

**ENDÜSTRİYEL MALZEMELERDE EŞZAMANLI ISI VE  
KÜTLE TRANSFERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK  
İNCELENMESİ**

**Burak TÜRKAN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL MALZEMELERDE EŞZAMANLI ISI VE KÜTLE  
TRANSFERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ**

Burak TÜRKAN

Orcid No: 0000-0002-4019-7835

Prof. Dr.Akın Burak ETEMOĞLU

(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2020

## TEZ ONAYI

Burak TÜRKAN tarafından hazırlanan “ENDÜSTRİYEL MALZEMELERDE EŞZAMANLI ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU

**Başkan** : Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU  
Orcid No: 0000-0001-8022-1185  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Prof. Dr. Ömer KAYNAKLI  
Orcid No: 0000-0002-9763-6464  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Prof. Dr. Yusuf ULCAY  
Orcid No: 0000-0001-6685-8278  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Osman TURAN  
Orcid No: 0000-0003-3421-2020  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN  
Orcid No: 0000-0001-8647-4861  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü  
17/06/2020

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**17/06/2020**

**Burak TÜRKAN**



## ÖZET

Doktora Tezi

### ENDÜSTRİYEL MALZEMELERDE EŞ ZAMANLI ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

**Burak TÜRKAN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman :** Prof. Dr.Akın Burak ETEMOĞLU

Kurutma işlemi gıda ürününden sıvı miktarının buharlaştırılarak mikrobiyal bozulmayı önlemek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Enerji tüketimini azaltmak ve gıda kalitesini artırmak için kurutma sürecinin modellenmesi ve optimizasyonu çok önemlidir. Bu yüzden literatürde kurutma karakteristiklerinin araştırılmasında farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar arasında eş zamanlı ısı ve kütle transferi için Fourier ve Fick yasası yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak gözenekli ortam yaklaşımı (Darcy Flow) karmaşık bir mekanizmaya sahip olduğu için literatürde yapılan çalışmalarda çok fazla tercih edilmediği görülmüştür. Bu çalışmada her iki yöntem için öncelikle ürünlerin kurutma karakteristikleri araştırılmıştır. Konvektif çalışmada farklı parametrelerin (hız, sıcaklık, kalınlık) ürün nemi, büzülme katsayısı, ekserji verimliliği ve ekserjetik gelişim potansiyel değerleri üzerindeki etkisi Taguchi deneysel tasarımı için kullanılan Anova analizi yardımı ile incelenmiştir. Optimum kurutma koşullarının en yüksek hava hızı (1m/s), en yüksek sıcaklık (60°C) ve en düşük ürün kalınlığında (0.5 cm) gerçekleştiği görülmüştür. Kızılötesi ışınımlı kurutucu için ise farklı parametrelerin (hız, ışınım gücü, ışınım lambası uzaklığı) etkisi incelenmiştir. Optimum kurutma koşulları 0.3 m/s hız, 350 W ışınım gücü ve 20 cm ışınım lambasına olan uzaklık olarak elde edilmiştir. Ekserji veriminde, konvektif kurutmada hava sıcaklığı (%88.54) en etkili parametre iken ışınım ile kurutmada ise ışınım lambası gücünün (%39.61) en önemli parametre olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalar hem deneysel hem de nümerik yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Kurutma probleminde gıda ürünü için lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri zamana bağlı olarak çözülmüştür. Kurutma işlemindeki büzülme etkisi Comsol Multiphysics programında “Deformed-Moving Mesh” metodu kullanılarak incelenmiştir. Deneysel ve nümerik çözüm ile elde edilen veriler karşılaştırılmış olup sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ürün içerisindeki yüksek nem miktarı mikroorganizmaların oluşmasına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı deneysel olarak ürün içerisindeki nem dağılımının tespit edilemediği durumlarda nümerik çözüm de yapılarak bu olumsuzluğun önceden önlenmesi mümkün hale gelebilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Isı ve kütle transferi, Comsol, konvektif ve ışınım ile kurutma  
2020, xix + 192 sayfa.

## ABSTRACT

Ph.D Thesis

### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SIMULTANEOUS HEAT AND MASS TRANSFER IN INDUSTRIAL MATERIALS

**Burak TÜRKAN**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor :** Prof. Dr.Akın Burak ETEMOĞLU

The drying process is widely used to prevent microbial deterioration by evaporating the amount of liquid from the food product. Modeling and optimization of the drying process is very important to reduce energy consumption and improve food quality. Therefore, different approaches have been used in the literature to investigate drying characteristics. Among these approaches, Fourier and Fick's law are widely used for simultaneous heat and mass transfer. However, since the porous media approach (Darcy Flow) has a complex mechanism, it has been found that it is not preferred much in the literature studies. In this study, drying characteristics of the products were investigated for both methods. The effect of different parameters (velocity, temperature, thickness) on product moisture, shrinkage coefficient, exergy efficiency and exergetic development potential values in the convective study was examined with the help of Anova analysis used for Taguchi experimental design. Optimum drying conditions were observed at the highest air velocity (1 m/s), the highest temperature (60 °C) and the lowest product thickness (0.5 cm). The effect of different parameters (velocity, radiation power, radiation lamp distance) was investigated for infrared radiation dryer. Optimum drying conditions were obtained as a velocity of 0.3 m/s, 350 W radiation power and 20 cm distance to radiation lamp. In exergy efficiency, air temperature (88.54%) was the most effective parameter in convective drying, while radiation lamp power (39.61%) was the most important parameter in radiative drying. Studies were carried out using both experimental and numerical methods. In the drying problem, nonlinear partial differential equations for food product are solved with time. The shrinkage effect of the drying process was examined in Comsol Multiphysics program by using “Deformed-Moving Mesh” method. The data obtained with the experimental and numerical solution were compared and the results were found to be consistent with each other. High moisture content in the product causes microorganisms to form. For this reason, in cases where the moisture distribution in the product cannot be determined experimentally, a numerical solution can be made and thus it will be possible to prevent this negativity in advance.

**Key Words:** Heat and mass transfer, Comsol, convective and radiative drying  
**2020, xix + 192 pages.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimi ile başladığım akademik hayatım boyunca maddi manevi destek ve yardımlarını hiç esirgemeyen ve her konuda destek olan, bilgi ve tecrübesi ile çalışmalarımı yönlendiren çok değerli danışman hocam ve aynı zamanda Mühendislik Fakültesi Dekanı olan sayın Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne DDP(MH)-2016/12 nolu proje kapsamında, doktora tezime verdikleri destekten dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarında yanımda olan ve yetişmemde emeği geçen çok değerli hocam sayın Prof. Dr. Muhiddin CAN'a çok teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde bulunan hocalarım sayın Prof. Dr. Yusuf ULCAY ve sayın Prof. Dr. Ömer KAYNAKLI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Termodinamik ve Enerji Anabilim Dalındaki tüm hocalarımıza ve özellikle bölüm başkanımız sayın Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ'e teşekkür ederim.

Değerli arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE'ye, Arş. Gör. Dr. Oğuz TUNCEL'e, Arş. Gör. Çağlar KAHYA'ya, ve Arş. Gör. Ahmet Serhan CANBOLAT'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve desteğini eksik etmeyen Arş. Gör. H. Merve BİNGÖL'e çok teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi manevi desteğini eksik etmeyen ve bu günlere gelmemde emeği büyük olan değerli aileme şükranlarımı sunuyorum.

Burak TÜRKAN

17/06/2020

## İÇİNDEKİLER TABLOSU

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER TABLOSU.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Zorlanmış Taşınım ile Kurutma İçin Yapılmış Çalışmalar.....	3
2.2. Işınım ile Kurutma İçin Yapılmış Çalışmalar.....	9
2.3. Tez Çalışmasının Literatürden Farkı ve Sağladığı Yenilikler.....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1. Kurutma ile İlgili Genel Bilgi.....	12
3.1.1. Kurutucuların sınıflandırılması.....	12
3.1.2. Kurutma sürecini etkileyen faktörler.....	19
3.1.3. Kurutma modelleri.....	21
3.1.4. Çok fazlı akış (Darcy Flow).....	21
3.1.5. Ekserji kavramı.....	22
3.1.6. Taguchi metodu.....	23
3.1.7. Ülkemizde kurutulmuş ürünlerin durumu.....	24
3.2. Deney Tesisatı Tanıtımı.....	26
3.2.1. Tünel tip tepsili kurutucu seti.....	26
3.2.2. pH ölçer.....	30
3.2.3. Renk ölçüm cihazı.....	31
3.2.4. Sıcaklık ölçer.....	32
3.2.5. Ağırlık ölçer.....	33
3.2.6. Dijital mikroskop.....	34
3.3. Nümerik Analizler İçin Kullanılan Comsol Programı.....	35
3.4. Matematik Modelleme.....	38
3.4.1. Nem içeriği hesabı.....	38
3.4.2. Efektif difüzyon katsayısı hesabı.....	39

3.4.3. Renk ölçüm hesabı .....	41
3.4.4. Kurutma modelleri analizi .....	42
3.4.5. Ürün büzülme hesabı.....	43
3.4.6. Nümerik analiz için matematik model .....	43
3.4.7. Büzülme hızı hesabı .....	44
3.4.8. Isı ve kütle taşınım katsayıları hesabı .....	45
3.4.9. Çok fazlı akış için matematik model.....	46
3.4.10. Taguchi analiz denklemleri .....	49
3.4.11. Nem içeriğinin ve ölçüm cihazlarının belirsizlik analizi.....	50
3.4.12. Konvektif kurutma için ekserji analizi .....	51
3.4.13. Işınımlı kurutucu için ekserji analiz denklemleri.....	54
3.4.14. Ekserji verimliliği ve ekserji denge denklemleri.....	57
3.4.15. Konvektif kurutma için enerji tüketim hesabı.....	60
3.4.16. Işınımlı kurutucu için enerji tüketim hesabı.....	60
3.4.17. Özgül enerji tüketim hesabı.....	61
3.4.18. Isıl verim hesabı .....	61
3.4.19. Kurutucu performans oranı .....	61
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	62
4.1. Muz Kurutulması: Nümerik Modelleme, Renk Kinetiği, pH Değişimi ve Büzülme Etkisinin İncelenmesi.....	62
4.1.1. Başlangıç nem içeriğinin tespiti .....	63
4.1.2. Deneilerin uygulanması.....	63
4.1.3. Deney bulguları .....	64
4.1.4. Farklı kurutma modelleri ve doğrulama çalışması.....	67
4.1.5. Renk ölçüm sonuçları.....	70
4.1.6. pH ölçüm sonuçları .....	72
4.1.7. Renk kinetik modeli ve regresyon analizi.....	73
4.1.8. Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi hesabı .....	74
4.1.9. Nümerik çalışma ve doğrulama analizi.....	77
4.2. Elma Kurutulmasında Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transferinin 3 Boyutlu Simülasyonu.....	85
4.2.1. Nümerik modelleme.....	85
4.2.2. Model doğrulaması .....	87

4.2.3. Analiz bulguları.....	90
4.2.4. Parametrik çalışma.....	97
4.3. Zorlanmış Taşınım ile Farklı Geometrik Şekilli Gıda Ürünlerinin Kurutulmasının Gözenekli Ortam Yaklaşımı ile Nümerik İncelenmesi.....	103
4.3.1. Nümerik modelleme.....	104
4.3.2. Model doğrulaması.....	106
4.3.3. Analiz bulguları.....	109
4.4. Taguchi Metodu Kullanılarak Sıcak Hava ile Salatalık Kurutulmasına Etki Eden Parametrelerin Optimizasyonu.....	114
4.4.1. Başlangıç nem içeriğinin tespiti.....	115
4.4.2. Deneylein uygulanması.....	115
4.4.3. Taguchi analizi.....	115
4.4.4. Nümerik modelleme.....	116
4.4.5. Nem içeriği hesabı için Taguchi analizi.....	120
4.4.6. Büzülme katsayısı için Taguchi analizi.....	121
4.4.7. Ekserji verimliliği değerleri için Taguchi analizi.....	123
4.4.8. Ekserjetik gelişim potansiyeli değerleri için Taguchi analizi.....	125
4.4.9. Taguchi analizi doğrulama çalışması.....	127
4.5. Gıda Ürününün Işınımlı Kurutucuda Kurutulmasının Optimizasyon Çalışması...	127
4.5.1. Başlangıç nem içeriğinin tespiti.....	128
4.5.2. Deneylein uygulanması.....	128
4.5.3. Taguchi analizi.....	131
4.5.4. Kuruma süresi için optimizasyon çalışması.....	132
4.5.5. Toplam renk değişimi için optimizasyon çalışması.....	134
4.5.6. Enerji tüketimi için optimizasyon çalışması.....	135
4.5.7. Ekserji verimi için optimizasyon çalışması.....	136
4.5.8. Isıl verim için optimizasyon çalışması.....	138
4.5.9. Özgül enerji tüketimi için optimizasyon çalışması.....	139
4.5.10. Kurutucu performans oranı için optimizasyon çalışması.....	141
4.5.11. Taguchi analizi doğrulama çalışması.....	145
5. SONUÇ.....	152
KAYNAKLAR.....	158
EKLER.....	167

EK 1. Comsol programında deforme edilmiş ağ uygulaması (Deformed Mesh) .....	168
EK 2. Konvektif kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve ölçüm sonuçları .....	179
EK 3. Konvektif kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve hesaplanan çıktı değerleri .....	181
EK 4. Işınım ile kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve ölçüm sonuçları .....	182
EK 5. Işınım ile kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve hesaplanan çıktı değerleri.....	184
EK 6. Işınım ile kurutucu için ekserji veriminin Matlab kodu.....	186
ÖZGEÇMİŞ .....	189

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$C$	renk parametresi değeri
$c_p$	özgül ısı (kJ/kgK)
$c_w$	ürün içerisindeki su yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$c_v$	ürün içerisindeki buhar yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$D_{AB}$	ikili yayılım katsayısı (su–hava) (m <sup>2</sup> /s)
$D_{eff}$	efektif nem difüzyon katsayısı (m <sup>2</sup> /s)
$DR$	kuruma hızı (gr su/gr kuru madde dk)
$D_0$	sonsuz sıcaklıktaki difüzyon katsayısına eşdeğer sabit (m <sup>2</sup> /s)
$D_w$	ürünün kılcal difüzyon katsayısı (m <sup>2</sup> /s)
$D_v$	buharın difüzyon katsayısı (m <sup>2</sup> /s)
$D_{va}$	hava buhar difüzyon katsayısı (m <sup>2</sup> /s)
$E_o$	aktivasyon enerjisi (kJ/mol)
$h_m$	kütle transfer katsayısı (m/s)
$h_t$	ısı taşınım katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
$k$	ısı iletim katsayısı (W/mK)
$L$	uzunluk (m)
$MR$	boyutsuz nem oranı
$M_{ma}$	nemli havanın molekül ağırlığı (kg/mol)
$N$	toplam gözlem sayısı
$Nu$	Nusselt sayısı = $h_T L/k$
$Pr$	Prandtl sayısı = $\nu/\alpha$
$R$	evrensel gaz sabiti (kJ/mol.K)
$Re$	Reynolds sayısı = $uL/\nu$
$R^2$	regresyon katsayısı
$S_b$	büzülme katsayısı (%)
$Sc$	Schmidt sayısı = $\nu/D_{AB}$
$Sh$	Sherwood sayısı = $h_m L/D_{AB}$
$SH$	standart hata
$t$	kuruma zamanı (dakika)



T	sıcaklık (K)
u	hız (m/s)
V	hacim (m <sup>3</sup> )
$x^2$	ki kare
$\alpha$	ısı yayılım katsayısı (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$\Delta a$	kırmızı renk sapması
$\Delta b$	sarı renk sapması
$\Delta E$	toplam renk sapması
$\lambda$	buharlaşma entalpisi (J/kg)
$\rho$	yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$\nu$	viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$\varepsilon$	gözeneklilik
$\kappa$	gözenekli malzeme geçirgenliği
$\nabla p_g$	basınç gradyanı
$\mu_w$	sıvı viskozitesi

### Alt İndis

b, o	başlangıç değeri
e	denge değeri
h	hava
KB	kuru baz
s	katı veya yüzey
t	t an değeri
t+ $\Delta t$	t+ $\Delta t$ an değeri
w	su
YB	yaş baz
v	buhar

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. a) Kuruma hızının zamanla değişimi b) Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi c) Nem içeriğinin zamanla değişimi d) Sıcaklığın zamanla değişimi .....	15
Şekil 3.2. Higroskopik bir malzemenin sorpsiyon davranışı .....	18
Şekil 3.3. Türkiye'nin 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 arası toplam ihracatı içinde kuru meyve ve mamulleri.....	25
Şekil 3.4. Kuru ürünler ile ana sektörlerin 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 arası ihracat miktarları (TL×1000) .....	25
Şekil 3.5. 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 arası ihracatı yapılan kuru meyve ve mamulleri listesi .....	26
Şekil 3.6. Deneilerde kullanılan kurutucuların farklı açılardan detaylı görselleri (a- kızılötesi ışınlama ile kurutma, b- konvektif kurutma) .....	28
Şekil 3.7. Konvektif ve ışınlı kurutma cihazı yazılım arayüzü.....	28
Şekil 3.8. pH ve sıcaklık ölçüm cihazı.....	30
Şekil 3.9. Renk ölçüm cihazı .....	32
Şekil 3.10. Kızıl ötesi sıcaklık ölçer .....	33
Şekil 3.11. Hassas terazi.....	34
Şekil 3.12. Dijital mikroskop .....	35
Şekil 3.13. Comsol programının ara yüzü.....	36
Şekil 3.14. Comsol programında sonuçların grafik gösterimi .....	37
Şekil 3.15. Comsol programında görsel sonuç gösterimi .....	38
Şekil 3.16. Kurutma kabini şematik gösterimi.....	52
Şekil 3.17. Işınlama maruz kalan ürün için enerji dengesinin şematik gösterimi .....	54
Şekil 3.18. Kapalı 3 yüzey için radyasyon ağının şematik gösterimi .....	55
Şekil 3.19. Materyalin kurutma çemberine olan görüş alanı .....	56
Şekil 3.20. Materyalin ışınlama lambasına olan görüş alanı .....	56
Şekil 3.21. İnfrared kurutma sürecinin şematik gösterimi .....	58
Şekil 4.1. Muz dilimlerinin kurutmadan önceki ve sonraki görüntüleri .....	64
Şekil 4.2. a) Yaş bazda (%) nem içeriği değişimi b) Boyutsuz nem oranı değişimi.....	64
Şekil 4.3. a)Kuru baz nem içeriğinin zamanla değişimi b)Kuruma hızının kuru baz nem içeriğine göre değişimi.....	65

Şekil 4.4. Muz dilimlerinin a) sıcaklık değişimi b) ağırlık değişimi .....	66
Şekil 4.5. (a) 40°C, (b) 50°C ve (c) 60°C sıcaklıklarda farklı modellerden elde edilen tahmini nem oranı ile deneysel nem oranı değişimi.....	68
Şekil 4.6. (a) 40°C, (b) 50°C ve (c) 60°C sıcaklıklarda farklı modellere ve deneye ait boyutsuz nem oranlarının zamanla değişimi.....	69
Şekil 4.7. Muz numunesine ait renk parametre değerleri; (a)- $L$ ; (b)- $a$ ; (c)- $b$ değerleri .....	70
Şekil 4.8. Muz numunesine ait pH değerinin zamanla değişimi.....	72
Şekil 4.9. Efektif difüzyon katsayısının kurutma havası sıcaklığı ile değişimi .....	74
Şekil 4.10. Efektif difüzyon katsayısının sıcaklık( $1/T$ ) ile değişimi.....	75
Şekil 4.11. Taze ve kurutulan ürünlerin görüntüleri .....	76
Şekil 4.12. Farklı sıcaklıklarda kurutma sonundaki nem oranının büzülme katsayısı ile değişimi .....	76
Şekil 4.13. 2 boyutlu aksel simetrik model .....	77
Şekil 4.14. Kuruma sırasında ürünün zamanla nem içeriğinin değişimi.....	79
Şekil 4.15. Kuruma sırasında ürünün zamanla sıcaklık değişimi .....	82
Şekil 4.16. Kurutma sonundaki ürüne ait nem (a-40°C; b-50°C; c-60°C) dağılımları ...	84
Şekil 4.17. Modelin 3D kesiti .....	86
Şekil 4.18. Bu çalışmaya ait sıcaklık ve nem değişiminin karşılaştırılması .....	88
Şekil 4.19. Ürün içerisindeki nem dağılımı (a-1800 s, b-3600 s, c-7200 s).....	91
Şekil 4.20. Ürün içerisindeki sıcaklık dağılımı (a-1800 s, b-3600 s, c-7200 s).....	92
Şekil 4.21. Malzemenin merkezinin zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği.....	94
Şekil 4.22. Malzemenin merkezinin zamana bağlı nem içeriği değişim grafiği.....	94
Şekil 4.23. Farklı kurutma modellerinin boyutsuz nem oranlarının kuruma süresince değişimi .....	96
Şekil 4.24. Midilli Modeli ve bu çalışmaya ait boyutsuz nem oranı değerlerinin zamana göre değişimi.....	96
Şekil 4.25. Kurutma modelleri ve bu çalışmaya ait boyutsuz nem oranı değerlerinin birbirine göre değişimi .....	97
Şekil 4.26. Farklı kurutma havası hızlarında boyutsuz nem oranının zamanla değişimi .....	98
Şekil 4.27. Farklı kurutma havası hızlarında ürün merkez sıcaklığının zamanla değişimi .....	

.....	98
Şekil 4.28. Farklı kurutma havası sıcaklıklarında boyutsuz nem oranının zamanla değişimi.....	99
Şekil 4.29. Farklı kurutma havası sıcaklıklarında ürün merkez sıcaklığının zamanla değişimi.....	99
Şekil 4.30. Farklı başlangıç ürün nem içeriği değerlerine sahip malzemede boyutsuz nem oranının zamanla değişimi .....	100
Şekil 4.31. Farklı başlangıç ürün nem içeriği değerlerine sahip malzemede merkez sıcaklığının zamanla değişimi.....	100
Şekil 4.32. Analizlerde kullanılan model ve akış alanı.....	104
Şekil 4.33. Dikdörtgen, silindir ve kare şekilli geometriler ve ağ yapıları .....	106
Şekil 4.34. Büzülmeli, büzülmesiz ve deneysel çalışmanın değişimi.....	107
Şekil 4.35. Büzülme etkisi hesaba katılarak kurutma süreci sırasında gıda ürününün nem içeriğinin gelişimi (a- kurutmanın başlangıcı, b-ilk saat, c- ikinci saat, d- üçüncü saat, e- dördüncü saat, f- beşinci saat) (40°C hava sıcaklığı, 0,5 m/s hava hızı).....	109
Şekil 4.36. 40°C hava sıcaklığında farklı hava hızlarında farklı şekilli ürünlerin nem profilleri (a- dikdörtgen, b- silindir, c- kare).....	110
Şekil 4.37. 40°C hava sıcaklığında farklı geometrik şekilli gıda ürünlerinin farklı hava hızlarında elde edilen yüzey sıcaklık dağılımları (a- dikdörtgen, b- silindir, c- kare) .....	111
Şekil 4.38. 0,5 m/s hava hızında farklı geometrik şekilli gıda ürünlerinin farklı hava sıcaklıklarında nem içerikleri (a- dikdörtgen, b- silindir, c- kare).....	112
Şekil 4.39. 0,5 m/s hava hızında farklı geometrik şekilli gıdaların farklı hava sıcaklıklarında yüzey sıcaklıkları (a- dikdörtgen, b- silindir, c- kare).....	113
Şekil 4.40. Analizde kullanılan model ve ağ yapısı.....	117
Şekil 4.41. Deneysel ve nümerik çalışmanın nem içeriklerinin karşılaştırılması .....	119
Şekil 4.42. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, sıcaklık ve kalınlık) için nem içeriğinin S/N oranı b) Parametrelerin nem içeriği üzerinde etki yüzdeleri.....	121
Şekil 4.43. a) Farklı kurutma parametrelerinde (hız, sıcaklık ve kalınlık) büzülme katsayıları için hesaplanan S/N oranları b) Parametrelerin büzülme katsayısı üzerinde etki yüzdeleri .....	122

Şekil 4.44. a) Farklı kuruma parametreleri ( hız, sıcaklık ve kalınlık) için elde edilen ekserji verimliliği için S/N oranları b) Parametrelerin ekserji verimliliği üzerinde etki yüzdeleri .....	124
Şekil 4.45. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, sıcaklık ve kalınlık) için elde edilen ekserjetik gelişim potansiyeline ait S/N oranları b) Parametrelerin ekserjetik verimliliği üzerinde etki yüzdeleri .....	126
Şekil 4.46. Yüzeyi yanmış olan muzun normal görüntüsü ve 500 kat büyütülmüş görseli .....	129
Şekil 4.47. Kurutulacak olan muzun kurutucuya yerleştirilmesi .....	130
Şekil 4.48. Kurutma sonrası muzun görüntüsü .....	131
Şekil 4.49. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınlam gücü ve tepsi konumu) için kuruma süresinin S/N oranı b) Parametrelerin kuruma süresi üzerindeki etki yüzdeleri .....	133
Şekil 4.50. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınlam gücü ve tepsi konumu) için toplam renk değişiminin S/N oranı b) Parametrelerin toplam renk değişimi üzerindeki etki yüzdeleri .....	135
Şekil 4.51. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınlam gücü ve tepsi konumu) için enerji tüketiminin S/N oranı b) Parametrelerin toplam renk değişimi üzerindeki etki yüzdeleri .....	136
Şekil 4.52. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınlam gücü ve tepsi konumu) için ekserji verimine ait S/N oranı b) Parametrelerin ekserji verimi üzerindeki etki yüzdeleri .....	138
Şekil 4.53. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınlam gücü ve tepsi konumu) için ısı verime ait S/N oranı b) Parametrelerin ısı verim üzerindeki etki yüzdeleri .....	139
Şekil 4.54. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınlam gücü ve tepsi konumu) için özgül enerji tüketimine ait S/N oranı b) Parametrelerin özgül enerji tüketimi üzerindeki etki yüzdeleri .....	141
Şekil 4.55. a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınlam gücü ve tepsi konumu) için kurutucu performans oranına ait S/N oranı b) Parametrelerin kurutucu performans oranı üzerindeki etki yüzdeleri.....	142
Şekil 4.56. Seçilen 3 deney setine ait 500 kat büyütülmüş görseller (a-231; b-212; c-	

313) .....	144
Şekil 4.57. Taze ürünün 500 kat büyütülmüş görseli.....	145
Şekil 4.58. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin kuruma süresi ile olan değişimi.....	147
Şekil 4.59. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin renk değişimi ile olan değişimi .....	147
Şekil 4.60. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin enerji tüketimi ile olan değişimi.....	148
Şekil 4.61. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin ekserji verimi ile olan değişimi .....	149
Şekil 4.62. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin ısı verimi ile olan değişimi.....	149
Şekil 4.63. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin özgül enerji tüketimi ile olan değişimi .....	150
Şekil 4.64. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin performans oranı ile olan değişimi..	151

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Bazı gıda ürünlerinin başlangıç ve kurutma sonrası nem içerikleri.....	12
Çizelge 3.2. Isı transferi mekanizmasına göre kurutucu tipleri .....	13
Çizelge 3.3. Kurutma modellerine ait sabitler ve katsayılar .....	43
Çizelge 3.4. Kurutma deneyinde kullanılan ölçüm cihazlarına ait toplam belirsizlik değerleri.....	51
Çizelge 4.1. 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklar için elde edilen istatistiki parametre değerleri ve katsayılar .....	67
Çizelge 4.2. Taze ve kuru muz dilimlerinin renk parametre ( $L$ , $a$ , $b$ ) değerleri.....	71
Çizelge 4.3. 40°C, 50°C ve 60 °C sıcaklıktaki ürüne ait renk parametre değerlerinin regresyon analizi sonuçları.....	73
Çizelge 4.4. Muzun termofiziksel özellikleri ve deney kurutma koşulları .....	78
Çizelge 4.5. 40°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	80
Çizelge 4.6. 40°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	80
Çizelge 4.7. 50°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	80
Çizelge 4.8. 50°C sıcaklıkta büzülme etkili nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi.....	80
Çizelge 4.9. 50°C sıcaklıkta büzülme etkisiz nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi.....	80
Çizelge 4.10. 60°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi.....	81
Çizelge 4.11. 60°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi.....	81
Çizelge 4.12. 40°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	83
Çizelge 4.13. 40°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	83
Çizelge 4.14. 50°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	83

Çizelge 4.15. 50°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	83
Çizelge 4.16. 60°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	83
Çizelge 4.17. 60°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	84
Çizelge 4.18. Isı ve kütle transfer sınır şartları .....	87
Çizelge 4.19. 30°C sıcaklığındaki elma malzemesinin termofiziksel özellikleri (Hussain ve Dincer 2003).....	88
Çizelge 4.20. Bu çalışmaya ait boyutsuz nem oranının süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	89
Çizelge 4.21. Younsi ve ark. (2006) ait boyutsuz nem oranının süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	89
Çizelge 4.22. Chiang ve Petersen (1987) ait boyutsuz nem oranının süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	89
Çizelge 4.23. Bu çalışmaya ait ürün sıcaklığının süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	89
Çizelge 4.24. Younsi ve ark. (2006) ait ürün sıcaklığının süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	90
Çizelge 4.25. Chiang ve Petersen (1987) ait ürün sıcaklığının süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	90
Çizelge 4.26. Ürünün z ekseninde sıcaklık değişimi ve nem oranı .....	93
Çizelge 4.27. Kurutma modellerinin istatistiksel sonuçları .....	95
Çizelge 4.28. 1m/s için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri .....	100
Çizelge 4.29. 3m/s için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri .....	101
Çizelge 4.30. 5m/s için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri .....	101
Çizelge 4.31. 40°C için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri.....	101
Çizelge 4.32. 80°C için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri.....	102
Çizelge 4.33. 120°C için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri....	102
Çizelge 4.34. %40 nem için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri .....	102
Çizelge 4.35. %60 nem için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri	



.....	103
Çizelge 4.36. %80 nem için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri	103
.....	103
Çizelge 4.37. Modelde kullanılan parametreler ve termofiziksel özellikler .....	105
Çizelge 4.38. Deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	107
Çizelge 4.39. Nümerik büzülme etkili çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi.....	107
Çizelge 4.40. Nümerik büzülme etkisiz çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi.....	108
Çizelge 4.41. Deneysel çalışmaya ait ürün sıcaklığının süre ile olan eğrisel regresyon analizi .....	108
Çizelge 4.42. Nümerik büzülme etkili çalışmaya ait ürün sıcaklığının süre ile olan eğrisel regresyon analizi.....	108
Çizelge 4.43. Nümerik büzülme etkisiz çalışmaya ait ürün sıcaklığının süre ile olan eğrisel regresyon analizi.....	108
Çizelge 4.44. Çalışmada kullanılan kurutma parametreleri ve seviyeleri.....	116
Çizelge 4.45. Taguchi ortogonal L9 dizisi kullanılarak seçilen parametreler ve seviyeleri .....	116
Çizelge 4.46. Salatalığın termofiziksel özellikleri ve deney kurutma koşulları .....	118
Çizelge 4.47. Deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	119
Çizelge 4.48. Nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi .....	119
Çizelge 4.49. 2 saatlik kurutma süreci için nem içeriği ve hesaplanan S/N oranı .....	120
Çizelge 4.50. Nem içeriğine ait S/N oranları için ANOVA tablosu .....	120
Çizelge 4.51. 2 saat sonraki kuruma süreci için büzülme katsayısı değerleri ve hesaplanan S/N oranları .....	122
Çizelge 4.52. Büzülme katsayısına ait S/N oranları için ANOVA tablosu.....	122
Çizelge 4.53. 2 saat sonraki kurutma süreci için ekserji verimliliği ve hesaplanan S/N oranı .....	124
Çizelge 4.54. Ekserji verimliliğine ait S/N oranları için ANOVA tablosu.....	124

Çizelge 4.55. 2 saat sonraki kurutma süreci için ekserjetik gelişim potansiyeli ve hesaplanan S/N oranı.....	126
Çizelge 4.56. Ekserjetik gelişim potansiyeline ait S/N oranları için ANOVA tablosu.....	127
Çizelge 4.57. Farklı sonuç çıktıklarına ait tahmini hata değerleri .....	127
Çizelge 4.58. Çalışmada kullanılan kurutma parametreleri ve seviyeleri.....	132
Çizelge 4.59. Taguchi ortogonal L9 dizisi kullanılarak seçilen parametreler ve seviyeleri .....	132
Çizelge 4.60. Kurutma süreci için kuruma süresi ve hesaplanan S/N oranı .....	133
Çizelge 4.61. Kuruma süresine ait S/N oranları için ANOVA tablosu.....	133
Çizelge 4.62. Toplam renk değişim miktarı ve hesaplanan S/N oranı.....	134
Çizelge 4.63. Toplam renk değişimine ait S/N oranları için ANOVA tablosu.....	134
Çizelge 4.64. Enerji tüketimi ve hesaplanan S/N oranı .....	136
Çizelge 4.65. Enerji tüketimine ait S/N oranları için ANOVA tablosu .....	136
Çizelge 4.66. Ekserji verimi ve hesaplanan S/N oranı.....	137
Çizelge 4.67. Ekserji verimine ait S/N oranları için ANOVA tablosu .....	138
Çizelge 4.68. Isıl verim ve hesaplanan S/N oranı .....	139
Çizelge 4.69. Isıl verime ait S/N oranları için ANOVA tablosu.....	139
Çizelge 4.70. Özgül enerji tüketimi ve hesaplanan S/N oranı .....	140
Çizelge 4.71. Özgül enerji tüketimine ait S/N oranları için ANOVA tablosu.....	140
Çizelge 4.72. Kurutucu performans oranı (ekserji verimi/ısı verim) ve hesaplanan S/N oranı .....	142
Çizelge 4.73. Kurutucu performans oranına ait S/N oranları için ANOVA tablosu.....	142
Çizelge 4.74. Farklı sonuç çıktıklarına ait tahmini hata değerleri .....	146
Çizelge 4.75. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin kuruma süresi üzerinde varyans analizi .....	146
Çizelge 4.76. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin renk değişimi üzerinde varyans analizi .....	147
Çizelge 4.77. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin enerji tüketimi üzerinde varyans analizi .....	148
Çizelge 4.78. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin ekserji verimi üzerinde varyans analizi .....	148
Çizelge 4.79. Kurutma havası bağıl nem içeriğinin ısı verimi üzerinde varyans analizi .....	

.....	149
Çizelge 4.80. Kurutma havası neminin özgül enerji tüketimi için varyans analizi.....	150
Çizelge 4.81. Kurutma havası neminin performans oranı için varyans analizi .....	150

## 1. GİRİŞ

Kurutma işlemi raf ömrü uzun olması için özellikle gıda ürünlerinde yaygınlıkla kullanılmaktadır. Kurutma çalışmalarında kuruma üzerine etki eden parametrelerin etkisi sistemin tasarımı, ürün kalitesi ve enerji tasarrufu açısından önemlidir. Bununla birlikte sistemin enerji ve ekserji analizlerinin yapılması endüstriyel kullanıcılar için ciddi bir öneme sahiptir. Ayrıca kurutma konusunun karmaşık olmasından dolayı ürünün iç yapısının sıcaklık ve nem değişiminin de incelenmesi gerekmektedir. Bu durumun deneysel olarak tespit edilmesi oldukça zordur bu yüzden farklı nümerik metodlar geliştirilmiştir. Kurutma analizlerinde çok farklı kurutma teorilerinin kullanılması ve farklı kurutma yöntemlerinin bulunması, konunun araştırılan güncel bir konu olduğunu göstermektedir. Günümüzde halen farklı metodların kullanıldığı kurutma çalışmaları yapılmaya devam etmektedir.

Bu çalışmaya başlamadan önceki hedefler şu şekilde idi;

- Model ve içinde bulunduğu akış kanalı nümerik olarak 3 boyutlu modellenecek.
- Deneysel çalışmada ürünün nem ve sıcaklık değişimleri ölçülüp sonuçları nümerik modelle karşılaştırılacak.
- Farklı ürünler için kurutma analizi yapılacak.
- Ürünlerin kurutulmasında renk ve pH analizi yapılacak.
- Farklı parametrelerin (hız, sıcaklık, nem, kalınlık, ışınım gücü ve geometri) kuruma üzerine etkisi incelenecek.
- Literatürde sıklıkla kullanılan kurutma modelleri farklı parametrik sonuçlara uygulanıp en uygun modelin hangisi olduğu araştırılacak.

- Ürünün kurutulmasında nem ve sıcaklık değişiminin varyans analizi yapılarak modelin iyi bir tahminleyici olup olmadığı araştırılacak.
- Deneyde kullanılan ölçüm aletleri için hata analizi yapılacak.
- Nümerik çözüm hakkında detaylı bilgi verilecek.
- Optimum kurutma koşulları için ürün kalitesi, süresi, enerji tüketimi ile maliyeti hakkında bilgi verilecek.
- Akademik ve endüstriyel kullanıcılar kurutmanın hangi şartlarda ve nasıl uygulanması (nümerik ve deneysel) gerektiği hakkında fikir sahibi olabilecek.

Hedeflenen tüm sonuçlar 5 farklı çalışma başlığı altında incelenmiştir. Çalışmada farklı gıda ürünlerinin kurutulması işlemi deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirildi. Ürün renk ve pH değişimi, farklı kurutma modelleri ile karşılaştırılması, aktivasyon enerjisi, hacimsel değişimi incelendi. Ayrıca deneysel belirsizlik değerleri de tespit edildi. Aynı zamanda Taguchi metodu ile kurutmaya etki eden parametrelerin etki oranları tespit edildi. Enerji ve ekserji analizleri yapıldı. Ürün sıvı ve gaz fazında modellenerek Darcy akış yaklaşımı nümerik olarak uygulandı. Ürün 2 ve 3 boyutlu geometri olarak modellendi ve analizler uygulandı. Üründe meydana gelen hacimsel değişim “Deformed-Moving Mesh” metodu uygulanarak incelendi. Son olarak farklı kurutucu olarak kızılötesi ışınlam ve konvektif yöntemler uygulandı. Optimum kurutma parametrelerinin tespit edilebilmesi için Taguchi metodu ile istatistiki varyans (ANOVA) analizi yapıldı. Kurutucu performans oranı tanımlandı ve çalışmaya uygulandı.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde kurutma konusunda oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Literatürde kurutma karakteristiği eğrileri, renk analizi, ince tabaka kurutma modelleri, efektif difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi, büzülme etkisi, Taguchi analizi ile ilgili yapılmış farklı çalışmalara rastlamak mümkündür. Aşağıda kurutma konusunda yapılmış olan bazı çalışmalardan özetler sunulmuştur.

### 2.1. Zorlanmış Taşınım ile Kurutma İçin Yapılmış Çalışmalar

Hussain ve Dinçer (2003), çalışmalarında nemli iki boyutlu dikdörtgen kesitli ürünün zorlanmış taşınım ile kurutulması sırasında eş zamanlı olarak elde edilen ısı ve kütle transferi denklemlerini sayısal olarak incelemişlerdir.

Karim ve Hawlader (2005), yaptıkları çalışmada muzun zorlanmış taşınım ile kurutulması sırasında ısı ve kütle transfer denklemlerini çözen bir matematik model geliştirmişlerdir. Deneyden elde ettikleri veriler ile oluşturdukları modeli doğrulamışlar ve farklı kurutma koşulları için de parametrik bir çalışma yapmışlardır. Aynı zamanda muzun efektif difüzyon katsayısını da hesaplamışlardır.

Etemoglu ve ark. (2005), kağıt kurutma prosesini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çarpan hava jeti ve hava kurutma metodu ile kağıt kurutulmasında eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri için model geliştirmişlerdir. Her iki metod ile geçici rejimde hesapladıkları kâğıt sıcaklığını deneysel veriler ile karşılaştırıp sonuçların uygun olduğunu göstermişlerdir.

Bonis ve Ruocco (2008), çalışmalarında ısı ve kütle transferini Comsol programını kullanarak incelemişlerdir. Kurutma havası sıcaklığının kurutma üzerine etkisini araştırmışlardır. Modeli ortalama ısı ve kütle taşınım katsayılarını kullanmadan oluşturmuşlardır. Nem içeriğine bağlı olarak programda kurutmayı tanımlamışlardır. Oluşturdukları modeli literatürden aldıkları deneysel veriler ile karşılaştırıp

doğrulamışlardır. Bu modelin aynı zamanda endüstriyel kurutucularda da kullanılabilceğini vurgulamışlardır.

Curcio ve ark. (2008), çalışmalarında bir gıda ürününün sıcak hava ile türbülanslı koşullar altında kurutulması sırasında eş zamanlı ısı ve kütle transferini teorik olarak modellemişlerdir. Oluşturulan kısmi diferansiyel denklemleri sonlu eleman metodu ile çözmüşlerdir. Yaptıkları çalışmayı literatürden elde edilen deneysel bir çalışma ile karşılaştırılıp sonuçların uygun olduğunu göstermişlerdir.

Etemoğlu ve ark. (2009), çalışmalarında hareketli bir düz plaka üzerinde bulunan bez parçasının kurutulması sürecini teorik ve deneysel olarak geçici rejimde incelemişlerdir. Matematik modeli çarpan hava jetli kurutucuda ısı ve kütle transferi analizi için geliştirmişlerdir. Modeli kullanarak teorik olarak hesapladıkları bez sıcaklığı ile deneysel verileri karşılaştırmışlardır. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Thuwapanichayanan ve ark. (2011), muz kurutulması üzerinde sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. Aynı zamanda kuruma hızı, renk analizi, şekil değişimi ve ürün mikroyapısını da incelemişlerdir. Kuruma hızının azalan hız periyodunda gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Conti ve ark. (2012), çalışmalarında kullandıkları odun malzemesinin kurutulmasını temsil eden matematiksel modelini oluşturduktan sonra bunu yaptıkları deneylerin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Matematiksel modelin oluşturulmasında Simpson Modelini ve chi-square istatistiksel metodunu kullanmışlardır. Simpson modeli ortalama nem içeriğine bağlı olarak kuruma oranını ifade eder. Yaptıkları deneyde 10 mm × 20 mm × 100 mm boyutlarında 108 adet odun parçası kullanmışlardır. Odundaki nem azalmasının hızlı olmasından dolayı oluşacak hataları azaltmak için sıcaklığı aşamalı olarak artırmışlardır. Elde ettikleri bu model sayesinde farklı odun sıcaklıkları için kuruma sürelerinin tahminini kolaylaştırmışlardır.

Lemus-Mondaca ve ark. (2013), 40°C'den 80°C'ye kadar farklı kurutma havası sıcaklıklarını kullanarak katı bir gıda ürününün kurutulmasını hem nümerik hem deneysel olarak incelemişlerdir. Ürün içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımını 3 boyutlu ısı iletimi ve kütle difüzyonu matematik modelleri kullanarak tahmin etmişlerdir. Deneysel verilerden elde ettikleri nem ve sıcaklık dağılımlarını nümerik olarak elde edilen veriler ile karşılaştırmışlardır. Isı ve kütle taşınım katsayılarını analitik model kullanarak hesaplamışlardır. Deneysel sonuçlarının %6 ile %9 oranında belirsiz davranış ortaya koyduğunu göstermişlerdir. İstatistikî verilere göre sonlu hacim metodunun çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Silva ve ark. (2013), muz dilimlerinin kuruma davranışını tespit edebilmek için 3 farklı difüzyon modeli kullanmışlardır. Difüzyon denklemlerinin analitik çözümünü sınır şartlarını kullanarak çözmüşler ve sonuçları deneysel çalışma ile karşılaştırmışlardır.

Tasirin ve ark. (2013), portakal kurutulmasına etki eden parametrelerin optimizasyon çalışması için Taguchi metodunu uygulamışlardır. Her bir parametrenin kurutma üzerindeki katkı faktörlerini hesaplamak için ANOVA analizi yapmışlardır. Kuruma sürelerini ve enerji tüketim miktarlarını hesaplamışlardır.

Ateeque ve ark. (2014), gıda ürünlerinin nem içeriğinin tahmini için nümerik model geliştirmişlerdir. Isı ve kütle transferinin korunum denklemlerini sonlu hacim metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Bu çözüm için Matlab da 3D kodu geliştirmişlerdir. CFD kodu kullanarak ürün üzerinden türbülanslı akış için ısı taşınım katsayılarını elde etmişlerdir. Patates kurutulmasında hız ve sıcaklığın kuruma davranışı üzerine olan etkisini araştırmışlar ve deneysel veriler ile elde ettikleri nümerik modeli doğrulamışlardır.

Alvarado ve ark. (2014), gıda ürünü kurutulması için eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemlerini sabit ürün özellikleri için geliştirmişlerdir. Bir boyutlu dikdörtgen kesitli ürün için Luikov denklemlerini analitik olarak çözmüşlerdir. Yüzey nem içeriği üzerinde sıcaklığın etkisini inceleyip bazı deneysel sonuçlar ile karşılaştırma yapmışlardır.



Udayraj ve ark. (2014), bir gıda ürününün nem içeriğinin tahmini için nümerik model geliştirmişlerdir. Nem transferi nemli ürün üzerinden akan kuru havaya yüzeyden su buharlaşması sonucu iç tabakadan dış yüzeye nem difüzyonu olduğunu düşünerek modellemişlerdir. Sonlu hacim metodunu kullanarak eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemlerinin çözümü Matlab programında A-3D kodunu geliştirerek çözmüşlerdir. Nemli malzeme üzerindeki akış alanını türbülanslı akış olarak kabul edip SST k-w türbülans modelini CFD kodu kullanarak ısı transfer katsayısının hesaplanmasında kullanmışlardır Ürünü dikdörtgen şeklinde kabul edip kuruma davranışı üzerinde hız ve sıcaklık etkilerini incelemişlerdir. Daha sonra nümerik metod sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırıp sonuçların mantıklı olduğunu göstermişlerdir.

Samadi ve ark. (2014), 3 farklı kalınlıkta muz diliminin kurutulmasını incelemişlerdir. Matematik modeller kullanılarak deneysel verileri en iyi doğrulayan modelin Midilli olduğunu göstermişlerdir.

Kumar ve ark. (2015), çalışmalarında zorlanmış taşınım ile meyve kurutulması sırasında eş zamanlı ısı ve kütle transferinin matematik modelini geliştirmişlerdir. Bu modeli kullanarak kuruma sırasında meyvenin içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımını tahmin etmişlerdir. Nem difüzyonuna bağlı olarak sıcaklık ve büzülmenin nasıl değiştiğini gösteren iki model geliştirerek sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Isı ve kütle transfer denklemlerini Comsol Multiphysics yazılımı kullanarak çözmüşlerdir. Daha sonra elde edilen sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır.

Bezerra ve ark. (2015), yaptıkları çalışmalarında literatürde bulunan bir kurutma modelini kullanarak meyve kabuklarının kuruma davranışını incelemişlerdir. Farklı sıcaklık ve hızlar için deneylerini gerçekleştirip sonuçları istatistiki parametreler ile karşılaştırmışlardır. Sonuçları uyumlu olarak elde etmişlerdir. Aynı zamanda difüzyon katsayısı, kütle transfer katsayısını ve biot sayısını hesaplamışlardır.

Tzempelikos ve ark. (2015), silindirik ayva dilimlerinin zorlanmış taşınım ile kurutulmasını nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Isı ve kütle transferi denklemlerini tek boyutlu modellemişlerdir. Deneysel olarak yaptıkları çalışma ile

efektif nem difüzyon katsayılarını hesaplamışlardır. CFD yazılımı kullanarak ısı ve kütle transferi katsayılarını türbülanslı akış alanı için elde etmişlerdir. Elde edilen deneysel verilerle farklı hız ve sıcaklıklar için doğrulama yapmışlardır.

Franco ve ark. (2015), farklı kalınlık ve hava sıcaklıklarında deneysel ve nümerik olarak meyve kurutması yapmışlardır. Ürün tabaka kalınlığının ve hava sıcaklığının kuruma süresi, nem içeriği ve ürün su aktivitesi üzerine olan etkisini istatistiki olarak incelemişlerdir. Sonlu eleman yazılım programı olan Comsol ile ısı ve kütle transferi denklemlerini çözerek model geliştirmişlerdir. Modelin doğrulaması yapılarak kaliteli ürün elde edilmesinde iyi bir yaklaşıma sahip olduğunu göstermişlerdir.

Zadin ve ark. (2015), endüstriyel odun kurutma prosesini optimize etmek için Comsol simülasyon programını kullanmışlardır. Akış alanı için k-e türbülans modelini kullanıp hava ve odunda sıvı ve gaz fazı ile katıda ısı transferini modellemişlerdir. Multifizik simülasyon modelini endüstriyel odun kurutulmasının optimizasyonunda başarılı bir şekilde kullanmışlardır.

Gulati ve Datta (2015), gıda kurutulması sırasında üründe faz değişimini dikkate alarak modellerini geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımları ile önceden kurutma kalitesi hakkında fikir sahibi olunabileceğini ifade etmişlerdir. Modelin doğruluğunu deneysel veriler ile sağlamışlardır. Patatesin kurutulmasını Comsol programında modellemişlerdir. Bu oluşturdukları model ile sıcaklık, nem değeri, deformasyon, ürün yoğunluğu ve gaz gözenekliliği değerlerini literatürde yapılan diğer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Oluşturdukları modelin farklı kurutma koşulları için geliştirilebileceğini ve daha kaliteli ürünlerin nasıl elde edilebileceği yönünde faydalı olunabileceğini öne sürmüşlerdir. Tasarım parametreleri ile ürün kalitesinin daha iyi hale getirilebileceği önerisinde bulunmuşlardır.

Omolola ve ark. (2015), ince tabaka muz kurutma kinetiğini incelemişlerdir. Deneyden elde ettikleri sonuçları farklı kurutma modellerine uygulayıp en uygun modelin Two Term Modeli olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca kurutma işleminin azalan hız

periyodunda gerçekleştiğini ve artan hava sıcaklığı ile efektif difüzyon katsayısının arttığını tespit etmişlerdir.

Vega ve ark. (2016), Meyve ve sebzelerin kurutulmasında ürün yüzeyinde maksimum sıcaklık değerini araştırmışlardır. Elma dilimlerini deneysel olarak otomatik kontrol ünitesinde kurutmuşlardır. Simülasyon modelinde deneysel datalar ile optimum kontrolü tanımlamışlardır. Yaptıkları çalışmada kuruma süresini kısaltarak ürün kalitesi ve verimini artırmayı amaçlamışlardır.

Defraeye ve ark. (2016), meyve dilimlerinin zorlanmış taşınımla kurutulmasında ürün içi nem dağılımını görüntülemek için nötron röntgen filmi kullanmışlardır. Hava hızı, sıcaklığı ve radyasyonun etkisini incelemişlerdir. Bu görüntüleme tekniği ile ürün içerisindeki suyun nasıl hareket ettiğini elde etmişlerdir.

Saha ve ark. (2018), kurutma çalışmaları için büzölme etkisini hesaba katarak iki difüzyon modeli geliştirmişlerdir. alışmalarında, muz dilimlerinin kurutulması için bir ısı pompası kurutucusu kullanmışlardır. Yazarlar, daha iyi kurutma sonuçları için büzölme etkisinin ince tabaka kurutma modellerine eklenmesi gerektiğini önermişlerdir.

Folayan ve ark. (2018), farklı kalınlıklarda (0.5, 1 ve 1.5 cm) dilimledikleri soğanın kurutma karakteristiklerini farklı sıcaklıklarda (65°C, 75°C, 85°C ve 95°C) incelemişlerdir. Bununla birlikte kurutma sırasında enerji ve ekserji verimliliği için optimum kurutma koşullarını da araştırmışlardır. Bütün sıcaklıklar için 1.5 cm kalınlığındaki ürünün kurutulmasında ekserji veriminin en yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Singh ve Talukdar (2019), patatesin kurutma kinetiğini farklı hava hızı (2, 4 ve 6 m/s) ve hava sıcaklıkları (40°C, 50°C ve 60°C) için test etmişlerdir. Enerji tüketimi için yaptıkları ANOVA analizi sonuçlarına göre kurutma üzerinde en fazla katkıyı %82.2 ile sıcaklık parametresinin sağladığını göstermişlerdir. Hava hızınının 2m/s den 6m/s değerine çıkartıldığında kuruma süresinin %30 azaldığını ve hava sıcaklığının 40°C den 60°C ye çıkartıldığında ise kuruma süresinin %36 kısaltıldığını tespit etmişlerdir.

Yuan ve ark. (2019), elma dilimlerinin sıcak hava ile kurutulması sırasında oluşan büzülme etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçları doğrulamak için Comsol Multiphysics programını kullanarak büzülme etkisine bağlı sıcaklık ve nem dağılımlarını elde etmişlerdir. Doğrulama sonucu olarak nümerik çözüm ile deneysel veriler arasında %10'dan daha az bir hata oranı olduğunu göstermişlerdir.

## **2.2. Işınımla Kurutma İçin Yapılmış alışmalar**

Nimmol ve ark. (2007), yaptıkları deneysel çalışmada uzun dalga IR ve düşük basınçlı IR kurutucu kullanarak gıda ürünü üzerinde kalite değişimini incelemişlerdir. Yaptıkları incelemeler sonunda uzun dalga IR ısıtıcıda ürünün daha kısa sürede kuruduğunu, düşük basınçlı IR kurutucuda ise ürünün daha kaliteli olduğunu görmüşlerdir.

Leonard ve ark. (2008), yaptıkları çalışmalarında gıda ürününün mikro yapısının kurutulmasında uzak mesafeli kızılötesi işınım (IR) yöntemi kullanmışlardır. Ürünün mikro yapısını gözlemlemek için X Ray mikrotomografi tekniğini uygulamışlardır. Kurutma tekniği olarak düşük basınçlı süper ısıtmalı buharlı kurutma ve vakum kurutma yöntemlerini test etmişlerdir. Her iki kurutma yöntemi tek başına ve kızıl ötesi işınım dahil edilerek uygulayarak final kurutma gözenekliliği üzerindeki etkilerini gözlemlemişlerdir. IR ısıtma olduğu zaman sıcaklığın artışı ile sonuç gözenekliliğinin artırıcı bir yapı oluşturduğunu görmüşlerdir. rn gözenekliliğinin bilinmesi kurutma koşullarının daha iyi optimize edilmesini sağladığı için IR ısıtma yönteminin uygulanmasının önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Jaturonglumlert ve Kiatsiriroat (2010), yaptıkları çalışmalarında sıcak hava ve (IR) uzak kızıl ötesi ısıtma sistemlerinin kombinasyonu ile meyve kurutulmasında eş zamanlı ısı ve kütle transferini incelemişlerdir. Isı ve kütle analogisi ile katsayıları elde etmişlerdir. Isı ve kütle transferi katsayıları arasındaki oranı klasik yöntemle elde edemeyip düzeltilmiş Nu sayısı kullanmışlardır. Geliştirdikleri model ile deneysel veriler arasında %10'luk sapma değeri elde etmişlerdir. Birleşik konvektif ve (IR) kızıl ötesi ısıtma ile sadece sıcak hava ile kurutma işlemlerini karşılaştırmışlardır. Kızıl tesi ısıtmada

yüksek ısı ve kütle taşınım katsayılarından dolayı daha kısa kuruma zamanı elde etmişlerdir.

Heybeli ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada (IR) kızıl ötesi kurutma yöntemi ile kerevizi kurutmuşlardır. İşlem boyunca ürünün kuruma hızı, süresi ve renk değişimini incelemişlerdir. Sonuç olarak kızıl ötesi ısıtma yöntemini seçme nedenlerini şu şekilde sıralamışlardır;

1. Isı transferi direncinin olmaması

2. Enerji maliyetinin düşük olması

3. Isıtma süresini kısaltması.

Aktaş ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada (IR) kızılötesi bir kurutucu tasarlamışlardır. Meyve parçalarının kurutulması işlemini deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda atık ısıdan faydalanmak için geri kazanım ünitesi kullanmışlardır. Isı transferi açısından kızıl ötesi (IR) ışınım lambası kullanımı ile ürünün daha kısa zamanda kurutulması sağlanmış olup enerji tüketiminin azaldığını tespit etmişlerdir. Ürünü 3,89 gr su/gr kuru madde başlangıç nem içeriğinden 0,16 gr su/gr kuru madde nem içeriğine kadar kurutmuşlardır. 35°C ve 40°C kurutma havası sıcaklıkları ile 1.22 m/s, 1,83 m/s ve 2,45 m/s kurutma havası hızlarında kurutma işlemlerini yapmışlardır.

