78
4.2.3	Deney Düzeneğinde Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Bunların Tanıtılması .....	80
4.2.4	Deney Düzeneğinin Çalıştırılması ve Deney İçin Hazır Hale Getirilmesi .....	84
4.2.5	Deney Düzeneğinde Yapılan Ölçümler ve Deney Şartları .....	85
<b>5.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>88</b>
5.1	Ürünlere Ait Modelleme Çalışmaları, Modellere ait Katsayılarının Belirlenmesi ve Belirsizlik (Hata) Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	88
5.2	Elma Kurutma Sonuçlarının Tartışılması .....	92
5.2.1	Ürün Nem İçeriğinin Zamana Göre Değişimi .....	92
5.2.2	Ürün Kuruma Hızının Zamana Göre Değişimi .....	94
5.2.3	Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği ile Değişimi .....	96
5.2.4	Ürün Nem Oranının Zamana Göre Değişimi.....	98
5.2.5	Difüzyon Katsayısının Hesaplanması ve Değerlendirilmesi .....	100
5.2.6	Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Sıcaklığına ve Hızlara Göre Değerlendirilmesi .....	102
5.2.7	Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	104
5.2.7.1	Kurutma Kabini İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	105

5.2.7.2 Isıtma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..	107
5.2.7.3 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	109
5.2.7.4 Kurutma Kabini İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	111
5.2.7.5 Isıtma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .	115
5.2.7.6 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	119
5.3 Kayısı Kurutma Sonuçlarının Tartışılması .....	123
5.3.1 Ürün Nem İçeriğinin Zamana Göre Değişimi .....	123
5.3.2 Ürün Kuruma Hızının Zamana Göre Değişimi .....	125
5.3.3 Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği İle Değişimi.....	127
5.3.4 Ürün Nem Oranının Zamana Göre Değişimi.....	129
5.3.5 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması ve Değerlendirilmesi .....	131
5.3.6 Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Sıcaklığına ve Hızlara Göre Değerlendirilmesi .....	133
5.3.7 Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	135
5.3.7.1 Kurutma Kabini İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	136
5.3.7.2 Isıtma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..	138
5.3.7.3 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	140
5.3.7.4 Kurutma Kabini İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	142
5.3.7.5 Isıtma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .	146
5.3.7.6 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	150
5.4 Patates Kurutma Sonuçlarının Belirlenmesi .....	154
5.4.1 Ürün Nem İçeriğinin Zamana Göre Değişimi .....	154

5.4.2	Ürün Kuruma Hızının Zamana Göre Değişimi .....	156
5.4.3	Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği İle Değişimi .....	158
5.4.4	Ürün Nem Oranının Zamana Göre Değişimi.....	160
5.4.5	Difüzyon Katsayısının Hesaplanması ve Değerlendirilmesi .....	162
5.4.6	Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Sıcaklığına ve Hızlara Göre Değerlendirilmesi .....	164
5.4.7	Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	166
5.4.7.1	Kurutma Kabini İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	167
5.4.7.2	Isıtma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..	169
5.4.7.3	Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	171
5.4.7.4	Kurutma Kabini İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	173
5.4.7.5	Isıtma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .	177
5.4.7.6	Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	181
<b>6.</b>	<b>SONUÇLAR .....</b>	<b>185</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>192</b>
	<b>EKLER.....</b>	<b>210</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>213</b>



## TABLULAR LİSTESİ

<b>Tablo 1.1.</b> Kuruma Kinetiği Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	8
<b>Tablo 1.2.</b> Kurutma Eğrilerine Uygulanmış Matematiksel Modeller .....	11
<b>Tablo 1.3.</b> Enerji ve Ekserji Analizi Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	14
<b>Tablo 3.1.</b> Elma İçin Kurutma Sonrası Ürün Birleşenleri Oranları .....	57
<b>Tablo 3.2.</b> Kayısı İçin Kurutma Sonrası Ürün Birleşenleri Oranları .....	58
<b>Tablo 3.3.</b> Patates İçin Kurutma Sonrası Ürün Birleşenleri Oranları .....	59
<b>Tablo 3.4.</b> Elma, Kayısı ve Patatesin 100 Gram Yaş Ürün Numuneleri İçerisinde Bulunan Ürün Bileşenleri ve Oranları .....	60
<b>Tablo 3.5.</b> Elma, Kayısı ve Patatesin Yaş ve Kuru Ürün Numuneleri İçin Hesaplanan Özgül Isıları .....	60
<b>Tablo 3.6.</b> Deney Sırasında Kullanılan Ölçüm Cihazlarına Ait Toplam Belirsizlik .....	72
<b>Tablo 3.7.</b> Ürünler İçin Hesaplanan Kurutma Parametrelerine ait Toplam Belirsizlik Değerleri .....	73
<b>Tablo 4.1.</b> Elma, Kayısı ve Patatesin İçerisinde Bulunan Besin Değerleri .....	76
<b>Tablo 4.2.</b> Cihaz Listesi .....	81
<b>Tablo 4.3</b> Kurutma Sonrası Numunelere ait Kütleler .....	87
<b>Tablo 5.1.</b> Kurutma Kinetiği Matematiksel Modellenmesi .....	88
<b>Tablo 5.2.</b> Ürünler İçin Modellere Ait Hesaplanan Katsayılar ve RMSE, $R^2$ Değerler .....	91
<b>Tablo 5.3.</b> Kurutma Modellerine Göre Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları .....	104
<b>Tablo 5.4.</b> Kurutma Modellerine Göre Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları .....	135
<b>Tablo 5.5.</b> Kurutma Modellerine Göre Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları .....	166

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Gıda Maddeleri İçin Kuruma Olayının Şematik Gösterimi.....	20
Şekil 2.2. Sorpsiyon Eğrisinin Kurutmanın Statiği Açısından Anlamı .....	21
Şekil 2.3. Denge Nemi Sorpsiyon İzotermi .....	22
Şekil 2.4. Adsorpsiyon ve Desorpsiyon İzotermi . .....	24
Şekil 2.5. Tarım Ürünlerinin Kinetik Kuruma Eğrileri.....	27
Şekil 2.6. Ürün Nem İçeriğinin Kurutma Süresiyle Değişimi .....	28
Şekil 2.7. Kuruma Hızının Ürün Nem İçeriğiyle Değişimi .....	30
Şekil 2.8. Kuruma Hızının Kurutma Süresi ile Değişimi .....	31
Şekil 3.1. Elma Kurutma ve Nem Alma İşleminin Psikrometrik Diyagramda Gösterimi. ....	47
Şekil 3.2. Kayısı Kurutma ve Nem Alma İşleminin Psikrometrik Diyagramda Gösterimi. ....	48
Şekil 3.3. Patates Kurutma ve Nem Alma İşleminin Psikrometrik Diyagramda Gösterimi .....	48
Şekil 3.4. Kurutma Sisteminde Isıtma Bölümünün Şematik Gösterimi. ....	50
Şekil 3.5. Kurutma Sisteminde Kurutma Kabininin Şematik Gösterimi. ....	52
Şekil 3.6. Basit Bir Soğutma Bölümünün Şematik Gösterimi .....	64
Şekil 4.1. Ürünlerin Kurutma Öncesi Kabine Yerleştirilmesi .....	75
Şekil 4.2. Şartlandırılmış Hava ile Tel Kafesli Kabinli Kurutma Sistemi .....	78
Şekil 4.3. Tel Kafesli Kabinli Kurutma Sistemi Genel Görünüşü.....	80
Şekil 4.4. Kuruma Öncesi Numunelere ait Resimler .....	86
Şekil 4.5. Kurutma Sonrası Numunelere ait Resimler.....	86

## ŞEKİLLER LİSTESİ (Devam)

Şekil 5.1. Literatürde Yaygın Kullanılan Modellere ait (a) Elma; (b) Kayısı;(c) Patates; Ürünleri İçin Nem Oranının Kuruma Süresi ile Değişimi Grafiği .....	89
Şekil 5.2. Nem İçeriğinin Kuruma Süresi ile Değişimi .....	93
Şekil 5.3. Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi .....	95
Şekil 5.4. Nem İçeriğinin Kuruma Hızı ile Değişimi .....	97
Şekil 5.5. Nem Oranının Kuruma Süresi ile Değişimi .....	99
Şekil 5.6. Difüzyon Katsayısının Kuruma Süresi ile Değişimi .....	101
Şekil 5.7. Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği .....	103
Şekil 5.8. Kurutma Kabini Bölümü İçin $COP_{kk}$ ile Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği.....	106
Şekil 5.9. Isıtma Bölümü İçin $COP_{IP}$ ile Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği.....	108
Şekil 5.10. Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin $COP_{SM}$ ile Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği.....	110
Şekil 5.11. Kurutma Kabini Bölümü İçin $COP_{Ex,kk}$ ile Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği.....	112
Şekil 5.12. Kurutma Kabini Bölümü İçin $EX_{kk,yo}$ ile Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği.....	114
Şekil 5.13. Isıtma Bölümü İçin $COP_{Ex,IP}$ ile Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği.....	116
Şekil 5.14. Isıtma Bölümü İçin $EX_{IS,yo}$ ile Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği.....	118

## ŞEKİLLER LİSTESİ (Devam)

- Şekil 5.15.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $COP_{Ex,SM}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 120
- Şekil 5.16.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $EX_{sg,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 122
- Şekil 5.17.** Nem İçeriğinin Kuruma Süresi ile Değişimi ..... 124
- Şekil 5.18.** Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi ..... 126
- Şekil 5.19.** Nem İçeriğinin Kuruma Hızı ile Değişimi ..... 128
- Şekil 5.20.** Nem Oranının Kuruma Süresi İle Değişimi ..... 130
- Şekil 5.21.** Difüzyon katsayısının Kuruma Süresi İle Değişimi ..... 132
- Şekil 5.22.** Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 134
- Şekil 5.23.** Isıtma Bölümü İçin  $COP_{kk}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 137
- Şekil 5.24.** Isıtma Bölümü İçin  $COP_{IP}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 139
- Şekil 5.25.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $COP_{SM}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 141
- Şekil 5.26.** Kurutma Kabini Bölümü İçin  $COP_{Ex,kk}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 143
- Şekil 5.27.** Kurutma Kabini Bölümü İçin  $EX_{kk,yo}$  İle Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 145
- Şekil 5.28.** Isıtma Bölümü İçin  $COP_{Ex,IP}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 147
- Şekil 5.29.** Isıtma Bölümü İçin  $EX_{is,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 149

## ŞEKİLLER LİSTESİ (Devam)

- Şekil 5.30.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $COP_{Ex,SM}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 151
- Şekil 5.31.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $EX_{sg,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 153
- Şekil 5.32.** Nem İçeriğinin Kuruma Süresi ile Değişimi ..... 155
- Şekil 5.33.** Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi ..... 157
- Şekil 5.34.** Nem İçeriğinin Kuruma Hızı ile Değişimi ..... 159
- Şekil 5.35.** Nem Oranının Kuruma Süresi ile Değişimi ..... 161
- Şekil 5.36.** Difüzyon katsayısının Kuruma Süresi ile Değişimi ..... 163
- Şekil 5.37.** Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 165
- Şekil 5.38.** Isıtma Bölümü İçin  $COP_{kk}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 168
- Şekil 5.39.** Isıtma Bölümü İçin  $COP_{IP}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 170
- Şekil 5.40.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $COP_{SM}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 172
- Şekil 5.41.** Kurutma Kabini Bölümü İçin  $COP_{Ex,kk}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 174
- Şekil 5.42.** Kurutma Kabini Bölümü İçin  $EX_{kk,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 176
- Şekil 5.43.** Isıtma Bölümü İçin  $COP_{Ex,IP}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 178
- Şekil 5.44.** Isıtma Bölümü İçin  $EX_{is,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 180

## ŞEKİLLER LİSTESİ (Devam)

- Şekil 5.45.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $COP_{Ex,SM}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği ..... 182
- Şekil 5.46.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $Ex_{sg,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği..... 184



## KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
$C$	Özgül Isı (kJ/kgK)
$\dot{E}x_{y0}$	Ekserji Yokoluşu
$\dot{E}x_{l,k}$	Isı Yoluyla Kaybolan Ekserji Akısını
$\dot{Q}_k$	Kurutma Kabininden Kaybedilen Isı Miktarını (kW)
$\dot{E}$	Enerji Akımı (Birim Zamandaki Enerji Akımı)(kW)
$\dot{Q}$	Isı Akımı (kW)
$\dot{W}$	Güç(kW)
$\eta_{ex}$	Ekserji Verimliliği
$C_h$	Havanın Özgül Isı kJ/kg-K
$C_p$	Sabit Basınçta Özgül Isı kJ/kg-K
$D_{ef}$	Etkin Difüzyon Katsayısı (m <sup>2</sup> /s),
KH	Kurutma Hızı (kg su/kg kuru madde. dak.)
EK	Enerji Kullanımı
İP	İyileştirme Potansiyeli
$E_x$	Ekserji Akımı (kJ/s=kW),
$h$	Özgül Entalpi (kJ/kg)
$h_0$	Suyun Buharlaşma Gizli Isısını kJ/kg
$h_b$	Su Buharı Entalpisi
$h_h$	Kuru Havanın Entalpisi
L	Dilim Yarı Kalınlığı (m)
m	Madde Miktarı (kg)
$m$	Kütlesel Debi (kg/sn)
$M_0$	Ürünün İçerdiği Başlangıçtaki Su Miktarı (kg su/kg kuru madde)
$m_b$	Su Buharı Kütlesi (kg)
$M_e$	Kurutulan Ürünün Denge Nem İçeriği (kg su/kg kuru madde)
$m_h$	Kuru Hava Kütlesi (kg)
$M_{kb}$	Kuru Bazda Hesaplanan Nem İçeriğini (kg su/kg kuru madde)
$M_{km}$	Kuru Madde Miktarını (kg)

## KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ (Devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
$M_t$	t Anındaki Nem İçeriği (kg su/kg kuru madde),
NO	Ürün Nem Oranı (Birimsiz)
n	Katsayı (Birimsiz)
$\emptyset$	Bağıl Nem
ÖET	Özgül Enerji Tüketimi
ÖNÇÖ (SMER)	Özgül Nem Çekme Oranı (gr-su/kwh)
$P$	Basınç (bar, kPa)
$P_b$	Buhar Basıncı (bar, kPa)
$P_{bd}$	Doymuş Buhar Basıncı (bar, kPa)
$P_T$	Nemli Havanın Toplam Basıncı (bar, kPa)
Q	Isı Miktarı (kJ)
R	Gaz Sabiti (kJ/kg K),
$R^2$	Regresyon Katsayısı
RMSE	Tahmini Standart Hatası
s	Özgül Entropi (kJ/kgK)
T	Sıcaklık (K)
t	Zaman(s)
$T_{ç}$	Çiğ Noktası Sıcaklığı (°C)
$T_{kr}$	Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)
$T_y$	Yaş Termometre Sıcaklığı (°C)
w	Özgül Nem (kg-sb/kg-kh)
$w_R$	Belirsizlik
X	Kurutulmuş Ürün İçerisindeki Bileşenlerin Oranını
$\rho$	Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_b$	Mutlak Nem
$\chi^2$	Khi-kare
$\mathcal{V}$	Hacim
$\psi$	Akış Ekserji (kJ/kg)



## KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ (Devam)

### Alt İndisler

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
<i>b</i>	Buhar
<i>bd</i>	Doymuş Buhar
<i>ç</i>	Çıkan
<i>çğ</i>	Çiğ Noktası Sıcaklığı
<i>elek</i>	Elektrik
<i>ex</i>	Ekserji
<i>g</i>	Giren
<i>h</i>	Hava
<i>IP</i>	Isı Pompası
<i>ıs</i>	Isıtma Bölümü
<i>k</i>	Kayıp
<i>km</i>	Kuru Madde
<i>kh</i>	Kuru Hava
<i>kk</i>	Kurutma Kabini Bölümü
<i>komp</i>	Kompresör
<i>kr</i>	Kuru Termometre Sıcaklığı
<i>kü</i>	Kuru Ürün
<i>nh</i>	Nemli Hava
<i>sb</i>	Su Buharı
<i>sg</i>	Soğutma Bölümü
<i>SİS</i>	Sistem
<i>SM</i>	Soğutma Makinesi
<i>ss</i>	Soğutma Sistemi
<i>ü</i>	Ürün
<i>y</i>	Yaş Termometre Sıcaklığı
<i>yü</i>	Yaş Ürün
<i>0</i>	Ölü Nokta

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Kurutmanın Önemi

Meyve ve sebze gibi ürünleri korumanın en eski, en kolay ve en geniş yolu, bu ürünlerin kurutulmasıdır. Bu ürünlerin bozulmadan uzun süre muhafaza edilmeleri, öteden beri insanlığın uğraştığı bir konu olmuştur. Ülkemizin iklim koşullarının uygun olması nedeniyle, her çeşit meyve ve sebzenin kurutulması işlemi büyük çapta doğal koşullar altında güneşe serilerek yapılmaktadır. Bu yolla kurutulmuş ürünlerden elma, üzüm, incir ve kayısının ülke ekonomisine katkısı büyük orandadır. Bunun yanında dünya sebze pazarında ticari önemi olan patlıcan, kabak, biber, patates ve havuç vb. sebzelerin ülkemiz koşullarında kurutma potansiyeli oldukça fazladır. Ancak ülkemizin dünya kurutulmuş ürün piyasasındaki payını arttırabilmesi için daha sağlıklı koşullarda ve kaliteli kuru ürün üretilmesine önem verilmesi gerekmektedir. Dünya kuru ürün ticaretinde yer alan kurutulmuş sebzelerin % 97–98’i, kontrollü şartlarda sıcak hava ile kurutulmaktadır.

Meyve ve sebzelerin yaş olarak tüketilmelerinin yanı sıra, kurutularak değişik amaçlarla kullanılmaları, saklama koşullarının daha kolay olması ve ekonomik kazanımları nedeniyle tercih edilmekte ve uygulanmaktadır [1]. Kurutma ile sağlanan bazı faydaları aşağıdaki gibi sıralanabilir [2].

- Ürünün, ağırlık ve hacmi azalacağından dolayı ambalaj masrafları düşer, nakli ve depolanması daha kolay olur.
- Kurutulmuş ürünler tüketime kolay ve çabuk hazırlanırlar ve tüketim alanları daha geniştir.
- Ürünlerin kalite ve besin değerleri korunur ve uzun süre tüketilebilirler.
- Kuru meyve ve sebze gibi ekonomik değeri olan ürünlerin üretilmesine imkân verir ve bazı ürün artıklarının yeniden değerlendirilmesine imkân sağlar.

Yukarıdaki nedenlerden dolayı, meyve ve sebzelerin kurutulması tüm dünyada en yaygın kullanım alanı bulmuş bir uygulamadır. Yukarıda bahsedilen beklentileri

karşlamak için modern tarım ve gıda ürünlerini kurutma endüstrisi gelişmiştir. Bu endüstrinin amacı da; işçiliği azaltmak, gıda ürünlerinin kalitesini arttırmak, etkin gıda işleme ve üretimini sağlamak olmuştur.

## 1.2 Kurutmanın Tarihçesi

Kurutma, bilinen en eski gıda saklama tekniğidir ve yüzyıllardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Milattan önceki zamanlarda pek çok gıdanın kurutulduğuna dair bilgiler mevcuttur. Örneğin; M.Ö. 20000 yıllarında Rusya’da, et dilimlendikten sonra güneşte kurutulmuştur. M.Ö. 10000’li yıllarda deniz suyunun güneşte kurutulması ile tuz elde edilmiştir. Antik Mısır’da M.Ö. (2800 – 2300) elma, üzüm ve kayısı gibi meyveler güneş altında kurutulmuştur. Çok eski çağlarda Mısır’ da ürünlerin ve bitkisel ilaçların basit bir kurutma yöntemi ile elde edildiği, ilk çağlarda balığın ikiye bölünerek, etin tuzlanarak kurutulduğu bilinmektedir. İlk çağlardaki tüm ürün koruma deneyimlerinden sonra ürünleri saklamak için dört ana yöntemin kullanıldığı anlaşılmıştır. Bunlar; kurutma, dumanlama, tuzlama, turşu yapmadır [3].

Milattan sonra ise Fenikeli ve Akdenizli balıkçıların avlarını güneş altında kuruttukları bilinmektedir. Eski Mısır’da yapılan kazılar sonucunda kümbetlerin içinde kurutulmuş buğday tanelerine rastlanmıştır. Çinlilerin de çok eski zamanlardan beri çay yapraklarını kuruttukları yapılan çalışmalar sonucunda bilinmektedir [4]. Milattan sonraki yüzyıllarda Arap yarımadasında hurmanın ve Avrupa da gıda maddelerinin (özellikle incir, üzüm, et ve balığın) güneş veya rüzgâr altına serilerek kurutulduğu bilinmektedir. 15. ve 16. yüzyılda; pek çok denizci uzun seyahatler sırasında gıdalarını kurutarak saklamışlardır. Örneğin; Kolomb’un yeni keşifler için çıktığı yolculuklarda erzak olarak kurutulmuş gıdalar aldığı eski metinlerde yazılıdır [5]. 17. yüzyılda özellikle savaşlarda gıdaların uzun süreli muhafazasına gereksinim duyulduğundan, gıdaların kurutulması sanayide yerini almıştır. Fransızlar ilk fırın kurutucunun üretimini gerçekleştirmişler ve bu sayede sebze ve meyvelerin endüstriyel boyutta kurutulmasının ilk adımını atmışlardır.

Özellikle savaş dönemlerinde erzakın cephelere taşınması sırasında daha hafif olması ve daha uzun süre saklanabilmesi gibi avantajlarından dolayı kurutulmuş gıdalar

tercih edilmiş ve gıdaların kurutulması yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. İngiliz süvari birlikleri 1854–1856 yılları arasında Kırım’da iken, ülkelerinden kurutulmuş sebzeleri beraberlerinde getirmişler ve bu kurumuş gıdalarla hayatlarını idame ettirmişlerdir. Yine aynı şekilde, Kanada’dan kurutulmuş olan sebzeler Güney Afrika’daki Boer Savaşı’ndaki (1899-1902) askerleri beslemek amacıyla yollanmıştır. Bir başka örnekte ise 1. Dünya Savaşı’nda yaklaşık olarak 4500 tonluk kurutulmuş ürün Amerika’dan birliklere gönderilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri 1919 yılından itibaren endüstriyel boyutta lahana, ıspanak, şalgam, kereviz, patates, tatlı mısır, çorba karışımları ve havuç kurutmaya başlamıştır. [6].

Dünyada çıkan savaşlar ve bu savaşların uzun süre devam etmesiyle birlikte gıdaya olan ihtiyaç, insanları gıda kurutma teknolojisine yönlendirmiş ve bunun sonucunda kurutma endüstrisi gelişmeye başlamıştır. Meyve ve meyve ürünlerinin kurutulmasında 1800’lü yılların sonu ile 1900’lü yılların başında önemli bir dönüm noktası yaşanmış ve güneşte kurutmanın yerini alacak olan püskürtmeli kurutucular İkinci Dünya Savaşı’ndan önce geliştirilmiştir. Bu tür kurutucular genelde süt ürünleri ve yumurtaların kurutulmasında kullanılmıştır [7].

1900’lü yılların başlarında Amerika’da taze fasulye, lahana, havuç, kereviz, patates, ıspanak, tatlı mısır, şalgam ve çorbaya konulan sebzeler kurutulmuş olarak işlenmeye başlamıştır [8]. Ülkemizde ise endüstriyel anlamda sebze kurutmak için kurulan ilk tesis 1965 yılında hizmete girmiştir. Buna rağmen, son yıllarda Türkiye kurutulmuş sebze konusunda net bir ihracatçı ülke pozisyonuna gelmiştir. İhracatın tamamına yakını gelişmiş ülkelere gerçekleştirilmektedir. Toplam kurutulmuş sebze ihracatı 2006 yılında bir önceki yıla göre % 22,5 oranında artış göstermiştir [9].

Güneş ve rüzgârın etkisiyle gerçekleştirilen kurutma işlemi, yirminci yüzyılın ortalarında bir teknoloji dalı olarak daha fazla önem kazanmıştır. Günümüzde, gıda maddelerinin kurutulmasının nedeni yalnızca bozulmadan uzun süre saklanabilmelerini sağlamaya yönelik değildir. Aynı zamanda kurutma uygulaması ile gıda ürünlerinin ağırlık ve bazen de hacimsel azalmalarına paralel olarak, taşıma, depolama, paketleme maliyetlerinde önemli avantajlar sağlanmaktadır. Bunun yanı

sıra, çözünebilir kahve, çay, patates püresi gibi tüketime hazır gıdaların üretimini de kurutma teknolojisi ile başarmak olanaklıdır [10].

### **1.3 Tezin Amacı ve Kapsamı**

#### **1.3.1 Amaç**

Bu tez çalışmasında; kabin tipli bir konvektif kurutucuda kurutulan ürünlerin ölçülen parametreleri üzerinden ürün kuruma karakteristiklerinin araştırılması, kurutulan ürünlere ait en uygun kuruma matematik modellerinin belirlenmesi, kurutma işleminin enerji ve ekserji analizlerinin yapılması amaç edinilmiştir.

Ürünlerin homojen kuruması, renk değişiminin olmaması, yüzeyde çatlama ve sertleşme olmaması, kuru ürün kalitesini artıran önemli özelliklerdir [11]. 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, elek telinden yapılmış kafes tipli kurutma hücresinin alt kısmından sıcak hava verilerek ürünün sıcak hava ile tam buluşması sağlanmış ve sanki akışkan yatakta kurutma gerçekleşmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında ise; kapalı çevrimli kabin tipli konvektif kurutucuda kayısı, elma ve patatesin 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 kurutma havası ile yapılan kurutma işleminde, ürünün son nem içeriği istenilen seviyelere indirilemediğinden, mikroorganizmalar daha hızlı harekete geçmekte ve ürün daha çabuk bozulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan kurutma sisteminde kurutma havası sistemde kapalı çevrimde dolaşmaktadır. Çiller ünitesinde nemi alınan ve bağıl nemi düşürülen hava, fan vasıtası ile ısıtıcı serpantinlerden geçerken, ısıtılarak tekrar ikinci kez bağıl nemi

düşürülmektedir ve nem alma kapasitesi iyice artırılmaktadır. Bu olay da; kurutma verimini artırmaktadır ve dolayısı ile yukarıda bahsedilen sorunları ortadan kaldırmaktadır.

İdeal bir kurutma işlemi için, harcanması gereken enerjinin belirlenmesi ve enerji-ekserji analizleri yapılarak sistemin veriminin araştırılması önemli mühendislik problemlerinden biridir. Optimum kurutma havası koşullarının belirlenmesi, enerji maliyeti ve kurutma süresi açısından son derece önemlidir. Kapalı çevrimli bir konvektif kurutucuda, istenilen sıcaklık ve bağıl nem değerlerine erişilebilmek için, sistem içinde dolaşan kurutma havasının iklimlendirilmesi şarttır. Bu işlem için, belirli miktarda enerji harcanması gerekir. Bu atmosferik havanın sıcaklığının yükseltilmesi, sıcaklığının düşürülmesi, neminin alınması veya nem verilmesi, iklimlendirme işlemleridir. Kurutma havası koşullarının, süreç boyunca sabit kalabilmesi için, bu iklimlendirme işlemleri kurutma prosesi boyunca devam etmelidir.

Bu çalışmada, ülkemizde önemli bir yeri olan ve çok tüketilen sebze ve meyvelerin başında gelen patates, elma ve kayısı, farklı kurutma sıcaklıklarında ve farklı hava hızlarında kabin tipinde kapalı çevrimli bir konveksiyon kurutucuda kurutulmuş ve bu şartların kuruma hızına etkileri araştırılmıştır. Bunun yanında kurutma sisteminin enerji ve ekserji analizleri; her bir ürünün farklı kurutma karakteristikleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Bu çalışmada; ürünün son nem içerikleri korunarak, ürünü daha kısa sürede, daha az enerji harcayarak kurutmak ve ürün kurutma sanayisine bir kurutma sistemi kazandırmak amaç edinilmiştir.

### **1.3.2 Kapsam**

Bu çalışma kapsamında kayısı, elma ve patatesin kuruma davranışı deneysel olarak incelenmiş ve kuruma davranışları ile ilgili matematik modelleri oluşturulmuştur. Homojen kuruma elde etmek için, kurutma havasının kurutucuya optimum giriş ve çıkış şartları altında girmesi araştırılarak, homojen kuruma ve kurutma süresi açısından optimum kurutma şartları tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sırasında kurutma havasının; ürün kurutma öncesi, kurutma sonrası ve havanın çillerde soğutularak nemi alındıktan sonraki kuru termometre sıcaklıkları ve bağıl nem değerleri, kurutma süresinin (30 dakika) her beş (5) dakika zaman aralıklarında ölçülmüştür. Bununla birlikte tel kafesli kurutma kabinine yüklenen yaş ürünün her 5 dakika zaman aralıklarındaki ağırlıkları da ölçülmüştür. Alınan bu veriler kullanarak her bir ürünün kuruma eğrileri belirlenmiş ve bu kuruma eğrilerine uygun matematik modeller ve katsayıları MATLAB programında istatistiksel analiz yöntemi ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada sırası ile kurutma kabininin enerji ve ekserji analizinden başlayarak bütün komple sistemin (ısıtma bölümü, soğutma ve nem alma bölümü) enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Kurutma kabini; hava geçişini kolaylaştırmak için elek telinden tel kafes şeklinde imal edilmiş, kurutma sistemine sökülüp takılabilen sandık biçiminde bir hücredir. Kuruma hücresi olarak tel kafesli kurutma kabini seçilmesinin nedeni; kabinin altından verilen sıcak havanın kafesin içerisinde yer alan ürünün çevresini sarması ve ürünle temasının sağlanması ve bu vesile ile de homojen kurutmanın gerçekleşmesidir. Hatta kuruma zamanı ilerlerken kuruyarak ağırlığı hafifleyen ürün parçaları, kafes içerisinde hava ortamı içinde döneleyerek sanki bir akışkan yatakta kurutma işlemi de gerçekleşmektedir. Kurutma sistemindeki hava, kapalı çevrim içinde dolaşmaktadır. Çiller ünitesinde soğutulup nemi alınan hava tekrar ısıtıcı serpantinlerde ısıtılıp kurutma bölümüne bir fan vasıtası ile gönderilmesiyle kapalı çevrim tamamlanmaktadır. Kapalı çevrimden amaç, kontrollü ve homojen kurutmanın sağlanmasıdır.

Deneysel çalışma kapsamında Ankara'da Sistem Klima A.Ş. tarafından yapımı gerçekleşen kapalı çevrimli kabin tipli konvektif kurutma sistemi kurulmuş, deneme çalışmaları yapılmış, sistemin arızasız çalıştığı tespit edilmiştir. Sonra şirketin kendi bünyesinde kurulan bu deney düzeneğinden yukarıda bahsi geçen ürünlere ait deneyler yapılarak ölçümler alınmıştır. Seçilen gıda ürünlerinin kurutulmasında, kurutma havası hızı, sıcaklığı ve bağıl neminin kuruma süresine etkisi araştırılmıştır. Bu ürünlere ait kuruma eğrileri oluşturulmuş ve bu eğrilere uygun matematik

modeller belirlenmiştir. Daha sonrada sistemin enerji ve ekserji analizleri yapılarak her bir ürün için enerji ve ekserji verimlilikleri belirlenmiştir.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; Kurutmanın Önemi ve Tarihçesi, Tezin Amacı, Kapsamı, Literatür Araştırması, İkinci bölümde; Kurutma ve Kurutma Teorisi, Üçüncü bölümde; Teorik Analiz, Dördüncü bölümde; Materyal ve Metot, Beşinci bölümde; Bulgular ve İrdeleme, Altıncı bölümde; Sonuçlar ve akabinde Kaynaklar bölümü verilmiştir.

#### **1.4 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 kaynak araştırması yapılmasına karşın; burada, yapılan tez çalışmasıyla doğrudan ilgili olan çalışmalara yer verilmiştir. Tez çalışmasıyla doğrudan ilgili olan çalışmalar aşağıdaki alt başlıklar altında gruplandırılarak incelenmiştir. Literatür çalışması; kurutma kinetiği, kurutma davranışın matematiksel modellenmesi ve kurutma sisteminin enerji-ekserji analizlerinin araştırılması gibi konuları içermektedir.

##### **1.4.1 Kurutma Kinetiği ile İlgili Çalışmalar**

Ürünün kurutma havası şartlarının, kuruma davranışı üzerine etkisinin belirlenmesine kuruma kinetiği denir. 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 yöntemine göre kuruma kinetiği üzerine yapılan çalışmalar, Tablo 1.1’de kurutulan ürün, kurutma havası şartları ve bulguları ile birlikte sunulmuştur.



**Tablo 1.1.** Kuruma Kinetiği Üzerine Yapılan Çalışmalar

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	KURUTULAN ÜRÜN	KURUTMA ŞARTLARI			BULGULAR
		V (m/s)	T (°C)	RH (%)	D <sub>ef</sub> (m <sup>2</sup> /s)
Boutelba, et al., 2019 [12]	Patates	0,7-1,5	52,69	8-14	0,928--2,88 x10-9
Sing and Talukdar, 2019 [13]	Patates	2-6	40-60	-	0,378-1,45 x10-9
Gonzalez-pelez et al. 2019 [14]	Mantar	2.0	50,65,80	-	2,6-7,2 x10-10
Yogendrasidhar, 2019 [15]	İnci darısı	1-1,3	40,50	-	6,4-1,59 x10-10
Tekgöl, 2019 [16]	Limon Kabuğu	0,5-2	50-70	-	1,32 x10-8
Yaşar, 2019 [17]	Altın Çilek	0,034 dm <sup>3</sup> /s	50,60,70	33-45	-
Mohammadi, et al., 2018 [18]	Kivi	1-1,5	45,55,65	-	2,45-7,12 x10-9
Kaveh, 2018 [19]	Patates, vd.,	0,5-1,5	40-70	-	0,13-9,76 x10-9
Majdi, et al., 2018 [20]	Elma	4-5	70,80,90	6	-
Winiczenko., et al., 2018 [21]	Elma	0,01-6	50,60,70	-	-
Younis, 2018 [22]	Sarımsak	0,75-1,25	40	-	0,58-7,66x x10-10
Gül, 2018 [23]	Mandarin	1-2	60-80	-	-
Benseddik, 2018 [24]	Kabak	2-15	40-80	-	-
Agrawal, et al., 2017 [25]	Kabak	6,7-13,6	50,60,70	-	-
Khan, et al., 2016 [26]	Patates, Elma vd.	0,7	60	-	2,25-6,52 x10-10 1,13-6,71 x10-10
Aral ve Beşe, 2016 [27]	Alıç	0,5-1,3	50,60,70	-	0,234-2,09 x10-9
Tzempelikos, 2015 [28]	Ayva	2	40-60	-	3,23-7,82 x10-10
Kumar, et al., 2014 [29]	Muz	0,5-0,9	40,50,60	-	-
Silva, 2014 [30]	Armut	1,2-2,7	30-40	-	2-4 x10-9
Golestani, et al., 2013 [31]	Elma	0,6	60-80	-	21,2-34,7 x10-10
Akpınar ve Biçer, 2002 [32]	Patates	1,0	60-70	-	-
Akpınar ve Biçer, 2003 [33]	Kabak	1,0 ve 1,5	60,70, 80	-	-
Aktaş ve Ceylan, 2008 [34]	Fındık	0,3	40	-	-
Azzouz et al., 2002 [35]	Üzüm	1,0-2,3	50-70	10-15	-
Babalıs et al., 2006 [36]	İncir	0,5-3	55-85	-	-
Babalıs ve Belessiotis, 2004 [37]	İncir	0,5-3	55-85	10	51,30-7,77 x10-10
Bozkır, 2006 [38]	Kayısı	1,1-2	35-50	-	-
Can, 2007 [39]	Kabakçekirdeği	-	40-46	-	1,23-1,43x10-6
Ceylan ve ark., 2005 [40]	Elma	2,8	40	20	-
Demir ve ark., 2004 [41]	Defne yaprağı	1,5	40-60	5-15	-
Doymaz, 2004a [42]	Beyaz dut	1,0	50	-	2,23-6,91x10-10
Doymaz, 2004b [43]	Havuç	0,5 ve 1,0	50-80	-	0,78-9,34x10-9
Doymaz, 2005a [44]	Bamya	1,0	50,60,70	8-25	-
Doymaz, 2006 [45]	Siyah üzüm	1,1	60	-	0,38-1,28 x10-9
Doymaz, 2007 [46]	Kabak	1,0	50,55,60	15-25	3,88-9,38x10-10
Doymaz, 2008 [47]	Pırasa	2,5	50 ve 70	-	-
El-Aouar et al., 2003 [48]	Papatya	1,25-3,25	40-70	-	1,03-4,78 x10-9
Erenturk ve ark., 2004 [49]	Kuşburnu	1,67-3,1	50-80	4-60	-
Ertekin ve ark., 2001 [50]	İncir	0,1-1	40-80	15-45	-

**Tablo 1.1.** Kuruma Kinetiği Üzerine Yapılan Çalışmalar (Devam)

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	KURUTULAN ÜRÜN	KURUTMA ŞARTLARI			BULGULAR
		V (m/s)	T (°C)	RH(%)	D <sub>ef</sub> (m <sup>2</sup> /s)
Gamboa-Santos ark., 2013 [51]	Havuç	2-6	40-65	-	-
Garau et al., 2006 [52]	Portakal kabuğu	2,5	30-90	-	0,81-51,10x10 <sup>-10</sup>
Giraldo-Zuniga et al., 2006 [53]	murici	1-5	50-70	-	1,28-2,91x10 <sup>-9</sup>
Göğüş ve Maskan, 2006 [54]	Zeytin posası	1-5	60-80	-	1,84-3,94x10 <sup>-7</sup>
Guine ve Fernandes, 2006 [55]	Kestane	-	70-90	-	4,45-7,65x10 <sup>-9</sup>
Guine, 2006 [56]	Armut	-	30-50	-	1,18-2,35x10 <sup>-9</sup>
Hatamipour ve Mowla, 2003 [57]	Mısır ve Fasulye	2,15-2,75	40-70	-	0,48-7,14x10 <sup>-6</sup>
Hawlder et al.,1991 [58]	Domates	0,4 – 0,8	40-80	-	1,52- 9,12 x10 <sup>-10</sup>
Iguaz et al., 2003 [59]	Pirinç	0,75-2,5	5-32	-	3-8,x10 <sup>-5</sup>
İsaeva, 2007 [60]	Kayısı	1,5-3,5	40-70	-	-
Kaleemullah ve Kailappan, 2006 [61]	Kırmızı Biber	0,4	50-65	-	3,78-7,10 x10 <sup>-9</sup>
Kashaninejad et al., 2007 [62]	Fıstık	0,5-1,5	25-70	5-20	0,54- 9,29x10 <sup>-10</sup>
Kashaninejad ve Tabil, 2004 [63]	Semizotu	1.1	35-120	5	-
Kaya ve ark., 2007a [64]	Ayva	0,2-0,6	35-55	40-70	0,65-6,92x10 <sup>-10</sup>
Kaya ve ark., 2007b [65]	Elma	0,2-0,6	35-55	40-70	0,48-2,02x10 <sup>-10</sup>
Kingsly et al., 2007 [66]	Şeftali	0,8	55-65	-	3,04-4,41x10 <sup>-9</sup>
Kiranoudis et al., 1997 [67]	Elma, Kivi	1-4,5	50-70	15-40	-
Krokida et al., 2003 [68]	Çeşitli sebzeler	1,5-2,6	65,75,85	20-40	-
Lahsasni et al., 2004a [69]	İncir	0,02-0,08	50,55,60	-	-
Lahsasni et al., 2004b [70]	Armut	0,6-1,7	50,55,60	-	-
Leeratanarak et al., 2006 [71]	Patates cipsi	0,8	70-90	-	-
Lopes et al., 2007 [72]	Yosun türü	1,5	40-60	-	8,1-18,80x10 <sup>-8</sup>
Lopez et al., 1998 [73]	Fındık	0,5-2	30-70	25-40	1,48-12,42x10 <sup>-9</sup>
Lopez et al., 2000 [74]	Marul	0,6	50-150	-	6,03-31,5x10 <sup>-9</sup>
Madamba et al., 1996 [75]	Sarımsak	0,5-1	50-90	8-24	-
Margaris ve Ghiaus, 2007 [76]	Üzüm	-	65	-	6,44x10 <sup>-10</sup>
Marquez et al., 2006 [77]	Kuşburnu	1-5	50-80	5-50	0,75-3,38 x10 <sup>-10</sup>
Maskan et al., 2002b [78]	Pestil	0,86-1,82	55-75	-	3-37,60x10 <sup>-11</sup>
Mengeş, 1999 [79]	Kayısı, Elma	1-3	60,70,80	-	-
Mengeş, 2005 [80]	Patates	2	60,70,80	-	-

**Tablo 1.1.** Kuruma Kinetiği Üzerine Yapılan Çalışmalar (Devam)

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	KURUTULAN ÜRÜN	KURUTMA ŞARTLARI			BULGULAR
		V (m/s)	T (°C)	RH(%)	
Mengeş ve ark., 2007a [81]	Kayısı	1-3	70,75,80	-	-
Menges ve Ertekin, 2006 [82]	Erik, Elma	1-3	60-80	-	1,20-4,55x10 <sup>-7</sup>
Mirzaee et al., 2009 [83]	Kayısı	1,0-2,0	40-80	-	1,7-11,6x10 <sup>-10</sup>
Mohapatra ve Roa, 2005 [84]	Buğday	3,7	40-60	-	1,22-2,86x10 <sup>-10</sup>
Müller, 2007 [85]	Adaçayı, Reyhan	0,2-0,6	30-90	30-70	-
Mwithiga ve Olwal, 2005 [86]	Lahana Yaprağı	1,0	30-60	-	14,9-55,9x10 <sup>-10</sup>
Orikasa vd. 2008 [87]	Kivi	1,1	40-70	2-20	-
Pahlavanzadeh et al., 2001 [88]	Üzüm	2	50-70	10-30	2,4-6,22x10 <sup>-10</sup>
Panchariya et al., 2002 [89]	Siyah çay	0,25-0,65	80-120	-	1,14-2,99x10 <sup>-11</sup>
Pathare ve Sharma, 2006 [90]	Kavun	1-1,5	30-60	-	0,25-0,32x10 <sup>-10</sup>
Sacilik ve Elicin, 2006 [91]	Elma	-	40-60	-	2,27-4,97 x10 <sup>-10</sup>
Sankat et al., 1996 [92]	Muz	0,62	40-80	-	8,8-34,8x10 <sup>-8</sup>
Senadeera et al., 2003 [93]	Fasulye, Patates	2,2	30-50	-	5-15x10 <sup>-10</sup>
Simal et al., 1997 [94]	Elma	-	30-90	-	1,98-12,67x10 <sup>-10</sup>
Simal et al., 1998a [95]	Brokoli	2,7	90	-	2,25x10 <sup>-9</sup>
Simal et al., 2004 [96]	Kivi	-	30-90	-	3-17,21 x10 <sup>-10</sup>
Simal et al., 2005 [97]	Kivi	-	40-80	-	5-11,5 x10 <sup>-10</sup>
Singh ve Gupta, 2007 [98]	Havuç	-	55-75	-	7,81-10,6x10 <sup>-10</sup>
Srikiatden ve Roberts, 2006 [99]	Havuç, Patates	1,5-3	40-70	-	5,94-13,73x10 <sup>-10</sup>
Sturm et al., 2012 [100]	Elma	2,0-4,8	35-85	-	-
Unadi et al., 2002 [101]	Domates	1,5-5,0	45-70	-	-
Vega et al., 2007 [102]	Biber	2,5	50-80	-	3,2-11,2x10 <sup>-9</sup>
Veganas ve Marinos-Kouris, 1991 [103]	Kayısı	0,5 -1,0	40 -60	-	5,2x10 <sup>-7</sup> -6,1x10 <sup>-9</sup>
Wang et al., 2007 [104]	Elma Püresi	1,2	75-105	-	-

#### 1.4.2 Kurutma Modelleri ile İlgili Çalışmalar

Kurutma modelleri baz alınarak yapılan kaynak araştırmaları sonucunda; araştırmacıların çalışmalarında yararlandıkları ve kurutma karakteristiklerini (Kurutma Nem Oranlarını) en iyi elde ettikleri matematiksel modeller ve bu modellere ait denklemler aşağıdaki Tablo 1.2’de verilmiştir.

**Tablo 1.2.** Kurutma Eğrilerine Uygulanmış Matematiksel Modeller (Devam)

Model Adı	Model Eşitliği	Araştırma Yapanlar
Newton Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Uğur, 2019 [106]
		Kılıç ve Çınar, 2019 [105]
		Ayensu, 1997 [111]
		Liu ve Bakker-Arkema, 1997 [112]
		Tiris ve ark., 1994 [113]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Aghbashlo ve ark., (2009) [114]
		Akpınar, 2006b [115]
		Al-Muhtaseb ve ark., 2010 [116]
		Demir ve ark., 2004 [41]
		Doymaz ve Pala, 2002 [117]
		Doymaz, 2004b [43]
		Doymaz, 2004c [118]
		Doymaz, 2004d [119]
		Ertekin ve Yıldız, 2004 [120]
		Ertekin ve ark., 2001 [50]
		Günhan, 2005 [121]
		Queiroz ve ark., 2004 [122]
		Tunde-Akintunde ve Ajala 2010 [123]
		Karathanos ve Belessiotis, 1999 [124]
Park ve ark., 2002 Sun ve Woods, 1994 [125]		
Geliştirilmiş Page	$MR = \exp[-kt^n]$	Ertekin ve Yıldız, 2001 [126]
		Mengeş ve ark., 2005 [127]
		Kılıç ve Çınar, 2019 [105]
		Younis, 2018 [22]
		Arıcı (2006) [128]
		Purkayastha vd. 2013 [129]
		Singh ve Pandey, 2011 [130]
		Doymaz, 2008 [47]
		Chhinnan, 1984 [131]
		Pal ve Chakraverty, 1997 [132]
Rahman ve ark., 1998 [133]		
Logaritmik	$MR = a \exp(-kt) + c$	Doymaz, 2006 [45]
		Günhan, 2005 [121]
		Sacılık, 2007 [134]
		Toğrul ve Pehlivan, 2002 [135]
		Goyal ve ark., 2007 [136]
		Doymaz, 2004c [118]
		Lahsasni ve ark., 2004a [70]
Yağcıoğlu, 1999 [137]		

**Tablo 1.2.** Kurutma Eğrilerine Uygulanmış Matematiksel Modeller (Devam)

Model Adı	Model Eşitliği	Araştırma Yapanlar
Two-term	$NO = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Babalıs ve ark., 2006 [36]
		Kumar ve ark., 2012 [138]
		Dandamrongrak ve ark., 2002 [139]
		Madamba ve ark., 1996 [75]
		Lakshmi, 2018 [110]
		Soponronnarit ve ark., 2001 [140]
Wang ve Singh	$NO = 1 + at + br^2$	Keneni, et al., 2018 [107]
		Özdemir ve Devres, 1999 [141]
		Chen ve Wu, 2001 [142]
		Panchariya ve ark., 2002 [89]
		Wang ve Singh, 1978 [143]
Verma ve ark.	$NO = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Arıcı, 2006 [102]
		Doymaz, 2005b [144]
		Doymaz., 2008 [47]
		Verma ve ark., 1985 [145]
Geliştirilmiş Henderson ve Papis	$NO = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Ertekin ve Yıldız, 2001 [126]
		Karathanos, 1999 [146]
		Karathanos ve Belessiotis, 1999 [124]
Midilli ve ark.	$NO = a \exp(-kt^n) + bt$	Toğrul ve Pehlivan, 2003 [147]
		Al-Muhtaseb ve ark., 2010 [116]
		Benseddik, 2018 [24]
		Rabha, 2017 [109]
		Arıcı, 2006 [128]
		Yogendrasasidhar, 2019 [15]
		Yaşar, 2019 [17]
		Günhan, 2005 [121]
		Menges ve Ertekin, 2007b [148]
		Ertekin ve Yıldız, 2004 [120]
Midilli ve ark., 2002 [149]		
Thompson	$t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2$	Thompson, Peart & Foster, 1968 [150]
İki terimli exponansiyel	$NO = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Pardeshi ve ark., 2009 [151]
		Sharaf-Eldeen, Blaisdell ve Hamdy, 1980 [152]
Difüzyon yaklaşımı	$NO = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Yogendrasasidhar, 2019 [15]
		Ertekin ve Yıldız, 2004 [120]
Weibull	$NO = a - b \exp(-k_0t^n)$	Uğur, 2019 [106]
		Tzempelikos, 2015 [28]
		Szychowski vd. 2018 [108]

### **1.4.3 Enerji ve Ekserji Analizi ile İlgili Çalışmalar**

Literatürlerde birçok araştırmacı tarafından yapılan ekserji-enerji analizi ile ilgili farklı çalışmalara rastlanmaktadır. Ürün kurutma sistemleri ve proseslerinin enerji-ekserji analizi konusunda yürütülen çalışmaların sayısı, ısı sistemlerin ve değişik proseslerin enerji-ekserji analizine göre daha azdır. Yine de literatür çalışması kapsamlı bir şekilde yapılmış ve konvektif kurutma sistemlerinin ekserji-enerji analizi üzerine yapılan çalışmalar detaylı incelenmiştir. İncelenen bu çalışmalara ait kurutma şartları ve çalışmalardan elde edilen bulgular Tablo 1.3’de birlikte verilmiştir.



**Tablo 1.3.** Enerji ve Ekserji Analizi Üzerine Yapılan Çalışmalar

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	KURUTULAN ÜRÜN	KURUTUCU TİPİ	KURUTMA ŞARTLARI			BULGULAR							
			Hava Akımı	T (°C)	RH(%)	Enerji Kullanım Performansı	Kurutma Süresi (saat)	COP	COP <sub>Ex</sub>	η <sub>E</sub> (%)	η <sub>Ex</sub> (%)	Ex,yo	ÖNÇÖ (Kg/kWh)
Duan, et al., 2019 [153]	Alıç	Isı Pompalı (IPK)	1,5-3	45-67,8	8,8-12	32,55 EKO (%)	2	3,45	0,1-1,05	0,9-1	0,4-0,98	0-0,13	0,93
Daş, 2019 [154]	Armut	Hava ısıtmalı güneş kolektörlü	1-1,9 (m/s)	35,45,55,65	-	55-65 EKO (%)	46,8	-	41,8-63,4	45	-	-	-
Mohammadi, et al., 2018 [18]	kivi	Isı Pompalı (IPK)	1-1,5 (m/s)	45,55,65	-	-	2,3-5,5	1,43	-	9-12	15	-	0,11-0,15
Karthikeyan and Murugavelh, 2018 [155]	Zerdeçal	Güneş Tüneli Kurutucu	0,5 (m/s)	42,2-82,8	-	9,75-33,98 EKO (%)	12	-	-	19,46	23-73	-	-
Azadbakht et al., 2017 [156]	Patates	Akışkan Yatak	3,2-9,1 (m/s)	45,50,55	-	0,033-0,037 EKO	0,08-1,75	-	-	7-15	0,039-0,08	0,233-2,006 (kJ/s)	-
Rabha, et al., 2017 [157]	Hayalet biber, zencefil	Konv. Güneş Tüneli Kurutucu	-	42-61,37-57	-	-	33-42	-	-	4-8,5	21-98, 4-94	-	8,82-18,72
Amjad, et al., 2016 [158]	Patates	Diyogonal Toplu Kurutucu	1,5 (m/s)	55,65	-	0-59 EKO (%)	20	-	-	37,56-5	41-94	0-5,38	-
Adapa and Schoenau, 2005 [159]	Ginseng ve çeşitli ürünler	Isı Pompalı (IPK)	1,6-2,1 (m/s)	30,35	10-20	-	3,3-120	-	-	22-65	-	-	0,06-0,61
Akpınar, 2004 [160]	Kırmızı Biber	Konvektif Tipi	1,5 (m/s)	55,60,70	-	1,109-18,854 EKO (%)	2,66-5	-	-	-	67,28-97,92	0,06-1,488 (kJ/kg)	-
Akpınar ve ark., 2005a [161]	Patates	Siklon Tipi	1-1,5 (m/s)	60-80	10-20	0-34,72 EKO (%)	3,33-5,33	-	-	-	32-100	0-1,243 (kJ/s)	-
Akpınar ve ark., 2006a [162]	Balkabağı	Siklon Tipi	1-1,5 (m/s)	60-80	10-20	0-56,85 EKO (%)	5,66-12	-	-	-	19,4-100	0-1,165 (kJ/s)	-
Ceylan ve ark., 2006 [40]	Kavak, Çam	Isı Pompalı (IPK)	0,8 (m/s)	40	12-54	2-10 kW (EK)	50-70	1,86-1,87	-	-	40-90	0-3,5 (kJ/kg)	0,188-0,243
Çolak ve Hepbasli, 2007a [163]	Yeşil Zeytin	Tepsili Kurutucu	0,01-0,015 (kg/s)	40,50,60,70	15	-	-	-	-	-	68,65-91,79	0,06-0,18 (kJ/s)	-
Çolak vd., 2008 [164]	Nane Yaprakları	Isı Pompalı Tepsili Kurutucu	0,01-0,05 (kg/s)	40,45,50	16	0,45-0,65 kW (İP)	8,33	-	-	-	76,03-97,24	0,0957-0,1319 (kJ/s)	-
Çolak ve Hepbasli, 2009 [165]	Makarna ve çeşitli ürünler	Toprak Kaynaklı Isı Pompalı	1,0-2,0 (m/s)	40,50,60,70	15-45	0,02-1,51 kW (İP)	3-38	-	-	-	25,7-93,22	0,1-4,34 (kJ/s)	-
Dincer ve Şahin, 2004 [166]	Kereste	Konvektif Tipi	0,5-2,5 (kg/s)	50,55,60,65,70	10-95	2,5-9,5 kJ/kg-su (ÖET)	-	-	-	-	0,05-0,158	-	-
Goyal ve Tiwari, 1999 [167]	Tarımsal Ürünler	Güneş Enerjili Kabin Tipi Kurutucu	-	30-80	-	-	24	-	-	0-24	-	-	-
Kocabayık ve Demirtürk, 2008 [168]	Nane Yaprakları	İnfrared Kabin Tipli kurutma	0,5-2,0	0,5 kW	-	37,04-106,58 MJ/kg-su (ÖET)	1-3	-	-	-	-	-	-
Kuzgunkaya ve Hepbaşlı, 2007a [169]	Defne Yapağı	TKIP ve Kabin Tipli	1,5 m/s (0,12 kg/s)	40,45,0,50	16-19	0,0149-0,0219 kW (İP)	9	-	-	-	81,35-87,48	0,0149-0,0221	-
Kuzgunkaya ve Hepbaşlı, 2007b [170]	Defne Yapağı	Toprak Kaynaklı Isı Pompalı	-	45	16	-	1	1,45-2,88	0,174-0,196	-	15,5-21,1	-	0,122
Midilli and Kucuk, 2003 [171]	Antep Fıstığı	Güneş Enerjili Kabin Tipi Kurutucu	1,23	40-60	37-62	0-58 EKO (%)	6	-	-	-	19-100	0,15-3,08 kJ/kg	-
Özdeş, 2013 [172]	Elma, Brokoli, Domates	Kabin Tipli Kurutma Sistemi	0,5-1,5	45,50,55	-	-	-	-	-	-	0,63-10,94	3,29-15,89 (kJ/s)	-
Soysal, 2000 [173]	Nane, Kantaron, Gül	Rafli Kurutma Sistemi	-	30,45,60,70	-	164-366 kJ/kg-su (ÖET)	-	-	-	-	63-71	-	-
Syahrol et al., 2002 [174]	Buğday	Akışkan Yatak	1,63-1,95	40-65	13,5-21,1	-	0,5-1,5	-	-	3,6-34	2,4-12	-	-

## 2. KURUTMA VE KURUTMA TEORİSİ

### 2.1 Kurutma ve Kurutma Sistemi

Kurutma işlemi gazlardan, sıvılardan veya katılardan su veya diğer sıvıların uzaklaştırılmasıdır. Kurutma, genel olarak bir maddenin bünyesindeki sıvıların alınması anlamına gelir. Bununla beraber kurutma teriminin en yaygın kullanılan anlamı, katı maddelerden ısı yöntemleriyle su veya uçucu diğer maddelerin uzaklaştırılması olarak ifade edilir. Ürünün belirli bir süreçte istenilen kuruluk değerlerine kontrollü olarak indirgenmesini sağlayan ısıtma, kurutma gazı temini, ürünün giriş ve çıkışı, nem alma, soğutma gibi işlemleri gerçekleştiren ünitelerin tümüne kurutma sistemi denir. Kurutma sistemleri gıda, orman ürünleri, kimya, tekstil, maden vb. endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kurutma öncesi ısı yöntemleri dışında başka yöntemler kullanarak katı maddeden suyun mümkün olduğunca uzaklaştırılması, daha ekonomik bir kurutma işlemidir. Örneğin ürünlerin mekanik yöntemler olarak tanımlanan filtreleme, presleme, santrifüjleme, çökeltme, eleme gibi işlemlerle kurutulması daha az enerji ihtiyacı ve uzaklaştırılan birim miktar su için daha az maliyet gerektirir. Kurutulacak ürün bu tip yöntemlere uygun değilse ürüne gaz akımı ile ısı transferi uygulanarak buharlaştırma yolu ile kurutma sağlanır. Transfer edilen ısı ürün içerisindeki nemin buharlaşmasına ve ortamdaki uzaklaştırılmasına harcanır. Bu kurutma işleminde ısı ve kütle transferi aynı anda gerçekleşir.

Kurutmada, kurutma gazı olarak genellikle hava kullanılır. Kurutma havası hızının ya da sıcaklığın artması; kullanılan enerji miktarının artmasına neden olur. Ürün içerisindeki nemin buharlaştırılması için verilmesi gereken enerjinin daha kısa sürede kurutma sistemine verilmesi ise, kurutma süresini azaltır. Kurutma havasının sıcaklığı, nemi ve ürün içerisindeki nem, kuruma hızını belirler. Kurutma havasının neminin azaltılması da bu kuruma hızını artırarak, kurutma süresini kısaltır.

Kurutma işleminde istenilen, malzemenin ekonomik ve az zaman diliminde, yapısını fazla değiştirmeden kurutma işleminin tamamlanmasıdır. Kurutma işlemi gerçekleşirken gıdalardaki serbest nem kısa sürede atılmakta ve kontrollü olmayan kurutma işleminden ve ürünlerdeki bağlı nemden dolayı kurutma süresi uzamaktadır.



Üründeki serbest nem ve ürün içindeki bağılı nem alınırken ürüne en uygun olan kurutma yönteminin seçimi, enerjinin etkin kullanılması ve günümüz ekoloji dengeleri açısından büyük önem taşımaktadır. Kurutma sisteminin belirlenmesinde üründen buharlaştırılan birim miktardaki nem için harcanan enerji miktarı önemli bir ölçüttür.

Kurutuculardaki sıcak hava akımı, kurutulacak üründeki nemin buharlaşması için gerekli ısıyı sağladığı gibi, oluşan buharın ortamdan uzaklaştırılmasını da gerçekleştirir. Kurutma sistemlerinde enerji kazanımı sağlamak için taze hava ve egzoz havası belirli oranlarda karıştırılarak ısıtıcıya gönderilir. Kademeli kurutma sisteminde ise bir kademedeki kurutma havası tekrar ısıtılıp bir sonraki kademedeki kurutma hacminde kullanılır. Kademeli kurutma sisteminde harcanan enerji miktarı, tek kademeli kurutma sistemindekinden azdır. Egzozdan atılan havanın enerjisinin yüksek düzeylerde olması durumunda ısı geri kazanımlı kurutma sistemi kullanılır [175].

Birçok Isı Geri Kazanımlı kurutma işlemleri uygulamalarında, kurutma havasının kurutma sisteminde yeniden (sürekli) dolaştırılması, sistemin ısı verimi artırır. Daha fazla dolaştırılan hava ile düşük ısı kaybı ve daha az dolaştırılan hava (taze hava çok) ile oluşan yüksek kuruma hızı, dolaştırılan hava oranı en uygun duruma getirilerek giderilebilir. Kurutucu içinde dolaştırılan havanın, fiziksel olarak kurutulacak üründen alınacak nemi uzaklaştırabilmesi gerekmektedir. Kurutma havasının nemi, yeniden (kapalı) çevrimden etkilendiği için, istenilen hava neminin korunması amacıyla zaman zaman analiz edilmelidir. Kullanılan kurutma havasının maksimum nem alma kapasitesi; havanın yaş termometre sıcaklığındaki doyma özgül nemi ile sisteme sağlanan havanın (kurutma havasının) çiy noktası sıcaklığındaki özgül nemi arasındaki fark verir. Havanın gerçek nem alma potansiyeli, ısı ve kütle transferi oran (hız)'larıyla hesaplanır ve her zaman maksimum ulaşılabilecek nem alma hızından daha az değerlerdedir [176].

Bir kurutma sisteminde harcanan enerji; herhangi bir yakıtın yanmasıyla, alternatif enerji kaynaklarıyla (güneş, rüzgâr vb.) jeotermal enerjiyle, elektrik enerjisi ya da

daha başka bir enerji kaynağı ile sağlanır. Kurutma için gerekli olan ısı, bu enerji kaynaklarından karşılanır ve böylece kurutma işlemi gerçekleşir. Sistemde aynı havanın dolastırılması sonucunda bağıl nemi zamanla yükselecek ve nem alma kabiliyeti azalacaktır. Bu da istenmeyen durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle sistemde aynı hava dolaştırılıyorsa, kuruma ünitesinden geçen havanın neminin bir soğutucu kullanılarak alınması gerekir. Tamamen taze hava ile çalışan sistemlerde kurutma havası ürün üzerinden geçirildikten sonra egzozdan atıldığından, bu da sistemde enerji tüketimini arttırmaktadır.

Ürünün kurutucuya yüklenmesinin ve kurutucudan boşaltılmasının kolay olması tercih nedenlerindedir. Kurutma sırasında sıcaklık, ağırlık ve nem kontrolünün daha basit ve ucuz olduğu kurutma sistemleri de daha çok tercih edilmektedir. Ürün kurutulurken sistemde kullanılan enerji miktarı da büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bu enerjinin elde edilmesi de, kullanılması da kolay olmalıdır. Sonuç olarak tercih edilen kurutma sisteminde ürünün kurutma maliyeti mümkün olduğu kadar düşük olmalı ve aynı zamanda kontrollü ve kaliteli bir kurutma yapılmalıdır.

Kurutmanın uygulandığı en yaygın alanlar; gıda, deri, kimya, tekstil ve orman ürünleri endüstrisi, tarım sektörü ve silah sanayidir. Bu alanlarda kurutma işlemi uygulanarak ürünlerin kalitelerinin iyileştirilmesi yanında, nemden korunması, hacimlerinin ve ağırlıklarının azaltılması, taşıma, depolama, işleme ve kullanım kolaylığı gibi üstünlükler kazandırılır.

## **2.2 Kurutma Yöntemleri**

Kurutma, ürünlerin içerdiği suyu belirli bir sınıra kadar buharlaştırıp üründen uzaklaşmasını sağlayan işlemdir. Gıda, tekstil, ağaç vb. gibi endüstrilerde, kurutma çok önemli bir prosestir. Büyük ölçekte enerjinin harcandığı bu proseste, ürün kalitesi ve enerji tasarrufu açısından kurutma yöntemine bağlı olarak kurutucu seçimi oldukça önemlidir. Ayrıca, çevresel etkiler ve kurutma işleminin güvenli bir şekilde devam edebilmesi de kurutucu seçiminde önem arz etmektedir. Kurutma yöntemleri genel olarak “güneşte kurutma” ve “yapay kurutma” olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır [177].

Birinci grup kurutmada ise, ısıtma işlemi yöntemi, güneş enerjisinin kullanım şekline göre yapılmıştır. Buna göre Güneşte kurutma yöntemi üç şekilde sınıflandırılmaktadır.

- Doğal sistemler: meyve, sebze ve tahıl ürünlerinin direkt güneş ışınları altında serilerek kurutulması
- Pasif sistemler: sistemde ek enerji olmadan ürünün kurutulması
- Aktif sistemler: kurulan sisteme ek enerji verilerek ürünün kurutulması

İkinci grup kurutmada yöntemlerinin esasını, kurutulacak maddedeki suyun uzaklaştırılması için gerekli ısının transfer şekli oluşturmaktadır. Buna göre yapay kurutma yönteminde üç şekilde ısı geçişi olmaktadır. Aşağıda ısı transferi mekanizmasına göre (konveksiyon, iletim, ışınım) sınıflandırılmış temel kurutma yöntemleri ile bunlardan birkaçının birlikte kullanıldığı birleşik kurutucu yöntemi verilmiştir.

- Konveksiyonla (taşınım) kurutma: ısının taşınım yolu ile kurutulacak ürüne aktarılması.
- Kondüksiyonla (iletim) kurutma: kurutulacak maddeye ısının iletim yolu ile aktarılması.
- Radyasyonla (ışınım) kurutma: ısının ışınım yolu ile ürüne transfer edilmesi.
- Birleşik mod kurutma: Isının, iletim taşınım ve ışınım yolu ile birlikte ürüne aktarılmasıdır. Örneğin Mikrodalga ve konvektif kurutma.

Diğer kurutucu yöntemleri gıda kalitesi ve enerji tasarrufu yönünden daha avantajlı olmasına rağmen, kullanılabilirliğinin kolay olması sebebiyle, gıdaların kurutulmasında yaklaşık % 90 oranında Konvektif kurutucu tercih edilmektedir [178]. Bu kurutma yönteminde kurutucu havanın özellikleri, kuruma şartları açısından önemli rol oynamaktadır. Bunlar kurutma için kullanılan kuru havanın

sıcaklığı, basıncı, özgül nemidir. Gıdalarda bulunan suyun miktarı, kendini çevreleyen havanın bağıl nemi ile ilişkilidir. Ayrıca gıdalarda bulunan su değişik fiziksel özelliklerdedir. Gıdalardaki suyun miktarı, gıdanın özelliklerine etki eden en önemli faktördür. Her gıdanın belli koşullarda ulaştığı ve çevresindeki ortama bağlı olan denge nemi, farklı ve kendine özgü olmaktadır [177].

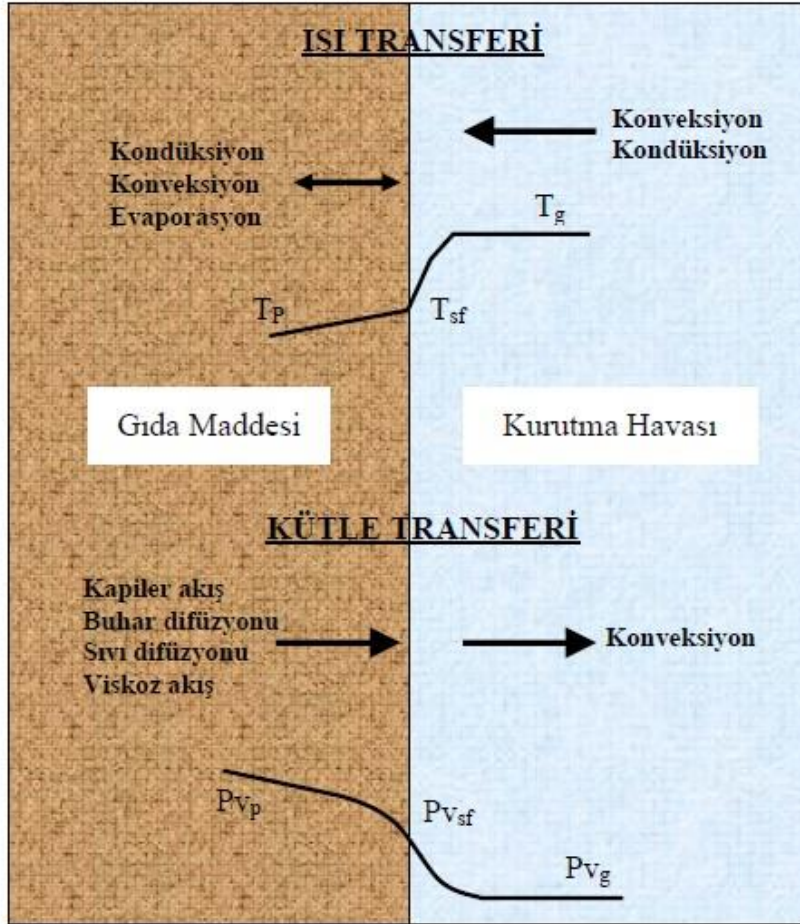
### **2.3 Kurutma Prensibi**

Kurutma terimi en genel ifadeyle; katı maddelerden ısı yöntemleriyle uçucu maddelerin giderilmesi olarak tanımlanmaktadır. Teknik anlamda ise; bir katının yüzeyine ısı transferi uygulayarak, katının bünyesinde bulunan nemin buharlaştırılması ile bir gaz akımı içine kütle transferi olayıdır. Kurutma işlemi sırasında ısı ve kütle transferini etkileyen parametreler; ortam sıcaklığı, ortamdaki havanın nemi, gıdanın yüzey alanı ve basınç olarak sıralanabilir [4]

Gıda kurutma endüstrisinde ise kurutma; eş zamanlı olarak gerçekleşen ısı ve kütle transferi sayesinde suyun gıdalardan uzaklaştırılması işlemidir. Bu eş zamanlı fiziksel olaylar gıdanın kurutulması sırasında iki şekilde gerçekleşir. Bunlardan birincisi; kurutulacak ürünün yüzeyine dış çevreden ısı transferi gerçekleşmesidir. Bu süreçte ürün, çevresindeki sıcak hava ile temas eder ve ısınmaya başlar. Bu esnada dış çevreden kurutulacak ürünün yüzeyine taşınım ve iletimle ısı geçişi ile birlikte malzeme içine ısı iletimi gerçekleşir.