Aghbashlo (2016), çalışmasında kombine infrared konvektif kurutucunun optimum tasarımı ve performansını araştırmıştır. Isı ve kütle transfer modelini kullanarak kurutma sürecinin ekserji analizi için teorik bir yaklaşım önermiştir. Bir ürün üzerinde bu elde ettikleri modelin uygulamasını yapmıştır. İnfrared sıcaklıkları olarak 1073.15K, 1173.15K, 1273.15K, 1373.15 ve 1473.15K ve kurutma havası sıcaklıkları olarak ise 323.15K, 333.15K, 343.15K, 353.15K ve 363.15K seçilmiştir.

Ruhanian ve Movagharnejad (2016), ince patates tabakasının kurutulmasını kızıl ötesi konvektif kurutucuda deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylelerini 3 farklı kalınlık ve 3 farklı kurutucu gücü için gerçekleştirmişlerdir. Kurutmanın neredeyse tamamının azalan

hız periyodunda olduğu görülmüştür. Kurutucu gücünü artırmanın nem içeriğini ve kuruma süresini kısalttığı, deformasyonu ve efektif nem difüzyon katsayısını artırdığı bulgusunu elde etmişlerdir. 8 farklı kurutma modelini elde ettikleri deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Belirlilik katsayısı ( $R^2$ ), standart sapma (RMSE) ve ki kare (chi-square) istatistiki parametre değerlerini her bir kurutma modeli için hesaplamışlardır.

### **2.3. Tez Çalışmasının Literatürden Farkı ve Sağladığı Yenilikler**

Taguchi analizinde en uygun parametreyi bulmak için literatürde genellikle kuruma süresinin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada farklı olarak enerji tüketimi, ekserji verimi, renk değişimi, ekserjetik gelişim potansiyeli, ısıl verim, özgül enerji tüketimi kullanılmıştır. Her bir sonuç çıktısı için en uygun optimum kurutma koşulları araştırılmıştır. Daha önce literatürde muz ve salatalık kurutulması için optimizasyon (Taguchi) çalışmasına rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında her iki ürün için Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ayrıca kızılötesi ışınlama kurutmada optimum kurutma koşullarının tespiti için performans oranı tanımlanmıştır.

Kurutma sırasında ürün içerisindeki sıvı buhar faz dengesi için tanımlanan Darcy akış modeli Comsol programı kullanılarak farklı geometriye sahip ürünler için uygulanmıştır. Kurutma sırasında üründe meydana gelen hacimsel değişim literatürde yapılan çoğu nümerik ve teorik çalışmalarda ihmal edilirken bazı çalışmalarda Young modülü içeren gerilme deformasyonu metodu ile incelendiği görülmüştür. Bu çalışmada ise diğer yöntemlerden farklı olarak ALE (Arbitrary Lagrange Eulerian) metodu ile “Deformed-Moving Mesh” modülü kullanılmıştır.

Kurutma çalışmalarında ürün kalitesi için sıklıkla kullanılan yöntem olan rehidrasyon oranı yerine üründeki pH etkisi araştırılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada nümerik ve deneysel çalışmalara ait sonuçlar karşılaştırılarak doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu çalışmaların karşılaştırılması için regresyon analizleri yapılarak bağımsız değişkenin (süre) bağımlı değişkenleri (sıcaklık ve nem) açıklama etkisi tanımlanmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Kurutma ile İlgili Genel Bilgi

Meyve, sebze ve sulu besinler bünyelerindeki fazla sudan dolayı uzun süre saklanamazlar. Çünkü fazla su, mikrobiyolojik ve kimyasal bozulmalara neden olmaktadır. Bu bozulmanın engellenmesi, meyve, sebze ve diğer bazı besinlerin bileşimlerindeki fazla suyun uzaklaştırılmasıyla yani o besinlerin kurutulmasıyla mümkündür. Kurutma; kurutma havası ile ürün arasında gerçekleşen eş zamanlı ısı ve kütle transferi işlemidir. Kurutma işlemi ile ürünlerin (gıda maddelerinin) uzun süre bozulmadan depolanması ve nem miktarının düşürülmesinin yanında aroma, besin değeri ve vitamin gibi özelliklerinin korunması da sağlanmış olur. Böylece ekonomik israf önlenmiş olup uzun süre kaliteli ürün tüketiciye sunulmaktadır. Çizelge 3.1’de bazı ürünlerin başlangıç ve kurutma sonrası nem içeriği değerleri verilmiştir (Alibas 2006, Ertekin 2002).

**Çizelge 3.1.** Bazı gıda ürünlerinin başlangıç ve kurutma sonrası nem içerikleri

Ürün	İlk nem içeriği (%)	Son nem içeriği (%)	Ürün	İlk nem içeriği (%)	Son nem içeriği (%)
Kayısı	85.3	25	Domates	93	7
İncir	77.5	26	Elma	84.8	24
Patates	77	7	Hurma	65	40
Havuç	80-90	5-10	Şeftali	75-80	20
Muz	80	15	İspanak	80	10
Erik	78.7	35	Vişne	83.7	25
Kiraz	81	30	Armut	84	25

#### 3.1.1. Kurutucuların sınıflandırılması

Kurutucu seçiminde dikkat edilmesi gerekenler aşağıda verilmiştir:

- Kurutulacak malzemenin fiziksel özellikleri
- Ürünün kuruma özellikleri
- Maddenin kurutucu içerisindeki akışı
- Ürünün kalitesi

- Geri kazanma durumu
- İşletme tesisi imkanları

Gıda, ağaç ve tekstil gibi endüstride kurutma işlemleri çok önemli bir yer tutmaktadır. Yukarıda saydığımız özellikler kurutucu seçiminde enerji tasarrufu için göz önünde bulundurulmalıdır. Endüstride yaygın olarak 200'den fazla kurutucu kullanılmaktadır, bunlarda sadece 20 kadarı temel kurutuculardır (Baker 1997).

Isı transfer mekanizmasına göre temel kurutucu tipleri; konvektif kurutma, iletimle kurutma, ışınlı kurutma ve bunlardan birkaçının kullanıldığı birleşik kurutma olarak sınıflandırılabilir (Çizelge 3.2).

**Çizelge 3.2.** Isı transferi mekanizmasına göre kurutucu tipleri

Konvektif kurutma	İletimle kurutma	İşinimle kurutma
Birleşik mod Örnek olarak: Konvektif+ışınlı kurutma		

**a) Konvektif Kurutma :** Konvektif kurutmada ısı sıcak gaz (hava) tarafından katı ürün ile temas ettirilerek buharlaşma sağlanır. Isı sıcak gazdan ürüne verilmektedir. Kullanılabilirliğin kolay olmasından dolayı konvektif kurutma genellikle tercih edilir.

**b) İletimle Kurutma:** İletimle kurutmada ısıtma, ürünün sıcak yüzeyleri ile temas ettirilerek iletim yolu ile içerisindeki nemin buharlaştırılması işlemidir.

**c) İşinimle Kurutma:** İşinim ile kurutmada ihtiyaç duyulan enerji belli frekans ve dalga boyundaki ışınlıların kurutulmak istenen yüzey üzerine gönderilmesi ile gerçekleşir.

**d) Kombine Kurutma:** Kurutma işlemi için hem konvektif sıcak hava üfleme sistemi ile ışınlı kurutma sisteminin bir arada uygulanarak yapılan kurutma işlemidir.



Kurutma prosesinde işlem sırası kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Isıtılan hava kurutma yapılacak ürün üzerine gönderilir.
- Ürünle temas eden sıcak hava soğur ve bu sırada üründen buharlaşan nem havaya karışır
- Nemli ve soğuk hava sistemden dışarı atılır.

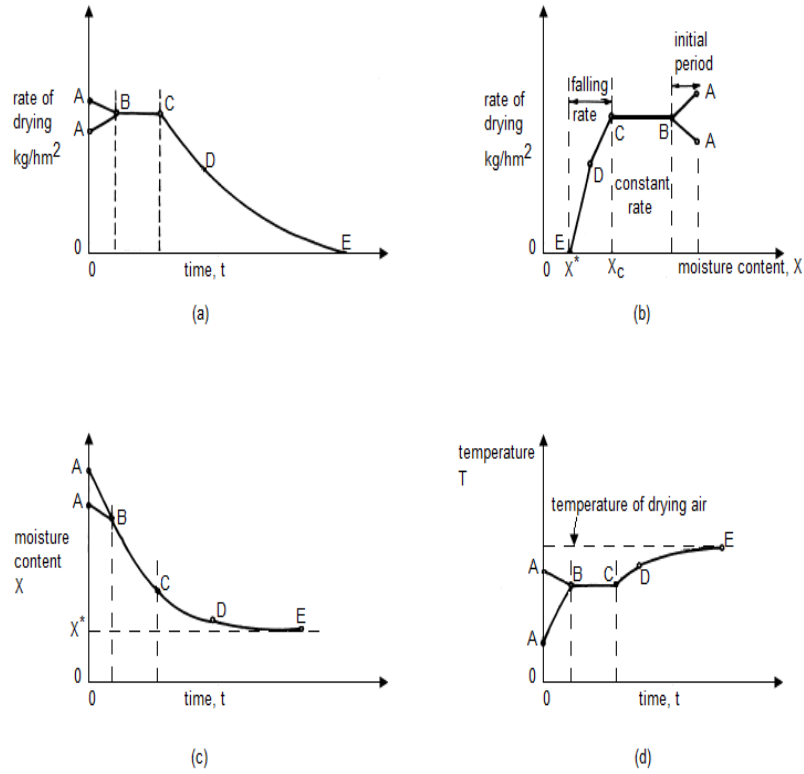
### **Konvektif Kurutma**

Kurutmada sıcak hava akımı kurutucuda malzeme üzerine gönderilerek ısının taşınım yolu ile malzemeye geçmesini sağlarken, buharlaşan suyu da ortamdan uzaklaştırır. Bu işlem havanın bağıl nemine ve sıcaklığına bağlı olarak üründe denge nemi oluşuncaya kadar devam eder.

Kurutma işlemi eş zamanlı ısı ve kütle transferi mekanizmalarından oluşan karmaşık bir süreçtir. Hava ile kurutma süreci genellikle sabit hız ve ve ardından azalan hız periyodundan oluşmaktadır. Sabit hız periyodunda yüzey su ile kaplıdır. Su buharlaştıkça yüzeyden kütle transferi gerçekleşmektedir. Hava hızı, sıcaklığı ve bağıl nem bu süreçte kurutma hızını etkileyen faktörlerdir. Azalan hız periyodunda nem transferi kılcal akış, sıvı ve buhar difüzyonu gibi iç kütle transfer mekanizmaları tarafından kontrol edilir. Azalan hız periyodunda bu mekanizmalardan bir veya daha fazlası aynı anda etki edebilir. Hava sıcaklığı, kimyasal bileşim, ürünün fiziksel yapısı ve kalınlığı kuruma hızını etkiler. Higroskopik malzemelerde 2 azalan hız periyodu oluşmaktadır. 1. azalan hız periyodunda ürün nemi havaya karıştıkça ıslak yüzey alanı azalır. Yüzey kuruduktan sonra 2. azalan hız periyodu başlar ve buharlaşma ürünün iç kısımlarında oluşur (Heldman ve Hartel 1999, Geankoplis 1993, Rizvi 1995, Toledo 1999).

Birim alandan birim zamanda buharlaşma ile transfer olan su kütlesi kurutma hızını belirler. Yüzeyi su filmi ile kaplı nemli bir ürün kurutulmaya başlandığında kuruma hızı su yüzeyinden buharlaşma hızına eşittir. Havanın hızı, sıcaklığı, nemi sabit kaldığı sürece kuruma hızı da değişmez. Yüzeydeki su filminin ortadan kalkmaya başladığı andaki nem Birinci Kritik Nem olarak adlandırılır. Sabit Hız Periyodu ise kritik neme

düşünceye kadar süren kurutma periyoduna denir. Malzeme içindeki mutlak nemin ve kuruma hızının zaman ile değişimi Şekil 3.1’de verilmiştir (Avcı 1999).



**Şekil 3.1.** a) Kuruma hızının zamanla değişimi b) Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi c) Nem içeriğinin zamanla değişimi d) Sıcaklığın zamanla değişimi

Ürünün nem oranı zaman içinde farklı periyotlar halinde sürekli azalmaktadır. Yüzeysel sıcaklığı ise kurutma havasına bağlı olarak dış şartlar (hava hızı, nemi, sıcaklığı) sabit olduğu için BC aralığında sabittir. Bunun sebebi sıvının düzgün buharlaşmasıdır. BC bölgesinde ısı transferi kütle transferi ile dengelenmiş bulunmaktadır.

AB: Denge noktasından önce nemli ürünün ısıtılması veya soğutulması süreci

BC: Sabit hız periyodunda sıvının kararlı buharlaşması

C: Nemli ürünün yüzeyinde kuru noktaların oluşmaya başladığı birinci kritik nokta

CD: Birinci azalan hız periyodu

D: Yüzeyin tamamen buharlaştığı kuru bölgelerin görüldüğü ikinci kritik nokta

DE: İkinci azalan hız periyodu

Bir katı madde A noktasından kurutulmaya başlandıktan kısa bir zaman sonra ‘SHP’ denilen sabit hız periyoduna girer. Bu devrede kuruma hızı sabittir ve havanın değişken olan hızı, nemi ve sıcaklığı kuruma hızını etkiler. Bu denge durumundaki katının yüzeyi bir nem tabakası ile tamamen kaplıdır ve yüzey sıcaklığı havanın yaş termometre sıcaklığına eşittir. Ancak malzemedeki nem miktarı azalmaya başlayınca kılcal boşluklardaki sürtünme direncinin artmasından dolayı iç bölgeden yüzeye sıvı transferi zorlaşmakta ve yüzey sürekli nemli kalmamaktadır. Katı ürün kurutulmaya devam edildikçe kuruma hızı sabit kalmaz ve C Birinci Kritik Nem noktasında su filmi kaybolmaya başlar. Bir süre sonra yüzeydeki su filmi tamamen kaybolur. Bu noktadan sonra kütle transferinde sürekli bir azalma gözlenmektedir. Bu periyoda Azalan Hız Periyodu denilir. D noktasına ise İkinci Kritik Nem denir. Kurutmaya devam edildikçe suyun madde içinden yüzeye olan hareket hızına bağlı olarak kuruma hızı azalmaya devam eder ve ürünün nemi kurutma havasının bağıl nemi ile dengede olduğu nem miktarına gelince hızı sıfır olur. Azalan hız periyodunda ürün yüzeyinde kurulukların oluşması ve yüzey sıcaklığının çok artması sonucu üründe yapı ve kalite bozuklukları görülmektedir. Kritik nem değerinin aşılması sonucu higroskopik nem kaybı meydana gelir. Tekstil ürünlerinde bu yüzden kritik nem değerinin aşılmadığı BC bölgesinde kurutma işleminin yapılması tercih edilmektedir.

Kritik nokta denmesinin sebebi, kurutma işleminde katı içindeki sıvının içeriden yüzeye karşı gösterdiği iç direnç ile kurutma miktarını sınırlandırmasıdır. Bu noktadan sonra yüzeyde buharlaşma meydana gelir ve kuruma miktarı azalır. İkinci kritik noktada ise yüzey tamamen buharlaşır. Azalan hız periyodunda yüzeye transfer edilen ısı sıvının buharlaşması için gereken enerjiyi aşar. Yüzey sıcaklığı kuru termometre sıcaklığına yaklaşır. Sonuç olarak kütle transferi azalır ve denge nemine ulaşılır.

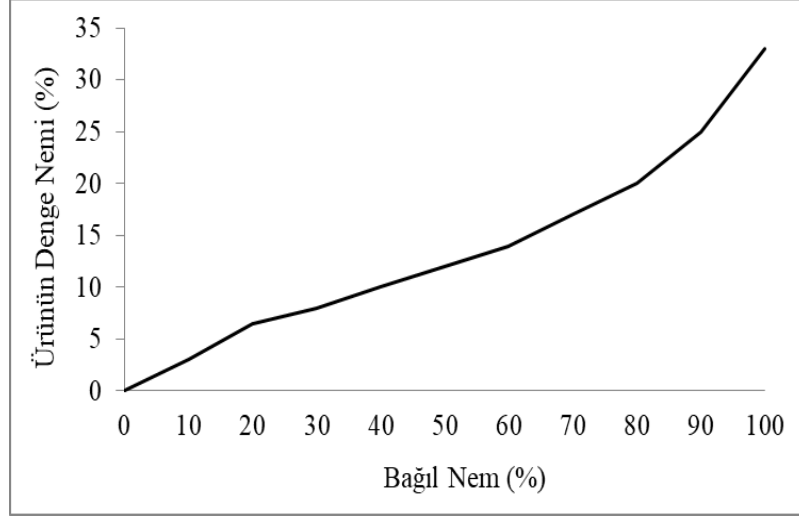
Ürünler barındırdıkları nemin özelliklerine göre higroskopik ve higroskopik olmayan maddeler olarak ikiye ayrılırlar. Higroskopik malzemeler bünyesine su alabilen maddelerdir. Ürünün çevresi ile higroskopik bir denge oluşturması havanın sıcaklığı ve nemine bağlı olarak değişmektedir. Ürünün nem oranı kurutma havasının nem oranı ile dengede olmadığı takdirde ürün bünyesine su almakta veya vermektedir. Bu duruma

sebepler aynı zamanda malzemedeki suyun kısmi basıncının çevre havasının su buharı basıncından farklı olması olarak da söylenebilir. Bu malzemeler ancak denge nem içeriğine ulaşıncaya kadar kurutulabilirler.

Higroskopik olmayan maddeler ise kum, kil, cam vb. gibi bünyelerinde su içermeyen maddelerdir. Malzeme içindeki suyun kısmi basıncı ile havadaki suyun buhar basıncı birbirine eşittir. Kurutma işlemi sırasında denge neminde kurutma yapılan hava sıcaklığı ve bağıl nemine bağlı olarak kuru ürün en az nem miktarına sahiptir. Higroskopik maddeler sadece denge nem içeriğine sahiptir (Roberts 1999).

Malzemelerde bulunan boşluklardan dolayı yapıları gözenekli olarak isimlendirilmektedir. Bu boşluklar su veya hava ile dolu olabilir. Üründe bulunan suyun buhar basıncı dış ortamda bulunan su buharının kısmi basıncından büyük ise üründen dış ortama nem transferi gerçekleşir. Eğer üründe bulunan suyun buhar basıncı dış ortam havasında bulunan su buharının kısmi basıncından küçük ise dış ortamdan ürüne nem transferi olur. Çevre havasının nemi ile ürün nemi arasındaki oluşan dengeye higroskopik denge denir (Kaya 2008).

Ürünün denge nem içeriği ile havanın bağıl nemi arasındaki ilişki sorpsiyon eğrisi olarak bilinmektedir (Şekil 3.2) (Cemeroglu ve Acar 1986). Kuru ürünün çevreden sıvı almasına absorpsiyon (nemlendirme), yağ malzemedeki sıvının çekilmesine desorpsiyon (kurutma) denir. Her ikisi beraber olarak sorpsiyon eğrisinde gösterilir. Buharlaştırma ve yoğunlaşma olayları malzemenin iç yapısında meydana geldiğinden dolayı desorpsiyon ve absorpsiyon eğrileri farklı olur. Absorpsiyon eğrisinde ürün belli bir bağıl nem ve sıcaklık içeren bir ortamda kurutulmaya bırakıldığında denge nemine ulaşması gözlemlenir. Desorpsiyon eğrisinde ise nemli ürün ortamın nemine bağlı olarak denge nemine ulaşması gözlemlenir. Her ürünün belli hava koşullarında ulaşacağı denge nemi farklıdır.



**Şekil 3.2.** Higroskopik bir malzemenin sorpsiyon davranışı

### **Işınımla Kurutma**

Bundan önceki yıllarda kurutma işlemi genellikle açık havada güneş enerjisinden yararlanılarak yapılmaktaydı. Günümüzde ise yapılan araştırmalar doğrultusunda güneşte kurutmanın çok sağlıklı olmadığı, ürüne havadan, topraktan bazı mikroorganizmaların bulaştığı ve küf gelişmesinin görüldüğü tespit edilmiş ve farklı kurutma yöntemleri geliştirilmiştir. Son yıllarda fabrikasyon usulü kurutma yapılarak daha sağlıklı, lezzetli ve besleyici ürünler elde etmek mümkündür. Ülkemizde en çok sebze ve meyve kurutulmaktadır. Bunlardan üzüm, fındık, incir, kayısı, ceviz, erik, elma, badem, vişne, dut, armut, nohut, börülce, bamya, fasulye, patlıcan, mercimek, biber, kabak ve benzerlerini saymak mümkündür.

Konvektif kurutma dışarıdan alınan havanın bir ısıtıcı yardımıyla ısıtıldıktan sonra kurutulacak gıda maddesi ile temas ettirilmesiyle yapılan kurutma işlemidir. Işınım ile kurutmada ise enerji ürün tarafından absorbe edilir. Enerji çevre havasını ısıtmadan ürün yüzeyine transfer edilir. Işınım uygulaması, enerji maliyetini düşürür, düşük sıcaklıkta kurutma yapmaya imkan verir, yüksek ürün kalitesi sağlar, kuruma süresini azaltır, yüksek enerji verimi sağlar (Sharma ve ark. 2005, Nowak ve Lewicki 2004).

Zorlanmış taşınım ile kurutma (konvektif) yüksek maliyeti, malzeme kaybı ve enerji israfı açısından olumsuz etkiye sahiptir. Ancak yine de mevcut sistemlerde hala kullanılmaktadır. Bu konuda alternatif sistemlerin geliştirilmesi kurutma teknolojileri açısından önemlidir. Kızıl ötesi ışınım ile ısı transferi ürüne direkt olarak etki etmesi ve hızlı otomasyon kontrolünden dolayı son yıllarda etkin bir öneme sahiptir. İşletme ve ilk kurulum maliyetlerinin de düşük olmasından dolayı kurutma alanında tercih edilebilir. Bununla birlikte radyasyonla ısıtma düzgün, kaliteli ve yüksek besin değerleri açısından konvektif kurutmaya göre daha avantajlıdır. Kurutmada ısı ve kütle transferi parametreleri doğru seçilmelidir. Bu şekilde optimum kurutma koşulları sağlanarak gereğinden fazla enerji israfı yapılmamış olur ve ekonomik kazanç sağlanır.

### **3.1.2. Kurutma sürecini etkileyen faktörler**

Kurutmayı etkileyen faktörler iç ve dış olmak üzere iki kısımda incelenir. İç faktörler; malzemenin nemi, kalınlığı, cinsi, gözenekliliği, buharlaşma yüzeyi genişliği, dış faktörler ise; kurutma havasının sıcaklığı, bağıl nemi, hızı ve kurutucu kapasitesi olarak söylenebilir.

**a) Kurutma Havaasının Sıcaklığı:** Kurutma havası sıcaklığı arttığında ürün içerisindeki suyun viskozitesi yükselir ve daha hızlı buharlaşması ile kuruma hızı artar bunun sonucu olarak kuruma süresi kısalır. Yüksek sıcaklıkta üründe meydana gelen değişimler istenmediğinden kurutma sıcaklığı seçiminde ürünün yapısı, yoğunluğu, nem ve kalınlığı dikkate alınmak zorunludur. Yapılan kurutma işleminde kurutma süresi ve kalitesi göz önüne alınmalıdır. Aynı zamanda yüksek sıcaklıkta kurutma işlemi sisteme verilen enerji miktarını ve maliyeti artırmaktadır.

**b) Kurutma Havaası Hızı:** Kurutma işlemi sırasında buharlaşma hızı ısı akışına, suya, ve nemli yüzey tabakasından yayılan buhar miktarına bağlı olarak değişir. Ürün üzerine gönderilen yüksek hava hızı yüzeydeki nemli tabakanın kalınlığını zamanla azaltarak ısı transferinin ve buharlaşma hızının artmasına neden olur. Kuruma hızı arttığı için kuruma süresi de kısalır.

Kurutma havası hızının fazla olması durumunda iç kısımlarda meydana gelen hızlı kurumadan dolayı dış yüzeye doğru su akışı bozulmaktadır. Bu nedenle malzemede çatlama gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Kurutma havası hızı düşük olduğunda ise malzeme yüzeyindeki nem uzaklaştırılamamaktadır. Bu yüzden kuruma hızı belli aralıkta tutulmak zorundadır. Kurutma fırınlarında vantilatörler yardımı ile istenilen hava hızı elde edilmektedir.

**c) Kurutma Havası Bağlı Nemi:** Bağlı nem birim hacimde gerçekte mevcut olan su buharı miktarının (mutlak nem) aynı sıcaklıkta havanın içerisine alabileceği mümkün olan en yüksek su buharı miktarına oranına denir (Bozkurt ve Kantay 1992).

Nemli hava belli bir sıcaklığa kadar soğutulursa, doymuş hale ulaşabilmek için daha az su buharına ihtiyacı olacağı için yoğuşma başlar, bu haldeki sıcaklığa çiy noktası sıcaklığı denir. Hava ısıtıldığında bağlı nemi azaldığından malzeme aynı bağlı nemdeki soğuk havada daha hızlı kurur. Çünkü havanın bağlı nemi azaldığında içerisine alacağı nem miktarı artmaktadır. Aynı zamanda yüzey ile hava arasındaki konsantrasyon farkının artmasında dolayı kuruma hızı artar. Havanın bağlı nemi arttıkça kuruma zamanının azaltmak için kuruma hızı artırılır. Kurutma fırınlarında bağlı nemin yükseltilmesi için buhar püskürtülebilir, sıcaklık düşürülebilir.

**d) Malzemenin Cinsi ve Kalınlığı:** Malzemenin cinsine göre yoğunluğu değiştiği için, yoğunluk arttıkça kuruma güçleşir ve kurutma süresi uzar. Malzemenin cinsi ve kalınlığına göre her bir ürün için kuruma süreleri belirlenmektedir. Malzemenin kalınlığı arttıkça kuruma süresi uzar.

**e) Malzemedeki Nem Miktarı:** Kurutulan malzemenin başlangıçtaki sahip olduğu nem oranı ne kadar fazla ve sonuç denge nemi ne kadar az ise kurutma süresi de bir o kadar uzun olmaktadır.

**f) Gözeneklilik:** Gözenekli ürünlerin kurutulması çok daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Gözenekli malzemelerin içinde bulunan boşluklar suyun yüzeye daha kolay ulaşmasını sağlayarak kuruma sürecini hızlandırır.

**g) Buharlaşma Yüzeyi Genişliği:** Malzemenin bütün halde değil de parça halinde kurutulması işlemi sırasında ürünün kurutma havasıyla temas eden yüzeyinin artması sonuç olarak buharlaşma hızının artmasına neden olur ve kurutma süresi azalır.

### **3.1.3. Kurutma modelleri**

Fick difüzyon yasası kurutma kinetiğinin tanımlanması için kullanılmaktadır. Literatürde bu yasa kullanılarak elde edilmiş olan ince tabaka kurutma modellerine sıklıkla rastlanır. Örnek olarak, Lewis Modeli (Lewis 1921); Henderson ve Pabis Modeli (Henderson ve Pabis 1961); Two Term Modeli (Madamba ve ark. 1996); Wang ve Singh Modeli (Wang ve Singh 1978); Midilli Modeli (Midilli ve ark. 2002) verilebilir. Bu modeller teorik, yarı teorik ve deneysel olarak sınıflandırılmaktadır (Midilli ve Küçük 2003, Demiray ve Tulek 2012, Wam 2006).

Kuruma süresi ve hızı malzemenin yapısına, yüzey alanına, kalınlığına, kurutma havası sıcaklığına, kurutma havası hızına ve nemine bağlıdır. Son yıllarda artan enerji maliyetleri kuruma hızına etki eden bu faktörlerin matematik modeller ile etkisi belirlenip malzemenin kalitesini bozmadan, minimum enerji ile en kısa sürede kurutulmasında büyük önem taşımaktadır.

Kurutma problemleri malzemenin nem içeriğine ve sıcaklığına bağlı olarak eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri yardımı ile ifade edilmektedir. Bu problemler ürünlerin termofiziksel özellikleri ve difüzyon katsayıları gibi birçok farklı katsayı içermektedir. Kuruma süreci termofiziksel özellikleri etkilediğinden dolayı kuruma şartlarının iyi bilinmesi gerekmektedir.

### **3.1.4. Çok fazlı akış (Darcy Flow)**

Gözenekli ortam özellikle sıvı veya gaz ile dolu boşluklara sahip katı malzemelerde bulunur. Isı ve kütle transferi bu gözenekler vasıtası ile gerçekleştirilir. Katılara göre daha hızlı transfer işlemi olur. Gıda ürünleri, toprak, kağıt, depolanmış tahıllar gibi



birçok gözenekli ortamlar bulunmaktadır. Gözenekli malzemelerde ısı ve kütle transferi önemli bir sürece sahiptir. Bu alanda farklı yaklaşımlar bulunmaktadır (Machado ve ark. 1998, Sanjuan ve ark. 1999, Datta 2007). Gözenekli malzemelerde sıvı ve buhar akışı katı içerisinde gerçekleşir. Burada Navier stokes yaklaşımının aksine Darcy akış yaklaşımı kullanılır (Datta 2007).

Gözenekli malzemelerde kurutma gıda, kağıt endüstrisi, ilaç sanayisi gibi diğer alanlarda da kullanılan önemli bir süreçtir. Kurutma işlemi soğuk ürün üzerine sıcak hava gönderilerek eş zamanlı ısı ve kütle transferinin oluşmasını sağlamaktır. Bu sayede ürünün nem içeriği azalırken sıcaklık değeri artacaktır. Bu sayede gıda ürünlerinin bozulmadan uzun süre dayanıklı kalması sağlanır (Curcio 2008).

Çok fazlı gözenekli model gıda ürünlerinde özellikle iç buharlaşma mekanizması da içeren ısı ve kütle transfer sürecinin etkin bir şekilde tanımlanmasına yardımcı olmaktadır. Kurutma sırasında katı içerisinde ve dışında su buharlaşması meydana gelir. Buharlaşma için gereken ısı taşınımıyla kurutmada sıcak hava ile sağlanır. Bu durumda katı içerisinde oluşan buhar ve sıvı fazları da ihmal edilemez. Her iki faz durumları için oluşan kütle transferi modeli ayrı ayrı tanımlanmalıdır. Gazlar için moleküler difüzyon ve sıvılar için kılcal difüzyon gerçekleşir. Bu mekanizma, gıdayı gözenekli bir ortam olarak ele almaktadır (Datta 2007).

### **3.1.5. Ekserji kavramı**

Günümüzde tekstil, gıda, kâğıt, seramik, ağaç kurutma gibi farklı uygulama alanlarında enerji tüketiminin artması kurutma işleminin önemini daha da artırmaktadır. Toplam enerji tüketimi içinde kurutma için bazı sektörlerde harcanan enerji oranları şu şekildedir; kerestede %11, tarımsal ürünlerde %12, kağıt endüstrisinde %33, seramik ve inşaat malzemelerinde %11, tekstilde %5 ve kimyada %6 dolaylarındadır. Kurutma işleminde enerji tüketimi fazla olmaktadır. Üretim sektöründe toplam maliyetin %60-70'i kurutma maliyetine harcanmaktadır. Bu yüzden enerjinin verimli kullanılması gerekmektedir (Syahrul ve ark. 2002). Kurutma sistemlerinin performansının belirlenmesinde enerji verimi ifadesi tek başına yeterli olamamaktadır bu yüzden ekserji

veriminde hesaba katılarak iyileştirme potansiyelinin belirlenmesi gerekmektedir. Ekserji bir sistemde kullanılabilir enerjinin ölçüsüdür. Dolayısı ile ekserjinin bir kısmı kullanılmakta bir kısmı ise kayıp olarak atılmaktadır. Ekserji analizi uygun bir tasarım sistemini ve işletme şartlarının seçilmesi için bize bilgi vermektedir. Bu bilgi bize işletme maliyeti, enerjinin korunumu ve kirliliğin tanımlanmasında etkili bir bilgi sunmaktadır (Akpınar 2004). Sistemdeki kayıp işin en aza indirilmesinin verimi artırdığı vurgulanmıştır. Bu yüzden kurutma parametrelerinin önemi ekserji verimi üzerinde etkilidir. Ekserji analizi ile kayıp enerji, tersinmezlikler ve sistemden atılan kayıp enerji belirlenebilmektedir (Fortes ve Ferreira 2004).

### **3.1.6. Taguchi metodu**

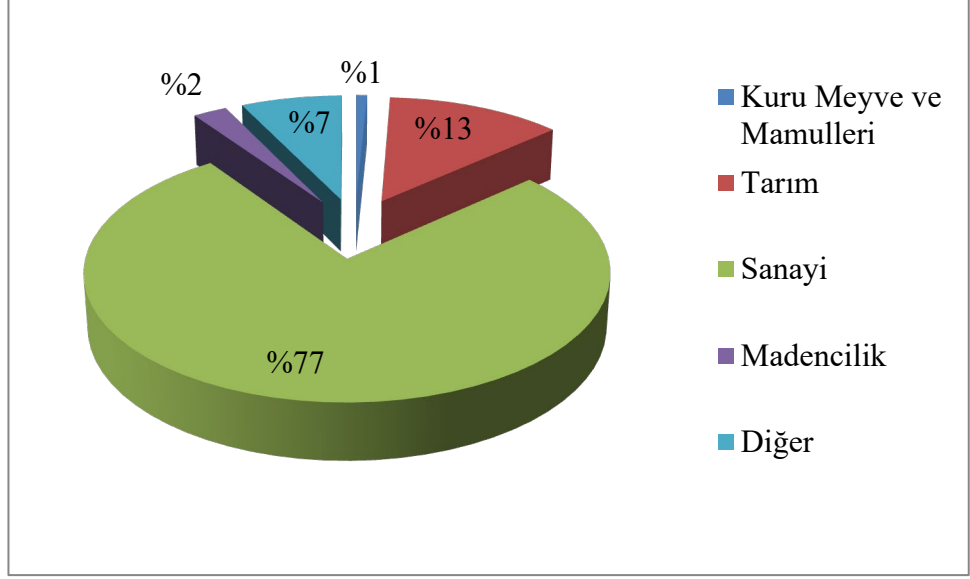
Geleneksel deneysel çalışmalar yüksek maliyet süreci ve uygulama süresi istemektedir. Arzu edilen kalite parametrelerinin test edilebilmesi için çok fazla miktarda faktörlerin uygulanması ve araştırılması oldukça fazla zaman gerektirmektedir. Aynı zamanda deneylerin tekrar edilebilir olması ve doğrulama çalışmaları gibi bir takım zorluklar da bulunmaktadır (Savaskan ve ark. 2004). Bu yüzden deneysel tasarım ve ürün kalitesini geliştirmek için minimum maliyetli deneysel çalışmaların uygulanması gerekmektedir. Bu deneysel çalışmaların sistematik analizi ve doğru çözümü için alternatif bir yöntem olarak Taguchi metodu kullanılmaktadır. Az sayıda deneyle ürün geliştirilmesini ve yüksek kalitede tasarım imkanı sunmaktadır. Bu yöntem deneysel çalışma verisi üzerine etki eden parametrelerin optimum koşullarının değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Son zamanlarda Taguchi metodu, endüstriyel uygulamalarda hızlı ve düşük maliyetli ürünleri elde etmek için ARGE çalışmaları ile desteklenen güçlü bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Analizlerde ortogonal dizi ve ANOVA metodu kullanılmaktadır. ANOVA karakteristik özellikler üzerinde faktörlerin etkisinin incelenmesine yardım eder. Taguchi metodunun geleneksel istatistik yöntemlerine göre avantajı optimum koşullarda en az çeşitliliğe sahip deneysel koşulları tanımlamaktadır (Oztop ve ark. 2007). Taguchi yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek analiz gerçekleştirilmektedir. Deney tasarımı birden fazla seviye ve faktör kullanılarak yapılabilir. Sonuç yorumu olarak en büyük S/N oranını veren değer, iyi deney sonucunu ifade etmektedir. Faktörlerin sıralamasında ise en iyi performansı veren faktörün en

yüksek S/N oranına sahip olduğu söylenebilir. Aynı zamanda Taguchi analizi ile yapılan varyans analizinde hangi faktörün işlem üzerinde ne kadar etkili olduğu öğrenilebilir. Bu şekilde yapılacak prosesin optimum çalışma koşulları tespit edilebilir (Yang ve Tarng 1998).

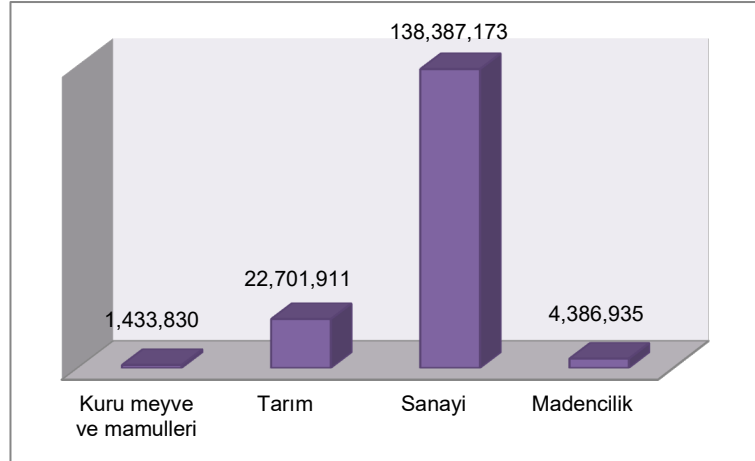
Taguchi, yapılacak çok sayıda deneyin az sayıda test edilebilmesi için ortogonal dizileri oluşturmaktadır. 2, 3, 2 ve 3 kademeli olarak ortogonal diziler belirlenebilmektedir. Genel gösterimi  $L_a (b^c)$  olarak ifade edilmektedir. Burada L ortogonal dizin, a toplam deney sayısı, b faktörlerin seviye sayısı ve c faktör sayısıdır. L4, L8, L12 ve L 32 2 seviyeliler için, L9, L18 ve L27 3 seviyeliler için kullanılmaktadır. Faktör grubunun toplam serbestlik derecesi ortogonal dizinin hangi seviyeden seçileceğine karar vermemize yardımcı olmaktadır. Tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik derecesi toplamı faktör grubunun serbestlik derecesine eşittir. Toplam serbestlik derecesine 1 eklendiğinde deney sayısına eşit ise doğru dizi seçilmiş demektir. Eğer eşit değil ise bir üst dizi seçilmesi daha uygun olacaktır (Şeker 2013). Tasarımı yapılan sisteme ait deneylerin sonuçları Taguchi yönteminde S/N (sinyal/gürültü) oranına dönüştürülür ve desibel olarak ifade edilir.

### **3.1.7. Ülkemizde kurutulmuş ürünlerin durumu**

Ülkemiz meyve, sebze üretimi konusunda oldukça zengindir. Şekil 3.3’de, Türkiye’de 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 yılları arasında yapılan toplam ihracatı içerisindeki kuru meyve ve mamullerinin oranı verilmiştir (İ.İ.B. 2019). Toplam ihracat içerisinde kuru meyve ve mamullerinin %1 oranında yer aldığı görülmüştür. Şekil 3.4’de ise 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 yılına kadar yapılan toplam ihracat miktarları verilmiştir. 2019 yılı içerisinde kuru meyve mamullerinin 1.433.830.000 TL değerinde ihracatı yapılmıştır.



**Şekil 3.3.** Türkiye'nin 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 arası toplam ihracatı içinde kuru meyve ve mamulleri



**Şekil 3.4.** Kuru ürünler ile ana sektörlerin 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 arası ihracat miktarları (TL×1000)



**Şekil 3.5.** 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 arası ihracatı yapılan kuru meyve ve mamulleri listesi

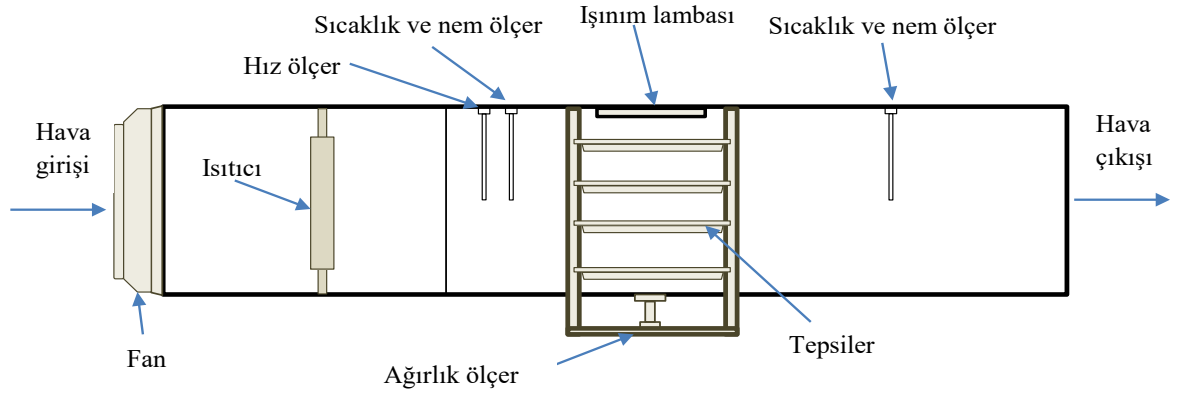
Şekil 3.5’de 1 Ağustos 2018-31 Temmuz 2019 12 aylık dönemde en fazla ihracatı yapılan ürünler verilmiştir. Burada kuru üzümün %36,38 ile en fazla ihracat oranına sahip olduğu görülmektedir.

## 3.2. Deney Tesisatı Tanıtımı

### 3.2.1. Tünel tip tepsili kurutucu seti

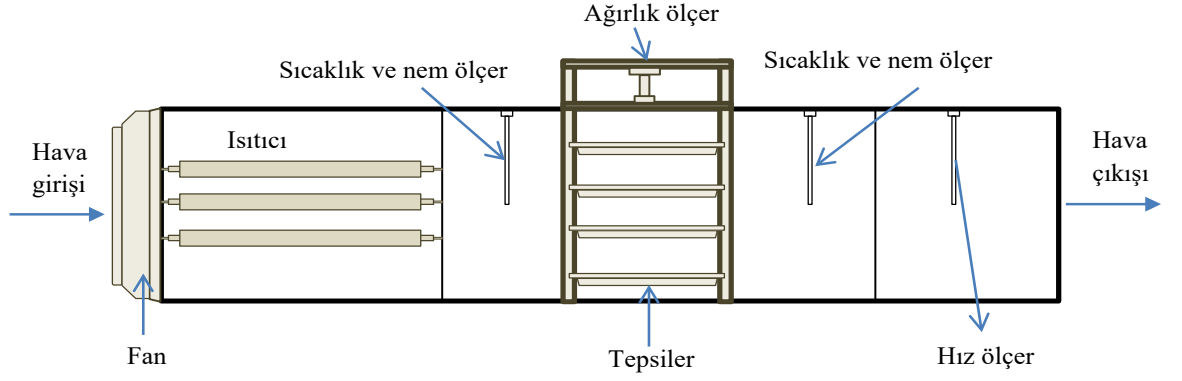
Deneyisel çalışma için Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminden sağlanan destek ile deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu deney düzeneği ile farklı ürünlerin konvektif ve kızılötesi ışınım ile kurutma süreçleri incelenmektedir. Deney cihazında değiştirilebilir parametreler kurutma havası sıcaklığı, kurutma havası hızı, rezistans gücü, ışınım lambası gücü ve tepsi uzaklığıdır. Cihazda konvektif ve ışınım ile kurutma aynı anda ve ayrı ayrı olarak da yapılabilmektedir. Ayrıca ürünün cinsi, kalınlığı ve boyutları da değiştirilebilmektedir. Konvektif ve kızılötesi ışınım ile kurutma deney setlerinin görünümü Şekil 3.6’da verilmiştir. Konvektif kurutucu setinin

boyu 228 cm, kesit ölçüleri 40 cm×35 cm, ışınlımla kurutucu boyu 228 cm, kesit ölçüleri 33 cm×33 cm ve 1.6 mikrometre dalgaboyuna sahip kızılötesi ışınlımla lambasının çapı 2 cm ve boyu 26 cm'dir.



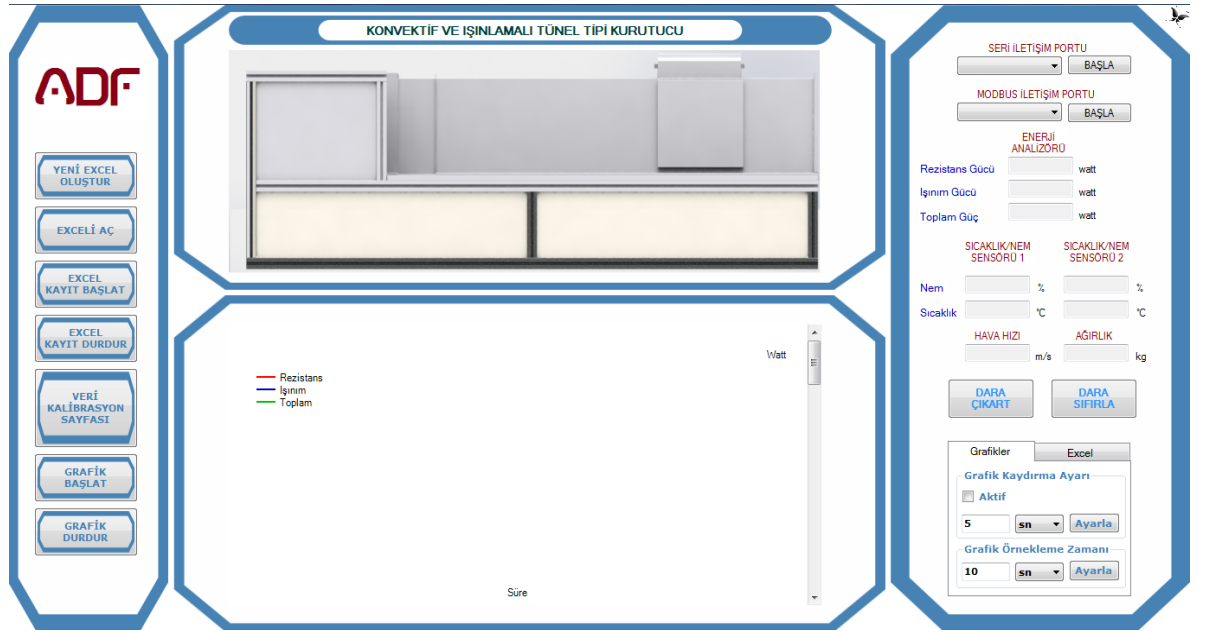
(a)





(b)

**Şekil 3.6.** Deneylerde kullanılan kurutucuların farklı açılardan detaylı görselleri (a- kızılötesi ışınlama ile kurutma, b- konvektif kurutma)



**Şekil 3.7.** Konvektif ve ışınlımlı kurutma cihazı yazılım arayüzü

### Bilgisayar kontrollü tünel tipi tepsili kurutucu deney düzeneği teknik özellikleri

- 1.Cihaz kurutucu bölümünde 3 adet birbirinden bağımsız, paslanmaz malzemeden yapılmış tepsiler bulunmaktadır.
- 2.Kurutucu tepsisinde hassas ağırlığın ölçülmesi için 0.1 gram hassasiyetinde yük hücresi bulunmaktadır.

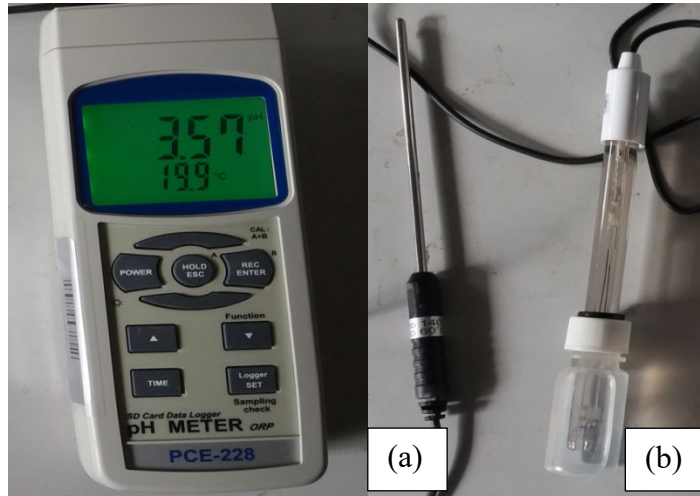
- 3.Cihaz ışınlam modunda aynalı ve aynasız kullanıma uygun yapıdadır.
- 4.Cihazda aynı anda hem konvektif hem de ışınlam deneyini yapabilmektedir.
- 5.Cihazda kullanılan fanın hızı ayarlanabilir yapıdadır.
- 6.2 adet hava hız sensörü bulunmaktadır. Hava hız sensörleri 0...5 m/s , 0...10 m/s , 0...15 m/s aralıklarında ölçümler için ayarlanabilir özelliktedir.
- 7.Cihazda 3 adet 0.1 okuma hassasiyetli sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Sıcaklık ölçüm aralığı -40 ile 120 °C aralığındadır.
- 8.Cihazda 3 adet bağıl nem sensörü bulunmaktadır. Nem sensörü 0% - 100% arasındadır.
- 9.Cihaz kaçak akım korumalıdır. Cihaz beslemesi 230 VAC 50 Hz değerindedir.
- 10.Rezistanslar PID ve SSR ile kontrol edilmektedir.
- 11.Rezistansların sıcaklık set değerleri bilgisayar yazılımı üzerinden yapılmaktadır.
- 12.Rezistans PID parametre değerleri yazılım üzerinden kontrol edilmektedir.
- 13.Rezistans gücü en fazla 2.32 kW değerindedir.
- 14.ışınlam lambası PID ve SSR ile kontrol edilmektedir.
- 15.ışınlam lambası kontrol set değerleri bilgisayar yazılımı üzerinden yapılmaktadır.
- 16.ışınlam lambası PID parametre değerleri yazılım üzerinden kontrol edilmektedir.
- 17.ışınlam lambasının gücü 1.25 kW değerindedir.
- 18.Cihaz ile beraber USB haberleşmeli bir adet veri toplama/kontrol yazılımı bulunmaktadır.
- 19.Sistem yazılımı ve otomasyon sistemi aynı zamanda LAN, WLAN, ETHERCAT haberleşmesine uygun yapıdadır.
- 20.Cihaz yazılımı, tüm sensör (Nem, sıcaklık, hava hızı, yük hücresi) verilerini anlık olarak ekranda izlenmesine olanak sağlamaktadır.
- 21.Cihaz yazılımı, tüm sensör verilerini anlık grafiğe dökmektedir.
- 22.Cihaz yazılımı, tüm sensör verilerini istenilen aralıklarda( 1 saniye - 24 saat arası ) excele kaydedebilmektedir.
- 23.Cihaz yazılımında server tabanlı reçete sistemi bulunmaktadır.
- 24.Cihaz yazılımı, tüm sensör verilerini istenilen aralıklarda( 1 saniye - 24 saat arası ) SQL-Server'a kaydedebilmektedir.
- 25.Sensör kalibrasyonları yazılımdan yapılabilecek yapıdadır.



26.Cihaz ,bir adet labview programında yapılmış grafik analiz ve anlık görüntüleme yazılımına sahiptir.

### 3.2.2. pH ölçer

Ürünlerde bulunan mikroorganizmaların gelişmesini ve aktivitesini belirleyen iç faktörlerden birisi pH değeridir. Ürünlere göre mikroorganizmaların geliştiği pH değerleri farklı olmaktadır. Ürünlerin uzun süre bozulmadan kalması pH değerlerine bağlıdır. Bazı ürünlerde pH değeri 4'ün altına düştüğünde mikroorganizmalar oluşurken bazılarında da 7 civarında oluşmaktadır. Ürünün pH değeri 7'den küçük ise asidik, 7'den büyük ise baziktir. pH değerine göre her ürünün ayrı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Deneylerde kullanılacak pH metre (PCE-228) ve sıcaklık ölçer Şekil 3.8'de verilmiştir. Burada a) sıcaklık ölçüm probu b) pH ölçüm elektrodu



Şekil 3.8. pH ve sıcaklık ölçüm cihazı

#### pH ve sıcaklık ölçüm cihazı teknik özellikleri

- 1.Ölçüm aralıkları : 0,00 ... 14,00 pH - -1999 ... 0 ... 1999 mV
- 2.Çözünürlük: 0.01 pH - 1 mV - 0,1 °C
- 3.Doğruluk ( 20°C) : ± (0.02 pH + 2 basamak) , ± (0.5 % + 2 basamak) , ±0.5 °C

- 4.Sıcaklık kompenzasyonu : 0 ... 65°C'de otomatik veya 0 ve 100°C arasında el ile sıcaklık sensörü kaldırılarak
- 5.Elektrod : pH PE-03 jel dolgulu elektrod, 1 metre kablo ve BNC fiş sıcaklık aralığı : 0 ... 60°C
- 7.Çevresel koşullar :0 ... 50 °C maks. 85 % H.r.
- 8.Boyutlar : 177 x 68 x 45 mm
- 9.Ağırlık : 490 g

### **3.2.3. Renk ölçüm cihazı**

Ürün kalitesini araştırmak için renk analizi de yapılmıştır. Ürünün renk analizinde farklı renk skalaları kullanılmaktadır. Ölçümlerde her renk en temel 3 bileşen (a,b,L) cinsinden ifade edilmektedir. Kullanılan cihazın özelliğine göre bu skala daha da genişlemektedir. Bu çalışmada ürüne ait L, a ve b parametre değerlerinin değişimi incelenmiştir

L: 0 (siyah) ile 100 (beyaz) arasındaki aydınlık derecesini belirler, tazeliğin göstergesi olan parlaklıkları inceler.

a: kırmızı veya yeşil değeri

b: sarı veya mavi değeri

Renk skalasında belirtilen parlaklık (L), kırmızılık (+a) ve yeşillik (-a), sarılık (+b) ve mavilik (-b) ölçüm parametreleri belirlenmiştir. Renk ölçüm cihazı (PCE-Colorimeter-CSM-1) şekil 3.9'da verilmiştir.

### **Renk ölçüm cihazı teknik özellikleri**

- 1.Ölçüm Deliği : Ø8 mm
- 2.Sensör : Silisyum-Fotodiyot
- 3.Renk Alanları :CIEL\*a\*b\*C\*h - CIEL a\* b\* - CIEXYZ
- 4.Işık Kaynağı : D65
- 5.Işık Kaynağın Türü : LED

6.Farklı Kaynaklar Arasındaki Hata : $\leq 0,50\Delta E^*ab$

7.Standart Sapma :  $\Delta E^*ab$  0.08 içinde

8.Ağırlık : 500 gr.

9.Boyutlar : 205 x 67 x 80 mm



Şekil 3.9. Renk ölçüm cihazı

#### 3.2.4. Sıcaklık ölçer

Ürün yüzey sıcaklığı, kurutucu sıcaklığı ve ışınım lambası sıcaklığı kızılötesi sıcaklık ölçer (TESTO 845) ile temassız olarak yapıldı. Kurutucu içerisinde yüksek sıcaklıklara ulaşıldığı için temassız ölçüm tercih edildi.

Ölçüm aralığı :  $-35-950^{\circ}\text{C}$

Doğruluk:  $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$

Optik oran: 1/75

Hassasiyet:  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$



**Şekil 3.10.** Kızıl ötesi sıcaklık ölçer

### **3.2.5. Ağırlık ölçer**

Kuruma sırasında ürünün ağırlık değişiminin ölçülmesi için hassas terazi kullanıldı.

Maksimum kapasite: 8.1 kg

Doğruluk:  $\pm 0.15$  gr

Hassasiyet:  $\pm 0.05$  gr

Cevap hızı: 1 s

Kefe ebadı: 315×305 mm



**Şekil 3.11.** Hassas terazi

### **3.2.6. Dijital mikroskop**

Kurutma sırasında ürün yüzeyindeki değişimleri tespit edebilmek için dijital mikroskop (Microcase Cmos 8 Led Digital Microscobe) kullanılmıştır.