İkincisi ise; katı maddenin içinden yüzeye doğru gerçekleşen kütle transferi olayıdır. Bu olay ürünün içinden yüzeye doğru difüzyonla transfer olan ve yüzeye çıkan nemin, ürünü çevreleyen çevre havasına yayılması ile devam eden kütle geçişi sürecidir. Bu süreçte yüzeydeki nem tamamıyla kurduktan sonra iç taraflarda bulunan nem, difüzyon yolu ile yüzeye taşınır ve buradan nemin buharlaşması sağlanır [179]. Kurutma şartlarına ve kurutulacak olan ürüne bağlı olarak, buharlaşma ya ürün içinde ya da yüzeyde meydana gelir. Kurutma sırasında kurutulacak malzemenin içindeki suyu buhar haline getirmek için, kurutulacak maddeye buharlaştırma gizli ısı kadar bir ısı vermek gerekir. Aktarılan ısı katının

gözeneklerinden nemin (suyun) buharlaşması için harcanır. Bu işlem Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Gıda Maddeleri İçin Kuruma Olayının Şematik Gösterimi

## 2.4 İçerdiği Nem Tipine Göre Kurutma Maddelerin Sınıflandırılması

Kurutma işlemindeki kütle transferi mekanizması, ürünlerin doğasına bağlıdır. Bünyesinde barındırdığı nemin karakteristiğine göre maddeler higroskopik ve higroskopik olmayan maddeler olarak ikiye ayrılırlar.

### 2.4.1 Higroskopik Olmayan Maddeler

Higroskopik olmayan maddeler, kum, kil, cam, seramik, vb. gibi maddelerdir. Bu maddeler bünyelerinde yapışkan su içermediklerinden dolayı, hangi ortamda

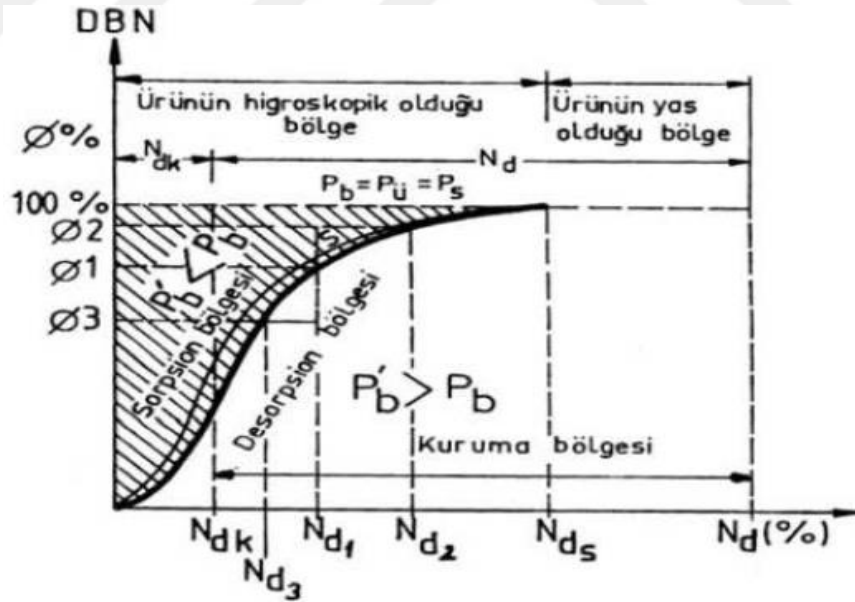
bulunurlarsa bulunsunlar nem alış verişinde bulunmazlar. Çünkü malzeme içindeki suyun kısmi basıncı, serbest halde bulunan suyun buhar basıncı birbirine eşittir [180].

#### 2.4.2 Higroskopik Maddeler

Higroskopik malzemeler ise organik ürünler vb. 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.

#### 2.5 Kurutmanın Statiği

Statik açıdan kurutmanın incelenmesi sırasında, hava ile ürün arasındaki nem dengesi, zaman dikkate alınmadan irdelenir. Denge, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi, ürünün çevre havasına nem vermesi (desorpsiyon) veya çevreden nem alması (adsorpsiyon) sonucunda oluşur.



Şekil 2.2. Sorpsiyon Eğrisinin Kurutmanın Statiği Açısından Anlamı [137]

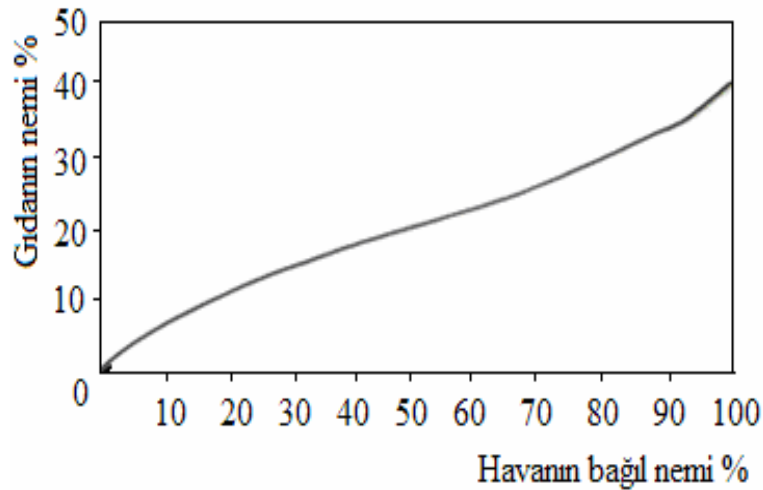
Denge durumunda havada bulunan su buharının kısmi basıncı ( $P_b$ ) ile ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ( $P_u$ ) birbirine eşittir. Ürünün yüzey sıcaklığı

yaklaşık çevre havası yaş termometre sıcaklığına eşit olduğundan ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ile ( $P_u$ ),havanın yaş termometre sıcaklığındaki su buharının kısmi buhar basıncı ( $P_b$ ) eşit alınabilmektedir ( $P_u = P_b$ ). Bu nedenle denge durumunda ürünün ulaştığı nem ( $N_d$ ), havanın kısmi buhar basıncına yani bağıl nemine ( $\phi$ ) bağlıdır [137].

Kurumakta olan bir ürünün hava ile arasındaki nem alışverişi sonucunda ulaşabileceği üst nem sınırı, o ürünün higroskopik limiti olarak tanımlanır. Yani higroskopik limit, bağıl nemin %100 olduğu şartlarda, bir ürünün ulaşabileceği en yüksek denge nemi değeridir ( $N_{ds}$ ). Ürünün higroskopik limitinden fazla nem alması, ancak serbest suyla doğrudan doğruya temas gelmesi sonucunda söz konusu olabilir.

### 2.5.1 Denge Bağıl Nemi

Denge halinde bulunan gıda maddesinin içerdiği nem miktarına denge nemi, denge halindeki ürünü çevreleyen havanın bağıl nemine de denge bağıl nemi denir. Nem içeriği bilinen bir gıda maddesi, sıcaklığı ve bağıl nemi sabit bir ortamda yeterli süre bekletilirse, havadaki su buharı basıncıyla ürünlerdeki suyun buhar basıncı dengeye erişinceye kadar nem alış verişinde bulunur.



Şekil 2.3. Denge Nemi Sorpsiyon İzotermi[146]

Denge halinde ise ürün tarafından tutulan suyun buhar basıncı ile havadaki suyun buhar basıncı eşittir. 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 [180].

Gıda maddelerinin belirli sıcaklık ve bağıl neme sahip ortamlarda ulaşacağı denge nemi değerlerinin bilinmesi, kurutma ve depolama işlemleri sırasında önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Şekil 2.3’de belli bir sıcaklık derecelerinde ve farklı bağıl nem içeren şartlarda tutularak dengeye ulaşan bir gıdada, gıdanın nem oranı ile çevre havasının bağıl nemi arasındaki ilişki görülmektedir.

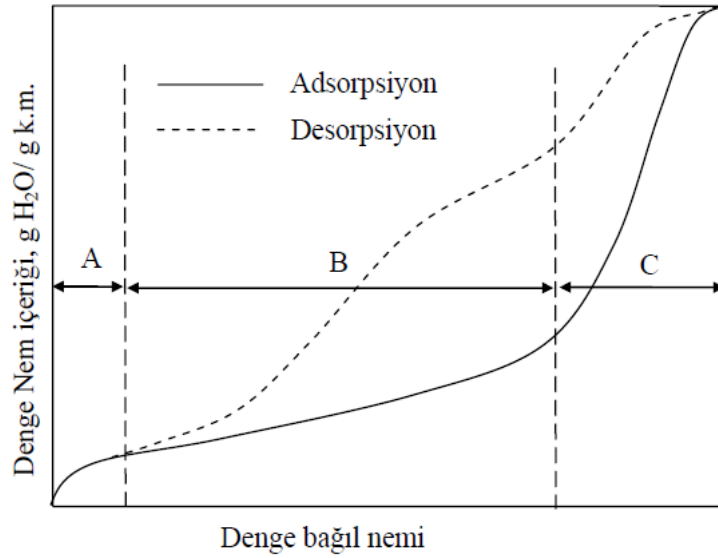
### **2.5.2 Sorpsiyon İzotermi ve Nemin Ürüne Bağlanması**

Kurutulan gıdanın içerdiği nem miktarı ortamda bulunan su buharı miktarına göre değişiklik göstermektedir. Ortamın nemi arttırıldığında ve azaltıldığında üründeki nem değişimi farklı karakteristiklere sahip olmaktadır. Ürünün içinde bulunduğu havanın nem miktarının sabit sıcaklıkta değiştirilmesi ile ürünün içerdiği nem miktarındaki değişimi gösteren eğriler sorpsiyon izotermi olarak adlandırılırlar [181]. Tipik bir ürün için sorpsiyon izotermi Şekil 2.4’de gösterilmektedir.

Konveksiyonla kurutma sisteminde, bir gıda ürününün denge nem içeriği ile kurutma havasının 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 ve bu durum sorpsiyon eğrisinin belirlenmesinde farklı sonuçlar verir. Islak ürünün (gıdanın) sabit sıcaklıktaki bir ortamda azalan oranda farklı bağıl nem değerlerinde tutulup denge nemine erişmesi beklendikten sonra, tartılıp ağırlık kaybının tespiti ile bulunan eğriye “desorpsiyon izotermi” denir. Desorpsiyon eğrisi genellikle monomoleküler su katmanının başlangıcında sona ermektedir. Buna karşın başlangıçta tam anlamıyla kuru olan aynı ürünün, sabit sıcaklıktaki bir ortamda artan oranlarda farklı bağıl nem değerlerinde



tutulup denge nemine erişmesi beklendikten sonra, tartılıp ağırlık artışının saptanmasıyla bulunan eğriye “adsorpsiyon izotermi” denir. Her ikisine beraber “sorpsiyon eğrisi” denir. Genelde çoğu ürün için bu izoterm eğrileri birbirinden farklılık göstermektedir. 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. Uygulamalarda genellikle kuru madde kullanılarak denge nem içeriği tayin edilmektedir.



**Şekil 2.4.** Adsorpsiyon ve Desorpsiyon İzotermi [178] .

Şekil 2.4’de, gıda maddelerinin sorpsiyon eğrisinin genel şekli gösterilmiştir. Desorpsiyon izotermi, adsorpsiyon izotermi ile aynı yolu izlemeyerek bir bombe yapması olayına “histeresis” denir. Sorpsiyon izotermi değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Desorpsiyon izotermi, ürünlerin kurutulma işlemini izleme ve incelemede yararlı bilgiler verirken adsorpsiyon izotermi ise kurutulmuş ürünlerin higroskopik nitelikleri ile bunların depolanma şartları hakkındaki bilgileri ortaya koymaktadır [150]. Nitekim Şekil 2.4’de görüldüğü gibi adsorpsiyon izotermi, grafiğin daha sağına düşen ve daha dik bir eğimi ile gelişen gıdalar higroskopik nitelikli gıdalardır. Buna karşın, grafiğin soluna düşen ve daha az bir eğimle gelişen

adsorpsiyon veren gıdalar ise, higroskopik değildirler ve bunlar neme karşı daha az duyarlıdır [2].

Kurutma işleminde transfer edilen nem, ürüne farklı şekillerde bağlanabilir. Kurutma işleminde, hangi periyotta (ısınma, sabit hız ve azalan hız) hangi tür nemin üründen transfer edilmekte olduğu bu tip bağlı nemlerden anlaşılabilir. Ürün içindeki suyun bağlanış şekline göre sorpsiyon eğrisi A, B ve C olarak üç bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler arasında kesin bir sınır olmadığı gibi, gıdalar için her bölgeye ait belirli genel nem değerlerinin verilmesi olanaksızdır [2].

**A bölgesinde (yapışkan nem):** Bütün gözenekli olmayan higroskopik ürünlerin içyapısında bulunan nem türüdür [183]. Bu bölgede ürünün bünyesindeki su, tek bir molekül katmanı halinde ürüne çok sıkı bir şekilde bağlanmıştır ve bu su üründe kimyasal reaksiyona giremeyecek ölçüde az miktardadır. Kurutmada bu suyun uzaklaştırılması zordur ve çoğu kez olanaksızdır. Bu tür nem, ancak kurutma havasının farklı koşullarında üründen ayrılabilir. Bu bölgede adsorpsiyon ve desorpsiyon çizgileri çakışıktır, aralarında açıklık yoktur.

**B bölgesinde (yapışkan olmayan nem):** Bu bölgede ürünün bünyesindeki su ürüne daha gevşek bağlıdır ve küçük gözeneklere hapsedilmiştir. Bu yüzden, ürün içindeki suyun buhar basıncı bulunduğu ortamın buhar basıncından farklıdır. Higroskopik malzemelerdeki yapışkan olmayan su, kurutulan üründe bulunan ve denge nem içeriğinden yüksek olan nemdir [184].

**C bölgesinde (serbest nem ve yüzey nemi):** Bu bölgedeki su ise, ürüne artık çok daha gevşek bağlıdır ve kapiler ve gözeneklerde yoğunlaşmış halde bulunan ve içinde çeşitli maddelerin çözüldüğü serbest sudur. Bu bölgede su ya büyük gözenekler içinde tutulur veya ürünün yüzeyinde ince bir film tabakası şeklinde bulunur. Bu bölgedeki su miktarının fazla olması sebebiyle reaksiyonlar hızlanır [178]. 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. Bu bölgedeki

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.

## 2.6 Kurumanın Kinetiği

Kurutma havası şartlarının, ürünün kuruma davranışı üzerine etkisinin belirlenmesine kuruma kinetiği adı verilmektedir. Kinetik açıdan kurumanın incelenmesi sırasında, ürün ile çevresindeki hava arasındaki nem alışverişi, kuruma süresince geçen zaman da dikkate alınarak irdelenir. Herhangi bir ürünün kuruması kinetik açıdan incelenirken, ürünün nemi ile kuruma süresi, kuruma hızı ile ürün nemi, kuruma hızı ile kuruma süresi ve ürün sıcaklığı ile nemi arasındaki ilişkiler dikkate alınır. Kuruma süreci içinde üç karakteristik evreyle karşılaşmaktadır. Bu evreler, ürünün ısınma evresi (IE), sabit hızla kuruma evresi (SHE) ve azalan hızla kuruma evresi (AHE) şeklinde adlandırılabilir [137].

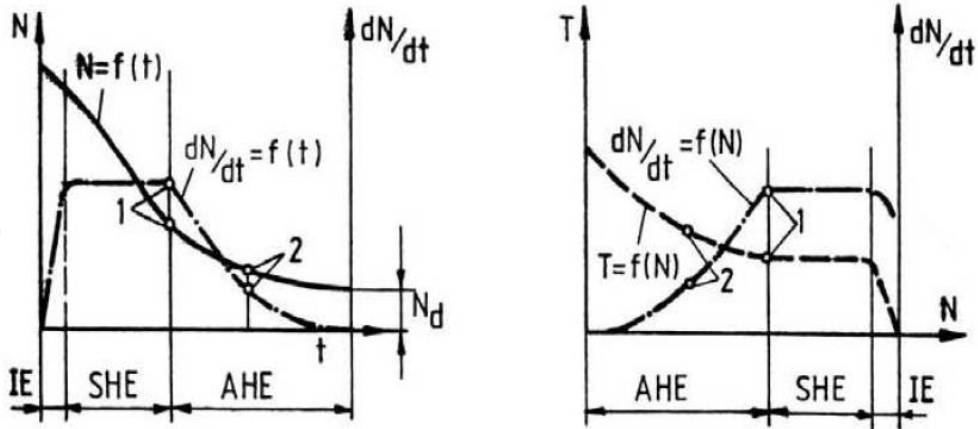
Sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, üründen yüzeye doğru bir nem taşınması söz konusu olduğundan, kurutma işlemi ilerledikçe ürünün iç katmanlarındaki nem miktarı giderek azalmaktadır. Bu durum nedeniyle, kurumakta olan ürünün yüzeyinden birim zamanda buharlaşarak ayrılan suya eşit miktarda su, artık iç kısımlardan yüzeye taşınamamaktadır. Bunun sonucunda, ürünün yüzeyinin tamamen serbest su ile kaplı olması (ıslak kalması) durumu sona ermektedir. Bu anda ürünün sahip olduğu nem düzeyine birinci kritik nem ve kuruma eğrilerinde bu durumu belirleyen noktaya ise birinci kritik nokta (BKN) adı verilmektedir.

Birinci Kritik Nokta (BKN) değerinden sonra, kuruma eğrisinin eğimi azalan yönde hızla değişim göstermektedir. Bu noktadan itibaren, kuruma hızının zaman içinde giderek azaldığı başka bir evre başlamaktadır. Bu evre, birim zaman aralıklarında buharlaşan nem miktarının bir önceki zaman dilimine göre azalma göstermesi nedeniyle, azalan hızla kuruma evresi (AHE) olarak tarif edilmektedir.

Ürünler genellikle azalan kuruma evresinde kururlar. Bu evre sonunda, ürün ile çevrenin sıcaklığı eşit duruma gelerek,  $N=f(t)$  eğrisi  $N_d$  değerine,  $dN/dt=f(N)$  eğrisi

ise sıfır değerine ulaşarak birbirlerine asimptot olmaktadır. Azalan hızla kuruma evresi (AHE) sırasında, kuruma hızı değişiminin doğrusallıktan sapmaya başladığı noktaya, ikinci kritik nokta (İKN) ve ürünün bu andaki nem değerine ise “ ikinci kritik nem” adı verilmektedir.

Kurumanın kinetiğinde, ürün ile çevresindeki hava arasındaki nem alışverişi, kuruma sürecinde geçen zaman dikkate alınarak incelenir. Kuruma, hem dış koşullar hem de katının iç yapısından etkilenir ve bu faktörlerin etki derecesi de kuruma periyoduna bağlı olarak değişir. Sabit hızda kuruma periyodunda, ısı ve kütle transferi katı-gaz ara yüzeyin deki koşullara bağlı iken, azalan hız periyodunda katı içindeki direnç önemli hale gelir. Şekil 2.5’de tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.5. Tarım Ürünlerinin Kinetik Kuruma Eğrileri [185].

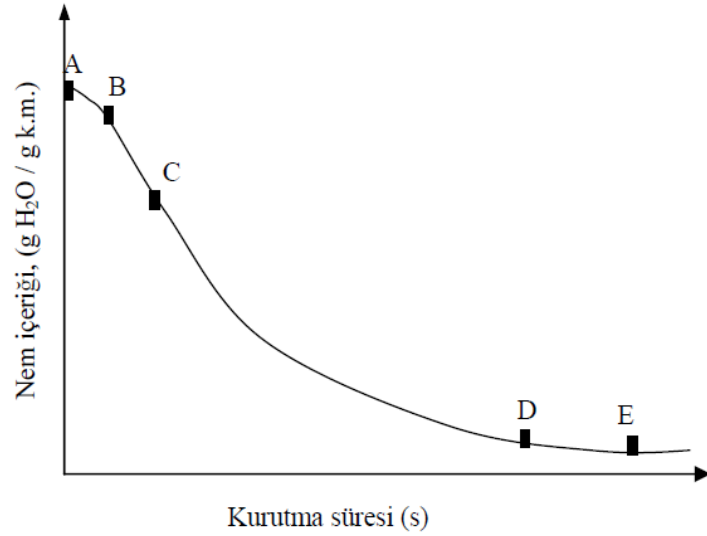
Yukarıdaki şeklin incelenmesinden anlaşılacağı üzere kuruma olayının kinetik olarak incelenmesi sırasında aşağıdaki ilişkiler dikkate alınmaktadır [137].

- Ürünün nemi ile kuruma süresi:  $N=f(t)$
- Kuruma hızı ile ürün nemi:  $dN/dt=f(N)$
- Kuruma hızı ile kuruma süresi:  $dN/dt=f(t)$
- Ürün sıcaklığı ile nemi:  $T=f(N)$

Kuruma kinetiğinin belirlenmesiyle, daha hızlı kuruma gerçekleştirileceği için harcanan enerji miktarı da azalmakta ve daha kaliteli ürünler elde edilmektedir.

### 2.6.1 Kurutma Evreleri

Kurutulan bir ürünün nem içeriği ile kurutma süresi arasındaki ilişki kuruma eğrileri ile belirlenir. Şekil 2.5'de kuruma eğrileri görülmektedir. Şekil 2.6'da, ürün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi gösterilmiştir. Kuruma amacıyla yeterli ısının bulunduğu bir ortama konan nemli bir maddenin kuruma sürecinde genel olarak üç evresi vardır. Bunlar ısınma evresi (IE), sabit kuruma hızı evresi (SHE) ve azalan kuruma hızı evresidir (AHE).

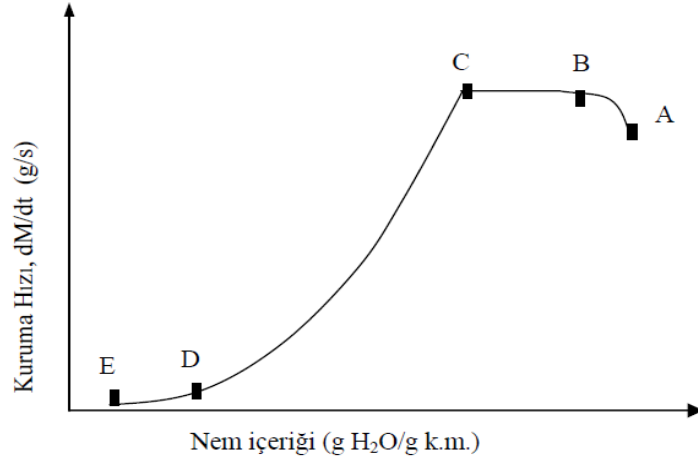


Şekil 2.6. Ürün Nem İçeriğinin Kurutma Süresiyle Değişimi [11, 154].

**A-B Bölgesi (Isınma evresi):** Kuruma başlangıcında görülen ısınma evresi (IE), kurutulacak ürünün sıcaklığı, kurutma ortamının sıcaklığı ile dengeye gelinceye kadar devam etmektedir. . Bu evrede verilen ısı miktarı, ürünün bünyesindeki suyun sıcaklığını yükseltir ve bunun sonucunda buharlaşma (kuruma) hızı yaklaşık t değişkenli bir fonksiyon uyarınca, sıcaklıkla birlikte giderek artar ve bu evrenin sonunda en yüksek değerine ulaşır [187]. IE süresi, toplam kurutma süresine göre çok kısa olduğundan dolayı kuruma eğrilerinde gösterilmemektedir ve çoğu kez hesaplamalarda göz önüne alınmamaktadır [188, 189].

**B-C bölgesi (Sabit kuruma hızı evresi):** Bu bölge, sabit hızda kuruma evresi olarak bilinir ve bu evre, kurutma işleminin başlangıcında etkindir. Burada ürünün yüzeyi ıslaktır ve üzeri ince bir su tabakası ile kaplı olduğundan, önce su tabakası buharlaşmaya başlar. Başlangıçta çok hızlı olan buharlaşma, bir süre sonra yüzeyin hemen üzerinde oluşan buhar tabakası nedeniyle yavaşlar. Eğer gıdanın yapısı gözenekli bir yapıya sahip ise, sabit hızda kuruma evresinde buharlaştırılan suyun büyük bir bölümü iç kısımlarda bulunan bünye nemidir. Gıdanın bünyesinde bulunan serbest haldeki nem (su), ürün yüzeyinde oluşan su tabakası sayesinde yüzeyden havaya transfer edilir. Bu esnada gıda bünyesindeki su, gıda içerisinden yüzeye kılcal (kapiler) kuvvetler ve difüzyon ile transfer olur. Gıda yüzeyine transfer edilen su, gıda yüzeyinden hava akımı içerisine kütle transferi (buharlaşma) şeklinde olur. Havadan gıdaya olan ısı transferi taşınım ile olur, iletim ve ışınım ihmal edilecek düzeydedir. Kurumanın devam etmesi için, gıda yüzeyinde oluşan buhar filminin, hareketli bir hava akımı ile dağıtılıp taşınması gerekir.

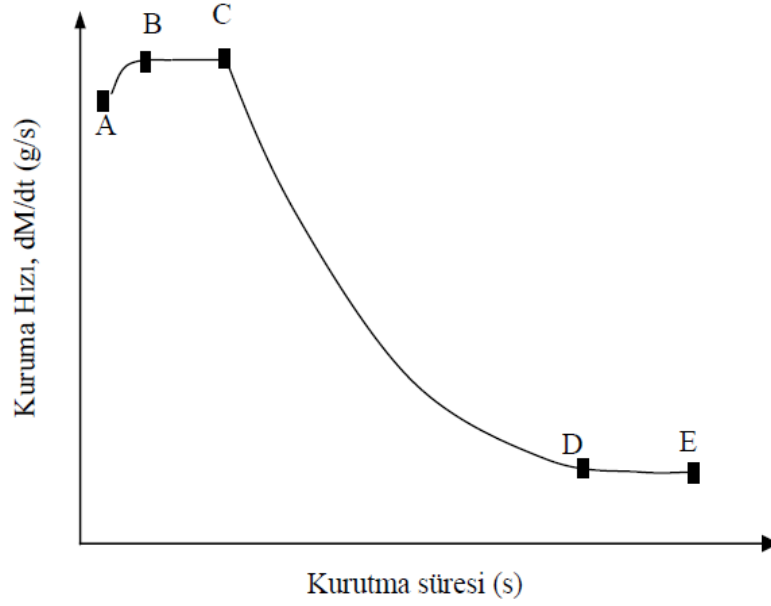
Kurutma havası ile ürün yüzeyi arasındaki ısı ve kütle taşınım katsayıları bu evrede sürükleyici kuvvetlerdir. Sabit hızda kuruma evresinde, kuruma hızı; kurutulan gıdanın dilim kalınlığına, sıcaklığa, toplam basınca ve kısmi buhar basıncına bağlı olarak değişir [178]. Bu evrede kuruma hızı sabittir ve sadece katı maddenin yüzeyine etki eden değişkenler tarafından kontrol edilir. Bu değişkenler genellikle havanın hızı, akış şekli, sıcaklığı ve nemidir [187].



**Şekil 2.7.** Kuruma Hızının Ürün Nem İçeriğiyle Değişimi [11,186].

Ürünün özelliklerine bağlı olmayan bu buharlaşma tamamen dış hava koşullarınca belirlenmekte ve nem ürünün yüzeyinden, herhangi bir serbest su tabakasının yüzeyinden buharlaşan su ile aynı davranışı göstererek buharlaşmaktadır. Yüzeydeki serbest su tabakası sabit bir kuruma hızı ile buharlaşırken devamlı olarak hücre aralarındaki hava boşluklarının meydana getirdiği kılcal borularla beslenmektedir, diğer bir ifadeyle, sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, suyun ürün yüzeyine iletim hızı ile yüzeyden buharlaşan suyun hızı birbirine eşit olmaktadır [190].

Şekillerdeki C noktası değeri kurutulacak ürünün özellikleri ile ilgili birçok faktöre bağlı olan kritik nem miktarını göstermektedir. C noktası, ürünün yüzeyinde serbestçe buharlaşabilen nemin sona erdiği ilk kuru noktayı belirtir. Malzeme yüzeyi üzerinde kuru lekeler görülmeye başladığı anda sabit hızda kuruma evresi sona erer ve azalan kuruma hızı ön evresine girilmiş olunur. Sonuçta bu C noktasında kritik nemlilik derecesine erişildiği için bu noktaya “kritik nokta” ve bu noktadaki neme "kritik nem" adı verilir. 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. Gıda ürünlerinin (meyvelerde ve sebzeler) kurutulmasında sabit kuruma hızı evresinin çok kısa sürmesi ve süreç boyunca çok az miktarda nem transfer edilmesi sebebiyle, teorik çalışmalarda genellikle bu bölge ihmal edilir [191,192].



**Şekil 2.8.** Kuruma Hızının Kurutma Süresi ile Değişimi [11,187].

**C-E bölgesi (azalan kuruma hızı evresi):** Şekillerden de görüldüğü gibi bu evre kendi içinde iki bölgeye ayrılabilir; azalan hızla kuruma ön evresi (CD) ve azalan hızla kuruma son evresi (DE). Genellikle gıda ürünleri azalan kuruma periyodunda kururlar [193, 180].

**C-D bölgesi (azalan kuruma hızı ön evresi):** Bu evrede gıda yüzeyine ulaşan su buharlaştığından dolayı, gıdanın yüzeyinde ıslak alan miktarında sürekli azalma olmakta ve gıdanın yüzeyini kaplayan su filmi kaybolmaktadır. Bu esnada malzemenin ıslak yüzey alanı azaldıkça orantılı olarak buharlaşma hızı da düşer. Bu nedenle bu evreye “azalan kuruma hızı ön evresi” denilmektedir. Bu evredeki kuruma işlemi; ürün içerisindeki nemin (suyun), sıvı ve buhar difüzyonu yoluyla ürün yüzeyine erişmesi ve yüzeye ulaşan nemin buharlaşarak uzaklaştırılması şeklinde gerçekleşir. Bu evrede kuruma hızı, ürünün iç gözenek yapısının ve ürünün içindeki nemin yüzeye doğru akmasına neden olan kuvvetlerin etkisi altındadır. Bu evrede hem yüzeyden serbest buharlaşma ve hem de iç kısımlardaki buharlaşan suyun hareketi etkili olmaktadır [192]. Bu evrede yüzeye yakın bölümler, hem doğrudan ve hem de kılcal (kapiler) etkilerle nem verdiklerinden, iç katmanlara göre



daha çok su kaybederler. Bunun sonucu olarak ürünün dış yüzeyinde kabuk bağlama, büzüşme, çatlama ve yarılmalar görülür[191].

Bu evrede ürünün yüzeyindeki ıslak alan azalır, kuru alan arttığından ötürü, yüzeyin yaş hava sıcaklığında kalmaması söz konusudur. Bu nedenle hava hızı, sıcaklık ve nem bu bölümde etkili olmaktadır. Sonuçta, kuruma hızını hesaplamada gıdanın nem dağılımı yanında sıcaklık dağılımının ve hava hızının da göz önünde alınması gerçeği ortaya çıkmaktadır [194]. Bu evre sonunda, suyun gıdanın iç kısımlarından yüzeye iletim hızı, yüzeyden meydana gelen buharlaşma hızından daha küçük olduğundan, ürünün yüzeyinin tamamen ince su tabakası ile kaplanması durumu ortadan kalkmaktadır. Bu andan itibaren malzemenin tüm açık yüzeyi kurumakta ve buna bağlı olarak ta kuruma hızı daha da yavaşlamaktadır. Bu noktadan itibaren ‘azalan kuruma hızı ön evresi’ sona erer ve ‘azalan kuruma hızı son evresi’ ne geçilir. [187].

**D-E Bölgesi (azalan kuruma hızı son evresi):** İkinci azalan hız periyodu olarak da bilinen bu bölgede, ürün içindeki su yüzeye çok yavaş difüze edilir. Bu evrede kurutma havası hızının, kuruma hızına etkisi daha azdır, buna mukabil bu bölgede gıdanın içyapı özellikleri etkindir. Bu bölgede kuruma hızı bütünüyle içsel nem hareketine bağlı olarak oluşur. Azalan hızda kuruma periyodunda, üründeki nem; difüzyonla sıvı hareketi, difüzyonla buhar hareketi ve kılcal sıvı hareketi şeklinde transfer edilebilir [195].

### 2.6.2 Ürün Nem İçeriği ve Büzülme

Kurutulacak ürünün nem içeriği; kurutma açısından karakteristik olan değerlerine göre; denge nemi, kritik nem, maksimum nem miktarı, başlangıç nemi ve maksimum higroskopik nem olarak adlandırılabilir.

**Denge nemi:** Katının kurutma sonunda ulaşabileceği en düşük nem değeri olup, kurutucu gaz içindeki buhar miktarı ile denge halindedir.

**Kritik nem:** Sabit bir değerde seyreden kuruma hızının azalmaya başladığı noktadaki nem değeridir.

**Maksimum nem içeriği:** Katı içindeki tüm boşlukların sıvı ile dolu olduğu andaki nem değeridir.

**Başlangıç nemi:** Kurutmanın başlangıcındaki nem değeridir.

**Maksimum higroskopik nem içeriği:** Kurutucu gazın doygun olduğu durumdaki nem değeridir.

Kuruma debisini kontrol eden önemli bir faktör de, nem miktarının azalması ile birlikte meydana gelen büzülme olayıdır. Bu özellik bakımından maddeler önemli derecede farklılık gösterir. Sert, gözenekli veya gözeneksiz katılar, kuruma sırasında önemli derecede büzülme göstermezler. Buna karşılık, koloidal ve lifli maddeler, nem kaybettikçe önemli derecede büzülürler.

Büzülme üç farklı etkiye sahiptir; birincisi, maddenin birim ağırlığının yüzeyini değiştirmesidir. Bu husus gıda maddeleri için özellikle doğrudur. Çünkü büzülme, hava ile temas eden madde yüzeyinin alanını önemli derecede değiştirir. İkinci ve daha önemli olan etkisi, yüzeyde nemin buhar veya sıvı olarak geçişini engelleyen, sert bir kabuk tabakasının oluşmasıdır. Bu şekilde kabuk oluşması kurumayı büyük ölçüde yavaşlatır. Büzülmenin üçüncü etkisi de maddenin çarpılmasına, yarılmasına veya tüm madde yapısının değişmesine sebep olur.

Çarpılma, yarıma veya sert bir yüzey tabakası meydana getirmeye meyilli olan maddeler, nemli hava kullanılarak kurutulurlar. Bu durumda hava ile katı maddenin yüzeyi arasındaki nem farkı, kurumayı yavaşlatmak amacı ile azaltılmış olur. Bu, içten dışa doğru olan nem farkının daha az olmasını mümkün kılarak, büzülmenin etkisini azaltır. Örneğin, kereste kurutucularında hava özellikle nemlendirilir ve böylece kurumunun ilk kademelerinde, madde ile hava arasında çok yüksek bir sıcaklık veya nem farkı oluşması önlenmiş olur. Böylece kuruma debisi, maddenin yeterli bir boyutsal sağlamlığa erişebileceği bir değere düşürülmüş olur.

### 2.6.3 Kuruma Hızını Etkileyen Faktörler

Suyun gıdanın yapısından kurutma yöntemi ile uzaklaştırılmasında “ısı ve kütle aktarımı” ile ilgili iki temel olayın gerçekleşmesi gerekir. Bunlar; ürünün ısıtılması ve üründen su alınması şeklinde ifade edilir. Ürün kurutmada bütün çabalar ısı ve kütle aktarımı hızını arttırmak üzerinde birleşmiştir. Isı ve kütle aktarımı işlemlerinin ikisi de kuruma hızını etkileyen faktörlerdir. Bu iki olay incelenirken; katı bünyesindeki sıvının katı yüzeyine gelmesi sırasında oluşan iç difüzyon ve kılcallık gibi koşullar ve kurutucu olarak kullanılan gazın hızı, sıcaklığı ve nemi gibi dış koşullar ele alınır.

Kurutma işlemi incelenirken, ısı ve kütle atarım hızını etkileyen faktörler iç ve dış faktörler olmak üzere iki guruba ayrılır. İç faktörler kurutulan ürüne (gıdaya) ait özellikler olup, dış faktörler ise kurutma havası ve kurutma sistemi ile ilgilidir. Kurutma ortamındaki hava ile ilgili olarak; havanın sıcaklığı, bağıl nemi, havanın hareket hızı, basıncı ve hareket yönü dikkate alınmalıdır. Gıda ile ilgili olarak; gıdanın nem miktarı (başlangıç ve sonuç nemleri), gıdanın boyutu (kalınlığı ve büyüklüğü, buharlaşma yüzeyi genişliği), gıdanın gözenekliliği, kuruma sırasında ürün yüzeyinin sertleşmesi, gıda malzemesinin türü ve özgül ısısı, gıda malzemesinin kendine özgü termofiziksel özellikleri, fiziki ve kimyevi yapısı, su aktivitesi, kılcallık ve difüzyon olayını kapsar. Kurutma ve ekipmanı ile ilgili olarak; kurutma cihazının ısı yalıtma durumu, kapasitesi ve boyutları, kurutma metodu, çevre iklimi ve kurutma ortamının basıncı, şeklinde belirtmek mümkündür [196]. Kurutma çalışmalarında iç faktörlerden ziyade dış faktörlerin etkisi daha çok araştırma konusu olmuştur [186].

### 2.7 Kurutma Sistemleri

Gıda ürünlerinin kurutulması için, bu işleme gerek duyulan ilk günlerden günümüze kadar geçen süre içinde, güneş ışınlarının altına sermekten, dielektrik kurutma tekniklerine kadar geliştirilmiş birçok yöntem bulunmaktadır. Sıvı, yarı sıvı ve katı gıdaların kurutulması amacıyla yapılmış olan kurutucular birkaç temel yöntemeye dayanan makine ve ekipmanlardır. Buna karşın son üründen istenilen nitelikler; en az ürün zararı, üstün rehidrasyon özelliği, ekonomik koşulların çeşitli ve farklı olmaları

gibi faktörler, kurutucuların tasarım ve çalışma ilkeleri yönünden çok çeşitli tiplerin ortaya çıkmasına neden olmuştur [197].

Gıda ürünlerinin kurutulmaları sırasında kullanılan kurutucular, ürünün özelliklerine uygun olmasının yanı sıra, kurutma işleminden beklenen özellikleri de sağlayacak yetenekte olmak zorundadır. Bu nedenle, birbirinden önemli farklılıklar gösteren çok çeşitli tiplerde genel ve özel kurutma sistemleri geliştirilmiştir. Genel kurutma sistemlerine örnekler verilirse; tepsili kurutma, kabinli kurutma, tünel kurutma, tamburlu kurutma gibi adlandırılan kurutma sistemleridir. Özel kurutma istemleri arasında en çok uygulamaya sahip olanlar sprey kurutma, vakum kurutma, dondurarak kurutma, akışkan yataklı kurutma sistemleridir (University of Texas, 2005).(Kurutma sistemleri). Endüstride, çeşitli uygulamalarda kullanılan 200'ü aşkın kurutma sistemi mevcuttur. Ancak bunlardan yaklaşık 20 kadarı kullanılan temel ve özel kurutma sistemidir ve en yaygın kullanılanlarıdır. [178]. En yaygın olarak kullanılan bu kurutma sistemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [137].

### **2.7.1 İletimle Kurutma**

Bu yöntemde, kurutma için gerekli ısı enerjisi, kurutulacak ürüne, ısıtılmış yüzeylerden kondüksiyon yoluyla iletilir. Kurutulan ürüne iletilen ısı, sıcak yüzeye değen yaş ürünün ısıl kondüktivitesine ve sıcak yüzeyin ısı iletim katsayısına bağlıdır [137].

Dolaylı kurutucu olarak da adlandırılan, bu kontak tipli kurutucular ısının iletimi ile kurutma yaparlar. Bunlar genellikle ince veya çok yaş maddeler için uygundur. Sabit veya hareketli olan ısıtılmış yüzeyler aracılığı ile buharlaştırma ısıyı sağlar. Bu yüzeyler, maddeyi tutacak, taşıyacak veya bölümlere ayıracak biçimde kurutucu içine yerleştirilir. Kurutma sırasında nem, vakum yoluyla veya sisteme gaz akışı sağlanmasıyla üründen buharlaştırılır. İnce sulu çimento ve çamur gibi maddelerin kurutulmasında kullanılan buhar tüplü döner kurutucular ve tambur tipli kurutucular bu kurutma yöntemine örnektirler [198].

Kurutma silindirleri veya topları, düz yüzeyler, açık kazanlar ve daldırma ısıtıcılar doğrudan temaslı kurutmaya örnek verilebilir. Isıtma yüzeyi, kurutulacak malzeme

ile temas halinde olmalıdır. Bu sistemlerde nem miktarı aşırı ısınmayı önlemektedir. İletimle kurutmada, ısıtılan yüzey, malzeme ile temastadır ve malzemenin aşırı ısınmasını önlemek, ısıtmanın homojen olmasını sağlamak için gereken önlemler alınmalıdır. İletim ile kurutma sistemleri genel olarak kâğıt ürünlerin kurutulmasında kullanılmaktadır. İletim ile kurutmada; yüksek kuruma hızı ve sabit bir ısı ve kütle transferi şartları sağlanamaz. Üründe zayıf bir nem değişimi oluşur. Kontrol problemleri, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gibi sorunlarla karşılaşılabılır. Tüm bu olumsuzluklara karşın iletimle kurutmanın diğer kurutma sistemlerine dönüştürülmesi ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetleri nedeniyle tercih edilmemektedir. [199]. İletimle kurutma sistemleri başlıca; Silindir Kurutucular, Askı Kurutucular, Döner Tipli Kurutucular ve Valsli Kurutuculardır.

### **2.7.2 Sıcak Havalı (Konveksiyon) Kurutucular**

Hemen hemen bütün kurutucularda taşınım ile kurutma işlemi gerçekleşmektedir. Hava ya da başka bir gazın ısı taşıyıcı akışkan olarak kullanıldığı ve bu akışkanın sistemde dolaştırıldığı kurutma sistemleri, taşınım ile yapılan kurutma sistemleridir. Isı, ısıtılmış hava veya gaz ile kurutulacak ürüne uygulanır. Sıcak hava, kurutulan ürün tabakasının üzerinden, ya da içinden geçirilir. Ürün ile sıcak havanın tam teması (buluşması) ile buharlaştırma ısısı taşınım ile ürün yüzeyine aktarılır ve buharlaştırılan nem kurutucu gaz veya hava ile kurutma ortamından uzaklaştırılır.

Bu tip kurutucular, doğrudan temaslı (direkt) kurutucular olarak da bilinmektedir. Bu kurutucularda, kurutma gazı/havası doğrudan kurutulacak ürün ile temasa getirilmektedir. Sıcak gazın, kurutulacak ürün ile doğrudan temas etmesi nedeniyle kuruma daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu tip kurutma yöntemi granül, tabaka veya kek formundaki yaş ürünlerin kurutulması için uygundur. Bu yöntemin ısı etkinliği iletimle kurutmaya göre daha düşüktür [137]. Tünel Kurutucular (ürünün hareket ettiği hava akışlı), Kabinli ve Bölmeli Kurutucular (tepsilere sererek sıcak havanın ürün üzerine gönderildiği), Döner Kurutucular (ürünün sıcak hava içerisine gönderildiği), Bantlı (konveyör) kurutucular, Sandık Kurutucular, Fırın Tipi Kurutucular, Akışkan Yataklı ve Püskürtmeli Kurutucular, Kızgın buhar

atmosferinde kurutma, Karıştırılmalı yatakta kurutma ve Flaş Kurutma (Alevli kurutma) bu kurutma türüne birer örnektir [200].

### **2.7.3 Işınım ile Kurutma**

Kurutulacak malzemeye 0,76-400 µm dalga boyunda elektromanyetik radyasyon ile ısı enerjisi uygulanır. Bu dalga boyundaki radyasyon kızılötesi veya morötesi radyasyon diye adlandırılır ve malzemenin yüzeyine nüfuz ederler. Malzeme yüzeyi ise gelen radyasyonun bir bölümünü soğurur. Termal radyasyon ışınları, kızılötesi lambalar, gaz ısıtılmalı akkor yansıtıcılar, buhar ısıtılmalı kaynaklar ve elektrikle ısıtılmış yüzeyler tarafından sağlanır. Bu sağlanan ışınlar, içinden geçtikleri ortamı ısıtmaz; kendilerini absorbe eden cisimleri ısıtırlar. Kızılötesi ışınların, yaş ürünün yüzeyinden itibaren etkilediği derinlik oldukça az olduğundan, Işınım ile kurutma yapan kurutucular daha ziyade serili olarak kalınlığı az olan ürünlerin (Tekstil ürünleri, ince tabakalı ürünler ve boyanmış yüzeyler vb.) kurutulmalarında üstünlük sağlarlar [201]. Bu kurutma yönteminde ısı transferi, termal radyasyon yapan malzemenin yapısı ve karakteristiği ile kurutulan maddenin özelliklerine bağlıdır ve ısı verim düşük olabilir [202].

Bu sistemlerin pahalı bir yatırım ve işletim maliyetleri vardır. Bu sistemler daha çok nem uzaklaştırma süreci zor olan malzemelerin son nem kesrini düzeltmede veya değerli ürünlerin kurutulmasında tercih edilen bir yöntemdir [176]. Örneğin Monomer yapıları kaplamalar ve boyar maddeler UV (Mor ötesi) radyasyon etkisinde kurularak işlenirler. Radyasyonla kurutma; kâğıt, tekstil gibi üzerinde motif desen içeren ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Kurutulacak malzemenin yanabilir olması durumunda ürün ısı kaynağına yakın tutulmamalıdır.

### **2.7.4 Vakum Kurutucular**

Vakum kurutma düşük basınçlarda suyun, düşük sıcaklıklarda (buharlaşması) kaynaması gibi avantaja sahiptir. Vakum kurutma alternatif bir kurutma metodu olup, özellikle meyveler gibi uzun sürede kuruyan gıda ürünleri için kullanılan önemli bir yöntemdir. Yapılan çalışmalar bu metodun, kurutma işlem süresini diğer metotlara nazaran çok kısalttığını göstermiştir. Vakum, gıdada bulunan suyun düşük

sıcaklıklarda atmosferik koşullardan daha kolay buharlaşmasını sağlamaktadır. Kurutulacak ürün kapalı kap içine konularak kabın havası vakumla alınmaktadır. Basınç düştüğünden ürün içindeki suyun daha düşük sıcaklıklarda buharlaştırılarak ürünün kurutulması sağlanır. Daha da önemli olan bir diğer nokta, suyun uzaklaştırılması esnasında ortamda hava bulunmadığı için oksidasyon reaksiyonlarını azaltmaktadır. Vakum kurutucularda kurutulmuş olan ürünlerde renk, tekstür ve aroma (hoş koku) iyi bir şekilde korunabilmektedir [203]. Bu tür kurutma yöntemi; şeker, kimyasal madde, kauçuk, patlayıcı gibi maddelerin üretiminde kullanılmaktadır.

### **2.7.5 Dondurarak Kurutma**

Kurutulacak ürün önce dondurulur, sonra derin vakuma tabi tutulur. Derin vakum haznesi bir derin soğutma kondenserine veya kimyasal nem alıcıya bağlıdır. Sonra vakum haznesi yavaş yavaş iletim veya kızılötesi radyasyon ile ısıtmaya başlanır. Islaklığı veren su veya herhangi bir çözücü madde, ani olarak donmuş halden süblimasyon yolu ile buhar haline geçip, kondenserde veya kimyevi nem alıcıda tekrar yoğunlaştırılır ve kurutma işleminin meydana geldiği ortamdan uzaklaştırılır. Çoğu dondurarak kurutma işlemleri -40 °C ile -10 °C sıcaklıkta ve birkaç yüz mikron vakum altında yapılır. Bu süreç yavaş ve pahalı bir kurutma şeklidir. Fakat ısıya karşı hassas maddeler için birçok üstünlükler sağlar. Geleneksel kurutma yöntemi ile kurutulması sakıncalı olan sıcaklığa çok hassas bazı biyolojik maddeler, ilaçlar ve gıda maddeleri dondurarak kurutulabilir. Dondurarak kurutma işlemi; farmakolojik ürünler, kan plazması, ilaçlar, serum, bakteriyel maddeler (bakteri kültürleri), aşılarda, sebze, meyve suları, kahve ve çay özü eldesinde, deniz ürünleri, et ve süt gibi ürünlerin kurutulmasında kullanılır [201].

Diğer kurutma yöntemleriyle karşılaştırıldığında kural olarak en kaliteli ürün dondurarak kurutma yöntemiyle elde edilebilir. Burada en önemli faktör olan yapısal sertlik, süblimasyonun meydana geldiği yüzeyin donmuş olmasıyla sağlanmasıdır. Bu yapısal sertlik, kurutma işleminden sonra, kurutulmuş maddenin şeklinin bozulmasını da önler. Sonuç olarak dondurarak kurutulmuş maddeye tekrar su ilave edildiğinde büzülmemiş gözenekli yapısı sayesinde hızlı bir şekilde bünyesine su

olarak (rehidrasyon) kurutma öncesi yapısına çok yakın bir yapıya ulaşır. Dondurarak kurutulmuş gıda ve biyolojik maddelerin diğer bir avantajı da kurutma işlemi sırasında çok az tat ve aroma kaybına uğramalarıdır. Sıcaklığın çok düşük olması, bağıl nemin düşük olması, lokal olarak su kaybının çok hızlı olması, diğer geleneksel kurutma yöntemlerine göre enzimatik olmayan kararma; gıdanın yapısındaki proteinlerin bozulmasını ve enzimatik reaksiyonları minimuma indirir [204].

### **2.7.6 Mikrodalgalı Kurutucular**

Mikrodalga kurutma tekniğinin esası, ürün içerisindeki su moleküllerinin polarize edilerek, hızla hareket etmelerini sağlamak ve bu suretle ortaya çıkan moleküler sürtünmeyle ısının ortaya çıkmasını sağlamaktır. Bu tip kurutmada enerji elektriksel güç kaynağından sağlanır. Mikrodalga kurutmada enerji, ürünün derinliklerine kadar inebilmelidir. Aksi durumda kurutulacak ürünün sadece yüzeyi ısınır. Işınımın etkileyebildiği derinlik, dalga boyuna, dielektrik sabitine ve kayıp faktörüne bağlıdır. Bu tür kurutma yöntemi, genellikle şerit şeklindeki ince malzemelerin kurutulmasında uygulanır.

Kurutma sırasında doğrudan su moleküllerinin ısıtılıp buharlaşmasıyla kurutma etkinliğinin yüksek olması ve kurutmanın normal atmosfer basıncı altında yapılması sebebiyle üründe yapısal bozulmalar olmadan kurutma homojenliği sağlanır. Suyun ürün içerisinde buharlaşıp, yüzeye kadar buhar fazında taşınması, erimiş maddelerin taşınmadan oldukları yerde kalmaları gibi avantajlar, mikrodalga kurutma yöntemini giderek daha çok tercih edilen sistem haline getirmiştir [205].

Mikrodalga kurutmada çok yüksek frekanslı (900 ile 5000 Mhz) güç kaynağı kullanılır. İletken olmayan maddelerin ısıtılmasına uygulandığından bir dielektrik ısıtma formu olarak nitelenebilir. Mikrodalga kurutma şerit şeklindeki ince malzemelere uygulanır.

Kurutma sistemi giriş ve çıkışında alınması gerekli koruyucu önlemler sürekli çalışmayı zorlaştırır. Sistemi çalıştırmak için gerekli emniyet önlemleri mikro dalga kurutmayı, dielektrik kurutmaya göre daha pahalı hale getirir [175].



### **2.7.7 Dielektrik Kurutma**

Bu tip kurutmada, radyo frekansı veya mikrodalga bölgesinde çok yüksek frekansa sahip bir elektromanyetik alana yerleştirilen nemli ürünün içerisinde termal enerji üretilir. Nemli ürün gıda maddeleri, yapı malzemeleri, tekstil ürünleri, tıbbi malzemeler ve vb. gibi olabilir. Elektromanyetik alan yönündeki hızlı değişimler yüzünden moleküler sürtünmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan ısı, kutup akısını değiştirir ve bu olay da ürün içerisinde ısı üretilmesine neden olur. Sıvı haldeki suyun dielektrik sabitinin birçok katı malzemeninkinden çok yüksek olmasından dolayı, ürünün nemli (su içeren) bölgelerinde kuru bölgelere göre daha fazla ısı üretilir [176]. Isının ürünün su içeren kısmında üretilmesinden ve nemin ürünün içinden dış kısmına doğru yönelmesinden dolayı, ürün içinde nem oranı otomatik olarak düzenlenir ve ürün içerisindeki su, ürün aşırı derece ısıtılmadan buharlaşır [175].

### **2.7.8 Ozmotik Kurutma**

Meyve ve sebze dilimleri gibi gıdaların hipertonic bir çözelti içinde bekletilmesiyle su oranının düşürülmesi uygulamasına “ozmotik kurutma” denir. Hipertonic ortam: çözülmüş madde yoğunluğu hücreden daha fazla olan ortamdır ve bu ortamda su yoğunluğu azdır. Burada suyun uzaklaştırılmasında buharlaşma değil ozmos (suyun difüzyona uğraması) olayı rol oynamaktadır [206]. Ozmos: suyun çok yoğun ortamdan az yoğun ortama difüzyon ile yarı geçirgen bir zardan geçmesidir. Ozmotik basınç: suyun çok yoğun ortamdan az yoğun ortama geçişi sırasında yarı geçirgen zara uyguladığı basınçtır.

## **2.8 Kurutma Sistemlerinin Seçimi**

Kurutulan gıdalardan istenilen niteliklerin istenilen anlamda oluşmasını sağlamak için makine, ekipman ve tesislerin tasarımı, seçimi, kurulumu ve işletilmesi sırasında kurutma konusu ile ilgili tüm ilkeler göz önüne alınmalı ve değişkenler arasında optimum seçimler yapılmalıdır. Tüm çabalar, en az ürün zararı ile maksimum kurutma oranını en ekonomik koşullarda gerçekleştiren ve sonuçta rehidre özelliği üstün olan ürünü çıkarabilen sistem üzerinde yoğunlaştırılmalıdır.

Kurutma işleminin başarısı, gerek ürün kalitesi gerekse işletmenin karlılığı bakımından uygun bir kurutucunun seçilmesine bağlıdır. Her türlü ürünün kurutma işlemine uygun çok amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeni ile ilk adım olarak kurutma yöntemi ve kurutucunun doğru seçimi büyük önem taşımaktadır [200]. Kurutulacak ürünün özelliklerine bağlı olarak, daha önce açıklanan bu sistemlerden en uygun olanı seçilmelidir. Kurutma işleminde, birim miktarda ürün kurutmak için, sistemde harcanan enerji miktarı dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisidir. Bir kurutma sistemi seçiminde aşağıdaki adımlar izlenmelidir [176].

- Uygun kurutucuların araştırılması
- Değişik kurutucu tiplerinin ön maliyet analizlerinin yapılması
- İlk yatırım maliyeti, b) İşletme maliyeti
- Prototip veya laboratuvar ölçeklerinde yapılan kurutma testleri ve bu testler için en uygun donanımın kullanılması. Bazen bir örnek (plot) tesisle bu doğrulanabilir.
- Kurutma deneylerinde kurutulan ürünlerin örnek ve kalitelerine bakılmalıdır.
- Ürün kalitesi, göz ardı edilmemelidir.
- Tozlanma, çözücü veya diğer ürün kayıplarının tespit edilmelidir.
- Hacim sınırlamalarına (kaplanan yerin büyüklüğü) bakılmalıdır.
- Ürünün yığın yoğunluğu ve paketlenme maliyetleri göz önünde bulundurulması.

Değişik gereksinimler kurutucunun tasarım esaslarını belirler. Örneğin ürünün kurutucuda taşınması çok önemli olup kurutucuda kalma süresiyle yakından ilgilidir. Ürünün başlangıçtaki durumu (sıvı, pasta, katı, toz, granüler, levha v.b.) tasarım esaslarında büyük etkiye sahiptir [194].

### **3. TEORİK ANALİZ**

Bu bölümde, kurutma ve konvektif kurutmada etkin olan nemli havaya ait tanım ve kavramlar verildikten sonra, kurutma işlemi Psikrometri diyagramı üzerinde gösterilmiştir. Kurutma kabini bölümü ve kurutma sistem bölümleri (ısıtma bölümü, soğutma ve nem alma bölümü) ile ilgili kontrol hacimleri için denklemler, kütle ve enerji denklemleri şeklinde verilmiştir. Ayrıca kurutma sisteminin performans ve belirsizlik analizleri yapılarak, kurutma işleminin hassasiyeti ortaya konulmaya çalışılmıştır.

#### **3.1 Tanım ve Kavramlar**

Kurutma işleminin analiz edilmesi için bazı kavram ve tanımların bilinmesi gereklidir. Bu kavram ve tanımlar eşliğinde analiz daha iyi anlaşılır hale gelir ve işlemi kavramak daha kolaylaşır.

##### **3.1.1 Kurutulacak Ürüne ait Tanım ve Kavramlar**

###### **3.1.1.1 Ürünün Gözenekliliği**

Gözeneklilik (porozite),  $\epsilon$ , bir üründe bulunan boşluk hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanmaktadır. Bir malzemenin gözenekli olabilmesi için Gözeneklilik değerinin 0.25 den büyük olması gerekmektedir [180]. 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 maddeler olarak kabul edilmiş ve literatürde verilen matematiksel modeller gözenekli olmayan ürünler için ele alınmıştır.

###### **3.1.1.2 Ürün Nem İçeriği**

Kurutma denemelerinde kullanılan ürünlerin nem içeriği yaş ve kuru baza göre belirlenmektedir. Bu çalışmada ürün nem içeriği kuru baza göre belirleneceğinden dolayı ürün nem içeriği tayininde aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$M_{KB} = \frac{M_{SU}}{M_{KM}} = \frac{M_t - M_{KM}}{M_{KM}} \quad (3.1)$$

Denklemdede;  $M_{KB}$ :Kurutulmuş ürünün herhangi bir andaki kuru bazda hesaplanan nem içeriğini (kg su/kg kuru madde),  $M_t$  belli bir sürede kuruyan ürünün toplam kütesini,  $M_{SU}$ : Su miktarını (kg),  $M_{KM}$ : Kuru madde miktarını (kg) göstermektedir.

Kurutulacak ürünün nem içeriği; kurutma açısından karakteristik olan değerlerine göre; denge nemi, kritik nem, maksimum nem miktarı, başlangıç nemi ve maksimum higroskopik nem olarak adlandırılabilir.

### 3.1.1.3 Ürün Nem Oranı

Ürün nem oranı (NO) ise (3.2) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır [207].

$$NO = \frac{M_{KB,t} - M_{e,t}}{M_{KB,0} - M_{e,t}} \quad (3.2)$$

Denklemdede;  $M_{KB,t}$ : Herhangi bir andaki ürünün içerdiği su miktarını veya ürün nem içeriğini (kg su/kg kuru madde),  $M_{KB,0}$ : Kurutmaya başlamadan önceki ürünün içerdiği su miktarını (kg su/kg kuru madde),  $M_{e,t}$ : Kurutulan ürünün denge nem içeriğidir ve kurutma koşullarındaki havanın içerdiği su miktarını (kg su buharı/kg kuru hava) ile belirtilebilir. Bunu ya bir higrometre ile ya da kurutma süresi sonunda kurutma kabinindeki yağ ve kuru termometre sıcaklıkları yardımıyla psikometri diyagramından bulunur. Genelde diğer nem miktarlarına göre küçük olduğundan dolayı birçok çalışmada ihmal edilmiştir[208].

### 3.1.1.4 Kuruma Hızı

Kurutma hızı ise aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır [45,207].

$$KH = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_{KB,t} - M_{KB,t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Denklemdede;  $\frac{\Delta M}{\Delta t}$  kuruma hızı (kg su/(kg kuru madde. dak.)),

$M_{KB,t}$ : t anındaki nem içeriği (kgsu/kg kuru madde),

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

t,  $\Delta t$ : süre (dak.) olarak ifade edilmektedir.

### 3.1.2 Nemli Hava (Kurutma Havası) ile İlgili Tanım ve Kavramlar

#### 3.1.2.1 Özgül Nem

Yeterli derecede kuru hava, su ile temasa getirildiğinde su buharlaşmaya başlar. Su buharı-hava karışımı doymuş hale gelinceye kadar, yani karışımdaki kısmi buhar basıncı  $P_b$  suyun aynı sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına eşit oluncaya kadar buharlaşma devam eder. 1 kg kuru havada bulunan su buharı kütlesi havanın özgül nemi olarak adlandırılır ve  $x$  ile gösterilir. Özgül nem değeri, nemli hava içindeki su buharının kütlesinin, kuru hava kütlesine oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$x = \frac{m_b}{m_h} = 0.662 \cdot \frac{P_b}{P - P_b} \quad (3.4)$$

#### 3.1.2.2 Bağlı Nem

Bağlı nem, belli bir sıcaklık ve basınçtaki havanın içinde bulundurabileceği su buharı miktarının, aynı sıcaklık ve basınçtaki doymuş havadaki su buharı miktarına oranıdır.

Su buharı-hava karışımının birim hacimdeki su buharı kütlesi  $\rho_b$ 'nin aynı sıcaklık ve basınçta doymuş haldeki karışımdaki su buharı kütlesi  $\rho_{bd}$ 'ye oranı havanın bağlı nemi olarak ifade edilir.

$$\phi = \frac{\rho_b}{\rho_{bd}} = \frac{P_b}{P_{bd}} \quad (3.5)$$

Bağlı nem  $\phi$  ile gösterilir ve su buharı-hava karışımının doyma derecesinin bir ölçüsü olur. Burada  $P_b$  doymamış haldeki karışımın su buharının kısmi basıncını,  $P_{bd}$  ise, doymuş haldeki karışımın su buharı kısmi basıncını göstermektedir. Kurutulan gıdanın içerdiği nem miktarı ortamdaki havada bulunan su buharı miktarına göre değişiklik göstermektedir. Havanın ısıtılması ile bağlı nem azalır, soğutulması ise bağlı nem artar.

### 3.1.2.3 Buhar Basıncı

Nemli havanın içinde bulunan su buharı moleküllerinin kısmi basıncıdır ( $P_b$ ). Hava, içinde bulundurabileceği su buharının tamamını içerdiğinde, sahip olduğu buhar basıncı, doymuş buhar basıncı olarak tanımlanır ( $P_{bd}$ ).

### 3.1.2.4 Mutlak Nem

Herhangi bir durumda, incelenen  $1 \text{ m}^3$  hava içindeki su buharının kg olarak ağırlığına mutlak nem denir ( $\rho_b$ ).

### 3.1.2.5 Kuru Termometre Sıcaklığı

Havanın içindeki nemin ve güneş radyasyonunun etkisi olmaksızın herhangi bir termometre, termo eleman veya bir sıcaklık ölçerle ölçülen sıcaklıktır ( $T_{kr}$ ).

### 3.1.2.6 Yaş Termometre Sıcaklığı

Atmosfere açık bir su yüzeyinin, havadan suya verilen ısı miktarının, buharlaşan su tarafından (suyun gizli ısısı yoluyla) havaya geri verilen ısı miktarına eşit olduğu anda ulaştığı dinamik denge sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır ( $T_y$ ).

### 3.1.2.7 Çiğ Noktası Sıcaklığı

Nemli havanın sabit mutlak nem ve sabit atmosfer basıncı koşullarında soğutulması durumunda, belirli bir sıcaklık değerinden sonra hava, içinde bulunan su buharının hepsini taşıyamaz hale gelir ve su buharının bir miktarı yoğurarak havadan ayrılır. Yoğurmanın başladığı andaki sıcaklığa çiğlenme sıcaklığı denir ( $T_{çg}$ ).

### 3.1.2.8 Nemli Havanın Entalpisi

$(1+x)$  kg kuru havanın entalpisi ( $h_h$ ) ile su buharının entalpisi ( $x \cdot h_b$ )'nin toplamına eşit olur ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$h_{1+x} = h_h + x \cdot h_b \quad (3.6)$$

Kuru havanın sabit basınçtaki özgül ısısı  $C_h$  kullanılarak  $T$  sıcaklığındaki entalpisi,

$$h_h = C_h \cdot T \quad (3.7)$$

olarak hesaplanır. Havanın özgül ısısı için ortalama olarak  $C_h = 1,005$  kJ/kg-K kullanılabilir. Su buharının entalpisi için,  $0^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki atmosfer basıncında  $0^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki suyun buharlaşma gizli ısınısını ( $h_0$ ) = 2500 kJ/kg olarak, kızgın su buharının entalpisi hesaplanır;

$$h_b = h_0 + C_{sb} \cdot T = 2500 + C_{sb} \cdot T \quad (3.8)$$

Burada su buharının özgül ısısı ortalama olarak  $C_{sb} = 1,842$  kJ/kg-K kullanılarak, doymamış nemli havanın entalpisini veren bağıntı bulunur [209].

Değerlendirmeye alınan noktadaki nemli hava eğer neme doymamışsa; nemli havanın içindeki buhar kızgın buhar bölgesinde kabul edilir. Bu durumda nemli havanın entalpisi, içinde bulunan kızgın buharın entalpisi ile kuru havanın entalpileri toplamına eşittir. Değerlendirmeye alınan nokta doyma eğrisi üzerinde ise, buharın kızgın olması söz konusu değildir. Kolaylık açısından, genellikle psikrometrik diyagramlarda doymuş havanın toplam enerjisine ait değerler, yaş termometre sıcaklık doğrularına paralel doğrular halinde gösterilmiştir. Örneğin  $45^\circ\text{C}$  'nin altındaki değerler için bu durum büyük hatalar oluşturmamaktadır, ama pek çok kurutma probleminde yüksek sıcaklıklar söz konusu olduğundan gerçek ve doğru toplam enerji doğrularının belirtilmesi gereklidir.

### 3.1.2.9 Nemli Havanın Özgül Isısı

Bir maddenin sıcaklığındaki artış miktarına göre içinde depoladığı ısı enerjisi, özgül ısı olarak tanımlanır. Kuru havanın özgül ısısı ile 1 kg kuru havanın içerdiği su buharı miktarının özgül ısıları toplanarak nemli havanın özgül ısısı bulunur.

Nemli havanın sabit basınçtaki özgül ısısı  $C_{nh}$  aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

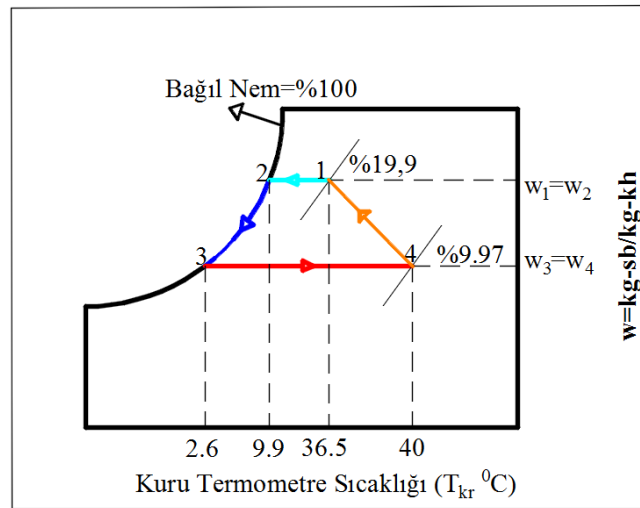
$$C_{nh} = C_{kh} + C_{sb} \cdot x \quad (3.9)$$

Burada  $C_{sb}$  (k.cal/kg.  $^\circ\text{C}$ ), su buharının sabit basınçtaki özgül ısısı;  $C_{kh}$  (k.cal/kg.  $^\circ\text{C}$ ) kuru havanın sabit basınçtaki özgül ısısı;  $x$  ise havanın özgül nemidir.

$$h_{1+x} = 2500 \cdot x + (1,005 + 1,842) \cdot T \quad (3.10)$$

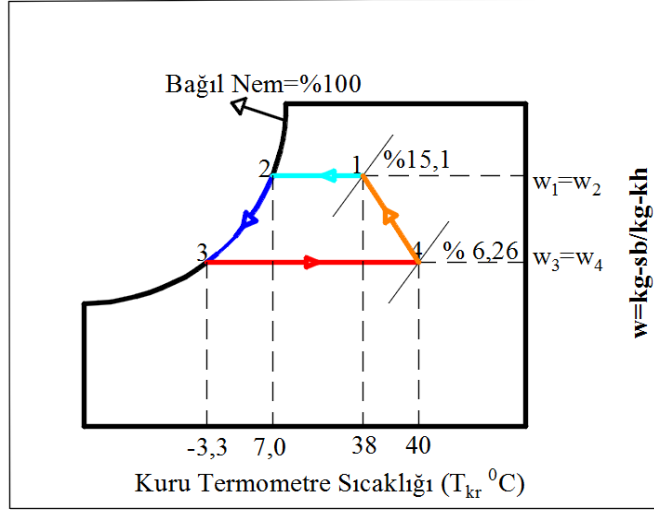
### 3.2 Kurutma Prosesinin Psikrometri Diyagramları Üzerinde Gösterilmesi

Kurutma sisteminde gerçekleşen kurutma sürecine ait proses akışı Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'de elma, kayısı ve patates örnekleri için psikrometrik diyagramlar üzerinde gösterilmiştir. Bu diyagramlar üzerinde; nemli hava soğutmaya tabi tutulduğunda, soğutulan havanın bağıl nemi artarken özgül nemi sabit kalır ve duyulur soğutmadaki doyma eğrisine ( $\phi=100$ ) kadar devam eder (1-2). Nemli havadan su çekme işlemi ise doyma eğrisi ( $\phi=100$ ) üzerinde aşağı inilerek soğutulmak istenilen kuru termometre sıcaklığının doyma eğrisi ile çakışma noktasına kadar gelinir ve bu suretle havanın özgül nemi düşürülerek nem alma işlemi gerçekleştirilmiş olur (2-3). Bu noktadan sonra nemi alınmış hava, duyulur ısıtmaya tabi tutularak özgül nemi sabit kalmak şartıyla bağıl nemi azaltılır (3-4). Duyulur ısıtmaya tabi tutulan hava ile kurutma yapılırken, sıcak havaya üründen nem yüklemesi yapılır. Kurutma işlemi sonundaki havanın kurutma sonrasında kuru termometre sıcaklığı düşerken özgül nemi ve bağıl nemi artmaktadır (4-1). Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'de görülen ve iklimlendirme işlemlerine tabi tutulan kurutma havasının bütün değerleri psikrometrik diyagramdan okunmuştur.

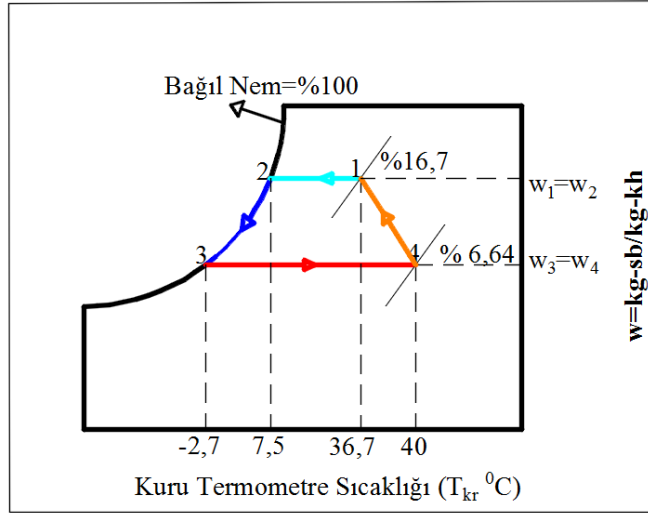


**Şekil 3.1.** Elma Kurutma ve Nem Alma İşleminin Psikrometrik Diyagramda Gösterimi.





**Şekil 3.2.** Kayısı Kurutma ve Nem Alma İşleminin Psikrometrik Diyagramda Gösterimi.



**Şekil 3.3.** Patates Kurutma ve Nem Alma İşleminin Psikrometrik Diyagramda Gösterimi

### 3.3 Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri

#### 3.3.1 Korunum Denklemleri Kütlenin Korunusuyla İlgili Denklemler

##### 3.3.1.1 Kütlenin Korunumu Denklemi

###### Genel kütlenin korunum dengesi,

$$\sum \dot{m}_{giren} - \sum \dot{m}_{çıkan} = \frac{dm_{KH}}{dt} \quad (3.11)$$

Burada,  $\dot{m}$  kütleli debidir.

Kabinli konvektif kurutma sistemi sürekli akışlı sürekli açık (SASA) sistem kabul edildiğinden dolayı  $\frac{dm_{KH}}{dt} = 0$  kabul edilir. Bu nedenle 3.11. deki eşitlik 3.12 deki gibi ifade edilir.

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} \quad (3.12)$$

##### 3.3.1.2 Enerjinin Korunumu Denklemi

$$\sum \dot{E}_{giren} - \sum \dot{E}_{çıkan} = \frac{dE_{KH}}{dt} \quad (3.13)$$

Kabinli konvektif kurutma sistemi sürekli akışlı sürekli açık (SASA) sistem kabul edildiğinden dolayı  $\frac{dE_{KH}}{dt} = 0$  kabul edilir. Bu nedenle 3.13. deki eşitlik 3.14 deki gibi ifade edilir.

$$\sum \dot{E}_{giren} = \sum \dot{E}_{çıkan} \quad (3.14)$$

##### 3.3.1.3 Genel Ekserji Denklemi

###### Ekserji dengesi

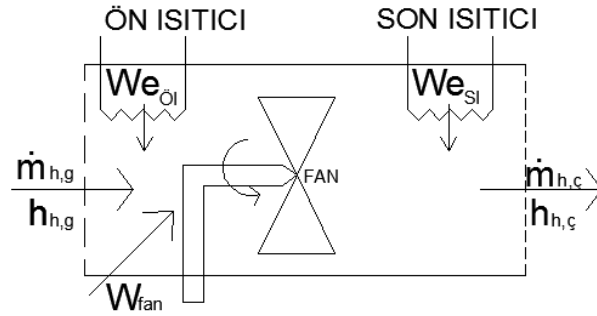
Birim zamanda genel ekserji denkliği aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sum \dot{E}x_{giren} - \sum \dot{E}x_{çıkan} - \sum \dot{E}x_{yo} = \frac{dEx_{KH}}{dt} \quad (3.15)$$

Kabinli konvektif kurutma sistemi sürekli akışlı sürekli açık (SASA) sistem kabul edildiğinden dolayı  $\frac{dEx_{KH}}{dt} = 0$  kabul edilir. Bu nedenle 3.15. deki eşitlik 3.16 deki gibi ifade edilir.

$$\sum \dot{E}x_{giren} - \sum \dot{E}x_{çikan} = \sum \dot{E}x_{yo} \quad (3.16)$$

### 3.3.2 Isıtma Bölümü Kontrol Hacmi İçin Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri



Şekil 3.4. Kurutma Sisteminde Isıtma Bölümünün Şematik Gösterimi.

#### Kütle denkliği

Eşitlik 3.12 bu ısıtma bölümü için sadeleştirilerek aşağıdaki hale gelmiştir.

$$\dot{m}_{h,g} = \dot{m}_{h,ç} = \dot{m}_{nh} \quad 3.17$$

Nemli Hava kütlesi ( $m_{nh}$ ) olarak ifade edilmektedir.

#### Enerji denkliği

Eşitlik 3.14 bu ısıtma bölümü için sadeleştirilerek aşağıdaki hale gelmiştir. Enerji denklemi ısıtma bölümü için sadeleştirilirken kinetik ve potansiyel enerjilerin olmadığı düşünülmüş ve aşağıdaki gibi sadeleştirilmiştir.

$$\dot{Q}_k + \dot{m}_{h,g}h_{h,g} = \dot{m}_{h,ç}h_{h,ç} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18 ısıtma bölümü kontrol hacmine göre düzenlenirse

$$\dot{Q}_{g,ts} = \dot{m}_{kh} \cdot (h_1 - h_5) = \dot{m}_{kh} \cdot C_{p,h} \cdot (T_1 - T_5) \quad (3.19)$$

### **Ekserji Denkliği**

Eşitlik 3.16 bu ısıtma bölümü için sadeleştirilerek aşağıdaki hale gelmiştir. Ekserji denklemi ısıtma bölümü için sadeleştirilirken kinetik ve potansiyel enerjilerin olmadığı düşünülmüş ve aşağıdaki gibi sadeleştirilmiştir.

$$\dot{m}_{kh} \cdot \psi_g + \dot{m}_{sb,g} \cdot \psi_{sb,g} - \dot{m}_{kh} \cdot \psi_\zeta - \dot{m}_{sb,\zeta} \cdot \psi_{sb,\zeta} + \dot{E}x_{g,ts} = \dot{E}x_{yo} \quad (3.20)$$

Denklem 3.20 ısıtma bölümü kontrol hacmine göre tekrar düzenlenerek aşağıdaki hali alır.

$$\dot{E}x_{yo} = \dot{m}_{kh} \cdot (\psi_5 - \psi_1) + \dot{m}_{sb,5} \cdot \psi_{sb,5} - \dot{m}_{sb,1} \cdot \psi_{sb,1} + \dot{E}x_{g,ts} \quad (3.21)$$

$$(\psi_5 - \psi_1)_{kh} = (h_{5,kh} - h_{1,kh}) - T_0 \cdot (s_{5,kh} - s_{1,kh}) \quad (3.22)$$

$$(h_{5,kh} - h_{1,kh}) = c_{p,ort} \cdot (T_5 - T_1) \quad (3.23)$$

$$(s_{5,kh} - s_{1,kh}) = c_{p,ort} \cdot \ln\left(\frac{T_5}{T_1}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{P_{kh,5}}{P_{kh,1}}\right) \quad (3.24)$$

$$\psi_{sb,5} = (h_{sb,5} - h_{ss,0}) - T_0 \cdot (s_{sb,5} - s_{ss,0}) \quad (3.25)$$

$$\psi_{sb,1} = (h_{sb,1} - h_{ss,0}) - T_0 \cdot (s_{sb,1} - s_{ss,0}) \quad (3.26)$$

$$\dot{E}x_{g,ts} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{is}}\right) \cdot \dot{Q}_{g,ts} \quad (3.27)$$

$T_{is}$  Isıtma sistemin ortalama sıcaklığını ifade eder.  $T_{is} = T_{ort} = \frac{T_1 + T_5}{2}$  olarak bulunur.

### 3.3.3 Kurutma Kabini Kontrol Hacmi İçin Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri



Şekil 3.5. Kurutma Sisteminde Kurutma Kabininin Şematik Gösterimi.

#### Kütle Denge Denklemleri

Eşitlik 3.12 bu kurutma kabini bölümü için sadeleştirilerek aşağıdaki hale gelmiştir.

Ürün ( $\dot{m}_ü$ ) için;

$$\dot{m}_{yü} = \dot{m}_{kü} + \dot{m}_{su,\zeta} \quad (3.28)$$

$$\dot{m}_{su,\zeta} = \dot{m}_{yü} - \dot{m}_{kü} \quad (3.29)$$

Kuru hava kütlesi ( $m_{kh}$ ) olarak ifade edilmektedir.

Kuru hava ( $\dot{m}_{kh}$ ) için;

$$(\dot{m}_{kh})_1 = (\dot{m}_{kh})_3 = (\dot{m}_{kh}) \quad (3.30)$$

Su( $\dot{m}_{su}$ ) ve su buharı için;

$$w_1 \dot{m}_{kh} + (\dot{m}_{su})_2 = w_3 \dot{m}_{kh} \quad (3.31)$$

$$(\dot{m}_{su})_2 = w_3 \dot{m}_{kh} - w_1 \dot{m}_{kh} = \dot{m}_{su,\zeta} \quad (3.32)$$

yukarıdaki ürün, kuru hava ve su buharı için oluşturulan denklem bir arada yazılırsa aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{m}_{yü} + (\dot{m}_{kh})_1 + w_1 \dot{m}_{kh} = \dot{m}_{kü} + (\dot{m}_{kh})_3 + w_3 \dot{m}_{kh} \quad (3.33)$$

Bu denklemde sadeleştirilirse aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{m}_{su,\zeta} = \dot{m}_{yü} - \dot{m}_{kü} = w_3 \dot{m}_{kh} - w_1 \dot{m}_{kh} \quad (3.34)$$

$$m_{nh} = m_{kh} + m_{sb} \quad (3.35)$$

$$P_T = P_{kh} + P_{sb} \quad (3.36)$$

tanımlamaları göz önüne alınarak ve nemli hava su buharı ve kuru havadan ibaret bir gaz karışımı düşünülürse ideal gaz denklemi *Dalton Modeline* göre aşağıdaki gibi olur.

$$P_{kh} = \rho_h \cdot R_h \cdot T_k \quad (3.37)$$

$$\rho_h = \frac{m_{kh}}{\mathcal{V}_k} \quad (3.38)$$

$$P_{sb} = \rho_{sb} \cdot R_{sb} \cdot T_k \quad (3.39)$$

$$\rho_{sb} = \frac{m_{sb}}{\mathcal{V}_k} \quad (3.40)$$

Nemli hava ve su buharı birlikte gaz karışımı olarak düşünülürse ideal gaz denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$(P_{kh} + P_{sb}) \cdot \mathcal{V}_k = (m_{kh} \cdot R_h + m_{sb} \cdot R_{sb}) \cdot T_k \quad (3.41)$$

Bu denklem düzenlenirse

$$(P_{kh} + P_{sb}) = (\rho_h \cdot R_h + \rho_{sb} \cdot R_{sb}) \cdot T_k \quad (3.42)$$

bu tanımlardan da anlaşılacağı üzere

$$\rho_{nh} = \rho_h + \rho_{sb} \quad (3.43)$$

yazılabilir. Kütleli debi ise aşağıdaki gibi formülüne edilir.

$$m_{nh} = \rho_{nh} \cdot V \cdot A \quad (3.44)$$

$$P_{sb} = \frac{P_T \cdot w}{(0,622 + w)} \quad (3.45)$$

Burada  $P_T$  nemli havanın toplam basıncı,  $P_{kh}$  nemli hava içerisindeki kuru havanın kısmi basıncı,  $P_{sb}$  nemli hava içerisindeki su buharının kısmi basıncı,  $m_{kh}$  nemli hava içerisindeki kuru havanın kütlesi,  $m_{sb}$  nemli hava içerisindeki su buharının kütlesi  $R_h$  ve  $R_{sb}$  sırasıyla nemli hava içerisindeki kuru havanın ve su buharının özgül gaz sabitleridir.  $V_k$  ve  $T_k$  nemli havanın sahip olduğu hacim ve sıcaklıklardır.  $\rho_{nh}$  nemli havanın yoğunluğu,  $\rho_h$  ve  $\rho_{sb}$  sırasıyla nemli hava içerisindeki kuru havanın ve su buharının yoğunluklarıdır.

### **Enerji Denge Denklemleri**

Eşitlik 3.14 kurutma kabini bölümü için sadeleştirilerek aşağıdaki hale gelmiştir. Enerji denklemi kurutma kabini bölümü için sadeleştirilirken kinetik ve potansiyel enerjilerin olmadığı düşünülmüş ve aşağıdaki gibi sadeleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{kh}h_1 + (\dot{m}_{sb})_1 (h_{sb})_1 + (\dot{m}_{yü})_2 \cdot (h_{yü})_2 \\ = \dot{m}_{kh}h_3 + (\dot{m}_{sb})_3(h_{sb})_3 + (\dot{m}_{kü})_4 \cdot (h_{kü})_4 + \dot{Q}_k \end{aligned} \quad (3.46)$$

denklemin 3.46 sadeleştirilirse aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_k = \dot{m}_{kh} \cdot (h_1 - h_3)_{kh} + \dot{m}_{kh} \cdot \dot{w}_1 \cdot (h_{sb})_1 - \dot{m}_{kh} \cdot \dot{w}_3 \cdot (h_{sb})_3 + (\dot{m}_{yü})_2 \cdot (h_{yü})_2 \\ - (\dot{m}_{kü})_4 \cdot (h_{kü})_4 \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$h_{kh} = C_{p,kh} \cdot T \quad (3.48)$$

$$h_{\ddot{u}} = C_{\ddot{u}} \cdot T \quad (3.49)$$

3.47 nolu denklem açık şekilde yazılırsa aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{Q}_{g,kk} = \dot{m}_{kh} \cdot C_{p,h} \cdot T_1 + (\dot{m}_{sb})_1 (h_{sb})_1 + \dot{m}_{y\ddot{u}} \cdot C_{y\ddot{u}} \cdot T_2 \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_k = \dot{m}_{kh} \cdot C_{p,kh} \cdot (T_1 - T_3)_{kh} + \dot{m}_{kh} \cdot \dot{w}_1 \cdot (h_{sb})_1 - \dot{m}_{kh} \cdot \dot{w}_3 \cdot (h_{sb})_3 + (\dot{m}_{y\ddot{u}}) \\ \cdot C_{y\ddot{u}} \cdot T_2 - (\dot{m}_{k\ddot{u}}) \cdot C_{k\ddot{u}} \cdot T_4 \end{aligned} \quad (3.51)$$

Burada  $T_2$  sıcaklığı ürünün kurutma kabine girmeden önceki sıcaklığını ifade eder. +4 °C meyvelerin saklanma koşulları olduğundan dolayı bu sıcaklık meyve ve sebze dilimlerinin kurutma işlemi başlangıcındaki yaş ürün sıcaklığı ( $T_2$ ) olarak alınmıştır.  $T_4$  sıcaklığı ise  $T_1$  ve  $T_3$  sıcaklığının ortalaması olarak kabul edilmiştir.  $T_4 = \frac{T_1+T_3}{2}$  Olarak ifade edilir.  $C_{p,h}$  kuru havanın sabit basınçtaki özgül ısısını ifade etmektedir. Kurutulan maddenin özgül ısı değeri, ürünün saf bileşenleri dikkate alınarak aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir[178,179].

$$\begin{aligned} C_{\ddot{u}r\ddot{u}n} = C_{su}X_{su} + C_{protein}X_{protein} + C_{yağ}X_{yağ} + C_{karbonhidrat}X_{karbonhidrat} \\ + C_{lif}X_{lif} + C_{k\ddot{u}l}X_{k\ddot{u}l} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Su için;

$$C_{su} = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2 \quad (3.53)$$

Protein için;

$$C_{protein} = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2 \quad (3.54)$$

Yağ için;

$$C_{yağ} = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2 \quad (3.55)$$

Karbonhidrat için;

$$C_{karbonhidrat} = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2 \quad (3.56)$$



Lif için;

$$C_{lif} = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2 \quad (3.57)$$

Kül için;

$$C_{kül} = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2 \quad (3.58)$$

Şeklindedir.

Denklem 3.52’de “X” şeklinde verilen parametre kurutulmuş ürün içerisindeki bileşenlerin oranını ifade eder ve aşağıdaki tablolarda Elma, Kayısı ve Patates için verilmiştir.

Ürünleri oluşturan bileşenler olan su, protein, yağ, karbonhidrat, lif ve kül için özgül ısılar denklem 3.53, 3.54, 3.55, 3.56, 3.57, 3.58 kullanılarak hesaplanmıştır. Sonra bu hesaplana özgül ısılar (C) ve Tablo 3.5’de verilen ürünler içerisindeki bileşen oranları (X) göz önünde bulundurularak Denklem 3.52 kullanılarak ürünlere ait özgül ısılar hesaplanmıştır. Ürünlerin bileşenlerine ait oranları çeşitli kuruma hızları ve sıcaklıkları için Tablo 3.2, 3.3 ve 3.4’de verilmiştir. Sonuç olarak yaş ve kuru ürünlere ait hesaplanan özgül ısılar ise Tablo 3.6’da verilmiştir.

**Tablo 3.1. Elma İçin Kurutma Sonrası Ürün Birleşenleri Oranları (X)**

ELMA (Kurutulmuş ürün)		V1=0,2 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	27,9 °C	X	36,8 °C	X	44,3 °C	X	50,1 °C	X	55,3 °C	X	
K.Ürün (gr)	57,8 gr	(% ORAN)	48,8 gr	(% ORAN)	39,7 gr	(% ORAN)	28,9 gr	(% ORAN)	22,8 gr	(% ORAN)	
Su	42,27 gr	0,73131	33,27 gr	0,68176	24,17 gr	0,60882	13,37 gr	0,46263	7,27 gr	0,31886	
Protein	0,35 gr	0,00606	0,35 gr	0,00717	0,35 gr	0,00882	0,35 gr	0,01211	0,35 gr	0,01535	
Yağ	0,58 gr	0,01003	0,58 gr	0,01189	0,58 gr	0,01461	0,58 gr	0,02007	0,58 gr	0,02544	
Karbonhidrat	12,41 gr	0,21471	12,41 gr	0,25430	12,41 gr	0,31259	12,41 gr	0,42941	12,41 gr	0,54430	
Lif	1,81 gr	0,03131	1,81 gr	0,03709	1,81 gr	0,04559	1,81 gr	0,06263	1,81 gr	0,07939	
Kül	0,38 gr	0,00657	0,38 gr	0,00779	0,38 gr	0,00957	0,38 gr	0,01315	0,38 gr	0,01667	
ELMA (Kurutulmuş ürün)		V2=0,3m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,1 °C	X	37,5 °C	X	45,6 °C	X	49,1 °C	X	56,6 °C	X	
K.Ürün (gr)	54,0 gr	(% ORAN)	42,6 gr	(% ORAN)	35,5 gr	(% ORAN)	26,9 gr	(% ORAN)	19,9 gr	(% ORAN)	
Su	38,47 gr	0,71241	27,07 gr	0,63545	19,97 gr	0,56254	11,37 gr	0,42268	4,37 gr	0,21960	
Protein	0,35 gr	0,00648	0,35 gr	0,00822	0,35 gr	0,00986	0,35 gr	0,01301	0,35 gr	0,01759	
Yağ	0,58 gr	0,01074	0,58 gr	0,01362	0,58 gr	0,01634	0,58 gr	0,02156	0,58 gr	0,02915	
Karbonhidrat	12,41 gr	0,22981	12,41 gr	0,29131	12,41 gr	0,34958	12,41 gr	0,46134	12,41 gr	0,62362	
Lif	1,81 gr	0,03352	1,81 gr	0,04249	1,81 gr	0,05099	1,81 gr	0,06729	1,81 gr	0,09095	
Kül	0,38 gr	0,00704	0,38 gr	0,00892	0,38 gr	0,01070	0,38 gr	0,01413	0,38 gr	0,01910	
ELMA (Kurutulmuş ürün)		V3=0,4 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,2 °C	X	36,4 °C	X	43,9 °C	X	49,3 °C	X	56,5 °C	X	
K.Ürün (gr)	51,1 gr	(% ORAN)	41,5 gr	(% ORAN)	32,2 gr	(% ORAN)	29,1 gr	(% ORAN)	21,0 gr	(% ORAN)	
Su	35,57 gr	0,69609	25,97 gr	0,62578	16,67 gr	0,51770	13,57 gr	0,46632	5,47 gr	0,26048	
Protein	0,35 gr	0,00685	0,35 gr	0,00843	0,35 gr	0,01087	0,35 gr	0,01203	0,35 gr	0,01667	
Yağ	0,58 gr	0,01135	0,58 gr	0,01398	0,58 gr	0,01801	0,58 gr	0,01993	0,58 gr	0,02762	
Karbonhidrat	12,41 gr	0,24286	12,41 gr	0,29904	12,41 gr	0,38540	12,41 gr	0,42646	12,41 gr	0,59095	
Lif	1,81 gr	0,03542	1,81 gr	0,04361	1,81 gr	0,05621	1,81 gr	0,06220	1,81 gr	0,08619	
Kül	0,38 gr	0,00744	0,38 gr	0,00916	0,38 gr	0,01180	0,38 gr	0,01306	0,38 gr	0,01810	
ELMA (Kurutulmuş ürün)		V4=0,5 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	29,3 °C	X	37,1 °C	X	42,0 °C	X	49,1 °C	X	56,3 °C	X	
K.Ürün (gr)	52,2 gr	(% ORAN)	41,6 gr	(% ORAN)	32,2 gr	(% ORAN)	26,3 gr	(% ORAN)	20,9 gr	(% ORAN)	
Su	36,67 gr	0,70249	26,07 gr	0,62668	14,07 gr	0,47534	10,77 gr	0,40951	5,37 gr	0,25694	
Protein	0,35 gr	0,00670	0,35 gr	0,00841	0,35 gr	0,01182	0,35 gr	0,01331	0,35 gr	0,01675	
Yağ	0,58 gr	0,01111	0,58 gr	0,01394	0,58 gr	0,01959	0,58 gr	0,02205	0,58 gr	0,02775	
Karbonhidrat	12,41 gr	0,23774	12,41 gr	0,29832	12,41 gr	0,41926	12,41 gr	0,47186	12,41 gr	0,59378	
Lif	1,81 gr	0,03467	1,81 gr	0,04351	1,81 gr	0,06115	1,81 gr	0,06882	1,81 gr	0,08660	
Kül	0,38 gr	0,00728	0,38 gr	0,00913	0,38 gr	0,01284	0,38 gr	0,01445	0,38 gr	0,01818	
ELMA (Kurutulmuş ürün)		V5=0,6 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	29,1 °C	X	38,0 °C	X	41,9 °C	X	52,9 °C	X	57,2 °C	X	
K.Ürün (gr)	50,9 gr	(% ORAN)	42,6 gr	(% ORAN)	31,7 gr	(% ORAN)	26,4 gr	(% ORAN)	20,5 gr	(% ORAN)	
Su	35,37 gr	0,69489	27,07 gr	0,63545	16,17 gr	0,51009	10,87 gr	0,41174	4,97 gr	0,24244	
Protein	0,35 gr	0,00688	0,35 gr	0,00822	0,35 gr	0,01104	0,35 gr	0,01326	0,35 gr	0,01707	
Yağ	0,58 gr	0,01139	0,58 gr	0,01362	0,58 gr	0,01830	0,58 gr	0,02197	0,58 gr	0,02829	
Karbonhidrat	12,41 gr	0,24381	12,41 gr	0,29131	12,41 gr	0,39148	12,41 gr	0,47008	12,41 gr	0,60537	
Lif	1,81 gr	0,03556	1,81 gr	0,04249	1,81 gr	0,05710	1,81 gr	0,06856	1,81 gr	0,08829	
Kül	0,38 gr	0,00747	0,38 gr	0,00892	0,38 gr	0,01199	0,38 gr	0,01439	0,38 gr	0,01854	
ELMA (Kurutulmuş ürün)		V6=0,7 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,9 °C	X	36,5 °C	X	43,0 °C	X	49,0 °C	X	56,6 °C	X	
K.Ürün (gr)	49,2 gr	(% ORAN)	43,9 gr	(% ORAN)	30,6 gr	(% ORAN)	26,4 gr	(% ORAN)	20,5 gr	(% ORAN)	
Su	33,67 gr	0,68435	28,37 gr	0,64624	15,07 gr	0,49248	10,87 gr	0,41174	4,97 gr	0,24244	
Protein	0,35 gr	0,00711	0,35 gr	0,00797	0,35 gr	0,01144	0,35 gr	0,01326	0,35 gr	0,01707	
Yağ	0,58 gr	0,01179	0,58 gr	0,01321	0,58 gr	0,01895	0,58 gr	0,02197	0,58 gr	0,02829	
Karbonhidrat	12,41 gr	0,25224	12,41 gr	0,28269	12,41 gr	0,40556	12,41 gr	0,47008	12,41 gr	0,60537	
Lif	1,81 gr	0,03679	1,81 gr	0,04123	1,81 gr	0,05915	1,81 gr	0,06856	1,81 gr	0,08829	
Kül	0,38 gr	0,00772	0,38 gr	0,00866	0,38 gr	0,01242	0,38 gr	0,01439	0,38 gr	0,01854	

**Tablo 3.2. Kayısı İçin Kurutma Sonrası Ürün Birleşenleri Oranları (X)**

KAYISI (Kurutulmuş ürün)		V1=0,2 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	27,8 °C	X	36,6 °C	X	42,4 °C	X	49,9 °C	X	58,2 °C	X	
K.Ürün (gr)	80,6 gr	(% ORAN)	67,3 gr	(% ORAN)	66,5 gr	(% ORAN)	61,3 gr	(% ORAN)	47,9 gr	(% ORAN)	
Su	71,50 gr	0,88710	58,20 gr	0,86478	57,40 gr	0,86316	52,20 gr	0,85155	38,80 gr	0,81002	
Protein	0,27 gr	0,00335	0,27 gr	0,00401	0,27 gr	0,00406	0,27 gr	0,00440	0,27 gr	0,00564	
Yağ	0,21 gr	0,00261	0,21 gr	0,00312	0,21 gr	0,00316	0,21 gr	0,00343	0,21 gr	0,00438	
Karbonhidrat	5,66 gr	0,07022	5,66 gr	0,08410	5,66 gr	0,08511	5,66 gr	0,09233	5,66 gr	0,11816	
Lif	1,24 gr	0,01538	1,24 gr	0,01842	1,24 gr	0,01865	1,24 gr	0,02023	1,24 gr	0,02589	
Kül	1,73 gr	0,02146	1,73 gr	0,02571	1,73 gr	0,02602	1,73 gr	0,02822	1,73 gr	0,03612	
KAYISI (Kurutulmuş ürün)		V2=0,3m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,3 °C	X	38,3 °C	X	43,7 °C	X	51,7 °C	X	60,0 °C	X	
K.Ürün (gr)	78,5 gr	(% ORAN)	67,1 gr	(% ORAN)	58,3 gr	(% ORAN)	57,6 gr	(% ORAN)	44,2 gr	(% ORAN)	
Su	69,40 gr	0,88408	58,00 gr	0,86438	49,20 gr	0,84391	48,50 gr	0,84201	35,10 gr	0,79412	
Protein	0,27 gr	0,00344	0,27 gr	0,00402	0,27 gr	0,00463	0,27 gr	0,00469	0,27 gr	0,00611	
Yağ	0,21 gr	0,00268	0,21 gr	0,00313	0,21 gr	0,00360	0,21 gr	0,00365	0,21 gr	0,00475	
Karbonhidrat	5,66 gr	0,07210	5,66 gr	0,08435	5,66 gr	0,09708	5,66 gr	0,09826	5,66 gr	0,12805	
Lif	1,24 gr	0,01580	1,24 gr	0,01848	1,24 gr	0,02127	1,24 gr	0,02153	1,24 gr	0,02805	
Kül	1,73 gr	0,02204	1,73 gr	0,02578	1,73 gr	0,02967	1,73 gr	0,03003	1,73 gr	0,03914	
KAYISI (Kurutulmuş ürün)		V3=0,4 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,8 °C	X	38,3 °C	X	44,4 °C	X	52,3 °C	X	58,9 °C	X	
K.Ürün (gr)	78,1 gr	(% ORAN)	65,9 gr	(% ORAN)	66,7 gr	(% ORAN)	54,5 gr	(% ORAN)	43,8 gr	(% ORAN)	
Su	69,00 gr	0,88348	56,80 gr	0,86191	57,60 gr	0,86357	45,40 gr	0,83303	34,70 gr	0,79224	
Protein	0,27 gr	0,00346	0,27 gr	0,00410	0,27 gr	0,00405	0,27 gr	0,00495	0,27 gr	0,00616	
Yağ	0,21 gr	0,00269	0,21 gr	0,00319	0,21 gr	0,00315	0,21 gr	0,00385	0,21 gr	0,00479	
Karbonhidrat	5,66 gr	0,07247	5,66 gr	0,08589	5,66 gr	0,08486	5,66 gr	0,10385	5,66 gr	0,12922	
Lif	1,24 gr	0,01588	1,24 gr	0,01882	1,24 gr	0,01859	1,24 gr	0,02275	1,24 gr	0,02831	
Kül	1,73 gr	0,02215	1,73 gr	0,02625	1,73 gr	0,02594	1,73 gr	0,03174	1,73 gr	0,03950	
KAYISI (Kurutulmuş ürün)		V4=0,5 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,6 °C	X	38,6 °C	X	43,6 °C	X	51,9 °C	X	59,9 °C	X	
K.Ürün (gr)	76,1 gr	(% ORAN)	65,3 gr	(% ORAN)	63,3 gr	(% ORAN)	53,6 gr	(% ORAN)	45,3 gr	(% ORAN)	
Su	67,00 gr	0,88042	56,20 gr	0,86064	54,20 gr	0,85624	44,50 gr	0,83022	36,20 gr	0,79912	
Protein	0,27 gr	0,00355	0,27 gr	0,00413	0,27 gr	0,00427	0,27 gr	0,00504	0,27 gr	0,00596	
Yağ	0,21 gr	0,00276	0,21 gr	0,00322	0,21 gr	0,00332	0,21 gr	0,00392	0,21 gr	0,00464	
Karbonhidrat	5,66 gr	0,07438	5,66 gr	0,08668	5,66 gr	0,08942	5,66 gr	0,10560	5,66 gr	0,12494	
Lif	1,24 gr	0,01629	1,24 gr	0,01899	1,24 gr	0,01959	1,24 gr	0,02313	1,24 gr	0,02737	
Kül	1,73 gr	0,02273	1,73 gr	0,02649	1,73 gr	0,02733	1,73 gr	0,03228	1,73 gr	0,03819	
KAYISI (Kurutulmuş ürün)		V5=0,6 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,6 °C	X	37,6 °C	X	46,0 °C	X	52,2 °C	X	59,3 °C	X	
K.Ürün (gr)	75,2 gr	(% ORAN)	63,7 gr	(% ORAN)	66,0 gr	(% ORAN)	53,1 gr	(% ORAN)	40,2 gr	(% ORAN)	
Su	66,10 gr	0,87899	54,60 gr	0,85714	56,90 gr	0,86212	44,00 gr	0,82863	31,10 gr	0,77363	
Protein	0,27 gr	0,00359	0,27 gr	0,00424	0,27 gr	0,00409	0,27 gr	0,00508	0,27 gr	0,00672	
Yağ	0,21 gr	0,00279	0,21 gr	0,00330	0,21 gr	0,00318	0,21 gr	0,00395	0,21 gr	0,00522	
Karbonhidrat	5,66 gr	0,07527	5,66 gr	0,08885	5,66 gr	0,08576	5,66 gr	0,10659	5,66 gr	0,14080	
Lif	1,24 gr	0,01649	1,24 gr	0,01947	1,24 gr	0,01879	1,24 gr	0,02335	1,24 gr	0,03085	
Kül	1,73 gr	0,02301	1,73 gr	0,02716	1,73 gr	0,02621	1,73 gr	0,03258	1,73 gr	0,04303	
KAYISI (Kurutulmuş ürün)		V6=0,7 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,9 °C	X	38,0 °C	X	45,6 °C	X	52,0 °C	X	59,9 °C	X	
K.Ürün (gr)	73,8 gr	(% ORAN)	59,9 gr	(% ORAN)	58,0 gr	(% ORAN)	55,8 gr	(% ORAN)	43,5 gr	(% ORAN)	
Su	64,70 gr	0,87669	50,80 gr	0,84808	48,90 gr	0,84310	46,70 gr	0,83692	34,40 gr	0,79080	
Protein	0,27 gr	0,00366	0,27 gr	0,00451	0,27 gr	0,00466	0,27 gr	0,00484	0,27 gr	0,00621	
Yağ	0,21 gr	0,00285	0,21 gr	0,00351	0,21 gr	0,00362	0,21 gr	0,00376	0,21 gr	0,00483	
Karbonhidrat	5,66 gr	0,07669	5,66 gr	0,09449	5,66 gr	0,09759	5,66 gr	0,10143	5,66 gr	0,13011	
Lif	1,24 gr	0,01680	1,24 gr	0,02070	1,24 gr	0,02138	1,24 gr	0,02222	1,24 gr	0,02851	
Kül	1,73 gr	0,02344	1,73 gr	0,02888	1,73 gr	0,02983	1,73 gr	0,03100	1,73 gr	0,03977	

**Tablo 3.3. Patates İçin Kurutma Sonrası Ürün Birleşenleri Oranları (X)**

PATATES (Kurutulmuş ürün)		V1=0,2 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	27,8 °C	X	34,8 °C	X	41,9 °C	X	52,3 °C	X	56,7 °C	X	
K.Ürün (gr)	56,0 gr	(% ORAN)	57,6 gr	(% ORAN)	44,1 gr	(% ORAN)	31,8 gr	(% ORAN)	24,8 gr	(% ORAN)	
Su	37,68 gr	0,67286	39,28 gr	0,68194	25,78 gr	0,58458	13,48 gr	0,42390	6,48 gr	0,26129	
Protein	1,48 gr	0,02643	1,48 gr	0,02569	1,48 gr	0,03356	1,48 gr	0,04654	1,48 gr	0,05968	
Yağ	0,23 gr	0,00411	0,23 gr	0,00399	0,23 gr	0,00522	0,23 gr	0,00723	0,23 gr	0,00927	
Karbonhidrat	14,37 gr	0,25661	14,37 gr	0,24948	14,37 gr	0,32585	14,37 gr	0,45189	14,37 gr	0,57944	
Lif	1,44 gr	0,02571	1,44 gr	0,02500	1,44 gr	0,03265	1,44 gr	0,04528	1,44 gr	0,05806	
Kül	0,80 gr	0,01429	0,80 gr	0,01389	0,80 gr	0,01814	0,80 gr	0,02516	0,80 gr	0,03226	
PATATES (Kurutulmuş ürün)		V2=0,3m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	31,8 °C	X	37,7 °C	X	43,6 °C	X	52,1 °C	X	53,1 °C	X	
K.Ürün (gr)	57,2 gr	(% ORAN)	45,1 gr	(% ORAN)	37,3 gr	(% ORAN)	32,6 gr	(% ORAN)	22,2 gr	(% ORAN)	
Su	38,88 gr	0,67972	26,78 gr	0,59379	18,98 gr	0,50885	14,28 gr	0,43804	3,88 gr	0,17477	
Protein	1,48 gr	0,02587	1,48 gr	0,03282	1,48 gr	0,03968	1,48 gr	0,04540	1,48 gr	0,06667	
Yağ	0,23 gr	0,00402	0,23 gr	0,00510	0,23 gr	0,00617	0,23 gr	0,00706	0,23 gr	0,01036	
Karbonhidrat	14,37 gr	0,25122	14,37 gr	0,31863	14,37 gr	0,38525	14,37 gr	0,44080	14,37 gr	0,64730	
Lif	1,44 gr	0,02517	1,44 gr	0,03193	1,44 gr	0,03861	1,44 gr	0,04417	1,44 gr	0,06486	
Kül	0,80 gr	0,01399	0,80 gr	0,01774	0,80 gr	0,02145	0,80 gr	0,02454	0,80 gr	0,03604	
PATATES (Kurutulmuş ürün)		V3=0,4 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,7 °C	X	36,0 °C	X	41,3 °C	X	48,9 °C	X	58,2 °C	X	
K.Ürün (gr)	57,1 gr	(% ORAN)	40,0 gr	(% ORAN)	30,1 gr	(% ORAN)	29,9 gr	(% ORAN)	25,7 gr	(% ORAN)	
Su	38,78 gr	0,67916	21,68 gr	0,54200	11,78 gr	0,39136	11,58 gr	0,38729	7,38 gr	0,28716	
Protein	1,48 gr	0,02592	1,48 gr	0,03700	1,48 gr	0,04917	1,48 gr	0,04950	1,48 gr	0,05759	
Yağ	0,23 gr	0,00403	0,23 gr	0,00575	0,23 gr	0,00764	0,23 gr	0,00769	0,23 gr	0,00895	
Karbonhidrat	14,37 gr	0,25166	14,37 gr	0,35925	14,37 gr	0,47741	14,37 gr	0,48060	14,37 gr	0,55914	
Lif	1,44 gr	0,02522	1,44 gr	0,03600	1,44 gr	0,04784	1,44 gr	0,04816	1,44 gr	0,05603	
Kül	0,80 gr	0,01401	0,80 gr	0,02000	0,80 gr	0,02658	0,80 gr	0,02676	0,80 gr	0,03113	
PATATES (Kurutulmuş ürün)		V4=0,5 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	27,8 °C	X	35,6 °C	X	40,5 °C	X	56,1 °C	X	63,9 °C	X	
K.Ürün (gr)	54,5 gr	(% ORAN)	41,4 gr	(% ORAN)	38,2 gr	(% ORAN)	25,5 gr	(% ORAN)	23,0 gr	(% ORAN)	
Su	36,18 gr	0,66385	23,08 gr	0,55749	19,88 gr	0,52042	7,18 gr	0,28157	4,68 gr	0,20348	
Protein	1,48 gr	0,02716	1,48 gr	0,03575	1,48 gr	0,03874	1,48 gr	0,05804	1,48 gr	0,06435	
Yağ	0,23 gr	0,00422	0,23 gr	0,00556	0,23 gr	0,00602	0,23 gr	0,00902	0,23 gr	0,01000	
Karbonhidrat	14,37 gr	0,26367	14,37 gr	0,34710	14,37 gr	0,37618	14,37 gr	0,56353	14,37 gr	0,62478	
Lif	1,44 gr	0,02642	1,44 gr	0,03478	1,44 gr	0,03770	1,44 gr	0,05647	1,44 gr	0,06261	
Kül	0,80 gr	0,01468	0,80 gr	0,01932	0,80 gr	0,02094	0,80 gr	0,03137	0,80 gr	0,03478	
PATATES (Kurutulmuş ürün)		V5=0,6 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,3 °C	X	37,0 °C	X	40,3 °C	X	56,6 °C	X	61,3 °C	X	
K.Ürün (gr)	56,0 gr	(% ORAN)	40,7 gr	(% ORAN)	38,8 gr	(% ORAN)	33,3 gr	(% ORAN)	23,3 gr	(% ORAN)	
Su	37,68 gr	0,67286	22,38 gr	0,54988	20,48 gr	0,52784	14,98 gr	0,44985	4,98 gr	0,21373	
Protein	1,48 gr	0,02643	1,48 gr	0,03636	1,48 gr	0,03814	1,48 gr	0,04444	1,48 gr	0,06352	
Yağ	0,23 gr	0,00411	0,23 gr	0,00565	0,23 gr	0,00593	0,23 gr	0,00691	0,23 gr	0,00987	
Karbonhidrat	14,37 gr	0,25661	14,37 gr	0,35307	14,37 gr	0,37036	14,37 gr	0,43153	14,37 gr	0,61674	
Lif	1,44 gr	0,02571	1,44 gr	0,03538	1,44 gr	0,03711	1,44 gr	0,04324	1,44 gr	0,06180	
Kül	0,80 gr	0,01429	0,80 gr	0,01966	0,80 gr	0,02062	0,80 gr	0,02402	0,80 gr	0,03433	
PATATES (Kurutulmuş ürün)		V6=0,7 m/s									
K.S.Sıcaklığı (°C)	28,7 °C	X	36,7 °C	X	43,6 °C	X	56,3 °C	X	55,2 °C	X	
K.Ürün (gr)	58,9 gr	(% ORAN)	45,3 gr	(% ORAN)	34,3 gr	(% ORAN)	30,4 gr	(% ORAN)	22,7 gr	(% ORAN)	
Su	40,58 gr	0,68896	26,98 gr	0,59558	15,98 gr	0,46589	12,08 gr	0,39737	4,38 gr	0,19295	
Protein	1,48 gr	0,02513	1,48 gr	0,03267	1,48 gr	0,04315	1,48 gr	0,04868	1,48 gr	0,06520	
Yağ	0,23 gr	0,00390	0,23 gr	0,00508	0,23 gr	0,00671	0,23 gr	0,00757	0,23 gr	0,01013	
Karbonhidrat	14,37 gr	0,24397	14,37 gr	0,31722	14,37 gr	0,41895	14,37 gr	0,47270	14,37 gr	0,63304	
Lif	1,44 gr	0,02445	1,44 gr	0,03179	1,44 gr	0,04198	1,44 gr	0,04737	1,44 gr	0,06344	
Kül	0,80 gr	0,01358	0,80 gr	0,01766	0,80 gr	0,02332	0,80 gr	0,02632	0,80 gr	0,03524	

**Tablo 3.4.** Elma, Kayısı ve Patatesin 100 Gram Yaş Ürün Numuneleri İçerisinde Bulunan Ürün Bileşenleri ve Oranları

YAŞ ÜRÜN (100 GR)	ELMA		KAYISI		PATATES	
ÜRÜN BİLEŞENİ	ÜRÜN BİLEŞENİ AĞIRLIĞI	X (% ORAN)	ÜRÜN BİLEŞENİ AĞIRLIĞI	X (% ORAN)	ÜRÜN BİLEŞENİ AĞIRLIĞI	X (% ORAN)
Su	84,47 gr	0,84470	90,90 gr	0,90900	81,68 gr	0,81680
Protein	0,35 gr	0,00350	0,27 gr	0,00270	1,48 gr	0,01480
Yağ	0,58 gr	0,00580	0,21 gr	0,00210	0,23 gr	0,00230
Karbonhidrat	12,41 gr	0,12410	5,66 gr	0,05660	14,37 gr	0,14370
Lif	1,81 gr	0,01810	1,24 gr	0,01240	1,44 gr	0,01440
Kül	0,38 gr	0,00380	1,73 gr	0,01730	0,80 gr	0,00800

**Tablo 3.5.** Elma, Kayısı ve Patatesin Yaş ve Kuru Ürün Numuneleri İçin Hesaplanan Özgül Isıları

ELMA (Kurutulmuş ürün)		$C_{yü} = 3,777 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{K}$								
Hızlar (m/s)	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$
0,2	28,95 °C	3,499	38,40 °C	3,380	47,15 °C	3,203	55,05 °C	2,844	62,65 °C	2,492
0,3	29,05 °C	3,451	38,75 °C	3,264	47,80 °C	3,088	54,55 °C	2,744	63,30 °C	2,245
0,4	29,10 °C	3,410	38,20 °C	3,239	46,95 °C	2,975	54,65 °C	2,853	63,25 °C	2,347
0,5	29,65 °C	3,426	38,55 °C	3,241	46,00 °C	2,867	54,55 °C	2,711	63,15 °C	2,338
0,6	29,55 °C	3,407	39,00 °C	3,264	45,95 °C	2,955	56,45 °C	2,718	63,60 °C	2,303
0,7	29,45 °C	3,380	38,25 °C	3,290	46,50 °C	2,911	54,50 °C	2,716	63,30 °C	2,302
KAYISI (Kurutulmuş ürün)		$C_{yü} = 3,936 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{K}$								
Hızlar (m/s)	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$
0,2	28,90 °C	3,885	38,30 °C	3,831	46,20 °C	3,831	54,95 °C	3,806	64,10 °C	3,706
0,3	29,15 °C	3,877	39,15 °C	3,830	46,85 °C	3,781	55,85 °C	3,782	65,00 °C	3,666
0,4	29,40 °C	3,875	39,15 °C	3,824	47,20 °C	3,832	56,15 °C	3,759	64,45 °C	3,660
0,5	29,30 °C	3,867	39,30 °C	3,821	46,80 °C	3,813	55,95 °C	3,752	64,95 °C	3,678
0,6	29,30 °C	3,864	38,80 °C	3,811	48,00 °C	3,829	56,10 °C	3,748	64,65 °C	3,613
0,7	29,45 °C	3,858	39,00 °C	3,788	47,80 °C	3,780	56,00 °C	3,769	64,95 °C	3,657
PATATES (Kurutulmuş ürün)		$C_{yü} = 3,704 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{K}$								
Hızlar (m/s)	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$	$T_{kü}$	$C_{kü}$
0,2	28,90 °C	3,349	37,40 °C	3,378	45,95 °C	3,139	56,15 °C	2,745	63,35 °C	2,346
0,3	30,90 °C	3,368	38,85 °C	3,157	46,80 °C	2,950	56,05 °C	2,781	61,55 °C	2,127
0,4	29,35 °C	3,366	38,00 °C	3,026	45,65 °C	2,653	54,45 °C	2,652	64,10 °C	2,411
0,5	28,90 °C	3,327	37,80 °C	3,064	45,25 °C	2,977	58,05 °C	2,391	66,95 °C	2,205
0,6	29,15 °C	3,350	38,50 °C	3,046	45,15 °C	2,996	58,30 °C	2,812	65,65 °C	2,229
0,7	29,35 °C	3,390	38,35 °C	3,161	46,80 °C	2,842	58,15 °C	2,681	62,60 °C	2,174

### Ekserji Denge Denklemleri

Eşitlik 3.16 kurutma kabini bölümü için sadeleştirilerek aşağıdaki hale gelmiştir. Ekserji denklemi kurutma kabini bölümü için sadeleştirilirken kinetik ve potansiyel ekserjilerin ihmal edildiği düşünülmüş ve aşağıdaki gibi sadeleştirilmiştir.

Şekil 3.5’de gösterilen kurutma kabini kontrol hacmine giren ve çıkan tüm noktalar için ekserji aşağıdaki formüle hesaplanır.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{kh} \cdot \psi_1 + \dot{m}_{sb,1} \cdot \psi_{sb,1} + \dot{m}_{yü} \cdot \psi_{yü} - \dot{m}_{kh} \cdot \psi_3 - \dot{m}_{sb,3} \cdot \psi_{sb,3} - \dot{m}_{kü} \cdot \psi_{kü} \\ - \dot{E}_{x_{l,k}} = \dot{E}_{x_{y0}} \end{aligned} \quad (3.59)$$

3.59 denklemi kurutma kabini kontrol hacmi için nemli hava içerisindeki su buharı ve kuru hava göz önünde bulundurularak aşağıdaki gibi yok olan ekserji miktarı yazılabilir. Burada  $\dot{m}_{yü}$  yaş ürünü,  $\dot{m}_{kü}$  de kuru ürünü ifade etmektedir.  $\dot{E}_{x_{l,k}}$  ise ısı yoluyla kaybolan ekserji akısını ifade etmektedir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

Burada 3.59 denklemi tekrar düzenlenirse aşağıdaki hali alır.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x_{y0}} = \dot{m}_{kh} \cdot (\psi_1 - \psi_3)_{kh} + \dot{m}_{sb,1} \cdot \psi_{sb,1} - \dot{m}_{sb,3} \cdot \psi_{sb,3} + \dot{m}_{yü} \cdot \psi_{yü} - \dot{m}_{kü} \cdot \psi_{kü} \\ - \dot{E}_{x_{l,k}} \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$Ex = \dot{m} \cdot \psi \quad (3.61)$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (3.62)$$

Denklem 3.61 ve 3.62 dikkate alınarak 3.60 denkleminin parametreleri aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$(\psi_1 - \psi_3)_{kh} = (h_{1,kh} - h_{3,kh}) - T_0 \cdot (s_{1,kh} - s_{3,kh}) \quad (3.63)$$

$$(h_{1,kh} - h_{3,kh}) = c_{p,ort} \cdot (T_1 - T_3) \quad (3.64)$$

$$(s_{1,kh} - s_{3,kh}) = c_{p,ort} \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_3}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{P_{kh,1}}{P_{kh,3}}\right) \quad (3.65)$$

$$\psi_{sb,3} = (h_{sb,3} - h_{ss,0}) - T_0 \cdot (s_{sb,3} - s_{ss,0}) \quad (3.66)$$

$$\psi_{sb,1} = (h_{sb,1} - h_{ss,0}) - T_0 \cdot (s_{sb,1} - s_{ss,0}) \quad (3.67)$$

$$\psi_{yü} = C_{yü} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) \quad (3.68)$$

$$\psi_{kü} = C_{kü} \cdot \ln\left(\frac{T_4}{T_0}\right) \quad (3.69)$$

olarak ifade edilirler.

$\dot{E}x_{yo}$ : Ekserji yok oluşunu ifade eder ve aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$\dot{E}x_{lk}$ : ısı kaybıyla gerçekleşen ekserji kaybını ifade eder ve aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}x_{l,k} = \left(1 - \frac{T_0}{T_y}\right) \dot{Q}_k \quad (3.70)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\psi$  akış ekserjisini (kJ/kg),  $\dot{E}x$  zamana bağlı olarak ekserjiyi (kJ/s=kW),  $\dot{E}x_{l,k}$  ısı kaybı yoluyla ekserji kaybını ve  $\dot{E}x_{yo}$  ekserji yok oluşunu ifade eder.  $\dot{m}$  kütleli debiyi (kg/s),  $h$  özgül entalpiyi (kJ/kg) ve  $s$  özgül entropiyi (kJ/kgK) göstermektedir.  $T_0$  referans sıcaklık (ölü hal),  $h_0$  ve  $s_0$  referans sıcaklık için, sırasıyla, entalpi ve entropi değerleridir.  $T_y$  Kurutma kabini yüzey sıcaklığını ifade eder ve kurutma kabininin dengeye geldiği sıcaklık yani  $T_4$  alınır. Kurutma sisteminin dışındaki çevre sıcaklığı olarak alınan  $T_0$  sıcaklığı, oda sıcaklığına yani 20 °C sıcaklığına denk alınmıştır.  $C_p$  kurutma havasının özgül ısı (kJ/kg K),  $\omega$  özgül nem ve  $h_{sb}$  doymuş su buharının entalpi değeridir (kJ/kg) ve  $h_0$  ise çevre sıcaklığındaki suyun sıvı formdaki entalpisidir.  $R$  gaz sabitini (kJ/kg K), ve  $P$  basınç değerini (kPa) göstermektedir.  $\dot{Q}_k$  ise ürün ve kurutma kabininden kaybedilen ısı miktarını gösterir.

Ürünün entalpi değeri ise aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$h = C_{ürün} \cdot T_{ü} \quad (3.71)$$

Yaş ve kuru ürünlerin özgül entropi değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$s_{y\ddot{u}} = C_{y\ddot{u}} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) \quad (3.72)$$

$$s_{k\ddot{u}} = C_{k\ddot{u}} \cdot \ln\left(\frac{T_4}{T_0}\right) \quad (3.73)$$

Burada  $T_2$  sıcaklığı ürünün kurutma kabineine girmeden önceki sıcaklığını ifade eder.  $T_0$  ise oda sıcaklığını yani 20 °C ifade eder.  $T_4$  sıcaklığı ise  $T_1$  ve  $T_3$  sıcaklığının ortalaması alınmıştır ve  $T_4 = \frac{T_1+T_3}{2}$  olarak bulunur.  $C_{y\ddot{u}}$  ve  $C_{k\ddot{u}}$  3.52 nolu denklemlerle hesaplanan yaş ve kuru ürün için özgül ısılarını ifade ederler.  $T_{\ddot{u}}$  ürün sıcaklığını ifade eder ve  $T_4$  sıcaklığına eşit olarak alınır.

Kurutma kabineinin ekserji verimliliği farklı bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir, aşağıda, bu çalışmada kullanılmış olan ekserji verimliliği denklemi yer almaktadır.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{sb}}{\dot{E}x_g} = \frac{\dot{E}x_g - \dot{E}x_{yo}}{\dot{E}x_g} \quad (3.74)$$

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_{kh} + \dot{E}x_{sb} + \dot{E}x_{\ddot{u}} \quad (3.75)$$

Bu 3.75 denklemindeki parametreler açılarak yazılırsa aşağıdaki gibi olur.

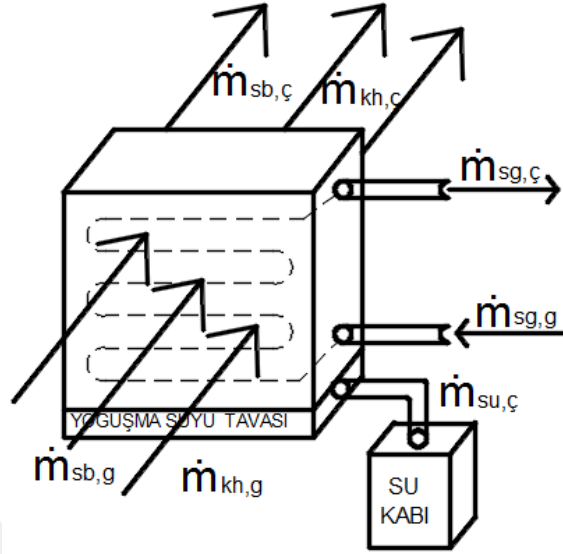
$$\dot{E}x_{kh} = \dot{m}_{kh} \cdot \left\{ c_{p,ort} \cdot (T_1 - T_0) - T_0 \cdot \left( c_{p,ort} \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{P_{kh,1}}{P_{kh,0}}\right) \right) \right\} \quad (3.76)$$

$$\dot{E}x_{sb} = \dot{m}_{sb,1} \cdot \left\{ (h_{sb,1} - h_{ss,0}) - T_0 \cdot (s_{sb,1} - s_{ss,0}) \right\} \quad (3.77)$$

$$\dot{E}x_{y\ddot{u}} = \dot{m}_{y\ddot{u}} \cdot \left\{ C_{y\ddot{u}} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) \right\} \quad (3.78)$$



### 3.3.4 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri



Şekil 3.6. Basit Bir Soğutma Bölümünün Şematik Gösterimi.

Deney düzeneğinde varolan soğutma bölümünün kütle enerji ve ekserji denklemleri verilen şekildeki kontrol hacmi göz önünde bulundurularak aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.

#### **Kütle Dengesi**

Denklem 3.12 kullanılarak yoğuşturucu kontrol hacmi için kuru havanın kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{m}_{kh,g} = \dot{m}_{kh,\zeta} = \dot{m}_{kh} \quad (3.79)$$

$$\dot{m}_{su,g} + \dot{m}_{sb,g} + \dot{m}_{kh,g} = \dot{m}_{sb,\zeta} + \dot{m}_{kh,\zeta} + \dot{m}_{su,\zeta} \quad (3.80)$$

Denklem 3.80 kontrol hacmi için düzenlenirse aşağıdaki net hale gelmiş olur.

Soğutma ünitesinde havadan nem alındığından sisteme su girişi olmaz. Denklem 3.80 düzenlenerek aşağıdaki hale gelir.

$$\dot{m}_{su,\zeta} = \dot{m}_{su,6} = \dot{m}_{kh} \cdot (w_g - w_\zeta) = \dot{m}_{kh} \cdot (w_3 - w_5) \quad (3.81)$$

Denklemden görülen  $w$  hava içerisindeki özgül nemi göstermektedir ve aşağıdaki gibi formülüne edilir

$$w = \frac{\dot{m}_{sb}}{\dot{m}_{kh}} \quad (3.82)$$

### **Enerji Dengesi**

Denklemler 3.14 kullanılarak yoğuşturucu hacmi için enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{kh} \cdot h_{kh,g} + \dot{m}_{sb,g} \cdot h_{sb,g} \\ = \dot{m}_{kh} \cdot h_{kh,\zeta} + \dot{m}_{sb,\zeta} \cdot h_{sb,\zeta} + \dot{m}_{su,\zeta} \cdot h_{su,\zeta} + \dot{Q}_{sg} \end{aligned} \quad (3.83)$$

Bu denklem tekrar düzenlendiğinde aşağıdaki hale getirilir.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{kh} \cdot w_3 \cdot h_{sb,3} - \dot{m}_{kh} \cdot w_5 \cdot h_{sb,5} + \dot{m}_{kh} \cdot C_{ph} \cdot (T_3 - T_5) - \dot{m}_{su,6} \cdot h_{su,6} \\ = \dot{Q}_{sg} \end{aligned} \quad (3.84)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{sg} = \dot{m}_{kh} \cdot w_3 \cdot h_{sb,3} - \dot{m}_{kh} \cdot w_5 \cdot h_{sb,5} + \dot{m}_{kh} \cdot C_{ph} \cdot (T_3 - T_5) - \dot{m}_{kh} \cdot (w_3 \\ - w_5) \cdot h_{su,6} \end{aligned} \quad (3.85)$$

$$\dot{Q}_{sg} = \dot{m}_{kh} \cdot \{ w_3 \cdot (h_{sb,3} - h_{su,6}) - w_5 \cdot (h_{sb,5} - h_{su,6}) + C_{ph} \cdot (T_3 - T_5) \} \quad (3.86)$$

### **Ekserji Eşitliği**

Eşitlik 3.16 soğutma bölümü için sadeleştirilerek aşağıdaki hale gelmiştir. Ekserji denklemi soğutma bölümü için sadeleştirilirken kinetik ve potansiyel ekserjilerin ihmal edildiği düşünülmüş ve aşağıdaki gibi sadeleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{kh} \cdot \psi_g + \dot{m}_{sb,g} \cdot \psi_{sb,g} - \dot{m}_{kh} \cdot \psi_\zeta - \dot{m}_{sb,\zeta} \cdot \psi_{sb,\zeta} - \dot{m}_{su} \cdot \psi_{su} - \dot{E}x_{sg} \\ = \dot{E}x_{yo} \end{aligned} \quad (3.87)$$

Denklemler 3.87 soğutma bölümü kontrol hacmine göre tekrar düzenlenerek aşağıdaki hali alır.

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{yo} = \dot{m}_{kh} \cdot (\psi_3 - \psi_5) + \dot{m}_{sb,3} \cdot \psi_{sb,3} - \dot{m}_{sb,5} \cdot \psi_{sb,5} - \dot{m}_{su,6} \cdot \psi_{su,6} \\ - \dot{E}x_{sg} \end{aligned} \quad (3.88)$$

$$(\psi_3 - \psi_5)_{kh} = (h_{3,kh} - h_{5,kh}) - T_0 \cdot (s_{3,kh} - s_{5,kh}) \quad (3.89)$$

$$(h_{3,kh} - h_{5,kh}) = c_{p,ort} \cdot (T_3 - T_5) \quad (3.90)$$

$$(s_{3,kh} - s_{5,kh}) = c_{p,ort} \cdot \ln\left(\frac{T_3}{T_5}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{P_{kh,3}}{P_{kh,5}}\right) \quad (3.91)$$

$$\psi_{sb,3} = (h_{sb,3} - h_{ss,0}) - T_0 \cdot (s_{sb,3} - s_{ss,0}) \quad (3.92)$$

$$\psi_{sb,5} = (h_{sb,5} - h_{ss,0}) - T_0 \cdot (s_{sb,5} - s_{ss,0}) \quad (3.93)$$

$$\psi_{su,6} = (h_{ss,6} - h_{ss,0}) - T_0 \cdot (s_{ss,6} - s_{ss,0}) \quad (3.94)$$

$$\dot{E}x_{sg} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ss}}\right) \cdot \dot{Q}_{sg} \quad (3.95)$$

$T_{ss}$  soğutma sisteminin ortalama sıcaklığını ifade eder.  $T_{ss} = T_{ort} = \frac{T_3 + T_5}{2}$  olarak bulunur.

$$\dot{m}_{su,6} = \dot{m}_{kh} \cdot (w_3 - w_5) \quad (3.96)$$

### 3.3.5 Kurutma Sistemi Performans Tesir Katsayıları

#### 3.3.5.1 Isıtma Bölümü Performans Denklemleri

Isıtma bölümünün enerji performans değerlendirmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_{g,ıs}}{\dot{W}_{komp,elek}} \quad (3.97)$$

Isıtma bölümünün ekserji performans değerlendirmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$COP_{ex,IP} = \frac{\dot{Q}_{g,ıs} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{ıs}}\right)}{\dot{W}_{komp,elek}} \quad (3.98)$$

IP: Isı pompası ifade eder.

$$T_{ıs} = \frac{T_1 + T_5}{2} \quad (3.99)$$

#### 3.3.5.2 Kurutma Kabini Bölümü Performans Denklemleri

Kurutma kabini bölümünün enerji performans değerlendirmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_{g,kk}}{\dot{W}_T} \quad (3.100)$$

Kurutma kabini bölümünün ekserji performans değerlendirmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$COP_{ex,IP} = \frac{\dot{Q}_{g,kk} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{kk}}\right)}{\dot{W}_T} \quad (3.101)$$

IP: Isı pompası ifade eder.

$$\dot{W}_T = \dot{W}_{komp} + \dot{W}_{fan} \quad (3.102)$$

$$T_{kk} = \frac{T_1 + T_3}{2} \quad (3.103)$$

$$\dot{Q}_{g,kk} = \dot{m}_h h_1 + (\dot{m}_{sb})_1 (h_{sb})_1 + (\dot{m}_{yü})_2 \cdot (h_{yü})_2 \quad (3.104)$$

$$\dot{Q}_{g,kk} = \dot{m}_h \cdot C_{ph} \cdot T_1 + (\dot{m}_{sb})_1 (h_{sb})_1 + \dot{m}_{yü} \cdot C_{yü} \cdot T_2 \quad (3.105)$$

$$\dot{Q}_{g,kk} = \text{kurutma kabini giren}$$

Kurutma kabini bölümü ekserji verimliliği denklemi:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{E}x_{yo}}{\dot{E}x_g} \quad (3.106)$$

$$\dot{E}x_g = \dot{m}_{kh} \cdot \psi_1 + \dot{m}_{sb,1} \cdot \psi_{sb,1} + \dot{m}_{yü} \cdot \psi_{yü} \quad (3.107)$$

### 3.3.5.3 Soğutma Bölümü Performans Denklemleri

Soğutma bölümünün enerji performans değerlendirmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$COP_{SM} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_{komp,elek}} \quad (3.108)$$

Soğutma bölümünün ekserji performans değerlendirmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$COP_{ex,SM} = \frac{\dot{Q}_c \cdot (1 - T_0/T_{ss})}{\dot{W}_{komp,elek}} \quad (3.109)$$

SM: soğutma makinesini ifade eder.

#### 3.3.5.4 Sistemin Enerji ve Ekserji Performans Denklemleri

Komple kurutma sisteminin enerji performans değerlendirilmesi aşağıdaki formüldeki gibi hesaplanır.

$$COP_{sis} = \frac{\dot{Q}_{sg}}{\dot{W}_{komp,elek} + \dot{W}_{fan,elek}} \quad (3.110)$$

Komple kurutma sisteminin ekserji performans değerlendirilmesi aşağıdaki formüldeki gibi hesaplanır.

$$COP_{ex,sis} = \frac{\dot{Q}_{sg} (1 - T_0/T_{ss})}{\dot{W}_{komp,elek} + \dot{W}_{fan,elek}} \quad (3.111)$$

$\dot{W}_{komp,elek}$  ve  $\dot{W}_{fan,elek}$  fan ve kompresörlerinin üzerinde bulunan elektrik motorlarının şebekeden çektiği elektrik akımı güçlerine eşit alınmıştır.

#### 3.3.5.5 Sistemin Özgül Nem Çekme Oranı Denklemi

Özgül kurutma enerjisi; üründen birim miktarda suyu uzaklaştırmak için harcanan enerji olarak ifade edilmektedir. Özgül nem çekme oranı (ÖNÇO&SMER) ise kWh enerji girdisine karşı alınan nemin kg oranı olarak belirtilerek aşağıdaki gibi ifade edilmiştir[180]

$$\text{ÖNÇO(SMER)} = \frac{\text{Alınan nem (kg)}}{\text{Enerji girdisi(kWh)}} \quad (3.112)$$

$$\dot{N}ÇO_{sis} = \frac{\dot{m}_{su,\zeta}}{\dot{W}_{komp,elek} + \dot{W}_{fan,elek}} \quad (3.113)$$

Burada  $\dot{m}_{su,\zeta}$  bir saatte uzaklaştırılan suyun kg olarak miktarıdır.

### 3.4 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

Difüzyonla kütle transferinde çeşitli gıdaların ince tabaka kurutma işleminde geniş bir araştırma olanağı bulmuş olan teorik model, Fick'in ikinci yasasının çözümüdür [213, 214]. Ürün kurutmayı karakterize etmek için en önemli parametrelerden biri de difüzyon katsayısıdır.

Dikdörtgen, silindir ve küre şekilli ürünlerin difüzyon katsayısını belirlemede kullanılan bir boyutlu Fick difüzyon denklemi aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\frac{\partial M(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n D_{ef} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (3.114)$$

Burada n, kurutulan ürünün kartezyen, silindirik ve küresel şeklinde olmasına bağlı sayıdır ve aşağıda verilmiştir.

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

Bu tez çalışmasında kurutma işlemine tabi tutulmuş ürünler Elma, Kayısı ve Patates seçilmiştir ve bu üç ürünün şekli yaklaşık küresel kabul edilmiştir. Fakat bu ürünler ince dilimler halinde dilimlenerek kurutma işlemi yapıldığından; bu dilimlerin herbiri kartezyen koordinatlarda olduğu kabul edilmiştir.

Denklemi 3.114'de difüzyon katsayısı sabit alınarak çözülüp kartezyen koordinatlarda uygun sınır koşulları ile basitleştirme yapılırsa, kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$O = \frac{M_{KB,t} - M_{e,t}}{M_{KB,0} - M_{e,t}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (3.115)$$

Burada;  $D_{ef}$ : Etkin difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ),  $L$ : Dilim yarı kalınlığı ( $m$ ),  $t$ : süre ( $s$ ) olarak ifade edilmektedir. Orta ve uzun kurutma süreleri için, (3.115) denkleminin ilk terimi çözüm için kullanılır ve aşağıdaki gibi sade hale getirilir[215].

$$NO = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (3.116)$$

3.116 nolu denklemden  $D_{ef}$  çekilirse aşağıdaki gibi olur.

$$D_{ef} = -\frac{4L^2}{\pi^2 \cdot t} \cdot \ln\left[\frac{\pi^2 \cdot NO}{8}\right] \quad (3.117)$$

### 3.5 Belirsizlik (Hata) ve Regresyon (Doğruluk) Analizi

#### 3.5.1 Hata ve belirsizlik

Deneysel çalışmalarda, elde edilen sonuçların doğruluğunu etkileyen hata miktarlarının belirlenmesi önemlidir. Ölçüm hatası, bir niceliğin ölçülen değeri ile gerçek değeri arasındaki farktır. Belirsizlik ise; ölçümlerdeki hataların tam olarak bilinmemesidir. Standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde elde edilen veriler değerlendirildiğinde iki farklı şekilde hata ortaya çıkabilir. Bunlardan biri, deney düzeneğinin ve ölçme cihazlarının yapısından kaynaklanan kaçınılmaz hatalar, diğeri ise deneyi yapan kişinin yaptığı ihmallerden kaynaklanan hatalardır [216]. Bir ölçüm hatası, çoğu zaman birçok nedenden kaynaklanan çok sayıda bağımsız hataların sonucunda oluşur. Hata analizi, bu bağımsız hataların genel hata üzerindeki etkilerini değerlendirme çalışmasıdır. Ölçüm hatası hiçbir zaman tam olarak bilinemez. En iyi ihtimalle, içinde gerçek değer yer aldığı bir bölge belirlenebilir. Bu bölge belirsizlik olarak adlandırılır ve hatanın olası bir büyüklüğünün ifadesidir. Belirsizliğin gerçekçi bir ölçümüne ulaşmak için tüm potansiyel hata kaynaklarının etkilerinin tam olarak belirlenmesi gerekir [217]. Bu hataların değerlendirilmesi için yapılan *Belirsizlik Analizi*, sonuçların yorumlanması açısından oldukça önemlidir.

Belirsizlik analizi kısaca şöyle yapılabilir;

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

$R=R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  şeklinde tanımlanabilir.  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  sözü edilen bağımsız değişkenlerin belirsizleri olmak üzere  $R$  için toplam belirsizlik, aşağıdaki ifade ile belirlenebilir [186]

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.118)$$

Nem İçeriği, Nem Oranı, Kuruma Hızı, Difüzyon Katsayısı, Özgül Nem Çekme Oranı belirsizliklerinin hesaplanması için Denklem 3.118 bu kurutma parametreleri için uyarlanarak aşağıda gibi oluşturulmuştur.

Nem içeriğinin belirsizliği ( $W_{MKB}$ ) denklem 3.119 ile hesaplanır.

$$W_{MKB,t} = \left[ \left( \frac{\partial M_{KB,t}}{\partial M_t} W_{M0} \right)^2 + \left( \frac{\partial M_{KB,t}}{\partial M_{KM}} W_{M_{KM}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.119)$$

Nem oranı belirsizliği ( $W_{NO}$ ) denklem 3.120 ile hesaplanır.

$$W_{NO} = \left[ \left( \frac{\partial NO}{\partial M_{KB,t}} W_{M_{KB,t}} \right)^2 + \left( \frac{\partial NO}{\partial M_{KB,0}} W_{M_{KB,0}} \right)^2 + \left( \frac{\partial NO}{\partial M_{Me,t}} W_{Me,t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.120)$$

Kurutma hızındaki belirsizlik değeri ( $W_{KH}$ ) denklem 3.121 ile hesaplanır.

$$W_{KH} = \left[ \left( \frac{\partial KH}{\partial M_{KB,t}} W_{M_{KB,t}} \right)^2 + \left( \frac{\partial KH}{\partial M_{KB,t-\Delta t}} W_{M_{KB,t-\Delta t}} \right)^2 + \left( \frac{\partial KH}{\partial \Delta t} W_{\Delta t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.121)$$

Difüzyon katsayısındaki belirsizlik değeri ( $W_{Def}$ ) denklem 3.122 ile hesaplanır.

$$W_{Def} = \left[ \left( \frac{\partial D_{ef}}{\partial L} W_L \right)^2 + \left( \frac{\partial D_{ef}}{\partial \Delta t} W_{\Delta t} \right)^2 + \left( \frac{\partial D_{ef}}{\partial NO} W_{NO} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.122)$$

Özgül Nem Çekme Oranı (ÖNÇÖ) katsayısındaki belirsizlik değeri ( $W_{ÖNÇÖ}$ ) denklem 3.123 ile hesaplanır.



$$W_{\text{ÖNÇÖ}} = \left[ \left( \frac{\partial \text{ÖNÇÖ}}{\partial V} W_V \right)^2 + \left( \frac{\partial \text{ÖNÇÖ}}{\partial \Delta t} W_{\Delta t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.123)$$

Kullanılan ölçüm cihazlarının belirsizlikleri ve ölçümü yapan kişiden kaynaklanan belirsizlikler Tablo 3.7’de verilmiştir. Bu belirsizlik değerleri yardımıyla Denklem 3.118 kullanılarak deneyde ölçülen büyüklükler için toplam belirsizlikler hesaplanmış ve Tablo 3.7’de verilmiştir. Cihazdan kaynaklı belirsizlik üretici firma tarafından cihazın özellikleri arasında belirtilirken, ölçüm yapan kişinin yanlış okumasından kaynaklanan belirsizlik ise tecrübelerine dayanarak alınmıştır [182].