Odak menzili: 0 Mm-40 Mm

8 beyaz led ışık

Dijital zoom: 500X

Büyütme aralığı: 20X-500X (manuel)

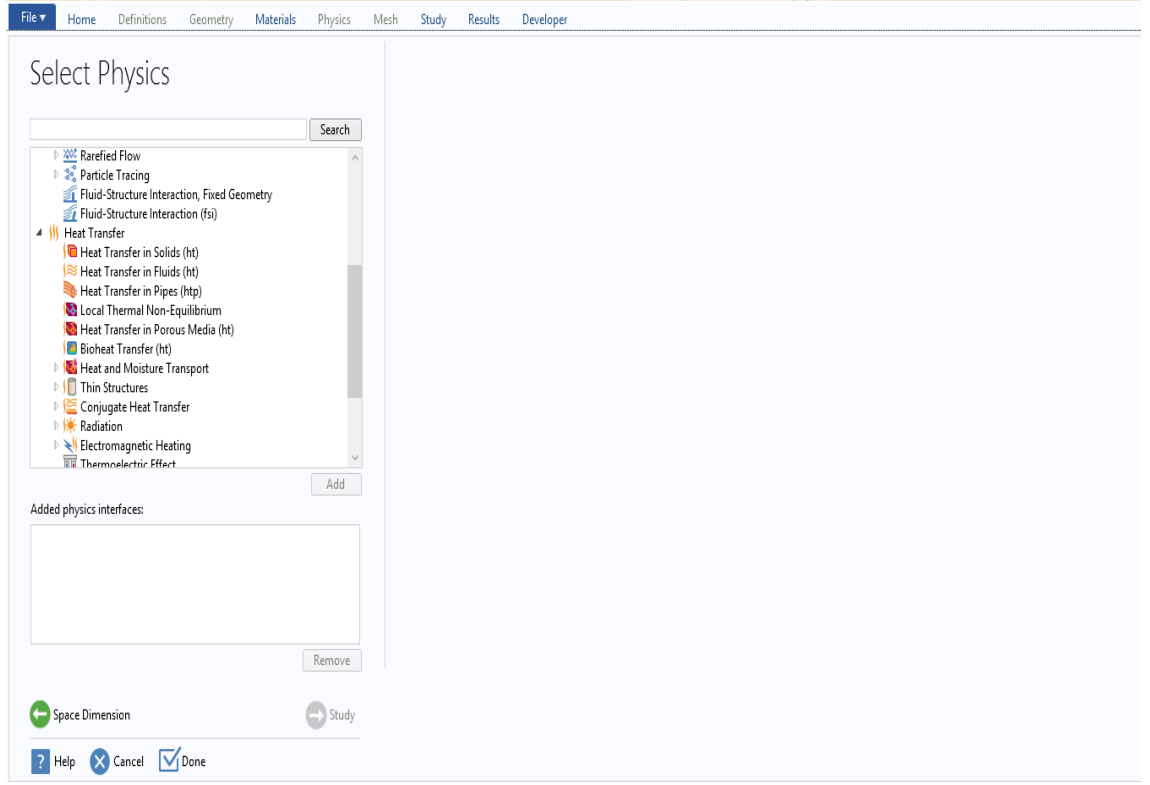
Ürün boyutları: 112 Mm (L) × 33 Mm (R)



**Şekil 3.12.** Dijital mikroskop

### **3.3. Nümerik Analizler İçin Kullanılan Comsol Programı**

*Comsol Programı*, kısmi diferansiyel denklemlerin (matematiksel modellerin) çözümüne dayalı mühendislik ve bilimsel modellerin oluşturulması ve çözümünde kullanılan multiphysics ve sonlu eleman (FEM) analizidir. Comsol programına PDE (Partial Differential Equation) tanımı yapılarak tüm model için istenen çözümler yapılabilir. Çözülecek problemin geometrisi, sınır şartları, materyal özellikleri ve değişkenleri yazılarak program aracılığı ile gerekli sonlu elemana bölünerek sonuçlar grafik şeklinde elde edilmektedir. Eğer mühendislik problemi için PDE denklemi elde edilmiş ise bunun programa girilerek değişkenlerinin tanımlanması ile çözüm yapılabilmektedir.



**Şekil 3.13.** Comsol programının ara yüzü

*Comsol Multiphysics uygulama alanları;*

Kimyasal reaksiyonlar

Difüzyon

Akışkanlar dinamiği

Elektrokimya

Akustik

Elektromanyetik

Jeofizik

Isı transferi

Mikroelektromekanik

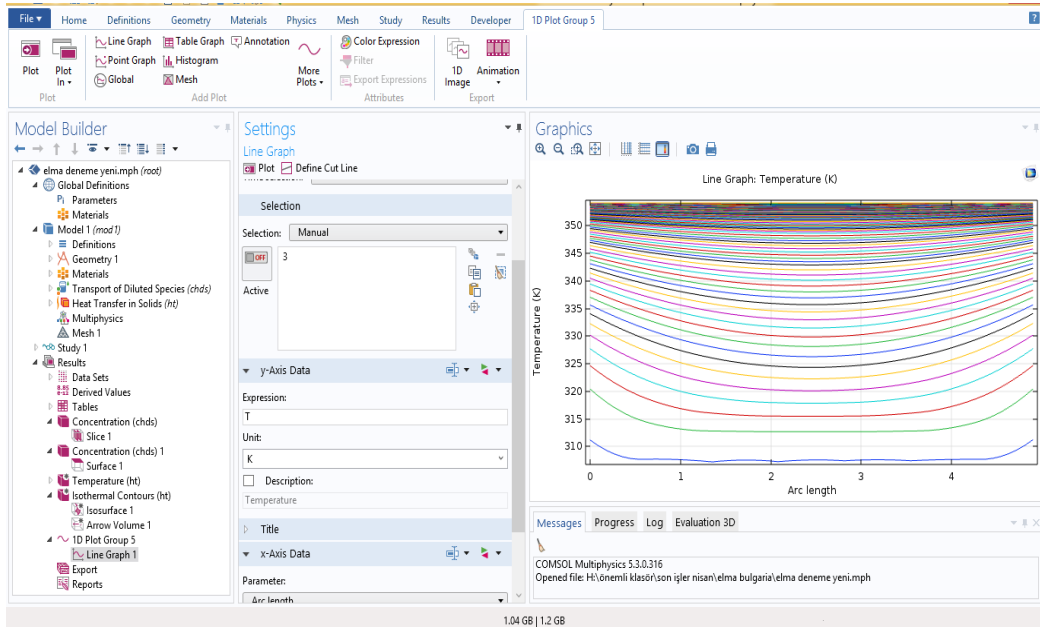
Mikrodalga mühendisliği

Optik

Yapı mekanikleri

Kuantum mekaniği

Comsol programı ile özel konularla ilgili oluşturulan matematiksel modelin tanımlanıp kolayca çözülmesi mümkündür. Aynı zamanda diğer sonlu eleman metodunu kullanan analiz programları kadar yaygın olmasa da kullanımının kolay olması ve sonuçların hem görsel hemde grafik şeklinde kullanıcıya sunulması son zamanlarda comsol programını daha cazip hale getirmiştir. Aynı zamanda program birçok parametrenin de kolayca incelenmesine fırsat vermektedir.

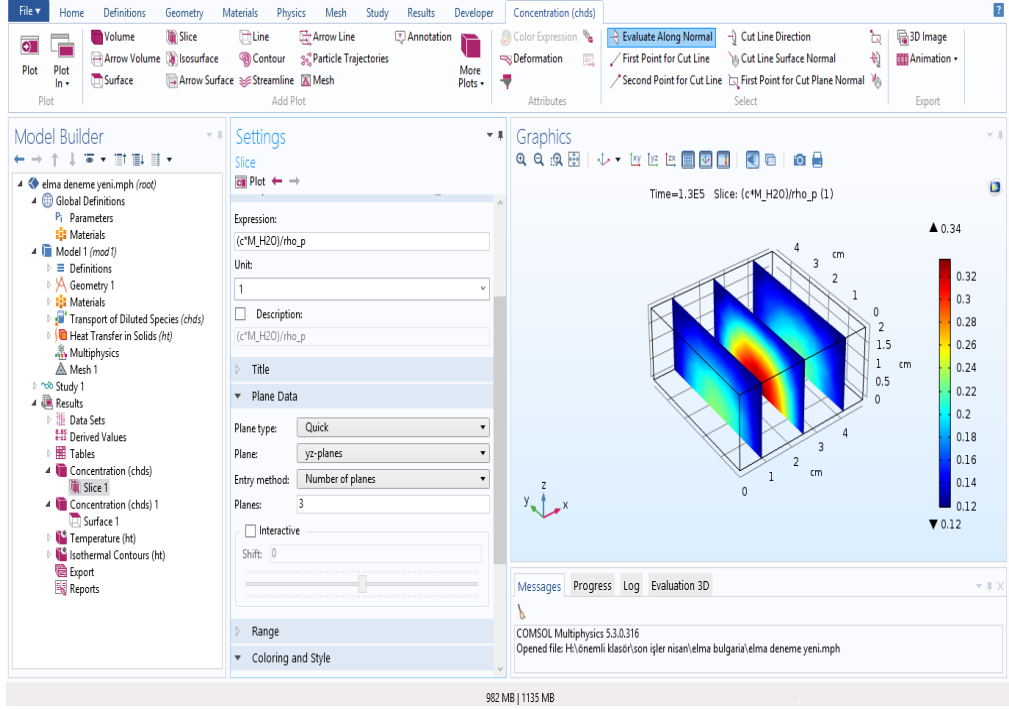


**Şekil 3.14.** Comsol programında sonuçların grafik gösterimi

***Comsol'da modelleme süreci 6 ana adımdan oluşmaktadır:***

1. Model seçeneği modülünden uygulanmak istenen uygun model seçilir.
2. Model geometrisi çizim modülünden oluşturulur.
3. Fiziksel model için varsa PDE denklemi girilir yoksa hazır olan denklemler seçilerek sınır ve başlangıç şartları ile materyal özellikleri tanımlanır.
4. Mesh modülünden istenen modül seçilir.
5. Çözüm modülünden istenen şartlarda çözüm gerçekleştirilir.
6. Sonuç kısmında elde edilen grafik ve sonuçlar incelenir.





Şekil 3.15. Comsol programında görsel sonuç gösterimi

### 3.4. Matematik Modelleme

#### 3.4.1. Nem içeriği hesabı

Ürün içindeki nem içeriğini kuru ve yaş baza göre ifade etmek için;

$$M_{KB} = \left( \frac{W_S}{W_K} \right) = \left( \frac{W - W_K}{W_K} \right) \quad (3.1)$$

$$\%M_{YB} = \left( \frac{W_S}{W_S + W_K} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

ifadeleri kullanılmaktadır. Burada W ürünün başlangıç ağırlığı (gr)  $W_S$  ürün içerisindeki suyun kütlesi (gr) ve  $W_K$  kuru ürünün kütlesi (gr) olarak ifade edilmektedir (Doymaz ve ark. 2006). Kurutulan ürünün birim zamandaki nem değişimi olan kuruma hızı (DR) şu şekilde ifade edilebilir;

$$DR = \left( \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) \quad (3.3)$$

burada  $M_t$  ürünün  $t$  anındaki,  $M_{t+\Delta t}$  ise  $t+\Delta t$  anındaki ürünün kuru baza (gr su/gr kuru madde) göre nem içeriğidir (Doymaz ve ark. 2006). Öncelikle kurutma modelleri boyutsuz nem oranı cinsinden tanımlandığı için istatistiki parametrelerin bulunmasında deneyden elde edilen kuru baz nem içerikleri (3.4) nolu eşitlik kullanılarak boyutsuz nem oranları (MR) elde edilmiştir.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_b - M_e} \quad (3.4)$$

Burada,  $M_e$  (gr su/gr kuru madde) kurutma sonundaki denge nem içeriği,  $M_b$  (gr su/gr kuru madde) başlangıç nem içeriğidir. Yapılan çalışmada boyutsuz nem oranı sadeleştirilerek  $MR=M_t/M_b$  kullanılmıştır (Akgun ve Doymaz 2005).

### 3.4.2. Efektif difüzyon katsayısı hesabı

Levha için;

Fick difüzyon yasası kurutma proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sabit sıcaklık, sabit difüzyon katsayısı ve ihmal edilebilir dış direnç altında difüzyon denklemini çözüldüğünde bu denklem aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Doymaz 2013).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3.5)$$

Burada  $D_{eff}$  efektif nem difüzivitesi ( $m^2/s$ ),  $L$  ürünün yarı kalınlığı ( $m$ )'dir. Efektif difüzyon katsayısının bulunmasında (3.6) nolu eşitlik kullanılır. Farklı zaman dilimleri için eşitlik (3.5) de verilen serinin ilk terimi alınarak basitleştirilebilir (Pangavhane ve ark. 1999).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3.6)$$

Zamana karşılık  $\ln(MR)$  grafiği çizildiğinde elde edilen eğim (e) kullanılarak efektif difüzyon katsayısı bulunur.

$$e = \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right) \quad (3.7)$$

Kimyasal reaksiyonların başlama enerjisi olan aktivasyon enerjisi,  $E_0$ , (kJ/mol) ise (3.8) numaralı eşitlik aracılığıyla hesaplanır.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right) \quad (3.8)$$

Burada R üniversal gaz sabiti ( $8.314 \times 10^{-3}$  kJ/molK),  $D_0$  Arrhenius denkleminin üstel faktörü ( $m^2/s$ ) ve  $T$  kurutma havası sıcaklığıdır (K).

Silindir için;

Efektif difüzyon katsayısı sonlu silindirik geometri için geliştirilen Fick difüzyon yasası kullanılarak hesaplanmaktadır. Kullanılan ifade de sabit difüzyon katsayısı ve difüzyonla gerçekleşen nem transferinin olduğu varsayılmaktadır. Efektif difüzyon katsayısı eşitlik (3.9) kullanılarak hesaplanabilmektedir (McMinn ve Magee 1999).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8r^2}{l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_i \beta_j} \exp\left(-(\lambda_i^2 + \beta_j^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (3.9)$$

Burada  $D_{eff}$  efektif difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ),  $r$  yarıçap ve  $l$  karakteristik uzunluk (m),  $t$  kuruma süresi (s) ve  $\lambda_i$  Bessel fonksiyonunun kök değeridir.

$$\beta_j = \frac{(2j-1)\pi r}{2l} \quad j = 1,2,3 \quad (3.10)$$

Uzun kuruma süreleri için seri çözümün yalnızca ilk terimi kullanılabilir (Madamba ve ark. 1996).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2} \exp\left(-(\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (3.11)$$

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2}\right) - \left(-(\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (3.12)$$

Efektif difüzyon katsayısı deneysel çalışmadan elde edilen kuruma süresinin  $\ln(MR)$  ile olan değişim eğrisinden elde edilir. Eşitlik (3.12)'de verilen  $\ln(MR)$  değerlerinin kuruma süresi ile olan değişim grafiğinden eğim değeri eşitlik (3.13)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Eğim} = \frac{(5.7831 + \beta_1^2) D_{eff}}{r^2} \quad (3.13)$$

Efektif difüzyon katsayısı eğim metodu kullanılarak hesaplanmıştır (Karathanos ve ark. 1990, Madamba ve ark. 1996).

### 3.4.3. Renk ölçüm hesabı

Kinetik model, ürünlerin kurutulması ve depolanması sırasında meydana gelebilecek değişimlerin tahmin edilebilmesi için deneysel değişkenlerin fonksiyonu olarak yazılabilmektedir. Ürün renginin zamana göre değişimi için iki farklı kurutma kinetiği modeli kullanılacaktır (Maskan 2001). Bunlar,

$$1. \quad C = C_o \pm kt \quad (3.14)$$

$$2. \quad C = C_o \exp(\pm kt) \quad (3.15)$$

olup burada, k kinetik sabit (dakika<sup>-1</sup>) olarak tanımlıdır. Ürünün tazeliğini ve kalitesini belirlememize yardımcı olan renk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi için, toplam renk sapması (3.16) nolu eşitlik ile hesaplanabilir (Maskan 2000).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta a)^2} \quad (3.16)$$

$$\Delta L = L_{taze} - L_{örnek}$$

$$\Delta a = a_{taze} - a_{örnek}$$

$$\Delta b = b_{taze} - b_{örnek}$$

#### 3.4.4. Kurutma modelleri analizi

Deneyde farklı sıcaklıklar için elde edilen verilerin doğrulaması ve en uygun modelin seçilmesi için farklı kurutma modelleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Bunun için literatürde kullanılan 5 farklı deneysel, yarı deneysel ve teorik ince tabaka kurutma modelleri kullanılmıştır. Bunlar Çizelge 3.3’de denklemleri verilen Lewis Modeli, Henderson ve Pabis Modeli, Two Term Modeli, Wang ve Singh Modeli ve Midilli Modelleridir. İstatistiki hesaplamalar Sigma Plot programı yardımı ile yapılmıştır. Çizelge 3.3’de verilen modellere ait kurutma katsayıları (a, b, k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>, n) ve istatistiki parametreler olan belirlilik katsayısı (R<sup>2</sup>), standart hata (SH) ve ki kare (x<sup>2</sup>) ifadeleri hesaplanmıştır (Goyal ve ark. 2007).

$$SH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{deney} - MR_{tahmin})^2}{N - z}} \quad (3.17)$$

$$x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{deney} - MR_{tahmin})^2}{N - z} \quad (3.18)$$

Burada; MR<sub>deney</sub> ve MR<sub>tahmin</sub> deney sonucu elde edilen ve program aracılığı ile tahmini elde edilen boyutsuz nem oranları, N deneyde zamana bağlı olarak okunan veri sayısı, z

katsayıların sayısıdır. Deney sonucu elde edilen boyutsuz nem içeriğine en uygun model seçilirken  $R^2$  değerinin 1 e yakın olması, SH ve  $x^2$  değerlerinin ise 0'a yakın olması gerekmektedir (Pangavhane ve ark.1999).

**Çizelge 3.3.** Kurutma modellerine ait sabitler ve katsayılar

Model No	Model İsmi	Denklem	Referans
1	Lewis	$MR=\exp(-kt)$	Lewis (1921)
2	Henderson ve Pabis	$MR=a\exp(-kt)$	Henderson ve Pabis (1961)
3	Two Term	$MR=a\exp(-k_0t)+b\exp(-k_1t)$	Madamba ve ark. (1996)
4	Wang and Singh	$MR=1+at+bt^2$	Wang ve Singh (1978)
5	Midilli	$MR=a\exp(-kt^n)+bt$	Midilli ve ark. (2002)

MR: boyutsuz nem oranı,  $k, k_0, k_1$ : kurutma sabiti ( $sn^{-1}$ ),  $a, b$ : katsayılar,  $n$ : kurutma sabiti

### 3.4.5. Ürün büzülme hesabı

Büzülme etkisi kurutma işlemi sırasında gıdalarda yaygın bir şekilde gözlenmektedir. Bu durum ürün kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu yüzden kurutma işleminde bu etkinin de hesaba katılması gerekir. Büzülme katsayısı ( $S_b$ ) aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir (Dissa ve ark. 2010).

$$S_b = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \times 100 \quad (3.19)$$

### 3.4.6. Nümerik analiz için matematik model

Isı transferi için Fourier yasası, kütle difüzyonu için ise Fick yasası kullanılarak katı içerisindeki enerji ve kütle dengesi matematiksel olarak ifade edilebilmektedir. Sıcak havadan ürün yüzeyine taşınım ile ısı transfer edilirken, ürün içerisindeki sıvı difüzyon ile yüzeye transfer edilir ve dış ortama buharlaşması sağlanır.

Fourier yasasına dayalı olarak katıdaki enerji korunum denklemi,

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \nabla(-k\nabla T) = 0 \quad (3.20)$$

ve Fick yasasına dayalı olarak katıdaki kütle korunum denklemi,

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla(-D_{eff}\nabla M) = 0 \quad (3.21)$$

olarak verilebilir (Curcio ve ark. 2008, Aversa ve ark. 2007, Sabarez 2012).

#### 3.4.6.1.Sınır Koşulları

Kurutma havasından ürün yüzeyine taşınım ile transfer edilen ısı, ürün yüzeyinde su buharlaşmasına neden olurken aynı zamanda ürünün iletimle sıcaklığının artışı da sağlamaktadır. Isı transferi için yüzey sınır şartı;

$$(-k\nabla T) = h_T(T_h - T_s) \quad (3.22)$$

ve kütle transferi için yüzey sınır şartı ise ürün içerisinden yüzeye difüzyon ile gelen sıvı transferi ile ürün yüzeyinden kurutma havasına gerçekleşen buhar transferi arasındaki denge için yazılmaktadır.

$$(-D_{eff}\nabla M) = h_M(M_h - M_s) \quad (3.23)$$

#### 3.4.7. Büzülme hızı hesabı

Büzülme etkisini deneysel hesaplamak oldukça zordur. Bu yüzden büzülme hızı tahmini yapılmalıdır. Bu çalışmada büzülme hızının lineer dağılım metodu kullanılmıştır. Ürünün herhangi bir noktasındaki büzülme hızı;

$$u(x) = u(b) \frac{x}{b} \quad (3.24)$$

Şeklinde tanımlanır. Yüzeydeki hız değeri ise eşitlik (3.25)'de verilmiştir.

$$u(b) = \frac{b - b(old)}{\Delta t} \quad (3.25)$$

Burada  $b$  (old) bir sonraki zamanda ürünün yarı kalınlığı,  $b$  başlangıçtaki yarı kalınlığıdır (Karim ve Hawlader 2005).

Ürünün herhangi bir andaki yarı kalınlığını ve büzülme etkisine bağlı efektif difüzyon katsayısını hesaplamak için o andaki nem içeriğine bağlı olarak elde edilen aşağıdaki ifade kullanılabilir (Desmorieux ve Moyne 1992).

$$b = b_0 \left[ \frac{\rho_w + M\rho_s}{\rho_w + M_0\rho_s} \right] \quad \frac{D_{ref}}{D_{eff}} = \frac{b_0}{b} \quad (3.26)$$

Burada  $D_{ref}$  deneyden elde edilen efektif difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ),  $D_{eff}$  nümerik analizde kullanılan büzülme etkisi sonucu elde edilen yeni efektif difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ),  $b_0$  ilk anda ürünün yarı kalınlığı ve  $b$  t anındaki ürünün yarı kalınlığıdır (Karim ve Hawlader 2005, Kumar ve ark. 2015).

#### 3.4.8. Isı ve kütle taşınım katsayıları hesabı

Isı ve kütle transfer katsayıları literatürde iyi bilinen korelasyonlar ile hesaplanmaktadır. Isı taşınım katsayısı, Reynolds ve Prandtl boyutsuz sayılarına bağlı Nusselt sayısı ile elde edilirken kütle taşınım katsayısı, Reynolds ve Schmidt boyutsuz sayılarına bağlı Sherwood sayısı ile hesaplanmaktadır (Çengel 2002, Kumar ve ark. 2015, Karim ve Hawlader 2005).

$$Nu = \frac{h_T L}{k} = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (3.27)$$



$$\text{Sh} = \frac{h_M L}{D_{AB}} = 0.664 \text{Re}^{0.5} \text{Sc}^{0.33} \quad (3.28)$$

$$\frac{h_T}{h_M} = \rho c_p L e^{2/3} \quad (3.29)$$

### 3.4.9. Çok fazlı akış için matematik model

Kurutma modelinin oluşturulmasında hem katı içerisinde hem de akış alanında oluşan gerçek transfer mekanizmaları göz önünde bulundurulmuştur. Katı içerisinde basınç ve kılcal (capillary) basınç gradyanı ile sıvı su transferi sağlanırken, basınç ve konsantrasyon farkı ile buhar transfer edilir. Konvektif kurutmada iç buharlaşma daha düşüktür. Bu yüzden basınç gradyanı ihmal edilebilir. Ancak bu çalışmada ihmal edilmemiştir. Bunun yerine buhar akışı için moleküler difüzyon, sıvı su akışı için ise kılcal akış tercih edilir. Buharlaşma olayı ise hem katı içerisinde hem de katı yüzeyinde oluşmaktadır.

Gözenekli katı için sıvı su ve buhar ile oluşan kütle transfer denklemleri eşitlik (3.30) ve (3.31)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla(-D_w \nabla c_w) + u_w \nabla c_w = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla(-D_v \nabla c_v) + u_v v \nabla c_v = 0 \quad (3.31)$$

Burada  $u_w$  ve  $u_v$  katı içerisindeki gaz fazında bulunan su buharı hızı ve sıvı fazdaki su hızıdır (Bird ve ark. 1960, Welty ve ark. 2001).

Su konsantrasyonu ( $c_w$ ) ve sıvı faz buharlaşması  $S_w$  arasındaki bağıntı;

$$S_w = \frac{c_w M_w}{\rho_w \varepsilon} \quad (3.32)$$

şeklinde yazılır. Gözenekli malzeme içerisindeki sıvı faz hızı nemli hava hızına göre düşüktür. Bu hızı hesaplamak için gaz faz basınç gradyanının da hesaba katıldığı Darcy yasası tanımlanır.

$$u_w = -\frac{\kappa\kappa_{rl}}{S_w\varepsilon\mu_w}\nabla p_g \quad (3.33)$$

Burada  $\kappa_{rl}$  sıvı faz geçirgenliği,  $\kappa$  gözenekli malzemenin geçirgenliği,  $\nabla p_g$  basınç gradyanı,  $\mu_w$  suyun viskozitesi,  $\varepsilon$  porosity (Datta 2007).

Sıvı faz geçirgenliği ise eşitlik (3.34)'de tanımlanmıştır;

$$\kappa_{rl} = \left\{ \begin{array}{ll} \left(\frac{S_w - S_{li}}{1 - S_{li}}\right)^3 & S_1 > S_{li} \\ eps & S_1 \leq S_{li} \end{array} \right\} \quad (3.34)$$

$S_{li}$  indirgenemez sıvı faz doygunluğu, bu eşitlik gözenekli malzeme içerisinde kalacak sıvı faz buharlaşma miktarının tanımlanmasında kullanılır (Datta 2007).

Su buhar transferi için hız alanının tanımlanmasında eşitlik (3.35) kullanılır.

$$u = \frac{u_g}{S_g\varepsilon} - \frac{M_a D_{eff}}{M_{ma}\rho_{ma}}\nabla\rho_{ma} \quad (3.35)$$

$M_{ma}$  ve  $\rho_{ma}$  nemli havanın molar kütlesi ve yoğunluğu.

Efektif difüzyon katsayısı;

$$D_{eff} = D_{va}\varepsilon^{4/3}S_g^{10/3} \quad (3.36)$$

Millington and Quirk İfadesi ile hesaplanır. Burada  $D_{va}$  hava buhar difüzyon katsayısıdır.

Laminer akış alanı için süreklilik denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u\nabla)u = \nabla \left[ -pl + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)l \right] + F \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (3.38)$$

Gözenekli materyal içerisindeki akış alanı için;

$$\frac{1}{\varepsilon_p} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon_p} \rho(u\nabla)u \frac{1}{\varepsilon_p} = \nabla \left[ -pl + \mu \frac{1}{\varepsilon_p} (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu \frac{1}{\varepsilon_p} (\nabla u)l \right] - \left( \mu \kappa^{-1} + \beta_F |u| + \frac{Q_{br}}{\varepsilon_p^2} \right) u + F \quad (3.39)$$

Taşınım ve iletim transfer olaylarını içeren kurutma havası için enerji dengesi eşitlik (3.40) ve (3.41)'de verilmiştir (Bird ve ark. 1960, Welty ve ark. 2001, Comsol Multiphysics 2017).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \nabla T + \nabla q = 0 \quad (3.40)$$

$$q = -k \nabla T \quad (3.41)$$

Fourier yasasına göre katı içerisindeki enerji dengesi eşitlik (3.42)'de verilmiştir.

$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \nabla T + \nabla q = 0 \quad (3.42)$$

$$q = k_{eff} \nabla T \quad (3.43)$$

Hava içerisine buhar transferi meydana gelmektedir. Sıvı su transferi olmamaktadır. Hava için kütle transferi denklemleri konvektif ve difüzyon ile sağlanmaktadır. Kütle

dengeyi eşitlik (3.44)'de verilmiştir (Bird ve ark. 1960, Welty ve ark. 2001, Comsol Multiphysics 2017).

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} + \nabla(-D_a \nabla c_a) + u \nabla c_a = 0 \quad (3.44)$$

### 3.4.10. Taguchi analiz denklemleri

Maksimum, minimum ve nominal performans değerleri için eşitlik (3.45), (3.46) ve (3.47) kullanılmaktadır (Taguchi 1990).

$$S/N_{max} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.45)$$

$$S/N_{min} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.46)$$

$$S/N_{nom} = 10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (3.47)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.48)$$

Burada n bir denemede test sayısı,  $y_i$  performans karakteristikleri için gözlenen deneysel verinin i. değeri,  $\bar{y}$  gözlem değerlerinin ortalaması ve  $s^2$  gözlem değerlerinin varyansıdır.

Deneysel olarak elde edilen nem içeriği Taguchi yöntemi ile yapılan analiz sonucunda aynı zamanda tahmin edilebilir.

$$S/N' = S/N_{avg} + \sum_{i=0}^p (S/N_i - S/N_{avg}) \quad (3.49)$$

Burada;  $S/N'$  tahmini  $S/N$  oranı,  $S/N_{avg}$  tüm  $S/N$  oranlarının ortalaması,  $p$  faktör sayısı,  $S/N_i$  her bir faktörün optimum seviyedeki  $S/N$  oranıdır (Tutar ve ark. 2014).

Hesaplanan tahmini  $S/N'$  oranı eşitlik (3.50)'de kullanılarak optimum deney kombinasyonu için tahmini ölçüm sonuç değeri elde edilir. Daha sonra bu değer ile deney sonucu karşılaştırılarak, Taguchi analizi ile deney sonuçlarının uyumlu olup olmadığı araştırılabilir.

$$Tahmin\ edilen\ değer = 10^{-\frac{S/N'}{20}} \quad (3.50)$$

#### 3.4.11. Nem içeriğinin ve ölçüm cihazlarının belirsizlik analizi

Deneysel çalışmada ölçüm cihazları nedeniyle bir hata meydana gelebilir. Bu nedenle, ölçüm sonuçlarının belirsizlik analizini yaparak toplam hata değerini belirlemek gerekir. Genel belirsizlik aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanabilir;

$$W_r = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.51)$$

$$e = \frac{W_r}{R} \quad (3.52)$$

burada  $R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonudur,  $W_r$  genel belirsizliği,  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  bağımsız değişkenlerin hata değeri ve bağıl belirsizlik (Moffat 1988, Kumar ve ark. 2015). Gıdanın nem içeriğini hesaplamak için kuru ürün ve başlangıç ağırlığının hassas bir terazide ölçülmesi gerekir. Bu nedenle, nem içeriğinin hesaplanmasında meydana gelen belirsizlik sadece ağırlığa bağlı olacaktır. Eşitlik (3.51) ve (3.52) kullanılarak gıda ürününün kuru baz nem içeriği ile ilişkili belirsizlik analizi denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$e_m = \left\{ \left( \frac{\delta W}{W - W_{dr}} \right)^2 + \left( \frac{W \delta W_{dr}}{(W - W_{dr}) W_{dr}} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3.53)$$

burada  $\delta W$  and  $\delta W_{dr}$  ağırlığın yüzde hatası,  $W_{dr}$  ürünün kuru ağırlığı,  $W$  ürünün ilk ağırlığıdır.

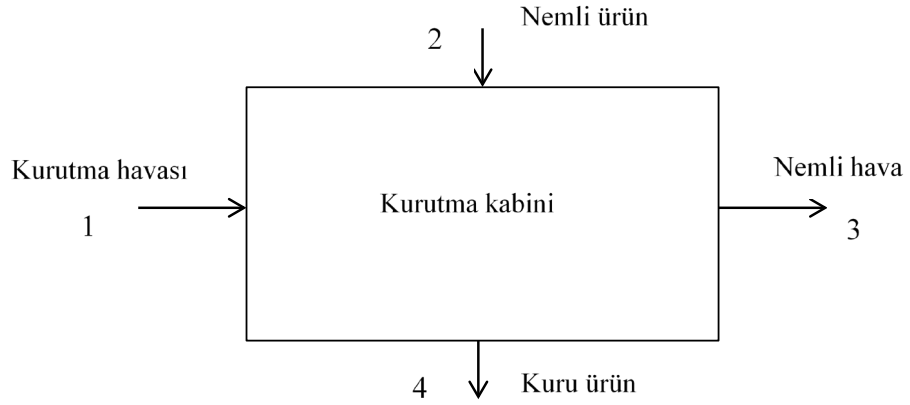
Ölçüm cihazlarının hassasiyet değerleri ve toplam belirsizlik değerleri verilmiştir. Cihazdan kaynaklı belirsizlik üretici firma tarafından cihazın özellikleri arasında belirtilirken, ölçüm yapan kişinin yanlış okumasından kaynaklanan belirsizlik ise tecrübî olarak alınmıştır (Akpınar 2005).

**Çizelge 3.4.** Kurutma deneyinde kullanılan ölçüm cihazlarına ait toplam belirsizlik değerleri

Kullanılan cihaz	Ölçülen büyüklük	Hassasiyet ( $\pm$ )	Ölçümden kaynaklanan belirsizlik ( $\pm$ )	Toplam belirsizlik ( $\pm$ )
Kurutma cihazı	Hava sıcaklığı	0.3 °C	0.1	0.3162
	Hava hızı	0.1 m/s	0.1	0.1414
	Hava nemi	%1.8 (RH)	0.01	0.0205
	Ürün ağırlığı	0.1 gr	0.01	0.1004
pH ve sıcaklık ölçüm cihazı	Ürün sıcaklığı	0.5°C	0.1	0.5099
	pH elektrod	0.02	0.1	0.1019
Hassas terazi	Ürün ağırlığı	0.05 gr	0.01	0.0509
Kızıl ötesi sıcaklık ölçer	Ürün sıcaklığı	0.1 °C	0.1	0.1414
Renk ölçüm cihazı	Ürün renk değişimi	0.08	0.1	0.1281

#### 3.4.12. Konvektif kurutma için ekserji analizi

Termodinamiğin 2. kanununa dayalı olarak herhangi bir kurutma sisteminin ekserji analizi yapılabilir. Bunun için Şekil 3.16'da verilen kurutma tünelinin toplam ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekserji yıkımı hesaplanmalıdır. Ekserji değerleri 1. kanun enerji dengesine dayalı olarak çalışma ortamı şartlarına bağlı karakteristikler kullanılarak hesaplanır. Enerji dengesini tanımlamak için uygulanan matematik ifadesi aşağıdaki eşitlik (3.54)'de verilmiştir (Aviara ve ark. 2014).



**Şekil 3.16.** Kurutma kabini şematik gösterimi

$$E = (U - U_{\infty}) - T_{\infty}(S - S_{\infty}) + P_{\infty}(V - V_{\infty}) + \frac{v^2}{2} + (Z - Z_{\infty})g + V(P - P_{\infty}) \quad (3.54)$$

burada  $(U - U_{\infty})$  iç enerji bileşeni (J/kg),  $T_{\infty}$  ortam sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $(S - S_{\infty})$  entropi bileşeni (J/kg),  $P_{\infty}(V - V_{\infty})$  iş bileşeni (J/kg),  $\frac{v^2}{2}$  momentum bileşeni (J/kg),  $(Z - Z_{\infty})g$  yerçekimi bileşenidir (J/kg).

Kurutma prosesinde herhangi bir kaldırma ve hareket olmadığı için momentum ve yerçekimi değişimleri ihmal edilebilir. İç enerji, entropi ve PV değerleri ile denklem yeniden düzenlenirse,

$$E = (U - U_{\infty}) - T_{\infty}(S - S_{\infty}) + P_{\infty}(V - V_{\infty}) + V(P - P_{\infty}) \quad (3.55)$$

İç enerji, entropi ve PV değerleri ile denklem yeniden düzenlenirse eşitlik (3.56) elde edilir.

$$E = (U + PV) - (U_{\infty} + P_{\infty}V_{\infty}) - T_{\infty}(S - S_{\infty}) \quad (3.56)$$

$U+PV$  terimleri yerine  $H$  entalpi değeri yerine yazılırsa;

$$E = c_p \left[ (T - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T}{T_\infty} \right] \quad (3.57)$$

Eşitlik elde edilir. Kurutucunun giriş ve çıkış sıcaklık değerlerine bağlı olarak ekserji giriş ve ekserji çıkış değerleri hesaplanabilir.

$$E_i = c_p \left[ (T_i - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_i}{T_\infty} \right] \quad (3.58)$$

$$E_o = c_p \left[ (T_o - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_o}{T_\infty} \right] \quad (3.59)$$

Ekserji yıkımı ise eşitlik (3.60)'da verildiği gibi yazılabilir.

Ekserji yıkımı= Ekserji girişi- Ekserji çıkışı

$$E_{des} = \sum E_i - \sum E_o \quad (3.60)$$

Ekserji verimliliği, ürünün kurutulmasındaki ekserji kullanımının sisteme verilen kurutma havasının ekserji değerine oranı olarak tanımlanabilir (Colak ve Hepbaslı 2007). Bu ifade;

Ekserji verimi= (Ekserji girişi-Ekserji yıkımı)/Ekserji girişi

Ekserji verimi=1- (Ekserji yıkımı/ Ekserji girişi)

$$\eta_E = 1 - \frac{E_{des}}{E_i} \quad (3.61)$$

şeklinde yazılabilir.



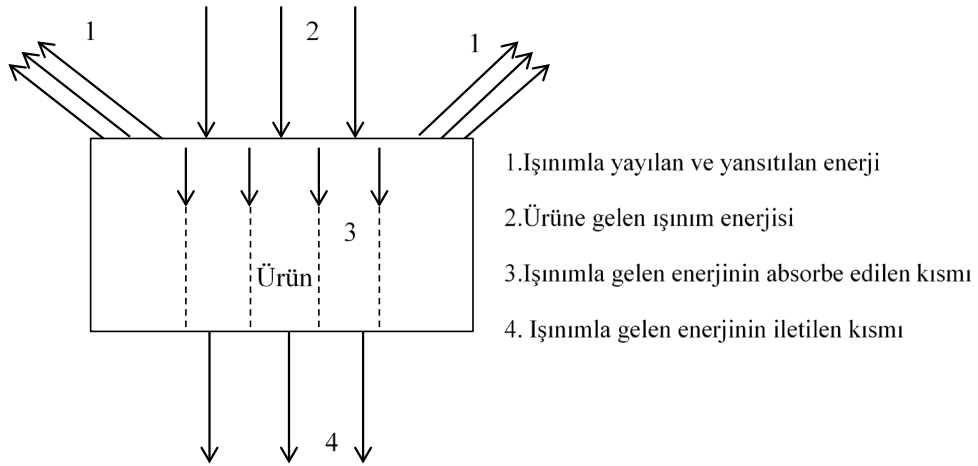
Bir sistemde ekserji yıkımı yada tersinmezlik minimize edildiğinde ekserji veriminde maksimum iyileşme meydana gelmektedir. (Van Gool 1997). Ekonominin farklı süreçlerini veya sektörlerini analiz ederken, (exergetic) “iyileştirme potansiyeli” kavramının kullanılması yararlı olmaktadır (Hammond ve Stapleton 2001). Kurutma prosesinin ekserjetik gelişim potansiyel değerini tanımlamak için eşitlik (3.62) kullanılabilir (Colak ve Hepbaşlı 2007).

$$IP = (1 - \eta_E)(E_i - E_O) \quad (3.62)$$

burada IP ekserjetik gelişim potansiyelidir (kJ/kg).

### 3.4.13. Işınmımlı kurutucu için ekserji analiz denklemleri

Işınım ile enerji nemli bir ürün üzerine gönderildiğinde enerjinin bir kısmı iletilir, enerjinin bir kısmı ürün tarafından emilir ve enerjinin bir kısmı ise ürün tarafından absorbe edilir. Radyasyona maruz kalan nemli ürün üzerindeki enerji dengesi denklemi yazılarak, ürün tarafından absorbe edilen ışınmımla enerji miktarı eşitlik (3.63) kullanılarak hesaplanır (Aghbashlo 2016).

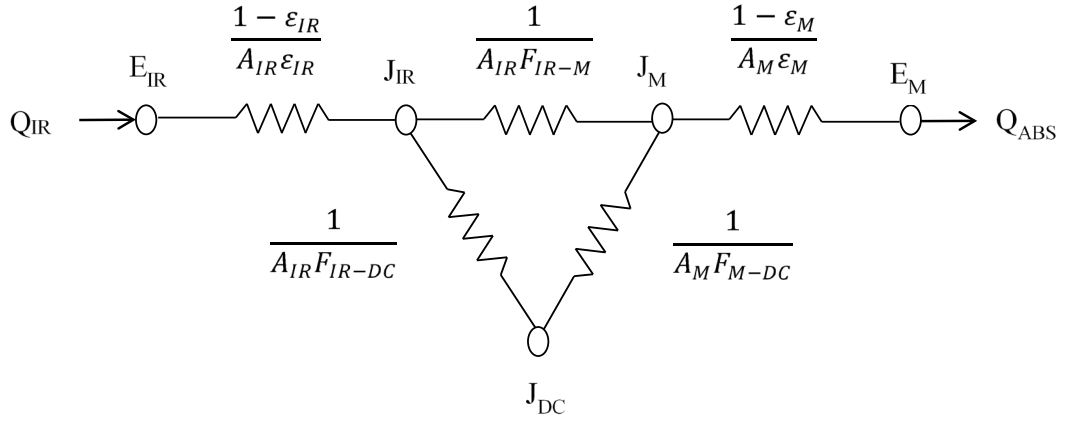


**Şekil 3.17.** Işınmımlı kurutucu için enerji dengesinin şematik gösterimi

$$Q_{abs} = IR_{rad} - IR_{ref} - IR_{emit} - IR_{tran} \quad (3.63)$$

Kızılötesi ışınımına maruz kalan nemli ürün tarafından absorbe edilen ışınım enerji miktarı kurutucunun radyasyon ağı ile kapalı 3 yüzey duvarı olarak düşünülmesi ile hesaplanabilir. Absorbe edilen enerji miktarı bu bilgiler göz önüne alınarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

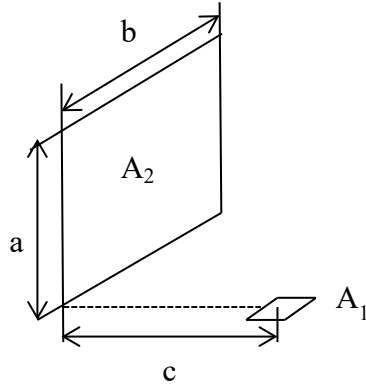
$$\dot{Q}_{abs} = \frac{\sigma (T_{IR}^4 - \bar{T}_M^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{IR}}{A_{IR}\varepsilon_{IR}} + \frac{1}{\left(\frac{1}{A_{IR}F_{IR-M}}\right) + \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{A_{IR}F_{IR-DC}}\right) + \left(\frac{1}{A_M F_{M-DC}}\right)}\right)} + \frac{1 - \varepsilon_M}{A_M \varepsilon_M}} \quad (3.64)$$



**Şekil 3.18.** Kapalı 3 yüzey için radyasyon ağının şematik gösterimi

Işınımın tüm miktarının ürünün ısıtılması için etkin olarak kullanıldığı varsayılmıştır.

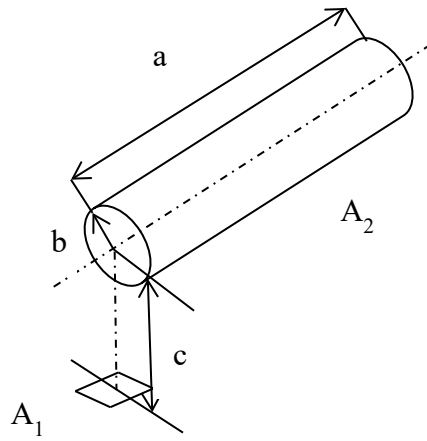
Burada  $F_{M-DC}$  ışınım lambasının ürüne olan görüş faktörü değeridir. Bu değeri hesaplamak için eşitlik (3.65) kullanılır (Genceli 2004).



**Şekil 3.19.** Materyalin kurutma çemberine olan görüş alanı

$$X = \frac{a}{b} \quad Y = \frac{c}{b} \quad A = \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left( \tan^{-1} \frac{1}{Y} - AY \tan^{-1} A \right) \quad (3.65)$$



**Şekil 3.20.** Materyalin ışınım lambasına olan görüş alanı

$$X = \frac{a}{b} \quad Y = \frac{c}{b} \quad A = (1 + Y)^2 + X^2 \quad B = (1 - Y)^2 + X^2$$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{\pi Y} \tan^{-1} \left( \frac{X}{\sqrt{Y^2 - 1}} \right)$$

$$+ \frac{X}{\pi} \left\{ \frac{A - 2Y}{Y\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(Y-1)}{B(Y+1)}} \right] - \frac{1}{Y} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{Y-1}{Y+1}} \right) \right\} \quad (3.66)$$

Karşılıklılık kuralına göre eşitlik (3.67) yazılabilir,

$$F_{IR-M} A_{IR} = F_{M-IR} A_M \quad (3.67)$$

Burdadan  $F_{IR-M}$  hesaplanır. Toplama kuralına göre,

$$F_{IR-IR} + F_{IR-M} + F_{IR-DC} = 1 \quad (3.68)$$

yazılabilir. Buradan  $F_{IR-DC}$  hesaplanır (Genceli 2004).

#### 3.4.14. Ekserji verimliliği ve ekserji denge denklemleri

Kurutucuya giriş ve çıkış akışı ile ışınlama kurutma sürecinin şeması Şekil 3.21'de verilmiştir.

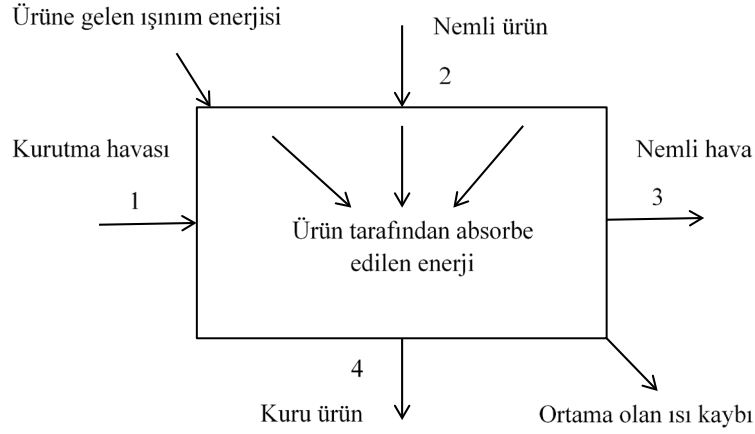
İnfrared kurutma süreci için ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\frac{m_d(ex_{M,4} - ex_{M,2})}{\Delta t} = Ex_{a,1} - Ex_{a,3} + Ex_{IR,rad} - Ex_{IR,ref} - Ex_{IR,emit} - Ex_{IR,tran} + Ex_{ev} - Ex_l - Ex_{des} \quad (3.69)$$

Eşitlik (3.63) ve (3.69) kullanılarak ekserji denge denklemi;

$$\frac{m_d(ex_{M,4} - ex_{M,2})}{\Delta t} = Ex_{a,1} - Ex_{a,3} + Ex_{abs} + Ex_{ev} - Ex_l - Ex_{des} \quad (3.70)$$

şeklinde ifade edilebilir.



**Şekil 3.21.** İnfared kurutma sürecinin şematik gösterimi

Yaş ve kuru ürünün özgül ekserji değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$ex_M = C_M \left[ (\bar{T}_M - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{\bar{T}_M}{T_0} \right) \right] \quad (3.71)$$

Kurutucu havasının giriş ve çıkış sıcaklık değerlerine bağlı olarak ekserji giriş ve ekserji çıkış değerleri hesaplanabilir (Aghbashlo 2016).

$$E_1 = m_a c_p \left[ (T_1 - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_1}{T_\infty} \right] \quad m_a = \rho u A_k \quad (3.72)$$

$$E_3 = m_a c_p \left[ (T_3 - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_3}{T_\infty} \right] \quad m_a = \rho u A_k \quad (3.73)$$

Kızılötesi ısıtıcının ekserji miktarı, kaynak sıcaklığı ve emissivite değerine bağlı olarak aşağıdaki gibi formüle edilebilir (Wright ve ark. 2002);

$$Ex_{IR} = \sigma T_{IR}^4 \left( \varepsilon_{IR} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T_{IR}} \right)^4 - \frac{4}{3} \varepsilon_{IR}^{3/4} \left( \frac{T_0}{T_{IR}} \right) \right) \quad (3.74)$$

buna ek olarak enerji miktarı eşitlik (3.75) de verilmiştir.

$$En_{IR} = \varepsilon_{IR} \sigma T_{IR}^4 \quad (3.75)$$

Ekserji analizinde sistemin ekserji miktarını elde etmek için enerji değerine bağlı olarak aşağıdaki eşitlik kullanılabilir;

$$Ex_{abs} = \beta \dot{Q}_{abs} \quad (3.76)$$

burada ekserji miktarının enerji miktarına oranı olarak ifade edilen  $\beta$  kalite faktörü eşitlik (3.77) kullanılarak elde edilebilir.

$$\beta = 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T_{IR}} \right)^4 \varepsilon_{IR}^{-1} - \frac{4}{3} \varepsilon_{IR}^{-0.25} \left( \frac{T_0}{T_{IR}} \right) \quad (3.77)$$

Nemli ürünün kurutulması için kullanılan ekserji miktarı;

$$Ex_{ev} = \left( 1 - \frac{T_0}{T_M} \right) \dot{Q}_{ev} \quad (3.78)$$

şeklinde elde edilir. Buharlaşmadan dolayı meydana gelen ısı transfer miktarı ise eşitlik (3.79) da verilmiştir.

$$\dot{Q}_{ev} = (m_w)_{ev} \lambda \quad (3.79)$$

Burada verilen  $(m_w)_{ev}$  değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$(m_w)_{ev} = \dot{m}_{w,2} - \dot{m}_{w,4} \quad (3.80)$$

Kızılötesi ışınlama ile kurutma sürecinin ekserji verimliliği hesabı, nemli ürünün kurutulması için hesaplanan ekserji miktarının, nemli ürün tarafından absorbe edilen ekserji miktarı ile kurutma havası için ekserji giriş değerinin toplamına bölünmesi ile elde edilir.

$$\psi_{ex} = \frac{\dot{E}x_{ev}}{\dot{E}x_{a,1} + \dot{E}x_{abs}} \times 100 \quad (3.81)$$

Burada sunulan matematik model kızılötesi ışınlı kurutma sürecinin ekserji veriminin hesabı için kullanılabilir (Aghbashlo 2016).

#### 3.4.15. Konvektif kurutma için enerji tüketim hesabı

Farklı hız ve sıcaklıklarda yapılan kurutma işlemine ait enerji tüketim miktarı eşitlik (3.82) kullanılarak hesaplanır (Koyuncu ve ark. 2007).

$$E_t = A \cdot v \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot \Delta T \cdot t \quad (3.82)$$

#### 3.4.16. Işınımlı kurutucu için enerji tüketim hesabı

Işınımlı kurutucudaki toplam tüketilen enerji, ışınlı lambası ve fan tarafından tüketilen enerjilerin toplamına eşittir. Herhangi bir zamanda (saat) ışınımlı ısıtıcı tarafından tüketilen enerji miktarı (kwh) eşitlik (3.83) kullanılarak hesaplanır (Sirvastava ve ark. 1993).

$$E_1 = K t \quad (3.83)$$

Fan tarafından tüketilen enerji miktarı;

$$E_2 = \frac{V^3}{16600} t \quad (3.84)$$

şeklinde elde edilir. İnfrared kurutucu kullanılarak tüketilen toplam enerji miktarı (kwh) aşağıdaki gibi ifade edilir (Sirvastava ve ark. 1993).

$$E_t = E_1 + E_2 \quad (3.85)$$

### 3.4.17. Özgül enerji tüketim hesabı

Özgül enerji tüketim miktarı (kJ/kg), üründen buharlaşan su miktarı ( $m_w$ ) için tüketilen enerji olarak ifade edilmektedir (Wang ve Sheng 2006).

$$\text{ÖET} = \frac{E_T}{m_w} \quad (3.86)$$

### 3.4.18. Isıl verim hesabı

Termal verim, üründen buharlaşan su için tüketilen enerjinin kurutucuda toplam tüketilen enerjiye oranı olarak ifade edilir (El-Mesery ve Mwithiga 2012).

$$\eta = \frac{m_w \lambda}{E_T} \quad (3.87)$$

Burada  $\lambda$  buharlaşma entalpisi (kJ/kg) ve  $m_w$  buharlaşan su miktarı (kg)'dir.

### 3.4.19. Kurutucu performans oranı

Yapılan çalışmada kurutucu performansının ve optimum çalışma şartlarının tespit edilebilmesi için eşitlik (3.88)'de verilen ifade tanımlanmıştır.

$$PO = \frac{\text{ekserji verimi}}{\text{ısı verim}} \quad (3.88)$$



## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Muz Kurutulması: Nümerik Modelleme, Renk Kinetiği, pH Değişimi ve Büzülme Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde muzun kurutma kinetiği 40°C, 50°C ve 60°C hava sıcaklığı ve 0.5 m/s hava hızı için deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Ürünün yaş ve kuru bazda nem içeriği, boyutsuz nem içeriği, kuruma hızı ve ağırlık değişimi zamana bağlı olarak tespit edilmiştir. Muzun tüm kuruma sürecinin azalan hız periyodunda gerçekleştiği görülmüştür. Buna ek olarak ürünün zamanla sıcaklığının değişim grafiği çizilmiştir. Ürünün renk parametreleri olan L, a ve b değerlerinin değişim grafikleri 3 farklı hava sıcaklığı için elde edilmiştir. Kurutma havası sıcaklığındaki artış ile ürünün parlaklık (L) ve sarılık (b) tonunun azaldığı, kırmızılık (a) tonunun ise arttığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar ile birlikte her bir hava sıcaklığına ait taze ve kuru ürün arasındaki renk sapmaları hesaplanıp ürünün parlaklık, tazelik ve kalitesinde olan değişim araştırılmıştır. Her bir kurutma havası sıcaklığı için elde edilen renk parametrelerinden L ve b 0. ve 1. dereceden kinetik modele uygun iken a değerinin sadece 0. dereceden kinetik modele uygun olduğu tespit edilmiştir. Deneysel elde edilen verilere en uygun modelin bulunması için literatürde yaygın olarak kullanılan 5 farklı ince tabaka kurutma modeli kullanılmıştır. Lineer olmayan regresyon analizi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun için belirlilik katsayısı ( $R^2$ ), standart hata (SH) ve ki kare ( $x^2$ ) ifadeleri hesaplanmıştır. Deneysel verilere en yakın değerler 40°C de Two Term ve Midilli modeli, 50°C ve 60°C de ise Midilli modelinde elde edilmiştir. Daha sonra her bir hava sıcaklığı için efektif difüzyon katsayıları hesaplanıp sıcaklıkla değişim grafiği çizilmiştir. Artan hava sıcaklığının efektif difüzyon katsayısı üzerinde etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Ayrıca aktivasyon enerjisi hesaplanmış olup, elde edilen sonuçların gıda kurutulması ile ilgili literatürde verilen bilgiler ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kurutma havası sıcaklığının ürün büzülmesi üzerine olan etkisi araştırılmış ve ürün hacmindeki en fazla değişim 60°C kurutma havası sıcaklığında gerçekleşmiştir. Son olarak nümerik analiz ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış olup nem ve sıcaklık değerleri arasında yüksek bir uyum gözlenmiştir.

#### 4.1.1. Başlangıç nem içeriğinin tespiti

Deneyle Bursa'da bir yerel markette satılan (Ekvator'dan ithal) muzlar kullanılmıştır. Kurutma işlemleri Bursa Uludağ Üniversitesi Isı Tekniği Laboratuvarında bulunan konvektif, tepsili tünel tip kurutma cihazı ile yapılmıştır. İlk nem tayininin belirlenmesi için  $351\pm 0.05$  gr ağırlığındaki muz dilimleri kurutma cihazına konularak 24 saat boyunca  $75\pm 0.3^\circ\text{C}$  hava sıcaklığında kurutulmuştur. Son iki ölçüm arasındaki fark %1 oluncaya kadar kurutma işlemi yapılmıştır. Ortalama başlangıç ürün nem içeriği %72 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.1'de kurutmadan önce ve sonraki muzun görüntüleri verilmiştir.

#### 4.1.2. Deneyle uygulanması

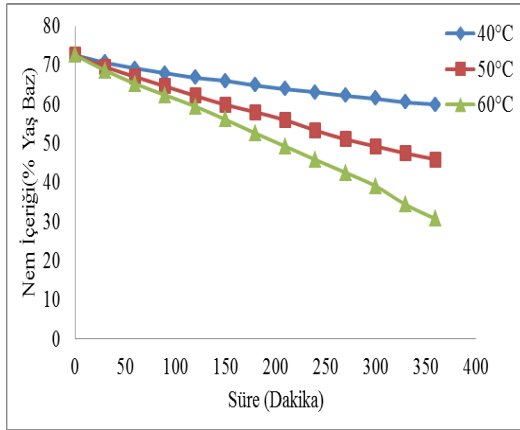
Alınan muzlar öncelikle buzdolabında  $4^\circ\text{C}$  de 24 saat boyunca muhafaza edilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar 3 saat laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Kurutma havasının kuruma üzerine etkisini incelemek için  $40\pm 0.3^\circ\text{C}$ ,  $50\pm 0.3^\circ\text{C}$  ve  $60\pm 0.3^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki hava, ürün üzerine 0.5 m/s hızda gönderilmiştir. Öncelikle muzlar 1 cm kalınlığında dilimlenerek tepsiye dizilmiştir. Bu arada sürekli rejime ulaşmaya kadar deney cihazı çalıştırılmıştır. Boş tepsilerin ağırlığı ölçülerek kaydedilmiştir. İstenen şartlara ulaştığı zaman tepsi cihaza yerleştirilmiştir. Deney sırasında ürünün ağırlığındaki değişim 0.05 gr hassasiyete sahip dijital terazi yardımı ile periyodik olarak kaydedilmiştir. Deney sonuçları 3 kere tekrar edilmiştir. Kalibrasyonu yapılan pH metre (PCE 228) ile pH ( $\pm 0.02$ ) ve sıcaklık ölçümü ( $\pm 0.5$ ) yapılırken, renk ölçüm ( $\pm 0.08$  hassasiyete sahip PCE CSM 1) cihazında farklı parametrelerin ölçümü yapılmıştır. Kurutma havasının bağıl nemi her bir sıcaklık değeri için cihazda bulunan nem sensörü ile ölçülmüştür. pH ve sıcaklık değeri ile renk ölçüm değerleri (L,a,b) her yarım saatte bir kaydedilmiştir. Bunun için her bir renk parametresinin (L,a,b) 5 farklı dilimden ölçümü yapılarak ortalama değerleri hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklarda her bir deney için eşit ağırlıkta 2 tepsi hazırlanmıştır. Bir tepsi sadece ağırlık ölçümü ve renk ölçümü için kullanılırken diğeri ise pH ve sıcaklık ölçümü için kullanılmıştır.



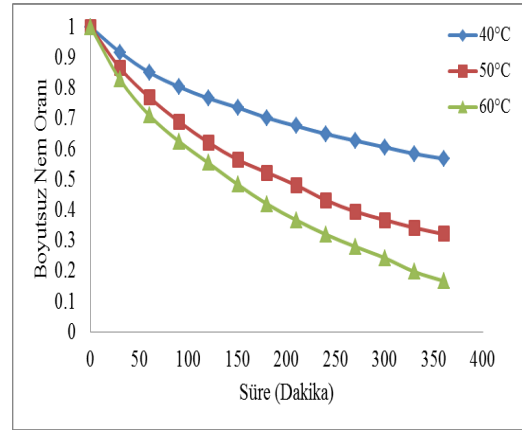
**Şekil 4.1.** Muz dilimlerinin kurutmadan önceki ve sonraki görüntüleri

#### 4.1.3. Deney bulguları

Kurutma parametrelerini incelemek üzere gerçekleştirilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde sunulmaktadır. Şekil 4.2’de yaş bazdaki nem içeriğinin ve boyutsuz nem içeriğinin zaman ile değişim grafiği sonuçları verilmiştir. Şekil 4.2a’da başlangıçta %72 yaş bazda nem içeriğine sahip ürünün 3 farklı sıcaklık için 360 dakikalık kurutma sonuçları görülmektedir.

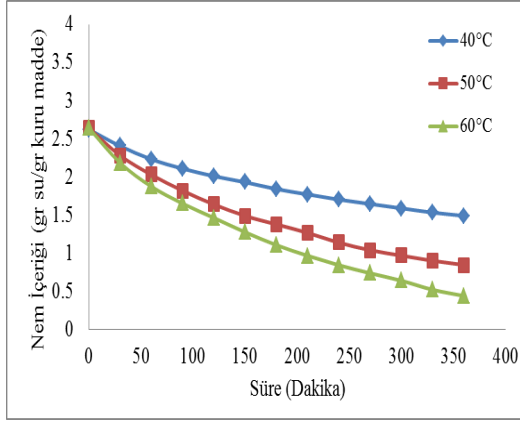


(a)

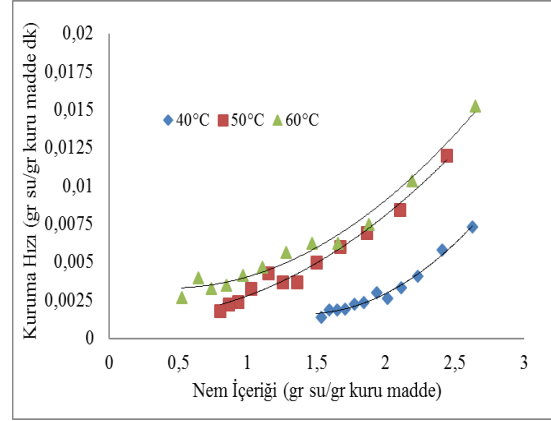


(b)

**Şekil 4.2.** a) Yaş bazda (%) nem içeriği değişimi b) Boyutsuz nem oranı değişimi



(a)



(b)

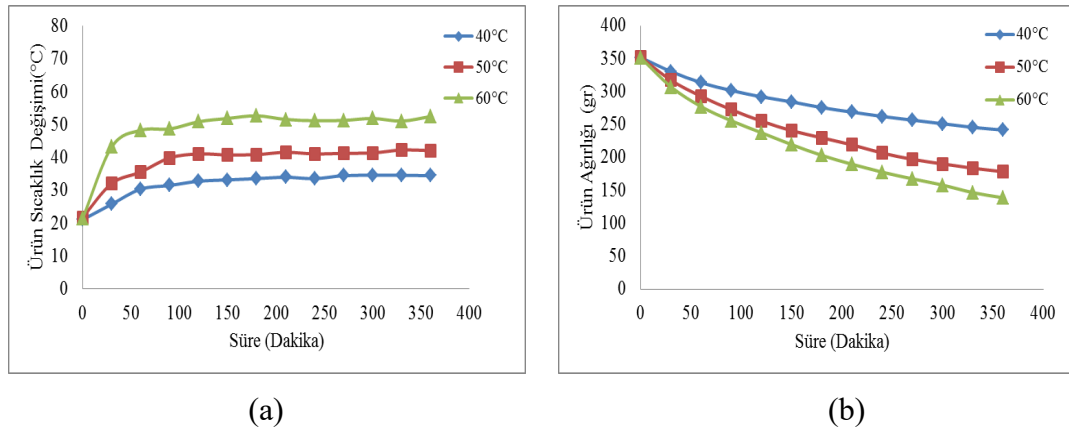
**Şekil 4.3.** a)Kuru baz nem içeriğinin zamanla değişimi b)Kuruma hızının kuru baz nem içeriğine göre değişimi

40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıkta kurutulan ürünün 360 dakika sonraki nem değerleri sırası ile yaklaşık %59, %45 ve %30 olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde Şekil 4.2b'de boyutsuz nem içeriğinin zamanla değişim grafiği çizilmiştir. Burada kurutma sonunda boyutsuz nem içeriği değerlerinin 40°C, 50°C ve 60°C için sırası ile 0.56, 0.32 ve 0.16 olduğu görülmüştür.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi hava sıcaklığı arttıkça nem içeriğinin azalarak kuruma süresinin kısaldığı ve kuruma hızının arttığı literatürdeki bilgiler ile uyumluluk göstermektedir (Kara ve Demir 2012, Silva ve ark. 2014, Mercali ve ark. 2010, Roberts ve ark. 2008, Lahsasni ve ark. 2004, Mundada ve ark. 2011, Afolabi ve Agarry 2014, Dandamrongrak ve ark. 2002, Ayim ve ark. 2012, Doymaz, 2007, İzli ve ışık 2015, Bains ve Langrish 2007-2008, Karim ve Hawlader 2005, Hadrich ve Kechaou 2009, Curcio ve ark. 2008).

Şekil 4.3a'da ürüne ait kuru baz nem içeriğinin zamanla değişimi görülmektedir. Burada 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıkta yapılan kurutma işlemi sonunda ürüne ait kuru baz nem içeriğinde gr su/gr kuru madde oranınca 1.13, 1.8 ve 2.2 azalma meydana gelmiştir. Sıcaklık arttıkça kuru baza ait nem içeriğinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.3b'de kuruma hızının nem içeriğine göre değişim eğrisi görülmektedir. Farklı sıcaklıklar (40°C, 50°C ve 60°C) için ortalama kuruma hızları sırası ile 0.0031, 0.0049

ve 0.0061 (gr su/gr kuru madde dk) olarak hesaplanmıştır. Daha yüksek sıcaklıkta kuruma hızında artış meydana geldiği gözlenmiştir. 10 °C'lik sıcaklık artışı kuruma hızında ortalama 1.3 kat artış sağlamıştır. 3 sıcaklık değeri için de kurumanın azalan hız periyodunda gerçekleştiği görülmektedir. Muz kurutulmasında sabit hızda kuruma evresi çok kısa olduğu için bu bölge görülememektedir. Asıl kurutma işlemi difüzyon etkisinin görüldüğü azalan hız periyodunda gerçekleşmektedir. Azalan hız periyodunda muzun kuruma hızında önce keskin bir düşüş meydana gelirken daha sonra azalma daha yavaş gerçekleşmiştir (Thuwapanichayanan ve ark. 2011, Silva ve ark. 2014, Hadrich ve Kechaou 2009). Farklı sıcaklıklarda yapılan kurutma işlemi boyunca ürün içerisindeki nem miktarı azaldığı için kuruma hızı da zamanla düşmektedir. Elde edilen bu veriler literatürdeki bazı araştırmacıların sonuçları ile de uyumluluk göstermektedir (Maskan 2000, Nguyen ve Price 2007, Motevali ve ark. 2010, Srikiatden ve Roberts 2006, Bains ve Langrish 2008, Thuwapanichayanan ve ark. 2011, Karim ve Hawlader 2005, Afolabi ve Agarry 2014, Hadrich ve Kechaou 2009, Mirzaee ve ark. 2009).



**Şekil 4.4.** Muz dilimlerinin a) sıcaklık değişimi b) ağırlık değişimi

Deneyle sırasında muz dilimlerinin merkezinin zamanla sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Ölçülen sonuçlar Şekil 4.4a'da verilmiştir. Muz dilimlerinin başlangıç sıcaklığı  $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Kurutma sonunda ölçülen sıcaklık değerleri  $40^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  ve  $60^\circ\text{C}$  kurutma havası sıcaklıkları için sırası ile  $34.4^\circ\text{C}$ ,  $42^\circ\text{C}$  ve  $52.4^\circ\text{C}$  olarak elde edilmiştir. Sıcaklık artış oranları ise %63, %100 ve %150 olmuştur. Bu sonuca göre en fazla sıcaklık artışının  $60^\circ\text{C}$  kurutma havası sıcaklığında gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 4.4b’de kurutulan ürünün ağırlık değişimi verilmiştir. 40°C, 50°C ve 60°C kurutma havası sıcaklıklarında 360 dakikalık sürede sırası ile 110gr, 173.5gr ve 212.2gr su buharlaşmıştır.

#### 4.1.4. Farklı kurutma modelleri ve doğrulama çalışması

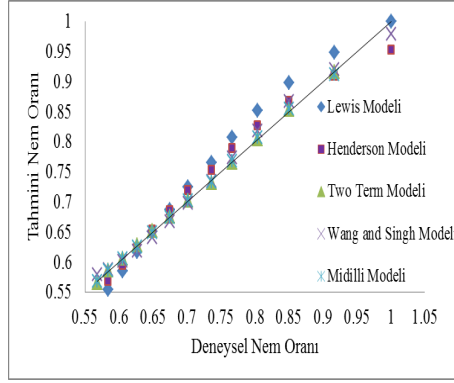
Deneysel verilerin doğruluğunu test etmek ve en uygun modelin bulunması için literatürde yaygın olarak bilinen 5 farklı kurutma modeli kullanılmıştır. 40°C, 50°C ve 60°C kurutma havası sıcaklığı için deneyden elde edilen veriler farklı kurutma modellerine uygulanmıştır. Çizelge 3.3’de verilen farklı kurutma modelleri için regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen katsayılar, a, b, k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>, n, R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri Çizelge 4.1’de toplu olarak verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklar için elde edilen istatistik parametre değerleri ve katsayılar

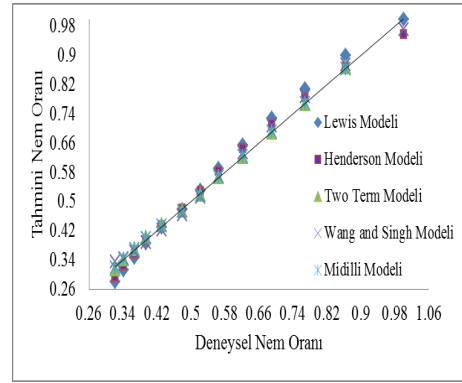
Model	40°C			50°C			60 °C		
	Sabitler ve katsayılar			Sabitler ve katsayılar			Sabitler ve katsayılar		
	R <sup>2</sup>	SH	x <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	SH	x <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	SH	x <sup>2</sup>
1	0.94	0.0315	0.0010	0.98	0.0274	0.0008	0.99	0.0171	0.0003
2	0.97	0.0223	0.0005	0.99	0.0213	0.0005	0.99	0.0137	0.0002
3	0.99	0.0021	4.56×10 <sup>-6</sup>	0.99	0.0047	2.19×10 <sup>-5</sup>	0.99	0.0084	7.03×10 <sup>-5</sup>
4	0.99	0.0119	0.0001	0.99	0.0160	0.0003	0.99	0.0224	0.0005
5	0.99	0.0029	8.46×10 <sup>-6</sup>	0.99	0.0041	1.64×10 <sup>-5</sup>	0.99	0.0038	1.42×10 <sup>-5</sup>
1	k=0.0018			k=0.035			k=0.0049		
2	k=0.0016			k=0.0033			k=0.0047		
3	a=0.14			a=0.17			a=0.94		
	b=0.85			b=0.82			b=0.05		
	k <sub>0</sub> =0.0157			k <sub>0</sub> =0.0162			k <sub>0</sub> =0.0046		
	k <sub>1</sub> =0.0011			k <sub>1</sub> =0.027			k <sub>1</sub> =0.121		
4	a=-0.0020			a=-0.0033			a=-0.0039		
	b=2.47×10 <sup>-6</sup>			b=4.31×10 <sup>-6</sup>			b=4.82×10 <sup>-6</sup>		
5	a=1.0			a=1.00			a=1.0		
	b=0.0002			b=8.07×10 <sup>-5</sup>			b=0.0003		
	n=0.77			n=0.85			n=0.78		
	k=0.0071			k=0.0083			k=0.0125		

R<sup>2</sup>, regresyon katsayısı; SH, standart hata; x<sup>2</sup>, ki kare; k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>, kurutma sabiti (dk<sup>-1</sup>); a, b, katsayılar; n, kurutma sabiti

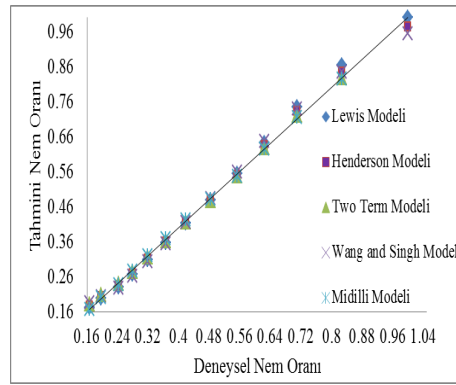
40°C sıcaklık için Two term modelinde R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0021 ve 4.56×10<sup>-6</sup>, Midilli Modelinde ise 0.99, 0.0029 ve 8.46×10<sup>-6</sup> olarak hesaplanmıştır. 50°C sıcaklık için Midilli Modelinde R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0041 ve 1.64×10<sup>-5</sup> olarak hesaplanmıştır. 60°C sıcaklık için Midilli modelinde R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0038 ve 1.42×10<sup>-5</sup> olarak hesaplanmıştır. Bu bilgiye göre Midilli modelinin diğer modeller arasında en uygun model olduğu ve deneysel verilere en yakın tahmini nem oranı değerlerini verdiği ifade edilebilir.



(a)



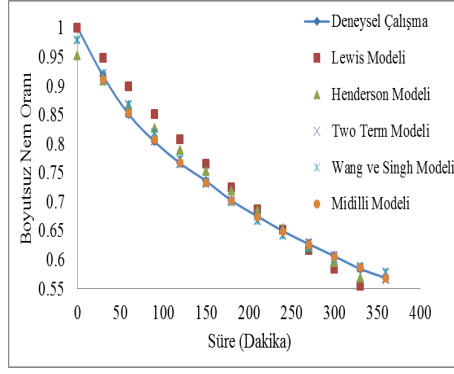
(b)



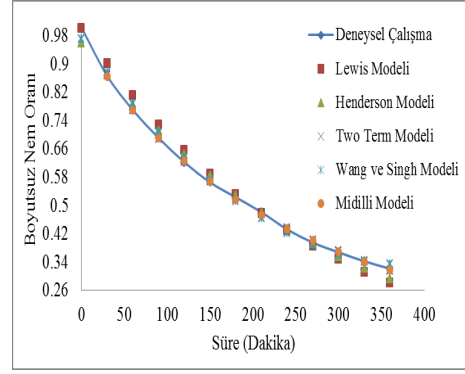
(c)

**Şekil 4.5.** (a) 40°C, (b) 50°C ve (c) 60°C sıcaklıklarda farklı modellerden elde edilen tahmini nem oranı ile deneysel nem oranı değişimi

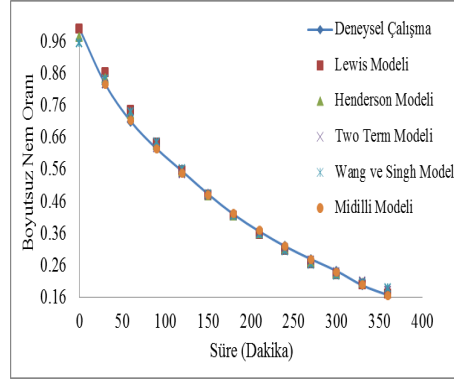
Şekil 4.5’de 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklarda elde edilen deney verilerinin farklı kurutma modellerine uygulanması sonucu hesaplanan tahmini nem oranları ile olan değişim grafiği verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.6.** (a) 40°C, (b) 50°C ve (c) 60°C sıcaklıklarda farklı modellere ve deneye ait boyutsuz nem oranlarının zamanla değişimi

Şekil 4.6’da 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklarda elde edilen farklı modellere ve deneye ait boyutsuz nem oranlarının zamanla değişim grafiği verilmiştir. Şekilde regresyon analizi sonucu en uygun model olarak karşımıza çıkan Midilli Modeline ait boyutsuz nem oranları değerlerinin deneysel verilere ait eğri üzerinde yer aldığı görülmektedir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’dan elde edilen verilere göre Midilli modeline ait tahmini nem oranı değerlerinin deneysel nem oranı değerleri ile oldukça iyi bir uyum gösterdiği, yanısıra Midilli modelinin değişik araştırmacılarca da incelendiği literatürden görülmektedir (Wang ve ark. 2009, Amiri ve ark. 2011, Sadi ve Meziane 2015, Mihindikulasuriya ve Jayasuriya 2013).

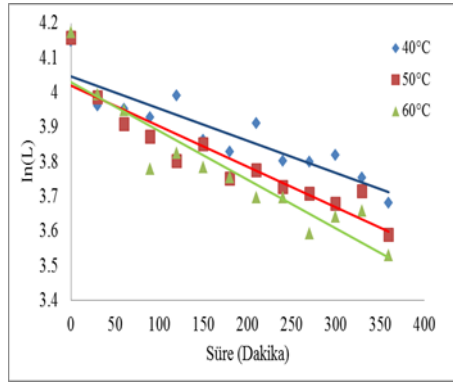
Literatürde yapılan bazı çalışmalarda ise çilek kurutulmasında Midilli modeli (Vega-Galvez ve ark. 2012); şeftali kurutulmasında Logaritmik model (Zhu ve Shen 2014); havuç kurutulmasında Two term modeli (Zielinska ve Markowski 2010) ve domates



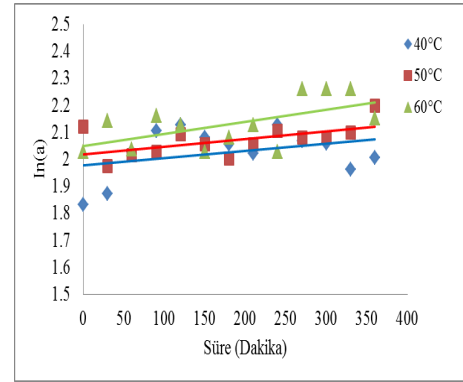
kurutulmasında Midilli modeli (Taheri-Garavand ve ark. 2011) kurutmayı en iyi tanımlayan model olarak bulunmuştur.

#### 4.1.5. Renk ölçüm sonuçları

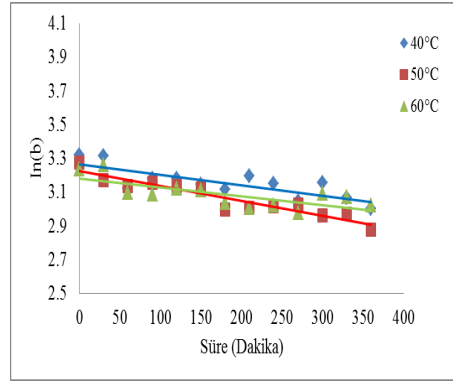
Şekil 4.7’de 3 farklı hava sıcaklık değeri için renk parametre değerleri olan  $L$ ,  $a$  ve  $b$ ’nin değişimi verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.7. Muz numunesine ait renk parametre değerleri; (a)-  $L$ ; (b)-  $a$ ; (c)-  $b$  değerleri

Bu sonuçlara göre hava sıcaklığı arttıkça ürünün parlaklık ( $L$ ) değerinin belirgin bir şekilde azaldığı söylenebilir. Her bir sıcaklık için ürünün  $a$  değerinin artış gösterdiği,  $b$  değerinin ise azaldığı görülmüştür.

Şekil 4.7 ve Çizelge 4.2'den anlaşılacağı üzere ürünün kurutma havası sıcaklığı arttıkça renginde koyulaşmanın arttığı (L değerinde azalma) gözlenmiştir (Wang ve Chao 2002, Sacilik ve Elicin 2006, İzli ve Işık 2015, Maskan 2001).

**Çizelge 4.2.** Taze ve kuru muz dilimlerinin renk parametre (*L, a, b*) değerleri

	Parametre	L	a	b
40 °C	Taze	63.4±(0.97) <sup>a</sup>	6.24±(0.31) <sup>a</sup>	27.7±(0.6) <sup>a</sup>
	Kuru	39.7±(1.98) <sup>b</sup>	7.44±(0.37) <sup>a</sup>	20.1±(0.5) <sup>b</sup>
50 °C	Taze	64±(2.12) <sup>a</sup>	8.34±(0.31) <sup>a</sup>	26.42±(0.19) <sup>a</sup>
	Kuru	36.1±(2.32) <sup>b</sup>	9±(0.96) <sup>a</sup>	17.8±(0.94) <sup>b</sup>
60 °C	Taze	65.07±(1.83) <sup>a</sup>	7.6±(0.51) <sup>a</sup>	25.4±(0.4) <sup>a</sup>
	Kuru	34.2±(1.93) <sup>b</sup>	8.6±(0.74) <sup>a</sup>	20.5±(0.5) <sup>b</sup>

L, parlaklık; a, kırmızı renk değeri; b, sarı renk değeri; ΔE, renk sapması

<sup>a,b</sup>Sütunlara ait farklı harflendirmeler renk değerleri arasındaki farklılığı göstermektedir. (p<0.05)

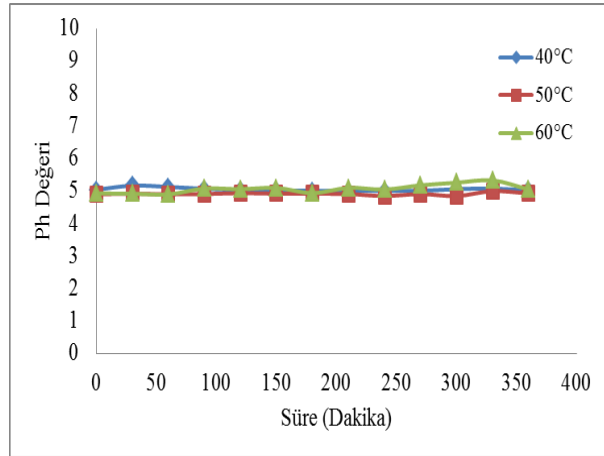
Aynı zamanda ürünün kırmızılık (a) tonunun arttığı sarılık (b) tonunun azaldığı söylenebilir. Muz kurutulmasında sıcaklık artışı ile literatürde de benzer sonuç elde edilmiştir (Thuwapanichayanan ve ark. 2011). a parametresi +3 değerini aştığında ürün sarılık ve yeşillik tonunu kaybetmeye başlar. Kurutmaya devam edilirse ürünün kırmızılık tonunda artış gözlenir. Bu duruma klorofil ve karotenoid pigmentleri arasındaki ayrışma neden olabilir (Avila ve Silva 1999, Kostaropoulos ve Saravacos 1995, Weemaes ve ark. 1999, Maskan 2000-2001). Literatürde yapılan diğer çalışmalarda ise barbunya kurutulmasında L nin azaldığı a ve b nin de sıcaklıkla arttığı gözlemlenmiştir (İzli ve Işık 2016). Hurma kurutulmasında ve domates kurutulmasında ise L, a ve b değerlerinin azaldığı görülmüştür (Tülek ve Demiray 2014, İzli ve Işık 2015).

Çizelge 4.2'de verilen renk değerlerine ait farklı ortalamaların belirlenmesinde Tukey çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Önem düzeyi p<0.05 alınarak analizler istatistiki program olan JMP 14'de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre farklı harfle işaretlenen değerler arasında önemli fark olduğu görülmektedir. Dolayısı ile taze ve kuru ürüne ait parlaklık ve sarı renk değişiminin kurutma işlemi için önemli olduğu söylenebilir.

Farklı sıcaklıklarda 40°C, 50°C ve 60°C kurutulmuş ürün için toplam renk sapmaları sırası ile  $24.9 \pm 1.56$ ;  $29.1 \pm 2.42$  ve  $31.27 \pm 2.58$  olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre kurutma havası sıcaklığı arttıkça renk sapması değerinin de arttığı görülmektedir. Bu artışa özellikle parlaklık ve kırmızılık parametrelerindeki değişimin neden olduğu söylenebilir (Pagliarini ve ark. 1990, Rhim ve ark. 1989). Sonuç olarak tünel tip tepsili kurutucuda hava sıcaklığının özellikle L, a ve b renk parametreleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

#### 4.1.6. pH ölçüm sonuçları

Ürünün kurutulması sırasında kalitesini test etmek için pH ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.8'de 40°C, 50°C ve 60°C hava sıcaklığı için kurutma süresi boyunca muz dilimlerinin pH değişimi görülmektedir. pH değerinin yaklaşık 5 değerinde sabit kaldığı görülmektedir. Bu sonuca göre sıcaklıkla pH değerinde belirgin bir değişimin olmadığı söylenebilir. Literatürden alınan verilere göre muzun pH değerinin 4.5-5.20 arasında olması gerektiği tespit edilmiştir (Bridges ve Mattice 1939, Anon 1962, Grahn 1984).



Şekil 4.8. Muz numunesine ait pH değerinin zamanla değişimi

#### 4.1.7. Renk kinetik modeli ve regresyon analizi

Deneylemlerden elde edilen renk skalasındaki bileşenler üzerinde sıcaklığın etkisini incelemek için 2 farklı kinematik model uygulanmıştır. Bunun için her bir sıcaklık değerine ait L, a, b değerleri için Sigma Plot programında istatistiksel regresyon analizleri yapılmıştır.

Çizelge 4.3’de 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıkta 2 farklı model için zamanla değişen renk parametrelerinin regresyon analizi sonuçları görülmektedir. 40°C için 0. kinetik modele ait L parametresinin  $R^2$ , SH ve  $x^2$  değerleri sırası ile 0.81, 0.0537 ve 0.0029 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde L parametresinin 1. kinetik modele ait sonuçları ise 0.81, 0.0535 ve 0.0029 olduğu görülmektedir. 50°C için 0. kinetik modele ait L parametresinin  $R^2$ , SH ve  $x^2$  değerleri sırası ile 0.85, 0.0598 ve 0.0036 1. kinetik modele ait sonuçları ise 0.85, 0.0585 ve 0.0034 olduğu görülmektedir. 60°C için 0. kinetik modele ait L parametresinin  $R^2$ , SH ve  $x^2$  değerleri sırası ile 0.85, 0.0699 ve 0.0049 1. kinetik modele ait sonuçları ise 0.86, 0.0677 ve 0.0046 olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.3.** 40°C, 50°C ve 60 °C sıcaklıktaki ürüne ait renk parametre değerlerinin regresyon analizi sonuçları

Sıcaklık	Renk parametresi	0. Kinetik Model			1. Kinetik Model		
		$R^2$	SH	$x^2$	$R^2$	SH	$x^2$
40°C	L	0.81	0.0537	0.0029	0.81	0.0535	0.0029
	a	0.11	0.0896	0.0080	0	0.0953	0.0091
	b	0.62	0.0590	0.0035	0.62	0.0588	0.0035
50°C	L	0.85	0.0598	0.0036	0.85	0.0585	0.0034
	a	0.31	0.0504	0.0025	0	0.0608	0.0037
	b	0.89	0.0373	0.0014	0.89	0.0370	0.0014
60°C	L	0.85	0.0699	0.0049	0.86	0.0677	0.0046
	a	0.34	0.0757	0.0057	0	0.0934	0.0087
	b	0.53	0.0594	0.0035	0.54	0.0590	0.0035

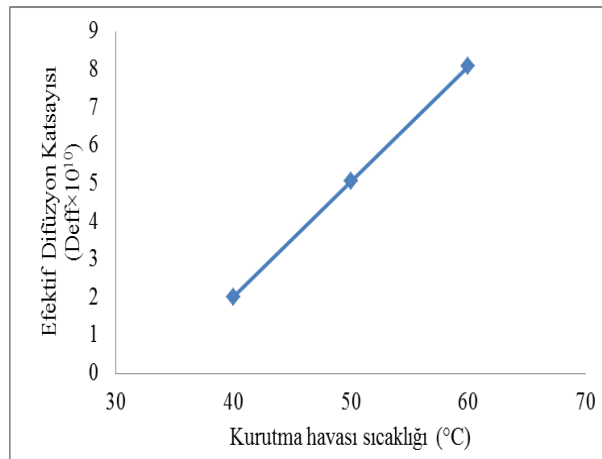
L, parlaklık; a, kırmızı renk değeri; b, sarı renk değeri;  $R^2$ , regresyon katsayısı; SH, standart hata;  $x^2$ , ki kare

Bu sonuçlardan her iki modelin de L için uygun olduğu söylenebilir. 3 sıcaklık değerinde renk parametrelerinden b değeri için 0. ve 1. kinetik modele ait regresyon sonuçlarının birbirine çok yakın olmasından dolayı her iki modelin de uygun olduğu ifade edilebilir. a parametre değerinin ise sadece 0. kinetik modele uygun olduğu tespit

edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Barreiro ve ark. 1997, Garza 1999, Ibarz ve ark. 1999, Maskan 2001).

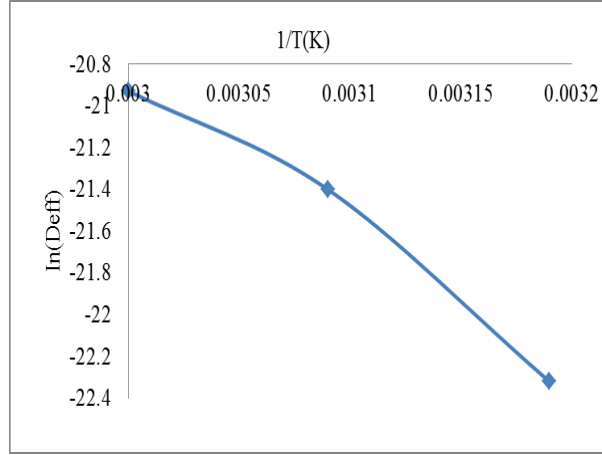
#### 4.1.8. Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi hesabı

Son olarak farklı sıcaklıklar için muzun efektif difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Eşitlik (3.7) kullanılarak 40°C, 50°C ve 60 °C hava sıcaklıklarına ait efektif difüzyon katsayısı sırası ile  $2.02 \times 10^{-10}$ ,  $5.05 \times 10^{-10}$  ve  $8.08 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. Literatürde yapılan muz kurutma çalışmalarının çoğunda efektif difüzyon katsayılarının  $10^{-9}$  ve  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s arasında değiştiği görülmektedir (Nguyen ve Price 2007, Demirel ve Turhan 2003, Queiroz ve Nebra 2001, Dandamrongrak ve ark. 2002; Omolola ve ark. 2015, Thuwapanichayanan ve ark. 2011; Joardder ve ark. 2014, Doymaz 2010, Nogueira ve Park 1992, Khawas ve ark. 2014, Ayim ve ark. 2012, John ve ark. 2014; Karim ve Hawlader 2005). Dandamrongrak ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada muzun efektif difüzyon katsayısının değerinin  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s mertebelerinde olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Yanısıra, literatürdeki kurutma işlemlerinin çoğunda, gıda ürünlerinin efektif difüzyon katsayıları  $10^{-8}$  - $10^{-12}$  arasında değişmektedir (Taheri-Garavand ve ark. 2011, Alakali ve Satimehin 2004; Ruiz-López, I.I. ve García-Alvarado 2007, Ramesh 2003, Zogzas ve ark. 1996, Mirzaee ve ark. 2009, Limpitboon 2011, Babalis ve Belessiotis 2004, McMinn ve Magee 1999).



**Şekil 4.9.** Efektif difüzyon katsayısının kurutma havası sıcaklığı ile değişimi

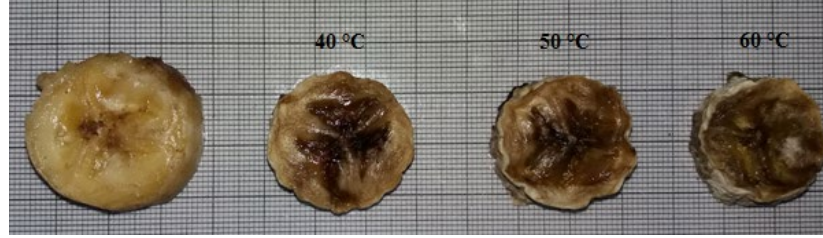
Efektif difüzyon katsayısının sıcaklık ile değişiminin (Şekil 4.9) lineer denklemi  $D_{eff} = 0.303T - 10.1$  ve  $R^2 = 1$  olarak bulunmuştur. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi kurutma havası sıcaklığı artırıldığında efektif difüzyon katsayısı da artmaktadır (Zielinska ve Markowski 2010, Kadam ve ark. 2011, Limpai boon 2011, Nguyen ve Price 2007, Karim ve Hawlader 2005, Omolola ve ark. 2015; Aghbashlo ve ark. 2008, John ve ark. 2014; Mirzaee ve ark. 2009).



**Şekil 4.10.** Efektif difüzyon katsayısının sıcaklık(1/T) ile değişimi

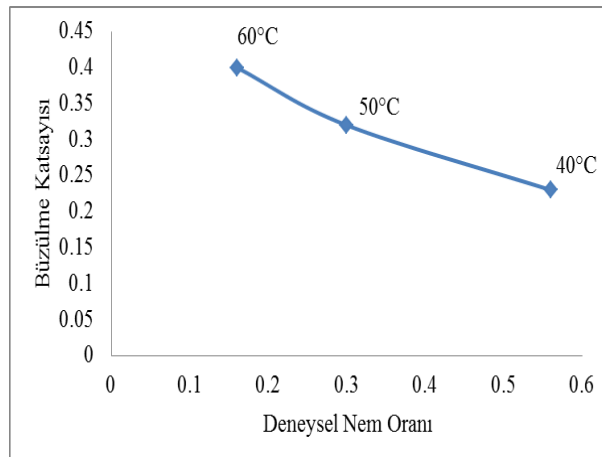
Aktivasyon enerjisini bulmak için eşitlik (3.8) kullanılmıştır. Şekil 4.10’da gösterilen  $\ln(D_{eff})-1/T$  grafiğinin eğimi kullanılarak aktivasyon enerjisi 61.1 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Literatürde muz için hesaplanan aktivasyon enerjilerinden bazıları şunlardır; 50.06 kJ/mol (John ve ark. 2014); 13.4 kJ/mol (Baini ve Langrish 2007);  $39.8 \pm 4.6$  kJ/mol ve  $34.7 \pm 0.073$  kJ/mol (Nguyen ve Price 2007); 27.22 kJ/mol (Khawas ve ark. 2014); 11.88 kJ/mol -33.10 kJ/mol -26.76 kJ/mol ve 44.50 kJ/mol (Ayim ve ark. 2012). Çoğu gıda ürünlerinin aktivasyon enerjileri 12.7 kJ/mol - 110 kJ/mol arasında değişmektedir (Zogzas ve ark. 1996). Diğer ürünlerin aktivasyon enerjileri ise literatürde şu şekilde verilmektedir; kuru erik 57 kJ/mol (Sabarez ve Price 1999); bamya 51.26 kJ/mol (Doymaz 2005); havuç 82.93 kJ/mol (Doymaz 2004); üzüm 40.14 kJ/mol (Roberts ve ark. 2008); şeftali 42.53 kJ/mol (Zhu ve Shen 2014) ; çilek 38.78 kJ/mol (Vega-Galvez ve ark. 2012); nane yaprağı 62.96 kJ/mol (Doymaz 2006); kayısı 29.35-33.78 kJ/mol (Mirzaee ve ark. 2009); incir 30.8 kJ/mol- 48.47 kJ/mol (Babalıs ve Belessiotis 2004); portakal 36.4 kJ/mol (Garau ve ark. 2006).

Ürünün kurutma davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için büzülme etkisinin de dikkate alınması gerekir. Üründe meydana gelen büzülme etkisinin incelenmesi için her bir sıcaklık (40°C, 50°C ve 60°C) değerinde kurutulan numuneler kullanılmıştır. Şekil 4.11’de farklı sıcaklıklar için 6 saatlik kurutma sonundaki muz dilimlerinin görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 4.11.** Taze ve kurutulan ürünlerin görüntüleri

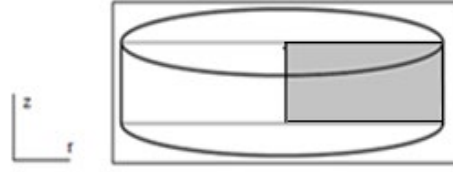
Üründe meydana gelen büzülme katsayısını hesaplamak için (3.19) nolu eşitlik kullanılmıştır. 40°C, 50°C ve 60 °C kurutma havası sıcaklığı için üründe meydana gelen büzülme katsayıları sırası ile yaklaşık %23, %32 ve %40 olarak bulunmuştur. Her 10°C sıcaklık artışında üründe yaklaşık %8.5 oranında hacimsel değişim meydana gelmiştir. Şekil 4.12’de 6 saatlik muz dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kurutulması sonunda ürünün nem oranı ile büzülme katsayısı değişimi arasındaki ilişki verilmiştir. Bu sonuçlara göre ürün büzülmesi üzerinde kurutma havası sıcaklığının etkili bir parametre olduğu söylenebilir (Liu ve ark. 2012).



**Şekil 4.12.** Farklı sıcaklıklarda kurutma sonundaki nem oranının büzülme katsayısı ile değişimi

#### 4.1.9. Nümerik çalışma ve doğrulama analizi

Yapılan zorlanmış taşınım ile kurutma çalışmasında eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemlerini tanımlamak için 2 boyutlu aksiyel simetrik (axisymmetric) model kullanılmıştır (Şekil 4.13). Silindirik ürünün kesitinin yarım dilimi modellenerek nümerik çözüm gerçekleştirilmiştir. Literatürde de bazı nümerik kurutma çalışmalarında bu model yaklaşımının kullanıldığı görülmüştür (Sabarez 2012, Kumar ve ark. 2015).



Şekil 4.13. 2 boyutlu aksiyel simetrik model

Kurutma sürecini analiz etmek için yapılan kabuller şu şekildedir:

- Başlangıçta ürün içerisinde nem içeriği ve sıcaklık değeri homojen (uniform) kabul edilmiştir.
- Ürün içerisindeki ısı transferi iletimle, sıvı kütle transferi ise difüzyon ile gerçekleşmektedir.
- Havadan ürüne taşınım ve iletimle ısı transferi, katıdan havaya difüzyon ve taşınım ile kütle transferi oluşmaktadır.
- Kuruma sırasında üründe oluşan büzülme etkisi (büzülme etkisine bağlı efektif difüzyon katsayısı) hesaba katılmıştır.
- Işınım etkisi ihmal edilmiştir.
- Kurutma süresince havanın termofiziksel özellikleri sabit kabul edilmiştir.

Öncelikle modelin en uygun ağ yapısının bulunması için 0.001 hassasiyetle ortalama nem içeriği değerleri kullanılarak ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. 1256 üçgen dizilimli ağ yapısının en uygun olduğu görülmüştür. 40°C, 50°C ve 60°C kurutma havası için lineer olmayan eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri başlangıç ve sınır şartları ile birlikte sonlu eleman metodu (Comsol Multiphysics 5.3) kullanılarak çözülmüştür. Denklemler 30 dakikalık zaman adımları için 0.001 tolerans değeri ile



çözölmüştür. Analizde kullanılan başlangıç giriş şartları ve ürünün termofiziksel özellikleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

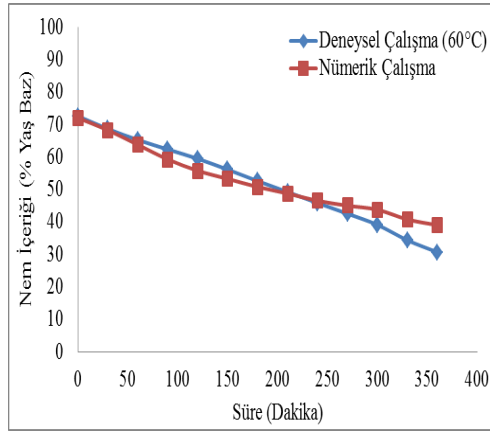
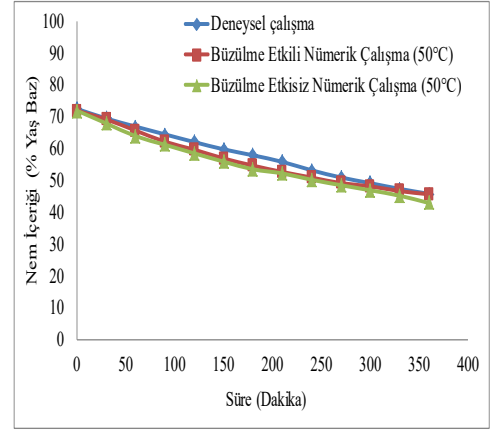
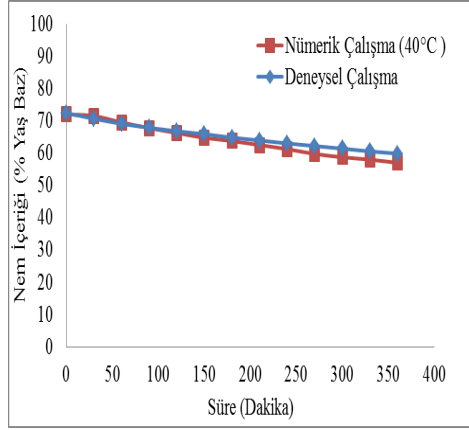
**Çizelge 4.4** Muzun termofiziksel özellikleri ve deney kurutma koşulları

Özellik	Birim	Referans
Hava hızı (m/s)	0.5	
Ürün başlangıç sıcaklığı (°C)	21	
Ürün yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	980	(Karim ve Hawlader 2005)
Hava sıcaklığı (°C)	40-50-60	
Ürün başlangıç nem içeriği (%)	72	
Kurutma havası nem içeriği (%)	16.1(40°C)-10.7(50°C)-8.2(60°C)	
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0.006M+0.120	(Bart-Plange ve ark. 2012)
Özgöl ısı (J/kgK)	0.811M <sup>2</sup> -24.75M+1742	(Bart-Plange ve ark. 2012)
Buharlaşma entalpisi (J/kg)	0.23×10 <sup>7</sup>	(Çengel 2002)
Suyun yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	998	(Çengel 2002)

M: nem içeriği (gr su/gr kuru madde)

Deneylelerden ve nümerik simölasyondan elde edilen nem içeriği ve sıcaklık değeri karşılaştırılarak modelin doğrulaması yapılmıştır. Şekil 4.14’de farklı kurutma havası sıcaklıkları için deneyden elde edilen nem içeriği değeri ile analizden elde edilen ortalama nem içeriği değeri karşılaştırılması verilmiştir. 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıkları için karşılaştırılması yapılan deney ve analizden elde edilen değeri arasında yaklaşık %2.2, %2.9 ve %6.8’lik bir fark olduğu görölmüştür.

Büzölme durumu hesaba katılmadan da sayısal analiz yapıldı. Büzölmeli ve büzölmesiz modellerin sonuçları Şekil 4.14’de sunulmuştur. Gıdanın nem içeriği için büzölme ve büzölme olmayan durumların sayısal sonuçları arasında yaklaşık %2 fark elde edilmiştir.



**Şekil 4.14.** Kuruma sırasında ürünün zamanla nem içeriğinin değişimi

Şekil 4.14’de görüldüğü gibi karşılaştırılan 2 yöntemin sonuçlarının grafik değişimleri için diğer kıyaslamalardan farklı olarak regresyon analizi yapılmıştır. Burada doğrusal eğriler için basit doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır. ( $y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$   $\beta_0$ ; regresyon kesim noktası,  $\beta_1$ ; regresyon eğimi ve  $\varepsilon$  hata değeridir).

Bazı durumlarda değişkenler arasındaki ilişki doğrusal olmayabilir. Bu durumlarda Polinom regresyon (polynomial regression) kullanılır. Polinom regresyon formülü şu şekildedir;  $\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2^2 + \dots + \beta_i X_i^{n_i} + \varepsilon$

Regresyon katsayısı bize modelde bulunan bağımlı değişkenlerin (y, sıcaklık, nem) % kaçının bağımsız değişkenler (x, süre) tarafından açıklanabildiğini gösterir.

**Çizelge 4.5.** 40°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	183.906	183.906	702.26	0.000	98.46	0.51	$y = 71.30 - 0.03351x$
Hata	11	2.881	0.262					
Toplam	12	186.786						

**Çizelge 4.6.** 40°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	307.970	307.970	1266.84	0.000	99.14	0.49	$y = 71.86 - 0.04336x$
Hata	11	2.674	0.243					
Toplam	12	310.644						

**Çizelge 4.7.** 50°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	896.140	896.140	2837.58	0.000	99.61	0.56	$y = 71.50 - 0.07397x$
Hata	11	3.474	0.316					
Toplam	12	899.614						

**Çizelge 4.8.** 50°C sıcaklıkta büzülme etkili nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	882.421	882.421	341.13	0.000	96.88	1.60	$y = 69.71 - 0.07340x$
Hata	11	28.454	2.587					
Toplam	12	910.875						

**Çizelge 4.9.** 50°C sıcaklıkta büzülme etkisiz nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	941.281	941.281	434.40	0.000	97.53	1.47	$y = 69.03 - 0.07581x$
Hata	11	23.836	2.167					
Toplam	12	965.117						

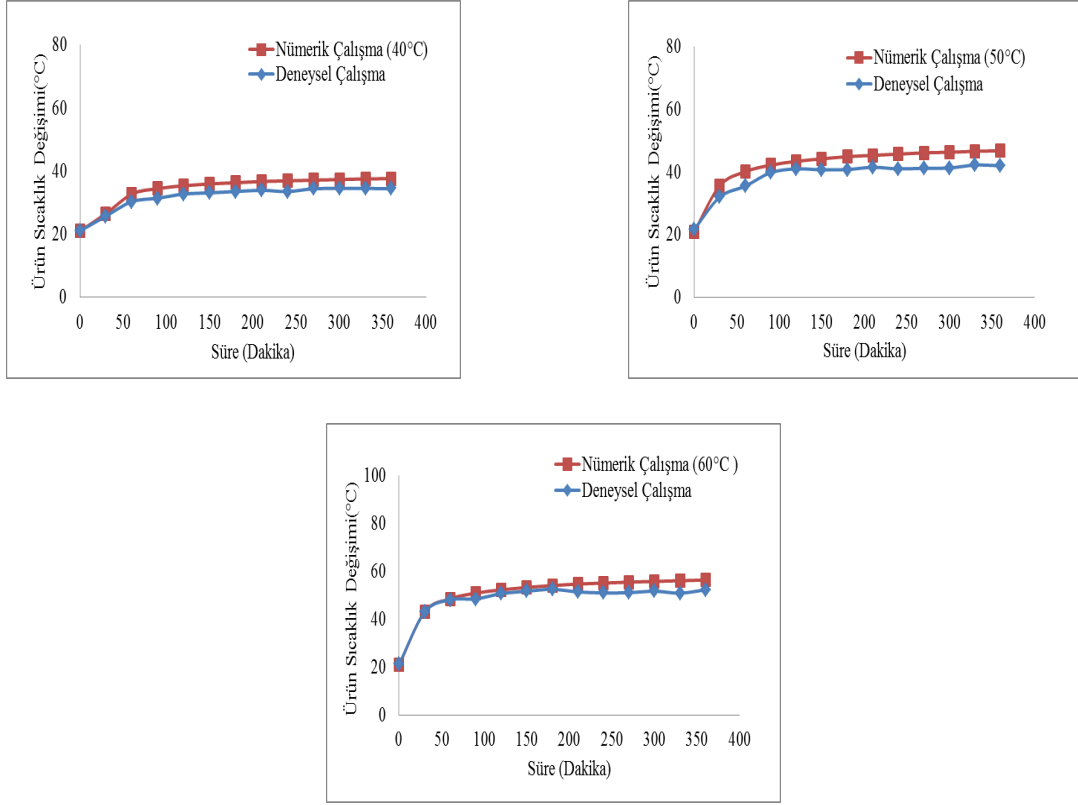
**Çizelge 4.10.** 60°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	2119.87	2119.87	5717.06	0.000	99.81	0.60	$y = 72.66 - 0.1138x$
Hata	11	4.08	0.37					
Toplam	12	2123.94						

**Çizelge 4.11.** 60°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	1272.54	1272.54	318.95	0.000	96.67	1.99	$y = 68.69 - 0.08814x$
Hata	11	43.89	3.99					
Toplam	12	1316.42						

Çizelge 4.5 ve 4.6’da 40°C sıcaklık için elde edilen nem içeriğinin regresyon analizi sonucuna göre nümerik çalışmaya ait R<sup>2</sup> değeri 1’e daha yakın olduğu için kuruma süresine bağlı olarak nem içeriğindeki değişim için daha iyi bir tahminleyici olduğu söylenebilir. Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9’da aynı şartlarda 50°C için yapılan regresyon analizi sonuçlarına göre ise deneysel çalışmanın daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Son olarak 60°C için yapılan regresyon analizi sonuçlarına göre de deneysel verilerin nem içeriği için daha iyi bir tahminleyiciye sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.10 ve 4.11).



**Şekil 4.15.** Kuruma sırasında ürünün zamanla sıcaklık değişimi

Ürün merkezinin sıcaklık değerleri kurutma sırasında deneysel olarak ölçülmüş ve nümerik olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.15’de her bir kurutma havası sıcaklığı için deneysel ve nümerik olarak elde edilen ürün merkezinin sıcaklık değişimleri görülmektedir. Deneysel ve nümerik simülasyondan elde edilen ürüne ait sıcaklık değerleri arasındaki ortalama fark 40°C, 50°C ve 60°C kurutma havası sıcaklıkları için sırası ile %7, %9 ve %5 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak nümerik çözümün sonucu olan nem içeriği ve sıcaklık değerleri ile deneyden elde edilen verilerin birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.12 ve 4.17 arasında 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklarında deneysel ve nümerik çalışmalar için ürün sıcaklığına ait eğrisel regresyon analizleri verilmiştir. 40°C için deneysel çalışmanın, 50°C ve 60°C için ise nümerik çalışmaya ait regresyon analizi sonuçlarının daha uygun olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.12.** 40°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	193.199	64.3996	151.25	0.000	98.06	0.65	$y = 21.49 + 0.1640x - 0.000699x^2 + 0.000001x^3$
Hata	9	3.832	0.4258					
Toplam	12	197.031						

**Çizelge 4.13.** 40°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	292.500	97.4999	145.46	0.000	97.98	0.81	$y = 21.47 + 0.2102x - 0.000920x^2 + 0.000001x^3$
Hata	9	6.032	0.6703					
Toplam	12	298.532						

**Çizelge 4.14.** 50°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	396.673	132.224	106.22	0.000	97.25	1.11	$y = 23.12 + 0.2758x - 0.001289x^2 + 0.000002x^3$
Hata	9	11.204	1.245					
Toplam	12	407.877						

**Çizelge 4.15.** 50°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	661.659	220.553	120.27	0.000	97.57	1.35	$y = 22.72 + 0.3180x - 0.001404x^2 + 0.000002x^3$
Hata	9	16.505	1.834					
Toplam	12	678.163						

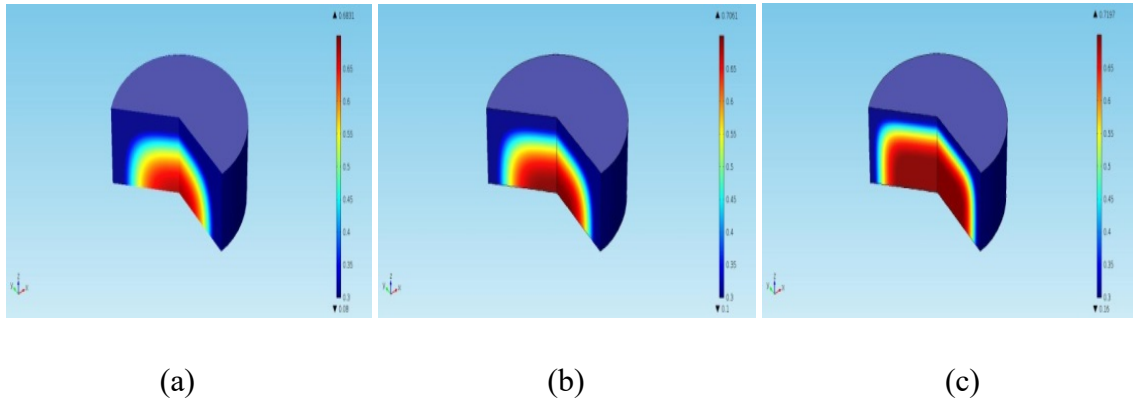
**Çizelge 4.16.** 60°C sıcaklıkta deneysel çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	765.366	255.122	27.09	0.000	90.03	3.06	$y = 26.10 + 0.4330x - 0.002145x^2 + 0.000003x^3$
Hata	9	84.771	9.419					
Toplam	12	850.137						

**Çizelge 4.17.** 60°C sıcaklıkta nümerik çalışmaya ait sıcaklığın süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	1026.71	342.238	34.04	0.000	91.90	3.17	$y = 265.90 + 0.4431x - 0.002087x^2 + 0.000003x^3$
Hata	9	90.50	10.055					
Toplam	12	1117.21						

Şekil 4.16’da farklı kurutma havası sıcaklıkları için kurutma süresi sonundaki ürün içerisindeki nem dağılımları verilmiştir. Ürün içerisindeki nem dağılımı değişken olduğu için deneysel olarak elde etmek zor olmaktadır. Ancak simülasyon ile ürün içerisindeki nem dağılımı tahmin edilebilmektedir. Ürün yüzeyinden olan buharlaşma miktarı merkezine göre daha fazla olmaktadır. Eğer tam olarak kuruma sağlanamazsa ürün içerisinde kalan bu sıvı üründe mikroorganizmaların oluşmasına neden olmaktadır (Curcio ve ark. 2008, Kumar ve ark. 2015). Bu yüzden kurutulacak ürünün içerisindeki nem miktarı dağılımının doğru tespit edilerek simülasyon ile kuruma süresinin tespit edilmesi önem arz etmektedir. Ürün yüzeyinin ve merkezinin kuruma süresi sonundaki nem miktarı değerleri 40°C, 50°C ve 60 °C için sırası ile %16-%67, %10-%59 ve %8-%53 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.16.** Kurutma sonundaki ürüne ait nem (a-40°C; b-50°C; c-60°C) dağılımları

## **4.2. Elma Kurutulmasında Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transferinin 3 Boyutlu Simülasyonu**

Bu çalışmada 3 boyutlu dikdörtgen kesitli elmanın kuruma davranışı nümerik olarak incelenmiştir. Elmanın kurutulması işleminin incelenmesi için eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri Comsol programında nümerik olarak zamana bağlı çözülmüştür. Kurutma işleminde malzemenin merkezinin kesitinin (y ve z eksen) sıcaklık ve nem değişimi 3 farklı zaman (1800-3600-7200sn) için incelenmiştir. Merkezin nem değişiminin zamanla azaldığı ve sıcaklığının hissedilir derecede arttığı görülmüştür. Diğer yapılan çalışmada ise malzemenin kalınlığı (z eksen) boyunca 1000-2000 ve 4000 saniye sonraki merkezinin sıcaklık ve nem değişimleri karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre sıcaklık değerinin yüzeye doğru arttığı ve nem değerinin ise azaldığı görülmüştür. Kuruma süresince nem içeriğinin ve sıcaklığın nasıl değiştiği araştırılıp farklı kurutma modelleri ile elmanın kuruma davranışı araştırılmıştır. Aynı zamanda kuruma üzerine etki eden hava hızı, sıcaklığı ve nem içeriğinin etkisi incelenmiştir. Her bir parametre verileri kullanılarak farklı kurutma modelleri için regresyon analizi yapılarak istatistik parametreler elde edilmiştir. Her bir parametre için kuruma davranışını en iyi Midilli Modelinin tanımladığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada gıda ürününün kurutulmasında enerji israfı yapılmaması ve optimum koşulların bulunmasında sıcaklık ve nem dağılımlarının detaylı olarak incelenmesinin faydalı olabileceği görülmüştür. Oluşturulan kurutma modelinin doğrulanması için literatürde bulunan iki farklı çalışmaya ait nümerik ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırma yapılmış ve sonuçların birbirine oldukça yakın olarak değiştiği görülmüştür.