**Tablo 3.6.** Deney Sırasında Kullanılan Ölçüm Cihazlarına Ait Toplam Belirsizlik

Ölçülen Büyüklük	Ölçümde Kullanılan Cihaz	Cihazdan Kaynaklanan	Ölçümden Kaynaklanan	Toplam Belirsizlik(±)
		Belirsizlik (±)	Belirsizlik (±)	
Sıcaklık (°C)	Termometre	0,5	0,1	0,509901951
Sıcaklık (°C)	Termokupl	1,0	0,1	1,004987562
Hız (m/sn)	Hız ölçer	0,1	0,1	0,141421356
Bagıl Nem (%)	Nem ölçer	0,035	0,01	0,036400549
Ağırlık (g)	Dijital Terazi	0,01	0,01	0,014142136
Zaman (dk)	Kronometre	0,0003	0,1	0,10000045
Uzunluk	Metre	0,002	0,01	0,010198039
Hacim	Litre	0,05	0,02	0,053851648

Ürünlerin kuruma kinetiğinin belirlenmesinde literatürde en çok kullanılan modellerin optimizasyonu deneysel veriler kullanılarak MATLAB programında yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda; elma, kayısı ve patates için en uygun kurutma modeli ve kurutma şartları belirlenmiş ve bu belirlenen modelleri oluşturan parametrelerin belirsizlikleri hesaplanarak Tablo 3.8’de verilmiştir. Ayrıca ürünlere ait en uyumlu kurutma eğrilerini veren modeller ve optimum kurutma şartları kullanılarak kurutma parametrelerinin belirsizlikleri hesaplanmış ve bu değerler ( $W_{MKB,0}$ ,  $W_{MKB,t}$ ,  $W_{NO}$ ,  $W_{KH}$ ,  $W_{D,ef}$ ,  $W_{\text{ÖNÇÖ}}$ )’de aynı tabloda verilmiştir.

**Tablo 3.7.** Ürünler İçin Hesaplanan Kurutma Parametrelerine ait Toplam Belirsizlik Değerleri

ÜRÜN K.ŞARTLAR	MODEL	ELMA	MODEL	KAYISI	MODEL	PATATES	NEM İÇERİĞİNDEKİ BELİRSİZLİK		
		V5T2		V3T3		V5T2	ELMA	$W_{MKE,D}$	0,005012445
$M_0$	MİDİLLİ VE ARK.	100	VERMA VE ARK.	100	MİDİLLİ VE ARK.	100	KAYISI	$W_{MKE,D}$	0,015587874
$M_t$		42,6		66,7		40,7	PATATES	$W_{MKE,D}$	0,003499034
$M_{KM}$		15,53		9,1		18,32	NEM İÇERİĞİNDEKİ BELİRSİZLİK)		
$M_{KB,0}$		5,43915003		9,98901		4,45852	ELMA	$W_{MKE,t}$	0,001689492
$M_{KB,t}$		1,74307791		6,32967		1,22162	KAYISI	$W_{MKE,t}$	0,009927947
$W_{MKE-g,0} (\pm)$		0,01414214		0,01414		0,01414	PATATES	$W_{MKE,t}$	0,001034157
$W_{MKE-g,t} (\pm)$		0,01414214		0,01414		0,01414	NEM ORANINDAKİ BELİRSİZLİK		
$N_0$		0,31948		0,63333		0,27302	ELMA	$W_{NO}$	0,001526378
$M_{e,t}$		7,93614		9,11732		6,01076	KAYISI	$W_{NO}$	0,002890855
$W_{nem\ ölçer}$		0,03640055		0,0364		0,0364	PATATES	$W_{NO}$	0,001683127
$M_{KB,t}$		1,74307791		6,32967		1,22162	KURUMA HIZINDAKİ BELİRSİZLİK		
$M_{KB,t-\Delta t}$		2,4270141		6,97869		1,71272	ELMA	$W_{KH}$	8,07162E-05
$\Delta t=30\ dk$		30		30		30	KAYISI	$W_{KH}$	8,54348E-05
$W_{at} (\pm)$		0,10000045		0,1		0,1	PATATES	$W_{KH}$	5,71609E-05
KH		0,02279787		0,02163		0,01637	Def KATSAYINDAKİ BELİRSİZLİK		
Def		4,7267E-10		1,3E-10		9,8E-10	ELMA	$W_{D,ef}$	3,21355E-09
L		0,0015		0,0015		0,002	KAYISI	$W_{D,ef}$	8,54221E-10
$W_L$		0,01019804		0,0102		0,0102	PATATES	$W_{D,ef}$	5,00716E-09
$W_{hacim}$		0,05385165		0,05385		0,05385	ÖNÇÖ'DAKİ BELİRSİZLİK		
ÖNÇÖ		67,9		39,4		70,1775	ELMA	$W_{ONCO}$	0,235128167
V	57,4	33,3	59,3	KAYISI	$W_{ONCO}$	0,145973884			
				PATATES	$W_{ONCO}$	0,242451858			

### 3.5.2 Regresyon (Doğruluk) Analizinde Kullanılan Denklemler

Regresyon analizlerinde Matlab programı kullanılmıştır. Deneysel olarak bulunan ve modeller ile tahmin edilen nem oranı değerleri arasındaki uyumu istatistiksel olarak açıklamak amacıyla, tahminin standart hatası (RMSE) ve regresyon katsayısı ( $R^2$ ), değerlerinden yararlanılmıştır. Tahminin standart hatası (RMSE), model ile elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerler arasındaki sapmayı göstermektedir. Modelin doğruluğu için bu değerlerin sıfıra yakın olması arzu edilir. Regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ise, model ile elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerler arasındaki uyumluluğu göstermektedir. Regresyon katsayısı ( $R^2$ ), ürünlerin kuruma eğrilerini tanımlayan denklemleri seçmek için ana kriter olarak alınmıştır. Bu katsayının bire yakın olması istenir. [71,187,97]. RMSE ve  $R^2$  değerleri eşitlik 3.124 ve eşitlik 3.125 ifadeleri kullanılarak hesaplanır. [220].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (NO_{i,deneysel} - NO_{i,teorik})^2}{N}} \quad (3.124)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (NO_{i,deneysel} - NO_{i,deneysel,ort})^2 - (NO_{i,teorik} - NO_{i,deneysel})^2}{\sum_{i=1}^N (NO_{i,deneysel} - NO_{i,deneysel,ort})^2} \quad (3.125)$$

Burada  $NO_{i,teorik}$  model ile hesaplanan tahmini nem oranı değerini ve  $NO_{i,deneysel}$  deneysel sonuçlarından elde edilen nem oranı değerini ifade etmektedir. N deneysel veri sayısını ve  $NO_{i,deneysel,ort}$  ise deneysel sonuçlarından elde edilen nem oranı değerinin ortalamasını açıklamaktadır.

## 4. MATERYAL VE METOD (DENEYSEL ÇALIŞMA)

### 4.1 Deneyde Kullanılan Ürünler

#### 4.1.1 Deneyde Kullanılan Ürünler ve Hazırlanışları

Kurutma sisteminde Elma, Kayısı ve Patates kurutulmuştur. Ürünler Ankara'da bir semt pazarından orta boy büyüklükte geliş güzel seçilerek satın alınmıştır. Tedarik edilen bu ürünler buzdolabında +4°C'de muhafaza edilmiştir. Deneyler başlamadan önce ürünler buzdolabından çıkarılarak 2 saat süreyle ortam sıcaklığında bekletilmiş ve ortam ile ısı dengese ulaşması sağlanmıştır.

Daha sonra kayısılar önce yıkanmış sonra çekirdekleri çıkarılarak ikiye ayrılarak dilimlenmiştir. Dilimler 30x10x3 mm boyutlarında olacak şekilde oluşturulmuştur. Elmalar yıkanmış ve çekirdekleri çıkartılarak 50x20x3mm boyutlarında özel bir kesiciyle dilimler haline getirilmiştir. Patatesler ise önce yıkanmış sonra kabukları soyulmuş ve 50x30x4 mm boyutlarında özel bir kesici ile dilimlere ayrılmıştır. Kurutma ürünleri çeşitli boyutlarda dilimlenmiş, bu dilimler hassas terazide tartılmış ve 100'er gramlık miktarlarda kurutulacak ürün numuneleri olarak hazırlanmıştır.

Ürünler konvektif tipli deney düzeneğinde bulunan tel kafesli kurutma kabinine yerleştirilmiştir. Dilimler sıcak hava akımının rahatlıkla geçebileceği şekilde tel kafesli kurutma kabinine belirli aralıklarla 100 gr olacak şekilde yerleştirilmiş ve kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Ürünlerin kurutma öncesi kurutma kabinine yerleştirilmesi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Ürünlerin Kurutma Öncesi Kabine Yerleştirilmesi

#### 4.1.2 Ürün Başlangıç Neminin Belirlenmesi ve Kuru Madde Tayini

Kurutma işleminde kullanılan ve örnekleme ile seçilen elma, kayısı ve patates standart ölçekte ve standart besin değerinde ürünler olarak kabul edilmiş ve kurutma kabininde 100'er gramlık miktarlarda kurutulmuştur. Ürün başlangıç neminin ve kuru madde tayininin belirlenmesinde T.C. Tarım ve Orman Bakanlığının "Ulusal Gıda Kompozisyon Veri Tabanı" dan yararlanılmıştır [221]. Bu ürünlerin içerikleri ve besin değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Elma, Kayısı ve Patatesin İçerisinde Bulunan Besin Değerleri

Ürün (100 gr)	Elma (gr)	Kayısı (gr)	Patates (gr)
Su	84,47	90.90	81.68
Protein	0.35	0.27	1.48
Yağ	0.58	0.21	0.23
Karbonhidrat	12.41	5.66	14.37
Lif	1.81	1.24	1.44
Kül	0.38	1.73	0.80

Ürün başlangıç nemi ürünlerin yaş durumdaki (100 gr için) kompozisyonlarında bulunan su miktarlarına eşit alınmaktadır. Kompozisyonlarında bulunan suyun haricindeki bileşenlerin tümü kuru madde olarak tanımlanmıştır.

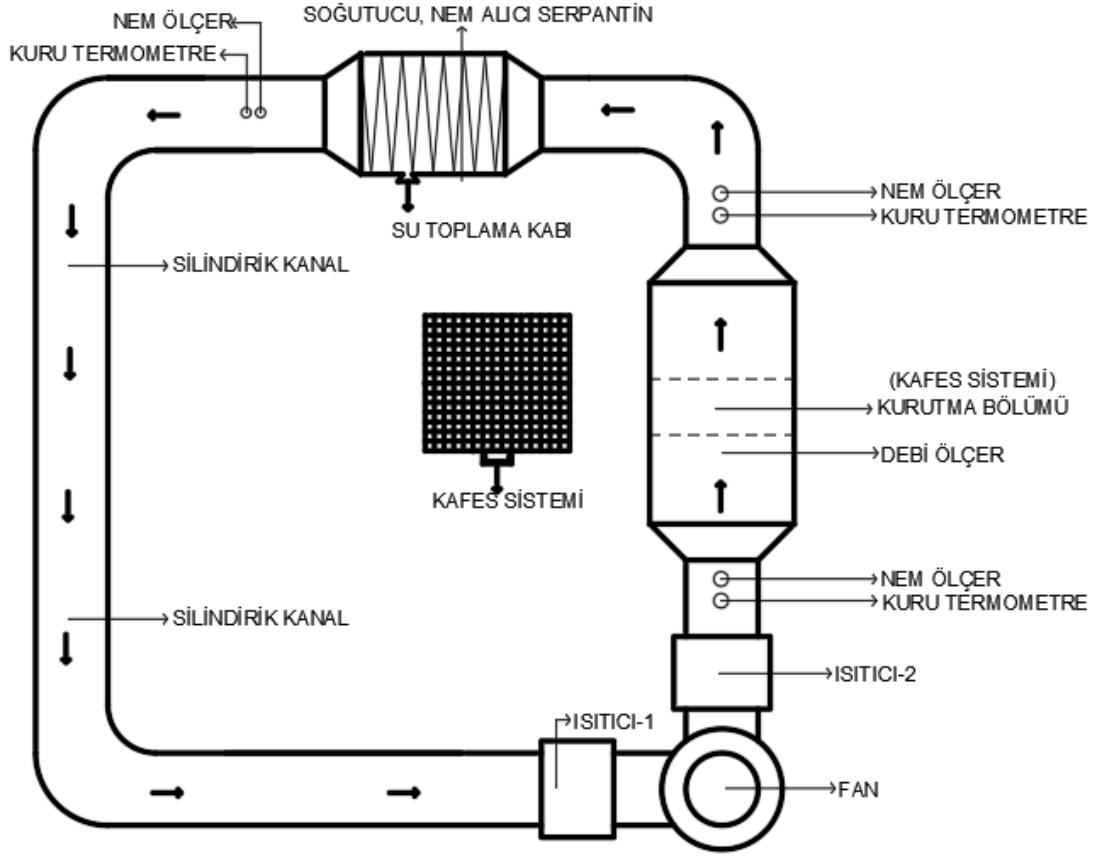
#### 4.2 Deney Düzenegi

Bu çalışmada ürünler, kapalı çevrimli konvektif kurutma sisteminde hijyenik ortamda hava ile kurutmaya tabi tutularak, kurutma işleminin daha kısa sürelerde gerçekleştirilmesine çalışılmıştır. Bununla birlikte, kurutma havası özelliklerinden olan kurutma havası sıcaklığı, bağıl nemi ve kurutma havası hızının kurutma süresine ve ürünün kuruma kalitesine olan etkileri incelenmiş ve ürünün kurutma karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla kurutmada kullanılan hava şartlarını kontrol altına alarak, ürünlerin kuruma karakteristiklerini ve mekanizmalarını inceleyebilmek için aşağıda verilen deneysel alt başlıklar oluşturulmuştur.

#### 4.2.1 Deney Düzeneginin Kurulması ve Tanıtılması

Gıdaların kuruma karakteristiklerini belirlemek amacı ile laboratuarda kurulu bulunan kabin tipli konveksiyon kurutma deney düzenegi Şekil 4.2’de görülmektedir. Deney seti; kurutma kabini, soğutma ve nem alma ünitesi, ön ısıtıcı, fan, son ısıtıcı, ölçüm cihazları, kanal bağlantı elemanları ve ısı yalıtım malzemelerinden oluşmaktadır. Kurutma prosesinde hava sirkülasyonunu sağlamak için 0.50 kW gücünde altı (6) kademede hız verecek bir fan seçilmiştir. Herbirinin gücü 6 kW olan ön ısıtıcı (elektrikli) ve son ısıtıcı (elektrikli) üzerine bağlanan termostat ile kurutma kabini girişi hava sıcaklıkları istenilen değerlere ayarlanabilmektedir. Deney setinde var olan soğutma sisteminin kapasitesi 0,745 kW olup; hem duyulur soğutma, hem de nemli havayı kurutarak nemli havadan nem çekme (alma) için kullanılmaktadır. Kapalı çevrimli deney düzeneginde kurutma havasını taşıyan ve sirkülasyonunu sağlayan hava kanalları dairesel kesitli olup galvanizli sacdan  $\varnothing=150$  mm çapında imal edilmiştir. Kurutma kabini 250x250x700 mm boyutlarında imal edilmiş olup ve kabin dahil sistemin bütün elemanları ve kanallar 19 mm kalınlığında yalıtım malzemesi ile ısı olarak yalıtılmıştır.

Deney seti ortamdan alınan havayı, kabinde istenilen sıcaklık, hız ve bağıl nem değerlerine getirebilecek ve bu değerlerde sabit tutabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tel kafesli kabinli tip konvektif kurutma sistemi laboratuvar ölçeğinde bir deney düzenegi olarak kurulmuştur. Bu düzenegin üstten görünüşü Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Deney esnasında şartlandırılmış havanın tamamının tekrar kullanılabilmesi için kapalı çevrim bir kurutma sistemi tercih edilmiştir.



Şekil 4.2. Şartlandırılmış Hava ile Tel Kafesli Kabinli Kurutma Sistemi

#### 4.2.2 Deney Düzenegini Oluşturan Bölümler ve Bu Bölümlerin Tanıtılması

Kurutma işlemini gerçekleştirmek için; kurutulması yapılacak ürünlerle temas ettirilen havanın şartlarının istenilen koşullarda kontrol edilmesi için kapalı çevrimli bir deney düzenegi kurulmuştur. Bu düzenekte meyve ve sebzelerin kurutulması laboratuvar ölçeklerinde gerçekleştirilmiştir. Kurutma sistemi 5 bölümden oluşmaktadır.

##### **Birinci bölüm: Kurutma Kabini**

Ürünlerin kurumaya başladığı ve kurutma işleminin gerçekleştiği kısımdır. Bu kısım tel kafes sisteminde oluşturulmuştur. Kafes altından üflenen havanın kafes içerisindeki ürünün her bölgesini sarmasını ve kurutmanın homojen olmasını sağlamak için kurutma kabini tel kafes yapıda yapılmıştır. Hatta kuruma esnasında ağırlığı hafifleyen ürün dilimleri kurutma işleminin sonuna doğru, kurutma havası

hızının etkisine yenik düşüp havada asılı kalarak sanki akışkan yatakta kurutma işlemi de gerçekleşmektedir.

### **İkinci bölüm: Yoğuşturucu**

Bu bölümde soğutma ünitesinin kondanseri, kurutma kabininden çıkan nemli havanın nemini almak için yoğuşturucu olarak kurutma sistemine entegre edilmiştir

### **Üçüncü bölüm: Ön Isıtıcı**

Yoğuşturucudan gelen nemi alınmış hava kapalı çevrimde bir fan yardımı ile dolaştırılarak ön ısıtıcıya gelmektedir. Ön ısıtıcı 1’de istenilen düzeyde ısıtılan hava dolaşıma sunulmak üzere fana girmektedir.

### **Dördüncü bölüm: Hava Sirkülasyonu Sistemi**

Bu kısımda kurutma havasının sistem içinde dolaşımını sağlayan fan cihazı ve havanın debisini ve hızını ayarlamak için otomatik kumanda paneli üzerinde bulunan hız kademe ayar sistemi bulunmaktadır. Bu ayar sistemi ile fanın 6 kademeli hız kontrolü sağlanmaktadır ve istenildiğinde değişik hızlarda da kurutma işlemi yapılmaktadır.

### **Beşinci Bölüm: Son Isıtıcı**

Kurutma kabini girişindeki havanın ısıtılmasını sağlayan kanal tipi elektrikli ısıtıcı 2, fan sisteminden hemen sonra kurutma sistemine monte edilmiştir. Kapalı çevrimde dolaşan havaya en son duyulur ısının verildiği bölümdür. Isıtıcı 1 ve ısıtıcı 2’ye termokupl ile bağlantısı yapılmış kontrol paneline yerleştirilmiş dijital sıcaklık göstergesi ile kabin giriş sıcaklığı istenilen değere ayarlanabilmektedir.





**Şekil 4.3.** Tel Kafesli Kabinli Kurutma Sistemi Genel Görünüşü

#### **4.2.3 Deney Düzenğinde Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Bunların Tanıtılması**

Kurutma ortamı olarak kullanılan havanın sirkülasyonu, kurutma kanalına yerleştirilmiş olan değişken debili fan tarafından sağlanmaktadır. Hava kanalı içerisinde yer alan kademeli elektrikli ısıtıcılar yardımıyla, hava istenilen sıcaklıklara kadar ısıtılabilir. Soğutma bölümünde ise kurutma havası istenilen sıcaklıklarda soğutulmakta ve bu havanın istenilen bağıl nem değerine kadar nemi alınmaktadır.

Deney düzenğinde kullanılan kullanılan araçlar ve ölçüm cihazların teknik özellikleri aşağıda Tablo 4.2’de verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Cihaz Listesi

<p><b>Kanal Tipi Motorlu Fan</b> Voltaj: 230 V Devir: 2280 rpm Güç: 50 W Frekans: 50 hz Akım: 0,43 A</p>	
<p><b>Kanal Tipi Elektrikli Isıtıcı</b> Kapasite : 6 kw</p>	
<p><b>Fan Hız Kademe Seti</b> Fan hız ayarı: 6 kademe</p>	
<p><b>Dijital Sıcaklık ve Nem Ölçer</b> Sıcaklık ölçümü: -30... 100°C Nem Ölçüm : 0 ... 100% RH Çözünürlük : 0.1 °C Doğruluk : ± 0.5°C, ±3.5 % RH Birim : °C, °F, % RH</p>	

**Tablo 4.2. Cihaz Listesi (Devam)**

<p><b>Dijital Sıcaklık Göstergesi</b> Çalışma voltajı: 90 ~ 250V±10%. Anma akımı: 10A. Güç tüketimi: 3W. Ölçüm aralığı:-50 ~ 99 °C Ölçüm hassasiyeti: 0. 1 °C Ölçüm hatası: ± 1 °C Kontrol hassasiyeti : 0. 1 °C</p>	
<p><b>Hız Ölçer (Anemometre)</b> Kademe: ±(3%rdg±0.1) M/S: 0-45.0 KNOTS: 0-88.0 Ft/min: 0-8800 Km/hr: 0-140.0 İsı: 0-80°C</p>	
<p><b>Hassas Terazi</b> Kapasite: 1000 g Ölçüm hassasiyeti:0.1g</p>	
<p><b>Soğutma Ünitesi</b> Soğutma kapasitesi: 0.745 Kw Soğutucu akışkan :R22 Kompresör Tipi : Rotary Elektrik beslemesi: 220 V/50Hz</p>	

**Tablo 4.2.** Cihaz Listesi (Devam)

<p><b>Termostat</b> Çalışma aralığı: 0 °C ~ 90 °C Çalışma gücü: AC 220 - 250 Volt Çalışma Frekansı 50 Hz / 16 Amper</p>	
<p><b>Kurutma Kabini</b> Kabin ölçüleri: 250x250x700 mm</p>	
<p><b>Kafes sistemi</b> Kafes ölçüleri: 250x250x 100 mm Kafes gözenek ölçüleri 10x10 mm</p>	

#### 4.2.4 Deney Düzeninein Çalıştırılması ve Deney İçin Hazır Hale Getirilmesi

Şekil 4.2'de verilen deney düzenine bölümlerinin bağlantı boruları ile montajı yapıp, izolasyonu sağlandıktan sonra denemeler yapılmak üzere işletmeye alınmıştır. İşletmeye alınan bu kurutma sisteminin işleyişi aşağıdaki gibi izah edilir.

Kurutma sisteminde kurutma kabini açılarak kapalı çevrimde çalışacak kurutma sisteminin içerisine havanın alınması sağlanıp, kurutma sistemi içerisinde sirküle edilecek havanın atmosfer şartlarına gelmesi beklenir. Sonra kurutma kabinine yükleme yapılmadan kurutma kabininin kapağı kapatılıp fan, ısıtıcılar ve soğutma ünitesi birlikte çalıştırılarak sistemin deney şartlarına (rejime) getirilmesi sağlanır. Daha sonra kurutma kabini cam kapağı açılarak 100'er gram ağırlığındaki kurutulacak ürünler, herbir deney için kurutma kabini içindeki tel kafesli yatağa yüklenir ve kurutma kabini kapağı kapatılıp deneye başlanır. Deney sonunda, yani otuz (30) dakika sonra, kurumuş ürün kurutma kabini kapağı açılarak sistemden kurumuş halde alınır.

Kurutma sisteminde proses aşağıda anlatılacağı gibi devam eder. Kurutma kabininden çıkan kurutma havasının bağıl nemini düşürmek için kurutma havası, önce soğutma ünitesinde duyulur soğutma yapıp nemi alındıktan sonra, ısıtma bölümünde yeniden duyulur ısıtmaya tabi tutulur. Bu ısıtılan hava ürünü kurutmak üzere kurutma kabinine gönderilir.

Kurutma ünitesinde gerçekleştirilen Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'de verilen iklimlendirme işleminde; psikometrik diyagram üzerinde (1) durumunda bulunan ve kurutma kabininden çıkan hava, soğutma ünitesinde doyma eğrisine ( $\phi=100$ ) kadar sabit özgül nemde soğutulur (2) noktasına ulaşır. Soğutulan hava buradan da istenilen özgül nem değerine kadar soğutulup nemi alınarak (3) noktasına ulaştırılır. Nemi alınmış ve doymuş (3 noktasında bulunan) hava sabit özgül nemde ısıtma bölümündeki ısıtıcılar vasıtasıyla duyulur ısıtma yapılarak (4) noktasına gönderilir. Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'de verilen psikrometrik diyagramlar üzerinde gösterilen (4) noktası ile (1) noktası arası kuruma prosesidir ve ürünün kabinde kuruma sürecine

denk gelmektedir. Bu proses boyunca, kurutma kabiniindeki üründen kurutma işlemi vasıtasıyla nem koparma işlemi gerçekleşir.

Kurutma işlemi sürecinde; hem soğutma işlemi boyunca kurutma havasından enerji çekilmiş, hem de ısıtma işlemi boyunca ısıtıcılardan kurutma havasına enerji verilmiştir. Deney düzeneğinde kurutma havası hızı, kabin öncesi ve sonrası kurutma havası sıcaklıkları, soğutma ve nem alma işlemi öncesi ve sonrası sıcaklıkları ve bu sıcaklıkların bağıl nem değerleri, her bir deney için kurutma sistemine entegrasyonu yapılmış otomatik kontrol panelinden okunmaktadır. Her bir deney şartları olan kurutma havası hızı ve sıcaklıkları kontrol panelinden set (ayarlanarak) yapılarak kurutma işlemine başlanmaktadır.

#### **4.2.5 Deney Düzeneğinde Yapılan Ölçümler ve Deney Şartları**

Deney sırasında kurutma havasının sıcaklığını ve bağıl nemini ölçmek için 3 adet Nem Ölçer (humidy meter) ve 6 adet Sıcaklık Ölçer (termo couple) ' den yararlanılmıştır. Ayrıca kurutma sisteminin belli noktalarında hava hızlarını ölçmek için hız ölçerler (dijital anemometer) kullanılmıştır. Hız ölçer ve nem ölçerin dışında, sıcaklık ölçerler ve fan, otomatik kontrol panelinde bulunan dijital gösterge cihazı ve aç-kapa şalterleri ile ekuple edilmişlerdir. Deney düzeneği üzerine yerleştirilen bütün ölçüm cihazlarının ölçüm alma yerleri Şekil 4.2'de görülmektedir. Deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının teknik özellikleri de Tablo 4.2'de verilmiştir.

Deneye başlamadan önce kurutma sistemi boş olarak çalıştırılmış ve kurutma sisteminin rejim haline gelmesi sağlanmıştır. Tüm deneyler için kurutmaya başlamadan önce kurutma havası sıcaklığı 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C değerlerinde set edilip farklı kurutma hava hızlarında (0,2 m/s, 0,3 m/s, 0,4 m/s, 0,5 m/s, 0,6 m/s, 0,7 m/s) deneyler yapılmıştır. Her bir kurutma deneyinin maksimum süresi 30 dakika kabul edilmiş ve her bir 5 dakika için kurutma havasının kurutma öncesi ve kurutma sonrasındaki sıcaklıkları ve bağıl nemleri ölçülmüştür. Kurutulacak ürünler 100'er gram şeklinde hassas terazi ile tartılarak, kurutma numuneleri oluşturulmuş, kurutma işlemi sona erdikten sonra da, yine bu hassas terazi ile ürün numunelerinin ağırlıkları ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Kurutma

öncesi ve kurutma sonrası elma, kayısı ve patates numunelerinin görüntülerine ait resimler de Şekil 4.4 ve 4.5’de verilmiştir.



**Şekil 4.4.** Kuruma Öncesi Numunelere ait Resimler



**Şekil 4.5.** Kurutma Sonrası Numunelere ait Resimler

**Tablo 4.3** Kurutma Sonrası Numunelere ait Küteller

<b>ELMA (100 gram)</b>	<b>Hızlar (m/s)</b>					
<b>Sıcaklıklar T (°C)</b>	0,2 m/s	0,3 m/s	0,4 m/s	0,5 m/s	0,6 m/s	0,7 m/s
T1=30	57,8 g	54,0 g	51,1 g	52,2 g	50,9 g	49,2 g
T2=40	48,8 g	42,6 g	41,5 g	41,6 g	42,6 g	43,9 g
T3=50	39,7 g	35,5 g	32,2 g	29,6 g	31,7 g	30,6 g
T4=60	28,9 g	26,9 g	29,1 g	26,3 g	26,4 g	26,4 g
T5=70	22,8 g	19,9 g	21,0 g	20,9 g	20,5 g	20,5 g
<b>KAYISI (100 gram)</b>	<b>Hızlar (m/s)</b>					
<b>Sıcaklıklar T (°C)</b>	0,2 m/s	0,3 m/s	0,4 m/s	0,5 m/s	0,6 m/s	0,7 m/s
T1=30	80,6 g	78,5 g	78,1 g	76,1 g	75,2 g	73,8 g
T2=40	67,3 g	67,1 g	65,9 g	65,3 g	63,7 g	59,9 g
T3=50	66,5 g	58,3 g	66,7 g	63,3 g	66,0 g	58,0 g
T4=60	61,3 g	57,6 g	54,5 g	53,6 g	53,1 g	55,8 g
T5=70	47,9 g	44,2 g	43,8 g	45,3 g	40,2 g	43,5 g
<b>PATATES (100 gram)</b>	<b>Hızlar (m/s)</b>					
<b>Sıcaklıklar T (°C)</b>	0,2 m/s	0,3 m/s	0,4 m/s	0,5 m/s	0,6 m/s	0,7 m/s
T1=30	56,0 g	57,2 g	57,1 g	54,5 g	56,0 g	58,9 g
T2=40	57,6 g	45,1 g	40,0 g	41,4 g	40,7 g	45,3 g
T3=50	44,1 g	37,3 g	30,1 g	38,2 g	38,8 g	34,3 g
T4=60	31,8 g	32,6 g	29,9 g	25,5 g	33,3 g	30,4 g
T5=70	24,8 g	22,2 g	25,7 g	23,0 g	23,3 g	22,7 g



## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Metaryel metot bölümünde verilen kabin tipli ürün kurutma deney düzeneğinde 100 gramlık Elma, Kayısı ve Patates numuneleri için deneyler yapılmıştır. Deneyler;  $V_1=0,2$  m/s,  $V_2=0,3$  m/s,  $V_3=0,4$  m/s,  $V_4=0,5$  m/s,  $V_5=0,6$  m/s,  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızları ve  $T_1=30$  °C,  $T_2=40$  °C,  $T_3=50$  °C,  $T_4=60$  °C,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklıkları şartlarında gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyin toplam süresi 30 dakika olarak belirlenmiş ve her bir 5 dakika aralıklarla ölçümler alınmıştır.

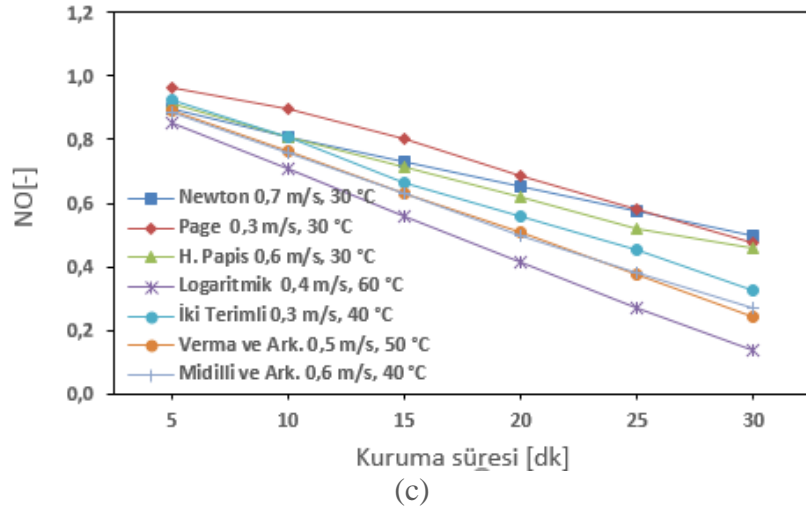
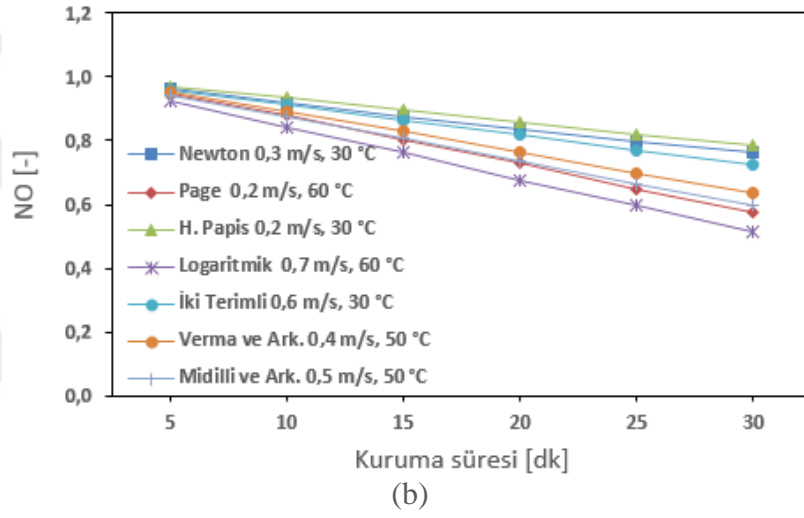
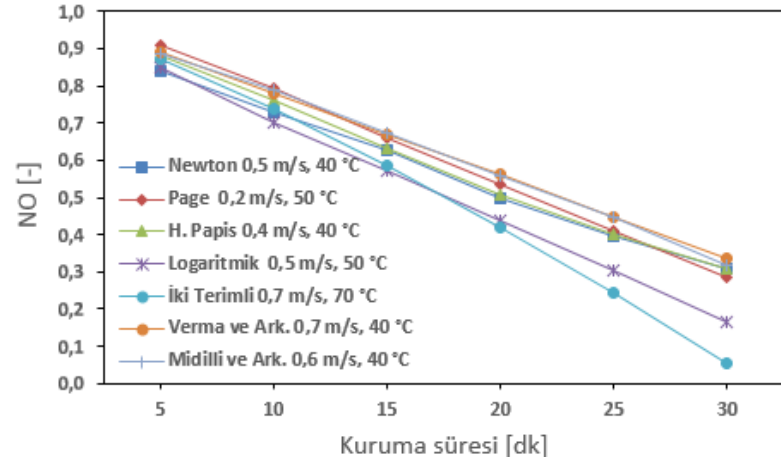
### 5.1 Ürünlere Ait Modelleme Çalışmaları, Modellere ait Katsayılarının Belirlenmesi ve Belirsizlik (Hata) Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kuruma kinetiği üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş; kurutma prosesi sonunda en doğru sonuçların elde edildiği, kurutma karakteristiklerinin doğru tahmini sonuçlar verdiği ve literatürde de çok rastlanan modellere ait bilgiler aşağıda Tablo 5.1’de verilmiştir.

**Tablo 5.1.** Kurutma Kinetiği Matematiksel Modellenmesi

Model Adı	Model Eşitliği	Tanımlamalar
Newton Lewis	$NO = \exp(-kt)$	NO: Nem Oranı (birimsiz) k, $k_0, k_1, g$ : Kurutma sabitleri ( $\text{dak}^{-1}$ ) t: Kuruma süresi (dak.) a, b, c: Kurutma katsayısı (birimsiz) n: Modele ait katsayısı (birimsiz)
Page	$NO = \exp(-kt^n)$	
Henderson ve Papis	$NO = a \exp(-kt)$	
Logaritmik	$NO = a \exp(-kt) + c$	
İki terimli	$NO = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	
Verma ve ark.	$NO = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	
Midilli ve ark.	$NO = a \exp(-kt^n) + bt$	

Deney sonuçlarından elde edilen işlenmiş veriler kullanılarak MATLAB Programında lineer olmayan regresyon analiz yöntemleri yardımıyla optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu optimizasyon çalışmasında nem oranı ile kurutma süresinin değişimi eğrilerinin matematiksel modellenmesi; literatürde en çok yer bulan ve Tablo 5.1’de verilen Newton Levis, Henderson ve Pabis, Logaritmik, Page, İki terimli (Two-term), Verma ve Ark. Ve Midilli ve Ark. Modelleri kullanılarak yapılmıştır. Bu model denklemlerine ait oluşturulan katsayılar ve elde edilen RMSE ve  $R^2$  değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir.  $R^2$  ve RMSE değerlerine bakılarak bu modellerin elma, kayısı ve patates ürünlerinin kurutulmasında en iyi sonuç verdiği şartlar sırasıyla Şekil 5.1. (a), (b), (c)’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Literatürde Yaygın Kullanılan Modellere ait (a) Elma; (b) Kayısı;(c) Patates; Ürünleri İçin Nem Oranının Kuruma Süresi ile Değişimi Grafiği

Literatürde en yaygın kullanılan Nem Oranı modellerinin deneysel verilere uygulanması ile elde edilen regresyon katsayıları ( $R^2$ ) ve tahminin standart hatası (RMSE) değerleri hesaplanmış ve Tablo 5.2’de verilmiştir. Bir denklemin uygunluğu tespitinde yüksek  $R^2$  ve düşük RMSE değerlerine bakılır[222, 223].  $R^2$  ve RMSE değerleri karşılaştırılarak  $R^2$  nin bir (1)’e ve RMSE değerinin de sıfır (0)’a yaklaştığı durumu veren kuruma eğrisinin en doğru olduğu seçilir. Regresyon katsayıları ( $R^2$ , RMSE) ürünlerin kurutma eğrilerini tanımlayan en iyi denklemi seçmek için ana kriter olarak seçilmiştir.

Literatürde yaygın olarak kullanılan yedi (7) kurutma modeli seçilmiş ve ürünler için deneysel olarak bulunan zamana bağlı nem oranı değerlerine bu modeller uygulanmıştır. Ürünler için hangi şartlarda daha iyi kurutma yapılabileceği ve bu şartlara hangi modelin uygun olduğu Şekil 5.1’de Elma, Kayısı ve Patates için verilmiştir. Bu yedi (7) model içinde elma, kayısı ve patates kurutma işlemlerinin en iyi sonucu verdiği şartlar ve modeller belirlenmiştir.

Elma kurutma verileri kullanılarak regresyonu yapılan kurutma eğrileri modellerinin  $R^2$  ve RMSE değerlerine bakılarak kurutma işleminin en iyi gerçekleştiği modelin  $V_5=0,6$  m/s ve  $T_2=40$  °C şartlarında Midilli ve Ark. Modeli olduğu görülmüştür.

Kayısı kurutma verileri kullanılarak regresyonu yapılan kurutma eğrileri modellerinin  $R^2$  ve RMSE değerlerine bakılarak kurutma işleminin en iyi gerçekleştiği modelin  $V_3=0,4$  m/s ve  $T_3=50$  °C şartlarında Verma ve Ark. Modeli olduğu görülmüştür.

Patates kurutma verileri kullanılarak regresyonu yapılan kurutma eğrileri modellerinin  $R^2$  ve RMSE değerlerine bakılarak kurutma işleminin en iyi gerçekleştiği modelin  $V_5=0,6$  m/s ve  $T_2=40$  °C şartlarında Midilli ve Ark. Modeli olduğu görülmüştür.

**Tablo 5.2.** Ürünler İçin Modellere Ait Hesaplanan Katsayılar ve RMSE, R<sup>2</sup> Değerler

Kurutulan Ürün: ELMA	Kurutma Şartları	Denklem	a	b	c	g	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	n	R <sup>2</sup>	RMSE
NEWTON MODEL	V4T2	$f(t) = \exp(-k \cdot t)$	-	-	-	-	0.03534	-	-	-	0.981	0.02786
PAGE MODEL	V1T3	$f(t) = \exp(-(k \cdot (t^n)))$	-	-	-	-	0.006886	-	-	1.518	0.9976	0.01291
HANDERSON PAPIŞ MODEL	V3T2	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	1.103	-	-	-	0.03976	-	-	-	0.9904	0.02384
LOGARİTMİK MODEL	V4T3	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	21.54	-	-20.55	-	0.001291	-	-	-	0.9998	0.004705
İKİ TERİMLİ MODEL	V6T5	$f(t) = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	4.332	-3.359	-	-	-	-0.006301	-0.01446	-	0.9993	0.01261
VERMA ve ARK. MODEL	V6T2	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$	-2.535	-	-	0.05805	0.0753	-	-	-	0.9953	0.01837
MİDİLLİ VE ARK. MODEL	V5T2	$f(t) = a \cdot \exp(-(k \cdot (t^n))) + (b \cdot t)$	1.046	-0.02391	-	-	0.2175	-	-	-1.046	0.9998	0.004577
Kurutulan Ürün: KAYISI	Kurutma Şartları	Denklem	a	b	c	g	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	n	R <sup>2</sup>	RMSE
NEWTON MODEL	V2T1	$f(t) = \exp(-k \cdot t)$	-	-	-	-	0.008969	-	-	-	0.9972	0.003948
PAGE MODEL	V1T4	$f(t) = \exp(-(k \cdot (t^n)))$	-	-	-	-	0.005734	-	-	1.344	0.9998	0.002424
HANDERSON PAPIŞ MODEL	V1T1	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	1.013	-	-	-	0.008409	-	-	-	0.999	0.002411
LOGARİTMİK MODEL	V6T4	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	5.363	-	-4.352	-	0.003231	-	-	-	0.9998	0.002831
İKİ TERİMLİ MODEL	V5T1	$f(t) = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	1.015	7.903	-	-	-	0.01098	5.175	-	0.9981	0.005921
VERMA ve ARK. MODEL	V3T3	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$	-0.3845	-	-	0.02305	0.06238	-	-	-	0.9999	0.001626
MİDİLLİ VE ARK. MODEL	V4T3	$f(t) = a \cdot \exp(-(k \cdot (t^n))) + (b \cdot t)$	1.424	-0.01471	-	-	0.3606	-	-	-0.0371	0.9999	0.001835
Kurutulan Ürün: PATATES	Kurutma Şartları	Denklem	a	b	c	g	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	n	R <sup>2</sup>	RMSE
NEWTON MODEL	V6T1	$f(t) = \exp(-k \cdot t)$	-	-	-	-	0.02208	-	-	-	0.9943	0.01117
PAGE MODEL	V2T1	$f(t) = \exp(-(k \cdot (t^n)))$	-	-	-	-	0.002139	-	-	1.721	0.9998	0.003112
HANDERSON PAPIŞ MODEL	V5T1	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	1.056	-	-	-	0.02734	-	-	-	0.9968	0.01095
LOGARİTMİK MODEL	V3T4	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	8.517	-	-7.51	-	0.003602	-	-	-	0.9998	0.004801
İKİ TERİMLİ MODEL	V2T2	$f(t) = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	-0.02343	1.093	-	-	-	-0.06593	0.02622	-	0.9988	0.01236
VERMA ve ARK. MODEL	V4T3	$f(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$	3.557	-	-	-0.005705	0.002668	-	-	-	0.9991	0.00918
MİDİLLİ VE ARK. MODEL	V5T2	$f(t) = a \cdot \exp(-(k \cdot (t^n))) + (b \cdot t)$	0.9503	-0.06628	-	-	-0.08078	-	-	0.6978	0.9999	0.003383

## 5.2 Elma Kurutma Sonuçlarının Tartışılması

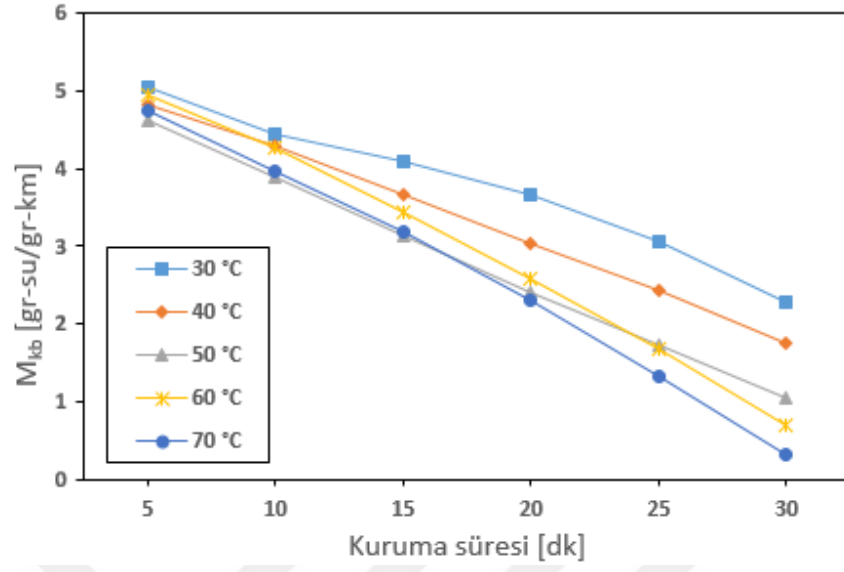
### 5.2.1 Ürün Nem İçeriğinin Zamana Göre Değişimi

Kurutma havası sıcaklığının ürünün nem içeriğine etkisi; elma için belirlenen en iyi kurutma ( $V_5=0,6$  m/s (a), ve  $T_2=40$  °C (b)), şartlarında Şekil 5.2’de zamana bağlı olarak verilmiştir.

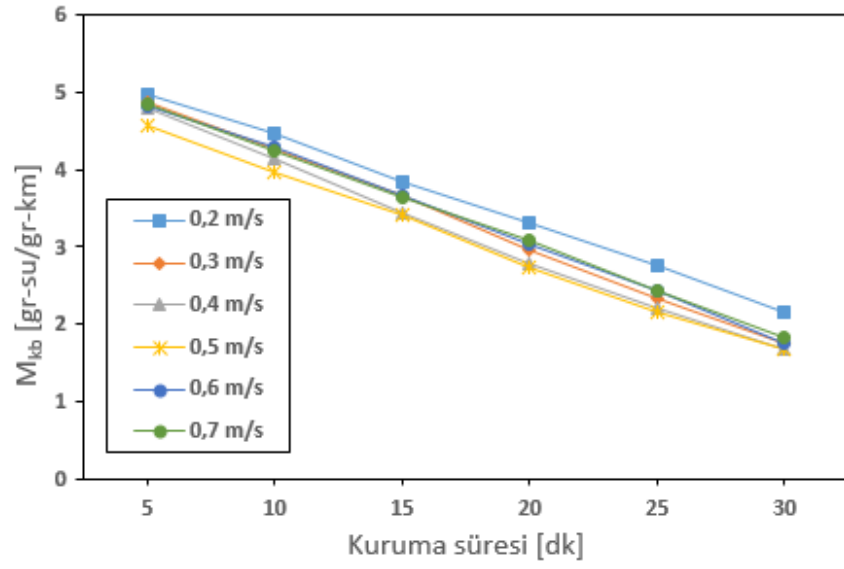
Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça nem içeriği azalmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde nem içeriği  $T_1=30$  °C’ de en yüksek değerken, kuruma süresinin sonundan yani 30. dakikada aynı sıcaklık şartında en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde yer alan diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımları da benzer davranış göstermektedir.

Sabit ürün kurutma havası hızında ( $V_5=0,6$  m/s) gerçekleşen kurutma işleminde; sıcaklığının artması ile grafik üzerinde nem içeriğinde zamana göre artan azalma görülmektedir. Ürün nem içeriği, 5. dakikada  $T_1=30$  °C sıcaklığında, en yüksek değerde iken; ürün nem içeriği  $T_3 =50$  °C sıcaklığında, yine aynı dakikada sıcaklık şartları göz önünde bulundurulduğunda, en düşük değerdedir. Kurutma zamanı arttıkça ürün nem içeriği bütün sıcaklık şartlarında azalarak düşük seviyelere inmektedir. Grafikte de görülmektedir ki kurutma havası sıcaklığının artmasıyla ürünün kuruma işlemi daha hızlı olmaktadır.

Kurutma havası hızlarına göre karşılaştırma yapıldığında; kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $T_2=40$  °C sıcaklığında nem içeriği  $V_1=0,2$  m/s’de en yüksek değeri almakta iken; kuruma süresinin sonundan yani 30. dakikada  $V_3= 0,4$  m/s’de en düşük değere ulaşmaktadır. Farklı hızlarda kurutma işlemine bakıldığında özgül nem içeriği hepsinde zamana bağlı olarak azalmaktadır. Bu grafik üzerinde yer alan bütün hız şartlarında özgül nem içeriği ile ilgili dağılımlar da benzer davranış göstermektedir.



(a)



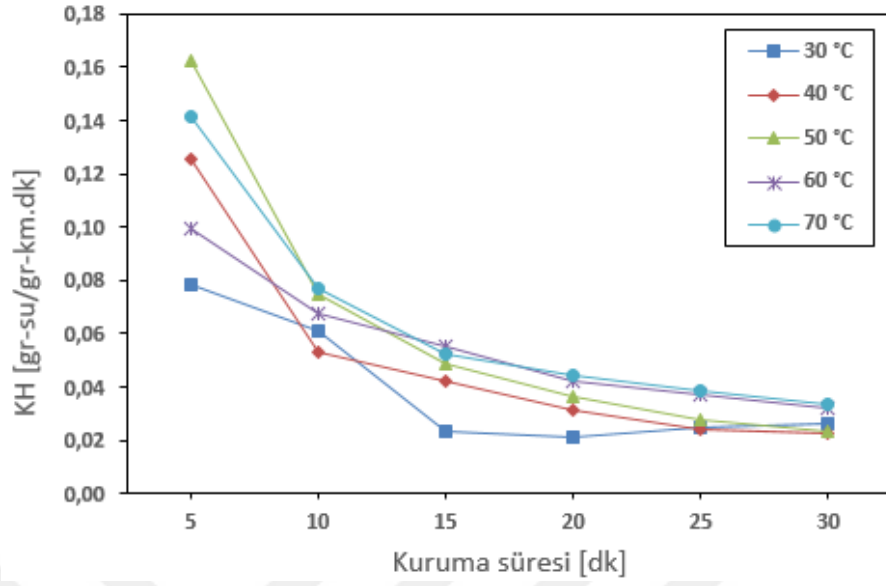
(b)

Şekil 5.2. Nem İçeriğinin Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_5=0,6$  m/s; (b)- $T_2=40^\circ\text{C}$ ]

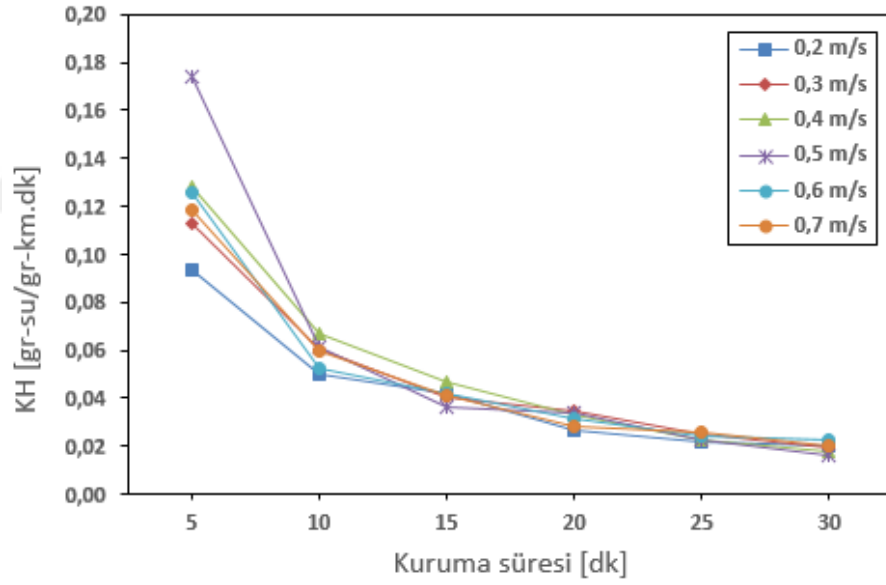
### 5.2.2 Ürün Kuruma Hızının Zamana Göre Değişimi

Şekil 5.3'de Elma için  $V_5=0,6$  m/s (a), ve  $T_2=40$  °C (b), şartlarında zamana bağlı kuruma hızı değişimi verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça kuruma hızları azalmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_3=50$  °C' de en yüksek değeri almakta iken; kuruma süresinin sonundan yani bu sıcaklığın 30. dakikasında en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. Bunun nedeni kurutma başlangıcında kurutma havasının bağıl neminin düşük olması, kurutma sonuna doğru ise kurutma havasının bağıl neminin artışıdır. Dolayısıyla bu durum; kurutma havasının içerisindeki bağıl neminin artması ürün üzerinde bulunan nemin buharlaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kuruma süresinin sonundaki kurutma hızlarında düşük çıkmaktadır.

Kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde kuruma hızı  $V_4=0,6$  m/s'de en yüksek değeri almakta kuruma süresinin sonundan yani 30. dakikada en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. Bunun nedeni kurutma başlangıcında kurutma havasının bağıl neminin düşük olması, kurutma sonuna doğru ise kurutma havasının bağıl neminin artışıdır. Kuruma başlangıcında; kurutma havası hızındaki artış, kurutulacak ürüne ısı transferini daha hızlı nüfuz ettirecek ve dolayısıyla ürün üzerinden nemi hızla uzaklaştırılacaktır.



(a)



(b)

Şekil 5.3. Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_5=0,6$  m/s; (b)- $T_2=40^\circ\text{C}$ ]

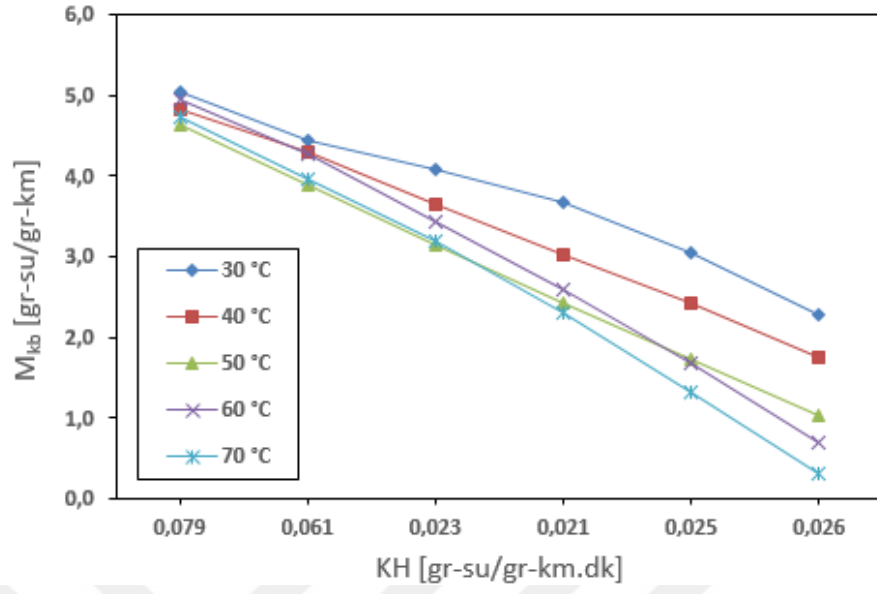


### 5.2.3 Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği ile Değişimi

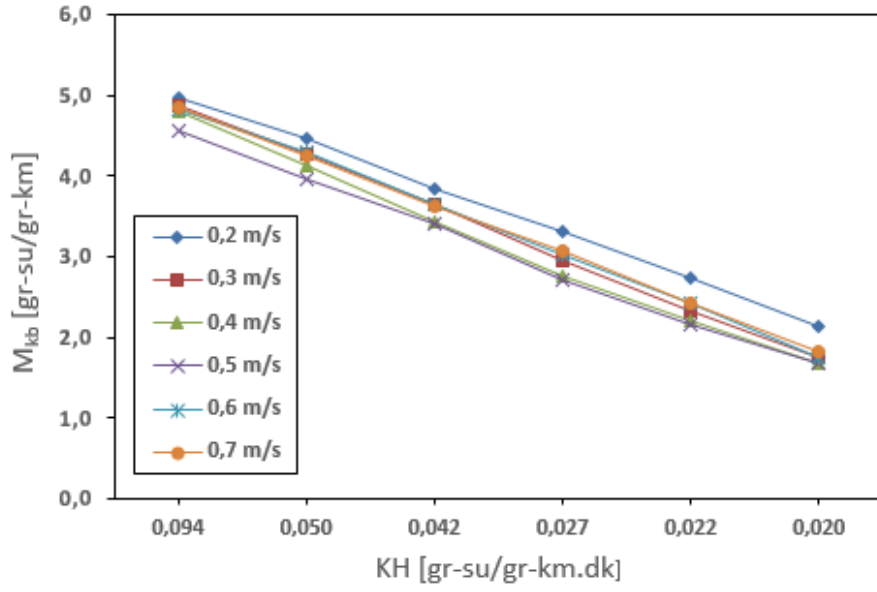
MATLAB Programında literatürde en çok kullanılan Modeller için yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen kuruma eğrilerinin  $R^2$  ve RMSE sonuçlarına göre Elma için Midilli ve Ark. Modelinin  $V_5=0,6$  m/s hızında en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği İle Değişimi grafiği  $V_5=0,6$  m/s hızında çizilmiştir.

Denklem (3.1) ve (3.3) kullanılarak hesaplanan ürünün kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimi, sıcaklıklara bağlı olarak Şekil 5.4'de verilmiştir. Bu sıcaklıklar  $T_1=30$  °C,  $T_2=40$  °C,  $T_3=50$  °C,  $T_4=60$  °C,  $T_5=70$  °C olarak seçilmiştir. Şekil 5.4 (a) ve (b)'de grafikler dikkatli bir şekilde incelendiğinde; kuruma hızının nem içeriğiyle değişiminin grafiklerinden anlaşılacağı üzere, kuruma olayının azalan kuruma hızı evresinde gerçekleştiği ve bu süreçte sabit kuruma hızı görülmediği anlaşılmaktadır. Bu bulgu, daha önce yapılan araştırmalarla uyum göstermektedir [203, 91].

Kuruma işlemi azalan hız periyodunda gerçekleşmiştir. Kuruma hızı arttıkça ürün nem içeriği azalmaktadır. Aynı anda kurutma havası sıcaklığının artışı ile buna bağlı olarakta ürün nem içeriği azalmaktadır. Bunun nedeni ise kurutma esnasında yüksek kurutma havası sıcaklıkları ürüne olan ısı transferini ve bununla birlikte yüzey suyu buharlaşma hızlarının artmasını sağlayarak, nemin daha hızlı bir şekilde uzaklaşmasına yardımcı olmaktadır. Kurutma havası sıcaklıklarının artışı ile ürünün iç yüzeyine olan ısı transfer hızı artarak, yüzey nemi daha yüksek hızla buharlaşmaktadır. Böylece, elde edilen sonuçlara göre kurutma havası sıcaklıklarının artması ile kuruma sürelerinde azalma gözlemlenmektedir.



(a)



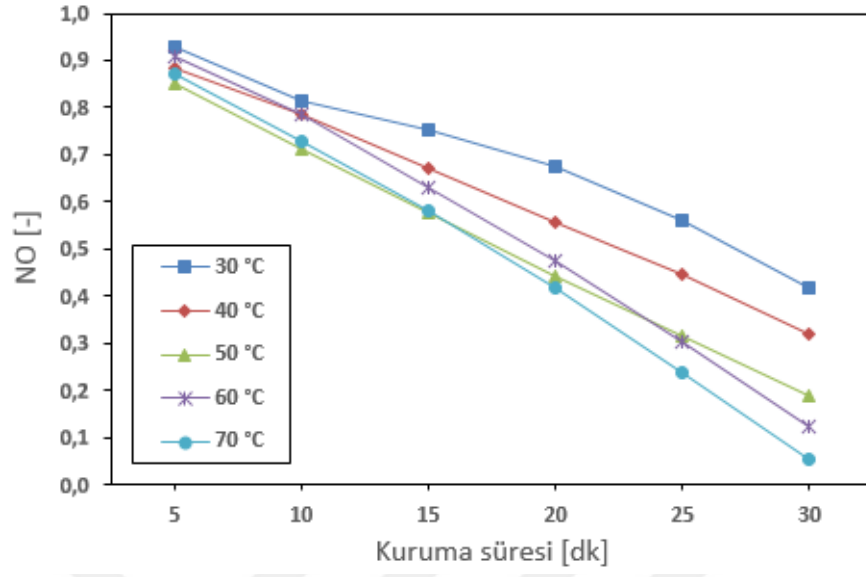
(b)

Şekil 5.4. Nem İçeriğinin Kuruma Hızı ile Değişimi [(a)- $V_5=0,6$  m/s; (b)- $T_2=40$  °C]

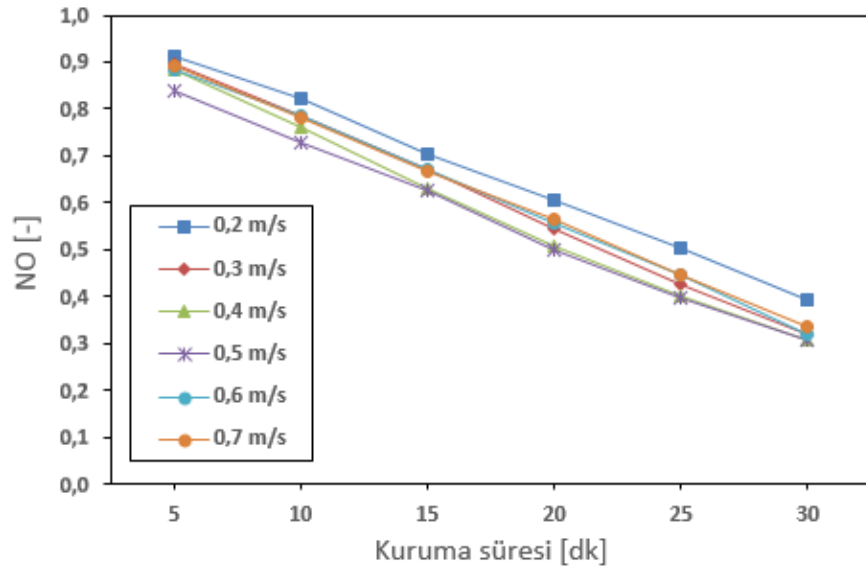
#### 5.2.4 Ürün Nem Oranının Zamana Göre Değişimi

Şekil 5.5 (a) ve (b) grafiklerinde  $V_5=0,6$  m/s ve  $T_2=40$  °C şartlarında zamana bağlı nem oranı grafikleri verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça nem oranında azalma görülmektedir. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_1=30$  °C' de en yüksek değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $T_3=50$  °C'de en düşük değeri almaktadır. Kuruma hızı zaman ilerledikçe azalarak yani kurutma süresinin sonunda bütün sıcaklıklarda en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir.

Kuruma hızı kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $V_1=0,2$  m/s'de en yüksek değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $V_4=0,5$  m/s'de en düşük değeri almaktadır. Kuruma hızı zaman ilerledikçe azalarak yani kurutma süresinin sonunda bütün hızlarda en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir.



(a)



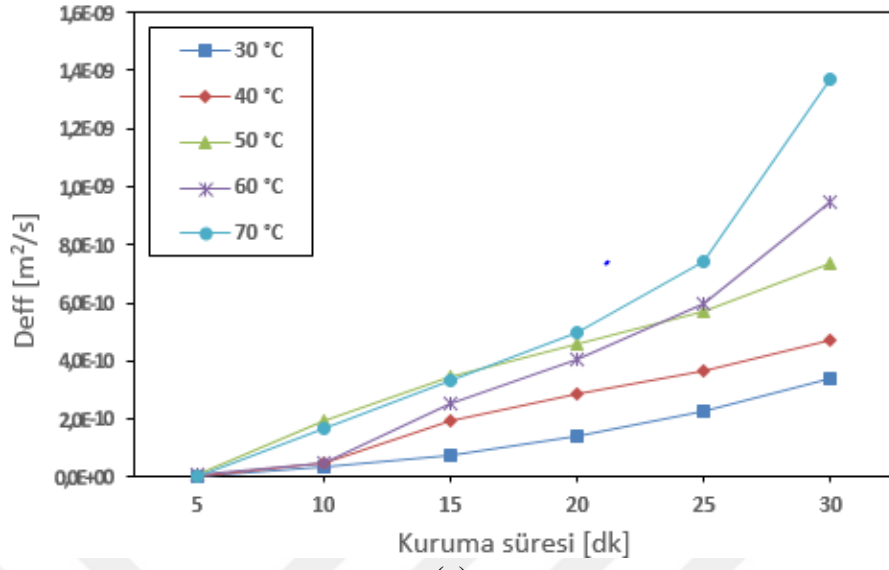
(b)

Şekil 5.5. Nem Oranının Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_5=0,6$  m/s; (b)- $T_2=40$ °C]

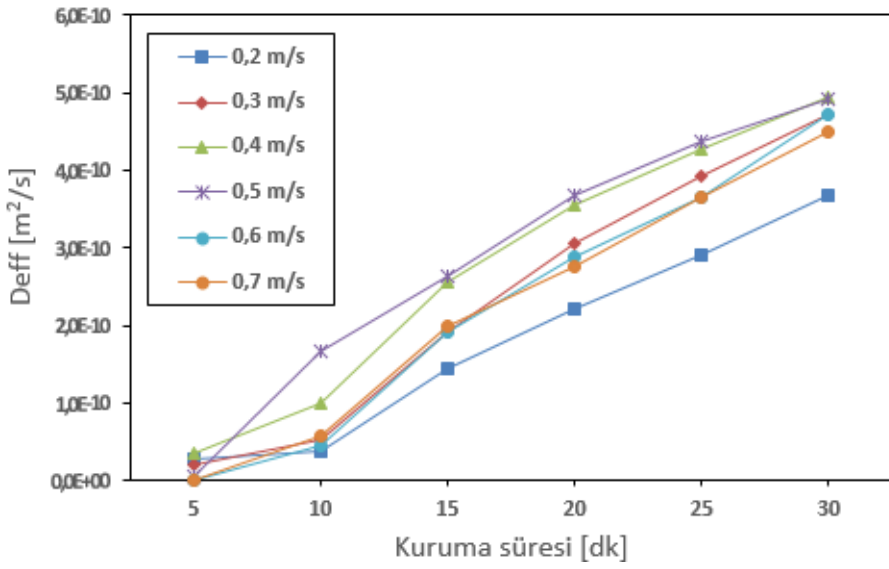
### 5.2.5 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması ve Değerlendirilmesi

Şekil 5.6 (a) ve (b) grafiklerinde  $V_5=0,6$  m/s ve  $T_2=40$  °C şartlarında zamana bağlı Difüzyon katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça Difüzyon katsayısı lineer olarak artmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_2=40$  °C' de en düşük değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $T_4=60$  °C'de en yüksek değeri almaktadır. Difüzyon katsayısı zaman ilerledikçe artarak yani kurutma süresinin sonunda bütün sıcaklıklarda en yüksek değere ulaşmaktadırlar. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. (a) grafiğindeki bütün şartlar incelendiğinde en yüksek Difüzyon katsayısı 30. dakikada  $T_5$  kurutma sıcaklığında  $1,37 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. Bu değer en yüksek nem alma olayının en yüksek difüzyon katsayısında gerçekleştiğini göstermektedir.

Difüzyon katsayısı kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $V_3=0,4$  m/s'de en yüksek değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $V_6=0,7$  m/s'de en düşük değeri almaktadır. Difüzyon katsayısı zaman ilerledikçe artarak yani kurutma süresinin sonunda bütün hızlarda en yüksek değerlere lineer olarak ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. (b) grafiğindeki bütün şartlar incelendiğinde en yüksek Difüzyon katsayısı 30. dakikada  $V_3$  kuruma hızında  $4,94 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. Bu değer en iyi kurumanın en yüksek difüzyon katsayısında gerçekleştiğini göstermektedir.



(a)



(b)

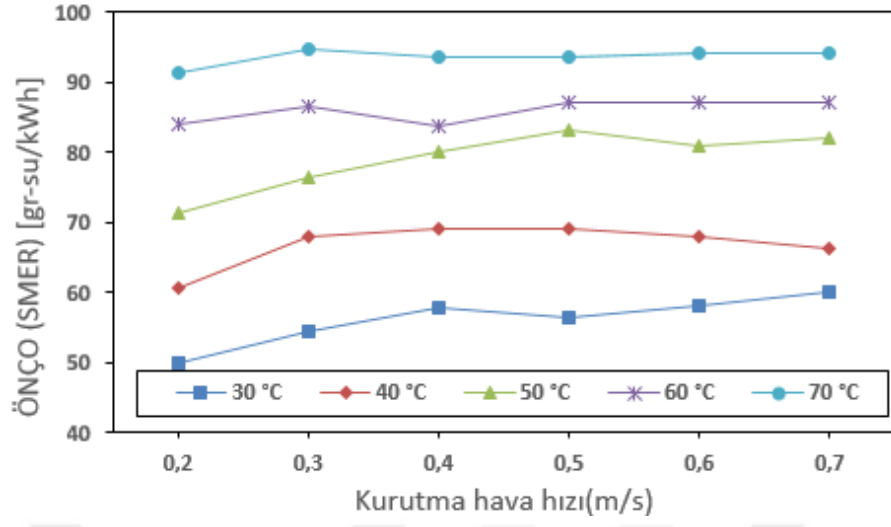
Şekil 5.6. Difüzyon Katsayısının Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)-V<sub>5</sub>=0,6 m/s; (b)-T<sub>2</sub>=40 °C]

### 5.2.6 Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Sıcaklığına ve Hızlara Göre Değerlendirilmesi

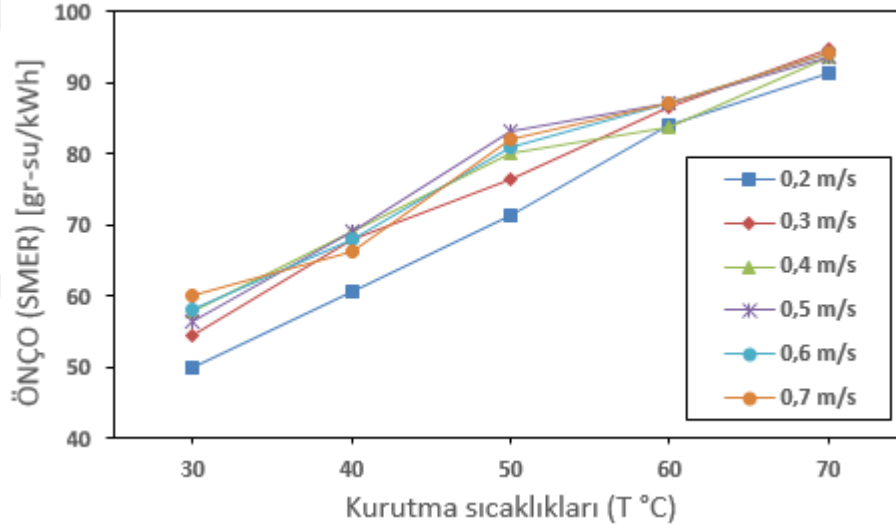
Şekil 5.7 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak ÖNÇO (SMER) değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin özgül nem çekme oranı değerleri (ÖNÇO&SMER); hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, yaklaşık olarak yatay seyir izlemekte ve kurutma havası hızı arttıkça doğrusal olarak ÖNÇO (SMER) değerlerinde küçük artışlar izlenmektedir. Bütün sıcaklık şartlarında ÖNÇO (SMER) değerleri  $T_5=70$  °C sıcaklık şartında  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 91,36 gr-su/kWh değerini alırken  $V_6=0,7$  m/s hızında ise yaklaşık 94,08 değerine yükselmektedir. Bu durumda gerçekleşen kurutma işleminde  $V_6=0,7$  m/s hızında sistemden kWh başına daha fazla nem çekilmekte ve ürün üzerinden daha fazla su miktarı buharlaştırılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak ÖNÇO (SMER) değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin özgül nem çekme oranı değerleri (ÖNÇO&SMER), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak doğrusal artış göstermekte ve  $T_5=70$  °C sıcaklığından bütün hızlarda maksimum değerlere ulaşmaktadırlar. Bununla birlikte kurutma havası hızı arttıkça kurutma sıcaklık şartlarında kabinin özgül nem çekme oranı değeri de kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6$  hızında ÖNÇO (SMER) değeri 60,11 iken,  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 49,94 değerini almaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak bu değer 94,08 olurken,  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 91,36 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı bütün hızlara ait ÖNÇO (SMER) değerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artışta, kurutma kabininin özgül nem çekme oranını artırmakta ve bu nedenle de kurutulmakta olan üründen kW başına daha yüksek miktarda nem çekme işlemi gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 5.7.** Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği



### 5.2.7 Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kabin tipli kurutma sisteminde elmanın kurutulması ile ilgili enerji ve ekserji analizleri yapılmış; bütün kurutma süreci sonunda yani 30. dakikada kurutma sıcaklıklarına ve kurutma hızlarına bağlı olarak hesaplanan  $COP_{SM}$ ,  $COP_{Ex,SM}$ ,  $EX_{sg,yo}$ ,  $COP_{IP}$ ,  $COP_{Ex,IP}$ ,  $EX_{is,yo}$ ,  $COP_{kk}$ ,  $COP_{Ex,kk}$ ,  $EX_{kk,yo}$ , değerleri Tablo 5.2’de verilmiş, bu değerlere ait grafiklerde Şekil 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 ve 5.16’da gösterilmiştir. Elma için kurutma işlemi çevrimi Şekil 3.1’de görüldüğü gibi devam etmektedir. Bu proses şeması esas alınarak enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

**Tablo 5.3.** Kurutma Modellerine Göre Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları

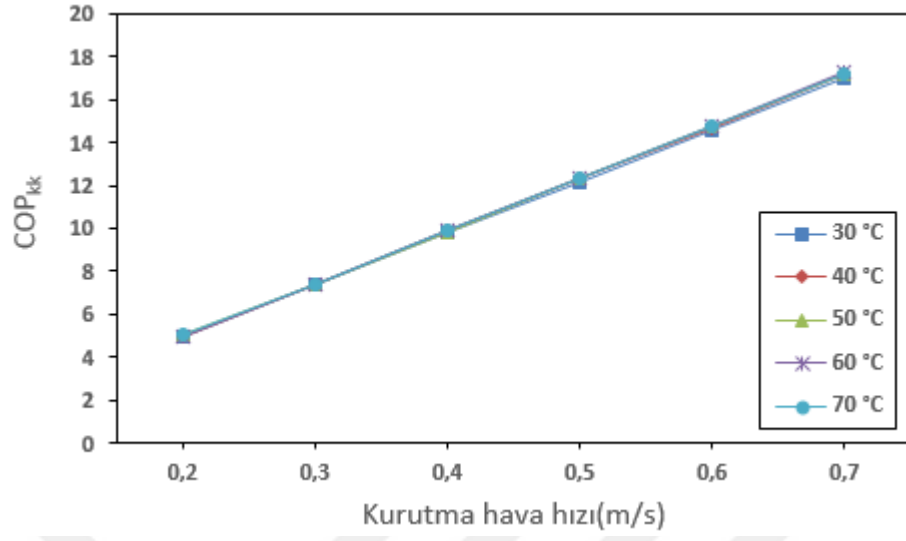
ELMA	MODELLER	NEWTON	PAGE	H. PAPIS	LOGARİTMİK	İKİ TERİMLİ	VERMA	MİDİLLİ
	K.ŞARTI	$V_4=0,5$ m/s	$V_1=0,2$ m/s	$V_3=0,4$ m/s	$V_4=0,5$ m/s	$V_6=0,7$ m/s	$V_6=0,7$ m/s	$V_5=0,6$ m/s
	PROSES	$T_2=40$ °C	$T_3=50$ °C	$T_2=40$ °C	$T_3=50$ °C	$T_5=70$ °C	$T_2=40$ °C	$T_2=40$ °C
ISITMA BÖLÜMÜ	$Q_{is,g}$	0,48538	0,40996	0,47000	0,81247	1,83842	0,61876	0,68144
	$EX_{is,g}$	0,01962	0,01786	0,01663	0,04429	0,15741	0,02637	0,02475
	$EX_{is,yo}$	0,01907	0,01547	0,01255	0,06377	0,25383	0,03169	0,02811
	$COP_{IP}$	0,57442	0,48516	0,55622	0,96151	2,17564	0,73226	0,80644
	$COP_{Ex,IP}$	0,02322	0,02113	0,01968	0,05241	0,18628	0,03121	0,02929
KURUTMA KABINI BÖLÜMÜ	$Q_{kk,g}$	10,44402	4,24002	8,38822	10,41045	14,54410	14,52082	12,38006
	$EX_{kk,g}$	0,04692	0,03350	0,03765	0,07809	0,22662	0,06490	0,05517
	$Q_{kk,ik}$	0,09074	0,07101	0,02880	0,11170	1,35021	0,14744	0,26124
	$EX_{kk,ik}$	0,00540	0,00602	0,00168	0,00910	0,17377	0,00864	0,01590
	$EX_{kk,yo}$	0,00352	0,00101	0,00755	0,01171	0,19371	0,00591	0,01015
	$COP_{kk}$	12,35978	5,01778	9,92688	12,32005	17,21195	17,18440	14,65095
	$COP_{Ex,kk}$	0,73556	0,42533	0,58028	1,00367	2,21512	1,00711	0,89178
SOĞUTMA BÖLÜMÜ	$Q_{sg,\zeta}$	0,61115	0,52058	0,53729	0,96181	3,17902	0,79424	0,97251
	$EX_{sg,\zeta}$	0,02191	0,01800	0,01592	0,04054	0,21015	0,02948	0,03224
	$EX_{sg,yo}$	0,00876	0,01430	0,01189	0,00680	0,02250	0,00315	0,00778
	$COP_{SM}$	0,72325	0,61607	0,63585	1,13824	3,76216	0,93993	1,15090
	$COP_{Ex,SM}$	0,02593	0,02130	0,01884	0,04798	0,24869	0,03489	0,03815

### 5.2.7.1 Kurutma Kabini İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

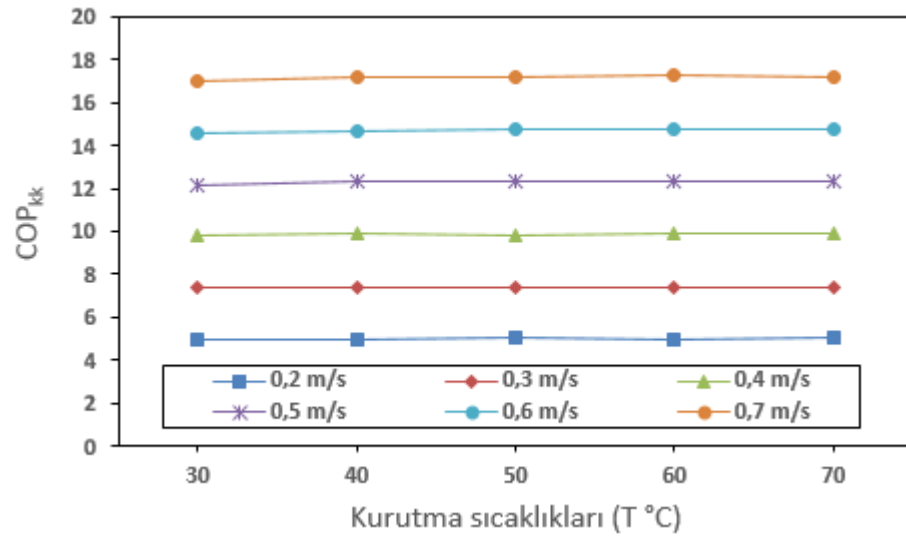
Şekil 5.8 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{kk}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{kk}$ ), hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, aynı değeri almakta ve kuruma hızı arttıkça lineer olarak  $COP_{kk}$  değerleride artmaktadır. Bütün sıcaklık şartlarında  $COP_{kk}$  değeri  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 5,0 değerini alırken  $V_6=0,7$  m/s hızında ise yaklaşık 17,0 değerine yükselmektedir. Bu durumda kurutma işleminin de  $V_6=0,7$  m/s hızında sisteme daha fazla ısı yüklenmekte ve ürün üzerinden daha fazla su miktarının buharlaştırılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre, kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{kk}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{kk}$ ), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak çok az değişmekte (artmakta) ve yaklaşık yatay bir seyir izlemektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça kabinin etkinlik katsayısı değeride kademeli olarak artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{kk}$  değeri 17,0 iken,  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 4,95 değerini almaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak bu değer 17.21 olurken,  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 5.024 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı  $COP_{kk}$  değerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artmasına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artışta, kurutma kabininin etkinlik katsayısını artırmakta ve bu nedenle de daha iyi kurutma gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

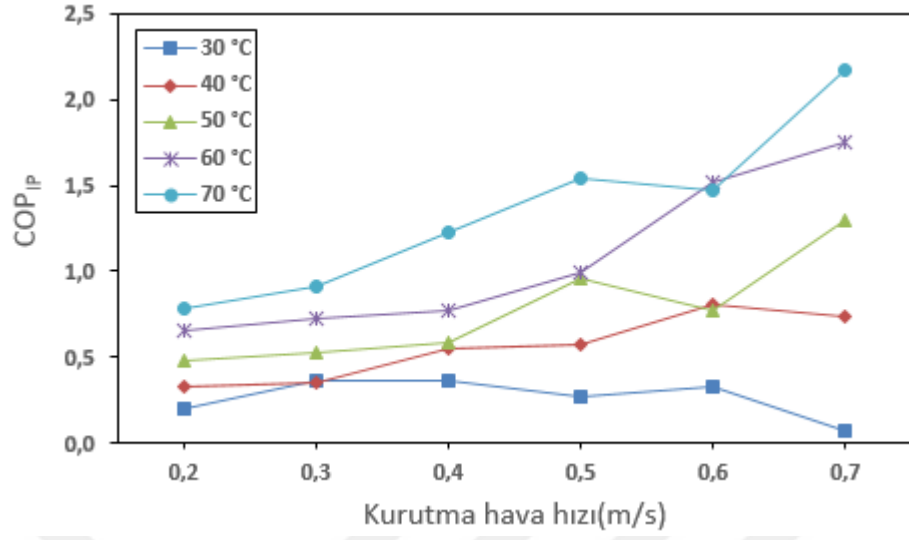
**Şekil 5.8.** Kurutma Kabini Bölümü İçin  $COP_{kk}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

### 5.2.7.2 Isıtma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

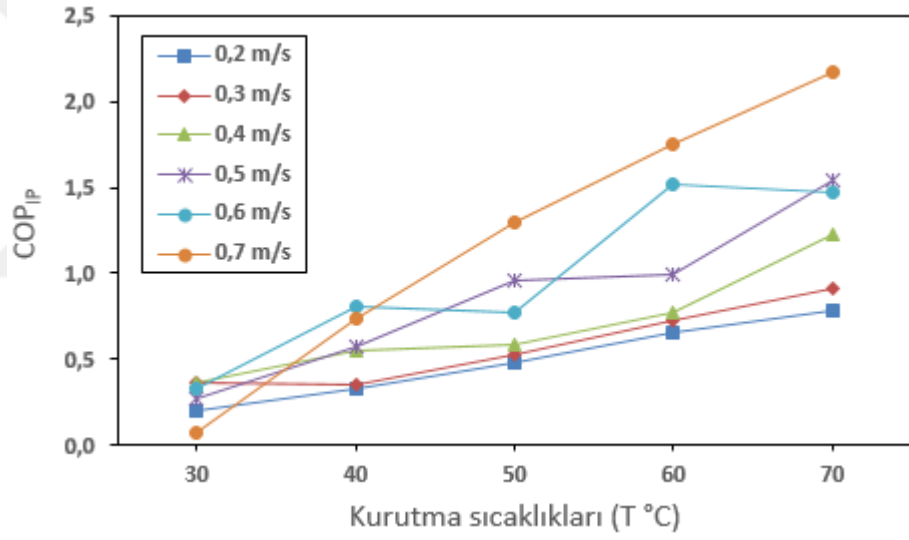
Şekil 5.9 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{IP}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{IP}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kurutma havası hızı arttıkça  $COP_{IP}$  değerleride yaklaşık artmaktadır.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki kurutma işleminde ise  $COP_{IP}$  değeri  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0.197 iken,  $V_6=0,7$  m/s hızında da bu değer 0,076 olmaktadır. En yüksek  $COP_{IP}$  değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında yaklaşık 2.175 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere en hızlı kuruma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartta gerçekleşen kuruma işleminde sisteme en fazla ısı verildiği anlaşılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{IP}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{IP}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak kademeli olarak artmakta ve aynı anda kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak yaklaşık lineer bir artış izlenmektedir. Bununla birlikte kurutma havası hızı arttıkça ısıtma bölümünün etkinlik katsayısı değeri de kademeli olarak artmaktadır.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{IP}$  değeri 0,076 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{IP}$  değeri yaklaşık 2,175 olup, en yüksek değere ulaşmıştır. Şekil 5.9 (b) grafiğinde kurutma havası hızlarına bağlı olarak sıcaklık arttıkça ısıtma bölümü için  $COP_{IP}$  değerlerindeki kademeli artışın görüldüğü aşikârdır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı  $COP_{IP}$  değerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Aynı şekilde kurutma havası sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artışta, ısıtma bölümünün etkinlik katsayısını artırmakta ve bu nedenle de daha iyi kurutmanın gerçekleşmesine yol açmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 5.9. Isıtma Bölümü İçin COP<sub>IP</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

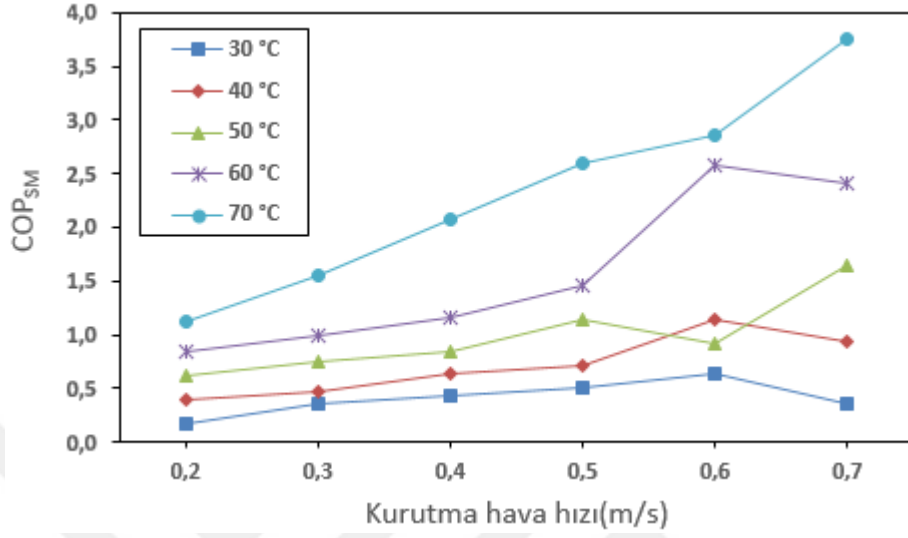
### 5.2.7.3 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.10 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{SM}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{SM}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kurutma havası hızı arttıkça  $COP_{SM}$  değerlerinde de yaklaşık doğrusal artış gözlenmektedir.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki soğutma işleminde ise  $COP_{SM}$  değeri,  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0.178 iken;  $V_6=0,7$  m/s hızında da 0,353 değerini almaktadır. En yüksek  $COP_{SM}$  değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 3,762 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere en verimli soğutma ve nem alma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartta gerçekleşen soğutma işleminde sistemden en fazla ısı çekildiği ve nem alındığı anlaşılmaktadır.

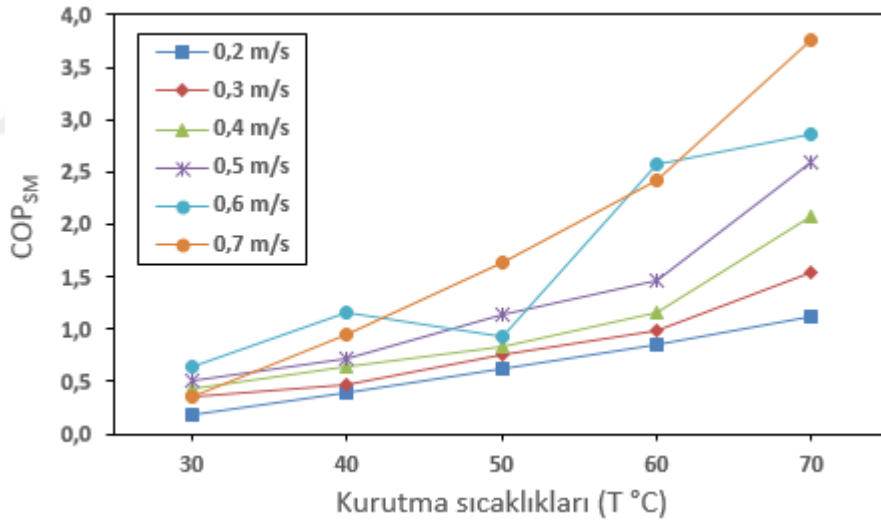
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre, kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{SM}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{SM}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve yaklaşık lineer bir artış izlenmektedir. Bununla birlikte kurutma havası hızı arttıkça, soğutma bölümünün etkinlik katsayısı değeri de kademeli olarak artmaktadır.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{SM}$  değeri 0,178 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{SM}$  değeri 3,76 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. (a) grafiğinde de kurutma havası hızlarına bağlı olarak kurutma sıcaklığı arttıkça soğutma bölümü için  $COP_{SM}$  değerlerinde kademeli artış görülmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir soğutmanın gerçekleştiğinden dolayı  $COP_{SM}$  değerlerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artışla birlikte, soğutma bölümünün etkinlik katsayısı artmakta ve bu nedenle de daha iyi bir soğutma ve nem

alma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Kapalı çevrimli bir kurutma sistemi düşünüldüğünde, bu durum ile birlikte kurutma havasının nem alma kapasitesi de artmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 5.10. Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin COP<sub>SM</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

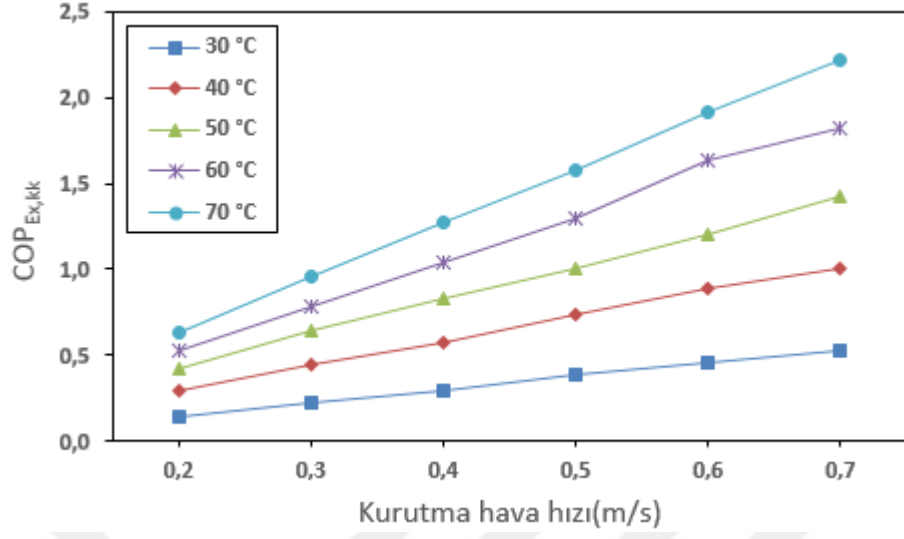
#### 5.2.7.4 Kurutma Kabini İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.11 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,kk}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,kk}$ ), hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, lineer olarak artmakta ve kuruma hızı arttıkça da doğrusal olarak  $COP_{Ex,kk}$  değerlerinde artış gözlenmektedir. En yüksek  $COP_{Ex,kk}$  değeri  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızında 2,215 değerini alırken, en düşük  $COP_{Ex,kk}$  değeri de  $V_1=0,2$  m/s kuruma hızı ve  $T_1=30$  °C kurutma sıcaklığında yaklaşık olarak 0,146 değerini almaktadır.  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızındaki kurutma işleminde sisteme en fazla ısı yüklenmekte ve sonuçta ürün üzerinden daha fazla su miktarı buharlaştırılmaktadır.

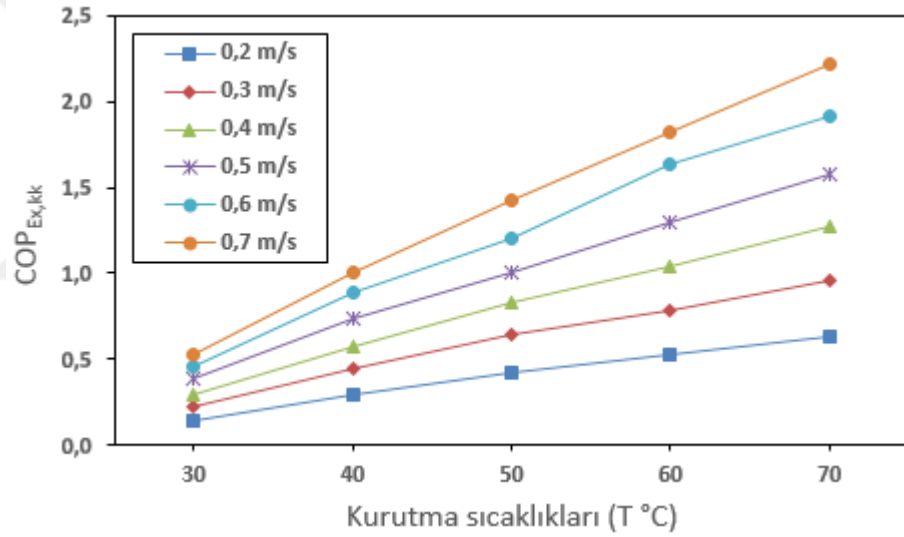
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,kk}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,kk}$ ), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli olarak artmakta ve doğrusal bir artış seyri izlenmektedir. Aynı şekilde kuruma hızı arttıkça kabinin etkinlik katsayısı değerinde de kademeli artış görülmektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında en yüksek  $COP_{Ex,kk}$  değeri 0,531 iken, aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise bu değer yaklaşık olarak en düşük 0,146 değerini almaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak kurutma kabininin en yüksek etkinlik katsayısı değeri 2,215 olurken; aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise bu değer en düşük 0,638 olmaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası hızının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı  $COP_{Ex,kk}$  değerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artışla da kurutma kabininin ekserji etkinlik katsayısı artmış ve bu nedenle de daha iyi kurutma gerçekleşmiştir.





(a)



(b)

**Şekil 5.11.** Kurutma Kabini Bölümü İçin COP<sub>Ex,kk</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

Şekil 5.12 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $EX_{kk,yo}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin ekserji yokoluşu değerleri ( $EX_{kk,yo}$ );  $T_1=30$  °C,  $T_2=40$  °C ve  $T_3=50$  °C sıcaklık şartlarında bütün hızlarda sıfıra (0,00- 0,018 kW) yakın bir değer almakta iken,  $T_4=60$  °C ve  $T_5=70$  °C sıcaklıklarındaki hıza bağlı değişimlerde

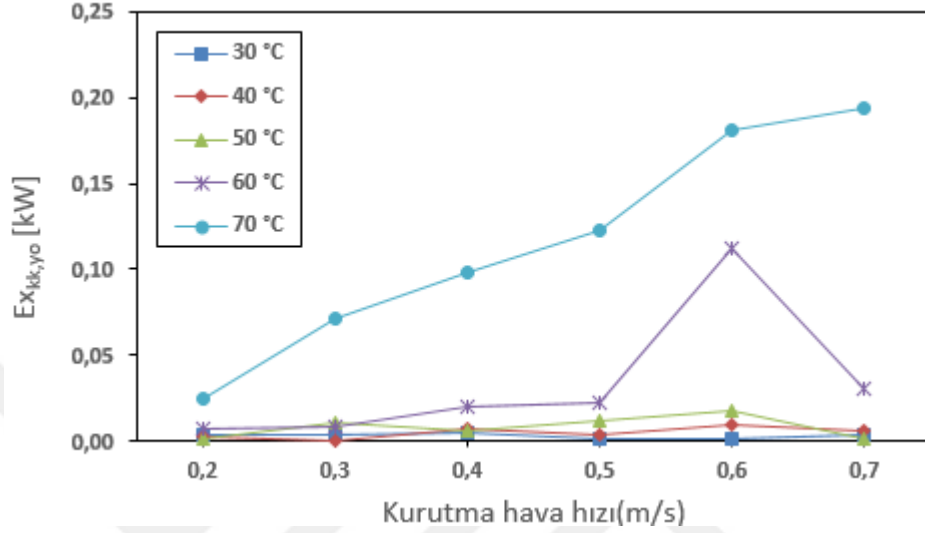
artarak salınımlı yükselmektedir. Bu durumda göstermektedir ki  $T_4=60\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık şartlarında kurutma kabininde ekserji yokoluşu daha fazla olmaktadır. En yüksek ekserji yokoluşu ( $EX_{kk,yo}$ ),  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığı  $V_6=0,7\text{ m/s}$  hızında gerçekleşmektedir ve bu değerinde  $0,193\text{ kW}$  olmaktadır.

$T_4=60\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  kurutma sıcaklığı şartlarında kurutma havası hızlarında bağlı olarak, lineer olarak kademeli artmakta ve kuruma hızı arttıkça da Ekserji yokoluşu artışı lineer olarak maksimum değerine ulaşmaktadır. En yüksek  $EX_{kk,yo}$  değeri  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığında ve  $V_6=0,7\text{ m/s}$  hızında  $0,193$  değerini alırken, en düşük  $EX_{kk,yo}$  değeri de  $V_1=0,2\text{ m/s}$  kurutma havası hızı ve  $T_3=50\text{ }^\circ\text{C}$  kurutma sıcaklığında yaklaşık olarak  $0,001012$  değerini almaktadır. Bu durumda kurutma işleminde  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık şartında ve  $V_6=0,7\text{ m/s}$  hızında sisteme daha fazla ısı yüklenmekte ve sistemin iyi yalıtılmaması nedeniyle ekserji yok oluşu en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu olayın sonucunda sistemin verimi ters yönde etkilenmekte ve sistemin kurutma performansı azalmaktadır.

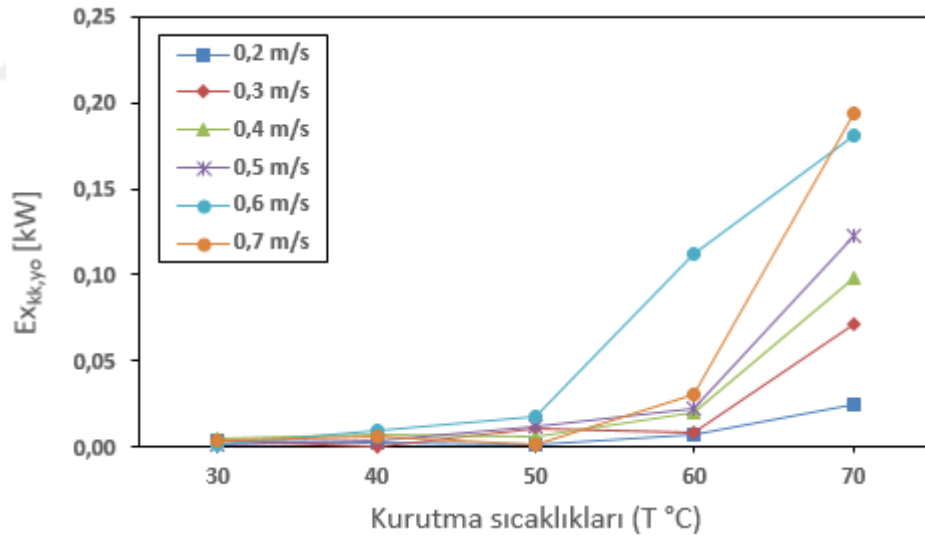
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $EX_{kk,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin ekserji yokoluş değerleri ( $EX_{kk,yo}$ ), bütün kuruma hızı şartlarında  $T_4=60\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığına kadar doğrusal olarak çok hafif artmakta bu sıcaklıktan sonra hızlı bir şekilde lineer olarak dikey artış göstermektedir. Fakat  $V_5=0,6\text{ m/s}$  hızında dikey yöndeki hızlı artış  $T_3=50\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığında başlamaktadır. Herbir kuruma hızı şartında;  $T_3=50\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığından sonra ekserji yok oluşunda kademeli artış gözlenmektedir. Aynı şekilde kuruma hızı arttıkça kabinin ekserji yok oluşu değerlerinde de kademeli artış görülmektedir.

$T_1=30\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığında;  $V_6=0,7\text{ m/s}$  hızında en yüksek  $EX_{kk,yo}$  değeri  $0,0035$  iken  $V_4=0,5\text{ m/s}$  hızında ise bu değer yaklaşık olarak  $0,00099$  ile en düşük değere ulaşmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığında ise;  $V_6=0,7\text{ m/s}$  hızında yaklaşık olarak en yüksek değer  $0,193$  olurken;  $V_1=0,2\text{ m/s}$  hızında ise  $0,0249$  değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir kuruma gerçekleşirken, en yüksek  $EX_{kk,yo}$

değerine de ulaşılır. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma havası hızlarındaki artış, kurutma kabininin ekserji yok oluşunu artırmakta ve bu nedenle de en yüksek ekserji kaybı ortaya çıkmaktadır.



(a)



(b)

**Şekil 5.12.** Kurutma Kabini Bölümü İçin  $Ex_{kk,yo}$  ile Kurutma Havası Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

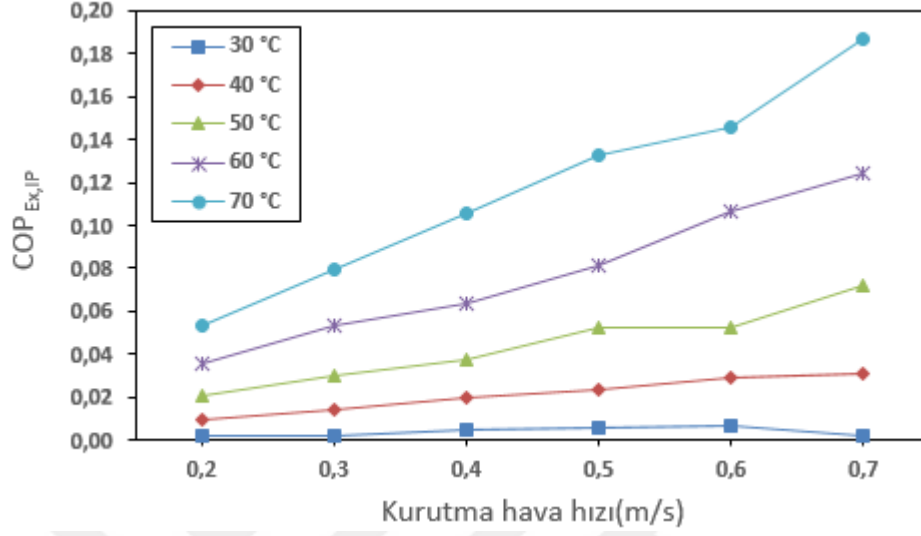
### 5.2.7.5 Isıtma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.13 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,IP}$  değerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,IP}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kuruma hızı arttıkça  $COP_{Ex,IP}$  değerlerinde de herbir sıcaklık şartı için yaklaşık lineer bir artış gözlenmektedir.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki kurutma işleminde ise  $COP_{Ex,IP}$  değeri;  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0,0024 iken,  $V_6=0,7$  m/s hızında da 0,0023 değerine düşmektedir. En yüksek  $COP_{Ex,IP}$  değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,186 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere en hızlı kuruma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızında gerçekleşmektedir. Bu şartlarda gerçekleşen kurutma işleminde sisteme en fazla ısı verildiği ve bu nedenle de ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısının en yüksek değere ulaştığı anlaşılmaktadır.

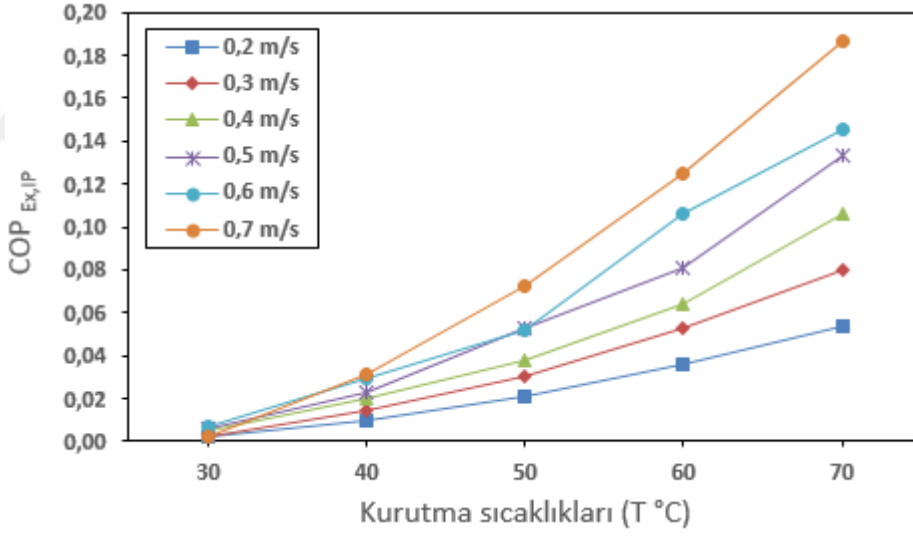
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,IP}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,IP}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde değişmekte (artmakta) ve yaklaşık parabolik bir artış seyri izlemektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça herbir sıcaklık şartı için ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı değeride kademeli olarak artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{Ex,IP}$  değeri 0,023 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{Ex,IP}$  değeri 0,186 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Şekil 5.13 (b)'den anlaşılacağı üzere; kurutma hızlarına bağlı olarak sıcaklık arttıkça ısıtma bölümü için  $COP_{Ex,IP}$  değerlerinde kademeli artış görülmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile herbir hız şartı için daha iyi bir kurutma gerçekleşmekte ve bunun sonucunda  $COP_{Ex,IP}$  değerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde kurutma havası hızları artışına bağlı olarak kurutma sıcaklıklarındaki

artış ile birlikte, ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı artmakta ve sonuç olarak daha iyi bir kurutma işlemi gerçekleşmektedir.



(a)



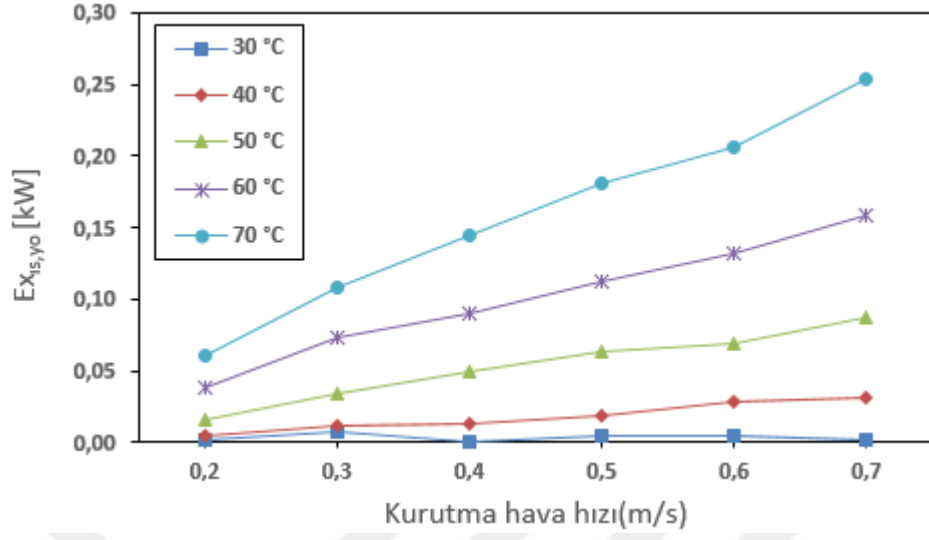
(b)

**Şekil 5.13.** Isıtma Bölümü İçin COP<sub>Ex,IP</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

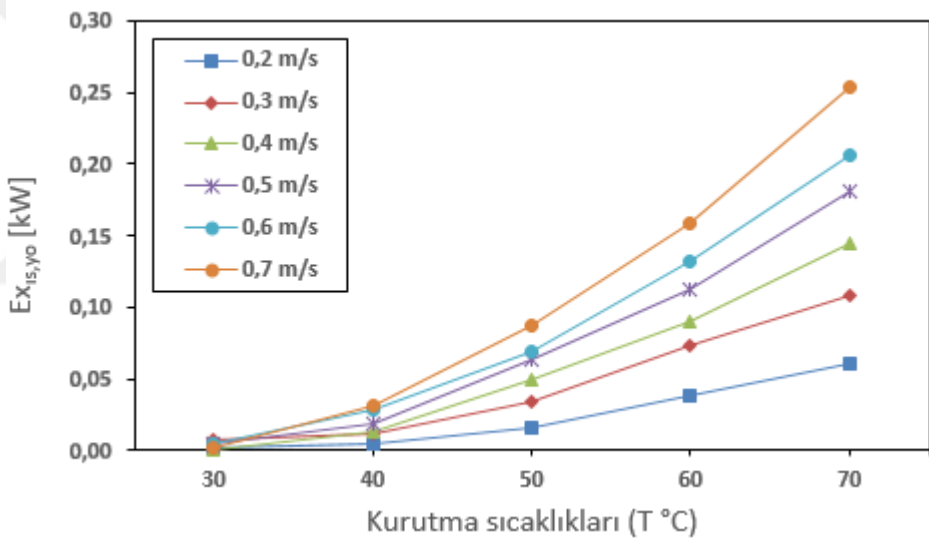
Şekil 5.14 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $Ex_{is,yo}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{is,yo}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kuruma hızı arttıkça  $Ex_{is,yo}$  değerlerinde de yaklaşık lineer bir artış gözlemlenmektedir. En yüksek ekserji yokoluşu ( $Ex_{is,yo}$ ) değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,253 olarak belirlenmiştir.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $Ex_{is,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{is,yo}$ ), her bir kurutma havası hızı şartlarında kurutma sıcaklıklarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve herbir hız şartı için sıcaklık artışı ile birlikte ekserji yokoluşunda yaklaşık parabolik bir artış seyri izlenmektedir. Bununla birlikte kuruma hızının artışıyla birlikte ısıtma bölümünün ekserji yokoluşu değeri de kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_5=0,6$  m/s hızında en yüksek  $Ex_{is,yo}$  değeri 0,00527 iken; aynı sıcaklıkta  $V_3=0,4$  m/s hızında ise yaklaşık 0,000118 ile en düşük değere ulaşmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak en yüksek değer olarak 0,254'e ulaşılan; aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 0,0608 olarak en düşük değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir kuruma gerçekleşirken, en yüksek  $Ex_{is,yo}$  değerine ulaşılır ki; ısıtma bölümünde en yüksek enerji kaybı bu hız ve sıcaklık şartında gerçekleşir.



(a)



(b)

Şekil 5.14. Isıtma Bölümü İçin  $Ex_{15,y0}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

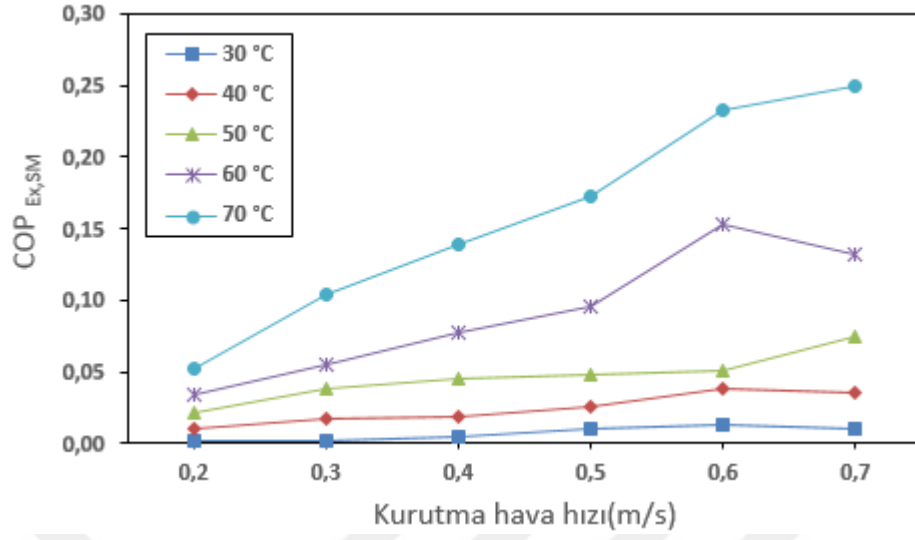
### 5.2.7.6 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.15 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,SM}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{Ex,SM}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kuruma hızı arttıkça  $COP_{Ex,SM}$  değerleride artmaktadır.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki soğutma işleminde ise  $COP_{Ex,SM}$   $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0,001567 iken  $V_6=0,7$  m/s hızında da 0,01024 değerini almaktadır. En yüksek  $COP_{Ex,SM}$  değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,248 olarak görülmektedir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, en verimli soğutma ve nem alma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartlarda gerçekleşen soğutma işleminde sistemden en fazla ısı çekildiği ve nem alındığı anlaşılmaktadır.

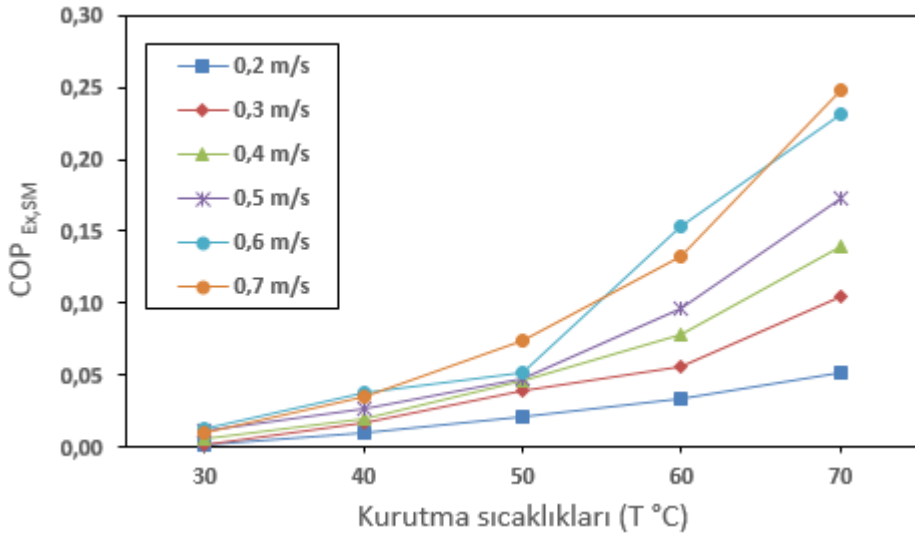
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,SM}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,SM}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve parabolik bir seyir izlenmektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça, soğutma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı değeride kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{Ex,SM}$  değeri 0,0015 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_6$  hızında  $COP_{Ex,SM}$  değeri 0,248 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere, kurutma hızlarına bağlı olarak kurutma sıcaklığı arttıkça soğutma bölümü için  $COP_{Ex,SM}$  değerlerinde de kademeli artış gösterdiği aşikârdır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir soğutma işlemi gerçekleşmekte, dolayısı ile  $COP_{Ex,SM}$  değerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak, kurutma hızlarındaki artış ile birlikte, soğutma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı artmakta ve bu nedenle de daha iyi bir soğutma ve nem alma işlemi gerçekleşmektedir.





(a)



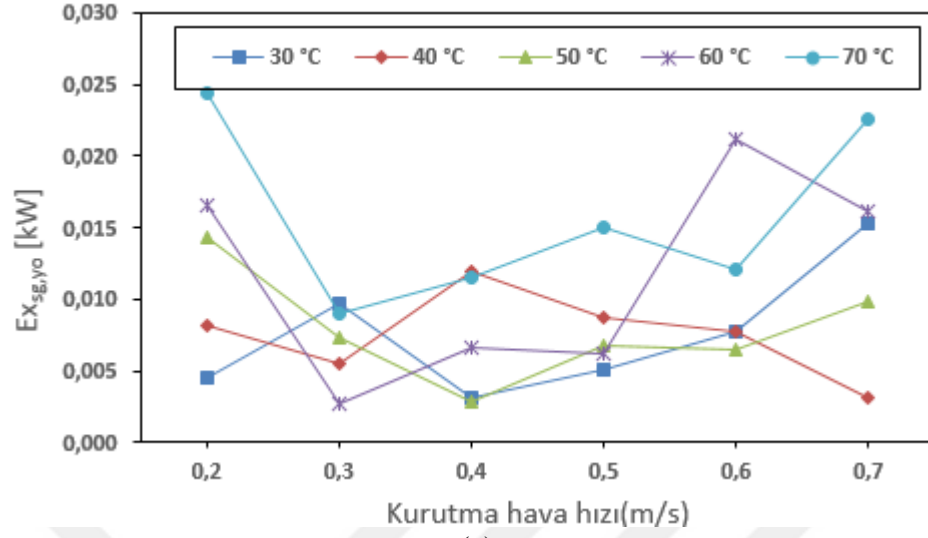
(b)

**Şekil 5.15.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $COP_{Ex,SM}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

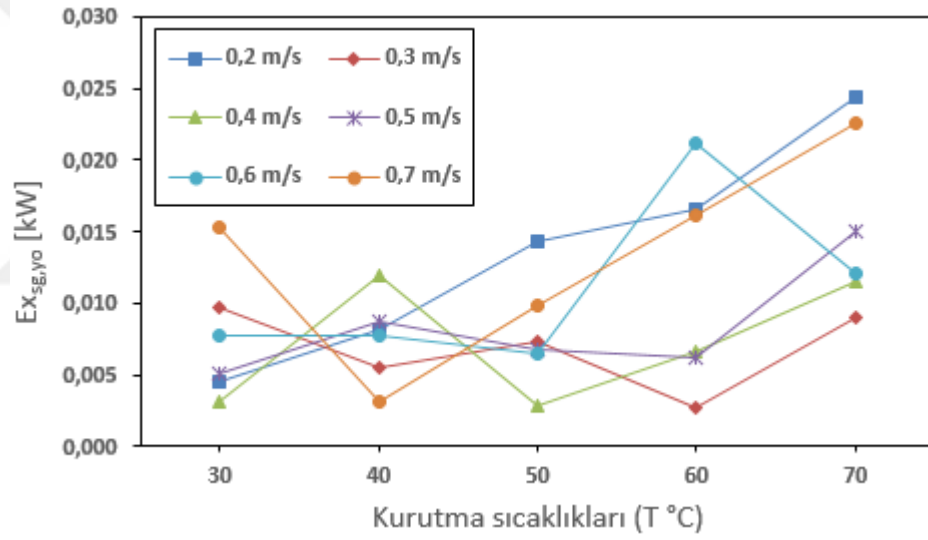
Şekil 5.16 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $Ex_{sg,yo}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte anlaşılacağı üzere; soğutma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli olarak artmakta ve herbir sıcaklık şartı için hızlara bağlı olarak ekserji yokoluşu değişimleri dalgalı bir seyir izlemektedir. En yüksek ekserji yok oluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ) değeri ise yaklaşık olarak  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,0225 olarak belirlenmiştir.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $Ex_{sg,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ), her bir kurutma havası hızı şartlarında kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak kademeli bir şekilde artmakta ve ekserji yokoluşu değişimleri herbir hız şartı için sıcaklık artışı ile birlikte dalgalı bir seyir izlemektedir. Bununla birlikte sıcaklığa bağlı olarak  $V_1=0,2$  m/s ve  $V_6=0,7$  m/s hızı şartlarında ekserji yokoluşu yaklaşık doğrusal olarak artmaktadır. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça da soğutma bölümünün herbir sıcaklık şartında ekserji yokoluşu değerleri de kademeli olarak artmaktadır.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında en yüksek  $Ex_{sg,yo}$  değeri; yaklaşık 0,0153 iken, aynı sıcaklıkta  $V_3=0,4$  m/s hızında ise yaklaşık 0,003108 ile en düşük değere ulaşmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak en yüksek ekserji yokoluşu değeri 0,02431 olurken;  $V_2=0,3$  m/s hızında ise en düşük 0,009009 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir soğutma ve nem alma gerçekleşirken,  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_1=0,2$  m/s hızında en yüksek  $Ex_{sg,yo}$  değerine ulaşır ki; ekserji yokoluşundaki bu artış da istenilmeyen bir durumu ortaya çıkarır ve bu durum sistemin verimini düşürür.



(a)



(b)

**Şekil 5.16.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $Ex_{sg,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

### 5.3 Kayısı Kurutma Sonuçlarının Tartışılması

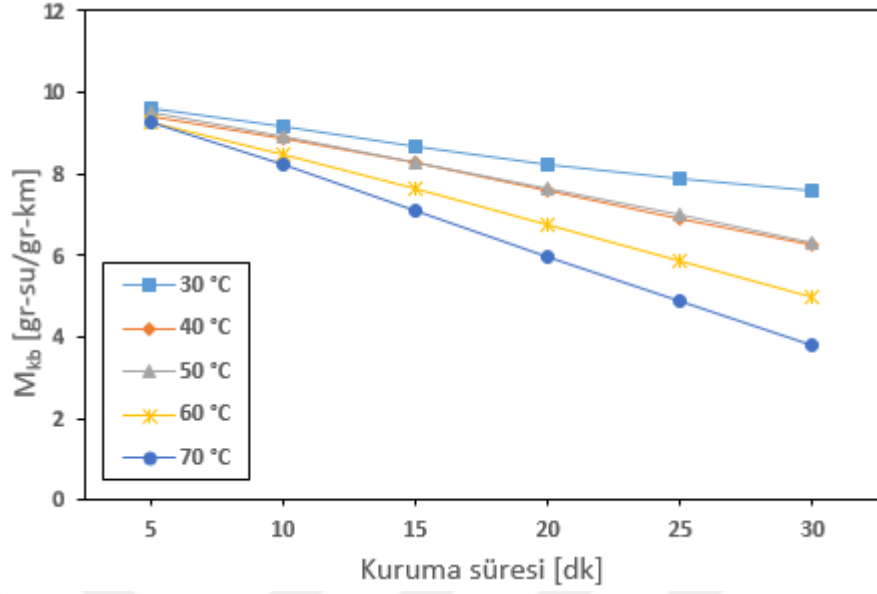
#### 5.3.1 Ürün Nem İçeriğinin Zamana Göre Değişimi

Kurutma havası sıcaklığının ürünün nem içeriğine etkisi; kayısı için belirlenen en iyi kurutma ( $V_3=0,4$  m/s (a), ve  $T_3=50$  °C (b)), şartlarında Şekil 5.17’de zamana bağlı olarak verilmiştir.

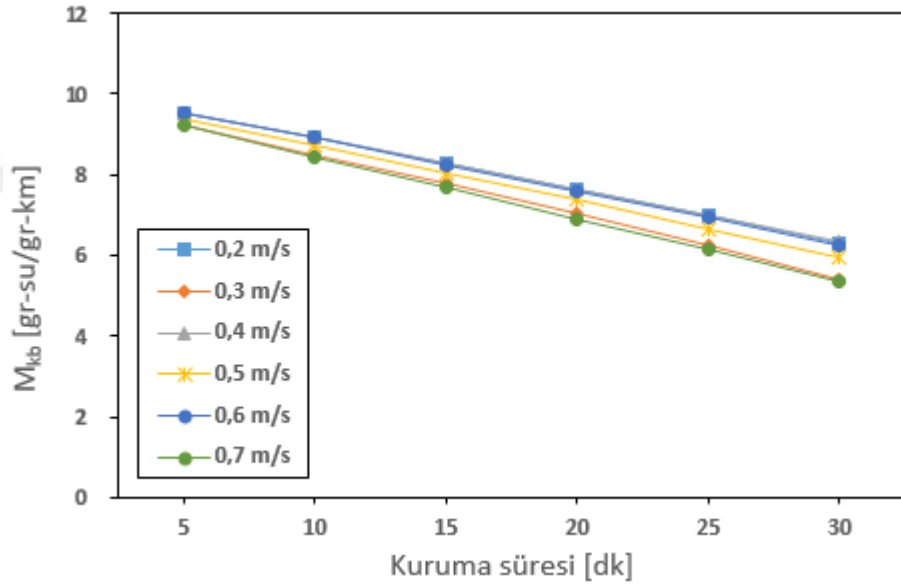
Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça nem içeriği azalmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde nem içeriği  $T_1=30$  °C’ de yüksek değerdeyken, kuruma süresinin sonundan yani 30. Dakikada  $T_5=70$  °C’ de en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde yer alan diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımları da benzer davranış göstermektedir.

Sabit ürün kurutma havası hızında ( $V_3=0,4$  m/s) gerçekleşen kurutma işleminde; sıcaklığının artması ile grafik üzerinde nem içeriğinde zamana göre artan azalma görülmektedir. Ürün nem içeriği, 5. dakikada  $T_1=30$  °C sıcaklığında, en yüksek değerde iken; ürün nem içeriği  $T_5 =70$  °C sıcaklığında, yine aynı dakikada sıcaklık şartları göz önünde bulundurulduğunda, en düşük değerdedir. Kurutma zamanı arttıkça ürün nem içeriği bütün sıcaklık şartlarında azalarak düşük seviyelere inmektedir. Grafiktende görülmektedir ki kurutma havası sıcaklığının artmasıyla ürünün kuruma işlemi daha hızlı olmaktadır.

Kuruma hızlarına göre karşılaştırma yapıldığında; kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $T_3=50$  °C sıcaklığında nem içeriği  $V_1=0,2$  m/s’de en yüksek değeri almakta iken; kuruma süresinin sonundan yani 30. dakikada  $V_6= 0,7$  m/s’de en düşük değere ulaşmaktadır. Farklı hızlarda kurutma işlemine bakıldığında özgül nem içeriği hepsinde zamanla azalmaktadır. Bu grafik üzerinde yer alan bütün hız şartlarında özgül nem içeriği ile ilgili dağılımlar da benzer davranış göstermektedir.



(a)



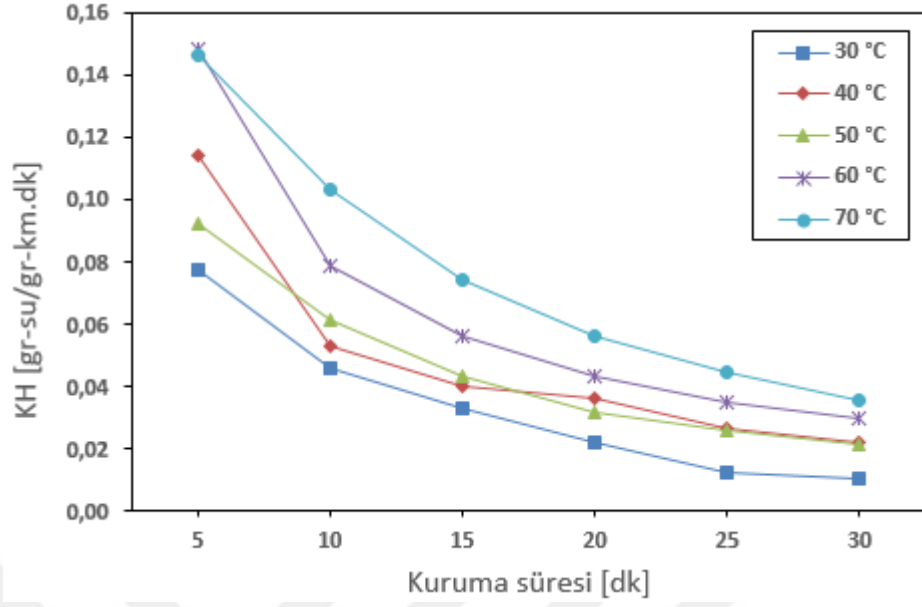
(b)

Şekil 5.17. Nem İçeriğinin Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_3=0,4$  m/s; (b)- $T_3=50^\circ\text{C}$ ]

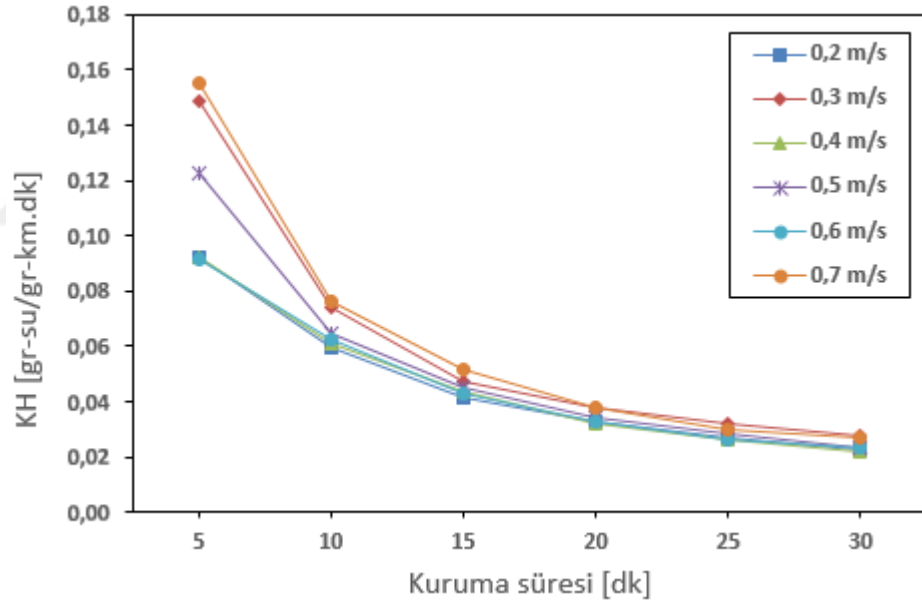
### 5.3.2 Ürün Kuruma Hızının Zamana Göre Değişimi

Şekil 5.18'de kayısı için  $V_3=0,4$  m/s (a), ve  $T_3=50$  °C (b), şartlarında zamana bağlı kuruma hızı değişimi verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça kuruma hızları azalmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_4=60$  °C' de; en yüksek değeri almakta iken, kuruma süresinin sonundan yani bu sıcaklığın 30. dakikasında en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. Bunun nedeni kurutma başlangıcında kurutma havasının bağıl neminin düşük olması, kurutma sonuna doğru ise kurutma havasının bağıl neminin artışıdır. Dolayısıyla bu durum; kurutma havasının içerisindeki bağıl neminin artması ürün üzerinde bulunan nemin buharlaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kuruma süresinin sonundaki kurutma hızlarında düşük çıkmaktadır.

Kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde kuruma hızı  $V_6=0,7$  m/s'de; en yüksek değeri almakta kuruma süresinin sonundan yani 30. dakikada en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. Bunun nedeni kurutma başlangıcında kurutma havasının bağıl neminin düşük olması, kurutma sonuna doğru ise kurutma havasının bağıl neminin artışıdır. Kuruma başlangıcında; kurutma havası hızındaki artış, kurutulacak ürüne ısı transferini daha hızlı nüfuz ettirecek ve dolayısıyla ürün üzerinden nemi hızla uzaklaştırılacaktır.



(a)



(b)

Şekil 5.18. Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_3=0,4$  m/s; (b)- $T_3=50^\circ\text{C}$ ]

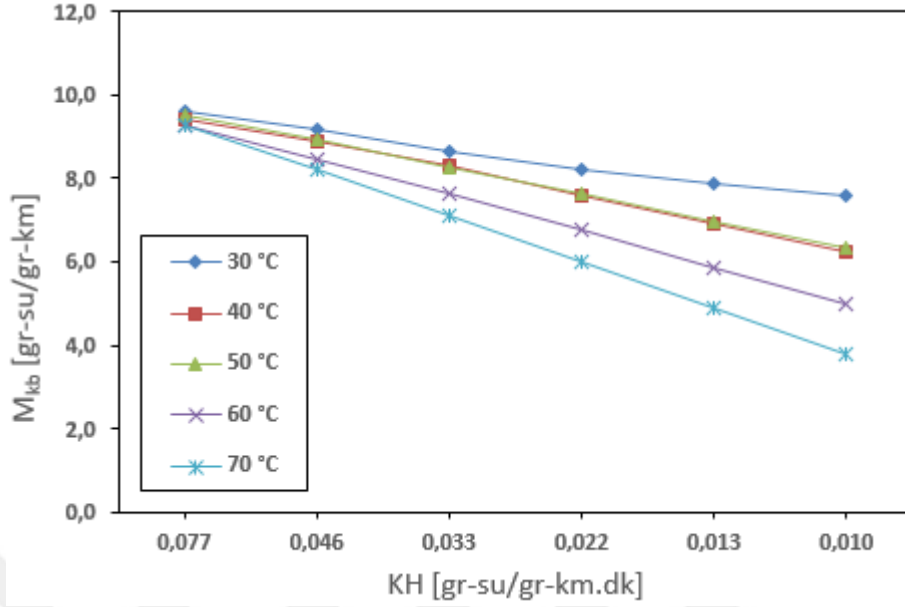
### 5.3.3 Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği İle Değişimi

MATLAB Programında literatürde en çok kullanılan Modeller için yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen kuruma eğrilerinin  $R^2$  ve RMSE sonuçlarına göre kayısı için Verma ve Ark. Modelinin  $V_3=0,4$  m/s hızında en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği İle Değişimi grafiği  $V_3=0,4$  m/s hızında çizilmiştir.

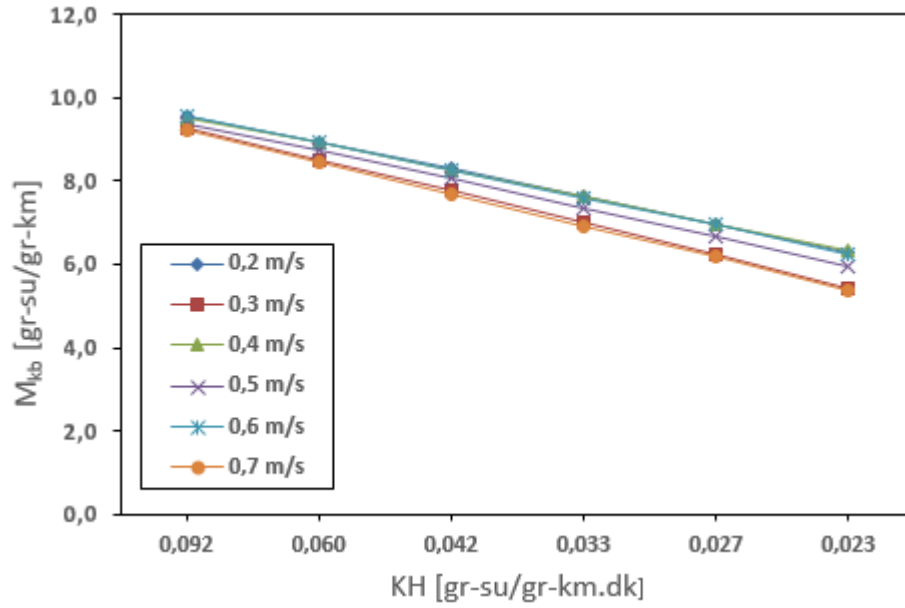
Denklem (3.1) ve (3.3) kullanılarak hesaplanan ürünün kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimi, sıcaklıklara bağlı olarak Şekil 5.19'de verilmiştir. Bu sıcaklıklar  $T_1=30$  °C,  $T_2=40$  °C,  $T_3=50$  °C,  $T_4=60$  °C,  $T_5=70$  °C olarak seçilmiştir. Şekil 5.19 (a) ve (b)'de grafikler dikkatli bir şekilde incelendiğinde, kuruma hızının nem içeriğiyle değişiminin grafiklerinden anlaşılacağı üzere, kuruma olayının azalan kuruma hızı evresinde gerçekleştiği ve bu süreçte sabit kuruma hızı görülmediği anlaşılmaktadır. Bu bulgu, daha önce yapılan araştırmalarla uyum göstermektedir [203, 91].

Kuruma işlemi azalan hız periyodunda gerçekleşmiştir. Kuruma hızı arttıkça ürün nem içeriği azalmaktadır. Aynı anda kurutma havası sıcaklığının artışı ile buna bağlı olarakta ürün nem içeriği azalmaktadır. Bunun nedeni ise kurutma esnasında yüksek kurutma havası sıcaklıkları malzemeye olan ısı transferini ve bununla birlikte yüzey suyu buharlaşma hızlarının artmasını sağlayarak, nemin daha hızlı bir şekilde uzaklaşmasına yardımcı olmaktadır. Kurutma havasının sıcaklıklarının artışı ile ürünün iç yüzeyine olan ısı transfer hızı artarak, yüzey nemi daha yüksek hızla buharlaşmaktadır. Böylece, elde edilen sonuçlara göre kurutma hava sıcaklıklarının artması ile kuruma sürelerinde azalma gözlemlenmektedir.





(a)



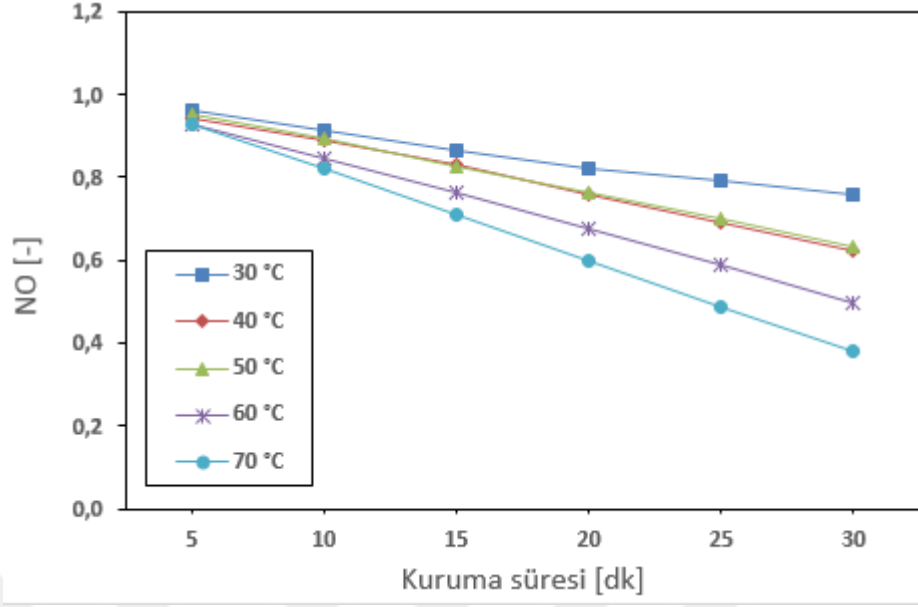
(b)

Şekil 5.19. Nem İçeriğinin Kuruma Hızı ile Değişimi [(a)- $V_3=0,4$  m/s; (b)- $T_3=50^\circ\text{C}$ ]

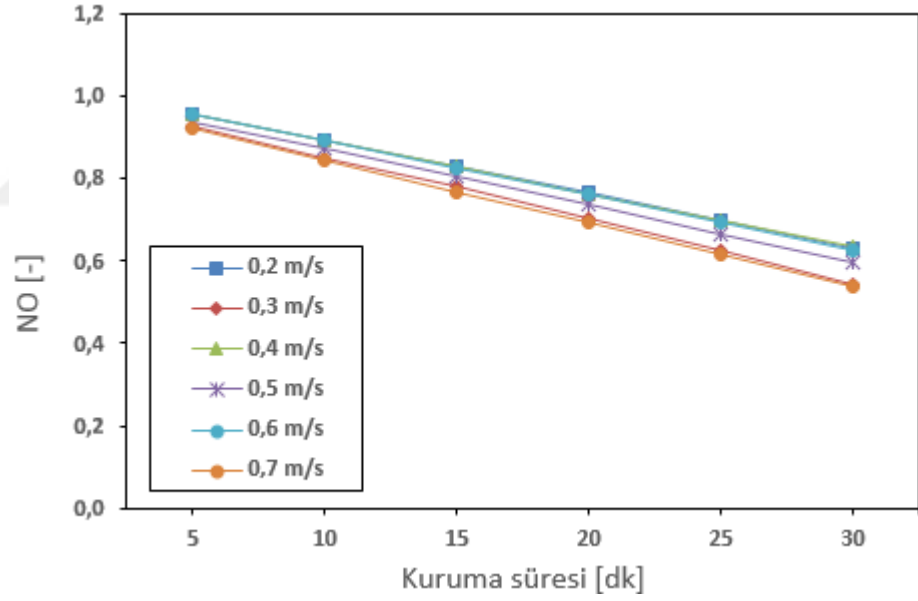
### 5.3.4 Ürün Nem Oranının Zamana Göre Değişimi

Şekil 5.20 (a) ve (b) grafiklerinde  $V_3=0,4$  m/s ve  $T_3=50$  °C şartlarında zamana bağlı nem oranı grafikleri verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça nem oranında azalma görülmektedir. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_1=30$  °C' de en yüksek değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $T_5=70$  °C'de en düşük değeri almaktadır. Kuruma hızı zaman ilerledikçe azalarak yani kurutma süresinin sonunda bütün sıcaklıklarda en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir.