### **4.2.1. Nümerik modelleme**

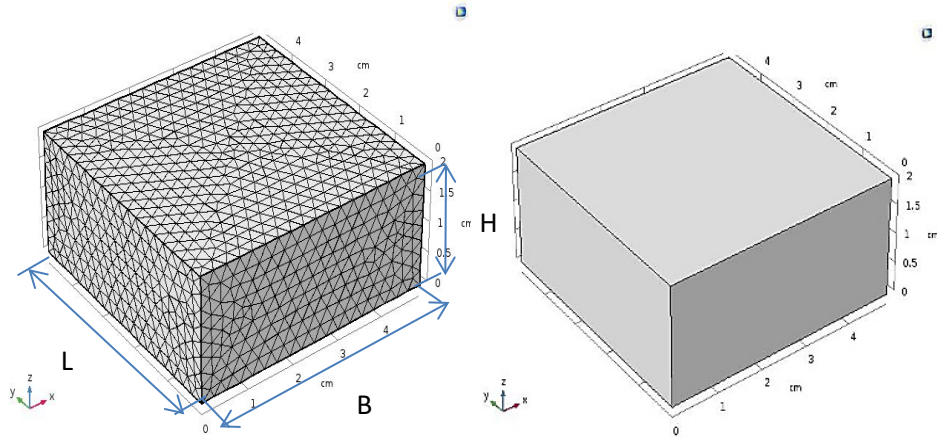
Elmanın zorlanmış taşınım ile kurutulmasında eş zamanlı ısı ve kütle transferinin tanımlanması için 3 boyutlu model geliştirildi. Kurutma süreci için matematiksel modelde ısı transferi için Fourier yasası ve kütle difüzyonu için Fick yasası kullanıldı (Çengel 2002, Incropera ve Dewitt 2001). Isı havadan malzemeye taşınım ile aktarılırken, malzeme içerisindeki sıvı yüzeye difüzyon ile aktarılıp hava içine buharlaşmaktadır. Fiziksel problem, başlangıçta sabit sıcaklık ve sabit nem içeriği



içermektedir. Malzemenin boyutları kartezyen koordinatlarda 3 boyutlu (4.9 cm×4.8 cm×2 cm) oluşturuldu (Hussain ve Dincer 2003). Isı ve kütle transferinin alt yüzey hariç sıcak havanın çevrelediği diğer yüzeylerinden meydana gelmektedir. Şekil 4.17’de fiziksel modelin geometrisi ve eleman sayısına bölünmüş hali görülmektedir.

Bu kurutma modelinin geliştirilmesi için aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

- Kurutma süreci boyunca havanın hızı, sıcaklığı ve bağıl nemi sabittir.
- Ürün içerisinde deformasyon meydana gelmemektedir.
- Ürün 3 boyutlu düşünülmüştür.
- Ürün içerisinde ısı üretimi yoktur.
- Ürünün termofiziksel özellikleri (özgül ısı, iletim katsayısı vs.) sabittir.
- Zorlanmış taşınım ile kurutma işleminde ısı transferi öncelikle havadan yüzeye ısı taşınımı ile gerçekleştiği daha sonra yüzeyden ürün merkezine iletimle (Fourier Yasası) aktarıldığı düşünülmüştür.
- Kütle transferinin ürün içerisinden yüzeye nem difüzyonu (Fick Yasası) ile gerçekleştiği ve yüzeyden dış havaya buharlaştığı kabul edildi.



Şekil 4.17. Modelin 3D kesiti

Uzunluğu  $L$ , yüksekliği  $H$  ve genişliği  $B$  olan nemli malzemenin sıcak hava ile temas eden 5 yüzeyinin (tabanından ısı ve kütle transferi olmadığı kabulü ile ) sınır koşulları  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönleri için Çizelge 4.18’de verilmiştir:

Ağdan bağımsızlık çalışması nem içeriği için yapılmış olup maksimum fark %1 alınmıştır. Ağ yapısı 12465 tetrahedral, 1468 üçgen ve 124 kenar elemanından oluşmaktadır. Lineer olmayan ısı ve kütle transferi denklemleri Newton metodu kullanılarak 0.001 tolerans değeri ile çözülmüştür.

**Çizelge 4.18.** Isı ve kütle transfer sınır şartları

	<i>Isı Dengesi</i>	<i>Kütle Dengesi</i>
$x = 0; 0 \leq y \leq B \text{ ve } 0 \leq z \leq H$	$-k \frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x} = h_T(T - T_\infty)$	$-D_{AB} \frac{\partial M(0, y, z, t)}{\partial x} = h_M(M - M_\infty)$
$x = L; 0 \leq y \leq B \text{ ve } 0 \leq z \leq H$	$-k \frac{\partial T(L, y, z, t)}{\partial x} = h_T(T - T_\infty)$	$-D_{AB} \frac{\partial M(L, y, z, t)}{\partial x} = h_M(M - M_\infty)$
$y = 0; 0 \leq x \leq L \text{ ve } 0 \leq z \leq H$	$-k \frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial y} = h_T(T - T_\infty)$	$-D_{AB} \frac{\partial M(x, 0, z, t)}{\partial y} = h_M(M - M_\infty)$
$y = B; 0 \leq x \leq L \text{ ve } 0 \leq z \leq H$	$-k \frac{\partial T(x, B, z, t)}{\partial y} = h_T(T - T_\infty)$	$-D_{AB} \frac{\partial M(x, B, z, t)}{\partial y} = h_M(M - M_\infty)$
$z = H; 0 \leq x \leq L \text{ ve } 0 \leq y \leq B$	$-k \frac{\partial T(x, y, H, t)}{\partial z} = h_T(T - T_\infty)$	$-D_{AB} \frac{\partial M(x, y, H, t)}{\partial z} = h_M(M - M_\infty)$

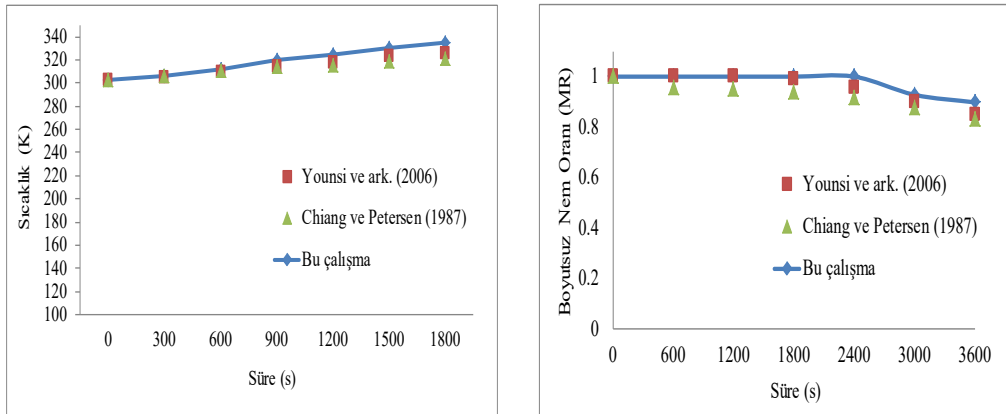
#### 4.2.2. Model doğrulaması

Younsi ve ark. (2006) elma parçasının kurutulması sırasında Luikov denklemlerini kullanarak nümerik çözüm ile sonuca ulaşmışlardır. Çalışmalarında 3 boyutlu modelledikleri dikdörtgen kesitli ürünün merkezinin sıcaklığının ve nem oranının değişimini zamana göre incelemişlerdir. Nümerik çözüm için Femlab yazılımını kullanmışlardır. Aynı modeli ise daha önce Chiang ve Petersen (1987) deneysel olarak incelemiştir.

**Çizelge 4.19.**30°C sıcaklığındaki elma malzemesinin termofiziksel özellikleri (Hussain ve Dincer 2003)

Parametre (Birimi)	Değeri
Malzemenin yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	856
Havanın sıcaklığı(°C)	81
Malzemenin nem içeriği(%)	87
Havanın nem içeriği(%)	12
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0.577
Molar buharlaşma ısısı (J/kg)	0.25×10 <sup>7</sup>
Özgül ısı (J/kgK)	4201.4
Nem kapasitesi(kg/kg)	0.01
Nem iletkenliği(kg/ms)	2.2×10 <sup>-8</sup>
Isı taşınım katsayısı(W/m <sup>2</sup> K)	25
Kütle transfer katsayısı(kg/m <sup>2</sup> s)	0.0001
Su molekül ağırlığı(gr/mol)	18

Yapılan çalışmada Chiang ve Petersen 'nin deneysel olarak yapmış oldukları çalışmanın sonuçları ile Younsi ve ark. nümerik olarak 3 boyutlu yapmış oldukları çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır. Malzemenin deneysel koşulları ve termofiziksel özellikleri çalışmalardan alınmıştır (Çizelge 4.19). Comsol programında 3 boyutlu dikdörtgen kesitli model için difüzyon teorisi ve sınır şartları kullanılarak merkezinin nem ve sıcaklık dağılım grafiği Şekil 4.18'de görüldüğü gibi elde edilmiş ve diğer çalışmalar ile kuruma davranışı karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirine yakın olarak değiştiği ve programın güvenilir olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.18.** Bu çalışmaya ait sıcaklık ve nem değişiminin karşılaştırılması

**Çizelge 4.20.** Bu çalışmaya ait boyutsuz nem oranının süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	0.0105020	0.0035007	13.34	0.031	93.03	0.01	$y = 0.9980 + 0.000006x$
Hata	3	0.0007872	0.0002624					
Toplam	6	0.0112891						

**Çizelge 4.21.** Younsi ve ark. (2006) ait boyutsuz nem oranının süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	0.0211643	0.0070548	118.52	0.001	99.16	0.007	$y = 0.9976 + 0.00002x$
Hata	3	0.0001786	0.0000595					
Toplam	6	0.0213429						

**Çizelge 4.22.** Chiang ve Petersen (1987) ait boyutsuz nem oranının süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	0.0186762	0.0062254	196.10	0.001	99.49	0.005	$y = 0.9976 + 0.000071x$
Hata	3	0.0000952	0.0000317					
Toplam	6	0.0187714						

Nem oranı için yapılan regresyon analizi sonuçlarına göre en yüksek regresyon katsayısına sahip olan çalışmanın (Chiang ve Petersen 1987) en iyi tahminleyici model olduğu söylenebilir (Çizelge 4.20-4.21-4.22).

**Çizelge 4.23.** Bu çalışmaya ait ürün sıcaklığının süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	902.893	902.893	566.84	0.000	99.13	1.26	$y = 301.8 + 0.009464x$
Hata	5	7.964	1.593					
Toplam	6	910.857						

**Çizelge 4.24.** Younsi ve ark. (2006) ait ürün sıcaklığının süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	472.321	472.321	462.41	0.000	98.93	1.01	$y = 302 + 0.006845x$
Hata	5	5.107	1.021					
Toplam	6	477.429						

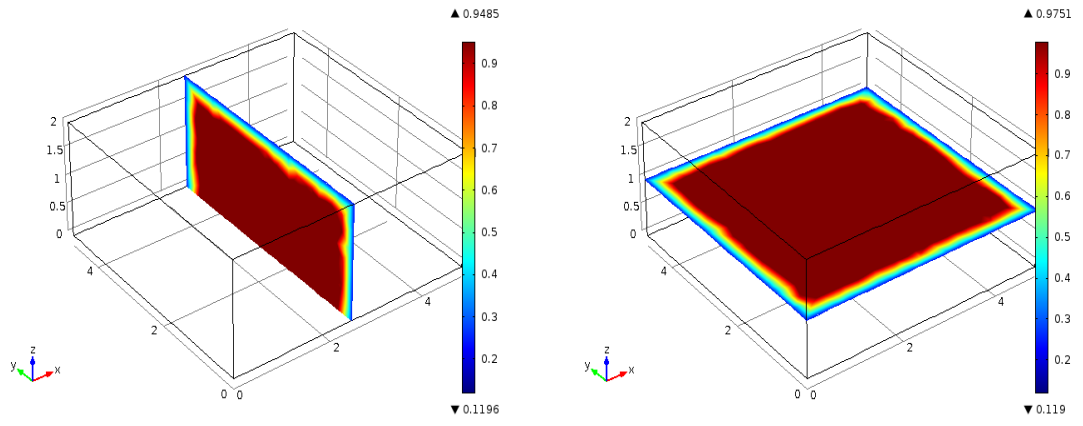
**Çizelge 4.25.** Chiang ve Petersen (1987) ait ürün sıcaklığının süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	258.036	258.036	267.59	0.000	98.17	0.98	$y = 303.8 + 0.005060x$
Hata	5	4.821	0.964					
Toplam	6	262.857						

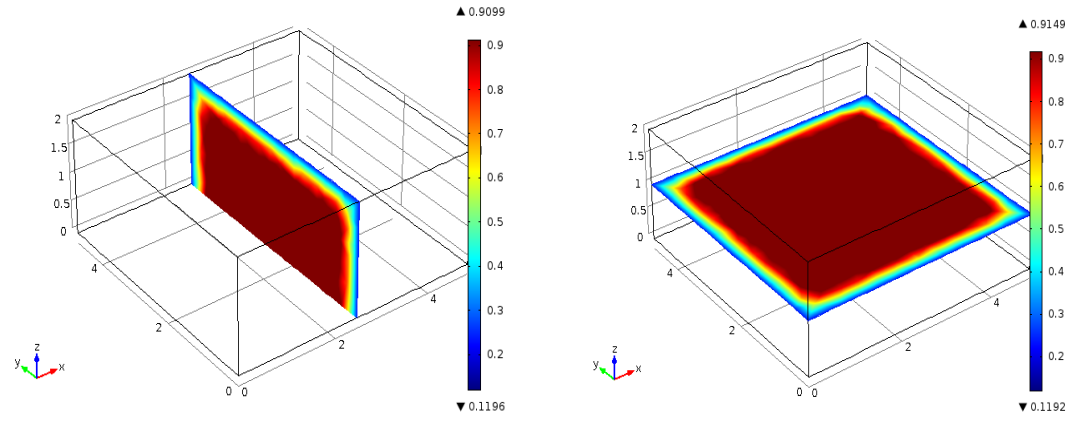
Sıcaklık için elde edilen regresyon analizi sonuçlarına göre bu çalışmanın ( $R^2=99,13$ ) daha uygun tahminleyici modele sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.23-4.24-4.25).

### 4.2.3. Analiz bulguları

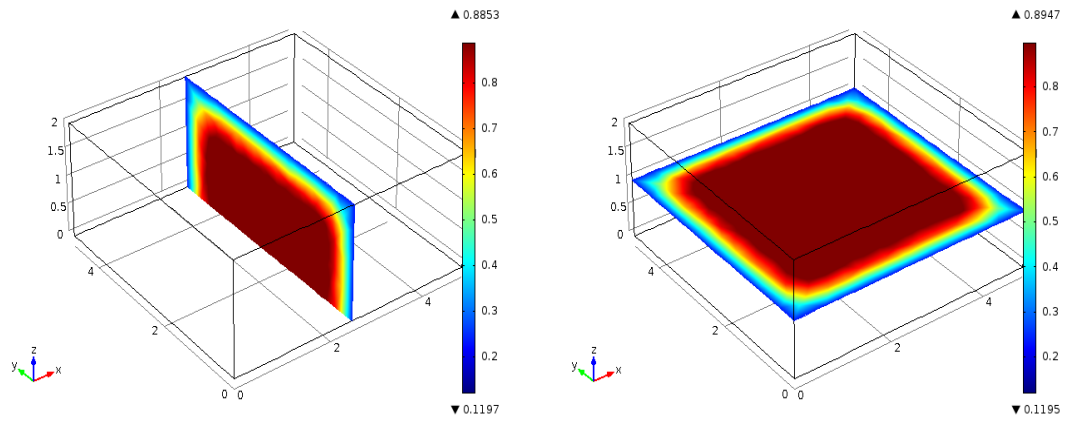
Malzeme içerisindeki sıcaklık ve nem dağılımının bulunması işleminde malzemenin termofiziksel özellikleri Çizelge 4.6'dan alınmıştır. Kurutma işleminde malzemenin kesitinin (y ve z eksenini) 1800, 3600 ve 7200 saniye sonraki sıcaklık ve nem dağılımları karşılaştırılmıştır. Daha sonra z eksenini (cm) boyunca zamana bağlı olarak nem ve sıcaklık değişimleri (1000, 2000 ve 4000 saniye sonraki) incelenmiştir. Son olarak malzemenin ortam nemine kadar kurutulmasının sıcaklık ve nem dağılım grafiği elde edilmiştir. Sonuçlar sonlu eleman yazılımı olan Comsol paket programında elde edilmiştir. Gıda ürünlerinin içindeki sıcaklık ve nem dağılımı, kalite ve depolama koşullarının belirlenmesi nedeniyle üreticiler için önemli bilgilerdir. Malzemenin içindeki y eksenini ve z ekseninin nem değişimi ve malzemenin içindeki y eksenini ve merkez eksenindeki sıcaklık değişimi sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



(a)

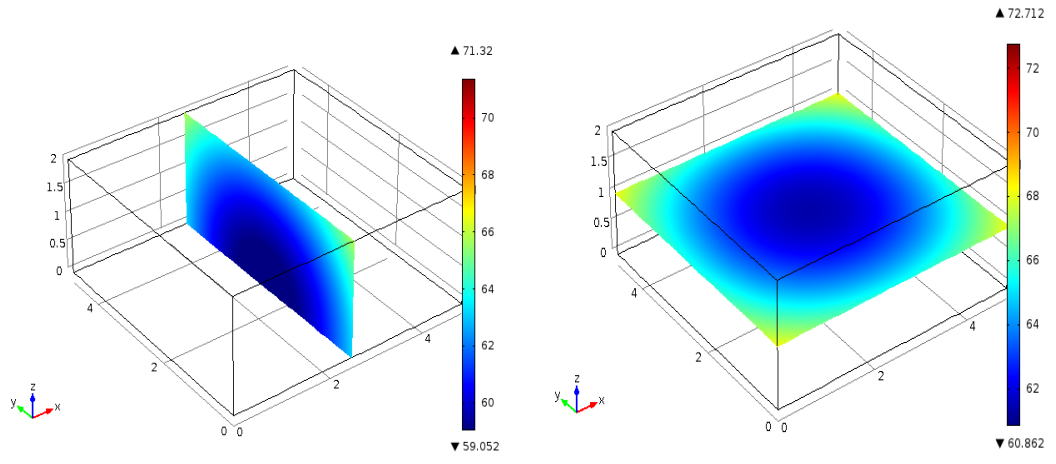


(b)

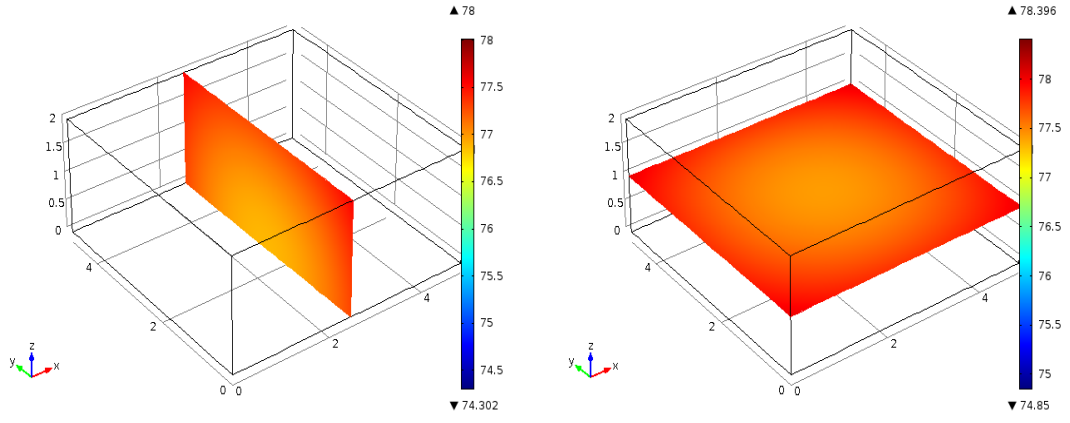


(c)

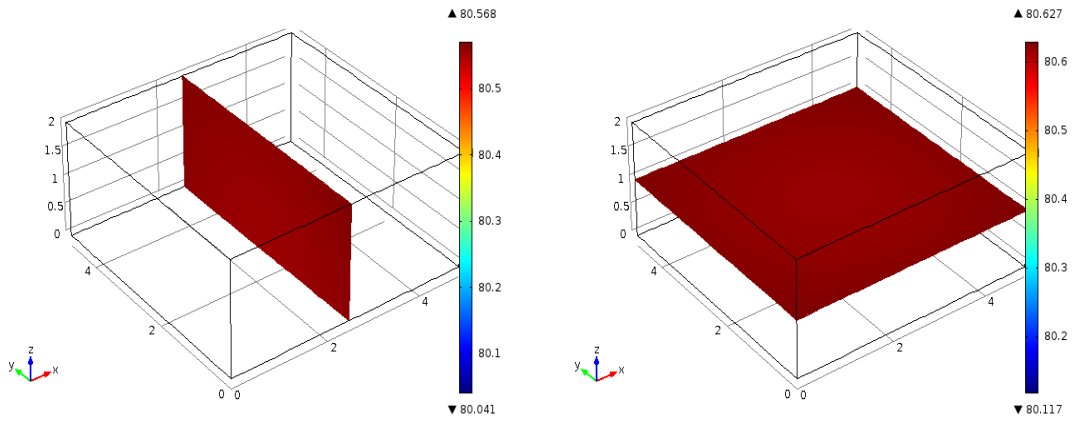
Şekil 4.19. Ürün içerisindeki nem dağılımı (a-1800 s, b-3600 s, c-7200 s)



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.20. Ürün içerisindeki sıcaklık dağılımı (a-1800 s, b-3600 s, c-7200 s)

Şekil 4.19’da malzeme içerisindeki y ve z ekseninin kesitinin merkez nem değişimi elde edilmiştir. Merkezinin 1800 saniye sonraki nem değeri %88, 3600 saniye sonraki değeri %87 ve 7200 saniye sonraki değeri ise %86 olarak elde edilmiştir. Merkez nem içeriğinin fazla değişmemesine rağmen kesit boyunca nem dağılımının zamanla merkeze doğru azaldığı renk skalasından açıkça görülmektedir.

Şekil 4.20’de malzeme içerisindeki y ve z ekseninin kesitinin merkez sıcaklık değişimi elde edilmiştir. Merkezinin 1800 saniye sonraki nem değeri 62°C, 3600 saniye sonraki değeri 75°C ve 7200 saniye sonraki değeri ise 80°C olarak elde edilmiştir. Kesit boyunca sıcaklık dağılımının zamanla merkeze doğru arttığı görülmektedir.

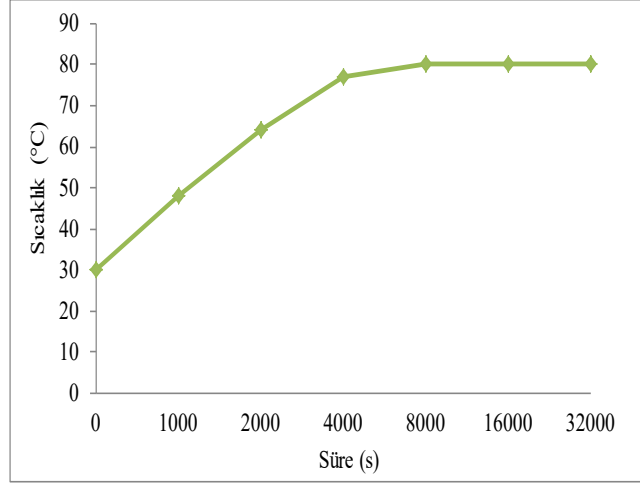
Nem içeriğinin merkeze yakın bölgede çok fazla değişmediği görülmüştür. Bunun nedeni olarak malzeme içerisindeki nemin buharlaşarak az miktarda suyun kalması sonucu difüzyonun zorlaşması olduğu söylenebilir (Darıcı ve Sen 2012).

Kurutma işlemleri gıdaların mikroyapısal düzeyde değişmesine neden olur, dolayısıyla makroskopik özelliklerini etkiler. Kurutma sırasında meydana gelen su kaybı ve bileşenlerin ayrılması hücre duvarlarının sertliği ile sonuçlanır. Hücresel duvarların hasar görmesi ve bozulması meydana gelebilir ve hatta hücresel dokunun çökmesi oluşabilir. Bu değişiklikler, ürünün hacim azaltması ve renk değişimi ile ilişkilendirilir. Bu nedenle, sıcaklık ve nem değerleri pratik amaçlar için bilinmelidir. Çizelge 4.26, ürün yüzeyinden farklı derinlikler için 1000, 2000 ve 4000 saniye sıcaklık ve nem oranlarını göstermektedir.

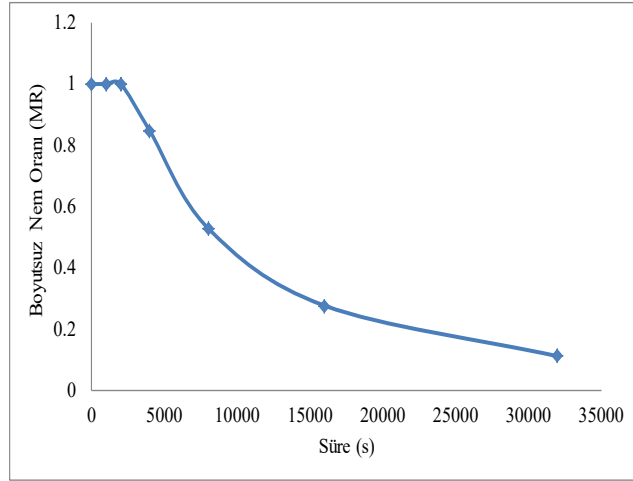
**Çizelge 4.26.** Ürünün z ekseninde sıcaklık değişimi ve nem oranı

z-ksen mesafesi (cm)	Kuruma süresi (saniye)					
	1000	2000	4000	1000	2000	4000
	Sıcaklık (°C)			Nem oranı (MR)		
0	46	63	76	1	1	1
0.5	46.8	63.55	76.65	1	1	1
1	49	64.55	76.92	1	1	0.78
1.5	52.2	66.5	77.35	1	0.56	0.33
2	57	69	78	0.03	0.02	0.02





**Şekil 4.21** Malzemenin merkezinin zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği



**Şekil 4.22.** Malzemenin merkezinin zamana bağlı nem içeriği değişim grafiği

Şekil 4.21 ve 4.22 de elma kurutulmasında malzemenin merkezinin sıcaklık ve nem içeriğinin değişimi zamana bağlı olarak verilmiştir. Malzemenin merkez sıcaklığı yaklaşık 8000 saniye sonra 80°C ye ulaşmıştır. Nem içeriğinin değişim eğrisi 3 farklı kurutma periyodu olarak karakterize edilmiştir. Birinci azalan periyot diğerlerinden daha kısa sürdüğü görülmüştür. Elma kurutulmaya başlandıktan kısa bir zaman sonra ‘SHP’ denilen sabit hız periyoduna girer. Burası birinci azalan periyot olarak isimlendirilen bölgedir. Bu denge durumundaki katının yüzeyi bir nem tabakası ile tamamen kaplıdır ve yüzey sıcaklığı havanın yaş termometre sıcaklığına eşittir. Ancak malzemedeki nem miktarı azalmaya başlayınca kılcal boşluklardaki sürtünme direncinin

artmasından dolayı iç bölgeden yüzeye sıvı transferi zorlaşmakta ve yüzey sürekli nemli kalmamaktadır. Katı ürün kurutulmaya devam edildikçe kuruma hızı sabit kalmaz ve ikinci azalan periyotta su filmi kaybolmaya başlar. Bir süre sonra yüzeydeki su filmi tamamen kaybolur. Bu noktadan sonra kütle transferinde sürekli bir azalma gözlenmektedir. Bu nokta üçüncü azalan periyottur. Kurutmaya devam edildikçe suyun madde içinden yüzeye olan hareket hızına bağlı olarak kuruma hızı azalmaya devam eder ve ürünün nemi kurutma havasının bağıl nemi ile dengede olduğu nem miktarına gelince kuruma işlemi durur.

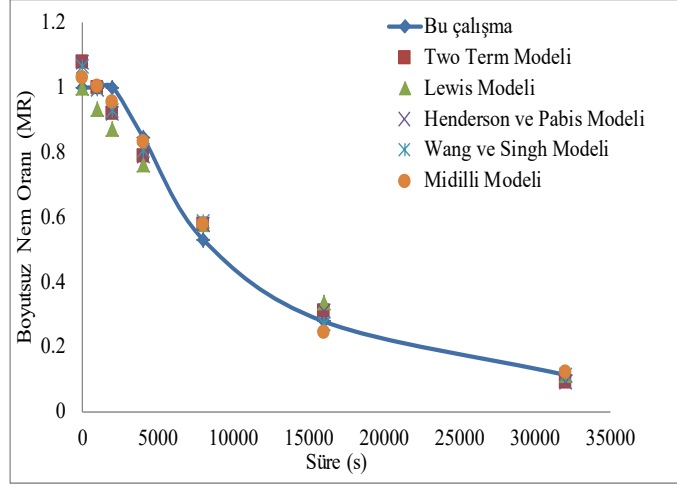
Öngörülen verilerin bir fonksiyonu olarak elde edilen kurutma eğrilerini doğrulamak için literatürde yaygın olarak kullanılan ince tabaka kurutma modelleri bulunmaktadır. Bu modellerden regresyon katsayısı ( $R^2$ ), ki-kare ( $x^2$ ) ve standart hata (SH) gibi istatistiksel sonuçlar Çizelge 4.27’de verilmiştir.

**Çizelge 4.27.** Kurutma modellerinin istatistiki sonuçları

Model/Katsayı	a	b	k	$k_0$	$k_1$	n	$R^2$	SH	$x^2$
Lewis			$6.81 \times 10^{-5}$				0.95	0.0751	0.0056
Henderson ve Pabis	1.07		$7.76 \times 10^{-5}$				0.97	0.0622	0.0039
Two Term	$3.9 \times 10^{-3}$	1.07		$1.03 \times 10^{-12}$	$7.82 \times 10^{-5}$		0.97	0.0803	0.0064
Wang ve Singh	$-6.97 \times 10^{-5}$	$1.24 \times 10^{-9}$					0.98	0.0593	0.0035
Midilli ve ark.	1.03	$3.49 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^{-6}$			1.43	0.99	0.0480	0.0023

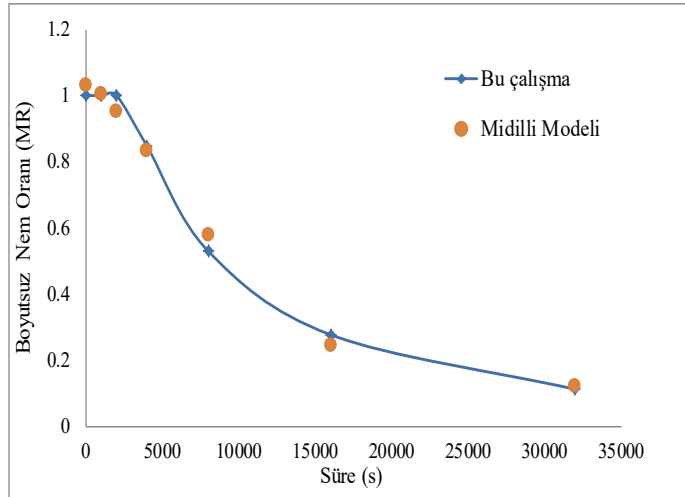
İstatistiksel analizde Midilli modelinin en yüksek  $R^2$  ve en düşük  $x^2$  ve SH değerlerini sağladığı görülmüştür. Dolayısıyla, Midilli modelinin, diğer ele alınan modellerden daha iyi tahminlerde bulunduğu söylenebilir.

Şekil 4.23’de kurutma modellerine ait boyutsuz nem içeriği değerlerinin yapılan çalışmanın sonuçları ile zamana bağlı olarak karşılaştırılması görülmektedir.



**Şekil 4.23.** Farklı kurutma modellerinin boyutsuz nem oranlarının kuruma süresince değişimi

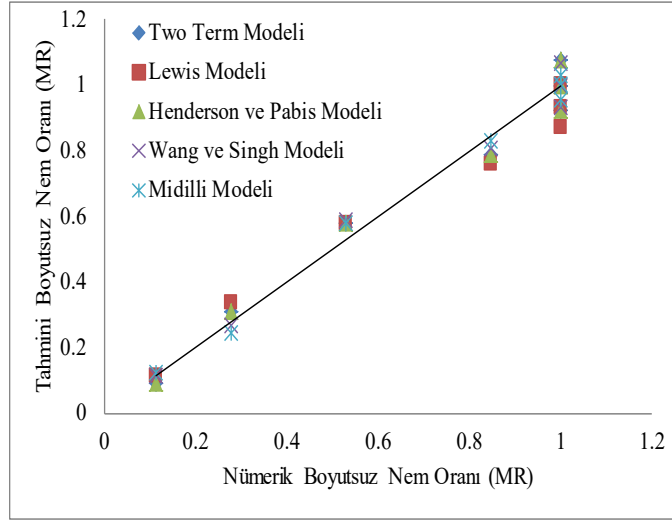
Daha önce regresyon sonuçlarına göre Midilli modelinin en uygun olduğu görülmüştü. Ayrıca bu modele ait boyutsuz nem içeriği ile yapılan çalışmaya ait sonuçların karşılaştırılması grafiksel olarak da gösterilmiştir. Bu grafikten (Şekil 4.24) de görüleceği gibi eğrilerin değişimi birbirine çok yakın olarak çıkmıştır.



**Şekil 4.24.** Midilli Modeli ve bu çalışmaya ait boyutsuz nem oranı değerlerinin zamana göre değişimi

Şekil 4.25'de kurutma modellerine ait boyutsuz nem içeriği değerlerinin yapılan çalışmaya ait sonuçlar ile karşılaştırılması görülmektedir. Bu grafikte de Midilli modeline ait sonuçların doğrusal eğriye en yakın olarak değiştiği görülmektedir. Gıda

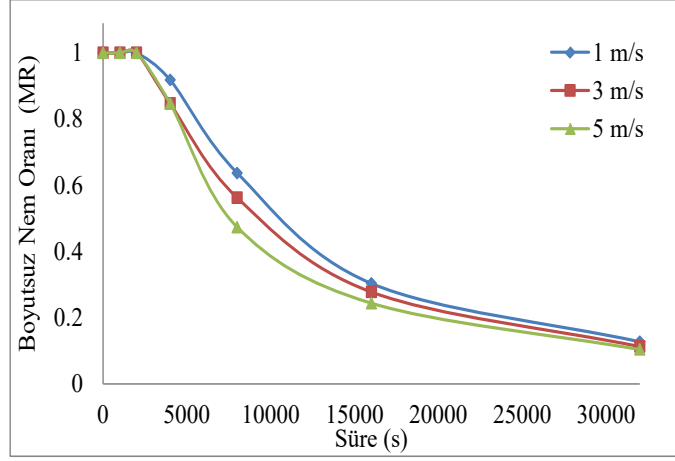
ürünlerinin kurutulmasında Midilli Modelinin, literatürde yapılan araştırmalar sonucunda öne çıktığı görülmüştür (Vega-Galvez ve ark. 2012, Arslan ve Özcan 2010, Darvishi ve ark. 2014).



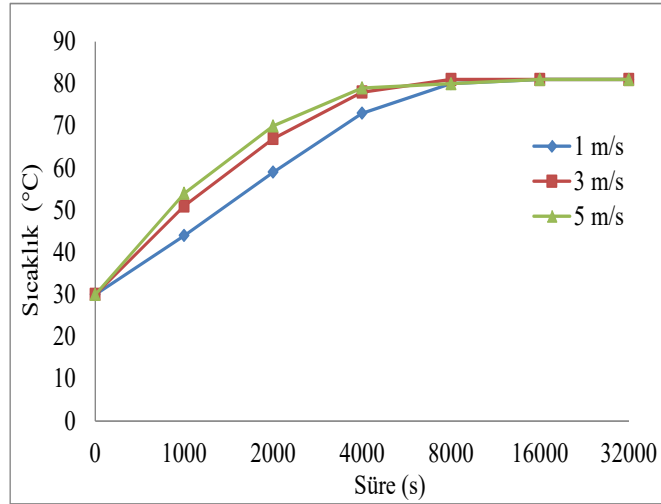
**Şekil 4.25.** Kurutma modelleri ve bu çalışmaya ait boyutsuz nem oranı değerlerinin birbirine göre değişimi

#### 4.2.4. Parametrik çalışma

Hesaplamalarda değişken parametrelerden hava hızı (1m/s, 3m/s ve 5m/s) , kurutma havası sıcaklığı (40°C, 80°C ve 120°C) ve ürün bağıl nemi (%40, %60 ve %80) alınmıştır. Bu uygulamada kurutma koşulları sabit kabul edilerek incelemeler nümerik olarak yapılmıştır. Farklı kurutma havası hızları için yapılan analizlerde kurutma havası sıcaklığı 80°C alınmıştır. Şekil 4.26 farklı kurutma havası hızlarında boyutsuz nem oranı değişimi ile kuruma süresi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 4.27’de ise farklı kurutma havası hızlarında ürün merkez sıcaklığının zamanla değişimi görülmektedir. Hava hızının artmasıyla ürünün merkezinin sıcaklığının zamanla arttığı nem içeriği miktarının ise azaldığı görülmüştür.

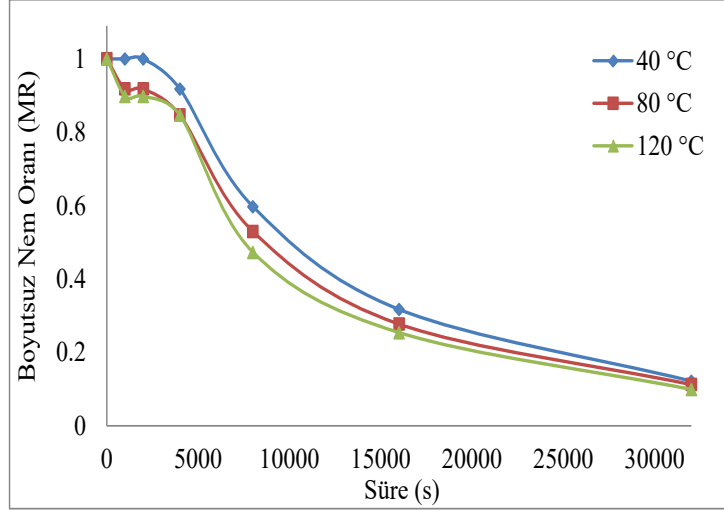


**Şekil 4.26.** Farklı kurutma havası hızlarında boyutsuz nem oranının zamanla değişimi

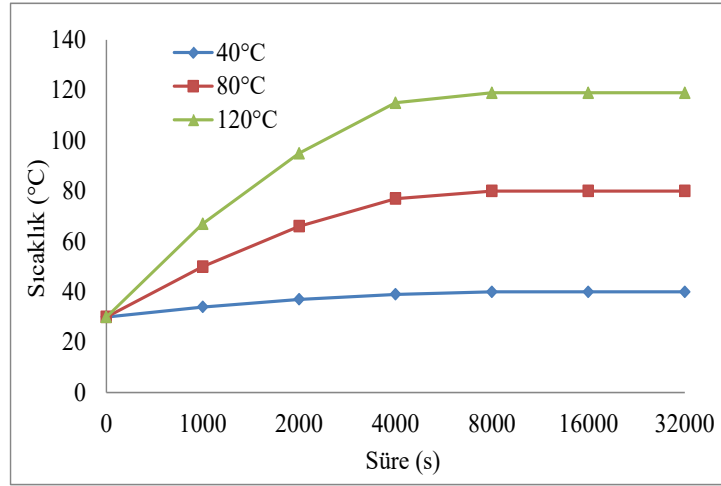


**Şekil 4.27.** Farklı kurutma havası hızlarında ürün merkez sıcaklığının zamanla değişimi

Farklı kurutma havası sıcaklıkları için yapılan analizlerde kurutma havası hızı 3 m/s alınmıştır. Şekil 4.28 farklı kurutma havası sıcaklıklarında ürün boyutsuz nem oranının zamana göre değişimini vermektedir. Şekil 4.29'de ise farklı kurutma havası sıcaklıklarında ürün merkez sıcaklığının zamanla değişimi görülmektedir. Hava sıcaklığının artmasıyla ürünün merkezinin sıcaklığının zamanla arttığı nem içeriği miktarının ise azaldığı görülmüştür.

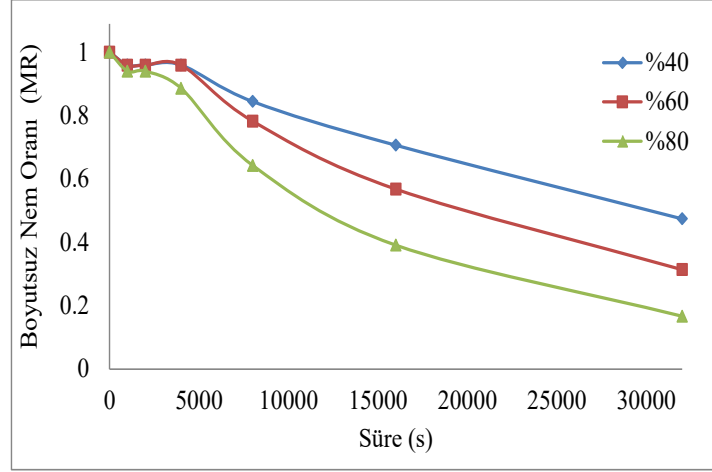


**Şekil 4.28.** Farklı kurutma havası sıcaklıklarında boyutsuz nem oranının zamanla değişimi

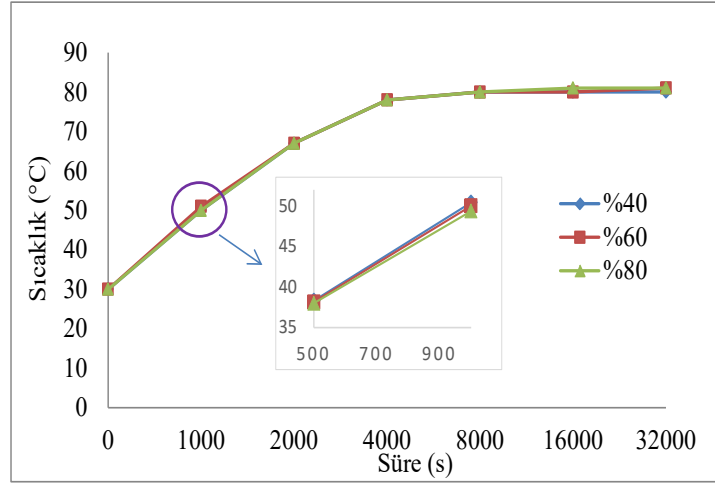


**Şekil 4.29.** Farklı kurutma havası sıcaklıklarında ürün merkez sıcaklığının zamanla değişimi

Farklı ürün nem değerleri için yapılan analizlerde kurutma havası hızı 3 m/s sıcaklığı 80°C alınmıştır. Şekil 4.30 farklı başlangıç ürün nem içeriğine sahip malzemede ürün nem oranının zamana göre değişimini vermektedir. Şekil 4.31’de ise farklı başlangıç ürün nem içeriğine sahip malzemede ürün merkez sıcaklığının zamanla değişimi görülmektedir. Ürün başlangıç nem içeriğinin artmasıyla ürünün merkezinin sıcaklığının zamanla değişmediği nem oranı içeriğinin ise azaldığı görülmüştür.



**Şekil 4.30.** Farklı başlangıç ürün nem içeriği değerlerine sahip malzemede boyutsuz nem oranının zamanla değişimi



**Şekil 4.31.** Farklı başlangıç ürün nem içeriği değerlerine sahip malzemede merkez sıcaklığının zamanla değişimi

Ayrıca farklı parametrelerde elde edilen boyutsuz nem oranı verileri kurutma modellerine yerleştirilip regresyon ile elde edilen katsayılar bulunmuştur.

**Çizelge 4.28.** 1m/s için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	A	b	k	$k_0$	$k_1$	N	$R^2$	SH	$\chi^2$
Lewis			$2.40 \times 10^{-5}$				0.97	0.0592	0.0035
Henderson ve Pabis	1.053		$2.62 \times 10^{-5}$				0.98	0.0499	0.0025
Two Term	0.529	0.523		$2.62 \times 10^{-5}$	$2.62 \times 10^{-5}$		0.97	0.0590	0.0035
Wang ve Singh	$-2.02 \times 10^{-5}$	$9.49 \times 10^{-11}$					0.99	0.0360	0.0009
Midilli ve ark.	1.001	$-3.23 \times 10^{-9}$	$3.45 \times 10^{-7}$			1.41	0.99	0.0170	0.0003

**Çizelge 4.29.** 3m/s için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	a	b	k	$k_0$	$k_1$	n	$R^2$	SH	$x^2$
Lewis			$2.58 \times 10^{-5}$				0.98	0.0545	0.0030
Henderson ve Pabis	1.056		$2.83 \times 10^{-5}$				0.98	0.0421	0.0018
Two Term	0.531	0.524		$2.83 \times 10^{-5}$	$2.83 \times 10^{-5}$		0.98	0.0498	0.0025
Wang ve Singh	$-2.12 \times 10^{-5}$	$1.03 \times 10^{-10}$					0.99	0.0294	0.0009
Midilli ve ark.	1.014	$2.69 \times 10^{-9}$	$8.19 \times 10^{-7}$			1.33	0.99	0.0127	0.0002

**Çizelge 4.30.** 5m/s için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	a	b	k	$k_0$	$k_1$	n	$R^2$	SH	$x^2$
Lewis			$2.76 \times 10^{-5}$				0.98	0.0462	0.0021
Henderson ve Pabis	1.051		$3.02 \times 10^{-5}$				0.99	0.0331	0.0011
Two Term	0.528	0.522		$3.02 \times 10^{-5}$	$3.02 \times 10^{-5}$		0.99	0.0392	0.0015
Wang ve Singh	$-2.16 \times 10^{-5}$	$1.07 \times 10^{-10}$					0.99	0.0371	0.0014
Midilli ve ark.	1.022	$-5.41 \times 10^{-9}$	$2.79 \times 10^{-6}$			1.22	0.99	0.0179	0.0003

1 m/s-3 m/s ve 5 m/s hızlara ait veriler farklı kurutma modellerine yerleştirilerek Çizelge 4.28-4.29 ve 4.30'da sonuçlar verilmiştir. 1 m/s hız için elde edilen sabitler,  $R^2$ , SH ve  $x^2$  değerleri sırası ile 0.99, 0.0170 ve 0.0003 Çizelge 4.28'de verilmiştir. 3 m/s hız için elde edilen sabitler,  $R^2$ , SH ve  $x^2$  değerleri sırası ile 0.99, 0.0127 ve 0.0002 Çizelge 4.29'da verilmiştir. 5 m/s hız için elde edilen sabitler,  $R^2$ , SH ve  $x^2$  değerleri sırası ile 0.99, 0.0179 ve 0.0003 Çizelge 4.30'da verilmiştir. Bu sonuçlardan  $R^2$  değeri 1'e, SH ve  $x^2$  değeri 0'a en yakın olan modelin Midilli olduğu görülmüştür. Farklı hızlar için yapılan çalışmada Midilli modelinin kuruma davranışını en iyi tanımladığı görülmüştür.

**Çizelge 4.31.** 40°C için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	a	b	k	$k_0$	$k_1$	n	$R^2$	SH	$x^2$
Lewis			$2.41 \times 10^{-5}$				0.97	0.0604	0.0037
Henderson ve Pabis	1.058		$2.66 \times 10^{-5}$				0.98	0.0481	0.0023
Two Term	0.532	0.525		$2.66 \times 10^{-5}$	$2.66 \times 10^{-5}$		0.97	0.0569	0.0032
Wang ve Singh	$-2.05 \times 10^{-5}$	$9.71 \times 10^{-11}$					0.99	0.0295	0.0009
Midilli ve ark.	1.013	$4.51 \times 10^{-9}$	$3.92 \times 10^{-7}$			1.40	0.99	0.0132	0.0002



**Çizelge 4.32.** 80°C için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	a	b	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	n	R <sup>2</sup>	SH	x <sup>2</sup>
Lewis			2.60×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0502	0.0025
Henderson ve Pabis	1.047		2.82×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0412	0.0017
Two Term	0.526	0.520		2.82×10 <sup>-5</sup>	2.82×10 <sup>-5</sup>		0.98	0.0487	0.0024
Wang ve Singh	-2.09×10 <sup>-5</sup>	1.01×10 <sup>-10</sup>					0.99	0.0276	0.0008
Midilli ve ark.	1.006	4.36×10 <sup>-9</sup>	8.42×10 <sup>-7</sup>			1.33	0.99	0.0123	0.0002

**Çizelge 4.33.** 120°C için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	a	b	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	n	R <sup>2</sup>	SH	x <sup>2</sup>
Lewis			2.78×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0460	0.0021
Henderson ve Pabis	1.045		3.01×10 <sup>-5</sup>				0.99	0.0366	0.0013
Two Term	0.525	0.520		3.01×10 <sup>-5</sup>	3.01×10 <sup>-5</sup>		0.98	0.0433	0.0019
Wang ve Singh	-2.15×10 <sup>-5</sup>	1.06×10 <sup>-10</sup>					0.99	0.0379	0.0014
Midilli ve ark.	1.01	2.02×10 <sup>-8</sup>	1.79×10 <sup>-6</sup>			1.27	0.99	0.0188	0.0004

40°C-80°C ve 120°C kurutma havası sıcaklıklarına ait veriler farklı kurutma modellerine yerleştirilerek Çizelge 4.31-4.32 ve 4.33’de sonuçları verilmiştir. 40°C sıcaklık için elde edilen sabitler, R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0132 ve 0.0002 Çizelge 4.31’de verilmiştir. 80°C sıcaklık için elde edilen sabitler, R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0123 ve 0.0002 Çizelge 4.32’de verilmiştir. 120°C sıcaklık için elde edilen sabitler, R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0188 ve 0.0004 Çizelge 4.33’de verilmiştir. Bu sonuçlardan R<sup>2</sup> değeri 1’e, SH ve x<sup>2</sup> değeri 0’a en yakın olan modelin Midilli olduğu görülmüştür. Farklı sıcaklıklar için yapılan çalışmada Midilli modelinin kuruma davranışını en iyi tanımladığı görülmüştür.

**Çizelge 4.34.** %40 nem için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	a	b	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	n	R <sup>2</sup>	SH	x <sup>2</sup>
Lewis			2.62×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0466	0.0022
Henderson ve Pabis	1.032		2.77×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0439	0.0019
Two Term	0.515	0.510		2.77×10 <sup>-5</sup>	2.77×10 <sup>-5</sup>		0.98	0.0520	0.0027
Wang ve Singh	-2.05×10 <sup>-5</sup>	9.91×10 <sup>-11</sup>					0.99	0.0214	0.0005
Midilli ve ark.	0.98	-3.58×10 <sup>-8</sup>	5.72×10 <sup>-7</sup>			1.36	0.99	0.0155	0.0002

**Çizelge 4.35.** %60 nem için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	a	b	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	n	R <sup>2</sup>	SH	x <sup>2</sup>
Lewis			2.58×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0488	0.0024
Henderson ve Pabis	1.043		2.78×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0415	0.0017
Two Term	0.525	0.511		2.78×10 <sup>-5</sup>	2.78×10 <sup>-5</sup>		0.98	0.0491	0.0024
Wang ve Singh	-2.07×10 <sup>-5</sup>	9.99×10 <sup>-11</sup>					0.99	0.0288	0.0008
Midilli ve ark.	1.00	-7.00×10 <sup>-9</sup>	8.76×10 <sup>-7</sup>			1.33	0.99	0.0160	0.0003

**Çizelge 4.36.** %80 nem için kurutma modellerine ait istatistiksel parametre değerleri

Model/Katsayı	a	b	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	n	R <sup>2</sup>	SH	x <sup>2</sup>
Lewis			2.55×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0498	0.0025
Henderson ve Pabis	1.045		2.76×10 <sup>-5</sup>				0.98	0.0415	0.0017
Two Term	0.525	0.520		2.76×10 <sup>-5</sup>	2.76×10 <sup>-5</sup>		0.98	0.0491	0.0024
Wang ve Singh	-2.06×10 <sup>-5</sup>	9.92×10 <sup>-11</sup>					0.99	0.0297	0.0009
Midilli ve ark.	1.00	5.66×10 <sup>-9</sup>	8.10×10 <sup>-7</sup>			1.33	0.99	0.0143	0.0002

%40-%60-%80 başlangıç nem içeriği değerlerine ait veriler farklı kurutma modellerine yerleştirilerek Çizelge 4.34-4.35 ve 4.36’da sonuçları verilmiştir. %40 nem için elde edilen sabitler, R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0155 ve 0.0002 Çizelge 4.34’de verilmiştir. %60 nem için elde edilen sabitler, R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0160 ve 0.0003 Çizelge 4.35’de verilmiştir. %80 nem için elde edilen sabitler, R<sup>2</sup>, SH ve x<sup>2</sup> değerleri sırası ile 0.99, 0.0143 ve 0.0002 Çizelge 4.36’da verilmiştir. Bu sonuçlardan R<sup>2</sup> değeri 1’e, SH ve x<sup>2</sup> değeri 0 a en yakın olan modelin Midilli olduğu görülmüştür. Farklı başlangıç nem değerleri için yapılan çalışmada Midilli modelinin kuruma davranışını en iyi tanımladığı görülmüştür.