Kuruma hızı kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $V_5=0,5$  m/s'de en yüksek değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $V_6=0,7$  m/s'de en düşük değeri almaktadır. Kuruma hızı zaman ilerledikçe azalarak yani kurutma süresinin sonunda bütün hızlarda en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir.



(a)



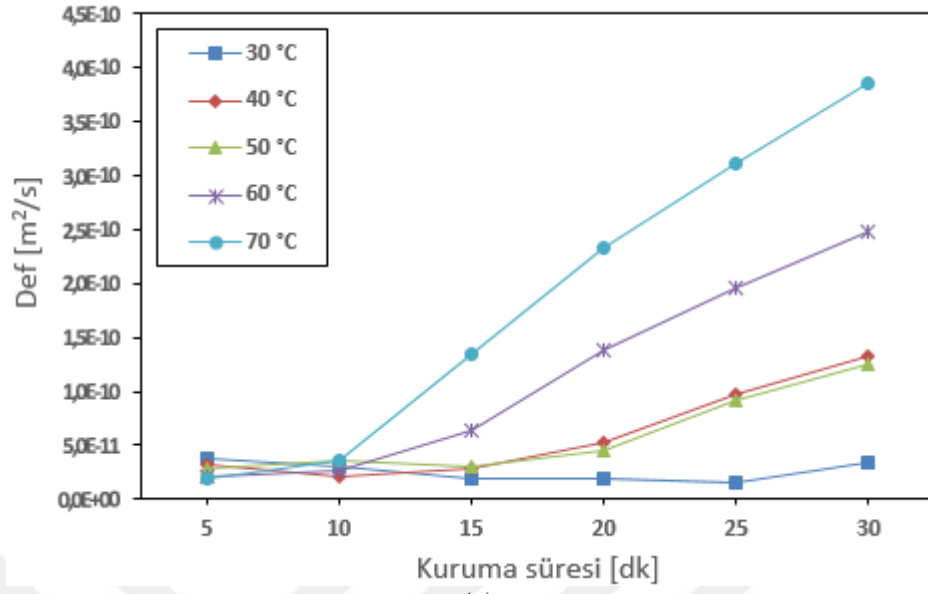
(b)

Şekil 5.20. Nem Oranının Kuruma Süresi İle Değişimi [(a)- $V_3=0,4$  m/s; (b)- $T_3=50^\circ\text{C}$ ]

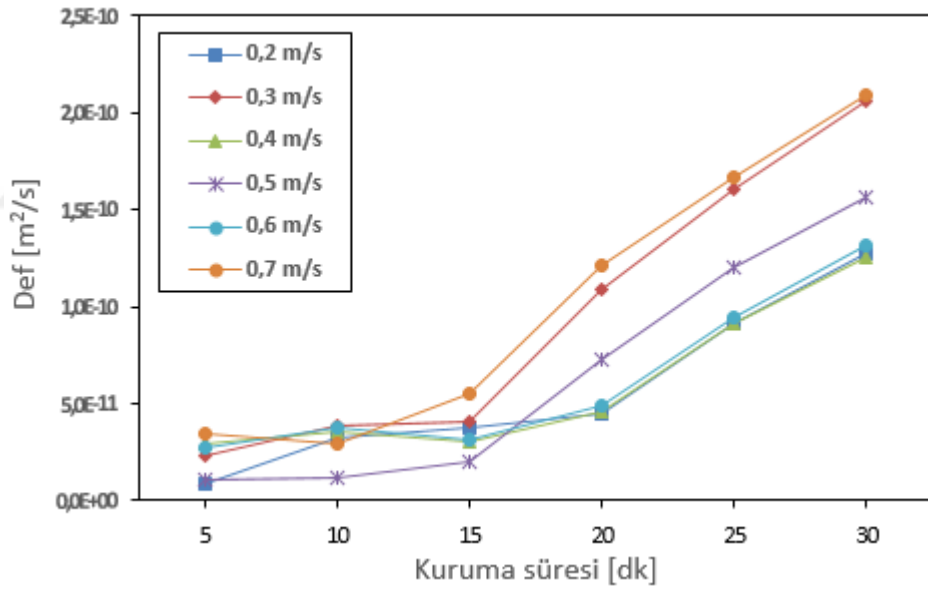
### 5.3.5 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması ve Değerlendirilmesi

Şekil 5.21 (a) ve (b) grafiklerinde  $V_3=0,4$  m/s ve  $T_3=50$  °C şartlarında zamana bağlı Difüzyon katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça 10. dakikadan sonra Difüzyon katsayısı lineer olarak artmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_5=70$  °C' de en düşük değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $T_1=30$  °C'de en yüksek değeri almaktadır. Difüzyon katsayısı zaman ilerledikçe artarak yani kurutma süresinin sonunda bütün sıcaklıklarda en yüksek değere ulaşmaktadırlar. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. (a) grafiğindeki bütün şartlar incelendiğinde en yüksek Difüzyon katsayısı 30.dakikada  $T_5=70$  °C kurutma sıcaklığında  $3,85 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. Bu değer, en yüksek nem alma olayının en yüksek difüzyon katsayısında gerçekleştiğini göstermektedir.

Difüzyon katsayısı kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $V_6=0,7$  m/s'de en yüksek değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $V_1=0,2$  m/s'de en düşük değeri almaktadır. Difüzyon katsayısı zaman ilerledikçe artarak yani kurutma süresinin sonunda bütün hızlarda en yüksek değerlere lineer olarak ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. (b) grafiğindeki bütün şartlar incelendiğinde en yüksek Difüzyon katsayısı 30. dakikada  $V_6=0,7$  m/s kuruma hızında  $2,09 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. Bu değer en iyi kurumunun en yüksek difüzyon katsayısında gerçekleştiğini göstermektedir.



(a)



(b)

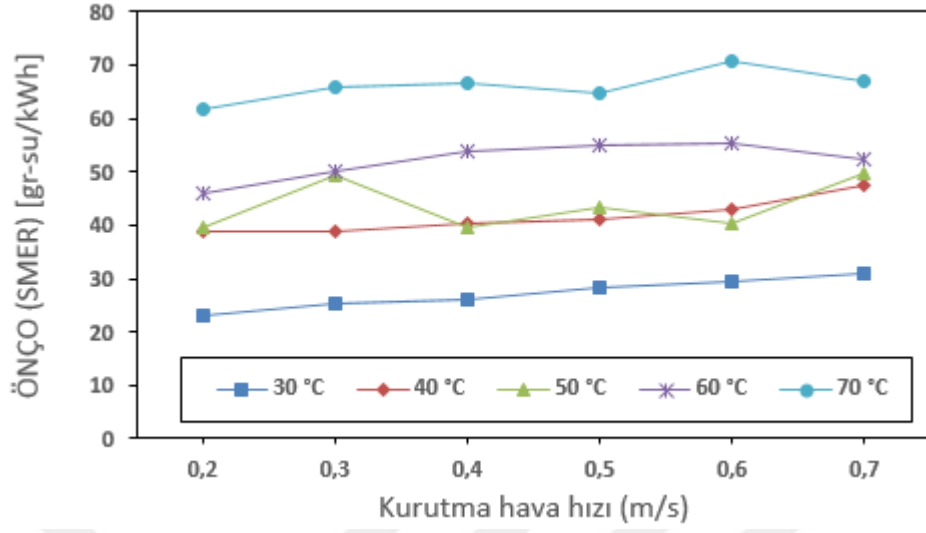
Şekil 5.21. Difüzyon katsayısının Kuruma Süresi İle Değişimi [(a)- $V_3=0,4$  m/s; (b)- $T_3=50$  °C]

### 5.3.6 Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Sıcaklığına ve Hızlara Göre Değerlendirilmesi

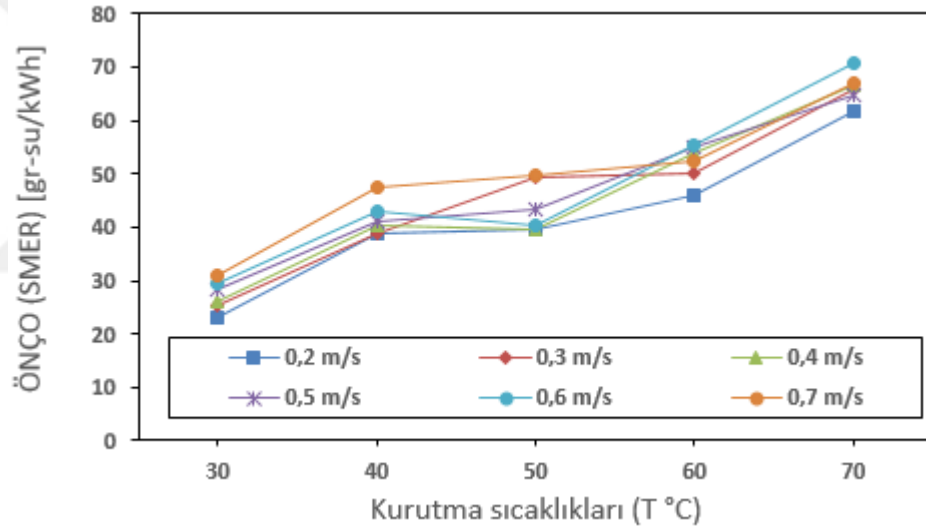
Şekil 5.22 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak kurutma havası hızına göre ÖNÇO (SMER) değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin özgül nem çekme oranı değerleri (ÖNÇO&SMER); hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, yaklaşık olarak yatay seyir izlemekte ve kuruma hızı arttıkça doğrusal olarak ÖNÇO (SMER) değerlerinde küçük artışlar izlenmektedir. Bütün sıcaklık şartlarında ÖNÇO (SMER) değerleri  $T_5=0,7$  m/s sıcaklık şartında  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 61,65 gr-su/kWh değerini alırken  $V_6=0,7$  m/s hızında ise yaklaşık 66,86 değerine yükselmektedir. Bu durumda kurutma işleminde  $V_6=0,7$  m/s hızında sistemden kWh başına daha fazla nem çekilmekte ve ürün üzerinden daha fazla su miktarı buharlaştırılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarının bağlı olarak kurutma havası sıcaklıklarına göre ÖNÇO (SMER) değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin özgül nem çekme oranı değerleri (ÖNÇO&SMER), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak doğrusal artış göstermekte ve  $T_5=70$  °C sıcaklığından bütün hızlarda maksimum değerlere ulaşmaktadırlar. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça kurutma sıcaklık şartlarında kabinin özgül nem çekme oranı değeri de kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında ÖNÇO (SMER) değeri 31,00 iken  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 22,95 değerini almaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_5=0,6$  m/s hızında yaklaşık olarak bu değer 70,76 olurken  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 61,65 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı bütün hızlara ait ÖNÇO (SMER) değerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma havası hızlarındaki artışta, kurutma kabininin özgül nem çekme oranını arttırmakta ve bu nedenle de kurutulmakta olan üründen kW başına daha yüksek miktarda nem çekme işlemi gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.22. Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

### 5.3.7 Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kabin tipli kurutma sisteminde kayısının kurutulması ile ilgili enerji ve ekserji analizleri yapılmış; bütün kurutma süreci sonunda yani 30. dakikada kurutma sıcaklıklarına ve kurutma hızlarına bağlı olarak hesaplanan  $COP_{SM}$ ,  $COP_{Ex,SM}$ ,  $EX_{sg,yo}$ ,  $COP_{IP}$ ,  $COP_{Ex,IP}$ ,  $EX_{is,yo}$ ,  $COP_{kk}$ ,  $COP_{Ex,kk}$ ,  $EX_{kk,yo}$ , değerleri Tablo 5.3’de verilmiş, bu değerlere ait grafiklerde Şekil 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30 ve 5.31’de gösterilmiştir. Kayısı için kurutma işlemi çevrimi Şekil 3.2’de görüldüğü gibi devam etmektedir. Bu proses şeması esas alınarak enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

**Tablo 5.4.** Kurutma Modellerine Göre Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları

KAYISI	MODELLER	NEWTON	PAGE	H.PAPIS	LOGARİTMİK	İKİ TERİMLİ	VERMA	MİDİLLİ
	K.ŞARTI	$V_2=0,3 \text{ m/s}$	$V_1=0,2 \text{ m/s}$	$V_1=0,2 \text{ m/s}$	$V_6=0,7 \text{ m/s}$	$V_5=0,6 \text{ m/s}$	$V_3=0,4 \text{ m/s}$	$V_4=0,5 \text{ m/s}$
	PROSES	$T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_4 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_4 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_3 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_3 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
ISITMA BÖLÜMÜ	$Q_{s,g}$	0,176918	0,398015	0,135164	1,652430	0,334323	0,685288	0,831891
	$EX_{is,g}$	0,003258	0,029480	0,002200	0,106844	0,006431	0,035782	0,044455
	$EX_{is,yo}$	0,007703	0,035357	0,000580	0,106145	0,010962	0,038371	0,036679
	$COP_{IP}$	0,209371	0,471024	0,159957	1,955539	0,395648	0,810992	0,984486
	$COP_{Ex,IP}$	0,003856	0,034888	0,002603	0,126443	0,007611	0,042346	0,052610
KURUTMA KABINI BÖLÜMÜ	$Q_{kk,g}$	6,270800	4,192189	4,195418	14,457757	12,427013	8,254378	10,376449
	$EX_{kk,g}$	0,233011	0,132511	0,001341	0,479952	0,418286	0,210126	0,322783
	$Q_{kk,ik}$	0,012564	0,184230	0,000992	1,023233	0,043636	0,225043	0,229688
	$EX_{kk,ik}$	0,000380	0,019625	0,000029	0,111914	0,001342	0,019108	0,019239
	$EX_{kk,yo}$	0,062454	0,299629	0,003011	1,191490	0,117417	0,355132	0,428658
	$COP_{kk}$	7,421065	4,961171	4,964992	17,109772	14,706524	9,768495	12,279822
	$COP_{Ex,kk}$	0,224620	0,528476	0,146295	1,871341	0,452209	0,829415	1,028596
SOĞUTMA BÖLÜMÜ	$Q_{sg,\zeta}$	0,203051	0,593329	0,148534	2,668382	0,392890	0,919855	1,072860
	$EX_{sg,\zeta}$	0,003171	0,035042	0,001876	0,140269	0,006654	0,040065	0,046730
	$EX_{sg,yo}$	0,009461	0,009752	0,002235	0,078355	0,015799	0,018797	0,030229
	$COP_{SM}$	0,240297	0,702165	0,175780	3,157849	0,464958	1,088586	1,269657
	$COP_{Ex,SM}$	0,003752	0,041470	0,002220	0,165998	0,007874	0,047415	0,055302

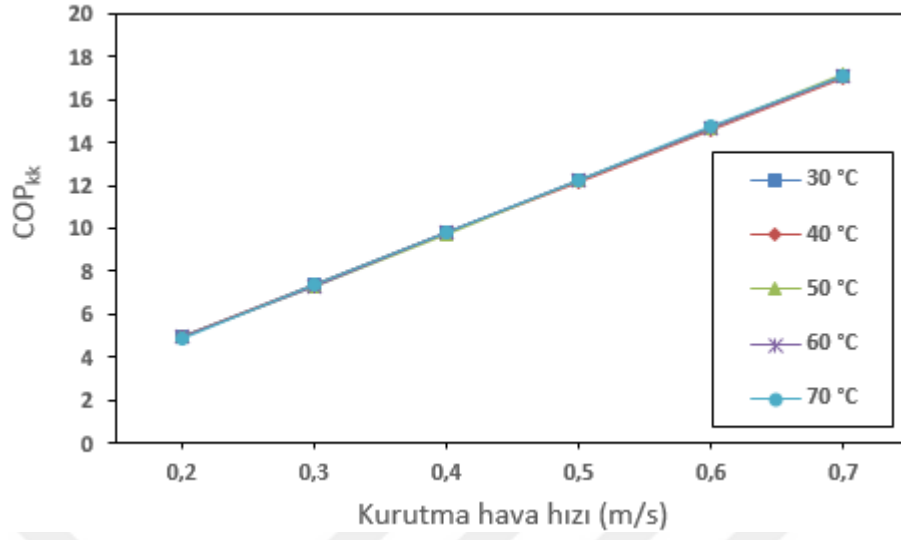


### 5.3.7.1 Kurutma Kabini İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

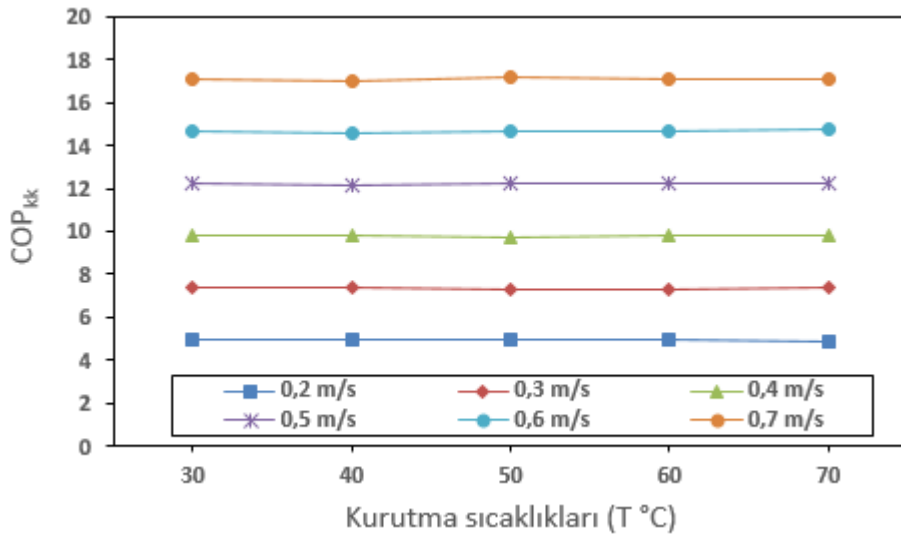
Şekil 5.23 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{kk}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{kk}$ ), hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, aynı değeri almakta ve kuruma hızı arttıkça lineer olarak  $COP_{kk}$  değerleride artmaktadır. Bütün sıcaklık şartlarında  $COP_{kk}$  değeri  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 5,0 değerlerini alırken  $V_6=0,7$  m/s hızında ise yaklaşık 17,0 değerlerine yükselmektedir. Bu durumda kurutma işlemin de  $V_6=0,7$  m/s hızında kurutma havasına daha fazla ısı yüklenmekte ve ürün üzerinden daha fazla su miktarının buharlaştırılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre, kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{kk}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{kk}$ ), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak çok az değişmekte ve yaklaşık yatay bir seyir izlemektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça kabinin etkinlik katsayısı değeride kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{kk}$  değeri 17,09 iken  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 4,96 değerini almaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak bu değer 17.11 olurken  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 4.90 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı  $COP_{kk}$  değerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artmasına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artış, kurutma kabininin etkinlik katsayısını artırmakta ve bu nedenle de daha iyi kurutma gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

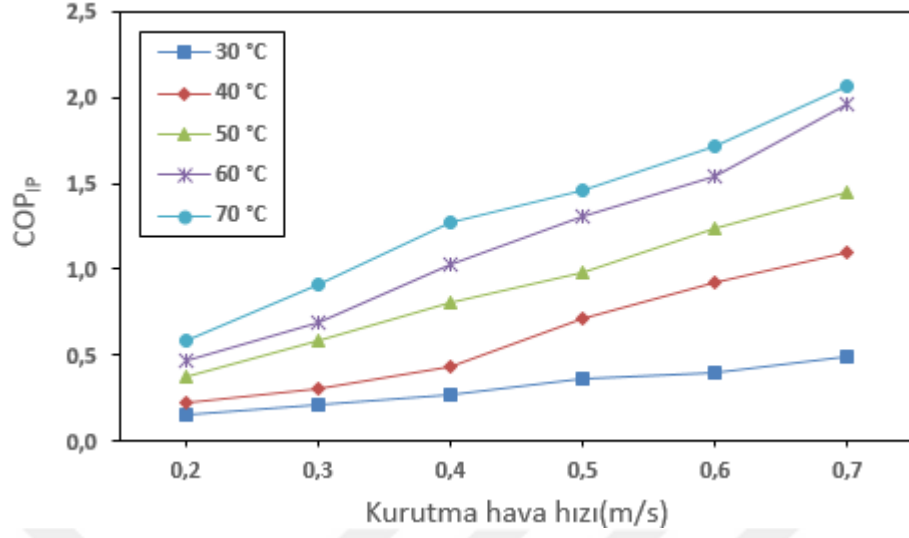
**Şekil 5.23.** Isıtma Bölümü İçin COP<sub>kk</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

### 5.3.7.2 Isıtma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

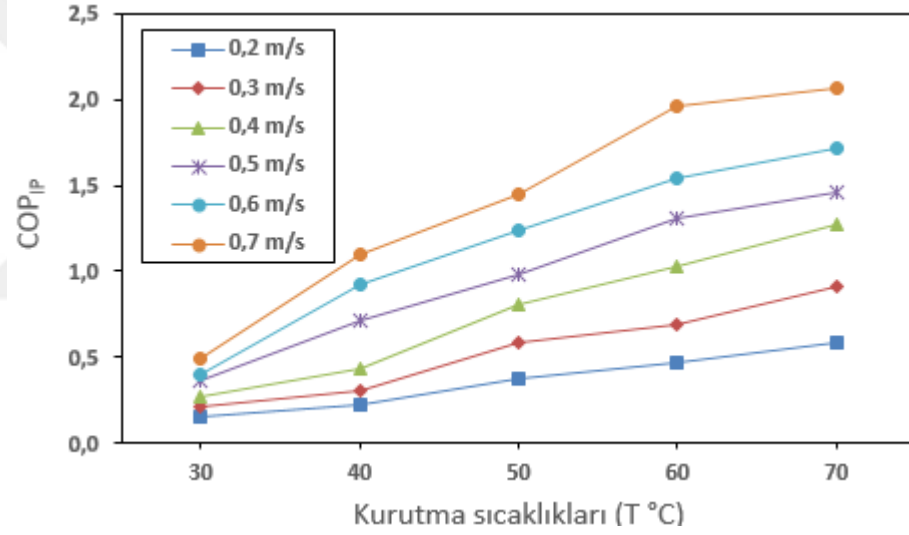
Şekil 5.24 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{IP}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{IP}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, yaklaşık doğrusal artmaktadır.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki kurutma işleminde ise  $COP_{IP}$  değeri,  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0.159 iken  $V_6$  hızında da 0,488 değerini almaktadır. En yüksek  $COP_{IP}$  değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 2.061 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere en hızlı kuruma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızında olmaktadır. Sonuç olarak kuruma işlemi için ısıtma bölümüne en fazla ısının bu şartlarda verildiği anlaşılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{IP}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{IP}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli olarak artmakta ve aynı anda kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak yaklaşık lineer bir artış izlenmektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça ısıtma bölümünün etkinlik katsayısı değeri de kademeli olarak artmaktadır.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{IP}$  değeri 0,1599 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{IP}$  değeri yaklaşık 2,06 olup, en yüksek değere ulaşmıştır. Şekil 5.24 (b) grafiğinde kurutma hızlarına bağlı olarak sıcaklık arttıkça ısıtma bölümü için  $COP_{IP}$  değerlerindeki kademeli artışın görüldüğü aşikârdır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı,  $COP_{IP}$  değerinin de yüksek değerlere ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma havası hızlarındaki artışta, ısıtma bölümünün etkinlik katsayısını artırmakta ve bu durum da daha iyi bir kurutmanın gerçekleşmesine yol açmaktadır.



(a)



(b)

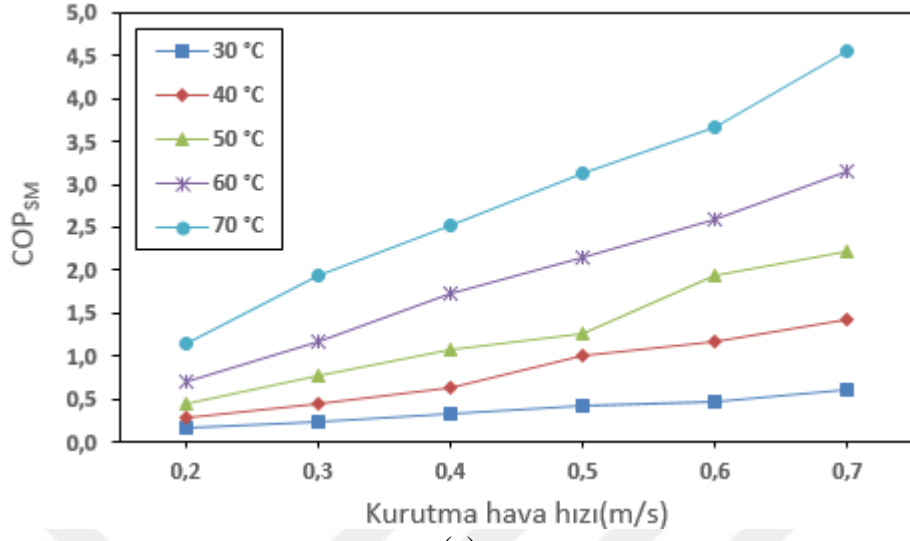
**Şekil 5.24.** Isıtma Bölümü İçin COP<sub>IP</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

### 5.3.7.3 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

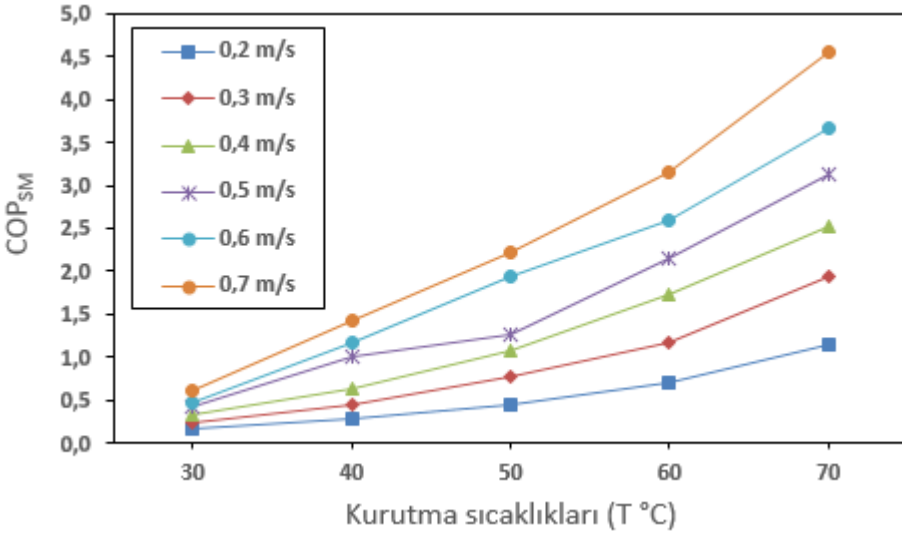
Şekil 5.25 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{SM}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{SM}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kurutma havası hızı arttıkça  $COP_{SM}$  değerlerinde de artış gözlenmektedir.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki soğutma işleminde ise  $COP_{SM}$  değerleride  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0.175 iken;  $V_6=0,7$  m/s hızında da 0,604 değerini almaktadır. En yüksek  $COP_{SM}$  değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 4,543 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere en verimli soğutma ve nem alma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartta gerçekleşen soğutma işleminde sistemden en fazla ısı çekildiği ve nem alındığı anlaşılmaktadır. Bu olay da kurutma havasının nem alma kabiliyetini artırmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre, kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{SM}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{SM}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve yaklaşık lineer bir artış izlemektedir. Bununla birlikte kurutma havası hızı arttıkça, soğutma bölümünün etkinlik katsayısı değeri de kademeli olarak artmaktadır.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{SM}$  değeri 0,175 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{SM}$  değeri 4,543 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu grafikte, kurutma hızlarına bağlı olarak kurutma sıcaklığı arttıkça soğutma bölümü için  $COP_{SM}$  değerlerinde kademeli artış görülmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir soğutmanın gerçekleştiğinden dolayı,  $COP_{SM}$  değerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artışla birlikte, soğutma bölümünün etkinlik katsayısı artmakta ve bu nedenle de daha iyi bir soğutma ve nem alma işlemi gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

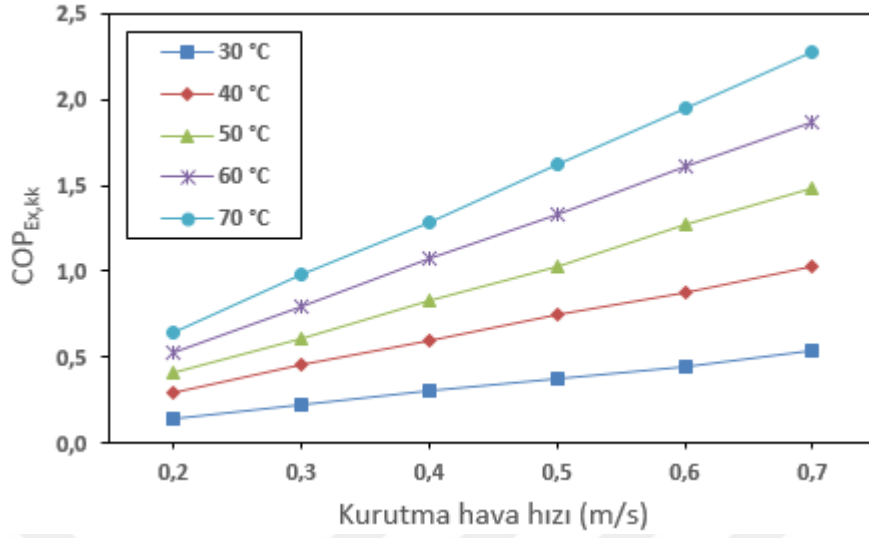
Şekil 5.25. Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin COP<sub>SM</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

#### 5.3.7.4 Kurutma Kabini İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

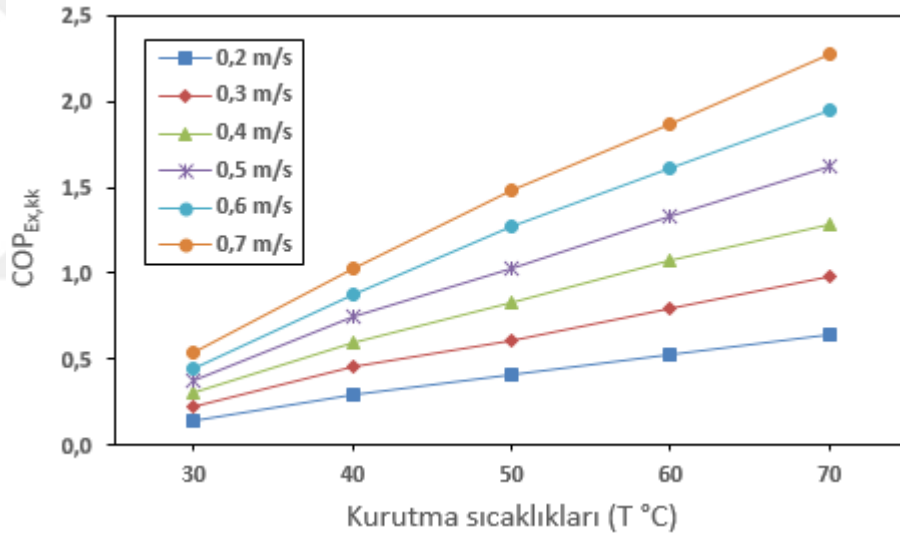
Şekil 5.26 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,kk}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,kk}$ ), hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, lineer olarak artmaktadır. En yüksek  $COP_{Ex,kk}$  değeri  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızında 2,275 değerini alırken, en düşük  $COP_{Ex,kk}$  değeri de  $V_1=0,2$  m/s kuruma hızı ve  $T_1=30$  °C kurutma sıcaklığında yaklaşık olarak 0,146 değerinde olmaktadır.  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızındaki kurutma işleminde sisteme en fazla ısı yüklenmekte ve sonuçta ürün üzerinden daha fazla su miktarı buharlaştırılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,kk}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,kk}$ ), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli olarak artmakta ve doğrusal bir artış izlenmektedir. Aynı şekilde kuruma hızı arttıkça kabinin etkinlik katsayısı değerinde de kademeli artış görülmektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{Ex,kk}$  değeri 0,533 iken  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 0,146 değerini almaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak bu değer 2,275 olurken; aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 0,641 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı  $COP_{Ex,kk}$  değerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma havası hızlarındaki artışta, kurutma kabininin ekserji etkinlik katsayısını artırmakta ve sonuç olarak da daha iyi kurutma gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 5.26.** Kurutma Kabini Bölümü İçin COP<sub>Ex,kk</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

Şekil 5.27 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $Ex_{kk,yo}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin ekserji yokoluşu değerleri ( $Ex_{kk,yo}$ ), hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, lineer bir şekilde artmaktadır. En yüksek  $Ex_{kk,yo}$  değeri  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızında 2,05 değerini alırken, en düşük  $Ex_{kk,yo}$  değeri de  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızı ve



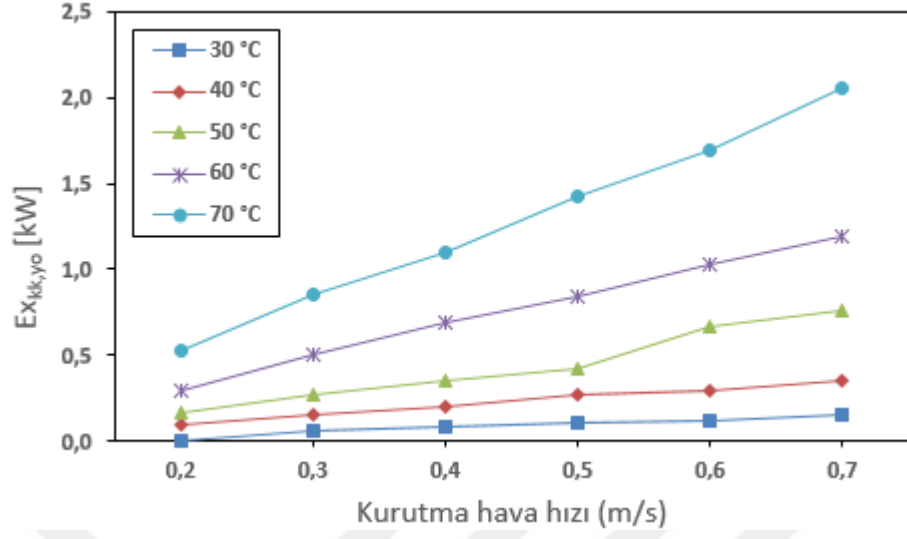
$T_1=30$  °C kurutma sıcaklığında yaklaşık olarak 0,003 değerinde olmaktadır. Bu durum göstermektedir ki;  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızı şartlarında kurutma kabininde ekserji yok oluşu en fazla olmaktadır.

Ekserji yokoluşu kurutma havası hızlarında bağlı olarak, lineer bir şekilde kademeli artmakta ve kurutma havası hızının artışı ile birlikte, ekserji yokoluşu da doğrusal olarak maksimum değerine ulaşmaktadır. En yüksek  $EX_{kk,yo}$  değeri  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızında 2,05 değerini alırken; en düşük  $EX_{kk,yo}$  değeri de  $V_1=0,2$  m/s kuruma hızı ve  $T_1=30$  °C kurutma sıcaklığında yaklaşık olarak 0,003 değerini almaktadır.  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızı şartlarındaki kurutma işleminde sisteme en fazla ısı yüklenmekte ve sistemin iyi yalıtılmaması nedeniyle de ekserji yok oluşu en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu durumun sonucunda sistemin verimi ters yönde etkilenmekte ve sistemin kurutma performansı azalmaktadır.

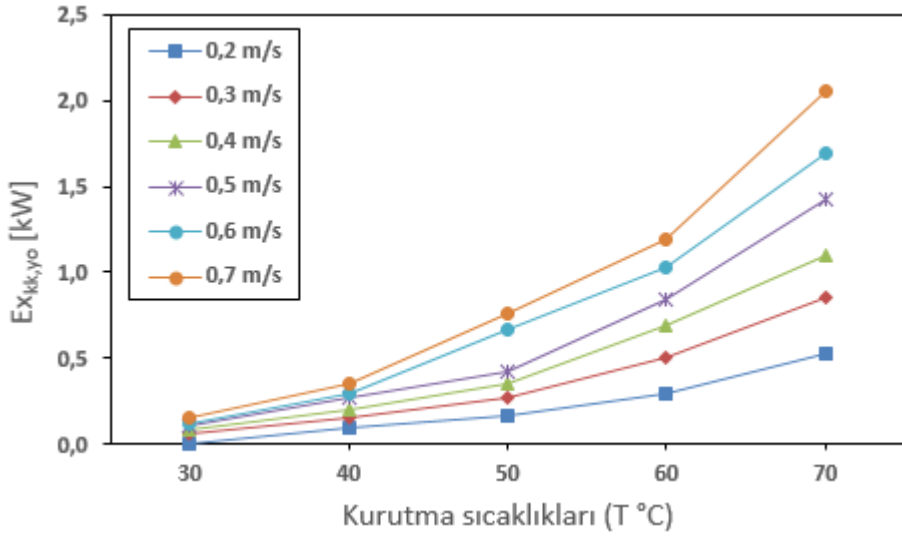
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $EX_{kk,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin ekserji yokoluş değerleri ( $EX_{kk,yo}$ ), bütün kuruma hızı şartlarında parabolik olarak artış göstermektedir. Herbir kuruma hızı şartında kurutma havası sıcaklıklarının artışı ile birlikte ekserji yok oluşunda kademeli artış gözlenmektedir. Aynı şekilde kuruma hızı arttıkça kabinin ekserji yok oluşu değerlerinde de kademeli artış görülmektedir.

$T_1$  sıcaklığında;  $V_6$  hızında  $EX_{kk,yo}$  değeri 0,15 iken  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 0,003 ile en düşük değere ulaşmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise  $V_6=0,6$  m/s hızında yaklaşık olarak en yüksek değer 2,05 olurken; aynı sıcaklık şartında  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 0,524 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir kuruma gerçekleşirken, aynı zamanda da en yüksek  $EX_{kk,yo}$  değerine ulaşılır ki; ekserji yok oluş değeri en yüksek değere ulaşması istenmeyen bir sonuçtur.

Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma havası hızlarındaki artış; kurutma kabininin ekserji yok oluşunu artırmakta ve bu nedenle de en yüksek ekserji kaybı ortaya çıkmaktadır.



(a)



(b)

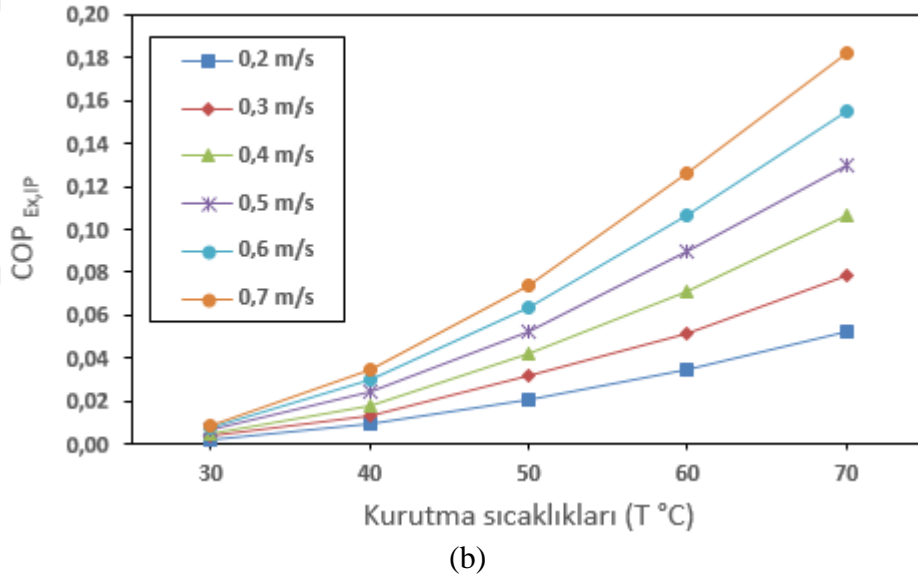
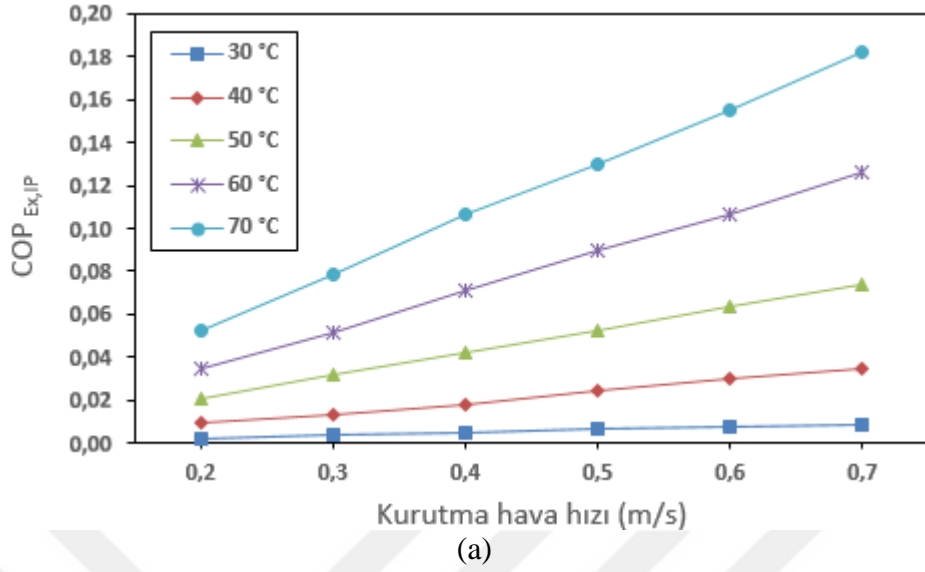
Şekil 5.27. Kurutma Kabini Bölümü İçin  $Ex_{kk,yo}$  İle Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

### 5.3.7.5 Isıtma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.28 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,IP}$  değerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,IP}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmaktadır. En yüksek  $COP_{Ex,IP}$  değeri ise  $V_6=0,6$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,182 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere en hızlı kuruma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartta gerçekleşen kuruma işleminde sisteme en fazla ısı verildiği ve ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısının en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,IP}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,IP}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde değişmekte ve yaklaşık parabolik bir artış izlemektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı değeride kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{Ex,IP}$  değeri 0,0026 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{Ex,IP}$  değeri 0,182 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Şekil 5.28 (b)' den anlaşılacağı üzere; kurutma hızlarına bağlı olarak sıcaklık arttıkça ısıtma bölümü için  $COP_{Ex,IP}$  değerlerindeki kademeli artış görülmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutma gerçekleşmekte ve bunun sonucunda  $COP_{Ex,IP}$  değerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artış ile birlikte, ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı artmakta ve sonuç olarak daha iyi bir kurutma işlemi gerçekleşmektedir.

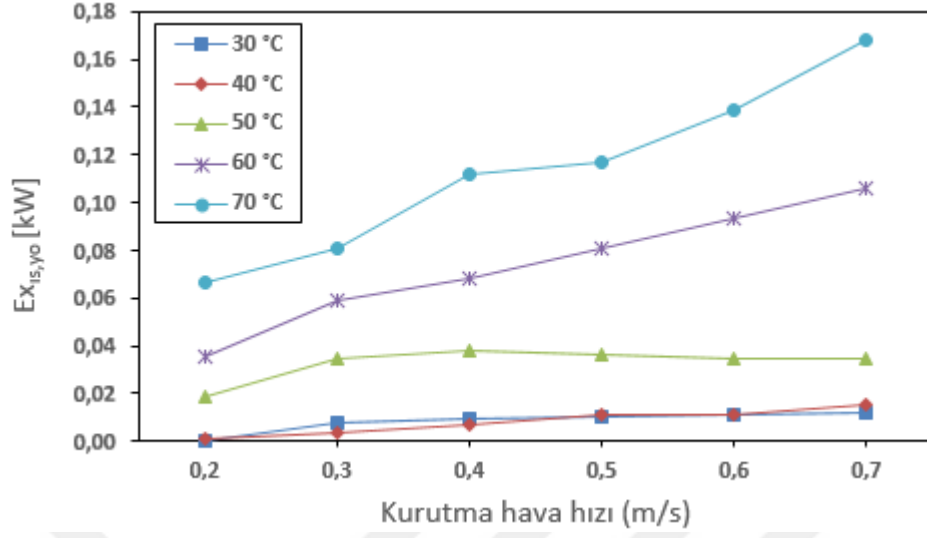


Şekil 5.28. Isıtma Bölümü İçin COP<sub>Ex,IP</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

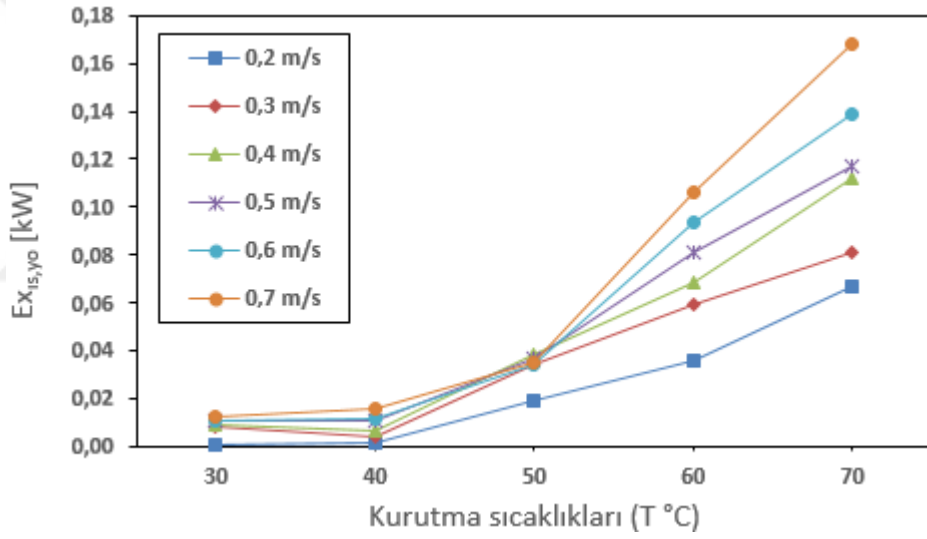
Şekil 5.29 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $Ex_{is,yo}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{is,yo}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarının artışına bağlı olarak kademeli bir şekilde artmaktadır. En yüksek ekserji yok oluşu ( $Ex_{is,yo}$ ) değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,168 olarak belirlenmektedir.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $Ex_{is,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{is,yo}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve yaklaşık parabolik bir seyir izlenmektedir. Bununla birlikte kuruma hızının artışıyla birlikte ısıtma bölümünün ekserji yokoluşu değeri de kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında  $Ex_{is,yo}$  değeri 0,01185 iken, aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 0,00058 ile en düşük değere ulaşmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak en yüksek değer olarak 0,16835' e ulaşırken; aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 0,06651 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir kuruma gerçekleşirken, aynı zamanda bu işlem sonucunda en yüksek  $Ex_{is,yo}$  değerine ulaşılır.



(a)



(b)

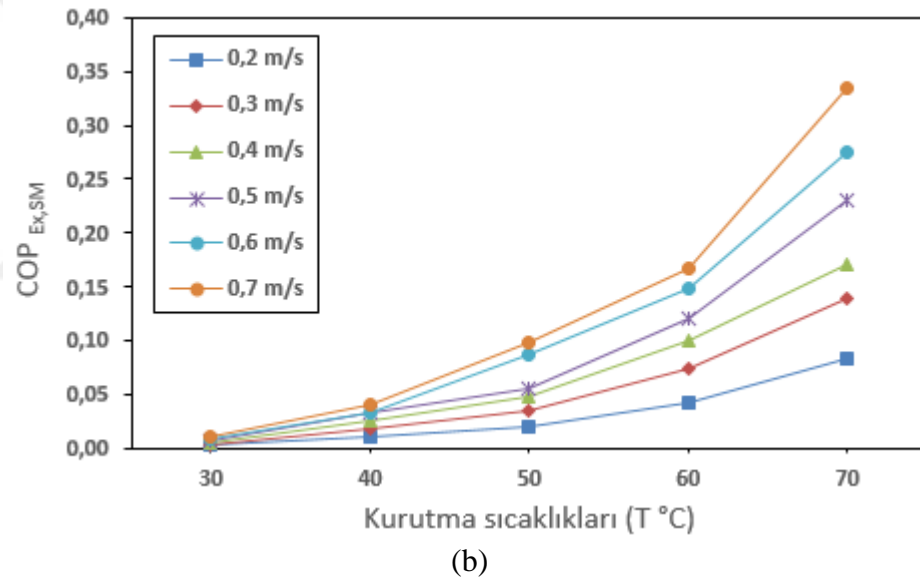
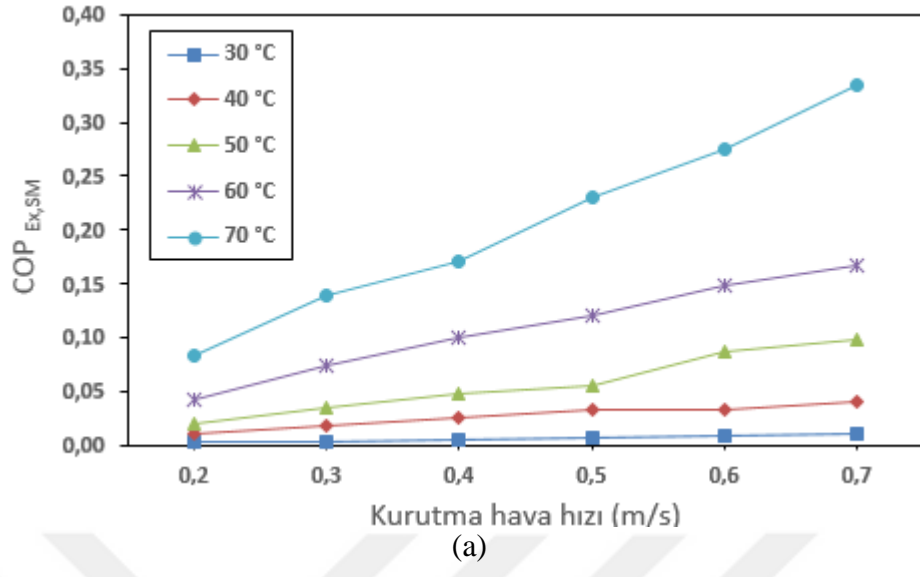
Şekil 5.29. Isıtma Bölümü İçin  $Ex_{is,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

### 5.3.7.6 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.30 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,SM}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,SM}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kuruma hızı arttıkça maksimum değerine ulaşmaktadır.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki soğutma işleminde ise  $COP_{Ex,SM}$  değeri;  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0,0022 iken, aynı sıcaklıkta  $V_6=0,7$  m/s hızında da 0,010 değerini almaktadır. En yüksek  $COP_{Ex,SM}$  değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,335 olarak elde edilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, en verimli soğutma ve nem alma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartlarda gerçekleşen soğutma işleminde sistemden en fazla ısı çekildiği ve nem alındığı anlaşılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,SM}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,SM}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve parabolik bir seyir izlenmektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça, soğutma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı değeride kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{Ex,SM}$  değeri 0,0022 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{Ex,SM}$  değeri 0,335 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Grafiklerde kurutma hızlarına bağlı olarak kurutma sıcaklığı arttıkça soğutma bölümü için  $COP_{Ex,SM}$  değerlerinde de kademeli artış gözlenmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir soğutma işlemi gerçekleşmekte, dolayısı ile  $COP_{Ex,SM}$  değerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak, kurutma hızlarındaki artış ile birlikte, soğutma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı artmakta ve bu nedenle de daha iyi bir soğutma ve nem alma işlemi gerçekleşmektedir.



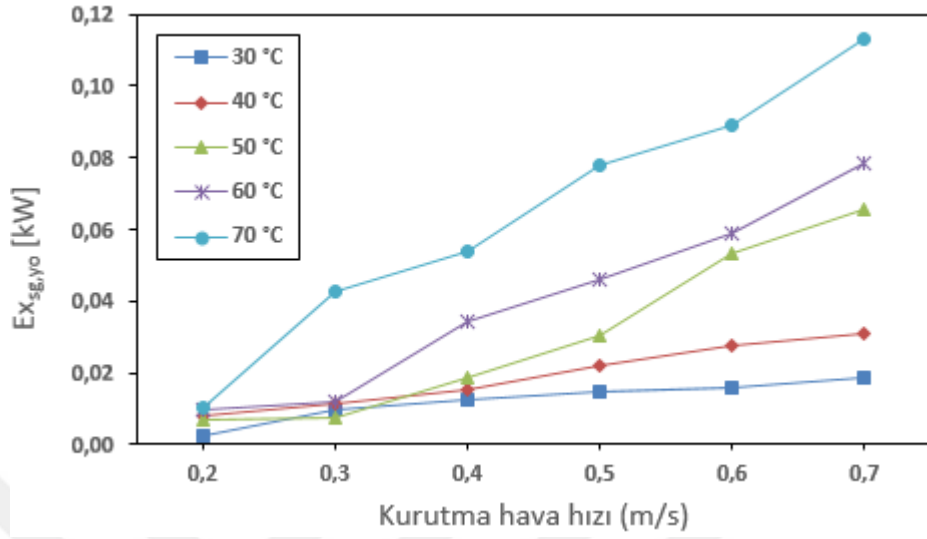
Şekil 5.30. Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $COP_{Ex,SM}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği



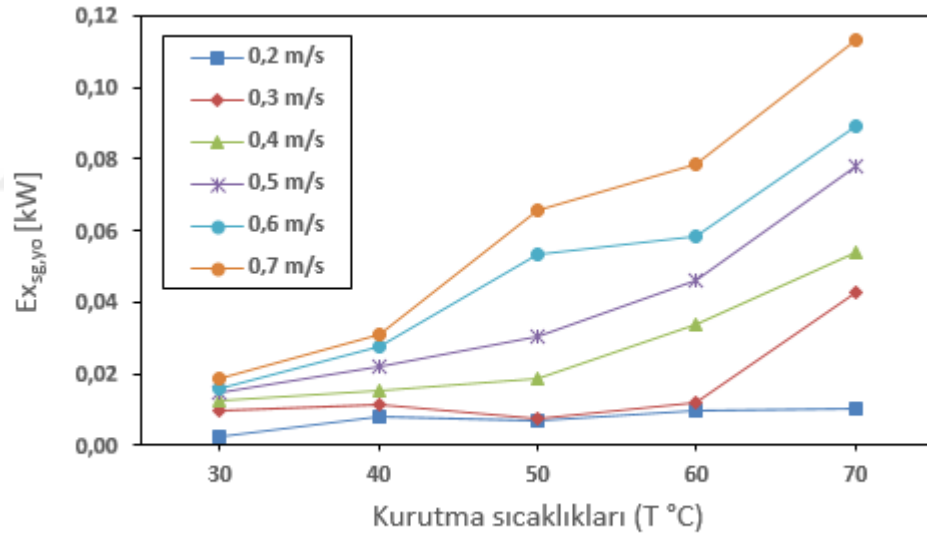
Şekil 5.31 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $Ex_{sg,yo}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere; soğutma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli olarak artmakta ve kuruma hızı arttıkça da  $Ex_{sg,yo}$  değerlerinde de kademeli artış gözlemlenmektedir. En yüksek ekserji yok oluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ) değeri ise  $V_6=0,7$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,1128 olarak bulunmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $Ex_{sg,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve yaklaşık parabolik bir seyir izlenmektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça da soğutma bölümünün herbir sıcaklık şartında ekserji yokoluşu değerleri de kademeli artış göstermektedir.

$T_1$  sıcaklığında;  $V_6=0,6$  m/s hızında  $Ex_{sg,yo}$  değeri 0,01853 iken, aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 0,00224 ile en düşük değere ulaşmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise  $V_6=0,6$  m/s hızında yaklaşık olarak en yüksek değer 0,11288 olurken; aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 0,001036 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir soğutma ve nem alma gerçekleşirken,  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızında en yüksek  $Ex_{sg,yo}$  değerine ulaşır ki; ekserji yokoluşundaki bu artış da istenilmeyen bir durumu ortaya çıkarır.



(a)



(b)

**Şekil 5.31.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $Ex_{sg,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

## 5.4 Patates Kurutma Sonuçlarının Belirlenmesi

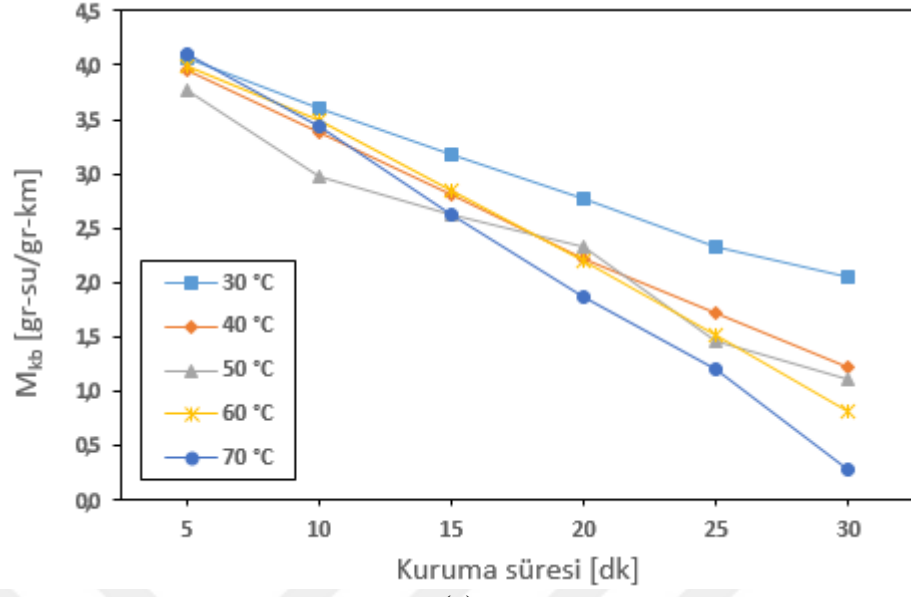
### 5.4.1 Ürün Nem İçeriğinin Zamana Göre Değişimi

Kurutma havası sıcaklığının ürünün nem içeriğine etkisi; patates için belirlenen en iyi kurutma ( $V_5=0,6$  m/s (a) ve  $T_2=40$  °C (b)) şartlarına göre Şekil 5.32’de zamana bağlı olarak verilmiştir.

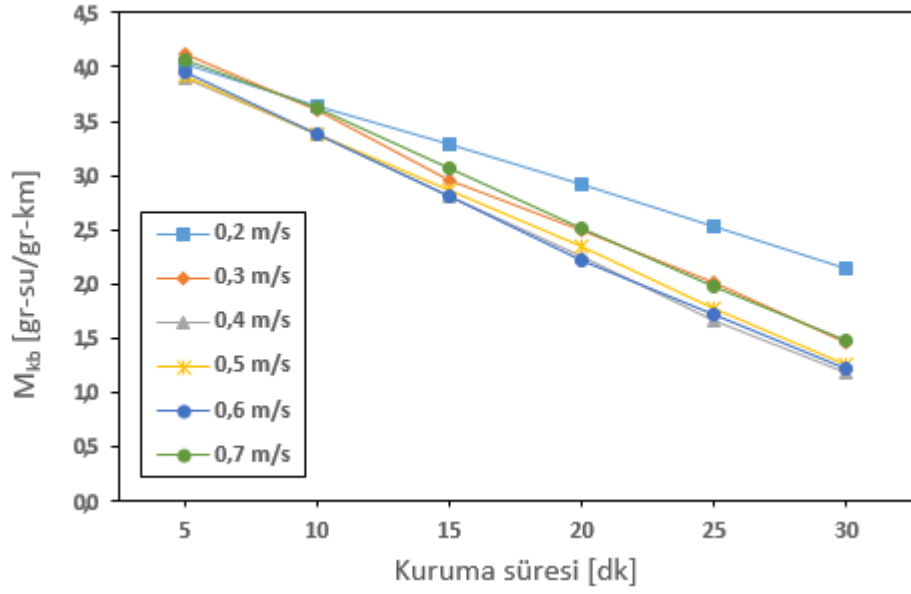
Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça nem içeriği azalmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde nem içeriği  $T_5=70$  °C’ de yüksek değerini alırken, kuruma süresinin sonundan yani 30. dakikada bu nem içeriği en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde yer alan diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlar da benzer davranış göstermektedir.

Sabit ürün kurutma havası hızında ( $V_5=0,6$  m/s) gerçekleşen kurutma işleminde; sıcaklığının artması ile grafik üzerinde nem içeriğinde sabit zamanlarda kademeli artış görülmektedir. Her bir sıcaklık değeri için elde edilen nem içeriği de zaman ilerledikçe azalmaktadır. Ürün nem içeriği, 5. dakikada  $T_5=70$  °C sıcaklığında, en yüksek değerde iken; ürün nem içeriği  $T_3 =50$  °C sıcaklığında, yine aynı dakikada sıcaklık şartları göz önünde bulundurulduğunda, en düşük değerdedir. Kurutma zamanı arttıkça ürün nem içeriği bütün sıcaklık şartlarında azalarak düşük seviyelere inmektedir. Grafiktende görülmektedir ki kurutma havası sıcaklığının artmasıyla ürünün kuruma işlemi daha hızlı olmaktadır.

Kuruma hızlarına göre karşılaştırma yapıldığında; kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $T_2=40$  °C sıcaklığında nem içeriği  $V_2=0,3$  m/s’de en yüksek değeri alırken; kuruma süresinin sonundan yani 30. dakikada  $V_3=0,4$  m/s’de en düşük değere ulaşmaktadır. Farklı hızlarda kurutma işlemine bakıldığında özgül nem içeriği hepsinde zamanla azalmaktadır. Bu grafik üzerinde yer alan bütün hız şartlarında özgül nem içeriği ile ilgili dağılımlar da benzer davranış göstermektedir.



(a)



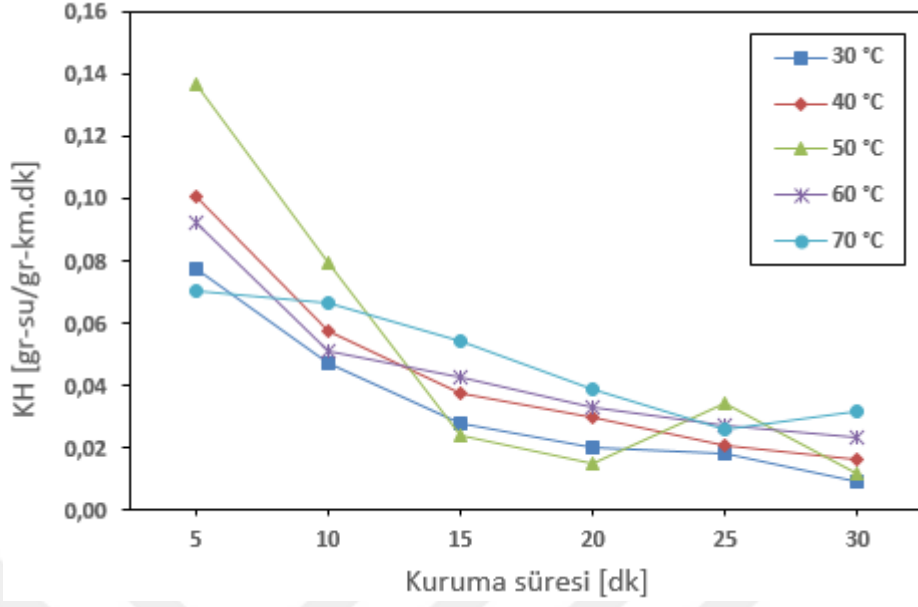
(b)

Şekil 5.32. Nem İçeriğinin Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_5=0,6$  m/s;(b)- $T_2=40^\circ\text{C}$ ]

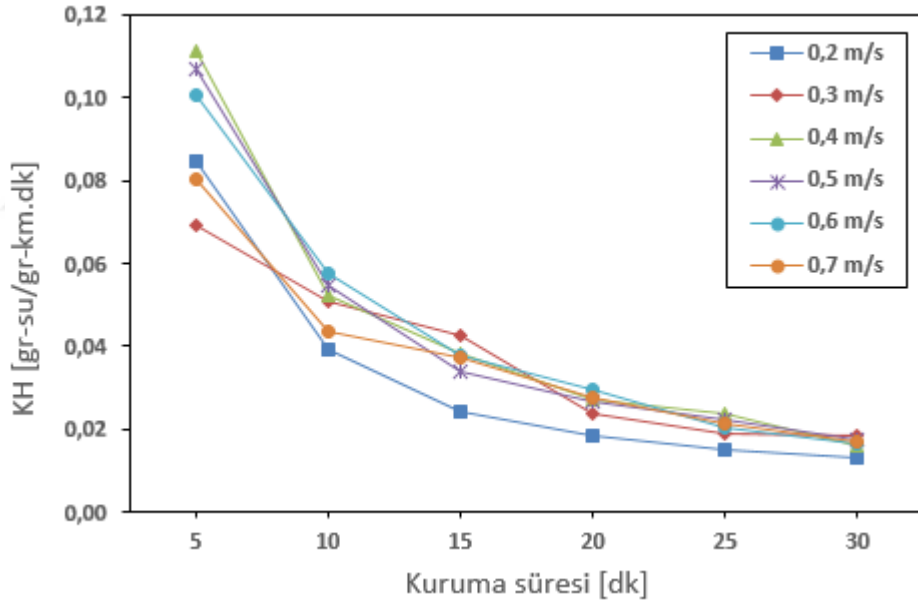
#### 5.4.2 Ürün Kuruma Hızının Zamana Göre Değişimi

Şekil 5.33'de Patates için  $V_5=0,6$  m/s (a) ve  $T_2=40$  °C (b) şartlarında zamana bağlı kuruma hızı değişimi verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça kuruma hızları azalmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_3=50$  °C' de en yüksek değeri almakta iken, kuruma süresinin sonundan yani bu sıcaklığın 30. dakikada en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. Bunun nedeni kurutma başlangıcında kurutma havasının bağıl neminin düşük olması, kurutma sonuna doğru ise kurutma havasının bağıl neminin artışıdır. Dolayısıyla bu durumda kurutma havasının içerisindeki bağıl nemin artması, ürün üzerinde bulunan nemin buharlaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kuruma süresinin sonundaki kurutma hızları da oldukça düşük çıkmaktadır.

Kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde kuruma hızı  $V_3=0,4$  m/s'de en yüksek değeri almakta iken kuruma süresinin sonundan yani 30. dakikada yine bu hız şartında kuruma hızı en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir. Bunun nedeni kurutma başlangıcında kurutma havasının bağıl neminin düşük olması, kurutma sonuna doğru ise kurutma havasının bağıl neminin artmasıdır. Kuruma başlangıcında; kurutma havası hızındaki artış, kurutulacak ürüne ısı transferini daha hızlı nüfuz ettirmekte ve dolayısıyla ürün üzerindeki nem daha hızlı uzaklaştırılmaktadır.



(a)



(b)

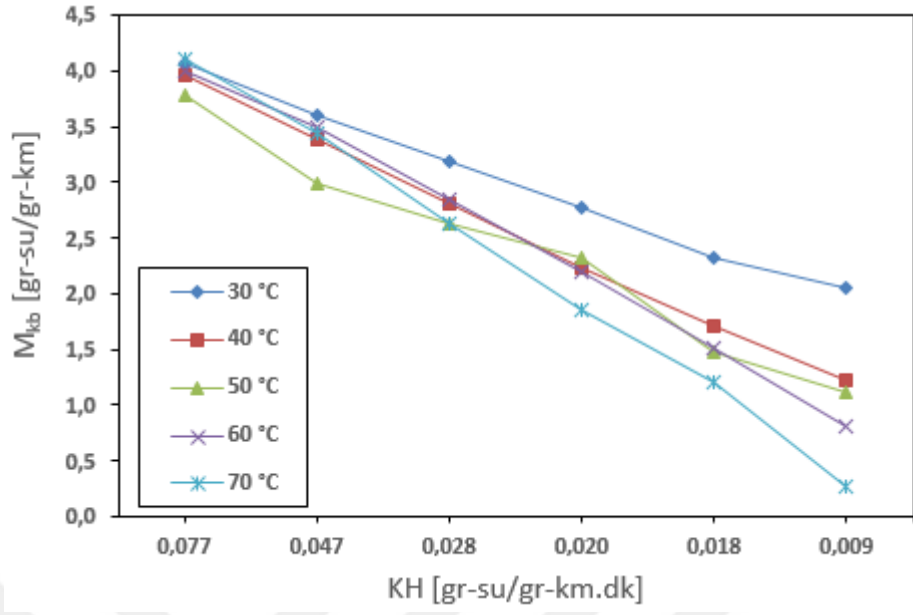
Şekil 5.33. Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_5=0,6$  m/s; (b)- $T_2=40$ °C]

### 5.4.3 Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği İle Değişimi

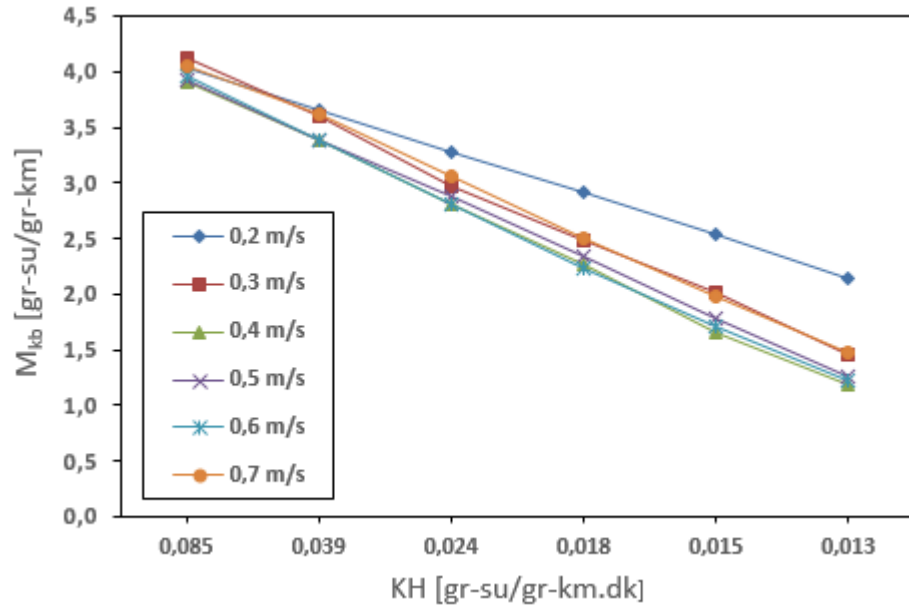
MATLAB Programında literatürde en çok kullanılan Modeller için yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen kuruma eğrilerinin  $R^2$  ve RMSE sonuçlarına göre Patates için Midilli ve Ark. Modelinin  $V_5=0,6$  m/s hızında en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle Ürün Kuruma Hızının Nem İçeriği İle Değişimi grafiği  $V_5=0,6$  m/s hızında çizilmiştir.