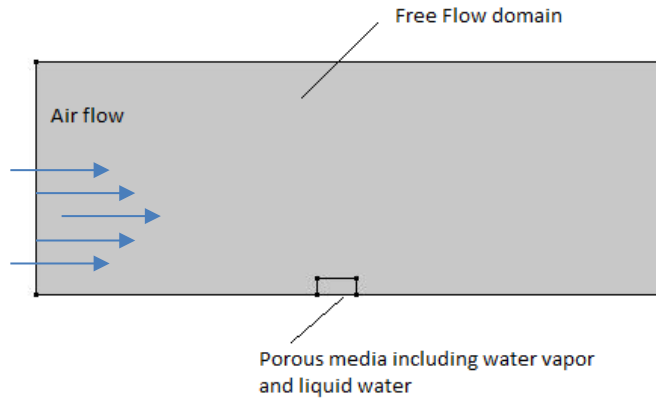
### 4.3. Zorlanmış Taşınım ile Farklı Geometrik Şekilli Gıda Ürünlerinin Kurutulmasının Gözenekli Ortam Yaklaşımı ile Nümerik İncelenmesi

Bu çalışmada kurutucu içerisinde bulunan gıda ürününün nem ve sıcaklık dağılımını hesaplamak için matematik model (Darcy flow) geliştirilmiştir. Konvektif kurutmada çok fazlı taşıma modeli (Multiphase transport modeli) kullanılmıştır. Gözenekli gıda ürününün içerisinde bulunan sıvı faz için kılcal (capillary) yayılma, buhar için moleküler yayılma ve taşınım mekanizmaları kullanılmıştır. Gıda ürünü ve akış alanı için modelde su buharı, sıvı su ve enerji korunum denklemleri modellenmiştir. Ayrıca transport denklemlerinde büzülme etkisi de hesaba katılmıştır. Kurutma üzerinde farklı

hava hızı ve sıcaklığın etkisinin yanı sıra ürüne ait geometrik şeklin de etkisi olup olmadığı incelenmiştir. Elde edilen lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri Comsol Multiphysics 5.3. programı ile çözülmüştür.

#### 4.3.1. Nümerik modelleme

Kurutma işleminin modellenmesinde akış, ısı transferi ve taşınım prensipleri hesaba katılmıştır. Model tünelde bulunan ürün etrafında laminer akış ve ürün içerisinde sıvı ve buhar fazları hesaba katılarak tanımlanmıştır. (Şekil 4.32)



**Şekil 4.32.** Analizlerde kullanılan model ve akış alanı

Analizlerde farklı geometrik şekillerde bulunan ürünler modellenmiştir. Ağdan bağımsızlık çalışması nem içeriği değeri için uygulandı ve maksimum fark %1 alındı. Ağ yapısı dikdörtgen, silindir ve kare için 4745-8868 eleman aralığında tespit edildi (Şekil 4.33). Zamana bağlı problemde “implicit time stepping” methodu kullanıldı. Lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri Newton metodu ile 0.001 tolerans kabul edilerek çözüldü. Çözüm süresi 100-500 saniye aralığında sürmüştür. (Windows 8-Intel (R) Core (TM) i7-3610QM cpu 2.30 GHz physical memory 1.39 GB virtual memory 1.52 GB)

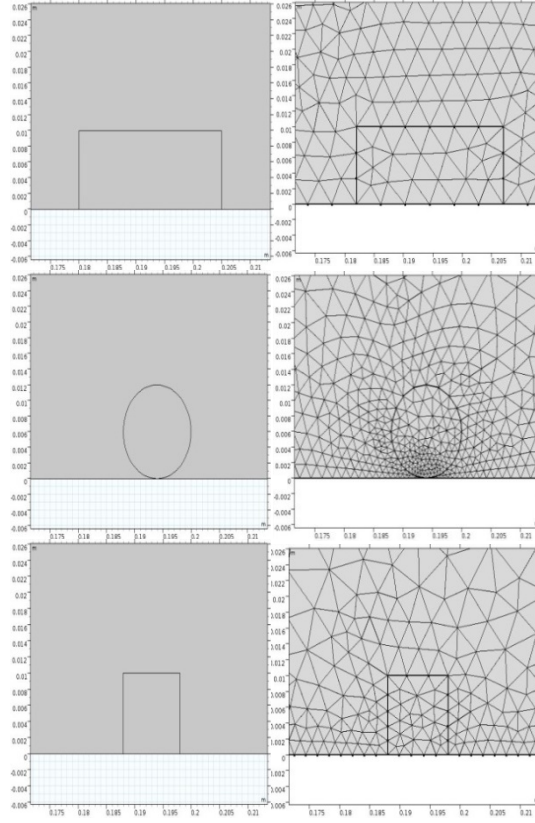
Modelde kullanılan dikdörtgen kesitli ürünün ölçüleri,  $1 \times 2.5$  cm, silindirin çapı 1.2 cm ve karenin kenarı 1 cm alındı. Kanal ölçüleri olarak 15 cm yükseklik, 40 cm genişlik alındı. Yüzey alanları ise dikdörtgen, silindir ve karede sırası ile  $2.5-1.13$  ve  $1 \text{ cm}^2$  dir. Analizde kullanılan parametreler ve termofiziksel özellikleri Çizelge 4.37’de verilmiştir.

**Çizelge 4.37.** Modelde kullanılan parametreler ve termofiziksel özellikler

<b>Parametre</b>	<b>Değer</b>	<b>Referans</b>
Hava hızı (m/s)	0.5-0.8-1	
Ürün sıcaklığı (°C)	21	
Ürün yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	980	(Karim ve Hawlader 2005)
Hava sıcaklığı (°C)	40-50-60	
Ürün nem içeriği (gr /gr kuru)	2.62	
Ürünün ısı iletim katsayısı (W/mK)	0.006M+0.120	(Bart-Plange ve ark. 2012)
Ürünün özgül ısısı (J/kgK)	0.811M <sup>2</sup> -24.75M+1742	(Bart-Plange ve ark. 2012)
Buharlaşma ısısı (kJ/kg)	2383-2407-2359	(Çengel 2002)
Büzülme hızı (m/s) ×10 <sup>8</sup>	5.55 (x) – 8.33 (y)	

Hava ve gıda ürününün sıcaklık ve nem içeriği değerlerinin tespit edilebilmesi için unsteady state, lineer olmayan kısmi diferansiyel transport denklemleri sınır şartları kullanılarak nümerik metot ile çözülmüştür. Burada sıvı transferinden dolayı oluşan hacim değişiminin hesaba katılabilmesi için zamana bağlı “Deformed (Moving) Mesh” kullanılmıştır. Ek 1’de deforme edilmiş ağ yapısı hakkında bilgi verilmiştir.

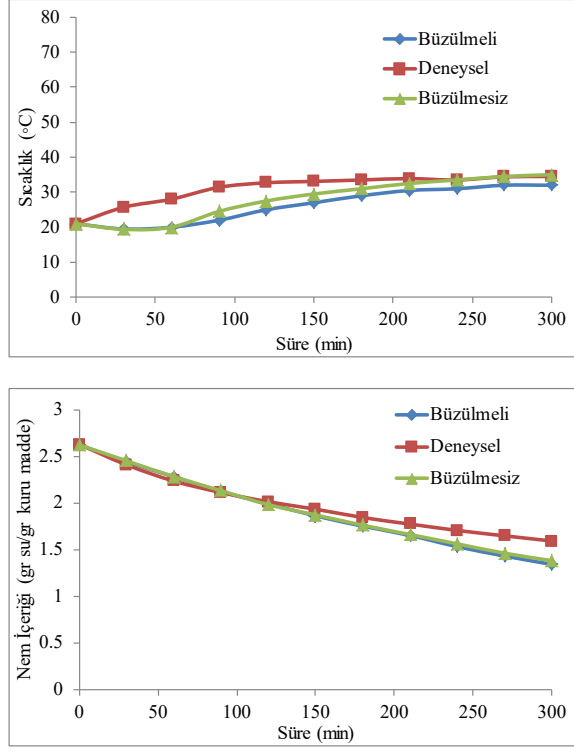
Comsol programında Arbitrary Lagrange Eulerian (ALE) metodu uygulanmıştır. ALE metodu hareketli sınır tanımlanmasına izin veren Lagrangian ve Eulerian yaklaşımları arasında bir uygulama olarak kullanılmaktadır. “Deformed mesh” hareketi olarak “Laplace smoothing type” kullanılmıştır.



**Şekil 4.33.** Dikdörtgen, silindir ve kare şekilli geometriler ve ağ yapıları

#### 4.3.2. Model doğrulaması

Kurutma modeli hem deformasyon etkisi ile hem de deformasyonsuz olarak oluşturulmuştur. Deformasyonun kurutma üzerinde etkisi olup olmadığını tespit etmek için dikdörtgen kesitli ürün deneysel olarak kurutulmuştur. Çünkü büzülme etkisinin nümerik olarak hesaba katılabilmesi için büzülme hızının bilinmesi gerekmektedir. Bunun için eşitlik (3.25) kullanılmıştır. Kurutma başlangıcındaki ve sonundaki nem içeriğinin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için deneysel olarak kurutma işlemi yapılmalıdır. Şekil 4.34’de nümerik olarak elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Büzülme etkisi ile büzülme olmadığı durumlar için merkez nem içeriği ve yüzeyde ölçülen en yüksek sıcaklık değerlerinin (nem içeriği için yaklaşık %0.8 fark, sıcaklık değişimi için %6.2 fark) birbirine yakın olarak değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre büzülme etkisinin nümerik modellemede ihmal edilebileceği söylenebilir. Yapılan çalışmada bu yaklaşım kullanılarak modelleme yapılmıştır.



**Şekil 4.34.** Büzülmeli, büzülmesiz ve deneysel çalışmanın değişimi

**Çizelge 4.38.** Deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	1.03081	1.03081	175.55	0.000	95.12	0.07	$y = 2.473 - 0.003227x$
Hata	9	0.05285	0.00587					
Toplam	10	1.08366						

**Çizelge 4.39.** Nümerik büzülme etkili çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	1.74888	1.74888	831.96	0.000	98.93	0.04	$y = 2.54 - 0.004203x$
Hata	9	0.01892	0.00210					
Toplam	10	1.76780						

**Çizelge 4.40.** Nümerik büzülme etkisiz çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	1.65191	1.65191	601.78	0.000	98.53	0.05	$y = 2.535 - 0.004085x$
Hata	9	0.02471	0.00275					
Toplam	10	1.67662						

**Çizelge 4.41.** Deneysel çalışmaya ait ürün sıcaklığının süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	188.095	62.6984	388.26	0.000	99.4	0.4	$y = 20.99 + 0.1708x - 0.000770x^2 + 0.000001x^3$
Hata	7	1.130	0.1615					
Toplam	10	189.225						

**Çizelge 4.42.** Nümerik büzülme etkili çalışmaya ait ürün sıcaklığının süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	243.464	81.1547	176.55	0.000	98.7	0.67	$y = 20.4 - 0.03316x + 0.000749x^2 - 0.000002x^3$
Hata	7	3.218	0.4597					
Toplam	10	246.682						

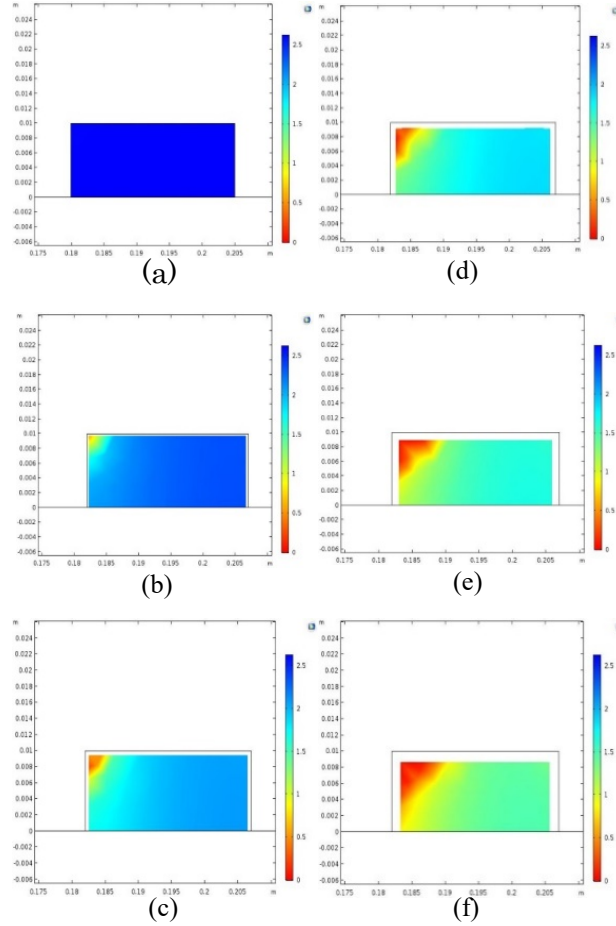
**Çizelge 4.43.** Nümerik büzülme etkisiz çalışmaya ait ürün sıcaklığının süre ile olan eğrisel regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	3	342.294	114.098	78.67	0.000	97.12	1.2	$y = 19.85 + 0.00422x + 0.000580x^2 - 0.000001x^3$
Hata	7	10.152	1.450					
Toplam	10	352.445						

Çizelge 4.38-4.43’de verilen regresyon analizi sonuçlarına göre nem içeriği için nümerik büzülme etkili çalışmanın ( $R^2=98.93$ ), sıcaklık için ise deneysel çalışmanın ( $R^2=99.4$ ), en uygun tahminleyici modele sahip olduğu söylenebilir.

Deneysel sonuç ile analitik sonuçlar arasında oluşan farkın nedeni, analizde ürünün termofiziksel özelliklerinin sabit kabul edilmesi ve deneysel ölçümde karşılaşılan zorluklar olarak açıklanabilir (Liu ve Cheng 1991).

Şekil 4.35’de 5 saatlik süre boyunca üründe meydana gelen büzülme etkisi ve nem içeriği değişimi görülmektedir. Zaman içerisinde üründe ortaya çıkan nem buharlaşması ile büzülme etkisinin olduğu görülmektedir. Nem içeriği azalmasının ilk olarak sıcak hava ile temas eden sol üst köşede olduğu renk değişiminden söylenebilir.

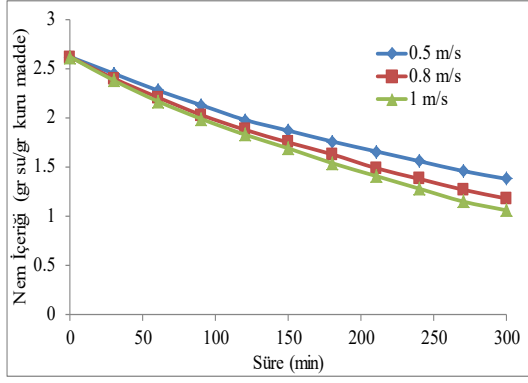


**Şekil 4.35.** Büzülme etkisi hesaba katılarak kurutma süreci sırasında gıda ürününün nem içeriğinin gelişimi (a- kurutmanın başlangıcı, b-ilk saat, c- ikinci saat, d- üçüncü saat, e- dördüncü saat, f- beşinci saat) (40°C hava sıcaklığı, 0.5 m/s hava hızı)

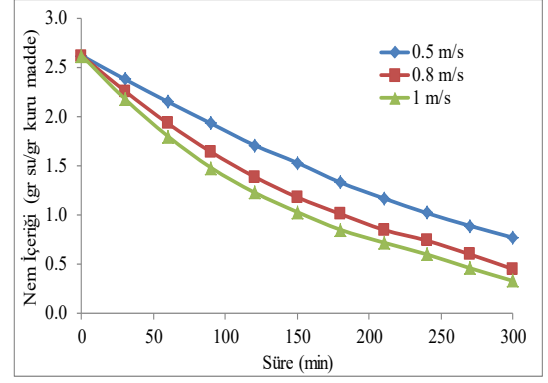
### 4.3.3. Analiz bulguları

Dikdörtgen, silindirik ve kare kesitli ürün için farklı hızlarda ve farklı sıcaklıklarda nem içeriği değişim grafikleri Şekil 4.36-4.37-4.38 ve 4.39’da verilmiştir.

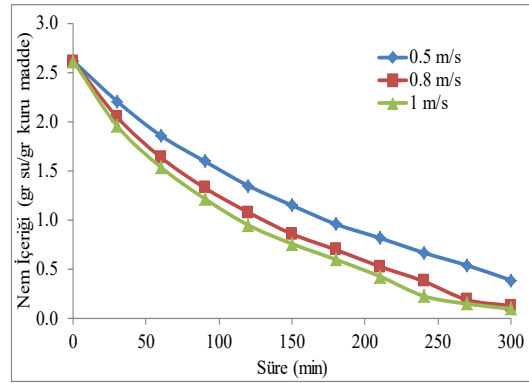




(a)



(b)



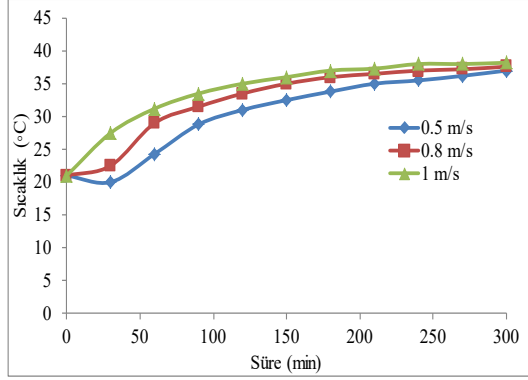
(c)

**Şekil 4.36.** 40°C hava sıcaklığında farklı hava hızlarında farklı şekilli ürünlerin nem profilleri (a- dikdörtgen, b- silindir, c- kare)

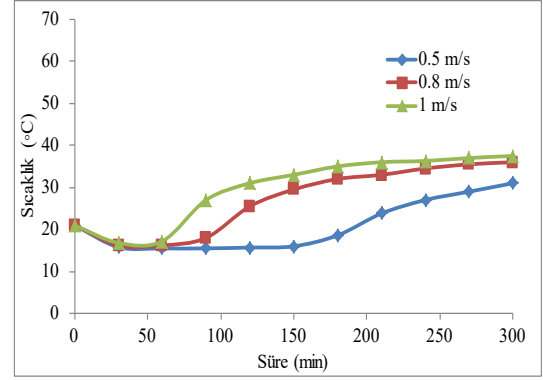
Şekil 4.36'da 3 farklı geometrik şekle sahip gıda ürününün farklı hızlarda kurutulması sırasında hesaplanan nem içeriğinin zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Kurutma havası hızının artışı her 3 durumda da kuruma süresini kısaltmıştır. Kuruma hızının artışı ile daha kısa sürede kurutma sağlanır. Kare şeklinde bulunan gıda ürünü silindir ve dikdörtgen şeklindeki ürünlere göre daha kısa sürede kurumaktadır. Dikdörtgen şeklinde üründe 1m/s kurutma havası hızı için 5 saatlik süre sonunda nem içeriği 1.06 (gr su/gr kuru) iken silindir ve karede ise 0.33-0.1 (gr su/gr kuru) olarak hesaplanmıştır. En hızlı kurumanın görüldüğü kare şekilli üründe 0.5 m/s ile 0.8 m/s hız arasında ortalama %28'lik fark varken, hız 0.8 m/s'den 1m/s'ye artırıldığında ortalama nem içeriği %14 azalmıştır.

Bu sonuca göre kare şekilli ürünün yüzey sıcaklığının en yüksek değerde olduğu görülmektedir. 3 farklı kurutma havası hızında üründe meydana gelen ortalama yüzey

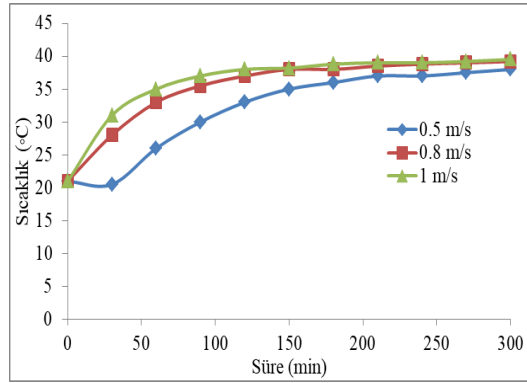
sıcaklıkları değerleri dikkörtgen, silindir ve kare şekil için 1m/s hızda sırası ile 33.88°C 29.8°C ve 35.97°C dir (Şekil 4.37). Bu sonuca göre kurutma havası hızı arttıkça gıda ürününün yüzey sıcaklığı artmaktadır.



(a)

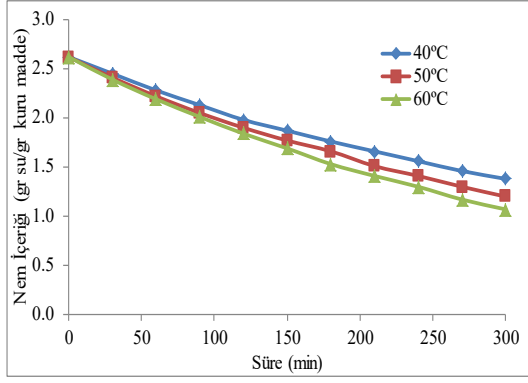


(b)

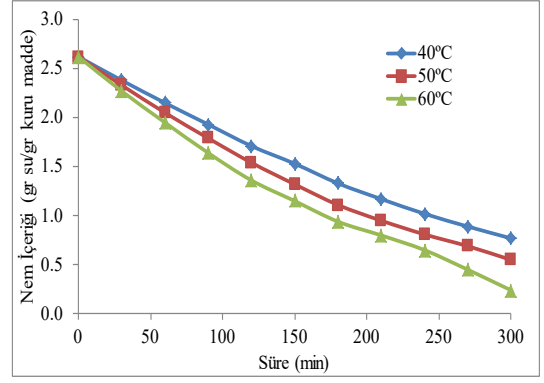


(c)

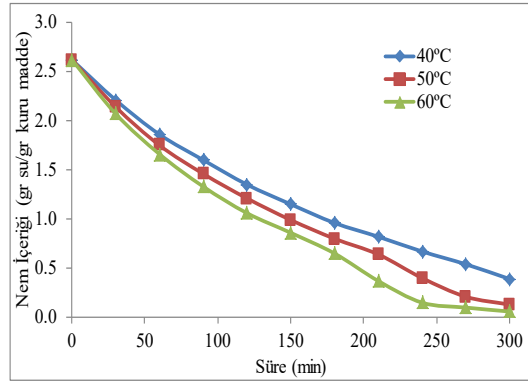
**Şekil 4.37.** 40°C hava sıcaklığında farklı geometrik şekilli gıda ürünlerinin farklı hava hızlarında elde edilen yüzey sıcaklık dağılımları (a- dikdörtgen, b- silindir, c- kare)



(a)

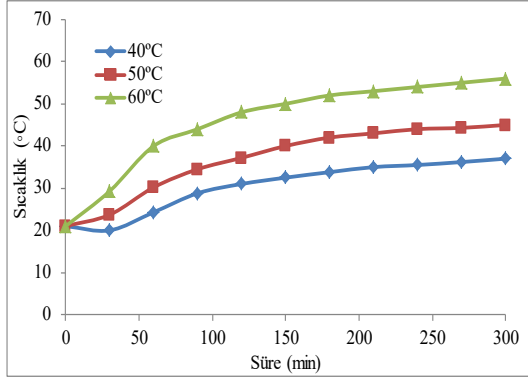


(b)

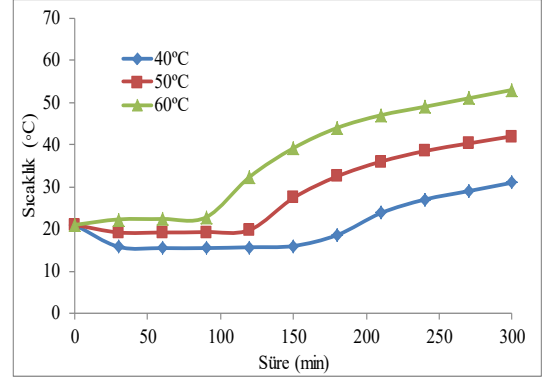


(c)

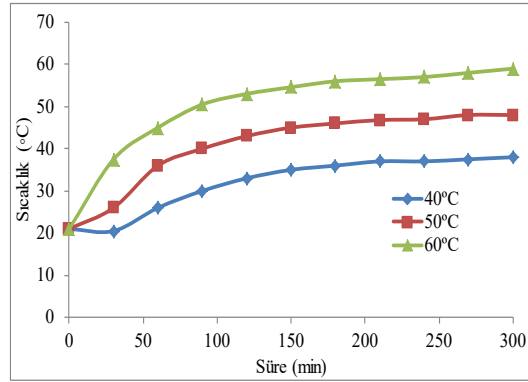
**Şekil 4.38.** 0.5 m/s hava hızında farklı geometrik şekilli gıda ürünlerinin farklı hava sıcaklıklarında nem içerikleri (a- dikdörtgen, b- silindir, c- kare)



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.39.** 0.5 m/s hava hızında farklı geometrik şekilli gıdaların farklı hava sıcaklıklarında yüzey sıcaklıkları (a- dikdörtgen, b- silindir, c- kare)

Farklı sıcaklıklarda yapılan kurutma analiz sonuçları Şekil 4.38’de verilmiştir. Kurutma havası sıcaklığı arttıkça nem içeriği azalmakta ve kuruma süresi kısalmaktadır. 60°C kurutma havası sıcaklığında dikdörtgen, silindir ve kare kesitli ürünün 5 saatlik süre sonundaki nem içeriği değerleri sırası ile 1.07-0.24 ve 0.06 (gr su/gr kuru) olarak hesaplanmıştır. Farklı hava sıcaklıkları ile yapılan kurutma işleminde de kare kesitli ürünün nem içeriğinin en düşük çıktığı görülmüştür.

Farklı kurutma havası sıcaklıklarında yapılan analiz sonucu Şekil 4.39’de görülmektedir. Hava sıcaklığı arttıkça zamanla yüzey sıcaklığı değerleri de yükselmektedir. Dikdörtgen, silindir ve kare kesitli gıda ürünlerinin 5 saatlik süre sonunda sıcaklık değerleri 56°C-53°C ve 59°C olarak tespit edilmiştir. En yüksek artış %64 oranında kare kesitli üründe gerçekleşmiştir.

Kurutma havası hızı ve sıcaklığı arttıkça kuruma süresi kısalmıştır. Aynı zamanda kurutma havası sıcaklığı da kuruma süresini azaltmıştır. Yüzey alanı daha küçük olduğu için kare kesitli gıda ürünün en hızlı kuruyan model olmuştur.

Şekil 4.37 ve 4.39'da kurutma sürecinin başlarında sıcaklık değerlerinde düşüş görülmüştür. Bunun nedeni üründe meydana gelen buharlaşma ile soğuma etkisidir. Ürün yüzeyi başlangıçta doymuş nem tabakası ile kaplıdır. Kuruma sürecinin başlarında buharlaşma oranı ve üründen uzaklaşan nem miktarı bu yüzden fazladır (Şekil 4.36 - 4.38). Daha yüksek buharlaşma oranından dolayı sıcaklık azalması oluşmaktadır. Sıcaklık azalma periyodu literatürde yapılan bazı çalışmalarda da görülmüştür (Kumar ve ark. 2015, Zhang ve Mujumdar 1992, Turner ve Jolly 1991, Golestani ve ark. 2013). Üründe sıcaklık artışı kalite bozulmasına neden olabilir. Bu yüzden soğutma sürecinin daha uzun tutularak kalitesinin artırılması gereklidir. Bu yüzden aralıklı kurutma ile her bir sıcaklık periyodundan sonra işlem yeniden başlatılarak daha fazla buharlaşma ile soğuma sağlanabilir (Kumar ve ark. 2015).

#### **4.4. Taguchi Metodu Kullanılarak Sıcak Hava ile Salatalık Kurutulmasına Etki Eden Parametrelerin Optimizasyonu**

Bu çalışma, konvektif kurutucuda salatalığın kurutulmasına etki eden parametrelerin optimizasyonunun Taguchi metodu ile uygulamasını göstermektedir. Kurutma parametreleri olarak 0.5, 0.8 ve 1 m/s hava hızları, 40, 50 ve 60°C hava sıcaklıkları ve 0.5, 1 ve 1.5 cm ürün kalınlıkları alınmıştır. Kurutma süresi sonunda her bir parametrenin ürün nemi, büzülme katsayısı, ekserji verimliliği ve ekserjetik gelişim potansiyel değerleri üzerindeki katkı faktörü ANOVA analizi ile araştırılmıştır. Elde edilen çıktı değerleri Ek-2'de verilmiştir. Ürünün kurutulmasında kalınlığın etkisinin, ekserji veriminde ise hava sıcaklığının etkisinin en fazla olduğu görülmüştür. Kuruma süresinin minimize edilmesinde optimum kurutma koşullarının 1m/s hava hızı, 60°C hava sıcaklığı ve 0.5 cm ürün kalınlığı olduğu tespit edilmiştir. Ekserji veriminin en fazla olması için 0.5 m/s hava hızı, 60°C hava sıcaklığı ve 0.5 cm ürün kalınlığı seçilmelidir.

#### **4.4.1. Başlangıç nem içeriğinin tespiti**

İlk nem tayininin belirlenmesi için  $80\pm 0.05$  gr ağırlığındaki salatalık dilimleri kurutma cihazına konularak 24 saat boyunca  $75\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  hava sıcaklığında kurutulmuştur. Son iki ölçüm arasındaki fark %1 oluncaya kadar kurutma işlemi yapılmıştır. Ortalama başlangıç ürün nem içeriği yaş ve kuru bazda sırası ile %91 ve 10.11 gr su/gr kuru madde olarak elde edilmiştir.

#### **4.4.2. Deneilerin uygulanması**

Alınan salatalıklar öncelikle buzdolabında  $4^{\circ}\text{C}$  de 24 saat boyunca muhafaza edilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar 3 saat laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Bu arada sürekli rejime ulaşıncaya kadar deney cihazı çalıştırılmıştır. Boş tepsilerin ağırlığı ölçülerek kaydedilmiştir. İstenen şartlara ulaştığı zaman tepsi cihaza yerleştirilmiştir. Deney sırasında ürünün ağırlığındaki değişim 0.05 gr hassasiyete sahip dijital terazi yardımı ile periyodik olarak kaydedilmiştir.

#### **4.4.3. Taguchi analizi**

Bu çalışmada kurutma sürecine etki eden parametreleri (hava hızı, hava sıcaklığı ve ürün kalınlığı) optimize etmek için Taguchi metodu kullanıldı. Kurutma sürecini etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça yapılacak deney sayısı da fazlalaşmaktadır. Bu durum aynı zamanda maliyetleri artırmakta ve uygulamayı zorlaştırmaktadır. Bu yüzden karar verilmesi gereken çok faktörlü durumlarda uygulanması verimli olan Taguchi metodu kullanılabilir. Bu yöntemde, önce, her bir parametre için SD (serbestlik derecesi) değerleri toplanarak elde edilen toplam serbestlik derecesine (TSD) uygun bir ortogonal dizi seçilmelidir.

Bu çalışmada 3 parametre değerlerinin her biri için 3 seviye seçilmiştir. Her bir parametre için TSD değeri parametrelerin seviyelerinden 1 çıkarılarak elde edilmiştir. 3 parametre değerinin 3 seviyesi için toplam 6 TSD vardır (Çizelge 4.44). Kurutma havası sıcaklığı olarak 40, 50 ve  $60^{\circ}\text{C}$ , kurutma havası hızı olarak 0.5, 0.8 ve 1 m/s, ürün

kalınlığı olarak ise 0.5, 1 ve 1.5 cm değerleri alındı. Kurutma parametrelerinin seviyelerini gösteren örneklerin numaralandırılması ve Taguchi L9 ortogonal dizi kullanılarak seçilen deneysel düzen Çizelge 4.45’de verilmiştir. Deneiden elde edilen sonuçlar Taguchi metodunda S/N (sinyal gürültü) oranına çevrilir. Veri analizinde yanıtın kontrolüne izin vermek ve yanıtla ilgili değişkenliği azaltmak için sinyal-gürültü (signal-to-noise) (S/N) oranı kullanılır. Taguchi metodunda S/N oranının minimum (smaller-the better), maksimum (larger-the-better) ve ortalama (nominal-the-best) olmak üzere üç performans kriteri bulunmaktadır. Bu çalışmada maksimum (ekserji verimliliği, büzülme katsayısı ve ekserjetik gelişim potansiyeli) ve minimum (nem içeriği) amaç fonksiyonları tanımlandı.

**Çizelge 4.44.** Çalışmada kullanılan kurutma parametreleri ve seviyeleri

Parametre	TSD (Level no-1)	Level 1	Level 2	Level 3
Sıcaklık (°C)	2	40	50	60
Hız (m/s)	2	0.5	0.8	1
Kalınlık (cm)	2	0.5	1	1.5
Toplam SD	6			

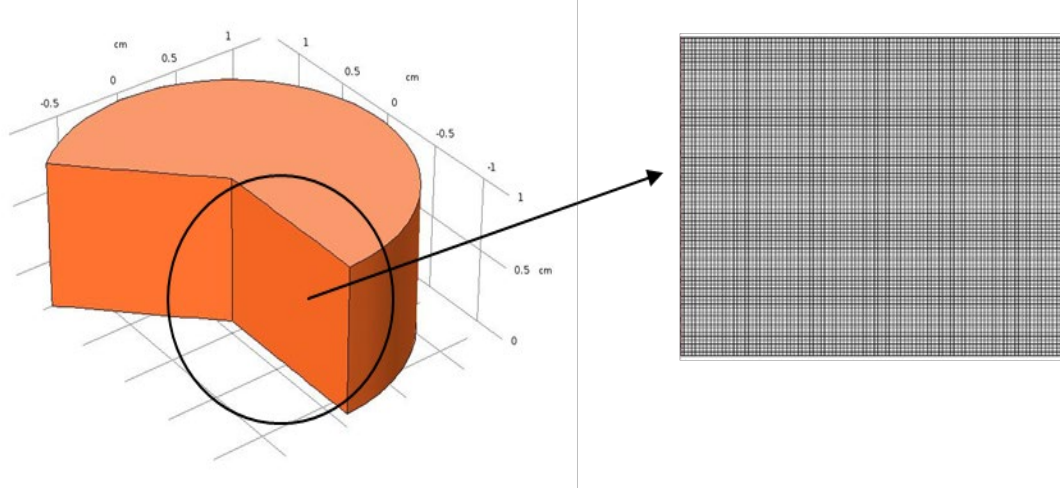
**Çizelge 4.45.** Taguchi ortogonal L9 dizisi kullanılarak seçilen parametreler ve seviyeleri

Ortogonal dizi	Deney no	Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Kalınlık (cm)
111	1	0.5	40	0.5
122	2	0.5	50	1.0
133	3	0.5	60	1.5
212	4	0.8	40	1.0
223	5	0.8	50	1.5
231	6	0.8	60	0.5
313	7	1.0	40	1.5
321	8	1.0	50	0.5
332	9	1.0	60	1.0

#### 4.4.4. Nümerik modelleme

Sıcak hava zorlanmış taşınım kurutma sürecinde eş zamanlı ısı ve kütle transfer denklemlerini elde etmek için 2 boyutlu aksisimetrik model kullanıldı. Dairesel şekilli gıda ürünü aksisimetrik olarak modellenebildiğinden dolayı nümerik yöntemde düzlemsel kesişimin sadece bir çeyrek dilimi hesaba katıldı (Şekil 4.40). Literatürde

bazı nümerik kurutma çalışmalarında da bu aksisimetrik model yaklaşımı kullanılmıştır (Kumar ve ark. 2015, Sabarez 2012).



**Şekil 4.40.** Analizde kullanılan model ve ağ yapısı

Modelin basitleştirilmesi için kabul edilen varsayımlar;

- Ürün içerisinde ısı üretimi yoktur.
- Gıda içerisinde ısı transferinin iletim (Fourier's Law) ile kütle transferinin difüzyon (Fick's Law) ile gerçekleştiği kabul edildi.
- Kurutma sırasında üründe büzülme etkisi hesaba katıldı.
- Kurutma süreci boyunca havanın ve ürünün termofiziksel özellikleri sabit kabul edildi.
- Kurutma havasının hızı ve sıcaklığı sabit olarak değerlendirildi.



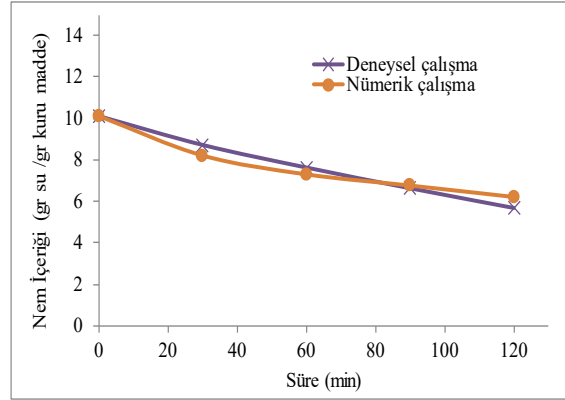
**Çizelge 4.46.** Salatalığın termofiziksel özellikleri ve deney kurutma koşulları

Parametre	Değer	Referans
Hava hızı (m/s)	1	
Ürün sıcaklığı (°C)	25.6	
Ürün kalınlığı (cm)	1	
Ürün yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	959	(Fasina ve Fleming 2001)
Hava sıcaklığı (°C)	60	
Ürün nem içeriği (gr /gr dry)	10.11	
Hava bağıl nemi (%)	30	
Ürünün ısı iletim katsayısı (W/mK)	0.62	(Fasina ve Fleming 2001)
Ürünün özgül ısısı (J/kgK)	4030	(Fasina ve Fleming 2001)
Buharlaştırma ısısı (kJ/kg)	2442	(Çengel 2002)
Isı transfer katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)	22	
Kütle transfer katsayısı (m/s)	1	
Nem difüzivitesi (m <sup>2</sup> /s) ×10 <sup>9</sup>	1	
Büzülme hızı (m/s) ×10 <sup>7</sup>	2.77 (x) – 2.56 (y)	

Nümerik çalışma için modellenen gıda ürünü için öncelikle ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak model yapısında 800 dörtgen eleman, 360 kenar elemanı ve 4 köşe elemanı seçilmiştir. Kısmi diferansiyel denklemleri Comsol Multifizik 5.3 programı kullanılarak 0.001 bağıl tolerans ve 0.0001 mutlak tolerans kriteri altında Newton metodu uygulanarak zamana bağlı çözülmüştür. Analizde kullanılan parametreler ile ürünün termofiziksel özellikleri Çizelge 4.46’da verilmiştir. Ürün içerisindeki nem değişimini hesaplamak için nümerik metot kullanılarak lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri çözülmüştür. Ürünün kuruma sırasında hacmindeki değişimden dolayı ortaya çıkan deforme yapısına ait ağ yapısını tanımlamak için Arbitrary Lagrange Eulerian yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem hareketli sınır tanımlamasına izin veren Lagrangian ve Eulerian yaklaşımları temeline dayanmaktadır.

1 m/s hız, 60°C ve 1 cm kalınlığındaki ürün için 2 saatlik kurutma süresi boyunca deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile nümerik çözümle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç verileri Şekil 4.41 üzerinde gösterilmiştir. 2 saatlik kuruma süresi boyunca deneysel veriler ile nümerik değerlerin birbirine yakın olarak değiştiği

görülmektedir. İki farklı çalışma arasında ortalama %5.2'lik bir fark ortaya çıkmıştır.



**Şekil 4.41.** Deneysel ve nümerik çalışmanın nem içeriklerinin karşılaştırılması

**Çizelge 4.47.** Deneysel çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	11.9903	11.9903	486.95	0.000	99.39	0.15	$y = 9.944 - 0.03650x$
Hata	3	0.0739	0.0246					
Toplam	4	12.0641						

**Çizelge 4.48.** Nümerik çalışmaya ait nem içeriğinin süre ile olan doğrusal regresyon analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F	P	R <sup>2</sup>	SH	Regresyon denklemi
Regresyon	1	8.55625	8.55625	33.16	0.010	91.7	0.5	$y = 9.568 - 0.03083x$
Hata	3	0.77403	0.25801					
Toplam	4	9.33028						

Çizelge 4.47 ve 4.48'den elde edilen regresyon analizlerine göre deneysel çalışmaya ( $R^2=99.39$ ) ait modelin en iyi tahminleyici model olduğu söylenebilir.

Eşitlik (3.53) kullanılarak salatalık için hesaplanan bağıl belirsizlik değeri  $\pm \%0.76$ 'dır.

#### 4.4.5. Nem içeriği hesabı için Taguchi analizi

9 farklı deneye ait hesaplanan 3 tekrarlı 27 farklı nem içeriği değerleri Minitab 18 programına girilmiştir. Daha sonra Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. Çizelge 4.49 iki saatlik kuruma süresi sonunda elde edilen nem içeriğinin deneysel sonuçlarını ve hesaplanan S/N oranlarını göstermektedir. En büyük ortalama S/N oranı en küçük nem içeriği değerini göstermektedir. şekil 4.42a'da verilen ortalama S/N ratio analizine göre en küçük nem içeriği değeri (optimum koşul), en büyük ortalama S/N oranlarının elde edildiği 1m/s hava hızı, 60°C hava sıcaklığı ve 0.5 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir. İki saatlik kuruma süresinde en fazla nem içeriğine (en yavaş kuruma hızı) sahip deneysel koşullar 0.5 m/s hava hızı, 40 °C hava sıcaklığı ve 1.5 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir. Daha yüksek hava sıcaklığı ve hava hızı üründen ortama geçen buharlaşma miktarını artırmıştır. Hava hızının 0.5 m/s'den 0.8 m/s'ye artışıının kurutma üzerine etkisi görülürken, 0.8 m/s'den 1 m/s hıza geçişte bu etkinin azaldığı söylenebilir. 10°C sıcaklık artışıının ise ürünün nem içeriğinin azalmasında büyük bir etkisi olduğu açıkça görülebilmektedir.

**Çizelge 4.49.** 2 saatlik kurutma süreci için nem içeriği ve hesaplanan S/N oranı

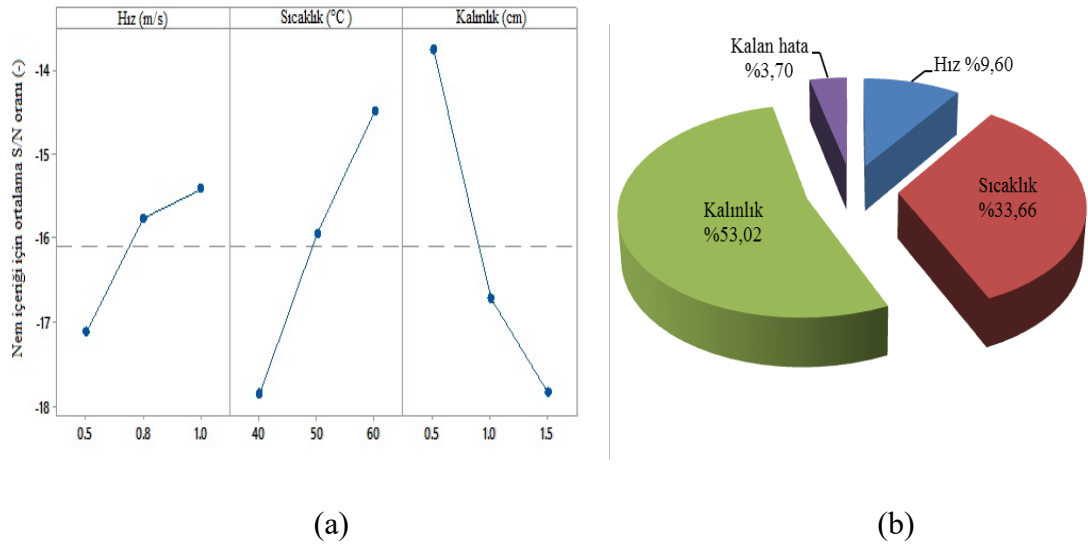
Ortogonal dizi	Nem içeriği (gr su /gr kuru madde)	S/N oranı	Standart sapma
111	7.21667	-17.1669	0.056862
122	7.25667	-17.2155	0.115902
133	7.06667	-16.9853	0.135031
212	7.82333	-17.8680	0.066583
223	7.94000	-17.9978	0.174356
231	3.73333	-11.4420	0.020817
313	8.45333	-18.5406	0.025166
321	4.28667	-12.6427	0.041633
332	5.67000	-15.0736	0.145258

**Çizelge 4.50.** Nem içeriğine ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız	2	4.857	4.857	2.4283	2.59
Sıcaklık	2	17.020	17.020	8.5099	9.09
Kalınlık	2	26.805	26.805	13.4026	14.32
Kalan hata	2	1.872	1.872	0.9362	
Toplam	8	50.554			

DF: Serbestlik derecesi, Seq SS: Ardışık kareler toplamı, Adj SS: Düzeltilmiş kareler toplamı, Adj MS: Düzeltilmiş ortalama kareleri, F: İstatistik değeri

ANOVA her bir parametrenin yüzdesel katkısını tanımlamak için deneysel sonuçların yaygın olarak uygulandığı istatistiksel bir yöntemdir. ANOVA yöntemi bize tüm ana faktörlerin önemini ve birbiri ile olan etkileşimlerini test etmemize olanak sağlar. Bu çalışmada kurutma parametrelerinin her birinin katkısını tanımlamak için ortalama S/N değerlerini kullanarak ANOVA metodu uygulandı. Çizelge 4.50’de verilen ANOVA sonuçları ile parametrelerin nem içeriği üzerindeki katkı oranları elde edilmiştir. Bu yüzde oranları Şekil 4.42b’de verilmiştir. İki saatlik kurutma süreci sonunda hava hızının etkisinin %9.6, hava sıcaklığının etkisinin %33.66 ve ürün kalınlığının etkisinin ise %53.02 olduğu elde edilmiştir. Bu sonuca göre nem içeriğine etki eden kurutma parametrelerinin önem sırası kalınlık>sıcaklık>hız olarak elde edilmiştir. Kurutma sürecinde en önemli parametre ürün kalınlığıdır. Artan hava hızı ve sıcaklık ile ortalama S/N oranı da artarken, artan kalınlık değeri ile ortalama S/N değeri azalmaktadır.



**Şekil 4.42.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, sıcaklık ve kalınlık) için nem içeriğinin S/N oranı b) Parametrelerin nem içeriği üzerinde etki yüzdeleri

#### 4.4.6. Büzülme katsayısı için Taguchi analizi

İki saatlik kuruma süresi sonunda üründe meydana gelen hacimsel değişim oranları hesaplanmıştır. Daha sonra Taguchi analizleri ile ANOVA tabloları oluşturulmuştur. 9 farklı deneye ait hesaplanan 3 tekrarlı 27 farklı hacimsel değişim değerleri Minitab 18 programına girilmiştir. Daha sonra Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. Çizelge 4.51’de iki saatlik kuruma süresi sonunda elde edilen hacimsel

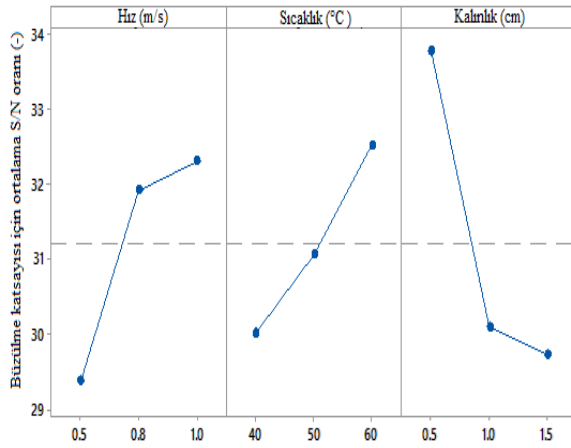
değişim katsayısı (büzülme katsayısı) değerleri, S/N oranları ve standart sapma değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4.51.** 2 saat sonraki kuruma süreci için büzülme katsayısı değerleri ve hesaplanan S/N oranları

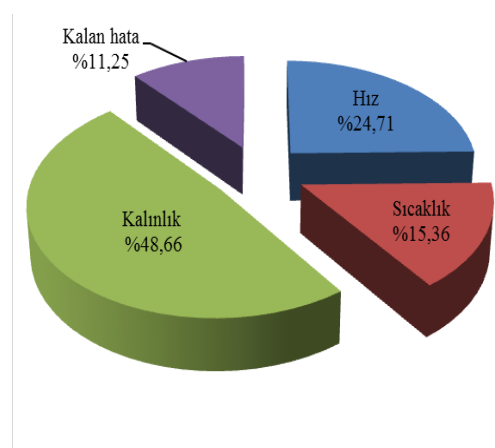
Ortogonal dizi	Büzülme katsayısı (%)	S/N oranı	Standart sapma
111	30.2667	29.5538	2.71539
122	28.4000	28.9738	2.83549
133	30.4667	29.6008	2.74287
212	31.7000	30.0026	1.46257
223	28.9700	29.1014	3.79838
231	67.7333	36.6138	1.07858
313	33.5000	30.4932	1.00000
321	57.0633	35.0966	3.31376
332	36.9333	31.3054	2.56970

**Çizelge 4.52.** Büzülme katsayısına ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız	2	15.093	15.093	7.547	2.20
Sıcaklık	2	9.385	9.385	4.692	1.37
Kalınlık	2	29.717	29.717	14.859	4.33
Kalan hata	2	6.870	6.870	3.435	
Toplam	8	61.065			



(a)



(b)

**Şekil 4.43.** a) Farklı kurutma parametrelerinde (hız, sıcaklık ve kalınlık) büzülme katsayıları için hesaplanan S/N oranları b) Parametrelerin büzülme katsayısı üzerinde etki yüzdeleri

Şekil 4.43a'da verilen ortalama S/N oran analizine göre en büyük hacimsel değişim değeri (optimum koşul), en büyük ortalama S/N oranlarının elde edildiği 1 m/s hava hızı, 60°C hava sıcaklığı ve 0.5 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir. Hava sıcaklığı ve hava hızı arttıkça üründe daha fazla sıvı buharlaşması meydana gelmiştir. Hacimsel değişim oranları için elde edilen ortalama S/N oranlarının değişimi, nem içeriği için elde edilen değerler ile benzer eğilim göstermektedir. 0.8 m/s hız ile 1 m/s hız arasında üründe meydana gelen hacimsel değişim miktarı birbirine yakın olarak değişmektedir. 10°C'lik sıcaklık artışı ile hacimsel değişim doğrusal olarak artmaktadır.

Ortalama deneysel veriler için elde edilen ANOVA değerleri Çizelge 4.52'de verilmiştir. ANOVA tablosu ile elde edilen etki yüzdeleri Şekil 4.43.b'de verilmiştir. Hacimsel değişim üzerinde en fazla katkısı olan parametrenin %48.66 ile ürün kalınlığının olduğu görülmektedir. Hava hızının ve hava sıcaklığının hacimsel değişim üzerindeki katkısı ise sırası ile %24.71 ve %15.36 olarak hesaplanmıştır. Kurutma parametrelerinin hacimsel değişim üzerindeki önem sırası ise şu şekildedir; kalınlık>hız>sıcaklık.

#### **4.4.7. Ekserji verimliliği değerleri için Taguchi analizi**

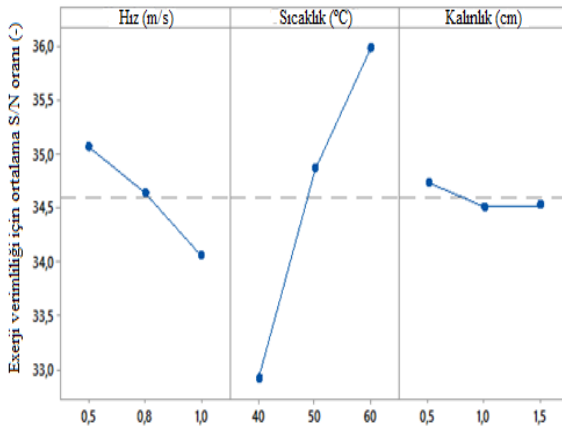
Her bir deney seti için eşitlik (3.61)'den elde edilen ekserji verim değerleri için Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.53'de verilmiştir. Maksimum ekserji verimi en büyük S/N oranında elde edilmiştir. Şekil 4.44'de S/N oranının parametrelere göre değişim grafiği verilmiştir. En fazla ekserji verimi 0.5 m/s hız, 60°C sıcaklık ve 0.5 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir. Ek 2 ve 3'de yapılan çalışmaya ait ölçüm değerleri ve hesaplanan tüm değerler verilmiştir.

**Çizelge 4.53.** 2 saat sonraki kurutma süreci için ekserji verimliliği ve hesaplanan S/N oranı

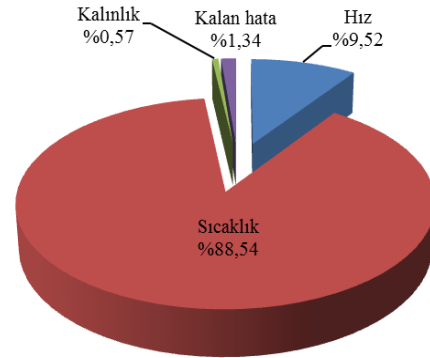
Ortogonal dizi	Ekserji verimliliği (%)	S/N oranı	Standart sapma
111	48.7667	33.7369	2.59294
122	56.9333	35.0793	3.16596
133	65.9900	36.3893	0.32909
212	44.1000	32.8718	1.91572
223	56.5667	35.0490	0.90738
231	63.0667	35.9959	0.20817
313	40.5000	32.1304	1.90000
321	52.8667	34.4612	0.87369
332	60.0667	35.5672	1.49778

**Çizelge 4.54.** Ekserji verimliliğine ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız	2	1.5594	1.5594	0.77968	7.08
Sıcaklık	2	14.4912	14.4912	7.24558	65.82
Kalınlık	2	0.0945	0.0945	0.04723	0.43
Kalan hata	2	0.2202	0.2202	0.11008	
Toplam	8	16.3652			



(a)



(b)

**Şekil 4.44.** a) Farklı kuruma parametreleri ( hız, sıcaklık ve kalınlık) için elde edilen ekserji verimliliği için S/N oranları b) Parametrelerin ekserji verimliliği üzerinde etki yüzdeleri

Ekserji veriminin sıcaklık artışı ile kademeli olarak arttığı görülmektedir. Yapılan deneylerin ekserji verimlerinin %44.1 ile %65.9 arasında değiştiği görülmektedir.

Literatürde de tepsili kurutucuda 40-93°C sıcaklık aralığında ve 0.5-1.5 m/s hava hızlarında yapılan gıda ürünlerinin kurutulması işlemlerinde hesaplanan ekserji verimlerinin %3.17 ile %100 arasında değiştiği görülmektedir (Aghbashlo ve ark. 2013).

Çizelge 4.54'de deneyden elde edilen ortalama ekserji verimlerinin ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Parametrelerin ekserji verimi üzerindeki etki yüzdeleri ise Şekil 4.44b'de verilmiştir. Ekserji verimine en büyük katkı %88,54 ile sıcaklık parametresinde elde edilmiştir. %9.52 hız ve %0.57 kalınlık etkisinin olduğu görülmektedir.

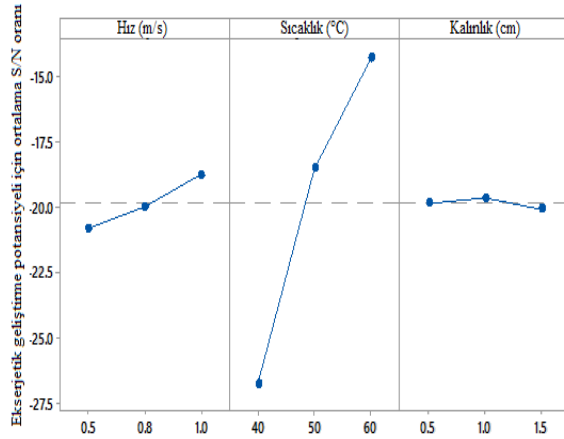
#### **4.4.8. Ekserjetik gelişim potansiyeli değerleri için Taguchi analizi**

Her bir deney seti için ekserjetik gelişim potansiyeli değerleri eşitlik (3.62)'den elde edilmiştir. Taguchi yöntemi uygulanarak elde edilen S/N oran değerleri ve standart sapma değerleri Çizelge 4.55'de verilmiştir. En fazla ekserjetik gelişim potansiyeli en büyük S/N oranının elde edildiği 332 (1 m/s, 60°C, 1 cm) numaralı deney setinde tespit edilmiştir. Şekil 4.45'de 3 farklı parametre için seçilen değerlere ait S/N oran değerlerinin değişimi verilmiştir. Hava hızı ve sıcaklık artışının ekserjetik gelişim potansiyel değerini artırdığı ürün kalınlığı değişiminin ise etkili bir parametre olmadığı görülmektedir. Optimum değerler 1 m/s hız, 60°C sıcaklık ve 1 cm kalınlık değerlerinde elde edilmiştir. Ekserjetik gelişim potansiyel değerinin en fazla olduğu durumda kurutucunun ekserji yıkım değerinin fazla olduğu söylenebilir.

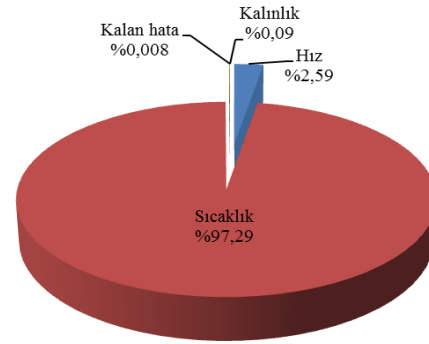


**Çizelge 4.55.** 2 saat sonraki kurutma süreci için ekserjetik gelişim potansiyeli ve hesaplanan S/N oranı

Ortogonal dizi	Ekserjetik gelişim potansiyeli (J/kg)	S/N oranı	Standart sapma
111	0.041403	-27.6745	0.0017134
122	0.112717	-19.2055	0.0197719
133	0.167533	-15.5213	0.0032185
212	0.046156	-26.7398	0.0024834
223	0.114179	-18.8603	0.0042953
231	0.191564	-14.3570	0.0037052
313	0.051467	-25.7874	0.0023091
321	0.134467	-17.4394	0.0049635
332	0.223482	-13.0189	0.0046365



(a)



(b)

**Şekil 4.45.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, sıcaklık ve kalınlık) için elde edilen ekserjetik gelişim potansiyeline ait S/N oranları b) Parametrelerin ekserjetik verimliliği üzerinde etki yüzdeleri

Ekserjetik gelişim potansiyel değerleri için elde edilen ANOVA analizi sonuçları Çizelge 4.56'da verilmiştir. Anova sonuçlarından elde edilen parametrelerin yüzde oranları Şekil 4.45b'de verilmiştir. En fazla katkının %97.29 ile sıcaklık parametresinde olduğu görülmektedir. %2.59 ve %0.09 ise hız ve kalınlık parametrelerinin katkı değerleri olarak elde edilmektedir. Parametrelerin katkı sırası sıcaklık>hız>kalınlık şeklinde elde edilmiştir.

**Çizelge 4.56.** Ekserjetik gelişim potansiyeline ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız	2	6.404	6.404	3.202	309.90
Sıcaklık	2	240.057	240.057	120.029	11616.20
Kalınlık	2	0.244	0.244	0.122	11.80
Kalan hata	2	0.021	0.021	0.010	
Toplam	8	246.726			

#### 4.4.9. Taguchi analizi doğrulama çalışması

Deneysel olarak elde edilen sonuç çıktıları Taguchi yöntemi ile yapılan analiz sonucunda aynı zamanda tahmin edilebilir. Çizelge 4.57’de 0.5 m/s hız, 60 °C sıcaklık ve 1.5 cm kalınlık için Taguchi metodu ile elde edilen tahmini sonuç değerleri ile deneysel çalışmaya ait sonuç değerleri verilmiştir. Deneysel değerler ile program yardımı ile hesaplanan değerler arasındaki hata yüzdeleri de hesaplanmıştır. En yüksek hata değeri büzülme katsayısı değeri için elde edilmiştir.

**Çizelge 4.57.** Farklı sonuç çıktılarına ait tahmini hata değerleri

Çıktı değerleri	Tahmini S/N oranı	Tahmini değer	Deneysel değer	Hata oranı (%)
Nem içeriği (gr su /gr kuru madde)	-17.2569	7.27963	7.06667	2.92
Büzülme katsayısı (%)	29.2276	29.0604	30.4667	4.61
Ekserji verimi (%)	36.4020	65.9885	65.9900	0.0022
Ekserjetik gelişim potansiyeli (J/kg)	-15.4660	0.171811	0.167533	2.55

#### 4.5. Gıda Ürününün Işınımlı Kurutucuda Kurutulmasının Optimizasyon Çalışması

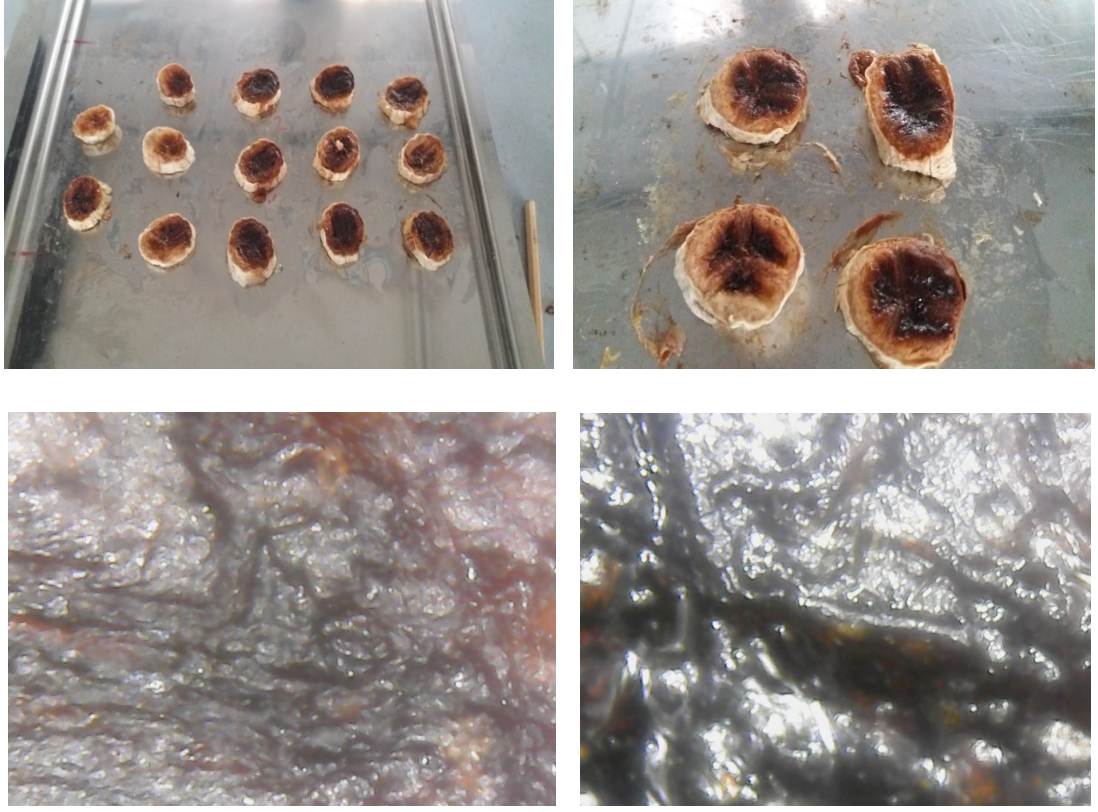
Bu çalışmada muzun kurutma kinetiği ışınımlı kurutucuda deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı kurutma havası hızı, ışınım gücü ve ışınım lambasına olan uzaklık parametrelerinin etkisini incelemek için Taguchi analizleri yapılmıştır.

#### 4.5.1. Başlangıç nem içeriğinin tespiti

İlk nem tayininin belirlenmesi için  $100\pm 0.05$  gr ağırlığındaki muz dilimleri kurutma cihazına konularak 500W ışınlam lambası gücünde 0.3 m/s hava hızında kurutulmuştur. Son iki ölçüm arasındaki fark %0.04 oluncaya kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Yapılan kurutma sonunda ürünün kuru ağırlığının 15.5 gr olarak kaldığı görülmüştür. Ortalama başlangıç ürün nem içeriği yaş bazda %84.5, kuru bazda ise yaklaşık 5.45 (gr su/gr kuru madde) olarak elde edilmiştir.

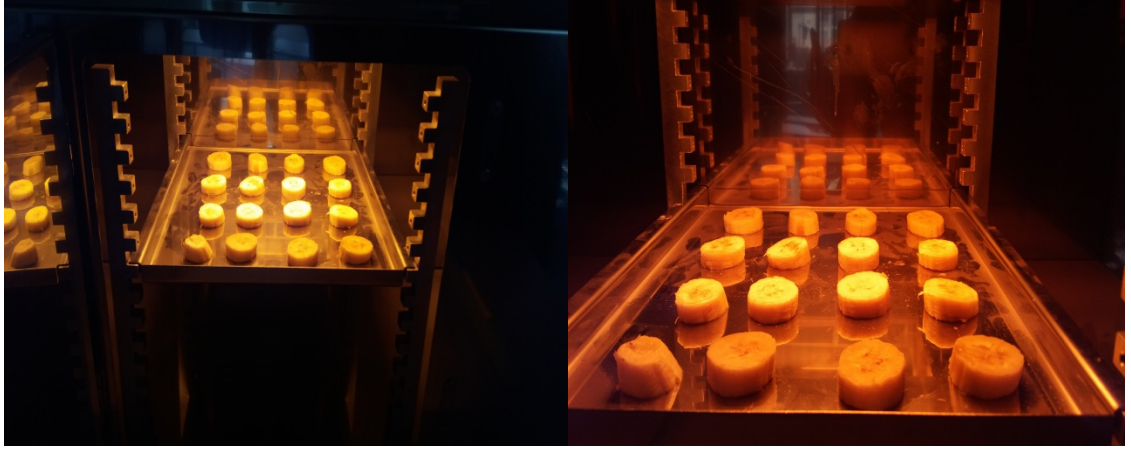
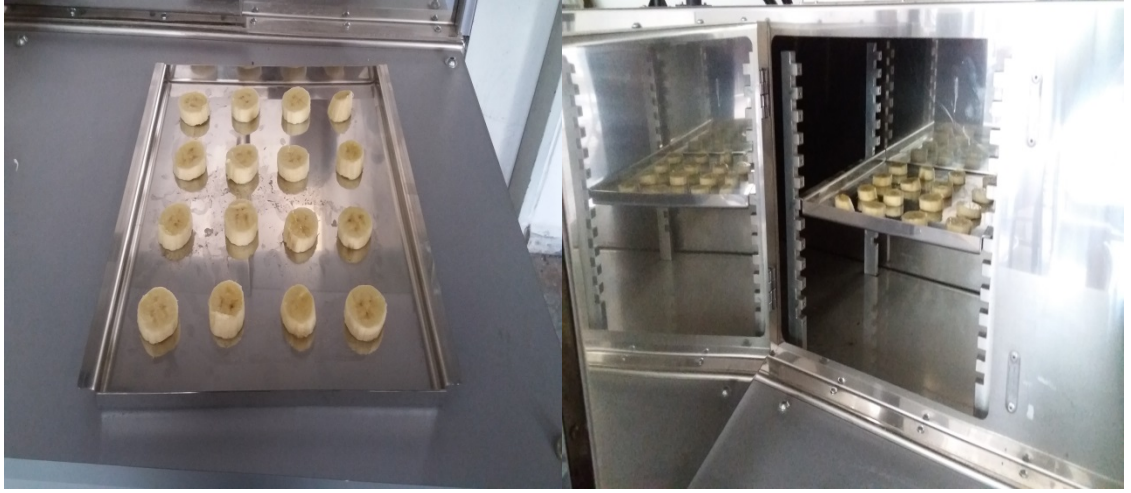
#### 4.5.2. Deneilerin uygulanması

Öncelikle yapılacak çalışmada kurutma üzerine etki eden parametreler, ışınlam gücü, hava hızı ve ışınlam lambasının ürüne olan uzaklığı seçilmiştir. Her bir parametreden 3 değer seçilmesi için ışınlam lambasına en yakın tepsiye (9 cm) ürün yerleştirilerek deneme çalışmalarına başlanmıştır. 1 kW ışınlam gücünden ve ışınlam lambasına en yakın mesafe olan 9 cm den başlanılarak aşamalı olarak uzaklık artırılarak çalışmalar yapılmıştır. 0.3 m/s hava hızında 500 W ışınlam lambası gücünde ürün üzerinde kısa sürede yanma meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.46). Son olarak 400 W ışınlam lambası gücünde 20 cm uzaklıkta ürün üzerinde yaklaşık 1 saat sonra yanma meydana gelmiştir. Bunun üzerine cihazı etkin kullanmak için ışınlam lambası gücü 250, 300 ve 350 W hava hızı 0.3, 0.6 ve 0.9 m/s ve tepsinin ışınlam lambasına olan uzaklığı 20, 26 ve 32 cm seçilmiştir. 350 W için yapılan deneyde ise nem içeriği %57.5'a ulaştığında yüzey üzerinde kararmalar ortaya çıkmıştır. Dolayısı ise tüm deneylerde bu nem içeriğine ulaşma sürelerine göre analizler yapılmıştır. Kurutmada ürün renk ölçümü 0.03 hassasiyetine sahip PCE renk ölçümü cihazı ile yapılmıştır. Ekserji verimini hesaplamak için kurutmanın başlangıcında ve sonunda tünel giriş ve çıkış sıcaklık ve nem içeriği değerleri ölçülmüştür.



**Şekil 4.46.** Yüzeği yanmış olan muzun normal görüntüsü ve 500 kat büyütülmüş görseli

Bursa’da yerel bir marketten alınan muzlar öncelikle buzdolabında 4°C’de 24 saat boyunca muhafaza edilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar 3 saat laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Öncelikle muzlar 1 cm kalınlığında dilimlenerek tepsiye dizilmiştir. Ürün ağırlığı  $100\pm 0.5$  gr ölçülmüştür. Bu arada sürekli rejime ulaşıncaya kadar deney cihazı çalıştırılmıştır. Boş tepsilerin ağırlığı ölçülerek kaydedilmiştir. İstenen şartlara ulaştığı zaman tepsi cihaza yerleştirilmiştir (Şekil 4.47). Deney sırasında ürünün ağırlığındaki değişim 0.05 gr hassasiyete sahip dijital terazi yardımı ile periyodik olarak kaydedilmiştir. Kurutulmuş olan ürünün resmi Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.47. Kurutulacak olan muzun kurutucuya yerleştirilmesi





**Şekil 4.48.** Kurutma sonrası muzun görüntüsü

### 4.5.3. Taguchi analizi

Bu çalışmada kurutma sürecine etki eden parametreleri (hava hızı, ışınlam gücü ve ışınlam lambasına olan uzaklık) optimize etmek için Taguchi metodu kullanıldı. Kurutma havası hızı olarak 0.3, 0.6 ve 0.9 m/s, ışınlam lambası gücü olarak 250, 300 ve 350 W ve ışınlam lambasına olan uzaklık olarak ise 20, 26 ve 32 cm değerleri alındı (Çizelge 4.58). Kurutma parametrelerinin seviyelerini gösteren örneklerin numaralandırılması ve Taguchi L9 ortogonal dizi kullanılarak seçilen deneysel düzen Çizelge 4.59'da verilmiştir. Burada verilen değerler Minitab programına girilmiştir. 27 farklı değer ile Taguchi analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde tepsi konumu olarak verilen 1 (20 cm), 2 (26 cm) ve 3 (32 cm) olarak ifade edilmiştir.

Bu çalışmada maksimum (ekserji verimliliği, enerji verimi, renk değişimi, kurutucu performans oranı) ve minimum (kuruma süresi, enerji tüketimi, özgül enerji tüketimi) amaç fonksiyonları tanımlandı. Deneyden elde edilen veriler Ek-3'de verilmiştir.

**Çizelge 4.58.** Çalışmada kullanılan kurutma parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Serbestlik derecesi	Level 1	Level 2	Level 3
Işınım gücü (W)	2	250	300	350
Hava hızı (m/s)	2	0.3	0.6	0.9
Uzaklık (cm)	2	20	26	32
Toplam SD	6			

**Çizelge 4.59.** Taguchi ortogonal L9 dizisi kullanılarak seçilen parametreler ve seviyeleri

Ortogonal dizi	Deney no	Hız (m/s)	Işınım gücü(W)	Uzaklık (cm)
111	1	0.3	250	20
122	2	0.3	300	26
133	3	0.3	350	32
212	4	0.6	250	26
223	5	0.6	300	32
231	6	0.6	350	20
313	7	0.9	250	32
321	8	0.9	300	20
332	9	0.9	350	26

#### 4.5.4. Kuruma süresi için optimizasyon çalışması

9 farklı deneye ait hesaplanan 3 tekrarlı 27 farklı kuruma süresi değerleri Minitab 18 programına girilmiştir. Daha sonra Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. Çizelge 4.60 elde edilen kuruma süresini ve hesaplanan S/N oranlarını göstermektedir. En büyük ortalama S/N oranı en küçük kuruma süresi değerini göstermektedir. Şekil 4.49a'da verilen ortalama S/N oran analizine göre en az kuruma süresi (optimum koşul), en büyük ortalama S/N oranlarının elde edildiği 0.3 m/s hava hızı, 350 W ışınım gücü ve (1) 20 cm ışınım lambasına olan uzaklıkta elde edilmiştir. ANOVA yöntemi bize tüm ana faktörlerin önemini ve birbiri ile olan etkileşimlerini test etmemize olanak sağlar. Bu çalışmada kurutma parametrelerinin her birinin katkısını tanımlamak için ortalama S/N değerlerini kullanarak ANOVA metodu uygulandı. Çizelge 4.61'de verilen ANOVA sonuçları ile parametrelerin kuruma süresi üzerindeki katkı oranları elde edilmiştir. Bu yüzde oranları Şekil 4.49b'de verilmiştir. Kurutma süreci sonunda hava hızının etkisinin %11.6, ışınım gücünün etkisinin %26.68 ve ışınım lambasına olan uzaklığın etkisinin ise %57.3 olduğu elde edilmiştir. Bu sonuca göre kuruma süresine etki eden kurutma parametrelerinin önem sırası uzaklık>ışınım

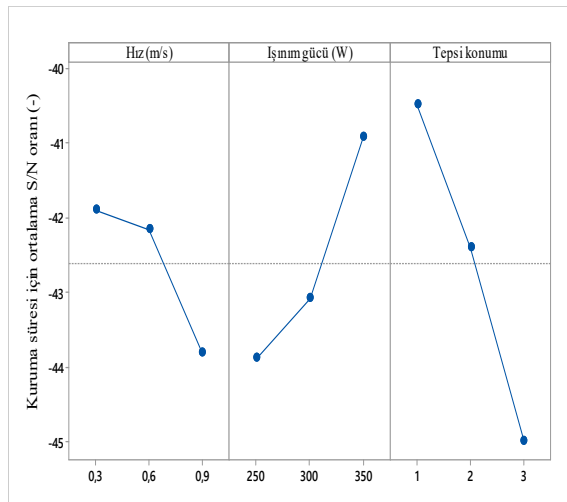
gücü>hız olarak elde edilmiştir. Kurutma sürecinde en önemli parametre ürünün ışınım lambasına olan uzaklıktır. Artan hava hızı ve tepsi konumu ile ortalama S/N oranı azalırken, artan ışınım gücü değeri ile ortalama S/N değeri artmaktadır.

**Çizelge 4.60.** Kurutma süreci için kuruma süresi ve hesaplanan S/N oranı

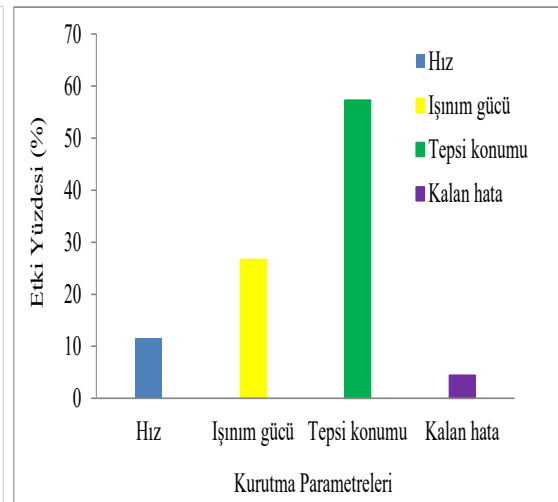
Ortogonal dizi	Kuruma süresi (dakika)	S/N oranı	Standart sapma
111	110	-40.8288	2.0000
122	121	-41.6559	1.0000
133	144.3	-43.1877	1.5275
212	155.6	-43.8444	2.0816
223	173.3	-44.7779	1.5275
231	78	-37.8438	2.0000
313	223	-46.9665	2.6457
321	137.6	-42.7775	2.5166
332	121.3	-41.6801	1.5275

**Çizelge 4.61.** Kuruma süresine ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız (m/s)	2	6.477	6.477	3.239	3.20
Işınım gücü (W)	2	14.206	14.206	7.103	7.02
Tepsi konumu	2	30.521	30.521	15.260	15.08
Kalan hata	2	2.024	2.024	1.012	
Toplam	8	53.228			



(a)



(b)

**Şekil 4.49.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınım gücü ve tepsi konumu) için kuruma süresinin S/N oranı b) Parametrelerin kuruma süresi üzerindeki etki yüzdeleri



#### 4.5.5. Toplam renk değişimi için optimizasyon alışması

Her bir deney seti için elde edilen toplam renk değişimi değerleri (eşitlik 3.16) için Taguchi metodu kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar izelge 4.62'de verilmiştir. Maksimum renk değişimi en büyük S/N oranında elde edilmiştir. Şekil 4.50a'da S/N oranının parametrelere göre değişim grafiği verilmiştir. En fazla renk değişimi 0.3 m/s hava hızı, 350 W ışınım gücü ve (1) 20 cm ışınım lambasına olan uzaklıkta elde edilmiştir.

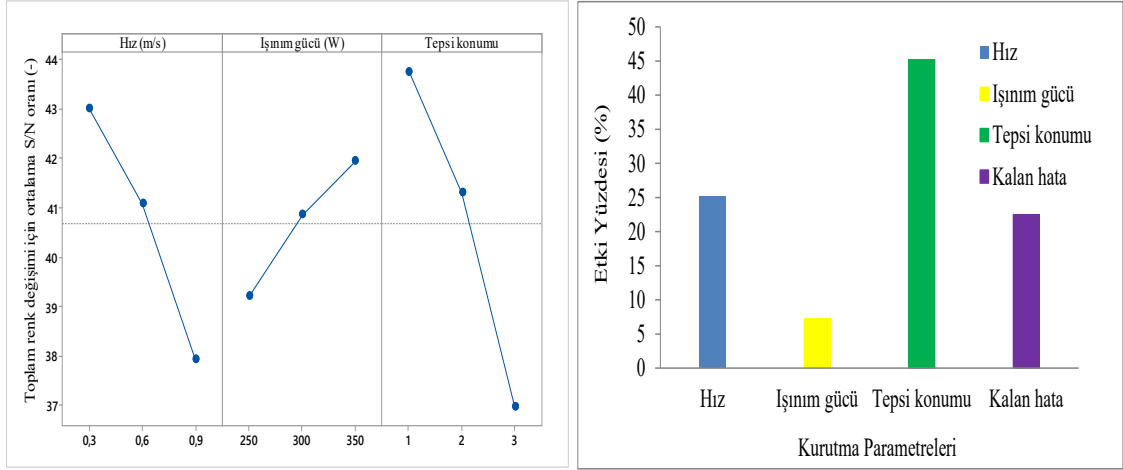
Renk değişimlerinin sıcaklık artışı ile kademeli olarak arttığı görülmektedir. Yapılan deneylerin toplam renk değişimlerinin 33.94 ile 164.173 arasında değiştiği görülmektedir. Çizelge 4.63'de deneyden elde edilen ortalama renk değişimlerinin ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Parametrelerin renk değişimi üzerindeki etki yüzdeleri ise Şekil 4.50b'de verilmiştir. Toplam renk değişimine en büyük katkı %45.19 ile tepsi konumu (ışınım lambasına olan uzaklık) parametresinde elde edilmiştir. %25.1 hız ve %7.23 ışınım gücü etkisinin olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.62.** Toplam renk değişim miktarı ve hesaplanan S/N oranı

Ortogonal dizi	Toplam renk değişimi	S/N oranı	Standart sapma
111	164.173	44.2859	8.04930
122	120.803	41.5965	8.71008
133	147.527	43.1454	22.6266
212	139.940	42.8149	15.8850
223	82.3667	37.2374	28.1111
231	144.843	43.1972	7.18774
313	33.940	30.5734	2.35196
321	155.693	43.7665	15.1978
332	99.850	39.4964	25.4716

**Çizelge 4.63.** Toplam renk değişimine ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız (m/s)	2	39.20	39.20	19.599	1.12
ışınım gücü (W)	2	11.27	11.27	5.635	0.32
Tepsi konumu	2	70.39	70.39	35.193	2.02
Kalan hata	2	34.89	34.89	17.443	
Toplam	8	155.74			



(a) (b)  
**Şekil 4.50.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınım gücü ve tepsi konumu) için toplam renk değişiminin S/N oranı b) Parametrelerin toplam renk değişimi üzerindeki etki yüzdeleri

#### 4.5.6. Enerji tüketimi için optimizasyon çalışması

Enerji tüketim değerleri eşitlik (3.85) kullanılarak elde edilmiştir. Taguchi yöntemi uygulanarak elde edilen S/N oran değerleri ve standart sapma değerleri Çizelge 4.64'de verilmiştir. En az enerji tüketim değeri en büyük S/N oranının elde edildiği 0,3 m/s hava hızı, 350 W ışınım gücü ve (1) 20 cm ışınım lambasına olan uzaklıkta tespit edilmiştir. Şekil 4.51a'da 3 farklı parametre için seçilen değerlere ait S/N oran değerlerinin değişimi verilmiştir.

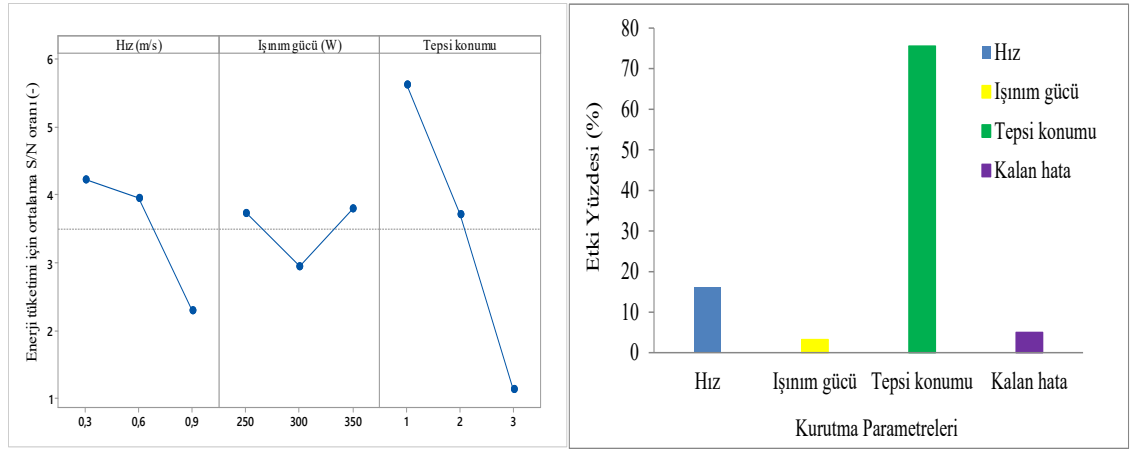
Enerji tüketim değerleri için elde edilen ANOVA analizi sonuçları Çizelge 4.65'de verilmiştir. Anova sonuçlarından elde edilen parametrelerin yüzde oranları Şekil 4.51b'de verilmiştir. En fazla katkının %75,58 ile tepsi konumunda olduğu görülmektedir. %16,14 ve %3,27 ise hız ve ışınım gücü parametrelerinin katkı değerleri olarak elde edilmektedir. Parametrelerin katkı sırası tepsi konumu>hız>ışınım gücü şeklinde elde edilmiştir.

**Çizelge 4.64.** Enerji tüketimi ve hesaplanan S/N oranı

Ortogonal dizi	Enerji tüketimi (kwh)	S/N oranı	Standart sapma
111	0.457667	6.78824	0.0075056
122	0.604667	4.36952	0.0045092
133	0.840000	1.51400	0.0100000
212	0.647667	3.77237	0.0092916
223	0.866333	1.24607	0.0077675
231	0.454000	6.85668	0.0125300
313	0.928667	0.642385	0.0111505
321	0.688333	3.24306	0.0125831
332	0.706667	3.01523	0.0090738

**Çizelge 4.65.** Enerji tüketimine ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız (m/s)	2	6.521	6.521	3.2603	3.23
Işınım gücü (W)	2	1.324	1.324	0.6620	0.66
Tepsi konumu	2	30.537	30.537	15.2687	15.12
Kalan hata	2	2.019	2.019	1.0095	
Toplam	8	40.401			



**Şekil 4.51.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınım gücü ve tepsi konumu) için enerji tüketiminin S/N oranı b) Parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki etki yüzdeleri

#### 4.5.7. Ekserji verimi için optimizasyon çalışması

Eşitlik (3.81) kullanılarak ekserji verimi hesaplanmıştır. Ekserji veriminin hesaplanmasında Matlab programı kullanılmıştır (Ek-6). Bu ifadenin hesaplanmasında kanalın kesit alanı  $0.1089 \text{ m}^2$ , ışınım lambası yüzey alanı  $0.0157 \text{ m}^2$ , ürünün yüzey alanı  $0.0007 \text{ m}^2$ , ışınım lambasının emissivity değeri 0.85, ürünün emissivity değeri 0.9

alınmış olup havanın termofiziksel özellikleri ise Ek 4’de verilmiştir (Çengel 2002, Phoungchandang ve Woods 2000). Işınım lambasından ürüne olan görüş faktörü ( $F_{IR\_M}$ ) eşitlik (3.67) kullanılarak her 3 uzaklık (20, 26, 32 cm) için sırası ile 0.0254, 0.0198 ve 0.0156 olarak hesaplanmıştır. Işınım lambasından kurutma çemberine olan görüş faktörü ( $F_{IR\_DC}$ ) eşitlik (3.68) yardımı ile hesaplanmıştır. Elde edilen değerler 3 uzaklık için sırası ile 0.9746, 0.9802 ve 0.9844’tür. Son olarak eşitlik (3.65) kullanılarak ürünün kurutma çemberine olan görüş faktörü ( $F_{M\_DC}$ ) 0.1224 olarak hesaplanmıştır. Deneyden elde edilen ölçümler ve çıktı değerleri toplu olarak Ek 4 ve Ek 5’de verilmiştir.

Çizelge 4.66, elde edilen ekserji verimini ve hesaplanan S/N oranlarını göstermektedir. En büyük ortalama S/N oranı en büyük ekserji verimi değerini göstermektedir. Şekil 4.52a’da verilen ortalama S/N oran analizine göre en fazla ekserji verimi (optimum koşul), en büyük ortalama S/N oranlarının elde edildiği 0.3 m/s hava hızı, 350 W ışınım gücü ve (1) 20 cm ışınım lambasına olan uzaklıkta elde edilmiştir.

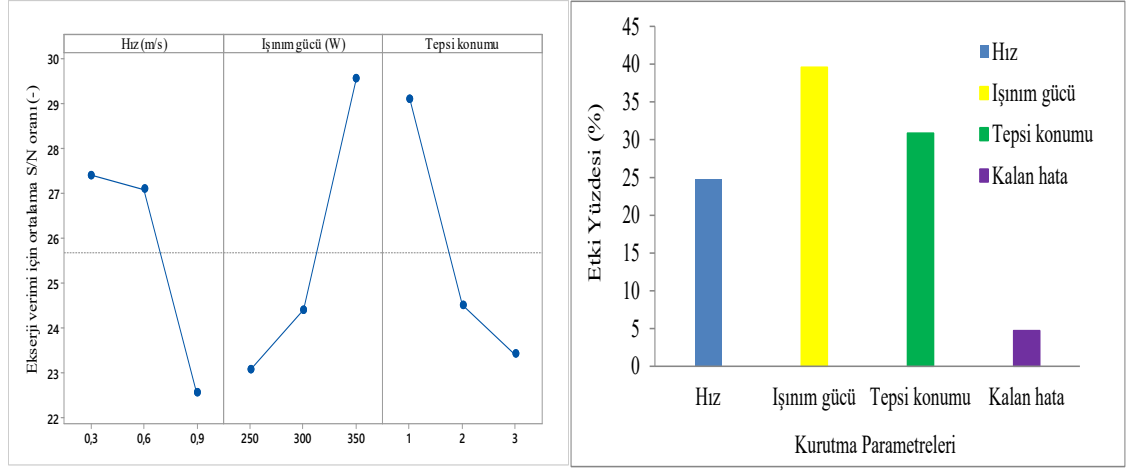
Çizelge 4.67’de verilen ANOVA sonuçları ile parametrelerin ekserji verimi üzerindeki katkı oranları elde edilmiştir. Bu yüzde oranları Şekil 4.52b’de verilmiştir. Kurutma süreci sonunda hava hızının etkisinin %24.81, ışınım gücünün etkisinin %39.61 ve ışınım lambasına olan uzaklığın etkisinin ise %30.86 olduğu elde edilmiştir. Bu sonuca göre kuruma süresine etki eden kurutma parametrelerinin önem sırası ışınım gücü>ışınım lambasına olan uzaklık>hız olarak elde edilmiştir. Kurutma sürecinde ekserji verimi için en önemli parametre ürünün ışınım gücüdür.

**Çizelge 4.66.** Ekserji verimi ve hesaplanan S/N oranı.

Ortogonal dizi	Ekserji verimi (%)	S/N oranı	Standart sapma
111	26.8967	28.5887	0.661085
122	15.2067	23.6398	0.156312
133	31.5333	29.9746	0.301386
212	16.3633	24.2760	0.205994
223	15.6900	23.9118	0.137477
231	45.0867	33.0754	1.13425
313	6.6000	16.3889	0.10000
321	19.2233	25.6737	0.353034
332	19.1167	25.6269	0.237978

**Çizelge 4.67.** Ekserji verimine ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız (m/s)	2	43.975	43.975	21.988	5.28
Işınım gücü (W)	2	70.199	70.199	35.100	8.43
Tepsi konumu	2	54.679	54.679	27.339	6.56
Kalan hata	2	8.331	8.331	4.165	
Toplam	8	177.184			



(a)

(b)

**Şekil 4.52.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınım gücü ve tepsi konumu) için ekserji verimine ait S/N oranı b) Parametrelerin ekserji verimi üzerindeki etki yüzdeleri

#### 4.5.8. Isıl verim için optimizasyon çalışması

Çizelge 4.68’de kuruma süresi sonunda elde edilen ısıl verimin değerleri (eşitlik 3.87), S/N oranları ve standart sapma değerleri verilmiştir. Şekil 4.53a’da verilen ortalama S/N oran analizine göre en büyük ısıl verim değeri (optimum koşul), en büyük ortalama S/N oranlarının elde edildiği 0.3 m/s hava hızı, 250-350 W ışınım gücü ve (1) 20 cm ışınım lambasına olan uzaklıkta elde edilmiştir.

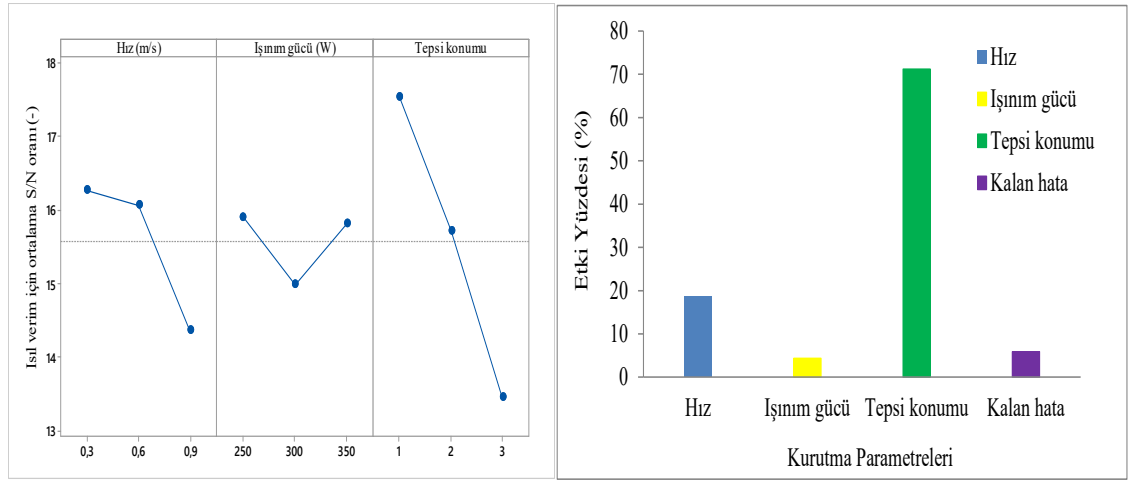
Yapılan deneylerin ısıl verim değerlerinin %4.5 ile %8.6 arasında değiştiği görülmektedir. Çizelge 4.69’da deneyden elde edilen ortalama ısıl verim değerlerinin ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Parametrelerin ısıl verim üzerindeki etki yüzdeleri ise Şekil 4.53b’de verilmiştir. Isıl verim üzerinde en büyük katkı %71.19 ile tepsi konumu (ışınım lambasına olan uzaklık) parametresinde elde edilmiştir. %18.63 hız ve %4.33 ışınım gücü etkisinin olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.68.** Isıl verim ve hesaplanan S/N oranı

Ortogonal dizi	Isıl verim (%)	S/N oranı	Standart sapma
111	8.65667	18.7447	0.140119
122	6.54333	16.3156	0.0450925
133	4.86667	13.7439	0.0450925
212	6.23667	15.8973	0.0873689
223	4.75667	13.5454	0.0416333
231	8.66667	18.7512	0.225462
313	4.50000	13.0600	0.100000
321	5.68667	15.0942	0.105987
332	5.58333	14.9363	0.0737111

**Çizelge 4.69.** Isıl verime ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız (m/s)	2	6.563	6.563	3.2814	3.19
Işınım gücü (W)	2	1.528	1.528	0.7639	0.74
Tepsi konumu	2	25.076	25.076	12.5378	12.19
Kalan hata	2	2.057	2.057	1.0287	
Toplam	8	35.224			



**Şekil 4.53.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınım gücü ve tepsi konumu) için ısı verime ait S/N oranı b) Parametrelerin ısı verim üzerindeki etki yüzdeleri

#### 4.5.9. Özgül enerji tüketimi için optimizasyon çalışması

Çizelge 4.70, elde edilen özgül enerji tüketimini (eşitlik 3.86) ve hesaplanan S/N oranlarını göstermektedir. En büyük ortalama S/N oranı en küçük özgül enerji tüketim değerini göstermektedir. Şekil 4.54a'da verilen ortalama S/N oran analizine göre en az

özgül enerji tüketimi (optimum koşul), en büyük ortalama S/N oranlarının elde edildiği 0.3 m/s hava hızı, 350 W ışınım gücü ve (1) 20 cm ışınım lambasına olan uzaklıkta elde edilmiştir.

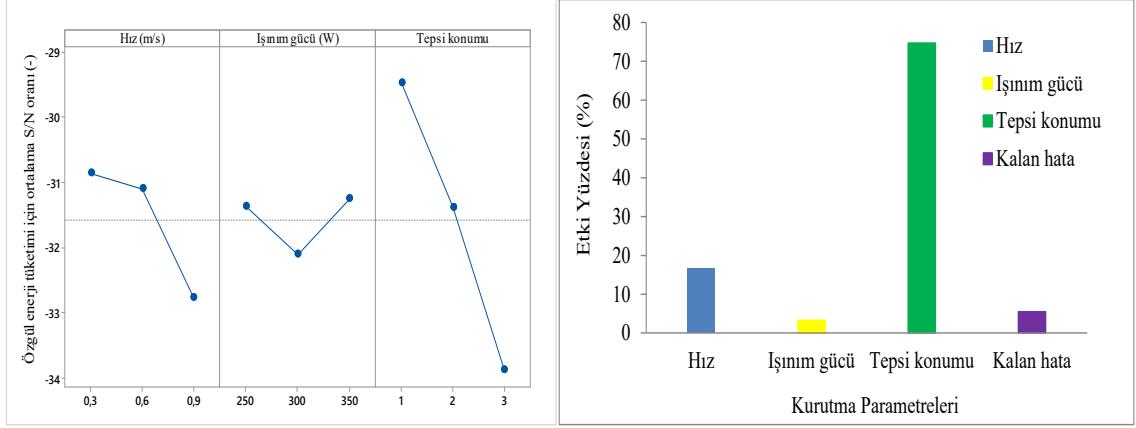
Çizelge 4.71’de verilen ANOVA sonuçları ile parametrelerin özgül enerji tüketimi üzerindeki katkı oranları elde edilmiştir. Bu yüzde oranları Şekil 4.54b’de verilmiştir. Kurutma süreci sonunda hava hızının etkisinin %16.55, ışınım gücünün etkisinin %3.29 ve ışınım lambasına olan uzaklığın etkisinin ise %74.72 olduğu elde edilmiştir. Bu sonuca göre kuruma süresine etki eden kurutma parametrelerinin önem sırası uzaklık> hız > ışınım gücü olarak elde edilmiştir. Kurutma sürecinde en önemli parametrenin ürünün ışınım lambasına olan uzaklığının olduğu tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.70.** Özgül enerji tüketimi ve hesaplanan S/N oranı

Ortogonal dizi	Özgül enerji tüketimi (MJ/kg)	S/N oranı	Standart sapma
111	26.0367	-28.3123	0.386825
122	34.4267	-30.7381	0.303535
133	47.3833	-33.5128	0.454459
212	37	-31.3646	0.531131
223	48.4533	-33.7067	0.435584
231	25.6867	-28.1964	0.717101
313	52.5967	-34.4196	0.631216
321	39.1967	-31.8659	0.714586
332	39.8967	-32.0192	0.512282

**Çizelge 4.71.** Özgül enerji tüketimine ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız (m/s)	2	6.537	6.537	3.2685	3.05
Işınım gücü (W)	2	1.301	1.301	0.6504	0.61
Tepsi konumu	2	29.498	29.498	14.7490	13.78
Kalan hata	2	2.141	2.141	1.0707	
Toplam	8	39.477			



(a)

(b)

**Şekil 4.54.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınım gücü ve tepsi konumu) için özgül enerji tüketimine ait S/N oranı b) Parametrelerin özgül enerji tüketimi üzerindeki etki yüzdeleri

#### 4.5.10. Kurutucu performans oranı için optimizasyon çalışması

Kurutucu performans değerleri eşitlik 3.88 kullanılarak elde edilmiştir. Taguchi yöntemi uygulanarak elde edilen S/N oran değerleri ve standart sapma değerleri Çizelge 4.72’de verilmiştir. En fazla kurutucu performans oranı değeri en büyük S/N oranının elde edildiği 0.3 m/s hava hızı, 350 W ışınım gücü ve (1) 20 cm ışınım lambasına olan uzaklıkta tespit edilmiştir. Şekil 4.55a’da 3 farklı parametre için seçilen değerlere ait S/N oran değerlerinin değişimi verilmiştir.

Kurutucu performans oranı değerleri için elde edilen ANOVA analizi sonuçları Çizelge 4.73’de verilmiştir. Anova sonuçlarından elde edilen parametrelerin yüzde oranları Şekil 4.55b’de verilmiştir. En fazla katkının %59.32 ile ışınım gücünde olduğu görülmektedir. %14.72 ve %10.4 ise hız ve tepsi konumu parametrelerinin katkı değerleri olarak elde edilmektedir. Parametrelerin katkı sırası ışınım gücü >hız> tepsi konumu şeklinde elde edilmiştir.

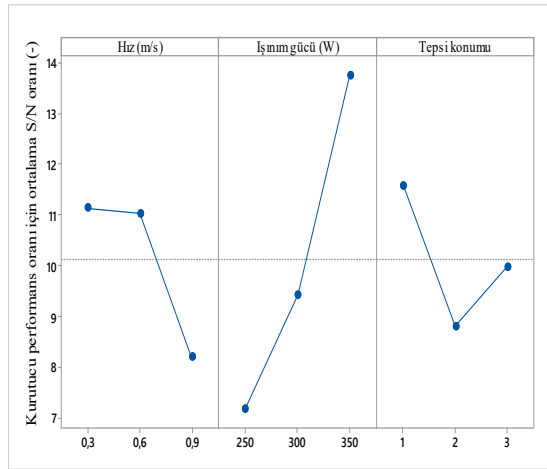


**Çizelge 4.72.** Kurutucu performans oranı (ekserji verimi/ısııl verim) ve hesaplanan S/N oranı

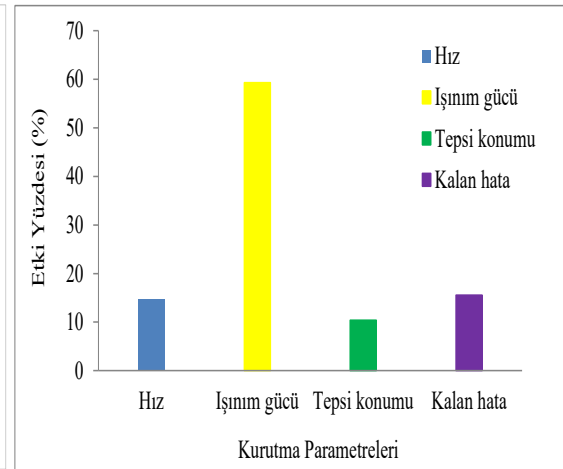
Ortogonal dizi	Kurutucu performans oranı	S/N oranı	Standart sapma
111	3.10546	9.84167	0.0307644
122	2.32396	7.32445	0.0087628
133	6.47964	16.2302	0.0623664
212	2.62377	8.37847	0.0049543
223	3.29853	10.3664	0.0026161
231	5.20241	14.3240	0.0204170
313	1.46682	3.32710	0.0103763
321	3.38043	10.5794	0.0009736
332	3.42391	10.6904	0.0074829

**Çizelge 4.73.** Kurutucu performans oranına ait S/N oranları için ANOVA tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Hız (m/s)	2	16.59	16.59	8.295	0.95
Işınım gücü (W)	2	66.84	66.84	33.418	3.81
Tepsi konumu	2	11.72	11.72	5.859	0.67
Kalan hata	2	17.53	17.53	8.766	
Toplam	8	112.67			



(a)

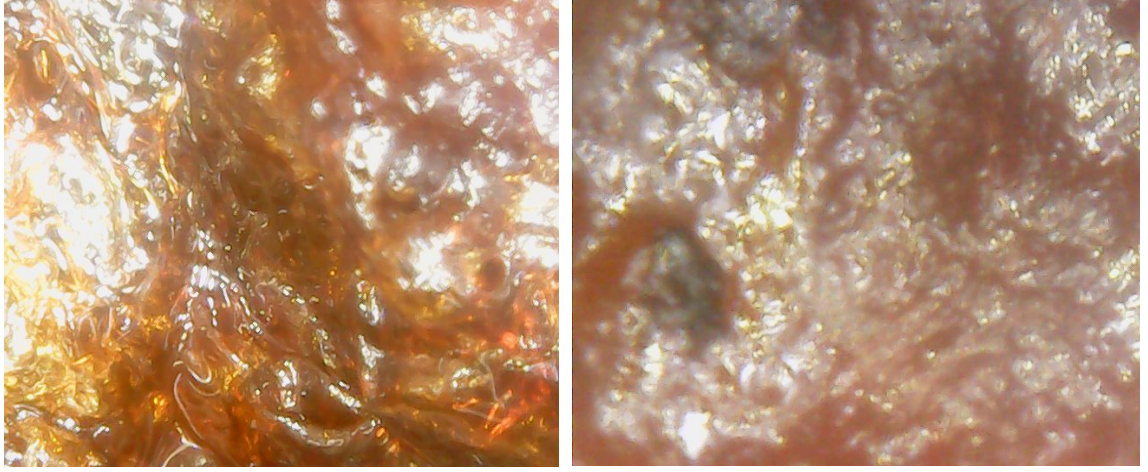


(b)

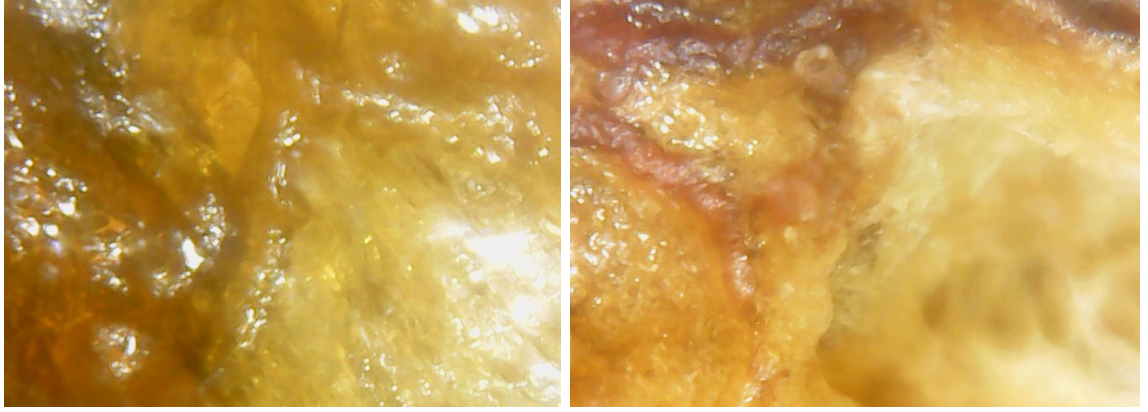
**Şekil 4.55.** a) Farklı kurutma parametreleri (hız, ışınım gücü ve tepsi konumu) için kurutucu performans oranına ait S/N oranı b) Parametrelerin kurutucu performans oranı üzerindeki etki yüzdeleri

Yapılan parametrik çalışma sonucunda sonuç çıktıları üzerinde optimum kurutma koşulları 0.3 m/s hız, 350 W ışınım gücü ve ışınım lambasına en yakın uzaklık 20 cm olarak tespit edilmiştir. Işınım lambasına olan uzaklığın kurutmaya ait sonuç çıktıları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.

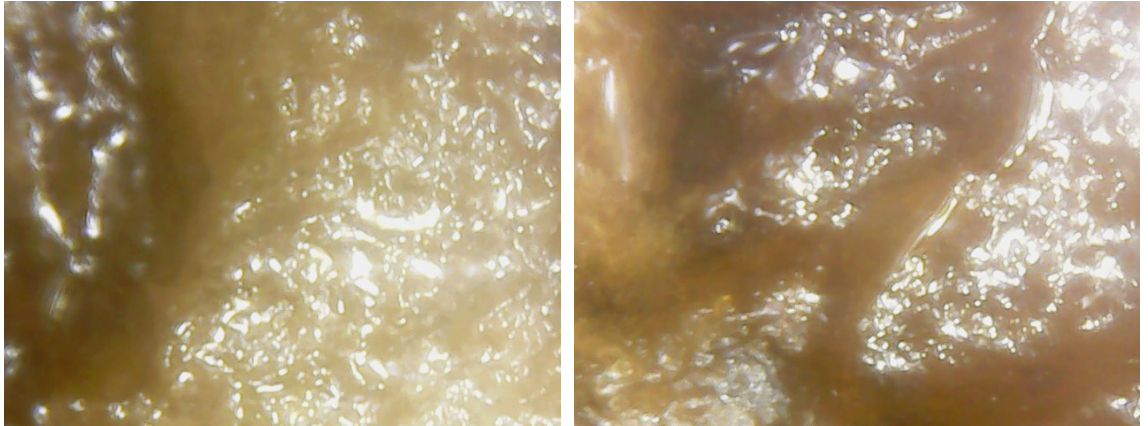
Yapılan 9 farklı deney seti içerisinde en kısa sürede (78 dakika) kuruyan deney setinin 231, en geç ve bu iki değer arasında kuruyan deney setinin 313 (223 dakika) ve 212 (155.6 dakika) olduğu görülmüştür. Seçilen 3 durum için kurutma sonunda elde edilen ürünler mikroskop altında incelenmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 4.56'da verilmiştir. Taze ürünün görseli ise Şekil 4.57'de verilmiştir.



(a)

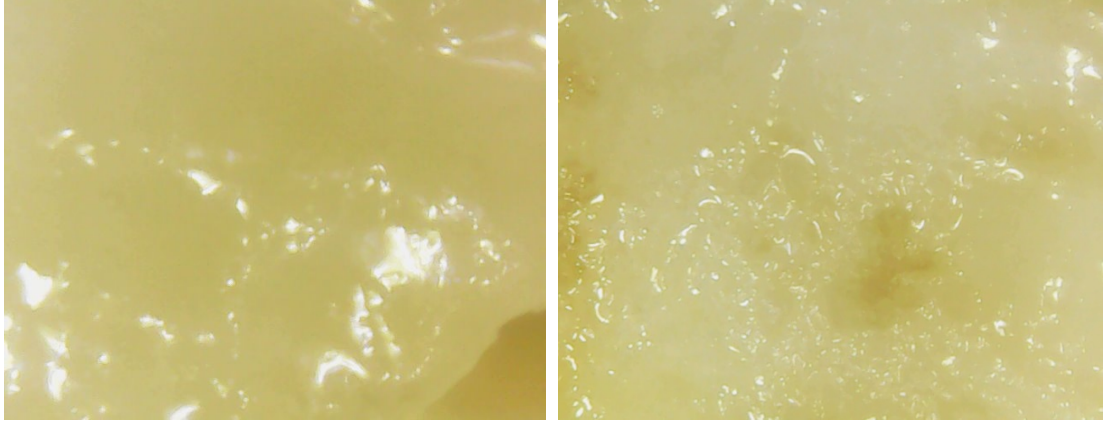


(b)



(c)

**Şekil 4.56.** Seçilen 3 deney setine ait 500 kat büyütülmüş görseller (a-231; b-212; c-313)



**Şekil 4.57.** Taze ürünün 500 kat büyütülmüş görseli

Şekil 4.56 ve 4.57’den elde edilen görsellere göre kuruma süresi en kısa olan (231) şartlarda ürün renginin daha koyu olduğu görülmüştür. En yavaş kuruma olan (313) şartlarda ise kurutulmuş ürünün taze haline daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda toplam renk değişimi 231 numaralı deney setinde 144.843 iken 313 numaralı deney setinde ise 33.940 elde edilmişti.

#### **4.5.11. Taguchi analizi doğrulama çalışması**

Deneyssel olarak elde edilen nem içeriği Taguchi yöntemi ile yapılan analiz sonucunda aynı zamanda tahmin edilebilir. Çizelge 4.74’da her bir çıktıya ait tahmini S/N oranları kullanılarak optimum kurutma koşulu olan 0.3 m/s hız, 350 W ışınlam gücü ve (1) 20 cm ışınlam lambası uzaklığı için Taguchi metodu kullanılarak elde edilen tahmini değerleri (eşitlik 3.49) verilmiştir. Deneyssel değerler ile tahmini değerlerin birbirine yakın olarak değiştiği görülmektedir. Yapılan kurutma çıktılarının ortalama hata değeri ise %2.31 olarak tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.74.** Farklı sonuç çıktıklarına ait tahmini hata değerleri

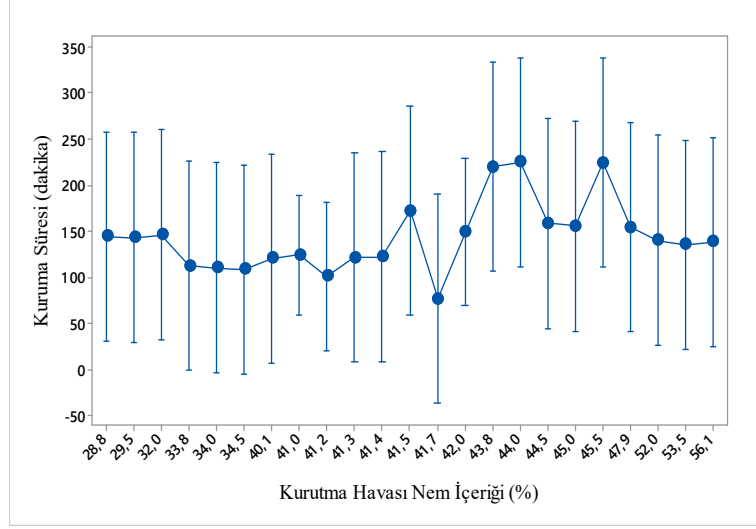
Çıktı değerleri	Tahmini S/N oranı	Tahmini değer	DeneySEL değer	Hata oranı (%)
Kuruma süresi (dakika)	-38.0419	67.2593	71	3.74
Toplam renk değişimi	47.3469	187.781	182.78	5.00
Enerji tüketimi (kwh)	6.66020	0.457889	0.414	0.04
Ekserji verimi (%)	34.7046	43.3674	41.4	1.96
Isıl verim (%)	18.4778	8.39852	9.48	1.08
Özgül enerji tüketimi (MJ/kg)	-28.4142	25.9830	23.21	2.77
Kurutucu performans oranı	16.2260	5.94446	4.36	1.58

Kurutma havası bağıl nemi deneyler sırasında sabit tutulamamıştır. Değişken olan kurutma havası bağıl nemi değerinin kurutma üzerinde etkisinin önemli derecede olup olmadığının tespit edilebilmesi için varyans analizleri yapılmıştır. Çizelge 4.75-4.81 ve Şekil 4.58-4.64 arasında yapılan varyans analizi sonuçları verilmiştir. İstatistiki analizlerde oluşturulan hipotezimiz “bağımlı değişken üzerine faktörlerin etkisi yoktur” şeklinde ele alınmıştır.