Denklem (3.1) ve (3.3) kullanılarak hesaplanan ürünün kuruma hızlarının nem içeriği ile değişimi, sıcaklıklara bağlı olarak Şekil 5.34'de verilmiştir. Bu sıcaklıklar  $T_1=30$  °C,  $T_2=40$  °C,  $T_3=50$  °C,  $T_4=60$  °C,  $T_5=70$  °C olarak seçilmiştir. Şekil 5.34 (a) ve (b)'de grafikler dikkatli bir şekilde incelendiğinde, kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi, grafiklerinden anlaşılacağı üzere, kuruma olayının azalan kuruma hızı evresinde gerçekleştiği ve bu süreçte sabit kuruma hızı görülmediği anlaşılmaktadır. Bu bulgu, daha önce yapılan araştırmalarla uyum göstermektedir [203, 91].

Kuruma işlemi azalan hız periyodunda gerçekleşmiştir. Kuruma hızı arttıkça ürün nem içeriği azalmaktadır. Aynı anda kurutma havası sıcaklığının artışı ile buna bağlı olarak da ürün nem içeriği azalmaktadır. Bunun nedeni ise kurutma esnasında yüksek kurutma havası sıcaklıkları ürüne olan ısı transferini ve bununla birlikte yüzey suyu buharlaşma hızının artmasını sağlayarak, nemin daha hızlı bir şekilde uzaklaşmasına yardımcı olmaktadır. Kurutma havasının sıcaklıklarının artışı ile de ürünün iç yüzeyine olan ısı transfer hızı artarak, yüzey nemi daha yüksek hızla buharlaşmaktadır. Böylece, elde edilen sonuçlara göre kurutma hava sıcaklıklarının artması ile kuruma sürelerinde azalma gözlemlenmektedir.



(a)



(b)

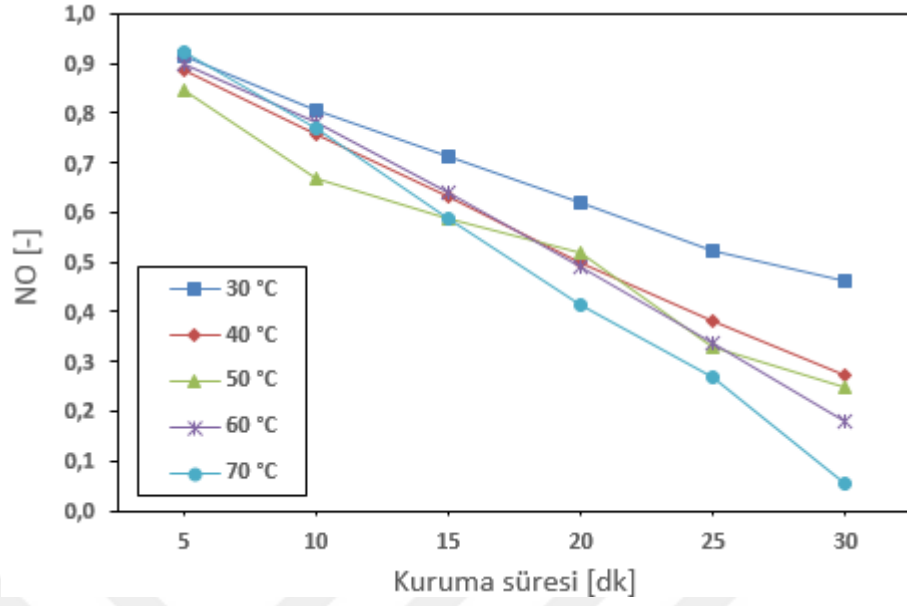
Şekil 5.34. Nem İçeriğinin Kuruma Hızı ile Değişimi [(a)- $V_5=0,6$  m/s; (b)- $T_2=40^\circ\text{C}$ ]



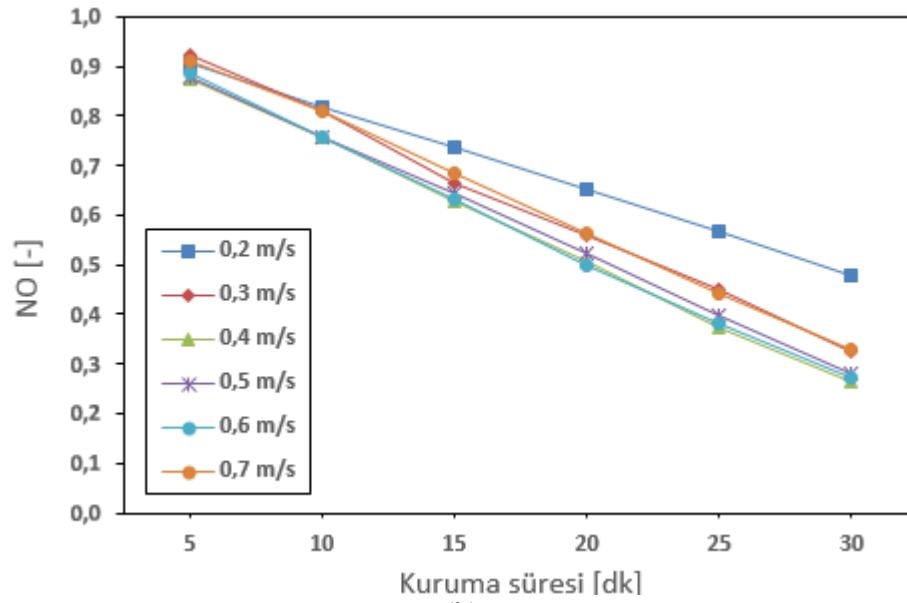
#### 5.4.4 Ürün Nem Oranının Zamana Göre Değişimi

Şekil 5.35 (a) ve (b) grafiklerinde  $V_5=0,6$  m/s ve  $T_2=40$  °C şartlarında zamana bağlı nem oranı grafikleri verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça nem oranında azalma görülmektedir. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_5=70$  °C' de en yüksek değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $T_3=50$  °C'de en düşük değeri almaktadır. Kuruma hızı zaman ilerledikçe azalarak, yani kurutma süresinin sonunda bütün sıcaklıklarda en düşük değere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlarda benzer davranış göstermektedir.

Kuruma hızı kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $V_2=0,3$  m/s'de en yüksek değeri almakta, buna mukabil aynı dakikada  $V_3=0,4$  m/s'de en düşük değeri almaktadır. Kuruma hızı zaman ilerledikçe azalarak, yani kurutma süresinin sonunda bütün hızlarda en düşük değerlere ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlar da benzer davranış göstermektedir.



(a)



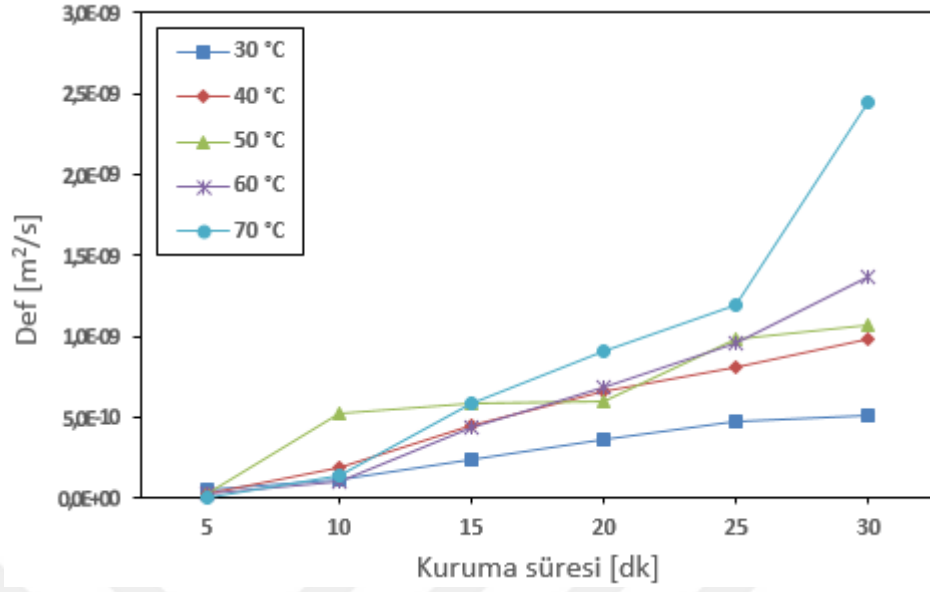
(b)

Şekil 5.35. Nem Oranının Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_s=0,6$  m/s; (b)- $T_2=40^\circ\text{C}$ ]

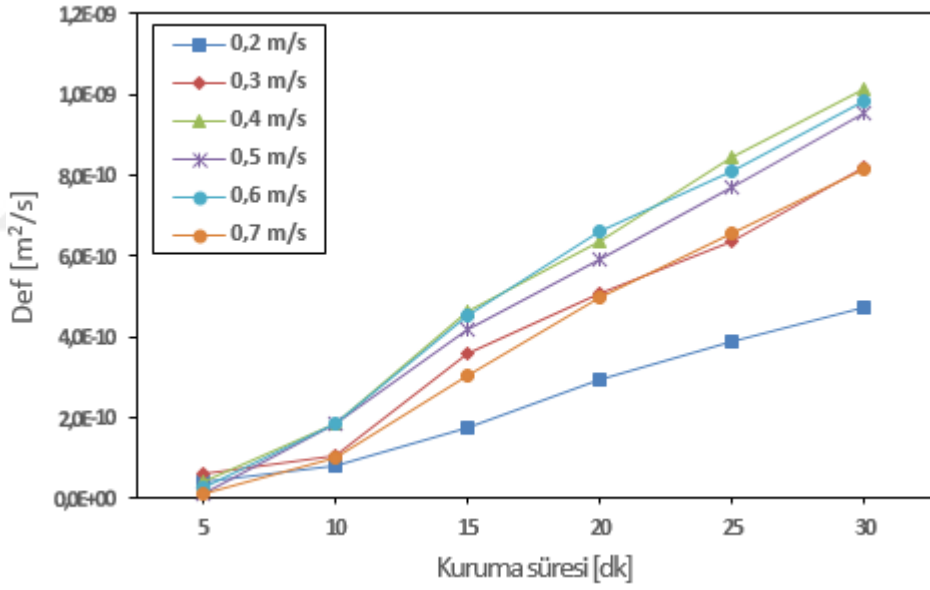
#### 5.4.5 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması ve Değerlendirilmesi

Şekil 5.36 (a) ve (b) grafiklerinde  $V_5=0,6$  m/s ve  $T_2=40$  °C şartlarında zamana bağlı Difüzyon katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere kuruma süresi arttıkça Difüzyon katsayısı yaklaşık lineer olarak artmaktadır. Kuruma süresinin 5. dakikasında (a) grafiğinde kuruma hızı  $T_5=70$  °C' de en düşük değeri almakta, buna mukabil aynı dakikada  $T_1=30$  °C'de en yüksek değeri almaktadır. Difüzyon katsayısı zaman ilerledikçe artarak yani kurutma süresinin sonunda bütün sıcaklıklarda en yüksek değerlere ulaşmaktadırlar. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası sıcaklıkları ile ilgili dağılımlar da benzer davranış göstermektedir. (a) grafiğindeki bütün şartlar incelendiğinde en yüksek Difüzyon katsayısı 30.dakikada  $T_5=70$  °C kurutma sıcaklığında  $2,45 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. Bu değer en yüksek nem alma olayının en yüksek difüzyon katsayısında gerçekleştiğini göstermektedir.

Difüzyon katsayısı kuruma süresinin 5. dakikasında (b) grafiğinde  $V_2=0,3$  m/s'de en yüksek değeri almakta buna mukabil aynı dakikada  $V_4=0,5$  m/s'de en düşük değeri almaktadır. Difüzyon katsayısı zaman ilerledikçe artarak yani kurutma süresinin sonunda bütün hızlarda en yüksek değerlere lineer olarak ulaşmaktadır. Bu grafik üzerinde diğer kurutma havası hızları ile ilgili dağılımlar da benzer davranış göstermektedir. (b) grafiğindeki bütün şartlar incelendiğinde; en yüksek Difüzyon katsayısı 30. dakikada  $V_3=0,4$  m/s kuruma hızında  $1,01 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. Bu değerden anlaşılmaktadır ki; en iyi kurutma en yüksek difüzyon katsayısında gerçekleşir.



(a)



(b)

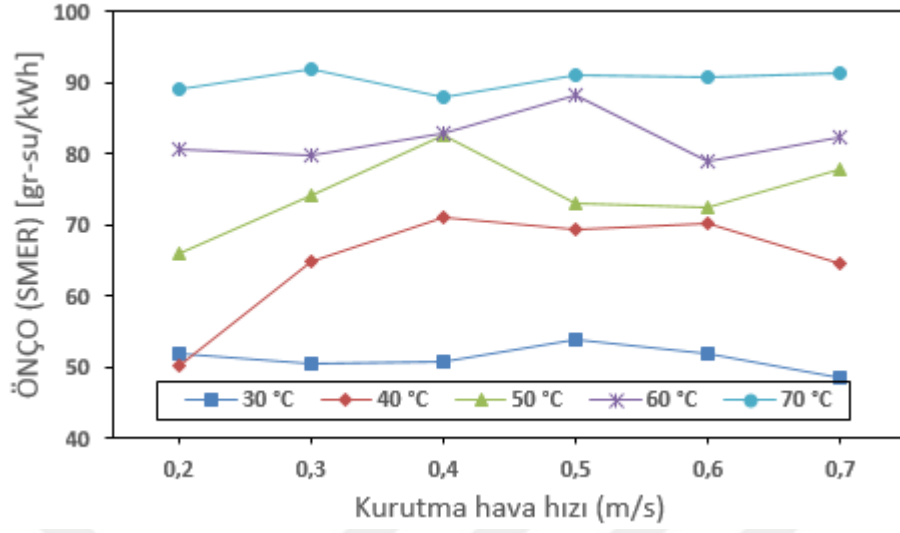
Şekil 5.36. Difüzyon katsayısının Kuruma Süresi ile Değişimi [(a)- $V_5=0,6$  m/s; (b)- $T_2=40$  °C]

#### 5.4.6 Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Sıcaklığına ve Hızlara Göre Değerlendirilmesi

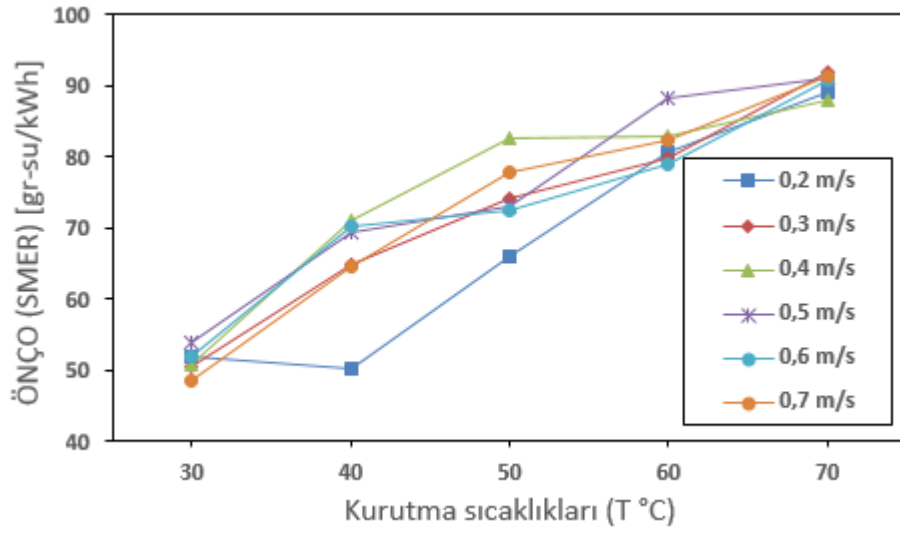
Şekil 5.37 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak ÖNÇO (SMER) değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin özgül nem çekme oranı değerleri (ÖNÇO&SMER); hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, yaklaşık olarak yatay seyir izlemekte ve kuruma hızı arttıkça doğrusal olarak ÖNÇO (SMER) değerlerinde küçük artışlar izlenmektedir. Bütün sıcaklık şartlarında ÖNÇO (SMER) değerleri  $T_5=70$  °C sıcaklık şartında  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 88,99 gr-su/kWh değerini alırken  $V_6=0,7$  m/s hızında ise yaklaşık 91,47 değerine yükselmektedir. Bu durum, kurutma işlemin de  $V_6=0,7$  m/s hızında sistemden kWh başına daha fazla nem çekilmekte olduğunu ve ürün üzerinden daha fazla su miktarının buharlaştığını göstermektedir.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak ÖNÇO (SMER) değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin özgül nem çekme oranı değerleri (ÖNÇO&SMER), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak doğrusal artış göstermekte ve  $T_5=70$  °C sıcaklığında bütün hızlar için maksimum değerlere ulaşmaktadırlar. Bununla birlikte kurutma havası hızı arttıkça kurutma sıcaklık şartlarına bağlı olarak kabinin özgül nem çekme oranı değerinde kademeli artış görülmektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında ÖNÇO (SMER) değeri 48,63 iken  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık bu değer 52,071 olmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak bu değer 91,47 olurken,  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 88,99 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı bütün hızlara ait ÖNÇO (SMER) değerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak, kurutma havası hızlarındaki artışta, kurutma kabininin özgül nem çekme oranını arttırmakta ve bu nedenle de kurutulmakta olan üründen kW başına daha yüksek miktarda nem çekme işlemi gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.37. Özgül Nem Çekme Oranının Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

#### 5.4.7 Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kabin tipli kurutma sisteminde patatesin kurutulması ile ilgili enerji ve ekserji analizleri yapılmış; bütün kurutma süreci sonunda yani 30. dakikada kurutma sıcaklıklarına ve kurutma hızlarına bağlı olarak hesaplanan  $COP_{SM}$ ,  $COP_{Ex,SM}$ ,  $EX_{sg,yo}$ ,  $COP_{IP}$ ,  $COP_{Ex,IP}$ ,  $EX_{is,yo}$ ,  $COP_{kk}$ ,  $COP_{Ex,kk}$ ,  $EX_{kk,yo}$ , değerleri Tablo 5.1’de verilmiş, bu değerlere ait grafiklerde Şekil 5.38, 5.39, 5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45 ve 5.46’da gösterilmiştir. Patates için kurutma işlemi çevrimi Şekil 3.3’de görüldüğü gibi devam etmektedir. Bu proses şeması esas alınarak enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

**Tablo 5.5.** Kurutma Modellerine Göre Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları

PATATES	MODELLER	NEWTON	PAGE	H.PAPIS	LOGARİTMİK	İKİ TERİMLİ	VERMA	MİDİLLİ
	K.ŞARTI	$V_5=0,6m/s$	$V_2=0,3 m/s$	$V_5=0,6m/s$	$V_3=0,4 m/s$	$V_2=0,3 m/s$	$V_4=0,5 m/s$	$V_5=0,6m/s$
	PROSES	$T_1=30\text{ }^\circ\text{C}$	$T_1=30\text{ }^\circ\text{C}$	$T_1=30\text{ }^\circ\text{C}$	$T_4=60\text{ }^\circ\text{C}$	$T_2=40\text{ }^\circ\text{C}$	$T_3=50\text{ }^\circ\text{C}$	$T_2=40\text{ }^\circ\text{C}$
ISITMA BÖLÜMÜ	$Q_{is,g}$	0,472765	0,203427	0,445200	0,476473	0,388707	0,670744	0,776031
	$EX_{is,g}$	0,0076943	0,003277	0,006510	0,044301	0,012574	0,041230	0,025227
	$EX_{is,yo}$	0,0001443	0,000270	0,000525	0,061015	0,013542	0,056480	0,033568
	$COP_{IP}$	0,5594852	0,240743	0,526863	0,563873	0,460008	0,793780	0,918380
	$COP_{Ex,IP}$	0,0091057	0,003878	0,007704	0,052427	0,014881	0,048793	0,029855
	KURUTMA KABINI BÖLÜMÜ	$Q_{kk,g}$	14,450042	6,197302	12,378850	8,604138	6,212721	10,529205
$EX_{kk,g}$		0,0302067	0,012848	0,026608	0,111173	0,027494	0,081857	0,054285
$Q_{kk,ik}$		0,0593076	0,103925	0,001066	0,147589	0,100815	0,044695	0,162739
$EX_{kk,yo}$		0,0055369	0,004534	0,006489	0,011355	0,002640	0,034251	0,000640
$EX_{kk,ik}$		0,0018331	0,003726	0,000032	0,015520	0,006091	0,003544	0,009660
$COP_{kk}$		5,8384009	2,503960	5,001556	3,476419	2,510190	4,254224	4,970224
$COP_{Ex,kk}$		0,1804597	0,089765	0,151387	0,365576	0,151657	0,337372	0,295040
SOĞUTMA BÖLÜMÜ	$Q_{sg,\zeta}$	0,5585731	0,334557	0,474036	0,648564	0,523030	0,660207	0,972268
	$EX_{sg,\zeta}$	0,0078897	0,006381	0,005593	0,050023	0,014991	0,031014	0,026927
	$EX_{sg,yo}$	0,0078748	0,004489	0,007899	0,005781	0,005452	0,004930	0,005605
	$COP_{SM}$	0,6610332	0,395925	0,560989	0,767531	0,618971	0,781310	1,150613
	$COP_{Ex,SM}$	0,0093369	0,007552	0,006619	0,059199	0,017741	0,036703	0,031866

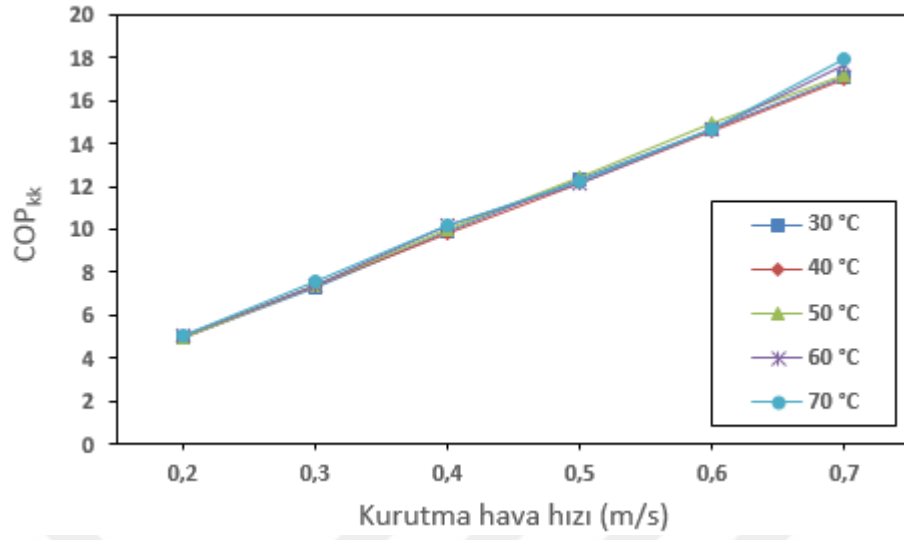
#### 5.4.7.1 Kurutma Kabini İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.38 (a) ve (b) incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{kk}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{kk}$ ), hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, aynı değeri almakta ve kuruma hızı arttıkça lineer olarak  $COP_{kk}$  değerleri de artmaktadır. Bütün sıcaklık şartlarında ve  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{kk}$  değerleri yaklaşık olarak 5,0 değerini alırken;  $V_6=0,7$  m/s hızında ise yaklaşık 17,0 değerine yükselmektedir. Bu durumda gerçekleşen kurutma işleminde  $V_6=0,7$  m/s hızında kurutma havasına daha fazla ısı yüklenmekte ve ürün üzerinden daha fazla su miktarı buharlaşmaktadır.

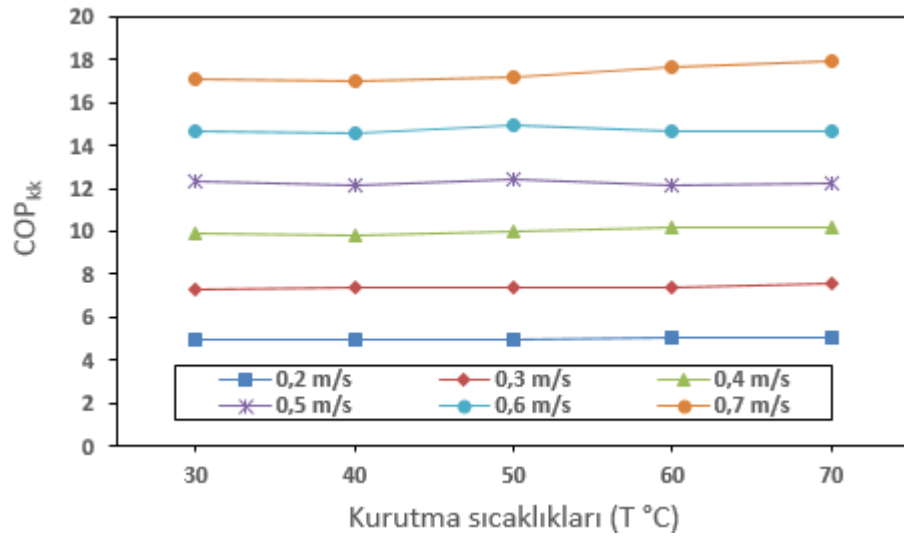
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre, kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{kk}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{kk}$ ), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak çok az değişmekte (artmakta) ve yaklaşık olarak yatay bir seyir izlemektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça kabinin etkinlik katsayısı değerinde de kademeli artış görülmektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{kk}$  değeri 17,10 iken;  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 4,95 değerini almaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak bu değer 17.94 olurken  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 5.018 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı,  $COP_{kk}$  değerlerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma havası hızlarındaki artışta, kurutma kabininin etkinlik katsayısını artırmakta ve bu nedenle de daha iyi kurutma gerçekleşmektedir.





(a)



(b)

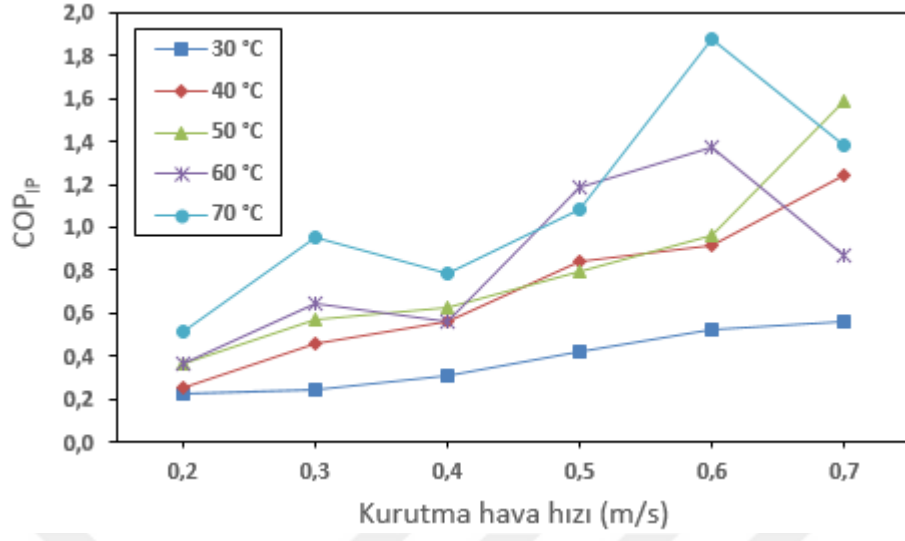
Şekil 5.38. Isıtma Bölümü İçin COP<sub>kk</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

#### 5.4.7.2 Isıtma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

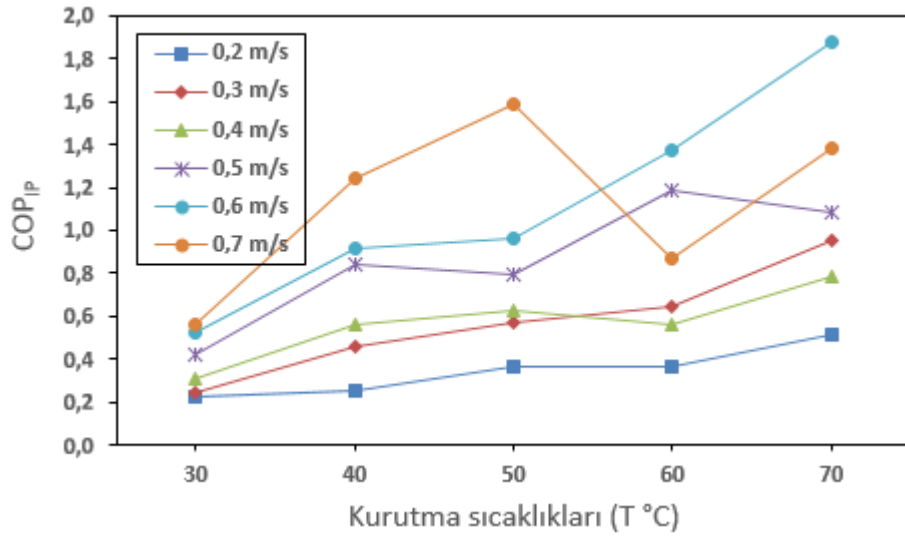
Şekil 5.39 (a) ve (b) grafikleri incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{IP}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{IP}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, yaklaşık dalgalı artış göstermiştir.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki kurutma işleminde ise;  $COP_{IP}$  değeri,  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0.226 iken,  $V_6=0,7$  m/s hızında da 0,559 değerini almaktadır. En yüksek  $COP_{IP}$  değeri ise;  $V_5=0,6$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında yaklaşık 1,873 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere, en hızlı kurutma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_5=0,6$  m/s hızında olmaktadır. Sonuç olarak kuruma işlemi için ısıtma bölümüne en fazla ısının bu şartlarda verildiği anlaşılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{IP}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{IP}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına göre kademeli olarak artmakta ve aynı anda kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak yaklaşık lineer dalgalı bir artış göstermektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça ısıtma bölümünün etkinlik katsayısı değeri de kademeli olarak artmaktadır.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{IP}$  değeri 0,226 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_5=0,6$  m/s hızında  $COP_{IP}$  değeri yaklaşık 1,873 olup, en yüksek değere ulaşmaktadır. Şekil 5.39 (b) grafiğinde kurutma hızlarına göre sıcaklık arttıkça ısıtma bölümü için  $COP_{IP}$  değerlerinde kademeli artışın görüldüğü aşikârdır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı,  $COP_{IP}$  değerinin de yüksek değerlere ulaşıldığı gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma havası hızlarındaki artışta, ısıtma bölümünün etkinlik katsayısını artırmakta ve bu durum da daha iyi bir kurutmanın gerçekleşmesine yol açmaktadır.



(a)



(b)

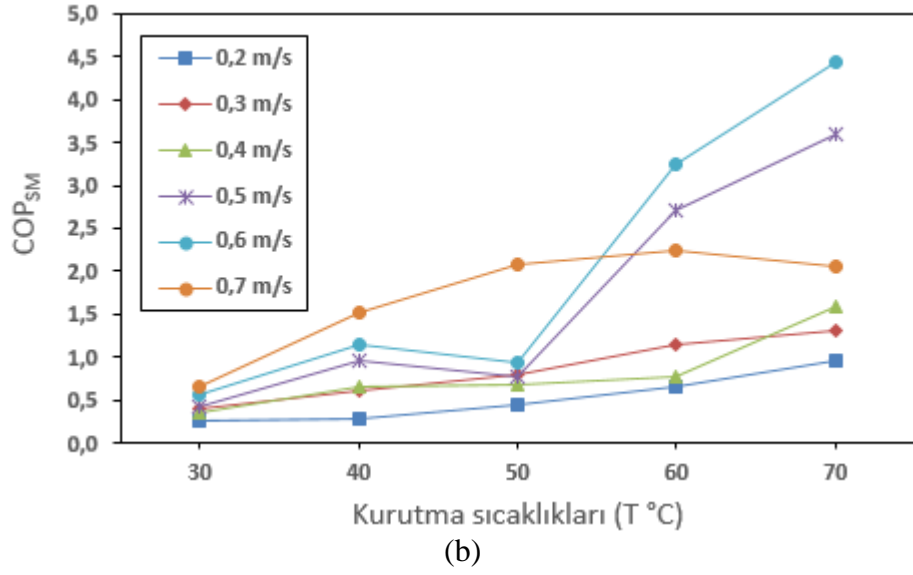
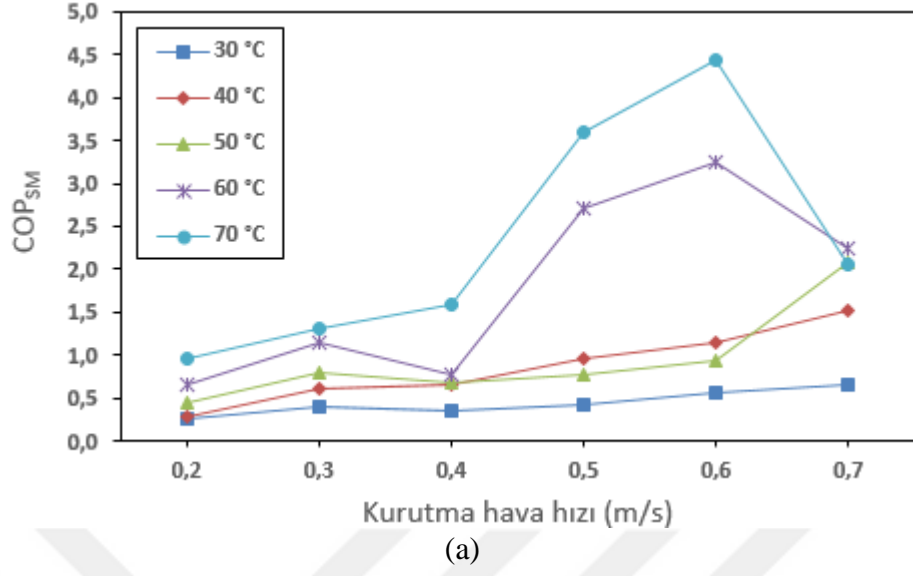
Şekil 5.39. Isıtma Bölümü İçin COP<sub>IP</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

### 5.4.7.3 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Enerji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.40 (a) ve (b) incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{SM}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{SM}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kurutma havası hızı arttıkça da  $COP_{SM}$  değerlerinde de artış gözlenmektedir.  $T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki soğutma işleminde ise  $COP_{SM}$  değeri,  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0,252 iken,  $V_6=0,7$  m/s hızında da 0,661 değerini almaktadır. En yüksek  $COP_{SM}$  değeri ise  $V_5=0,6$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 4,444 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere; en verimli soğutma ve nem alma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_5=0,6$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartlarda gerçekleşen soğutma işleminde sistemden en fazla ısı çekildiği ve nem alındığı anlaşılmaktadır. Bu durum da, kurutma havasının nem alma kabiliyetini arttırmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre, kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{SM}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{SM}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve yaklaşık lineer dalgalı bir artış izlemektedir. Bununla birlikte kurutma havası hızı arttıkça, soğutma bölümünün etkinlik katsayısı değeri de kademeli olarak artmaktadır.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{SM}$  değeri 0,252 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_5=0,6$  m/s hızında  $COP_{SM}$  değeri 4,444 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu grafikte, kurutma hızlarına göre kurutma sıcaklığı arttıkça soğutma bölümü için  $COP_{SM}$  değerlerinde de kademeli artış görülmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir soğutmanın gerçekleştiğinden dolayı,  $COP_{SM}$  değerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artışla birlikte, soğutma bölümünün etkinlik katsayısı artmakta ve bu nedenle de daha iyi bir soğutma ve nem alma işlemi gerçekleşmektedir.



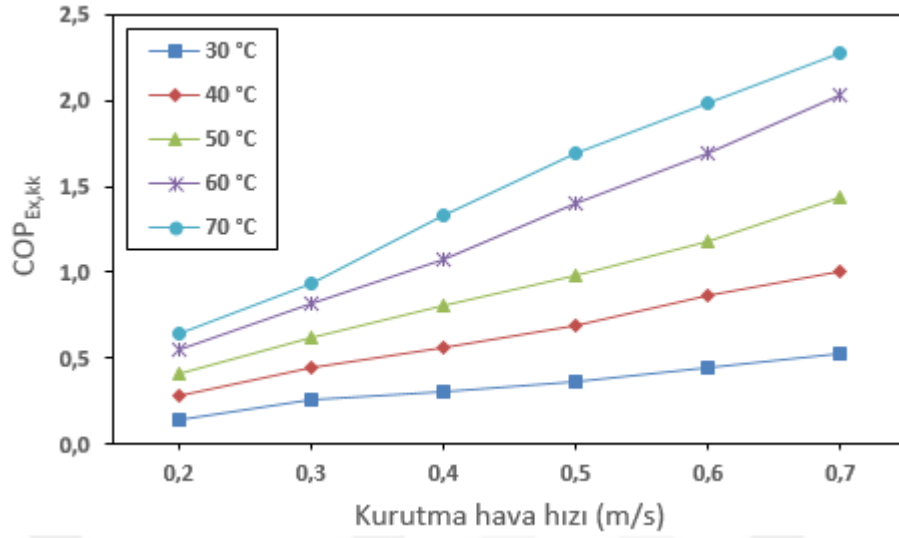
**Şekil 5.40.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin COP<sub>SM</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

#### 5.4.7.4 Kurutma Kabini İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

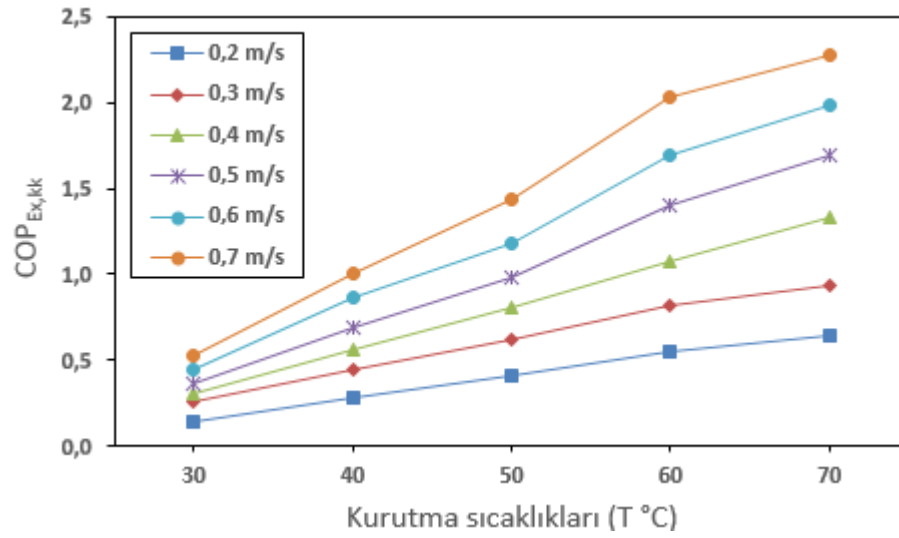
Şekil 5.41 (a) ve (b) incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,kk}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,kk}$ ), hemen hemen bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, lineer olarak artmaktadır. En yüksek  $COP_{Ex,kk}$  değeri  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızında 2,276 değerini alırken, en düşük  $COP_{Ex,kk}$  değeri de  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızı ve  $T_1=30$  °C kurutma sıcaklığında yaklaşık olarak 0,145 değerini almaktadır.  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_6=0,7$  m/s hızındaki kurutma işleminde sisteme en fazla ısı yüklenmekte ve sonuçta ürün üzerinden daha fazla su miktarı buharlaştırılmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,kk}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,kk}$ ), hemen hemen her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına göre kademeli olarak artmakta ve kurutma sıcaklıklarına bağlı olarak doğrusal bir artış izlemektedir. Aynı şekilde kuruma hızı arttıkça kabinin etkinlik katsayısı değerinde de kademeli artış görülmektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_6=0,7$  m/s hızında  $COP_{Ex,kk}$  değeri 0,528 iken,  $V_1=0,7$  m/s hızında ise yaklaşık 0,146 değerini almaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_6=0,7$  m/s hızında yaklaşık olarak bu değer 2,276 olurken; aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 0,646 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutmanın gerçekleştiğinden dolayı,  $COP_{Ex,kk}$  değerinde artış gözlenmiştir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma havası hızlarındaki artışta, kurutma kabininin ekserji etkinlik katsayısını arttırmakta ve sonuç olarak da daha iyi kurutma gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 5.41.** Kurutma Kabini Bölümü İçin COP<sub>Ex,kk</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

Şekil 5.42 (a) ve (b) incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $EX_{kk,yo}$  değişimleri görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabinin ekserji yokoluşu değerleri ( $EX_{kk,yo}$ )  $T_1=30$  °C,  $T_2=40$  °C ve  $T_3=50$  °C sıcaklık şartlarında bütün hızlarda sıfıra (0,00- 0,041 kW) yakın bir değer almakta iken,  $T_4=60$  °C ve  $T_5=70$  °C sıcaklıklarındaki hızlara bağlı değişimlerde ekserji yokoluş değerleri artarak salınımlı yükselmektedir. Bu durumda göstermektedir ki

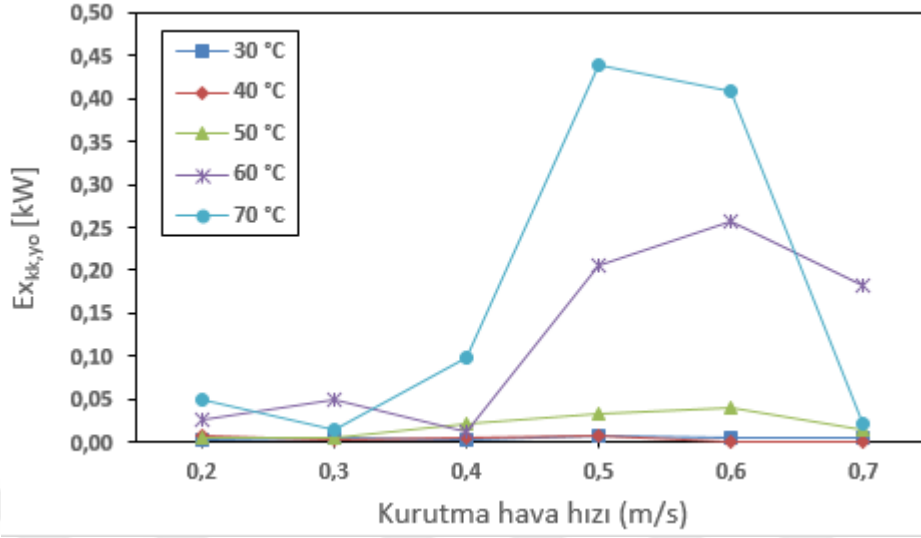
$T_4=60\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık şartlarında kurutma kabiniinde ekserji yok oluşu daha fazla olmaktadır. En yüksek ekserji yok oluşu ( $EX_{kk,yo}$ ),  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığı  $V_4=0,5$  m/s hızında gerçekleşmektedir ve 0,438 kW değerine ulaşmaktadır.

$T_4=60\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  kurutma sıcaklığı şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, lineer olarak kademeli artmakta ve kuruma hızı arttıkça da Ekserji yokoluşu artışı doğrusal olarak maksimum değerine ulaşmaktadır. Fakat  $V_4=0,5$  m/s hızından sonra  $T_4=60\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklarına göre ekserji yokoluşundaki değişim kademeli olarak azalmakta ve  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında bu değerler minimuma ulaşmaktadır.

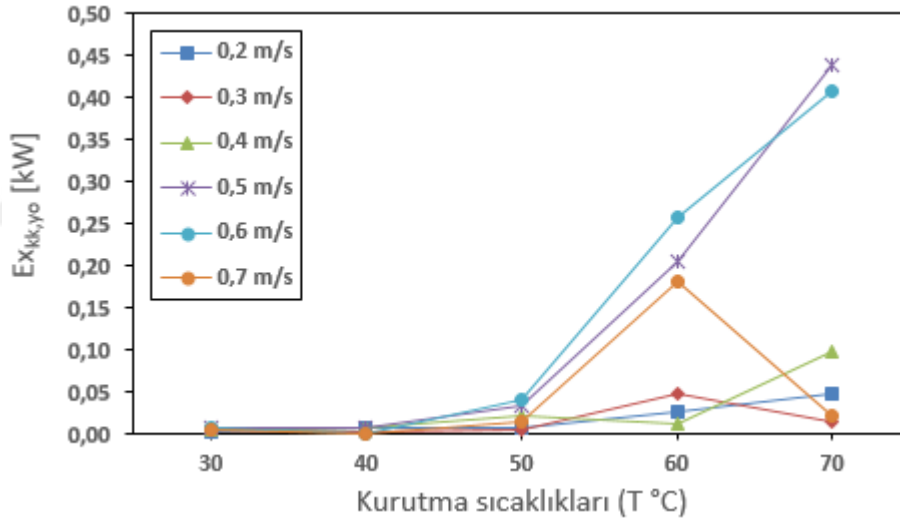
En yüksek  $EX_{kk,yo}$  değeri  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığında ve  $V_4=0,5$  m/s hızında 0,438 değerini alırken, en düşük  $EX_{kk,yo}$  değeri de  $V_6=0,7$  m/s kuruma hızı ve  $T_2=40\text{ }^\circ\text{C}$  kurutma sıcaklığında yaklaşık olarak 0,000287 değerini almaktadır. Bu durum göstermektedir ki; kurutma işleminde  $T_5=70\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık şartında ve  $V_4=0,5$  m/s hızında sisteme daha fazla ısı yüklenmekte ve sistemin iyi yalıtılamaması nedeniyle ekserji yok oluşu en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu olayın sonucunda sistemin verimi ters yönde etkilenmekte ve sistemin kurutma performansı azalmaktadır.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $EX_{kk,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte kurutma kabiniin ekserji yokoluş değerleri ( $EX_{kk,yo}$ ), bütün kuruma hızı şartlarında  $T_3=50\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığına kadar doğrusal olarak çok hafif artmaktadır.  $V_4=0,5$  m/s ve  $V_5=0,6$  m/s kurutma havası hızlarında ekserji yokoluş değerleri  $T_3=50\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığından sonra hızlı bir şekilde lineer olarak dikey yönde hızlı artış göstermektedir. Herbir kuruma hızı şartında;  $T_3=50\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığından sonra ekserji yok oluşunda kademeli küçük artışlar görülmektedir. Aynı şekilde kuruma hızı arttıkça kabiniin ekserji yok oluşu değerlerinde de kademeli artış görülmektedir.





(a)



(b)

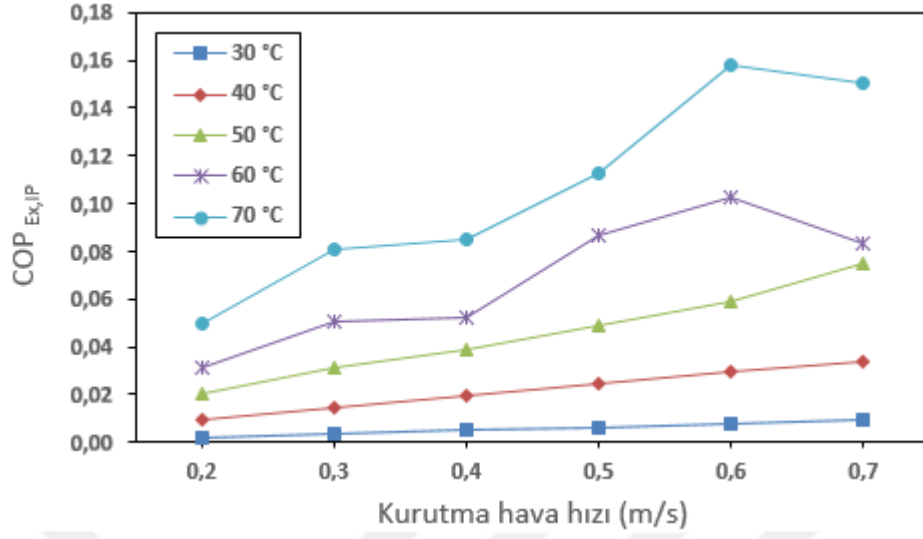
**Şekil 5.42.** Kurutma Kabini Bölümü İçin  $E_{X_{kk,yo}}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

#### 5.4.7.5 Isıtma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

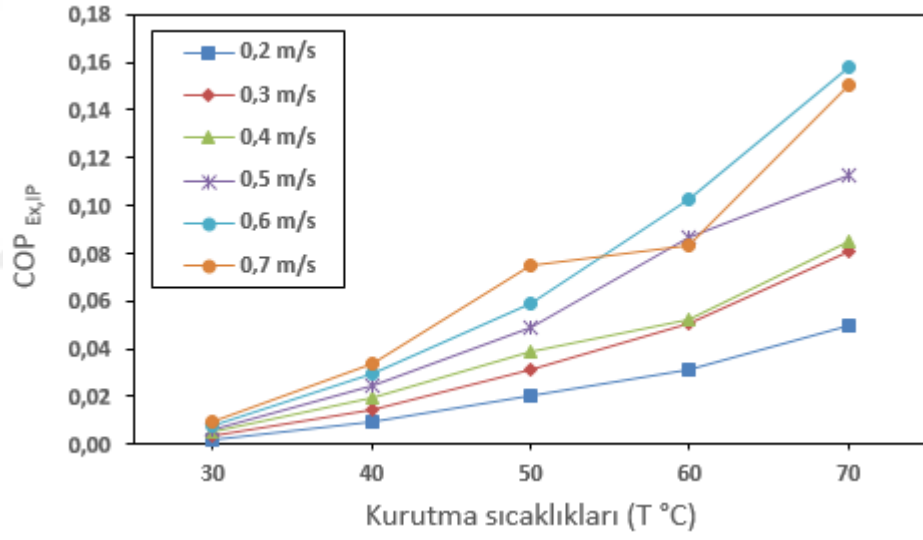
Şekil 5.43 (a) ve (b) incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,IP}$  değerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{Ex,IP}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmaktadır. En yüksek  $COP_{Ex,IP}$  değeri ise  $V_5=0,6$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,157 olarak belirlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere en hızlı kuruma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_5=0,6$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartta gerçekleşen kuruma işleminde sisteme en fazla ısı verildiği ve ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısında en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,IP}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,IP}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artış yönünde değişmekte ve yaklaşık parabolik bir artış izlemektedir. Bununla birlikte kurutma havası hızı arttıkça ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı değerinde de kademeli artış gözlemlenmektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{Ex,IP}$  değeri 0,002 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_5=0,6$  m/s hızında  $COP_{Ex,IP}$  değeri 0,157 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Şekil 5.43 (b)'den anlaşılacağı üzere; kurutma hızlarına göre sıcaklık arttıkça ısıtma bölümü için  $COP_{Ex,IP}$  değerlerinde kademeli artış görülmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir kurutma gerçekleşmekte ve bunun sonucunda da  $COP_{Ex,IP}$  değerinin yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak kurutma hızlarındaki artış ile birlikte, ısıtma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı artmakta ve sonuç olarak daha iyi bir kurutma işlemi gerçekleşmektedir.



(a)



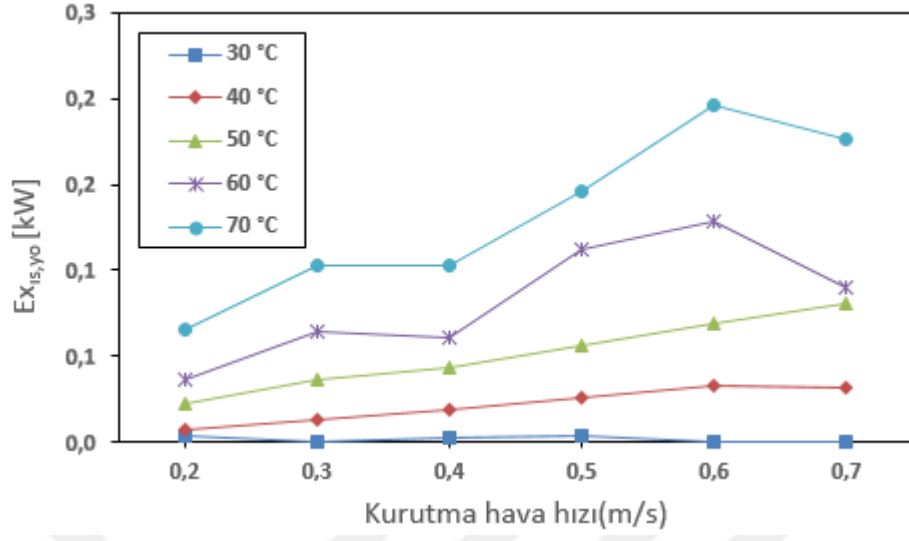
(b)

Şekil 5.43. Isıtma Bölümü İçin COP<sub>Ex,IP</sub> ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

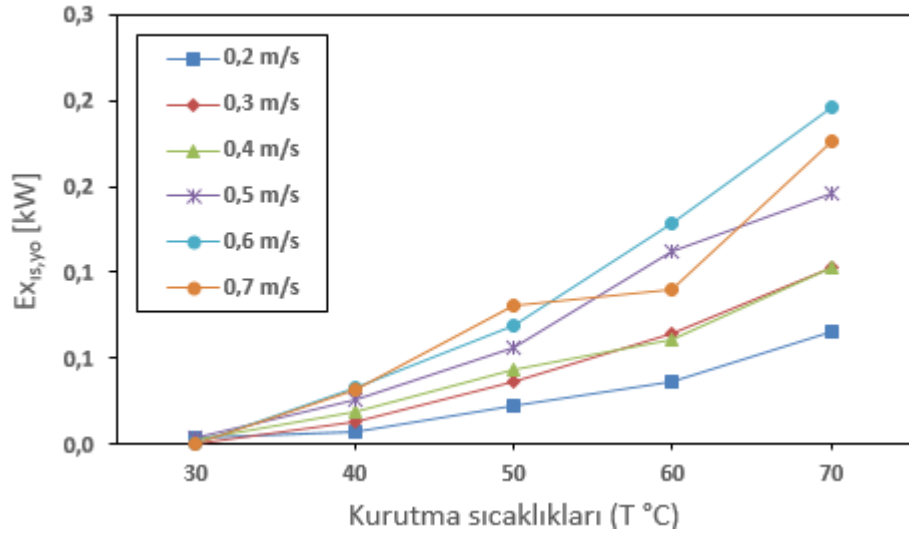
Şekil 5.44 (a) ve (b) incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $Ex_{is,yo}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{is,yo}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarının artışına bağlı olarak kademeli bir şekilde artmaktadır. En yüksek ekserji yok oluşu ( $Ex_{is,yo}$ ) değeri ise  $V_5=0,6$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,195 olarak belirlenmiştir.

(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $Ex_{is,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte ısıtma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{is,yo}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli bir şekilde artmakta ve yaklaşık parabolik bir seyir izlenmektedir. Bununla birlikte kuruma hızının artışıyla birlikte ısıtma bölümünün ekserji yokoluşu değeri de kademeli artış göstermektedir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_4=0,5$  m/s hızında en yüksek  $Ex_{is,yo}$  değeri yaklaşık 0,00342 iken, aynı sıcaklıkta  $V_6=0,7$  m/s hızında ise yaklaşık 0,000144 ile en düşük değere ulaşmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise;  $V_5=0,6$  m/s hızında yaklaşık en yüksek değer olarak 0,195'e ulaşırken; aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise 0,0655 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir kuruma gerçekleşirken, aynı zamanda bu işlem sonucunda en yüksek  $Ex_{is,yo}$  değerine ulaşılır ki bu olay da enerji kayıplarının en yüksek olduğu durumu açıklar.



(a)



(b)

Şekil 5.44. Isıtma Bölümü İçin  $Ex_{15,y0}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

#### 5.4.7.6 Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

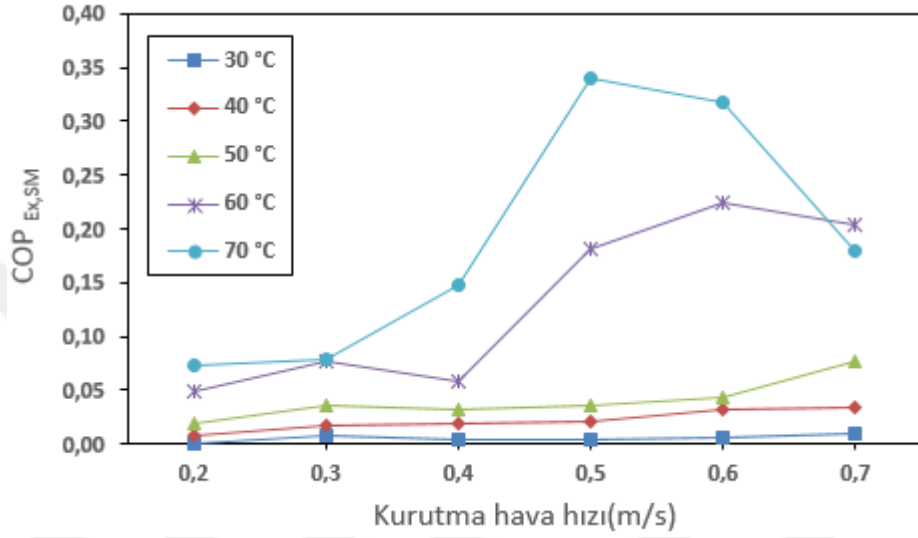
Şekil 5.45 (a) ve (b) incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $COP_{Ex,SM}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji etkinlik katsayısı değerleri ( $COP_{Ex,SM}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, kademeli artmakta ve kuruma hızı arttıkça maksimum değerine ulaşmaktadır. Fakat  $T_4=60$  °C ve  $T_5=70$  °C sıcaklıklarında bu durum farklıdır.  $T_5=70$  °C sıcaklığında en yüksek  $COP_{Ex,SM}$  değeri  $V_4=0,5$  m/s hızında bulunmuş  $T_4=60$  °C sıcaklığında ise bu değer  $V_5=0,6$  m/s hızında bulunmuştur.

$T_1=30$  °C sıcaklık şartındaki soğutma işleminde ise  $COP_{Ex,SM}$  değeri;  $V_1=0,2$  m/s hızında yaklaşık olarak 0,0014 iken; aynı sıcaklıkta  $V_6=0,7$  m/s hızında bu değer 0,009 olmaktadır. En yüksek  $COP_{Ex,SM}$  değeri ise  $V_5=0,6$  m/s hızında  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,318 olarak elde edilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, en verimli soğutma ve nem alma işlemi  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_5=0,6$  m/s hızında olmaktadır. Bu şartlarda gerçekleşen soğutma işleminde sistemden en fazla ısı çekildiği ve nem alındığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, kurutma işleminde kapalı çevrim düşünüldüğünde, kurutma havasının nem alma kabiliyeti artmaktadır.

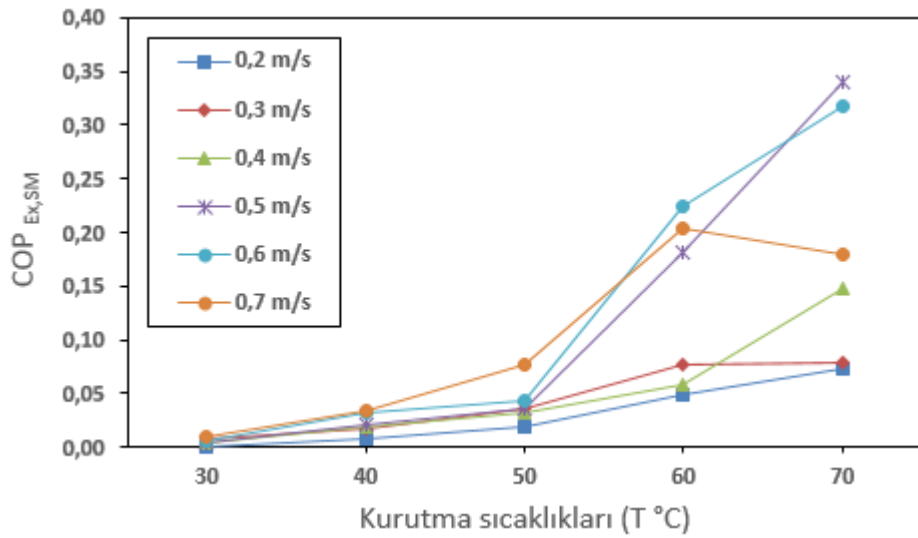
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $COP_{Ex,SM}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji etkinlik kat sayısı değerleri ( $COP_{Ex,SM}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta ve artış yaklaşık parabolik bir seyir izlemektedir. Bununla birlikte kuruma hızı arttıkça, soğutma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı değeride kademeli olarak artmaktadır.

$T_1=30$  °C sıcaklığında  $V_1=0,2$  m/s hızında  $COP_{Ex,SM}$  değeri yaklaşık 0,0014 ile en düşük değeri alırken;  $T_5=70$  °C sıcaklığında  $V_5=0,6$  m/s hızında  $COP_{Ex,SM}$  değeri 0,318 olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Grafiklerde kurutma hızlarına bağlı olarak kurutma sıcaklığı arttıkça soğutma bölümü için  $COP_{Ex,SM}$  değerlerinde de kademeli artış gözlenmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilirki;

kurutma havası sıcaklığının artışı ile daha iyi bir soğutma işlemi gerçekleşmekte; dolayısı ile  $COP_{Ex,SM}$  değerinin de yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde kurutma sıcaklıklarının artışına bağlı olarak, kurutma hızlarındaki artış ile birlikte, soğutma bölümünün ekserji etkinlik katsayısı artmakta ve bu nedenle de daha iyi bir soğutma ve nem alma işlemi gerçekleşmektedir.



(a)



(b)

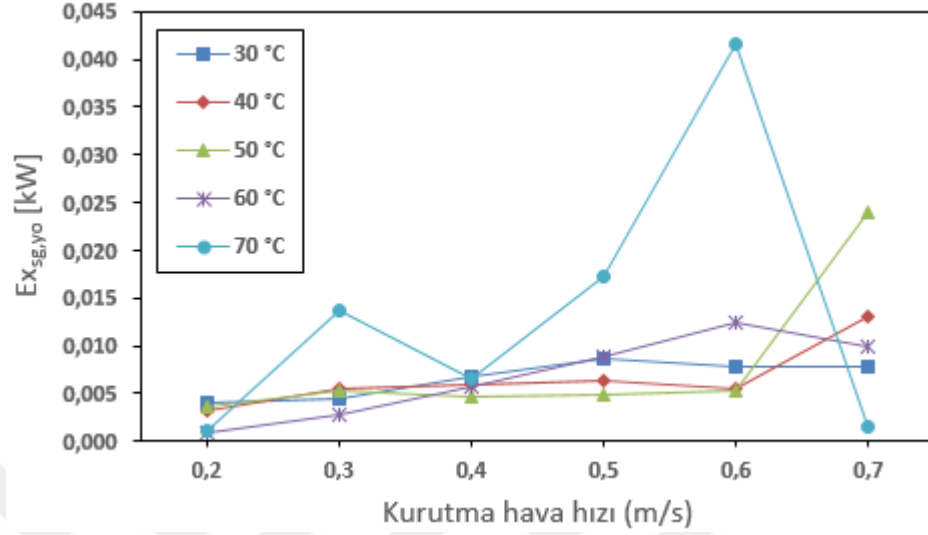
**Şekil 5.45.** Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $COP_{Ex,SM}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

Şekil 5.46 (a) ve (b) incelendiğinde; (a) grafiğinde kurutma havası sıcaklıklarına göre kurutma havası hızına bağlı olarak  $Ex_{sg,yo}$  değişimi görülmektedir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere; soğutma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ), bütün sıcaklık şartlarında kurutma havası hızlarına bağlı olarak, dalgalı olarak artmakta ve kurutma havası hızı arttıkça da  $Ex_{sg,yo}$  değerlerinde de genellikle kademeli artış gözlemlenmektedir. Fakat  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_5=0,6$  m/s hızı şartlarında en yüksek ekserji yok oluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ) yaşanmış,  $V_6=0,7$  m/s hızında ise bu değer yaklaşık olarak  $T_5=70$  °C sıcaklığında 0,00152 değerine inmiştir. Bu durumun sebebi;  $T_5=70$  °C sıcaklığı ve  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızındaki kurutma işleminde ürüne daha fazla ısının verildiği ve enerji kayıplarının da en düşük seviyeye ulaştığı gerçeğindedir.

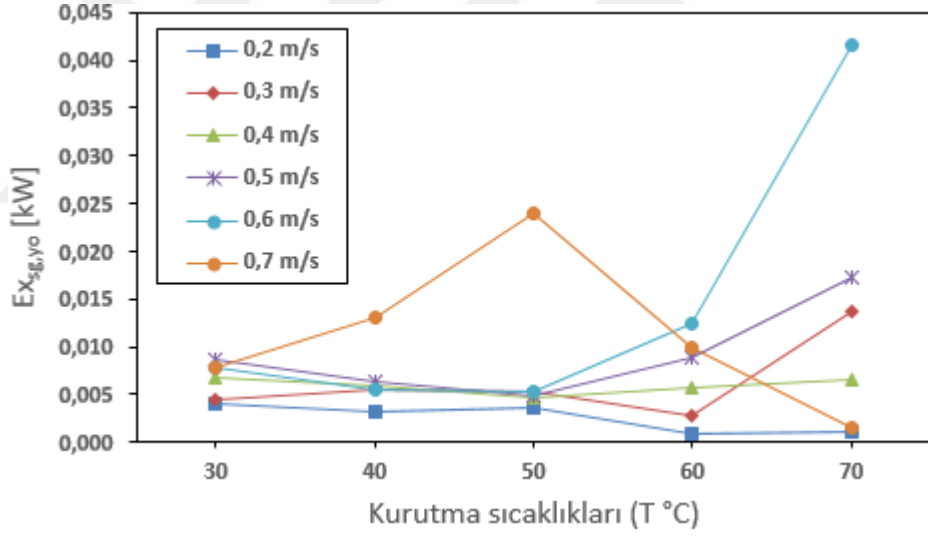
(b) grafiğinde ise kurutma havası hızlarına göre kurutma havası sıcaklıklarına bağlı olarak  $Ex_{sg,yo}$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Bu grafikte soğutma bölümü ekserji yokoluşu ( $Ex_{sg,yo}$ ), her bir sıcaklık şartlarında kurutma hızlarına bağlı olarak kademeli şekilde artmakta,  $V_6=0,7$  m/s hızı hariç yaklaşık lineer bir artış izlenmektedir. Fakat  $V_6=0,7$  m/s hızında ekserji yokoluşu,  $T_3=50$  °C sıcaklığına kadar paraboil artmış bu sıcaklıktan sonra  $T_5=70$  °C sıcaklığına kadar parabolik olarak düşmüştür. Bununla birlikte  $V_6=0,7$  m/s hızı hariç diğer kurutma hızlarında sıcaklık artışı ile birlikte soğutma bölümünün ekserji yokoluşu değerleri de kademeli artış göstermiştir.

$T_1=30$  °C sıcaklığında;  $V_4$  hızında en yüksek  $Ex_{sg,yo}$  değeri 0,00863 iken, aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise yaklaşık 0,00413 ile en düşük değere ulaşmaktadır. Buna mukabil  $T_5=70$  °C sıcaklığında ise  $V_5=0,6$  m/s hızında yaklaşık olarak en yüksek değer 0,0416 olurken; aynı sıcaklıkta  $V_1=0,2$  m/s hızında ise en düşük 0,001078 değerini almaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda denilebilir ki; kurutma havası sıcaklığının artışı ile birlikte daha iyi bir soğutma ve nem alma gerçekleşirken,  $T_5=70$  °C sıcaklığında ve  $V_5=0,6$  m/s hızında en yüksek  $Ex_{sg,yo}$  değerine ulaşır ki; ekserji yokoluşundaki bu artış da istenilmeyen bir durumu ortaya çıkarır ve sistemden enerji kayıpları en fazla olur.





(a)



(b)

Şekil 5.46. Soğutma ve Nem Alma Bölümü İçin  $Ex_{sg,yo}$  ile Kurutma Hava Hızı (a) ve Kurutma Sıcaklığı (b) Değişimleri Grafiği

## 6. SONUÇLAR

Tartışma bölümünde verilen deney şartlarında kabin tipli konvektif kurutma sisteminde elma, kayısı ve patates için kurutma deneyleri yapılmıştır. Bu ürünler için elde edilen işlenmiş veriler yardımıyla MATLAB programında literatürde en çok yer bulan ve Tablo 5.1’de verilen kurutma modelleri kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon çalışması sonucunda RMSE ve  $R^2$  değerlerine bakılarak elma, kayısı ve patates kurutulması için en uygun model ve kurutma şartları belirlenmiştir. En uygun modeller ve sınır şartları aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

Elma kurutma verileri kullanılarak optimizasyonu yapılan kurutma eğrileri modellerinin  $R^2$  ve RMSE değerlerine bakılarak kurutma işleminin en iyi gerçekleştiği modelin  $V_5=0,6$  m/s ve  $T_2=40$  °C şartlarında Midilli ve Ark. Modeli olduğu görülmüştür.

Kayısı kurutma verileri kullanılarak optimizasyonu yapılan kurutma eğrileri modellerinin  $R^2$  ve RMSE değerlerine bakılarak kurutma işleminin en iyi gerçekleştiği modelin  $V_3=0,4$  m/s ve  $T_3=50$  °C şartlarında Verma ve Ark. Modeli olduğu görülmüştür.

Patates kurutma verileri kullanılarak optimizasyonu yapılan kurutma eğrileri modellerinin  $R^2$  ve RMSE değerlerine bakılarak kurutma işleminin en iyi gerçekleştiği modelin  $V_5=0,6$  m/s ve  $T_2=40$  °C şartlarında Midilli ve Ark. Modeli olduğu görülmüştür.

Ürünler için en iyi sonuç veren modeller ve optimum kurutma şartları göz önünde bulundurduğunda elma için;  $NO= 0,319$ ,  $KH=0,023$  m/s,  $Def=4,73 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, kayısı için;  $NO= 0,633$ ,  $KH=0,022$  m/s,  $Def =1,26 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, patates için;  $NO= 0,273$ ,  $KH=0,016$  m/s,  $Def=9,82 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, değerleri ortaya çıkmıştır. Kurutma kinetiği çalışması yanında konvektif kurutma sisteminin enerji-ekserji analizi de yapılmıştır. Ürünler için en iyi sonuç veren modeller ve optimum kurutma şartları dikkate alınarak kurutma kabini için enerji-ekserji sonuçları: elma için; ÖNÇO (SMER) =67,93 gr-su/kW-h, COP =14,65,  $COP_{Ex,} =0,89$ ,  $Ex_{yo} =0,101$  kW, kayısı için; ÖNÇO (SMER) =39,41 gr-su/kW-h, COP =9,77  $COP_{Ex,} =0,83$ ,  $Ex_{yo} =0,355$  kW, patates

için; ÖNÇÖ (SMER) =70,18 gr-su/kW-h, COP =14,56 COP<sub>Ex</sub>, =0,86, E<sub>Xyo</sub> =0,00064 kW olarak verilmiştir.

### **Nem İçeriği Sonuçları (M<sub>KB</sub>)**

Kurutulan ürünler, kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında düşük nem içeriklerine sahiptirler. Otuzuncu dakikanın sonunda: V<sub>5</sub>=0,6 m/s kurutma havası hızında, T<sub>5</sub>=70 °C kurutma havası sıcaklığında elma en düşük nem içeriğine sahip olmaktadır ve bu değer de M<sub>kb</sub>=0,32 gr-su/gr-km'dir. V<sub>3</sub>=0,4 m/s kurutma havası hızında, T<sub>5</sub>=70 °C kurutma havası sıcaklığında kayısı en düşük nem içeriğine sahip olmaktadır ve bu değer de M<sub>kb</sub>=3,813 gr-su/gr-km'dir. V<sub>5</sub>=0,6 m/s kurutma havası hızında, T<sub>5</sub>=70 °C kurutma havası sıcaklığında patates en düşük nem içeriğine sahip olmaktadır ve bu değer de M<sub>kb</sub>=0,272 gr-su/gr-km'dir.

### **Kuruma Hızı Sonuçları (KH)**

Kurutulan ürünler, kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında düşük kuruma hızlarına sahiptirler. Kuruma süresinin beşinci dakikasında: T<sub>2</sub>=40 °C kurutma havası sıcaklığında, V<sub>4</sub>=0,5 m/s kurutma havası hızında elma en yüksek kuruma hızına sahip olmaktadır ve bu değer de KH=0,174 gr-su/gr-km.dk'dir. T<sub>3</sub>=50 °C kurutma havası sıcaklığında, V<sub>6</sub>=0,7 m/s kurutma havası hızında kayısı en yüksek kuruma hızına sahip olmaktadır ve bu değer de KH=0,155 gr-su/gr-km.dk'dir. V<sub>5</sub>=0,6 m/s kurutma havası hızında, T<sub>3</sub>=50 °C kurutma havası sıcaklığında patates en yüksek kuruma hızına sahip olmaktadır ve bu değer de KH=0,137 gr-su/gr-km.dk'dir.

### **Nem Oranı Sonuçları (NO)**

Kurutulan ürünler, kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında düşük nem oranlarına sahiptirler. Otuzuncu dakikanın sonunda: V<sub>5</sub>=0,6 m/s kurutma havası hızında, T<sub>5</sub>=70 °C kurutma havası sıcaklığında elma en düşük nem oranına sahip olmaktadır ve bu değer de NO=0,054'dir. V<sub>3</sub>=0,4 m/s kurutma havası hızında, T<sub>5</sub>=70 °C kurutma havası sıcaklığında kayısı en düşük nem oranına sahip olmaktadır ve bu değer de NO=0,38'dir. V<sub>5</sub>=0,6 m/s kurutma havası hızında, T<sub>5</sub>=70 °C kurutma

havası sıcaklığında patates en düşük nem oranına sahip olmaktadır ve bu değer de  $NO=0,053$ ' dir.

### **Difüzyon Katsayısı Sonuçları (Def)**

Kurutulan ürünler, kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında yüksek difüzyon katsayısına sahiptirler. Kuruma süresi sonunda:  $V_5=0,6$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında elma en yüksek difüzyon katsayısına sahip olmaktadır ve bu değer  $Def=1,37 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s' dir.  $V_3=0,4$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında kayısı en yüksek difüzyon katsayısına sahip olmaktadır ve bu değer de  $Def=3,85 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s' dir.  $V_5=0,6$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında patates en yüksek difüzyon katsayısına sahip olmaktadır ve bu değer  $Def=2,45 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s' dir.

### **Özgül Nem Çekme Oranı Sonuçları (ÖNÇÖ&SMER)**

Kurutma kabiniinde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası hızlarında ve  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında kurutma kabini en yüksek ÖNÇÖ (SMER) değerlerine sahiptirler. Elmanın kurutulması işleminde en yüksek ÖNÇÖ (SMER) değeri  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızı,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer ÖNÇÖ (SMER) =94,082 gr-su/ kW-h'dır. Kayısının kurutulması işleminde en yüksek ÖNÇÖ (SMER) değeri  $V_5=0,6$  m/s kurutma havası hızı,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer ÖNÇÖ (SMER) =70,769 gr-su/ kW-h'dır. Patatesin kurutulması işleminde en yüksek ÖNÇÖ (SMER) değeri  $V_2=0,3$  m/s kurutma havası hızı,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer ÖNÇÖ (SMER) =92,071 gr-su/ kW-h'dır. Bu şartlarda Kw-h başına maksimum miktarda üründen su buharlaştırılmıştır.

### **Kurutma Kabini Enerji Analizi Sonuçları (COP<sub>kk</sub>)**

Kurutma kabiniinde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası hızlarında ve  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında kurutma kabini en yüksek COP<sub>kk</sub> değerlerine sahiptirler. Elmanın kurutulması işleminde en yüksek

$COP_{kk}$  değeri  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızı,  $T_4=60$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $COP_{kk}=17,3004$ 'dir. Kayısının kurutulması işleminde en yüksek  $COP_{kk}$  değeri  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızı,  $T_3=50$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $COP_{kk}=17,146$ 'dir. Patatesin kurutulması işleminde en yüksek  $COP_{kk}$  değeri  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızı,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $COP_{kk}=17,941$ 'dir. Bu şartlarda kurutma kabini en yüksek verimlilikte çalışmaktadır.

### **Isıtma Bölümü Enerji Analizi Sonuçları ( $COP_{IP}$ )**

Kurutma kabininde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında genel olarak  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında ısıtma bölümünde yüksek  $COP_{IP}$  değerleri elde edilmektedir. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında elmanın kurutulmasında en yüksek  $COP_{IP}$  değerine sahip olmaktadır ve bu değer  $COP_{IP}=2,176$ 'dir. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında kayısının kurutulmasında en yüksek  $COP_{IP}$  değerine sahip olmaktadır ve bu değer  $COP_{IP}=2,062$ 'dir. Kuruma süresi sonunda  $V_5=0,6$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında patatesin kurutulmasında en yüksek  $COP_{IP}$  değerine sahip olmaktadır ve bu değer  $COP_{IP}=1,874$ 'dir. Bu şartlar altında ısıtma bölümü en yüksek verimlilikte çalışmaktadır.

### **Soğutma ve Nem Alma Bölümü Enerji Analizi Sonuçları ( $COP_{SM}$ )**

Kurutma kabininde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında genel olarak  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında soğutma ve nem alma bölümünde yüksek  $COP_{SM}$  değerleri elde edilmektedir. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında elma en yüksek  $COP_{SM}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{SM}=3,762$ 'dir. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında kayısı en yüksek  $COP_{SM}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{SM}=4,544$ 'dir. Kuruma süresi sonunda  $V_5=0,6$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında patates en yüksek

$COP_{SM}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{SM} = 4,444$ 'dir. Bu şartlar altında soğutma ve nem alma bölümü en yüksek verimlilikte çalışmaktadır.

### **Kurutma Kabini Ekserji Analizi Sonuçları ( $COP_{Ex,kk}$ , $EX_{kk,yo}$ )**

Kurutma kabininde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası hızlarında ve  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında kurutma kabini en yüksek  $COP_{Ex,kk}$  değerlerine sahiptirler. Elmanın kurutulması işleminde en yüksek  $COP_{Ex,kk}$  değeri  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızı,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $COP_{Ex,kk}=2,215$ 'dir. Kayısının kurutulması işleminde en yüksek  $COP_{Ex,kk}$  değeri  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızı,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $COP_{Ex,kk}=2,275$ 'dir. Patatesin kurutulması işleminde en yüksek  $COP_{Ex,kk}$  değeri  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızı,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $COP_{Ex,kk} = 2,276$ 'dir. Bu şartlarda kurutma kabini en yüksek verimlilikte çalışmaktadır.

Kurutma kabininde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası hızlarında ve  $T_1=30$  °C kurutma havası sıcaklığında kurutma kabini yaklaşık olarak en düşük  $EX_{kk,yo}$  değerlerine sahiptirler. Elmanın kurutulması işleminde en düşük  $EX_{kk,yo}$  değeri  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızı,  $T_3=50$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $EX_{kk,yo} = 0,001012$  kW'dır. Kayısının kurutulması işleminde en düşük  $EX_{kk,yo}$  değeri  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızı,  $T_1=30$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $EX_{kk,yo} = 0,003011$  kW'dır. Patatesin kurutulması işleminde en düşük  $EX_{kk,yo}$  değeri  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızı,  $T_2=40$  °C kurutma havası sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir ve bu değer  $EX_{kk,yo} = 0,000287$  kW'dır. Bu şartlarda kurutma kabini en yüksek verimlilikte çalışmaktadır ve ekserji yok oluşu değerleri de minimum seviyelerde seyretmektedir.

### **Isıtma Bölümü Ekserji Analizi Sonuçları ( $COP_{Ex,IP}$ , $Ex_{is,yo}$ )**

Kurutma kabininde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında genel olarak  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında ısıtma bölümünde yüksek  $COP_{Ex,IP}$  değerleri elde edilmektedir. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında elmanın kurutulmasında en yüksek  $COP_{Ex,IP}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{Ex,IP} =0,186$ 'dir. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında kayısının kurutulmasında en yüksek  $COP_{Ex,IP}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{Ex,IP} =0,182$ 'dir. Kuruma süresi sonunda  $V_5=0,6$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında patatesin kurutulmasında en yüksek  $COP_{Ex,IP}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{Ex,IP} =0,158$ 'dir. Bu şartlar altında ısıtma bölümü en yüksek verimlilikte çalışmaktadır.

Kurutma kabininde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında genel olarak  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızında ısıtma bölümünde düşük  $Ex_{is,yo}$  değerleri elde edilmektedir. Kuruma süresi sonunda  $V_3=0,4$  m/s kurutma havası hızında,  $T_1=30$  °C kurutma havası sıcaklığında elmanın kurutulmasında en düşük  $Ex_{is,yo}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $Ex_{is,yo} =0,000118$  kW'dır. Kuruma süresi sonunda  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızında,  $T_1=30$  °C kurutma havası sıcaklığında kayısının kurutulmasında en düşük  $Ex_{is,yo}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu  $Ex_{is,yo} =0,00058$  kW'dır. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_1=30$  °C kurutma havası sıcaklığında patatesin kurutulmasında en düşük  $Ex_{is,yo}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $Ex_{is,yo} =0,000144$ 'kW'dır. Bu şartlar altında ısıtma bölümü en yüksek verimlilikte çalışmaktadır ve ekserji yok oluşu değerleri de minimum seviyelerde seyretmektedir.

### **Soğutma ve Nem Alma Bölümü Ekserji Analizi Sonuçları ( $COP_{Ex,SM}$ , $Ex_{sg,yo}$ )**

Kurutma kabininde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında genel olarak  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında soğutma ve nem alma bölümünde yüksek  $COP_{Ex,SM}$  değerleri elde edilmektedir. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma

havası sıcaklığında elmanın kurutulmasında en yüksek  $COP_{Ex,SM}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{Ex,SM} = 0,248$ 'dir. Kuruma süresi sonunda  $V_6=0,7$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında kayısının kurutulmasında en yüksek  $COP_{Ex,SM}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{Ex,SM} = 0,335$ 'dir. Kuruma süresi sonunda  $V_4=0,5$  m/s kurutma havası hızında,  $T_5=70$  °C kurutma havası sıcaklığında patatesin kurutulmasında en yüksek  $COP_{Ex,SM}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $COP_{Ex,SM} = 0,341$ 'dir. Bu şartlar altında soğutma ve nem alma bölümü en yüksek verimlilikte çalışmaktadır.

Kurutma kabiniinde ürünlerin kurutulmasında; kurutma işlemi sonunda bütün kurutma havası sıcaklıklarında genel olarak  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızında soğutma ve nem alma bölümünde düşük  $Ex_{sg,yo}$ , değerleri elde edilmektedir. Kuruma süresi sonunda  $V_2=0,3$  m/s kurutma havası hızında,  $T_4=50$  °C kurutma havası sıcaklığında elmanın kurutulmasında en düşük  $Ex_{sg,yo}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $Ex_{sg,yo} = 0,002666$  kW'dır. Kuruma süresi sonunda  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızında,  $T_1=30$  °C kurutma havası sıcaklığında kayısının kurutulmasında en düşük  $Ex_{sg,yo}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $Ex_{sg,yo} = 0,002235$  kW'dır. Kuruma süresi sonunda  $V_1=0,2$  m/s kurutma havası hızında,  $T_4=60$  °C kurutma havası sıcaklığında patatesin kurutulmasında en yüksek  $Ex_{sg,yo}$  değeri ortaya çıkmıştır ve bu değer  $Ex_{sg,yo} = 0,000999$  kW'dır. Bu şartlar altında soğutma ve nem alma bölümü en düşük verimlilikte çalışmaktadır ve ekserji yok oluşu değerleri de minimum seviyelerde seyretmektedir.



## 7. KAYNAKLAR

1. Yağcıoğlu, A., Ürün İşleme Tekniği. Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayınları No:536, İzmir, 1996.
2. Cemeroğlu, B., Karadeniz F. ve Özkan M. Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi, Bölüm: Kurutma Teknolojisi. Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, No: 28, s541-675, 2003.
3. Yılmaz, H., Güneş Pili Tahrikli Model Bir Güneşli Kurutucunun Geliştirilmesi ve Kurutulmuş Domates Üretiminde Teorik ve Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2000.
4. Anonim, Preservation of Fruits and Vegetables by Drying III UNISWORK, 2004.
5. Dadalı, G., Bamyacı ve Ispanağın Mikrodalga Tekniğini Kullanarak Kurutulması, Doku ve Renk Özelliklerinin İncelenmesi ve Modellenmesi., Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 195s, 2007.
6. Gongora-Nieto MM., Vega-Mercado H. and Barbosa-Canovas G.V., Advances in dehydration of foods. Journal of Food Engineering, 49, 271-289, 2001.
7. Barbosa – Canovas, G. V. and Vega – Mercado, H. Dehydration of Foods, Chapman & Hall Publication., First Edition, New York, 327s, 1996.
8. Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M.M. and Barbosa-Canovas G.V., Advances in Dehydration of Foods. Journal of Food Engineering 49(4):271-289, 2001.
9. Anonim, Türkiye Kurutulmuş Meyve ve Sebze İhracatı Verileri. Devlet İstatistik Enstitüsü Bilgi İşlem Merkezi (DİE BİM) Kayıtları, 2007.
10. Hatipoğlu, N. Ozmatik Ön İşlemlerin Kayısı ve Kavunların Kurutulması ve Depolanma Stabilesine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2002.
11. Doymaz, İ., Üzüm ve Kahramanmaraş Biberinin Kurutma Karakteristiklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi , Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
12. Boutelba, I., Zid, S., Glouannec, P., Youcef-ali, S., Magueresse, A., & Kimouche, N. Thermo-Hydrous Behavior of Dried Un-Blanched Potato Samples. Journal of Food Engineering, 240, 160–170, 2019.
13. Sing, P., and Talukdar, P., Design and Performance Evaluation of Convective Drier and Prediction of Drying Characteristics of Potato Under Varying

Conditions, International Journal of Thermal Sciences Volume 142, Pages 176-187, August 2019.

14. J.E. González-Pérez, E.M. López-Méndez, C.E. Ochoa-Velasco, I.I. Ruiz-López, Mass Transfer and Morphometric Characteristics of Fresh and Osmodehydrated White Mushroom Pilei During Convective Drying, Journal of Food Engineering, Volume 262, , Pages 181-188, December 2019.
15. Yogendrasasidhar, D., & Setty, Y. P., Experimental Studies And Thin Layer Modeling of Pearl Millet Using Continuous Multistage Fluidized Bed Dryer Staged Externally. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2018.
16. Tekgöl, Y., Limon Kabuğunun Farklı Kurutma Yöntemleriyle Optimum Kurutma Koşullarının Belirlenmesi ve Kurutma Yöntemlerinin Bazı Kalite Özellikleri ile Uçucu Bileşenler Üzerine Etkileri, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir 2019.
17. Yaşar, A., Altın Çilekte (*physalis peruviana* l.) Farklı Kurutma Koşullarının Kuruma Özellikleri ve Ürün Kalitesine Etkisi, Gazi Osmanpaşa Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Tokat, 2019.
18. Mohammadi, I., Tabatabaekoloor, R., Motevali, A., Effect of Air Recirculation and Heat Pump on Mass Transfer and Energy Parameters in Drying of Kiwifruit Slices, Energy, 2018.
19. Kaveh, M., Rasooli Sharabiani, V., Amiri Chayjan, R., Taghinezhad, E., Abbaspour-Gilandeh, Y., & Golpour, I. ANFIS and ANNs Model For Prediction of Moisture Diffusivity And Specific Energy Consumption Potato, Garlic and Cantaloupe Drying Under Convective Hot Air Dryer. Information Processing in Agriculture, 5(3), 372–387, 2018.
20. Majdi, H., Esfahani, J. A., & Mohebbi, M., Optimization of Convective Drying by Response Surface Methodology. Computers and Electronics in Agriculture, 156, 574–584, 2018.
21. Winiczenko, R., Górnicki, K., Kaleta, A., Martynenko, A., Janaszek-Mańkowska, M., & Trajer, J., Multi-objective Optimization of Convective Drying of Apple Cubes. Computers and Electronics in Agriculture, 145, 341–348, 2018.
22. Younis, M., Abdelkarim, D., & Zein El-Abdein, A. Kinetics and Mathematical Modeling of Infrared Thin-Layer Drying of Garlic Slices. Saudi Journal of Biological Sciences, 25(2), 332–338, 2018.
23. Gül, C., Mandarin Meyvesinin Dilimlenerek Kurutulması ve Kurutma Kriterlerinin Optimizasyonu, S.D.Ü., Fenbilimleri Enstitüsü, Isparta, 2018.

24. Benseddik, A., Azzi, A., Zidoune, M. N., & Allaf, K. Mathematical Empirical Models of Thin-Layer Airflow Drying Kinetics of Pumpkin Slice. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2018.
25. Agrawal, S. G., & Methekar, R. N. Mathematical Model For Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Pumpkin. *Food and Bioprocess Processing*, 101, 68–73, 2017.
26. Khan, M. I. H., Kumar, C., Joardder, M. U. H., & Karim, M. A. Determination Of Appropriate Effective Diffusivity for Different Food Materials. *Drying Technology*, 35(3), 335–346, 2016.
27. Aral, S., & Beşe, A. V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of Experimental Parameters on Drying Kinetics, Color, Shrinkage, and Rehydration Capacity. *Food Chemistry*, 210, 577–584, 2016.
28. Tzempelikos, D. A., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., & Margaris, D. P. Experimental Study on Convective Drying Of Quince Slices and Evaluation of Thin-Layer Drying Models. *Engineering in agriculture, Environment and Food*, 8(3), 169–177, 2015.
29. Kumar, C., Millar, G. J., & Karim, M. A. Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material. *Drying Technology*, 33(2), 227–237, 2014.
30. Silva, V., Figueiredo, A. R., Costa, J. J., & Guiné, R. P. F. Experimental and Mathematical Study of the Discontinuous Drying Kinetics of Pears. *Journal of Food Engineering*, 134, 30–36, 2014.
31. Golestani, R., Raisi, A., & Aroujalian, A. Mathematical Modeling on Air Drying of Apples Considering Shrinkage and Variable Diffusion Coefficient. *Drying Technology*, 31(1), 40–51. 2013.
32. Akpınar, E.K., Biçer, Y., Tarımsal Ürünlerin Kurutulmasında Siklon Tipi Bir Kurutucunun Kullanılabilirliği, *Mühendis ve Makine*, Aralık 2002, Sayı: 515, Ankara, 2002.
33. Akpınar, E.K., Biçer, Y., Siklon Tipi Bir Kurutucuda Kabağın Kuruma Davranışının İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1), 159-169, 2003.
34. Aktaş M., Ceylan İ., Isı Pompası Destekli Bir Kurutucuda Fındık Kurutulması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 23, No 1*, 215-222, 2008.
35. Azzouz, S., Guazini, A., Jomaa, W. ve Belghith, A., Moisture Diffusivity and Drying Kinetic Equation of Convective Drying of Grapes, *J. Food Eng.*, 55, 323-330, 2002.

36. Babalis, S.J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., ve Belessiotis V.G., Evaluation of Thin Layer Drying Models for Describing Drying Kinetics of Figs, *J. Food Eng.*, 75, 205, 214, 2006.
37. Babalis S.J. ve Belessiotis V.G., 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, 2004.
38. Bozkır, O., Thin Layer Drying and Mathematical Modelling for Washed Dry Apricots, *J. Food Eng.*, 77, 146-151, 2006.
39. Can, A., An Analytical Method for Determining The Temperature Dependent Moisture Diffusivities of Pumpkin Seeds During Drying Process, *Appl. Therm. Eng.*, 27, 682-687, 2007.
40. Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., Isı Pompalı Kurutma Odasında Elma Kurutulması. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 25 (2): 9-14s, 2005.
41. Demir, V., Günhan, T., Yağcıoğlu, A.K., ve Değirmencioğlu, A., Mathematical Modelling and the Determination of Some Quality Parameters of Air-dried bay leaves. *Biosystems Engineering*, 88: 325-335, 2004.
42. Doymaz, İ. Drying Kinetics of White Mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61: 341-346, 2004a.
43. Doymaz, İ., Drying Characteristics and Kinetics of Okra. *Journal of Food Engineering*, 62, 150-156, 2004b.
44. Doymaz, İ. Drying Kinetics and Characteristics of Parsley. *Biosystems Engineering*, 89(2): 167-173, 2005a.
45. Doymaz, İ., Thin-Layer Drying Behaviour of Mint Leaves. *Journal of Food Engineering*, 74, 370-375, 2006.
46. Doymaz, I. Air Drying Characteristics of Tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78, 1291-1297, 2007.
47. Doymaz, İ., Influence of Blanching and Slice Thickness on Drying Characteristics of Leek Slices. *Chemical Engineering and Processing*, 47, 41–47, 2008.
48. El-Aouar, A.A., Azoubel, A.M. ve Murr, F.E.X., Drying Kinetics of Fresh and Osmotically Pre-Treated Papaya (*Carica Papaya L.*), *J. Food Eng.*, 59, 85-91, 2003.
49. Erenturk, S., Gulaboglu, M.S. ve Gultekin, S., The Thin-Layer Drying Characteristics of Rosehip, *Biosyst. Eng.*, 89, 2, 159–166, 2004.

50. Ertekin, C., Yıldız, O., Möhlbauer, W., İncirin Kuruma Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Kuruma Davranışının Belirlenmesi. Tarımsal Mekanizasyon 20. Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, 405 — 411, Şanlıurfa, 2001.
51. Gamboa-Santos, J., Soria, A. C., Fornari, T., Villamiel, M., and Montilla, A., Optimisation of Convective Drying of Carrots Using Selected Processing and Quality Indicators. International Journal of Food Science & Technology, 48(10), 1998-2006, 2013.
52. Garau, M.C., Simal, S., Femenia, A. ve Rossello, C., Drying of Orange Skin: Drying Kinetics Modelling and Functional Properties, J. Food Eng., 75, 288-295, 2006.
53. Giraldo-Zuniga, A., Arevalo-Pinedo, A., Rezende, J. R., Silva, C.S. ve Monteiro, J.A., Drying Kinetics of Murici (Byrsonima Crassifolia) Fruit, J. Food. Process Eng., 30, 699-705, 2006.
54. Göğüş, F. ve Maskan, M., Air Drying Characteristics of Solid Waste (Pomace) of Olive Oil Processing, J. Food Eng., 72, 378-382, 2006.
55. Guine, R.P.F. ve Fernandes, R.M.C., Analysis of The Drying Kinetics of Chestnuts, J. Food Eng., 76, 460-467, 2006.
56. Guine, R.P.F., Moisture Diffusivity in Pears: Experimental Determination and Derivation of A Mathematical Prediction Model, Int. J. Food Sci. Tech., 41, 1117- 1181, 2006.
57. Hatamipour, M.S. ve Mowla, D., 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, 2003.
58. Hawlader, M.N.A., Uddin, M.S., Ho, J.C. ve Teng, A.B.W., Drying Characteristics of Tomatoes, J. Food Eng., 14, 259-268, 1991.
59. Iguaz, A., San Martin, M.B., Mate, J.I., Fernandez, T. ve Virseda, P., Modelling Effective Moisture Diffusivity of Rough Rice (Lido Cultivar) at Low Drying Temperatures, J. Food Eng., 59, 253-258, 2003.
60. Isaeva, J., Kayısı Kurutmasının Deneysel ve Teorik Olarak Araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 110s., 2007.
61. Kaleemullah, S. ve Kailappan, R., Modelling of Thin-Layer Drying Kinetics of Red Chillies, J. Food Eng., 76, 531-537, 2006.
62. Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. ve Tabil, L.G., Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Pistachio Nuts, J. Food Eng., 78, 98–108, 2007.

63. Kashaninejad, M. ve Tabil, L.G., Drying Characteristics of Purslane (*Portulaca Oleracea* L.), *Dry. Technol.*, 22, 9, 2183-2200, 2004.
64. Kaya, A., Aydin, O., Demirtas, C. ve Akgun, M., An Experimental Study on The Drying Kinetics of Quince, *Desalination*, 212, 328-343, 2007a.
65. Kaya, A., Aydin, O. ve Demirtaş, C., Drying Kinetics of Red Delicious Apple, *Biosyst. Eng.*, 96, 4, 517-524, 2007b.
66. Kingsly, R.P., Goyal, R.K., Manikantan, M.R. ve Ilyas, S.M., Effects of Preatreatments and Drying Air Temperature on Drying Behaviour of Peach Slice, *Int. J. Food Sci. Tech.*, 42, 65-69, 2007.
67. Kiranoudis, C.T., Tsami, E., Maroulis, Z.B. ve Marinos-Kouris, D., Drying Kinetics of Some Fruits, *Dry. Technol.*, 15, 5, 1399-1418, 1997.
68. Krokida, M.K., Karathanos V.T., Maroulis Z.B. ve Kouris D.M., Drying Kinetics of Some Vegetables, *J. Food Eng.*, 59, 391-403, 2003.
69. Lahsasni, S., Kouhila M, Mahrouz M, Idlimam A, Jamali, A., Thin Layer Convective Solar Drying and Mathematical Modeling of Prickly Pear Peel (*Opuntia Ficus Indica*).*Energy*, 29: 211-224, 2004a.
70. Lahsasni, S., Kouhila M, Mahrouz M, Jaouhari J.T., Drying Kinetics of Prickly Pear Fruit (*Opuntica ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61 (2): 173–179, 2004b.
71. Leeratanarak, N., Devahastin, S. ve Chiewchan, N., Drying Kinetics and Quality of Potato Chips Undergoing Different Drying Techniques, *J. Food Eng.*, 77, 645-643, 2006.
72. Lopes, E. J., Zepka, L. Q., Pinto, L. A. A. ve Queiroz, M. I., Characteristics of Thin Layer Drying of The Cyanobacterium *Aphanothece Microscopica* Nageli, *Chem. Eng. Process.*, 46, 63-69, 2007.
73. Lopez, A., Pique, M.T., Boatella, J., Ferran, A., Garcia, J. ve Romera, A., Drying Characteristics of The Hazelnut, *Dry. Technol.*, 16, 3-5, 627-649, 1998.
74. Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A. ve Virseda, P., Thin Layer Drying Behaviour of Vegetable Wastes from Wholesale Market, *Dry. Technol*, 18, 4-5, 995-1006, 2000.
75. Madamba, P. S., Driscoll R. H., Buckle K. A., The Thin-Layer Drying Charecteristics Of Garlic Slices. *J. Of Food Engineering*, 29, 75 – 97, 1996.
76. Margaris, D.P. ve Ghiaus, A.G., Experimental Study of Hot Air Dehydration of Sultana Grapes, *J. Food Eng.*, 79, 1115-1121, 2007.

77. Marquez, C.A., De Michelis, A. ve Giner, S.A., Drying Kinetics of Rose Hip Fruits, *J. Food Eng.*, 77, 566-574, 2006.
78. Maskan, A., Kaya, S. ve Maskan, M., Hot Air Drying of Grape Leather (Pestil), *J. Food Eng.*, 54, 81-88, 2002b.
79. Mengeş, H., “Konya Bölgesinde Yetiştirilen Bazı Meyvelerin Kontrollü Şartlar Altında Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 1999.
80. Mengeş, H., Patatesin Farklı Kurutma Şartlarındaki Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Konya, 2005.
81. Mengeş, H., Ertekin, C., Haciseferoğulları, H., Gezer, İ., Malatya İlinde Yetiştirilen Hacıhaliloğlu Çeşidi Kayısının Kurutma Kinetiğinin İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 21(42), 84-88, 2007a.
82. Menges, H. O. ve Ertekin, C., Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Golden Apples, *J. Food Eng.*, 77, 119-125, 2006.
83. Mirzaeel, E., Rafieel S., Keyhanil A., Emam-Djomeh Z., Determining of Moisture Diffusivity and Activation Energy in Drying of Apricots, *Research in Agricultural Engineering Agricultural Journals.*, 55, 2009 (3): 114-120, 2009.
84. Mohapatra, D. ve Rao, P.S., A Thin Layer Drying Model of Parboiled Wheat, *J. Food Eng.*, 66, 513–518, 2005.
85. Müller, J., Convective Drying of Medicinal, Aromatic and Spice Plants: a Review. Hohenheim Üniversitesi, Germany, 2007.
86. Mwithiga, G., Olwal, J.O., The Drying Kinetics of Kale in A Convective Hot Air Dryer, *J. Of Food Sci.* 71:373-378, 2005.
87. Orikasa, T., Wu L., Shiina, T., Tagawa, A., Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 85: 303-308, 2008
88. Pahlavanzadeh, H., Basiri, A. ve Zarrabi, M., Determination of Parameters and Pretreatment Solution for Grape Drying, *Dry. Technol.*, 19, 1, 217-226, 2001.
89. Panchariya, P.C., Popovic, D. ve Sharma, A.L., Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying Process, *J. Food Eng.*, 52, 349-357, 2002.
90. Pathare, P. B. ve Sharma, G.P., Effective Moisture Diffusivity of Onion Slices Undergoing Infrared Convective Drying, *Biosyst. Eng.*, 93, 3, 285–291, 2006.

91. Sacılık, K., Keskin, R. and Eliçin, A.K. Mathematical Modelling of Solar Tunnel Drying of Thin Layer Organic Tomato. *Journal of Food Engineering*, 73 : 231-238, 2006.
92. Sankat, C.K., Castaigne, F. ve Maharaj, R., The Air Drying Behaviour of Fresh and Osmotically Dehydrated Banana Slices, *Int. J. Food Sci. Tech.*, 31, 123-135, 1996.
93. Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G. ve Wijesinghe, B., Influence of Shapes of Selected Vegetable Materials on Drying Kinetics During Fluidized Bed Drying, *J. Food Eng.*, 58, 277-283, 2003.
94. Simal S, Deya E, Frau M, Rossello C “Simple Modeling of Air Drying Curves of Fresh and Osmotically Pre-Dehydrated Apple Cubes” *Journal of Food Engineering*, 33:139–150, 1997.
95. Simal, S., Rossello, C., Berna, A. ve Mulet, A.,. Drying of Shrinking Cylinder-Shaped Bodies, *J. Food Eng*, 37, 423-435, 1998a.
96. Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C. ve Rossello, C., Use of Exponential, Page’s and Diffusional Models to Simulate The Drying Kinetics of Kiwi Fruit, *J. Food Eng.*, 66, 323-328, 2004.
97. Simal, S., Femenia, A., Carcel, J.A. ve Rossello, C., Mathematical Modelling of The Drying Curves of Kiwi Fruits: Influence of The Ripening Stage, *J. Sci. Food Agr.*, 85, 425-432, 2005.
98. Singh, B. ve Gupta, A.K., Mass Transfer Kinetics and Determination of Effective Diffusivity During Convective Dehydration of Pre-Osmosed Carrot Cubes, *J. Food Eng.*, 79, 459-470, 2007.
99. Srikiatden, J. ve Roberts, J.S., Measuring Moisture Diffusivity of Potato and Carrot (Core And Cortex) During Convective Hot Air and Isothermal Drying, *J. Food Eng.*, 74, 143–152, 2006.
100. Sturm, B., Hofacker, W. C, and Hensel, O., Optimizing The Drying Parameters for Hot-Air-Dried Apples. *Drying Technology*, 30(14), 1570-1582, 2012.
101. Unadi, A., Fuller, R.J., Macmillan, R.H., Strategies For Drying Tomatoes in a Tunnel Dehydrator. *Drying Technology*, 20(7): 1407-1425, 2002.
102. Vega, A., Fito, P., Andres, A. ve Lemus, R., Mathematical Modeling of Hot-Air Drying Kinetics of Red Bell Pepper (Var. Lamuyo), *J. Food Eng.*, 79, 1460-1466, 2007.
103. Vagenas, G., Marinos–Kouris, D., Drying Kinetics Of Apricots. *Drying Technology*, 9(3): 735 – 752, 1991.



104. Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. ve Hu, X., Mathematical Modeling on Hot Air Drying of Thin Layer Apple Pomace, *Food Res. Int.*, 40, 39-46, 2007.
105. Kılıç, E.E., Çınar, İ., Convective Hot Air Drying Characteristics of Selected Vegetables, Gaziantep University and Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Food Engineering, 2019.
106. Uğur, E., Farklı Sıcaklıklarda Kurutmanın Madımak Bitkisinin (*Polygonum Cognatum*) Kuruma Kinetiği ve Bazı Kalite Parametreleri Üzerine Etkisi, S.C.Ü. Fenbilimleri Enstitüsü, Sivas, 2019.
107. Keneni, Y. G., Hvoslef-Eide, A. K. (Trine), & Marchetti, J. M., Mathematical Modelling of The Drying Kinetics of *Jatropha Curcas* l. Seeds. *Industrial Crops and Products*, 132, 12–20, 2019.
108. Szychowski, P. J., Lech, K., Sendra-Nadal, E., Hernández, F., Figiel, A., Wojdyło, A., and Carbonell-Barrachina, Á. A. Kinetics, Biocompounds, Antioxidant Activity, and Sensory Attributes of Quinces as Affected by Drying Method. *Food Chemistry*, 255, 157-164, 2018.
109. Rabha, D. K., Muthukumar, P., & Somayaji, C. Experimental Investigation of Thin Layer Drying Kinetics of Ghost Chilli Pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) Dried in a Forced Convection Solar Tunnel Dryer. *Renewable Energy*, 105, 583–589. 2017.
110. Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A., & Nayak, P. K. Drying Kinetics And Quality Analysis of Black Turmeric ( *Curcuma Caesia*) Drying in a Mixed Mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 120, 23–34, 2018.
111. Ayensu, A., Dehydration of Food Crops Using A Solar Dryer with Convective Heat Flow. *Solar Energy*, 59 (4-6), 121-126, 1997.
112. Liu, Q. ve Bakker-Arkema, F. W., 1997. Stochastic Modeling of Grain Drying, Part 2 Model Development, *J. Agr. Eng. Res.*, 66, 275–280, 1997.
113. Tırıs, M., Tırıs, Ç., Edin, M., İki Ayrı Tip Güneşli Kurutucuda Çeşitli Meyve ve Sebzelerin Kuruma Eğrilerinin İncelenmesi. *Isı bilimi ve Tekniği Dergisi*, 17,27-32, 1994.
114. Aghbashlo M., Kianmehr M H, Arabhosseini A. Modeling of Thin-Layer Drying of Potato Slices in Length of Continuous Band Dryer. *Energy Conversion and Management*, 50: 1348-1355, 2009.

115. Akpınar, E.K., Mathematical Modelling of Thin Layer Drying Process Under Open Sun of Some Aromatic Plants. *Journal of Food Engineering*, 77, 864-870, 2006b.
116. Al-Muhtaseb A.H., Al-Harashsheh M, Hararah M, Magee TRA Drying Characteristics And Quality Change of Unutilized- Protein Rich-Tomato Pomace With and Without Osmotic Pre-Treatment. *Industrial Crops and Products*, 31: 171-177, 2010.
117. Doymaz, İ., Pala, M., Hot-Air Drying Characteristics of Red Paper. *Journal of Food Engineering*, 55, 331-335, 2002.
118. Doymaz, İ., Drying Behaviour of Green Beans. *Journal of Food Engineering*, 56, 101-107, 2004c.
119. Doymaz, I., Air Drying Characteristics of Thin Layer Carrots. *Journal of Food Eng.* 61: 359-364, 2004d.
120. Ertekin, C., Yaldiz, O., Drying of Eggplant and Selection of A Suitable Thin Layer Drying Model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359, 2004.
121. Günhan, T., Farklı Kurutma Havası Şartlarının Rio Grande Çeşidi Domatesin Kuruma Karakteristiklerine Etkilerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 124s, 2005.
122. Queiroz, R., Gabas A.L., Telis, V.R.N., Drying Kinetics of Tomato by Using Electric Resistance and Heat Pump Dryers. *Drying Technology*, 22(7): 1603-1620, 2004.
123. Tunde-Akintunde, T.Y. ve Ajala, A., “Air Drying Characteristics of Chili Pepper”, *International Journal of Food Engineering*, 6(1): Article 7, 2010.
124. Karathanos, V.T., Belessiotis V.G., Application of a Thin Layer Equation to Drying Data of Fresh and Semi-Dried Fruits. *JOURNAL of Agricultural Engineering Research*, 74:355–361, 1999.
125. Park, K.J., Vohnikova, Z. ve Brod, F.P.R., Evaluation of Drying Parameters and Desorption Isotherms of Garden Mint Leaves (*Mentha Crispa L.*), *J. Food Eng.*, 51,193-199, 2002.
126. Ertekin. C., Yaldız O, Patlıcan Kurutmada Kurumanın Çeşitli Modeller İle Açıklanması Tarımsal Mekanizasyon 20. Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, 399-404, Şanlıurfa, 2001.
127. Mengeş, H.O., Ertekin C., Aydın C., Elma Dilimlerinin Konveksiyonla Kurmasına Uygun Kuruma Modelinin Belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 1(3): 229-236, 2005.

128. Arıcı, R.Ç., Mantarın (*Agaricus Bisporus*) Kontrollü Şartlar Altında Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006.
129. Purkayastha, M.D., Nath, A., Deka, B.C., Mahanta, C.L., Thin Layer Drying of Tomato Slices, *J. Food Sci. Tech.*, 50(4), 642-653, 2013.
130. Singh NJ and Pandey RK.. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas L.*). *Food Bioprod Proc*, in press. 2011.
131. Chinnan, M.S., Evaluation of Selected Mathematical Models for Describing Thin Layer Drying of in-Shell Pecans, *Transactions of The ASAE*, 27, 2, 610–615, 1984.
132. Pal, U. S. and A. Chakraverty. Thin-layer Convection Drying of Mushrooms. *Energy Conversion and Management* 38(2): 107-113, 1997.
133. Rahman M S, Perera C.O., Thebaud C., Desorption Isotherm and Heat Pump Drying Kinetics of Peas. *Food Research International*, 30(7): 485–491, 1998.
134. Sacılık K., The Thin-Layer Modelling of Tomato Drying Process, *Agriculturae Conspectus Scientificus* | Vol. 72 No. 4 (343-349), 2007.
135. Toğrul, İ.T., D. Pehlivan, Modelling of Drying Kinetics of Single Apricot. *Journal of Food Engineering*, 58:23-32, 2002.
136. Goyal R.K, Kingsly A R P, Manikantan M R, Ilyas S M Mathematical Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Plum in a Tunnel Dryer. *Journal of Food Engineering*, 79:176-180, 2007.
137. Yağcıoğlu, A., Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 536, İzmir, 1999.
138. Kumar, N., Sarkar B.C. & Sharma H.K. Mathematical Modelling of Thin Layer Hot Air Drying of Carrot Pomace. *Journal of Food Science and Technology* 17:33-41, 2012.
139. Dandamrongrak, R., Young, G. ve Mason, R., Evaluation of Various Pre-Treatment for Dehydration of Banana and Selection of Suitable Drying Models, *J. Food Eng.*, 55, 139–146, 2002.
140. Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S., Wutiwiwatchai, W., Fluidised Bed Drying of Soybeans. *Journal of Stored Products Research*, 37(2): 133-151, 2001.
141. Özdemir M, Devres YO. 1999. The Thin Layer Drying Characteristics of Hazelnuts During Roasting. *J. Food Eng*, 42, 225-233.

142. Chen C, Wu P.C., Thin Layer Drying Model For Rough Rice With High Moisture Content, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(1): 45–52, 2001.
143. Wang, C.Y.ve Singh, R.P., A Single Layer Drying Equation for Rough Rice, ASAE,St.Joseph, MI, USA, 1978.
144. Doymaz, İ., Sun Drying of Figs: an Experimental Study. *Journal of Food Engineering*, 71, 403-407, 2005b.
145. Verma, L.R., Bucklin, R.A, Endan, J.B., Wratten F.T., Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models. *Transactions of the ASAE*, 28: 296–301, 1985.
146. Karathanos, V.T., Belessiotis V.G., Application of a Thin Layer Equation to Drying Data of Fresh and Semi-Dried Fruits. *JOURNAL of Agricultural Engineering Research*, 74:355–361, 1999.
147. Toğrul İT, Pehlivan D. Modeling of Drying Kinetics of Single Apricot. *Journal of Food Engineering*. 58, 23-32, 2003.
148. Mengeş, H., Ertekin, C., Vişne Kurutmada Kurumanın Çeşitli Modellerle Açıklanması. *Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(42), 4-10, 2007b.
149. Midilli, A., Kucuk H., Yapar Z., A New Model for Single Layer Drying. *Drying Technology*, 20(7): 1503-1513, 2002.
150. Thompson, T.L., Peart,R.M.,Foster,G.H., Mathematical Simulation of Corn Drying a New Model.*Transactions of the ASAE*,11:582-586, 1968.
151. Pardeshi, I.L., Arora, S. ve Borker, P.A., “Thin-Layer Drying of Green Peas and Selection of a Suitable Thin-Layer Drying Model”, *Drying Technology*, 27:288-295, 2009.
152. Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L. ve Hamdy, M. Y., A Model For Ear Corn Drying, *Transactions of The ASAE*, 23, 5, 1261–1265, 1980.
153. Duan, Q., Wang, D., Li, X., Li, Y., & Zhang, S. Thermal Characteristics of a Novel Enclosed Cascade-Like Heat Pump Dryer Used in a Tunnel Type Drying System. *Applied Thermal Engineering*, 155, 206–216, 2019.
154. Daş, M., Güneş Takip Mekanizmalı Bir Kurutma Sisteminin Performans Ve Optimum Çalışma Şartlarının Belirlenmesi, Fırat Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi., Elazığ, 2019.
155. Karthikeyan, A. K., & Murugavelh, S., Thin Layer Drying Kinetics and Exergy Analysis of Turmeric ( *Curcuma Longa* ) in a Mixed Mode Forced Convection Solar Tunnel Dryer. *Renewable Energy*, 128, 305–312, 2018.

156. Azadbakht, M., Aghili, H., Ziaratban, A. and Torshizi, M.V., Application of Artificial Neural Network Method to Exergy and Energy Analyses of Fluidized Bed Dryer For Potato Cubes, *Energy*, 120, 947-958, 2017.
157. Rabha, D. K., Muthukumar, P., & Somayaji, C. Energy And Exergy Analyses Of The Solar Drying Processes of Ghost Chilli Pepper And Ginger. *Renewable Energy*, 105, 764–773. 2017.
158. Amjad, W., Hensel, O., Munir, A., Esper, A., & Sturm, B. Thermodynamic Analysis of Drying Process in a Diagonal-Batch Dryer Developed for Batch Uniformity Using Potato Slices. *Journal of food engineering*, 169, 238–249, 2016.
159. Adapa PK., Schoenau GJ., Re-Circulating Heat Pump Assisted Continuous Bed Drying And Energy Analysis. *International Journal of Energy Research*, 29:961-972, 2005.
160. Akpınar, E., ‘Energy And Exergy Analyses of Dying Red Pepper Slices in A Convective Type Dryer’, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, 2004.
161. Akpınar, E. K., Midilli, A. and Bicer, Y., Thermodynamic Analysis of The Apple Drying Process, *Proc. IMechE Part E: J. Process Mechanical Engineering*, 219:1-14, 2005a.
162. Akpınar, E. K., Midilli, A. and Bicer, Y., The First and Second Law Analyses of Thermodynamic of Pumpkin Drying Process. *Journal of Food Engineering*, 72(4): 320-331, 2006a.
163. Çolak, N., & Hepbasli A., Performance Analysis of Drying of Green Olive in a Tray Dryer. *Journal of Food Engineering*, 20, 1188-1193, 2007a.
164. Çolak, N., Kuzgunkaya E., & Hepbasli A., Exergetic Assessment of Drying of Mint Leaves in a Heat Pump Dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 31, 281-298, 2008.
165. Çolak, N. and Hepbasli A., A Review of Heat Pump Drying: Part 1 Systems, Models and Studies, *Energy Conversion and Management*, 2009.
166. Dinçer, I. and Sahin A.Z., ‘A New Model For Thermodynamic Analysis of a Drying Process’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (2004 ) 645-652, 2004.
167. Goyal, R.K., Tiwari, G.N., Performance of a Reverse Plate Absorbercabinet Dryer: a New Concept. *Energy Conversion and Management*, 40, 385-392, 1999.

168. Kocabıyık, H., Demirtürk B.S., Nane Yapraklarının Infrared Radyasyonla Kurutulması. Onsekiz Mart Üniversitesi. Tarım Makinaları Bölümü, Çanakkale, 2008.
169. Kuzgunkaya E.H., Hepbaslı A., Exergetic Evaluation of Drying of Laurel Leaves in a Vertical Ground-Source Heat Pump Drying Cabinet. International Journal of Energy Research, 31:245-258, 2007a.
170. Kuzgunkaya E.H., Hepbaslı A., Exergetic Performance Assessment of a Ground Source Heat Pump Drying System. International Journal of Energy Research, 31:760-777, 2007b.
171. Midilli, A. and Kucuk, H., Energy and Exergy Analysis of Solardrying Process of Pistachio, Energy, 28: 539-556, 2003.
172. Özdeş, M., Kurutma Prosesinde Kurutma Hava Hız ve Sıcaklığının Ekserji Verimine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 2013.
173. Soysal, Y., İşletme Ölçeğinde Çeşitli Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Kurutulmasına Yönelik Bir Araştırma, Çukurova üniversitesi. Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Adana, 2000.
174. Syahrul, S., Hamdullahpur, F. and Dinçer I., 'Exergy Analysis of Fluidized Bed Drying of Moist Particles', Exergy, an International Journal, 2, 87-98, 2002.
175. Güngör, A., Özbalta, N., "Endüstriyel Kurutma Sistemleri", III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, İzmir, 2: 737-747, 1997.
176. Yüzgeç, U., "Kurutma Sürecinin Modellenmesi ve Akıllı Öngörülü Denetimi", Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 1-35, 2005.
177. Cemeroglu, B., "Kurutma Teknolojisi, Meyve Ve Sebze İşleme Teknolojisi", Gıda Teknolojisi Derneği, Ankara, 28: 541-542, 544-570, 1986.
178. Baker, G. J. C., Industrial Drying of Foods, Chapman & Hall Publication, NewYork, 299s, 1997.
179. Krokida, M.K., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D., Heat and Mass Transfer Coefficients in Drying: Compilation of Literature Data. Drying Technology, 20(1), 1-18, 2002.
180. Roberts, J.S., Understanding The Heat and Mass Transfer of Hygroscopic Porous Materials, Doktora Tezi, The State University of New Jersey, Food Science, New Brunswick, New Jersey, 1999.

181. UNIDO, “Preservation of Fruits and Vegetables by Drying”, III UNISWORK, UNIDO Uluslararası Gıda Güvenliği ve Saklama Yöntemleri Çalışma Programı Raporu, Gebze-Kocaeli, 2004a.
182. Kavak, E., Biçer, Y., Yıldız, C., “Kurutma ve Kurutma Modelleri”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bilim Günleri Bildiriler Kitabı, Denizli, 221: 100-105, 1999.
183. Karel, M., 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, 1975.
184. Quirijns, E.J., Boxtel, A.J.B., Loon, W.K.P ve Straten G., Sorption Isotherms, GAB Parameters and Isotheric Heat of Sorption, J. Sci. Food Agr., 85, 1805-1814, 2005.
185. Demir, V., Günhan, T., Tarım Ürünlerinin Kuruma Karakteristik Değerlerinin Belirlenmesi. Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü, 17-31, Bornova-İzmir, 2002.
186. Demirtaş, C., Ayhan, T. and Kaygusuz, K. Drying behaviour of hazelnuts. Journal of the Science of Food and Agriculture, Vol:76; pp. 559-564, 1998.
187. Güneş M., Bilgisayar Destekli Olarak Çeşitli Geometrik Şekillere Sahip Gözenekli Ortamlarda Kurutma Prosesinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1994.
188. Yağcıoğlu, A., Tavuk Gübresinin Değişik Hava Koşullarında Kuruma özelliklerinin Saptanması Üzerinde Bir Araştırma, Yayınlanmamış Doçentlik Tezi, Bornova, İzmir, 1981.
189. Güner B., “Raf Tipi Güneşli Bir Meyve Kurutucunun Matematiksel Modellenmesi ve Optimizasyonu”, Tarımsal Mekanizasyon 13. Ulusal Kongresi, Bildiri Kitabı, 451-460, 1991
190. Akyurt, M., Sevilir, E., Söylemez, E., Selçuk, K., Güneş Enerjisi ve Bazı Yakıtlarla Meyve ve Sebze Kurutulması. TUBİTAK, Proje No: TOAG-97, Yayın No:299, 1971.
191. Doğanatan, Z.S., Kahramanmaraş Biberlerin Kurutmaya Yönelik Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Saptanması ile Doğal Koşullarda ve Plastik Örtü Alt Güneş Toplayıcılarıyla Kurutma Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Ç.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Mekanizasyon Anabilim Dalı, Adana, 1986.
192. Carl, W. ve Hall, P.E., 1980.Drying and Storage of Agricultural Crops. AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut. ISBN 0-87055-364-X, 381p.

193. Saravacos, G.D., And Charn, S.E., Effect of Surface Active Agents on the Dehydration of Fruits and Vegetables: Food Technology, 16, 91-93., 1962b.
194. Başaran, B., Mısırın Akışkan Yatakta Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 2006.
195. Van Arsdel, W.B., Copley, M.J. ve Morgan, A.I., Food Dehydration, AVI Publishing, Co., Westport, CT, 1963.
196. Hussain MM, Dinçer İ, “Two-Dimensional Heat and Moisture Transfer Analysis of a Cylindrical Moist Object Subjected to Drying: A Finite-Difference Approach”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 4033-4039, 2003.
197. Saldamlı, İ. ve Saldamlı, E., Gıda Endüstrisi Makinaları, Önder Matbaa, Ankara, 1990.
198. Kanarya, A., “Akışkan Yataklı Kurutma Prosesinin Matematiksel Modellemesi” Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, 2-66, (2002).
199. Biçer, Y., Kavak, E., Yıldız, C., “Teknik Kurutmada Kurutucu Seçimi”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bilim Günleri Bildiriler Kitabı, Denizli, 221: 606-612, 1999.
200. Aktas. M., “Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 39-53, 2007.
201. Özkol, N., “İklimlendirme”, Yüksek Teknik Öğretmen Okulu Matbaası, Ankara, 42: 227-241, 1981.
202. Günerkan, H., "Endüstriyel Kurutma Sistemleri", Türk Tesisat Mühendisleri Derneği, 36 (13):1-10, 2005.
203. Erbay, B. ve Küçüköner, E., Gıda Endüstrisinde Kullanılan Farklı Kurutma Sistemleri. Türkiye 10. Gıda Kongresi. 1045-1048. 21-23 Mayıs 2008, Erzurum, 2008.
204. Kayhan, Ö., Zeytin Karasuyundan Antioksidanların Dondurarak Kurutma Yöntemi ile Ayırıştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2008.
205. Erdem, T., Ozonlu Su ile Yıkanan Kırmızı Pul Biberin Mikrodalga Enerjisi ile Kurutulması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007.



206. Cemeroğlu, B., Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. 479s, 2004.
207. Karaaslan, S., Tunçer, İK. Kırmızıbiberin Fan Destekli Mikrodalga ile Kurutulmasında Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi ve Uygun Kuruma Modelinin Belirlenmesi. KSU Doğa Bil. Dergisi, 2009, 12 (2): 9-16, 2009.
208. Doymaz, İ., Sun drying of figs: an experimental study. Journal of Food Engineering, 71, 403-407, 2005.
209. Bosnjakovic F., “Technische Thermodynamik”, Teil II, 4. Auflage, Dresden, Leipzig, (1965),
210. Choi, Y., Okos, M.R., Effects of Temperature and Composition on The Thermal Properties of foods. Food Engineering and Process Applications, Vol.1, Transport Phenomenon, Maguer L and Jelen P(ed.); Elsevier, New York; 93-101, 1986.
211. Singh, R.P., Handbook of Food Engineering, Heldman D.R. and Lund D.B. (ed.); Marcel Dekker Inc, New York; 247-276, 1992.
212. Hawlader M N A & Jahangeer K.A., Solar Heat Pump Drying and Water Heating in The Tropics. Solar Energy 80(5): 492-499, 2006.
213. Hutchinson, D. ve Otten L., “Thin Layer Air Drying of Soybeans and White Beans”, Journal of Food Technology, 18:507-522, 1983.
214. Madhiyanon, T., Phila, A. ve Soponronnarit, S., “Models of Fluidized Bed Drying for Thin-Layer Chopped Coconut”, Applied Thermal Engineering, 29:2849-2854, 2009.
215. Madamba, P.S., “Thin Layer Drying Models for Osmotically Pre-dried Young Coconut”, Drying Technology, 21:1759-1780, 2003.
216. Darıcı S., Borularda akış tıkanmasının türbülanslı ısı transferine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1998.
217. Anonim, Gıda Maddeleri Muayene ve Analiz Metodları. Tarım Orman ve Köyİşleri Bakanlığı, Gıda İşleri Genel Müdürlüğü, Yayın No: 65, 225-226, Ankara, 1983.
218. Holman, JP., Heat Transfer. New York, NY: McGraw-Hill,1989.
219. Sobukola, O.P., Dairo, O.U. ve Odunewu, A.V., “Convective Hot Air Drying of Blanched Yam Slices”, International Journal of Food Science and Technology, 43:1233-1238, 2008.

220. Alibas, İ., Microwave, Air and Combined Microwave-Air Drying of Grape Leaves (*Vitis vinifera* L.) and the Determination of Some Quality Parameters, *International Journal of Food Engineering*, 10(1): 69–88, 2014.
221. Türkomp, Ulusal Gıda Kompozisyon Veri Tabanı, <http://turkomp.gov.tr>, 2019.
222. Sarsavadia, P., R. Sawhney., D.R. Pangavhane S.P., Singh, I., Drying Behaviour of Brined Onion Slices. *Journal Food Engineering*, Vol:40, pp.219-226, 1999.
223. Kaymak-Ertekin, F., Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Journal of Food Science*, 67 (1), 168–175, 2002.



**EK 1: Elma İçin; Deney Sırasında Ölçülen Değerler Tablosu**

ELMA (100 gram)	KURUTMA ÖNCESİ			KURUTMA SONRASI			SOĞUTMA SONRASI			AĞIRLIK
	Hızlar (m/s)	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	Özgül Nem kg-sb/kg-kh	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	Özgül Nem kg-sb/kg-kh	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	
V1=0,2	30 °C	16,426	4,323	27,90 °C	19,9	4,641	17,30 °C	35,3	4,323	57,8 g
V2=0,3	30 °C	16,750	4,409	28,10 °C	20,3	4,791	17,70 °C	35,1	4,409	54,0 g
V3=0,4	30 °C	16,536	3,511	28,20 °C	22,0	5,226	16,70 °C	30,2	3,511	51,1 g
V4=0,5	30 °C	12,132	3,187	29,30 °C	23,9	6,059	14,10 °C	32,0	3,187	52,2 g
V5=0,6	30 °C	11,686	3,070	29,10 °C	24,7	6,191	13,10 °C	32,9	3,070	50,9 g
V6=0,7	30 °C	12,776	3,357	28,90 °C	23,9	5,919	14,10 °C	33,7	3,357	49,2 g
V1=0,2	40 °C	11,953	5,479	36,80 °C	22,0	8,528	24,20 °C	29,5	5,479	48,8 g
V2=0,3	40 °C	11,818	5,417	37,50 °C	20,9	8,414	25,70 °C	26,4	5,417	42,6 g
V3=0,4	40 °C	12,457	5,712	36,40 °C	21,6	8,187	25,90 °C	27,5	5,712	41,5 g
V4=0,5	40 °C	12,042	5,520	37,10 °C	21,0	8,271	25,70 °C	26,9	5,520	41,6 g
V5=0,6	40 °C	8,893	4,067	38,00 °C	19,2	7,936	18,40 °C	31,0	4,067	42,6 g
V6=0,7	40 °C	9,976	4,567	36,50 °C	19,9	7,577	21,50 °C	28,7	4,567	43,9 g
V1=0,2	50 °C	8,222	6,310	44,30 °C	20,8	12,073	30,00 °C	23,9	6,310	39,7 g
V2=0,3	50 °C	6,977	5,347	45,60 °C	18,2	11,280	32,80 °C	17,3	5,347	35,5 g
V3=0,4	50 °C	5,140	3,930	43,90 °C	17,5	9,916	25,70 °C	19,2	3,930	32,2 g
V4=0,5	50 °C	5,397	4,128	42,00 °C	18,1	9,279	23,00 °C	23,7	4,128	29,6 g
V5=0,6	50 °C	5,676	4,342	41,90 °C	17,8	9,074	24,70 °C	22,5	4,342	31,7 g
V6=0,7	50 °C	5,760	4,407	43,00 °C	18,4	9,950	23,80 °C	24,1	4,407	30,6 g
V1=0,2	60 °C	4,154	5,137	50,10 °C	18,6	14,534	32,20 °C	17,2	5,137	28,9 g
V2=0,3	60 °C	3,030	3,739	49,10 °C	17,5	12,980	25,40 °C	18,6	3,739	26,9 g
V3=0,4	60 °C	3,400	4,198	49,30 °C	18,8	14,109	23,00 °C	24,1	4,198	29,1 g
V4=0,5	60 °C	3,606	4,455	49,10 °C	19,2	14,269	22,10 °C	27,0	4,455	26,3 g
V5=0,6	60 °C	4,128	5,105	52,90 °C	19,9	17,936	32,40 °C	16,9	5,105	26,4 g
V6=0,7	60 °C	3,949	4,882	49,00 °C	19,8	14,651	24,10 °C	26,2	4,882	26,4 g
V1=0,2	70 °C	3,005	5,817	55,30 °C	20,6	20,941	34,40 °C	17,2	5,817	22,8 g
V2=0,3	70 °C	2,464	4,762	56,60 °C	20,7	22,437	28,60 °C	19,6	4,762	19,9 g
V3=0,4	70 °C	2,432	4,701	56,50 °C	20,8	22,439	26,10 °C	22,4	4,701	21,0 g
V4=0,5	70 °C	2,448	4,731	56,30 °C	21,1	22,552	24,70 °C	24,5	4,731	20,9 g
V5=0,6	70 °C	2,589	5,005	57,20 °C	21,5	24,034	24,90 °C	25,6	5,005	20,5 g
V6=0,7	70 °C	2,417	4,670	56,60 °C	21,4	23,224	24,90 °C	23,9	4,670	20,5 g

**EK 2: Kayısı İçin; Deney Sırasında Ölçülen Değerler Tablosu**

KAYISI (100 gram)	KURUTMA ÖNCESİ			KURUTMA SONRASI			SOĞUTMA SONRASI			AĞIRLIK
	Hızlar (m/s)	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	Özgül Nem kg-sb/kg-kh	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	Özgül Nem kg-sb/kg-kh	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	
V1=0,2	30 °C	17,360	4,571	27,8 °C	25,2	5,854	19,7 °C	32,1	4,571	80,6 g
V2=0,3	30 °C	18,752	4,940	28,3 °C	25,7	6,150	21,0 °C	32,0	4,940	78,5 g
V3=0,4	30 °C	18,325	4,827	28,8 °C	24,8	6,108	21,3 °C	30,7	4,827	78,1 g
V4=0,5	30 °C	16,139	4,247	28,6 °C	22,6	5,497	20,5 °C	28,4	4,247	76,1 g
V5=0,6	30 °C	16,677	4,390	28,6 °C	22,8	5,546	21,5 °C	27,6	4,390	75,2 g
V6=0,7	30 °C	15,295	4,024	28,9 °C	21,5	5,320	21,0 °C	26,1	4,024	73,8 g
V1=0,2	40 °C	10,496	4,806	36,6 °C	20,7	7,929	25,1 °C	24,3	4,806	67,3 g
V2=0,3	40 °C	10,090	4,619	38,3 °C	19,2	8,067	26,5 °C	21,5	4,619	67,1 g
V3=0,4	40 °C	9,167	4,193	38,3 °C	18,2	7,642	25,6 °C	20,6	4,193	65,9 g
V4=0,5	40 °C	6,944	3,171	38,6 °C	16,2	6,905	21,0 °C	20,6	3,171	65,3 g
V5=0,6	40 °C	6,770	3,092	37,6 °C	15,6	6,293	19,6 °C	21,9	3,092	63,7 g
V6=0,7	40 °C	6,264	2,859	38,0 °C	15,1	6,224	19,1 °C	20,9	2,859	59,9 g
V1=0,2	50 °C	4,313	3,294	42,4 °C	16,3	8,523	24,6 °C	17,2	3,294	66,5 g
V2=0,3	50 °C	3,181	2,426	43,7 °C	15,1	8,448	23,2 °C	13,8	2,426	58,3 g
V3=0,4	50 °C	4,016	3,067	44,4 °C	15,7	9,117	22,3 °C	18,4	3,067	66,7 g
V4=0,5	50 °C	5,247	4,012	43,6 °C	17,4	9,704	23,1 °C	22,9	4,012	63,3 g
V5=0,6	50 °C	5,745	4,396	46,0 °C	19,7	12,486	21,7 °C	27,3	4,396	66,0 g
V6=0,7	50 °C	6,049	4,630	45,6 °C	20	12,418	21,5 °C	29,1	4,630	58,0 g
V1=0,2	60 °C	3,168	3,911	49,9 °C	18,8	14,546	26,9 °C	17,8	3,911	61,3 g
V2=0,3	60 °C	2,624	3,235	51,7 °C	18,5	15,670	27,3 °C	14,4	3,235	57,6 g
V3=0,4	60 °C	3,112	3,840	52,3 °C	19,4	16,956	23,5 °C	21,4	3,840	54,5 g
V4=0,5	60 °C	3,281	4,051	51,9 °C	19,6	16,795	22,9 °C	23,4	4,051	53,6 g
V5=0,6	60 °C	3,496	4,318	52,2 °C	19,9	17,318	23,6 °C	23,9	4,318	53,1 g
V6=0,7	60 °C	3,330	4,112	52,0 °C	19,7	16,968	20,5 °C	27,5	4,112	55,8 g
V1=0,2	70 °C	1,500	2,891	58,2 °C	20,6	24,139	27,4 °C	12,8	2,891	47,9 g
V2=0,3	70 °C	2,312	4,466	60,0 °C	22,2	28,477	25,7 °C	21,8	4,466	44,2 g
V3=0,4	70 °C	2,116	4,086	58,9 °C	22,0	26,744	23,4 °C	22,9	4,086	43,8 g
V4=0,5	70 °C	2,845	5,505	59,3 °C	23,7	29,476	27,1 °C	24,7	5,505	45,3 g
V5=0,6	70 °C	2,923	5,657	59,3 °C	23,5	29,215	28,2 °C	23,8	5,657	40,2 g
V6=0,7	70 °C	2,727	5,275	59,9 °C	23,6	30,214	26,8 °C	24,1	5,275	43,5 g

**EK 3: Patates İçin; Deneş Sırasında Ölçülen Değerler Tablosu**

PATATES (100 gram)	KURUTMA ÖNCESİ			KURUTMA SONRASI			SOĞUTMA SONRASI			AĞIRLIK
	Hızlar (m/s)	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	Özgöl Nem kg-sb/kg-kh	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	Özgöl Nem kg-sb/kg-kh	Sıcaklık T(°C)	Bağıl Nem Ø(%)	Özgöl Nem kg-sb/kg-kh
V1=0,2	30 °C	16,16	4,253	27,8 °C	24,80	5,760	15,4 °C	39,20	4,253	56,0 g
V2=0,3	30 °C	15,69	4,129	31,8 °C	20,80	6,083	19,6 °C	29,20	4,129	57,2 g
V3=0,4	30 °C	19,44	5,123	28,7 °C	25,10	6,147	19,9 °C	35,50	5,123	57,1 g
V4=0,5	30 °C	19,03	5,014	27,8 °C	25,40	5,901	19,2 °C	36,30	5,014	54,5 g
V5=0,6	30 °C	14,23	3,741	28,3 °C	19,70	4,703	18,7 °C	28,00	3,741	56,0 g
V6=0,7	30 °C	15,47	4,069	28,7 °C	21,80	5,332	19,7 °C	28,60	4,069	58,9 g
V1=0,2	40 °C	11,36	5,203	34,8 °C	22,70	7,875	22,9 °C	30,00	5,203	57,6 g
V2=0,3	40 °C	8,29	3,788	37,7 °C	18,50	7,519	19,6 °C	26,80	3,788	45,1 g
V3=0,4	40 °C	8,86	4,051	36,0 °C	19,00	7,033	21,3 °C	25,80	4,051	40,0 g
V4=0,5	40 °C	6,11	2,789	35,6 °C	16,30	5,891	17,6 °C	22,40	2,789	41,4 g
V5=0,6	40 °C	6,04	2,754	37,0 °C	15,40	6,011	19,7 °C	19,40	2,754	40,7 g
V6=0,7	40 °C	6,64	3,032	36,7 °C	16,70	6,417	16,5 °C	26,10	3,032	45,3 g
V1=0,2	50 °C	6,94	5,321	41,9 °C	21,10	10,786	24,9 °C	27,20	5,321	44,1 g
V2=0,3	50 °C	6,12	4,684	43,6 °C	20,10	11,237	23,8 °C	25,60	4,684	37,3 g
V3=0,4	50 °C	7,57	5,807	41,3 °C	20,00	9,891	28,5 °C	24,00	5,807	30,1 g
V4=0,5	50 °C	7,15	5,482	40,5 °C	19,40	9,187	28,4 °C	22,80	5,482	38,2 g
V5=0,6	50 °C	6,95	5,322	40,3 °C	19,30	9,040	28,2 °C	22,40	5,322	38,8 g
V6=0,7	50 °C	5,74	4,388	43,6 °C	19,20	10,725	18,9 °C	32,4	4,388	34,3 g
V1=0,2	60 °C	6,06	7,520	52,3 °C	22,00	19,299	33,9 °C	22,80	7,520	31,8 g
V2=0,3	60 °C	4,46	5,522	52,1 °C	21,20	18,390	29,3 °C	21,80	5,522	32,6 g
V3=0,4	60 °C	7,41	9,225	48,9 °C	22,70	16,769	40,1 °C	19,90	9,225	29,9 g
V4=0,5	60 °C	3,82	4,722	56,1 °C	22,40	23,759	26,1 °C	22,50	4,722	25,5 g
V5=0,6	60 °C	4,38	5,424	56,6 °C	22,70	24,691	27,2 °C	24,20	5,424	33,3 g
V6=0,7	60 °C	8,74	10,907	56,3 °C	22,50	24,106	42,2 °C	21,00	10,907	30,4 g
V1=0,2	70 °C	3,33	6,448	56,7 °C	22,70	24,813	32,4 °C	21,30	6,448	24,8 g
V2=0,3	70 °C	3,06	5,929	53,1 °C	21,60	19,713	24,4 °C	31,20	5,929	22,2 g
V3=0,4	70 °C	5,18	10,092	58,2 °C	23,10	27,197	41,3 °C	20,40	10,092	25,7 g
V4=0,5	70 °C	3,81	7,396	63,9 °C	25,30	40,258	37,6 °C	18,30	7,396	23,0 g
V5=0,6	70 °C	3,22	6,237	61,3 °C	25,40	34,935	23,9 °C	33,80	6,237	23,3 g
V6=0,7	70 °C	5,61	10,940	55,2 °C	22,40	22,725	41,2 °C	21,20	10,940	22,7 g

## ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Ankara’da doğan Ramazan DEMİR, “ilk, orta ve lise” öğrenimini sırasıyla Nihat Başakar İlkokulu, 13 Ekim Ortaokulu ve Aydınlikevler İnönü Lisesinde tamamlamıştır. 2002 yılında kazandığı GAZİ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2006 yılında başarıyla bitirmiştir.

2008 yılında yüksek lisans eğitimine Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başlamıştır. Doç. Dr. Mevlüt Arslan danışmanlığında hazırladığı “**Kabin Tipli Kurutma Sisteminde Kuruma Kinetiğinin Araştırılması ve Sistemin Enerji-Ekserji Analizinin Yapılması**” başlıklı teziyle 2019 yılında mezun olmuştur.

2012 yılından beri Kültür ve Turizm Bakanlığında Kültür Merkezleri Dairesi Başkanlığında Makine Mühendisi olarak çalışmakta olan Ramazan DEMİR, evli ve 2 çocuk babasıdır.

### **İletişim Bilgileri**

Adres: Kültür ve Turizm Bakanlığı İsmet İnönü Bulvarı No:32

06100/ANKARA

Telefon : (312) 470 73 22

Faks : (312) 215 55 89

E-posta : rdmuhendis@gmail.com