Anova tablosunda yapılan grup içi varyans analizlerine göre P değeri tüm bağımsız değişkenler için 0.05’den büyük çıktığı için havanın kurutma çemberine giriş nem içeriği değerlerinin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir. Yani hipotezimiz kabul edilmiştir. Dolayısı ile kurutma havasının giriş nem içeriğindeki farklılığı, bağımsız değişkenler üzerinde etkili olmamıştır.

**Çizelge 4.75.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin kuruma süresi üzerinde varyans analizi

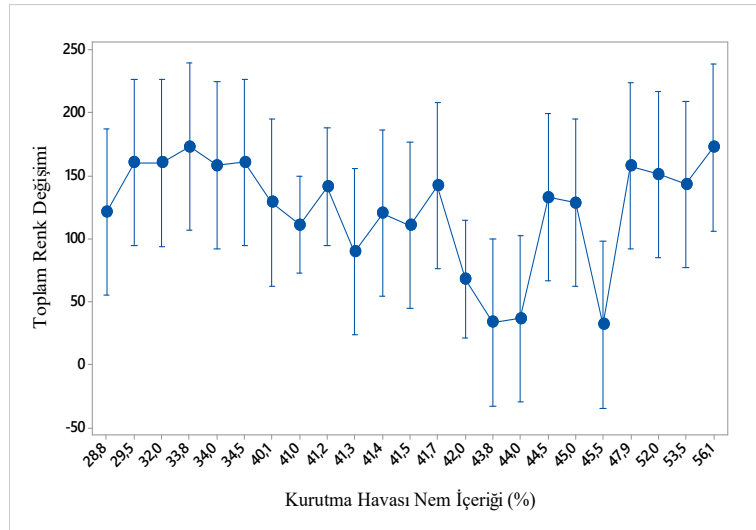
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Red/Kabul
Kurutma havası nem içeriği	22	34506	1568	0.93	0.606	Kabul
Kalan hata	4	6725	1681			
Toplam	26	41231				



**Şekil 4.58.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin kuruma süresi ile olan değişimi

**Çizelge 4.76.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin renk değişimi üzerinde varyans analizi

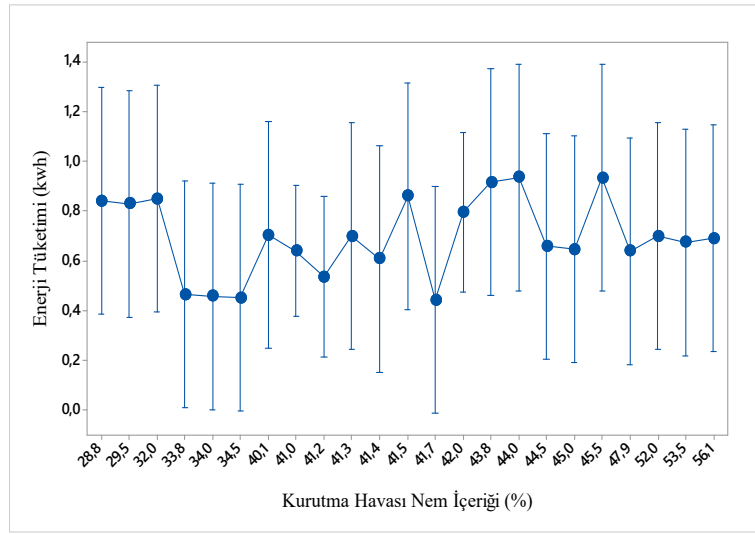
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Red/Kabul
Kurutma havası nem içeriği	22	45635	2074.3	3.63	0.109	Kabul
Kalan hata	4	2283	570.7			
Toplam	26	47918				



**Şekil 4.59.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin renk değişimi ile olan değişimi

**Çizelge 4.77.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin enerji tüketimi üzerinde varyans analizi

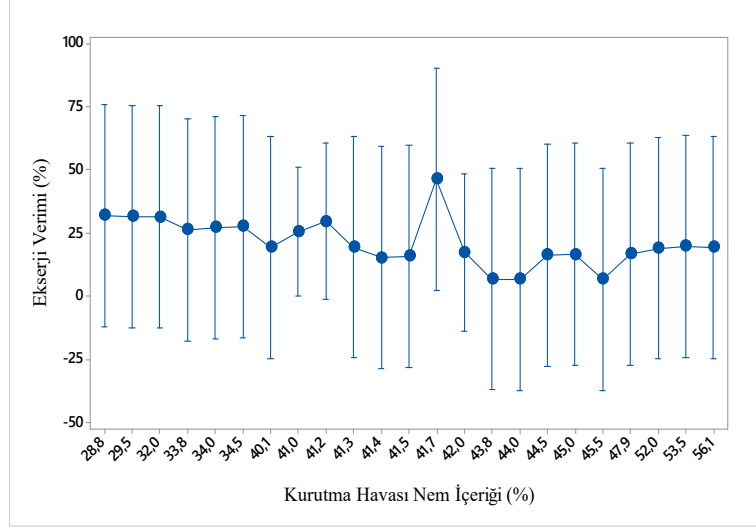
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Red/Kabul
Kurutma havası nem içeriği	22	0.5822	0.02646	0.98	0.582	Kabul
Kalan hata	4	0.1081	0.02704			
Toplam	26	0.6904				



**Şekil 4.60.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin enerji tüketimi ile olan değişimi

**Çizelge 4.78.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin ekserji verimi üzerinde varyans analizi

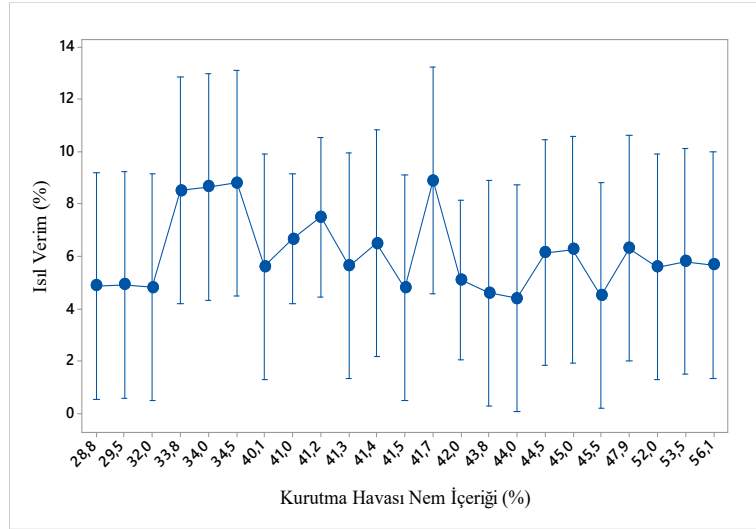
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Red/Kabul
Kurutma havası nem içeriği	22	2056	93.43	0.37	0.942	Kabul
Kalan hata	4	1003	250.81			
Toplam	26	3059				



**Şekil 4.61.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin ekserji verimi ile olan değişimi

**Çizelge 4.79.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin ısı verimi üzerinde varyans analizi

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Red/Kabul
Kurutma havası nem içeriği	22	49.419	2.246	0.93	0.608	Kabul
Kalan hata	4	9.673	2.418			
Toplam	26	59.091				

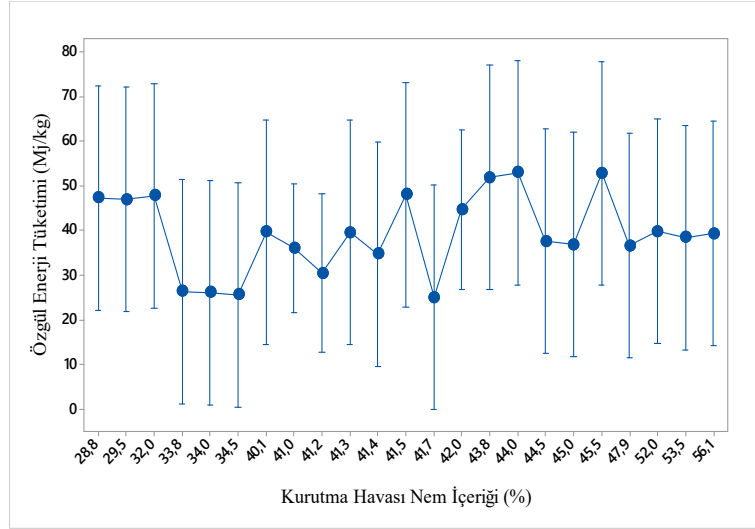


**Şekil 4.62.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin ısı verimi ile olan değişimi



**Çizelge 4.80.** Kurutma havası neminin özgül enerji tüketimi için varyans analizi

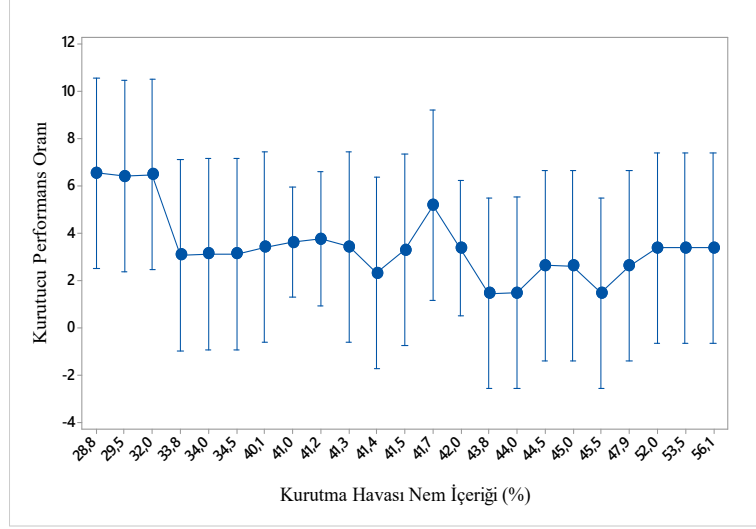
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Red/Kabul
Kurutma havası nem içeriği	22	1822.8	82.85	1.01	0.568	Kabul
Kalan hata	4	329.1	82.28			
Toplam	26	2151.9				



**Şekil 4.63.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin özgül enerji tüketimi ile olan değişimi

**Çizelge 4.81.** Kurutma havası neminin performans oranı için varyans analizi

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Red/Kabul
Kurutma havası nem içeriği	22	46.362	2.107	1.00	0.574	Kabul
Kalan hata	4	8.465	2.116			
Toplam	26	54.828				



**Şekil 4.64.** Kurutma havası bağıl nem içeriğinin performans oranı ile olan değişimi

## 5. SONUÇ

*1.çalışmanın (Muz Kurutulması: Nümerik Modelleme, Renk Kinetiği, pH Değişimi ve Büzülme Etkisinin İncelenmesi) sonuçları;*

Kurutma; kompleks, dinamik, non-lineer, pek çok parametreye eşzamanlı olarak bağlı bir süreç olup altında yatan mekanizma hala tam olarak anlaşılammıştır. Dolayısıyla değişik açılardan kurutma süreçlerinin incelenmesi hem akademik hem de endüstriyel amaçlar için önem taşımaktadır. Çalışmadan elde edilen dikkate değer bazı sonuçlar kısaca şu şekilde özetlenebilir;

Kurutma havası sıcaklığı arttıkça kuruma süresinin kısaldığı ve daha hızlı kurumanın gerçekleştiği görülmüştür. Muz kurutulması tüm sıcaklıklar için sadece azalan hız periyodunda gerçekleşmiştir.

Yapılan lineer olmayan regresyon analizi sonucunda deneysel verilere en yakın tahmini değerler 40°C de Two Term ve Midilli modellerinde elde edilirken 50°C ve 60°C de ise Midilli modelinin uygun olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre muzun kurutma kinetiğinin tanımlanmasında en iyi modelin Midilli modeli olduğu söylenebilir.

Her kurutma havası sıcaklığı için L değerinin azaldığı fakat en büyük renk sapmasının 60°C de gerçekleştiği görülmüştür. Bu sonuca göre ürünün renginde en fazla koyulaşma 60°C sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Ürünün her bir sıcaklık değeri için kuruma süresince a değerinin arttığı, b değerinin ise azaldığı görülmüştür. Ayrıca ürünün taze durumundan olan renk sapması değerleri hesaplanarak en fazla sapma  $31.27 \pm 2.58$  ile 60°C sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Taze ürüne en yakın koşullar sarılık tonu için 60°C, kırmızılık tonu için ise 50°C'de elde edilmiştir.

Yapılan çalışmadan elde edilen verilere göre, farklı sıcaklıklarda pH değerinde belirgin bir değişme olmadığı ve yaklaşık 5 değerinde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Ürünün başlangıçta sahip olduğu asitlik özelliğini koruduğu anlaşılmaktadır.

Her bir renk parametresinin hangi kinetik modele uygun olduğunu tespit edebilmek için regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre L ve b değerlerinin her iki modele uygun olduğu, a değerinin ise sadece 0. kinetik modele uygun olduğu görülmüştür.

40°C, 50°C ve 60 °C hava sıcaklıklarına ait efektif difüzyon katsayısı sırası ile  $2.02 \times 10^{-10}$ ,  $5.05 \times 10^{-10}$  ve  $8.08 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre kurutma havası sıcaklığının efektif difüzyon katsayısı üzerinde etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

Aktivasyon enerjisi kimyasal bir tepkimenin gerçekleşmesi için aşılması gereken enerji miktarıdır. Bu çalışmada muzun aktivasyon enerjisi 61.1 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

Ürün hacmindeki değişim için büzülme katsayısı hesaplanmış olup en büyük hacimsel değişim %40 oranı ile 60°C de gerçekleşmiştir. Kurutma sonunda hesaplanan büzülme katsayısı ile deneysel nem oranı değişim grafiğinden kurutma havası sıcaklığının üründeki hacim değişimi üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Üründeki büzülme katsayısının kurutma havası sıcaklık artışı ile eş zamanlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Deneysel ve nümerik çözüm ile elde edilen veriler karşılaştırılmış olup sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre eş zamanlı ısı ve kütle transferini ifade eden matematik model, kurutma sırasında ürün içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımının tahmin edilmesi için kullanılabilir.

*2.çalışmanın (Elma Kurutulmasında Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transferinin 3 Boyutlu Simülasyonu) sonuçları;*

Bu çalışmada 3 boyutlu dikdörtgen kesitli elma modelinin kurutulması işlemi nümerik olarak incelenmiştir. Eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri Comsol programı yardımı ile çözülmüştür. Malzeme içerisinde ısı ve kütle transferi denklemlerinde sıvının yüzeye difüzyonu ile kuruma sağlandığı kabul edilmiştir. Sıcak hava ile malzemenin 5 yüzeyinin temas ettiği kabul edilmiştir. İlk olarak oluşturulan model literatürde bulunan 2 farklı çalışma ile mukayesesi yapılarak doğrulanmıştır. Daha sonra

farklı zaman (1800-3600-7200 saniye) dilimleri için malzemenin merkez kesitinin sıcaklık ve nem değişimi incelenmiştir. Nem içeriğinin değişimi birbirine yakın olmasına rağmen sıcaklık değişiminde artış olduğu rahatlıkla görülmüştür. Bunun nedeni malzeme içerisindeki nemin azalmasından dolayı difüzyonun yavaşlamasıdır. Malzemenin z kesiti boyunca merkezinin sıcaklık ve nem değişimi 3 farklı zaman (1000-2000-4000 saniye) için incelenmiştir. Daha sonra malzemenin kuruma karakteristiğini belirlemek için yaklaşık 9 saatlik kurutma işleminin sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen boyutsuz nem verileri 5 farklı kurutma modeline yerleştirilip regresyon analizi yapılmıştır. Kuruma davranışını en iyi Midilli Modelinin sağladığı görülmüştür.

Farklı parametrelerin kuruma davranışı üzerine etkisi araştırılmış olup bunun için 3 farklı hız (1-3-5 m/s) 3 farklı sıcaklık (40-80-120°C) ve 3 farklı nem içeriği (40-60-80%) kullanılmıştır. Hız ve sıcaklık arttıkça kuruma süresinin kısaldığı görülmüştür. Aynı zamanda her bir parametre değişkeninin kuruma davranışını en iyi tanımlayan modelin bulunması için her bir değişkene ait boyutsuz nem verilerine regresyon analizi uygulanıp istatistiki değerleri elde edilmiştir. Her bir parametre (hız, sıcaklık ve nem) için kurutma davranışını tanımlayan en uygun modelin Midilli olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre malzemenin herhangi bir deformasyona veya vitamin değerinin bozulmaması için optimum koşullarda istenilen şartlarda kurutulması gerekmektedir. Burada oluşturulan model ile kurutma işlemi sırasında malzemenin içerisindeki sıcaklık ve nem değişimi gözlenerek istenilen değerlere ne kadar sürede gelebileceği önceden tahmin edilerek zaman, enerji ve ekonomik tasarruf sağlanmış olur. Yoksa istenilen şartlarda kurutulamayan ürünlerden maddi kayıp ortaya çıkmaktadır. Matematik modelleme bize önceden şartların gözlenmesi ile bu avantajı sunmaktadır. Yapılan çalışma kurutma konusunun daha iyi anlaşılması için endüstriyel ve akademik kullanıcılara kolaylık sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre kısa zamanda kurutmaya etki eden parametrelerin etkisi, kuruma süreleri ve kurutma hakkında istenilen bilgiler kısa zamanda endüstriyel kullanıcılara sunulabilir. Yapılan çalışmada deneysel ve teorik sonuçlar doğrulanmış olup oluşturulan model gelecek çalışmalara temel oluşturması bakımından önemlidir.

*3.çalışmanın (Zorlanmış Taşınım ile Farklı Geometrik Şekilli Gıda Ürünlerinin Kurutulmasının Gözenekli Ortam Yaklaşımı ile Nümerik İncelenmesi) sonuçları;*

Bu çalışmada gıda ürünü, sıvı ve buhar fazında gözenekli bir yapı olarak gerçeğe yakın şekilde modellenmiştir. Bu model ile aynı zamanda nem içeriği üzerinde büzülme etkisinin olup olmadığı da incelenmiştir. Büzülmeli ve büzülmesiz modellere ait nem içeriği değerlerinin birbirine çok yakın olarak değiştiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile doğrulanmıştır.

Çok fazlı akışa ait matematiksel ifadeler buhar ve sıvı su fazı için ayrı ayrı elde edilerek gözenekli materyal içerisindeki su ve buhar hızı hesaplanarak taşınım mekanizmalarının analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucu olarak kare kesitli üründe en hızlı kurumunun gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kuruma üzerinde hava hızı ve sıcaklık artışının kuruma süresini kısalttığı görülmüştür. Analiz sonucu göstermiştir ki hava hızı ve sıcaklığı buharlaşan nem miktarları üzerinde önemli bir parametredir. Ayrıca analizler ile ürün ve kurutucu içerisindeki havanın hız, nem ve sıcaklık değerleri tahmin edilebildiği için kurutucu tasarım ölçüleri önceden tasarlanabilir.

Ürün içerisinde kalan nem miktarı bozulmaya ve mikroorganizma oluşumuna neden olabilir. Bu yüzden önlenmesi gerekir. Kurutma sırasında ürün içerisinde herhangi bir noktada ne kadar nem kaldığının deneysel olarak tespit edilmesi zordur. Bu yüzden nümerik metot ile kurutma modeli gerçekçi bir şekilde oluşturulmalıdır. Geliştirilen model ile ürün içerisindeki ve çevresindeki sıcaklık ve nem dağılımları zamana bağlı olarak kolaylıkla tespit edilebilir.

Kurutmanın ilk aşamalarında gerçekleşen buharlaşma ile soğuma olgusu açıklandı. Ürün kalitesi göz önüne alındığından önemli bir uygulama olduğu tespit edildi. Bu yüzden kaliteyi artırmak için sıcaklık değerlerinin belli düzeylerde tutulması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

*4.çalışmanın (Taguchi Metodu Kullanılarak Sıcak Hava ile Salatalık Kurutulmasına Etki Eden Parametrelerin Optimizasyonu) sonuçları;*

Bu çalışmada konvektif kurutucuda salatalığın kurutma sürecinin optimizasyonu Taguchi metodu kullanılarak araştırıldı. Taguchi analizinden, en düşük nem içeriğine ve en fazla büzülme katsayısına sahip optimum kurutma koşullarının en yüksek hava hızı (1m/s), en yüksek sıcaklık (60°C) ve en düşük ürün kalınlığında (0.5 cm) gerçekleştiği görülmüştür. ANOVA analizleri bize kalınlığın nem içeriği ve ürünün hacimsel değişimi üzerinde en etkili katkı sağlayan faktör olduğunu göstermektedir. Ürünün kalınlığının azalması üründen meydana gelen nem transferini büyük ölçüde artırdığı söylenebilir. Ekserji verimi için Taguchi metodu kullanılarak elde edilen optimum kurutma koşulları 0.5 m/s hız, 60°C sıcaklık ve 0.5 cm kalınlık olarak elde edilmiştir. 9 deney için kurutucudaki ekserji verimlerinin %40.5 ile %65.9 aralığında değiştiği görülmektedir. Kurutma sisteminin ekserji verimine en fazla katkıyı %88.54 ile hava sıcaklığının verdiği görülmüştür. Ürün kalınlığının ve hızının etkisinin düşük olduğu görülmüştür. Aynı şekilde kurutma işleminde ekserjetik gelişim potansiyeli değeri için optimum kurutma koşulları ise 1 m/s hız, 60°C hava sıcaklığı ve 1 cm ürün kalınlığında elde edilmiştir. Ekserjetik gelişim potansiyel değeri üzerindeki en fazla katkı ekserji veriminde olduğu gibi %97.29'luk oran ile hava sıcaklığında gerçekleşmiştir.

Deneysel çalışmanın doğruluğu için nümerik analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Son olarak Taguchi metodunun tahmini hata analizi çalışması yapılmıştır.

Bu çalışma endüstriyel kurutma sistemlerinin imalatında ve ürünlerin optimum kurutma koşullarının tespit edilmesinde kullanılabilir. Bu sayede ürünün kalitesi artırılarak üretimde kullanılan enerjiden tasarruf edilmesi sağlanabilir. Sistemde kullanılabilir enerji olan ekserji verimliliğinin artırılması için ekserji yıkımının azaltılması gerekmektedir. Bunun için kurutucudan ortama olan ısı kayıplarının yalıtım yapılarak azaltılması sağlanmalıdır.

*5.çalışmanın (Gıda Ürününün Işınımlı Kurutucuda Kurutulmasının Optimizasyon Çalışması) sonuçları;*

Bu çalışmada ışınlama kurutma yöntemi için optimum kurutma koşulları ANOVA analizi yardımı ile araştırılmıştır. Kurutma parametreleri olarak hava hızı, ışınlama gücü ve ışınlama lambasına olan uzaklık alınmıştır. Taguchi analizi için seçilen 9 farklı deney seti uygulanmıştır. Her bir deney sonucu için kuruma süresi, enerji tüketimi, toplam renk değişimi, ekserji verimi, ısı verim, özgül enerji tüketimi ve kurutucu performans oranı çıktı değerleri hesaplanmıştır. Minimum değerlere sahip olan kuruma süresi, enerji tüketimi ve özgül enerji tüketimi için optimum kurutma koşulları 0.3 m/s hız, 350 W ışınlama gücü ve 20 cm ışınlama lambasına olan uzaklık olarak elde edilmiştir. Maksimum değerlere sahip olan toplam renk değişimi, ekserji verimi, ısı verim ve kurutucu performans oranı için optimum kurutma koşulları aynı şekilde 0.3 m/s hız, 350 W ışınlama gücü ve 20 cm ışınlama lambasına olan uzaklıkta elde edilmiştir. Tüm çıktı değerleri için aynı optimum koşullar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre Taguchi metodunun kurutma sürecinin optimizasyonunda uygun bir yaklaşım olduğu görülmüştür.

Taguchi analizinden elde edilen sonuçların doğrulama çalışması yapıldı. Optimum kurutma koşullarına ait parametreler için deney yapıldı. Deneysel olarak elde edilen çıktı değerleri ile Taguchi analizinden tahmini değerler karşılaştırıldı ve ortalama hata %2.31 olarak elde edildi.

Kurutma süresi (%57.3), renk değişimi (%45.19), enerji tüketimi (%75.58), ısı verim (%71.19), özgül enerji tüketimi (%74.72) üzerinde en fazla katkıyı sağlayan parametrenin ışınlama lambasına olan uzaklık olduğu tespit edilmiştir. Ekserji verimi (%39.61) ve kurutucu performans oranında (%59.32) ise en fazla katkıyı ışınlama gücü sağlamıştır.

Ayrıca deney sırasında sabit tutulamayan havanın bağıl neminin bu elde edilen çıktı değerleri üzerinde etkisi olup olmadığı tek tek varyans analizi yapılarak araştırıldı. Sonuç olarak kurulan hipotez kabul edildi. Her bir çıktı değeri üzerinde değişken havanın nem içeriğinin etkisinin olmadığı görülmüştür.



## KAYNAKLAR

- Afolabi, T. J., Agarry, S. E. 2014.** Mathematical modelling and simulation of the mass and heat transfer of batch convective air drying of tropical fruits. *Chemical and Process Engineering Research*, 23: 9-19.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Samimi-Akhijahani, H. 2008.** Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion Management*, 49: 2865–2871.
- Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madadlou, A. A. 2013.** Review on ekserji analysis of drying processes and systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22:1-22.
- Aghbashlo, M. 2016.** Exergetic simulation of a combination infrared-convective drying process. *Heat Mass Transfer*, 52(4): 829-844.
- Akgun, N. A., Doymaz, I. 2005.** Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering*, 68(4): 455–461.
- Akpınar, E. K. 2004.** Energy and ekserji analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 31(8): 1165-1176.
- Akpınar, E.K. 2005.** Deneysel çalışmalardaki hata analizine bir örnek: Kurutma deneylerindeki hata analizi. *Mühendis ve Makine*, 46(540): 41-48.
- Aktaş, M., İlbaş, M., Yalçın, A., Şahin, M. 2013.** Kızılötesi ışınlı bir kurutucuda kuruma davranışlarının deneysel incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(4): 767-775.
- Alakali, J.S., Satimehin, A. A. 2004.** Drying kinetics of ginger. *Nigerian Food Journal*, 22 (1): 105-111.
- Alibas, I. 2006.** Characteristics of chard leaves during microwave, convective, and combined microwaveconvective drying. *Drying Technology*, 24(1):1425-1435.
- Amiri, C. R., Amiri, P. J., Esna-Ashari, M. 2011.** Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed and fluidized bed convective dryer. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(1): 28-40.
- Anon, 1962.** pH values of food products. *Food Eng.*, 34(3): 98-99.
- Anonim, 2019.** İstanbul İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği.Türkiye Geneli ve İİB Mal grupları ve Ülkeler Bazında Kuru Meyve ve Mamulleri İhracatı, (Erişim tarihi:05.09.2019).
- Ateeque, M., Udayraj-Mishra, R. K., Chandramohan, V.P., Talukdar, P. 2014.** Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field. *International Journal of Thermal Sciences*, 78: 145-157.
- Avci, A., Can, M. 1999.** The analysis of the drying process on unsteady forced convection in thin films of ink. *Applied Thermal Engineering*, 19: 641-657.
- Aversa, M., Curcio, S., Calabro, V., Iorio, G. 2007.** An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. *Journal of Food Engineering*, 78(3): 922–932.
- Aviara, N. A., Onuoha, L.N., Falola, O.E., Igbeka, J.C. 2014.** Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. *Energy*, 73:809-817.
- Avila, I. M. L. B., Silva, C. L. M. 1999.** Modelling kinetics of thermal degradation of colour in peach puree. *Journal of Food Engineering*, 39:161-166.

- Ayim, I., Amankwah, E., Dzisi, K. A. 2012.** Effect of pretreatment and temperature on the air drying of French and False horn plantain slices. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 13(2): 1771-1780.
- Babalís, J., Belessiotis, V.G. 2004.** Influence of the drying conditions on the drying contents and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65: 449–458.
- Baini, R., Langrish, T. A. G. 2007.** Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 79(1): 330–343.
- Baini, R., Langrish, T. A. G. 2008.** An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 85: 201–214.
- Baker, C.G.J. 1997.** Industrial drying of foods. First Edition, Blackie Academic and Professional, New York.
- Barreiro, J. A., Milano, M., Sandoval, A. J. 1997.** Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 33: 359-371.
- Bart-Plange, A., Addo, A., Ofori, H., Asare, V. 2012.** Thermal properties of gros michel banana grown in Ghana. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(4).
- Bezerra, C. V., Silva, L.H.M., Corrêa, D. F., Rodrigues, A.M.C. 2015.** A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of passion fruit peel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85:750–755.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. 1960.** Transport Phenomena. John Wiley & Sons, London, UK.
- Bonis, M.V., Ruocco, G. 2008.** A multiphysics approach to fundamental conjugate drying by forced convection. Comsol Conference 2008 Hannover.
- Bozkurt, A.Y., Kantay, R. 1992.** Ağaç Malzemenin Kurutulması. İ.Ü. Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Bridges, M. A., Mattice, M. R. 1939.** Over two thousand estimations of the pH of representative foods. *American Journal Digestive Diseases*, 9: 440-449.
- Cemeroglu, B., Acar, J. 1986.** Meyve ve sebze isleme teknolojisi. Gıda Teknolojisi Derneği Yayın No: 6, Ankara.
- Colak, N., Hepbasli, A. 2007.** Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer. *Journal of Food Engineering*, 80(4): 1188–1193.
- Comsol Multiphysics 5.3, 2017.** Heat Transfer Model Library. Heat Transfer Module User's Guide, Chemical Reaction Engineering Module User's Guide.
- Conti, C., Conti, A.C., Gava, M., Filho, H.J.S. 2012.** Mathematical model of drying hevea brasiliensis wood. *IUFRO Wood Drying Conference*, Para, Brazil.
- Curcio, S., Aversa, M., Calabro, V., Iorio, G. 2008.** Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 87: 541–553.
- Çengel, Y.A. 2002.** Heat Transfer. A Practical Approach; McGraw-Hill: Boston.
- Dandamrongrak, R., Young, G., Mason, R. 2002.** Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models, *Journal of Food Engineering*, 55: 139–146.
- Datta, A.K. 2007.** Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations, *Journal of Food Engineering*, 80(1): 80-95.

- Defraeye, T., Nicolai, B., Mannes, D., Aregawi, W., Verboven, P., Derome, D. 2016.** Probing inside fruit slices during convective drying by quantitative neutron imaging. *Journal of Food Engineering*, 178:198-202.
- Demiray, E., Tulek, Y. 2012.** Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Rio Grande) slices in a convective hot air dryer. *Heat Mass Transfer*, 48(5):841–847.
- Demirel, D., Turhan, M. 2003.** Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. *Journal of Food Engineering*, 59: 1–11.
- Desmorieux, H., Moyne, C. 1992.** Analysis of dryer performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept. in *Drying A.S. Mujumder*, Editor, 834-843.
- Doymaz, I. 2004.** Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *J. Food Eng.*, 61: 359-364.
- Doymaz, I. 2005.** Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69: 275 – 279.
- Doymaz, I. 2006.** Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74(3): 370-375.
- Doymaz, I. 2007.** The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J Food Eng.* 79: 243-248.
- Doymaz, I. 2010.** Evaluation of Mathematical Models for Prediction of thin-layer drying of Banana Slices. *International Journal of Food Properties*, 13(3): 486-497.
- Doymaz, I. 2013.** Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. *Int. J. Food Sci. Tech.* 48: 1909–1915.
- El-Mesery, H. S., Mwithiga, G. 2012.** Comparison of a gas fired hot-air dryer with an electrically heated hot-air dryer in terms of drying process, energy consumption and quality of dried onion slices. *Afr. J. Agric. Res.*, 7(31):4440-4452.
- Ertekin, C. 2002.** Bazı sebze ve meyvelerin kurutulması. *Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı*, No: 1, 34-35.
- Etemoglu, A.B., Can, M., Avci, A., Pulat, E. 2005.** theoretical study of combined heat and mass transfer process during paper drying. *Heat and Mass Transfer*, 41: 419-427
- Etemoglu, A. B., Ulcay, Y., Can, M., Avci, A. 2009.** mathematical modelling of combined diffusion of heat and mass transfer through fabrics. *Fibers and Polymers*, 10(2): 252-259.
- Fasina, O.O., Fleming, H.P. 2001.** Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching. *J Food Eng*, 47(3): 203–210.
- Folayan, J.A., Osuolale, F.N., Anawe, P.A.L. 2018.** Data on exergy and exergy analyses of drying process of onion in a batch dryer. *Data in Brief*, 21: 1784-1793.
- Fortes, M., Ferreira, W. R. 2004.** Second law analysis of drying: modelling and simulation of fluidized bed grain drying. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, 301-308, Sao Paulo, Brazil.
- Franco, T. S., Perussello, C. A., Neves-Ellendersen, L. S., Masson, M. L. 2015.** Foam mat drying of yacon juice: Experimental analysis and computersimulation. *Journal of Food Engineering*, 158: 48–57.
- García-Alvarado, M.A., Pacheco-Aguirre, F.M., Ruiz-López, I. I. 2014.** Analytical solution of simultaneous heat and mass transfer equations during food drying. *Journal of Food Engineering*, 142:39–45.
- Genceli, O. F. 2004.** Çözümlü ısı ışınımı problemleri. Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Garza, S., Ibarz, A., Pagan, J., Giner, J. 1999.** Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food Research International*, 32: 335-343.
- Geankoplis, C. J. 1993.** Transport processes and unit operations. New Jersey: Prentice-Hall.
- Golestani, R., Raisi, A. 2013.** Aroujalian, A. Mathematical modeling on air drying of apples considering shrinkage and variable diffusion coefficient. *Drying Technology*, 31(1): 40–51.
- Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Mainkanthan, M. R., Ilyas, S. M. 2007.** Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79(1): 176-180.
- Grahn, M.A. 1984.** Acidified and low acid foods from Southeast Asia. FDA-LIB.
- Gulati, T., Datta, A. K. 2015.** Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, 166: 119–138.
- Hadrich, B., Kechaou, N. 2009.** Mathematical modeling and simulation of shrunk cylindrical material's drying kinetics—Approximation and application to banana. *Food and Bioproducts Processing*, 87: 96–101.
- Hammond, G.P., Stapleton, A.J. 2001.** Ekserji analysis of the United Kingdom energy system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 215(2): 141–162.
- Heldman, D. R., Hartel, R. W. 1999.** Principles of food processing. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc..
- Henderson, S. M., Pabis, S. 1961.** Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *J. Agr. Eng. Resource*, 6(3): 169–174.
- Heybeli, N., Ertekin, C., Dikici, G. 2013.** İnfrared kurutucu ile kerevizin kurutulması. *Tralleis Elektronik Dergisi*, 2:16-25.
- Hussain, M.M., Dincer, I. 2003.** numerical simulation of two-dimensional heat and moisture transfer during drying of a rectangular object. *Numerical Heat Transfer, Part A: Application: An International Journal of Computation and Methodology*, 43(8): 867-878.
- Ibarz, A., Pagan, J., Garza, S. 1999.** Kinetic models for colour changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 39: 415-422.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P. 2001.** Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 880 s.
- İzli, N., Işık, E. 2015.** Color and microstructure properties of tomatoes dried by microwave, convective, and microwave-convective methods. *International Journal of Food Properties*, 18: 241–249.
- İzli, N., Işık, E. 2016.** Effect of Different Drying Methods on Drying Characteristics, Colour and Microstructure Properties of Barbania Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, 33(2): 79-88.
- Jaturonglumlert, S., Kiatsiriroat, T. 2010.** Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *Journal of Food Engineering*, 100: 254-260.
- Joardder, M. U. H., Karima, A., Kumara, C., Brown, R. J. 2014.** Determination of effective moisture diffusivity of banana using Thermogravimetric analysis. *Procedia Engineering*, 90: 538 – 543.
- John, S. G., Sangamithra, A., Veerapandian, C., Sasikala, S., Sanju, V., Bhuvanewari, S. 2014.** Mathematical Modelling of the Thin Layer Drying of Banana

- Blossoms. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering. J Nutr Health Food Eng.* 1(2): 00008.
- Kadam, D.M., Goyal, R.K., Singh, K.K., Gupta, M.K. 2011.** Thin layer convective drying of mint leaves. *Journal of Medicinal Plant Research*, 5(2): 164-170.
- Kara, T., Demir, F. 2012.** Muzun farklı kurutma şartlarındaki kuruma karakteristiklerinin belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(2): 179-184.
- Karathanos, V.T., Villalobos, G., Saravacos, G.D. 1990.** Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *J Food Sci*, 55(1): 218–223.
- Karim, M. A., Hawlader, M. N. A. 2005,** Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23): 4914-4925.
- Khawas, P., Das, A. J., Dash, K. K., Deka, S. C. 2014.** Thin-layer drying characteristics of Kachkal banana peel (Musa ABB) of Assam. *International Food Research Journal*, 21(3): 1011-1018.
- Kaya, A. 2008.** Kurutmada ısı ve kütle transferinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi. *Doktora Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Kostaropoulos, A. E., Saravacos, G. D. 1995.** Microwave pretreatment for sun-dried raisins. *Journal of Food Science*, 60: 344-347.
- Koyuncu, T., Pinar, Y., Lule, F. 2007.** Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna* Jacq.) and yellow (*Crataegus aronia* Bosc.) fruits. *J Food Eng*, 78: 1471–5.
- Kumar, C., Millar, G.J., Karim, M. A. 2015,** Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. *Drying Technology*, 33:227-237.
- Lahsani, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Jaouhari, J. T. 2004.** Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61: 173–179.
- Lemus-Mondaca, R. A., Zambra, C.E., Vega-Gálvez, A., Moraga, N.O. 2013.** Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying process in papaya slices. *Journal of Food Engineering*, 116: 109–117.
- Leonard, A., Blacher, S., Nimmol, C., Devahastin, S. 2008.** Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure of banana slices: An illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product. *Journal of Food Engineering*, 85: 154–162.
- Lewis, W. K. 1921.** The rate of drying of solid materials. *J. Ind. Eng. Chem.*, 13(5): 427–432.
- Limpaiboon, K. 2011.** Effects of Temperature and Slice Thickness on Drying Kinetics of Pumpkin Slices. *Walailak J Sci & Tech*, 8(2).
- Liu, J.Y., Cheng, S. 1991.** Solutions of Luikov Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies. *Int.J. Heat Mass Transfer*, 34(7): 1747-1754.
- Machado, M. D., Oliviera, F. A. R., Gekas, V., Singh, R. P. 1998.** Kinetics of moisture uptake and soluble-solids loss by puffed breakfast cereals immersed in water. *International Journal of Food Science and Technology*, 33(3): 225–237.
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H., Buckle, K. A. 1996.** The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1): 75-97.
- Maskan, M. 2000.** Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44: 71–78.

- Maskan, M. 2001.** Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48: 177–182.
- Mercali, G. D., Tessaro, I. C., Norena, C. P. Z., Marczak, L. D. F. 2010.** Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, shum.). *International Journal of Food Science and Technology*, 45(11): 2281–2289.
- McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A., 1999.** Principles, methods and applications of the convective drying of food stuffs. *Trans IChemE*, 77(Part C): 175–193.
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., 2002.** A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7):1503-1513.
- Midilli, A., Kucuk, H. 2003.** Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, 44(7): 1111-1122.
- Mihindukulasuriya, S. D. F., Jayasuriya, H. P. W. 2013.** Mathematical modeling of drying characteristics of chilli in hot air oven and fluidized bed dryers. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1): 154-166.
- Mirzaee, E., Rafiee, S., Keyhani, A., Emam-Djomeh, Z. 2009.** Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots. *RES. AGR. ENG.*, 55(3): 114–120.
- Moffat, R.J. 1988.** Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1): 3-17.
- Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., Kazemi, M., Nikbakht, A. M. 2010.** Drying of pomegranate arils: Comparison of predictions from mathematical models and neural networks. *International Journal of Food Engineering*, 6(3): 1-19.
- Mundada, M., Hathan, B. S., Maske, S. 2010.** Convective dehydration kinetics of osmotically pretreated pomegranate arils. *Biosystems Engineering*, 107(4): 307–316.
- Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T., Soponronnarit, S. 2007.** Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. *Journal of Food Engineering*, 81: 624-633.
- Nogueira, R., Park, K. 1992.** Drying parameters to obtain “banana-passa”. Drying '92, ed. A.S. Mujumdar, Elsevier Science Publishers B.V. 873 – 883.
- Nowak, D., Lewicki, P.P. 2004.** Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5: 353-360.
- Nguyen, H. M., Price, E. W. 2007.** Air drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering*, 79(1): 200-207.
- Omolola, A. O., Jideani, A. I. O., Kapila, P. F. 2015.** Modeling of thin layer drying characteristics of banana cv. Luvhele. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 21(2): 342–348.
- Oztop, M.H., Sahin, S., Sumnu, G. 2007.** Optimization of Microwave Frying of Potato Slices by using Taguchi Technique. *Journal of Food Engineering*, 79(1): 83-91.
- Pagliarini, E., Vernile, M., Peri, C. 1990.** Kinetics study on color changes in milk due to heat. *J. Food Sci.*, 55(6): 1766-1767.
- Pangavhane, D. R., Sawhney, P. N., Sarsavadia, P. N. 1999.** Effect of various dipping pretreatments on drying kinetics of thompson seedless grapes. *J Food Eng.* 39: 211-216.
- Phoungchandang, S., Woods, J.L. 2000.** Solar Drying of Bananas: Mathematical Model, Laboratory Simulation, and Field Data. *Journal of Food Science*, 65(6):990-996.
- Queiroz, M. R., Nebra, S. A. 2001.** Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *Journal of Food Engineering*, 47: 127–132.

- Ramesh, M. N. 2003.** Moisture transfer properties of cooked rice during drying. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 36: 245-255.
- Rizvi, S. S. H. 1995.** Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.). *Engineering properties of foods* (pp. 223–309). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Roberts, J.S. 1999.** Understanding the heat and mass transfer of hygroscopic porous materials. Ph.D Thesis, The State University Of New Jersey, Food Science, New Brunswick, New Jersey.
- Roberts, J. S., Kidd, D. R., Padilla-Zakour, O. 2008.** Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4): 460-465.
- Ruhanian, S., Movagharnejad, K. 2016.** Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer *Engineering in Agriculture. Environment and Food*, 9: 84-91.
- Ruiz-López, I. I., García-Alvarado, M. A. 2007.** Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *Journal of Food Engineering*, 79: 208-216.
- Rhim, J. W., Nunes, R. V., Jones, V. A., Swartzel, K. R. 1989.** Kinetics of color change of grape juice generated using linearly increasing temperature. *Journal of Food Science*, 54: 776-777.
- Sabarez, H. T. 2012.** Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. *Journal of Food Engineering*, 111: (2) 279–288.
- Sacilik, K., Elicin, A.K. 2006.** The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73: 281–289.
- Sadi, T., Meziane, S. 2015.** Mathematical modelling, moisture diffusion and specific energy consumption of thin layer microwave drying of olive pomace. *International Food Research Journal*, 22(2): 494-501.
- Saha, B., Bucknall, M., Arcot, J., Driscoll, R. 2018.** Derivation of two layer drying model with shrinkage and analysis of volatile depletion during drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 226: 42-52.
- Samadi, S. Y., Ghobadian, B., Najafi, G., Motevali, A. 2014,** Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2): 174–182.
- Sanjuan, N., Simal, S., Bon, J. A. 1999.** Mulet. Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42: 27–31.
- Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. 2004.** Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 3(6): 117-128.
- Sharma, G.P., Verma, R.C., Pathare, P. 2005.** Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67: 361–366.
- Silva, W. P., Silva, C. M. D. P. S., Gomes, J. P. 2013.** Drying description of cylindrical pieces of bananas in different temperatures using diffusion models. *Journal of Food Engineering*, 117:417–424.
- Silva, W. P., Silva, C. M. D. P. S., Gama, F. J. A., Gomes, J. P. 2014.** Math. models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *J Saudi Soc Agri Sci*. 13: 67-74.
- Singh, P., Talukdar, P. 2019.** Design and performance evaluation of convective drier and prediction of drying characteristics of potato under varying conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 142: 176-187.

- Sirvastava, A.K., Goering, C.E, Rohrbach, R.P. 1993.** Engineering principles of agriculture machines. ASAE text book.
- Srikiatden, J., Roberts, J. S. 2006.** Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering*, 74: 143-152.
- Syahrul, S., Hamdullahpur, F., Dincer, I. 2002.** Ekserji analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Ekserji, an International Journal*, 2(2):87-98.
- Şeker, M. 2013.** Fren balatalarının üretim şartları ve içeriğinin, performans etkisinin Taguchi yöntemiyle araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon.
- Taguchi, G. 1990.** Introduction to quality engineering. Asian Productivity Organization, Tokyo.
- Taheri-Garavand, A., Rafiee, A., Keyhani, A. 2011.** Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato influence of air dryer conditions. *Int. Trans. J Eng. Manag& Applied Sci&Technol*, 2: 147-160.
- Tasirin, S. M., Puspasari, I., Xing, L. J., Yaakob, Z., Ghani, J. A. 2013.** Energy optimization of fluidized bed drying of orange peel using taguchi method. *World Applied Sciences Journal*, 26(12): 1602-1609.
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J., Soponronnarit, S. 2011.** Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT - Food Science and Technology*, 44(6): 1502-1510.
- Toledo, R. T. 1999.** Fundamentals of food process engineering (2nd ed.). Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc..
- Turner, I.W. 1991.** Jolly, P.C. Combined microwave and convective drying of a porous material. *Drying Technology*, 9(5): 1209–1269.
- Tutar, M., Aydin, H., Yuce, C., Yavuz, N., Bayram, A. 2014.** The optimisation of process parameters for friction stir spot welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. *Materials and Design*, 63: 789-797.
- Tülek, Y., Demiray, E. 2014.** Sıcak hava kurutma yönteminde farklı sıcaklık ve ön işlemlerin trabzon hurmasının renk ve kuruma karakteristiklerine etkisi. *Journal of Agricultural Sciences*, 20:27-37.
- Tzempelikos, D. A., Mitrakos, D., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., Margaris, D. P. 2015.** Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *Journal of Food Engineering*, 156: 10–21.
- Udayraj, Md. A., Mishra, R. K., Chandramohan, V.P., Talukdar, P. 2014.** Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field. *International Journal of Thermal Sciences*, 78: 145-157.
- Van Gool, W. 1997.** Energy policy: fairly tales and factualities. *in Innovation and Technology*, 93-105.
- Vega, A. M. N., Sturm, B., Hofacker, W. 2016.** Simulation of the convective drying process with automatic control of surface temperature. *Journal of Food Engineering*, 170: 16-23.
- Vega-Galvez, A., Puente-Diaz, L., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., Torres, M.J. 2012.** Mathematical Modelling of Thin-layer Drying Kinetics of Cape Gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *J Food Process Preservation*, 38: 728-736.



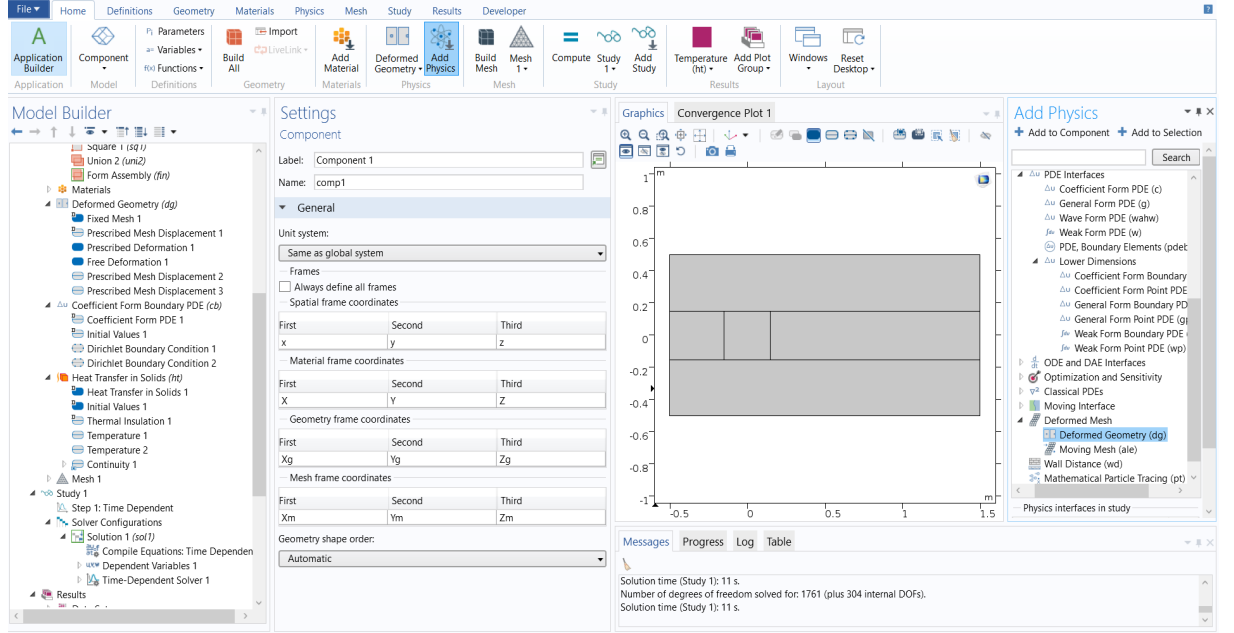
- Wam, M. 2006.** Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. *J Food Eng*, 72: 113–123.
- Wang, C. Y., Singh, R. P. 1978.** A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper No: 78-3001, ASAE, St. Joseph, MI.
- Wang, Z. F., Fang, S. Z., Hu, X. S. 2009.** Effective diffusivities and energy consumption of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in Microwave Drying. *Drying technology*, 27(10): 1097-1104.
- Wang, J., Chao, Y. 2002.** Drying characteristics of irradiated apple slices. *Journal of Food Engineering*, 52: 83–88.
- Wang, J., Sheng, K. 2006.** Far infrared and microwave drying of peach. *Lebensm Wiss Technol*, 39: 247-255.
- Weemaes, C., Ooms, V., Indrawati, L. L., Van den Broeck, I., Van Loey, A., Hendrickx, M. 1999.** Pressure±temperature degradation of green color in broccoli juice. *Journal of Food Science*, 64: 504-508.
- Welty, J., Wicks, C., Wilson, R., Rorrer, G. 2001.** Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. New York: John Wiley and Sons.
- Wright, S.E., Rosen, M.A., Scott, D. S., Haddow, J. B. 2002.** The exergy flux of radiative heat transfer with an arbitrary spectrum. *Exergy Int. J.*, 2(2): 69-77.
- Yang, W. H., Tarng, Y. S. 1998.** Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84(1-3): 122-129.
- Yuan, Y., Tan, L., Xu, Y., Yuan, Y., Dong, J. 2019.** Numerical and experimental study on drying shrinkage- deformation of apple slices during process of heat-mass transfer. *International Journal of Thermal Sciences*, 136: 539-548.
- Zadin, V., Kasemägi, H., Valdna, V., Vigonski, S., Veske, M., Aabloo, A. 2015.** Application of multiphysics and multiscale simulations to optimize industrial wood drying kilns. *Applied Mathematics and Computation*, 267: 465–475.
- Zielinska, M., Markowski, M. 2010.** Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chem Eng Process: Process Intensification*, 49: 212-218.
- Zhang, W., Mujumdar, A.S. 1992.** Deformation and stress analysis of porous capillary bodies during intermittent volumetric thermal drying. *Drying Technology*, 10(2): 421–443.
- Zhu, A., Shen, X. 2014.** The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *Int J Heat and Mass Trans.*, 72: 345-351.
- Zogzas, N., P. Maroulis Z. B., Marinos-Kouris, D. 1996.** Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14: 2225-2253.

## EKLER

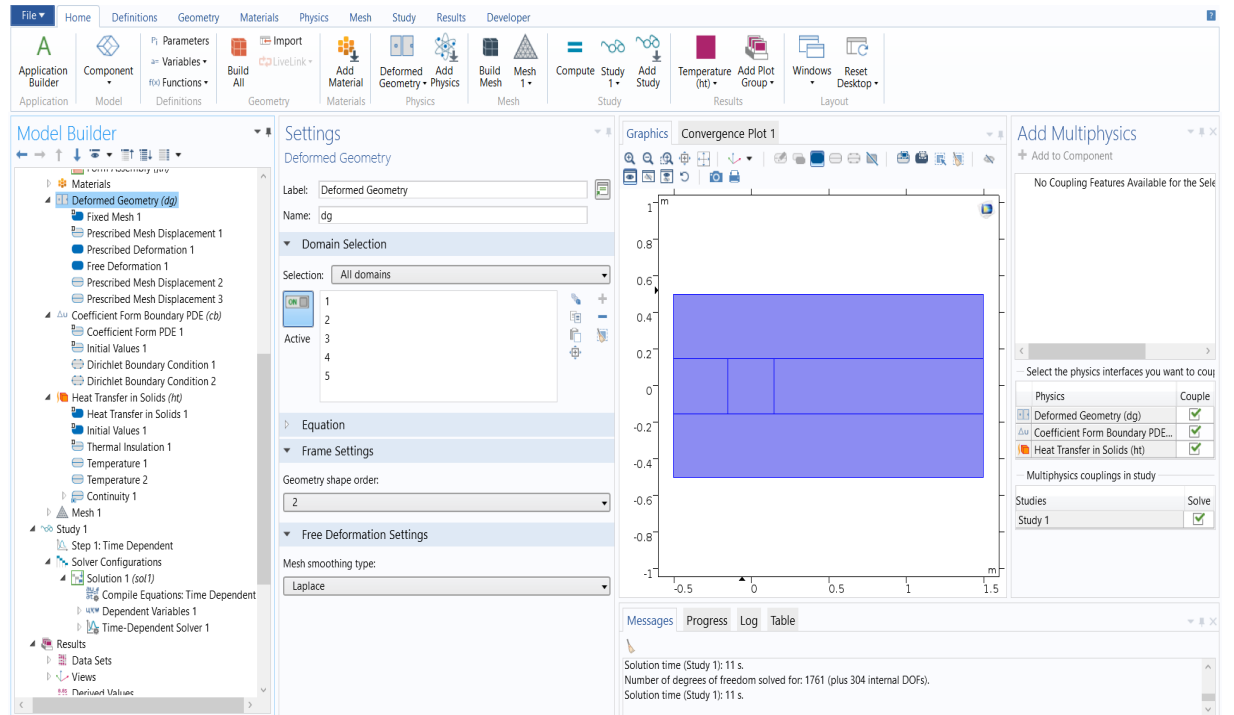
- EK 1** Comsol programında deforme edilmiş ağ uygulaması (Deformed Mesh)
- EK 2** Konvektif kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve ölçüm sonuçları
- EK 3** Konvektif kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve hesaplanan çıktı değerleri
- EK 4** Işınım ile kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve ölçüm sonuçları
- EK 5** Işınım ile kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve hesaplanan çıktı değerleri
- EK 6** Işınım ile kurutucu için ekserji veriminin Matlab kodu

## EK 1. Comsol programında deforme edilmiş ağ uygulaması (Deformed Mesh)

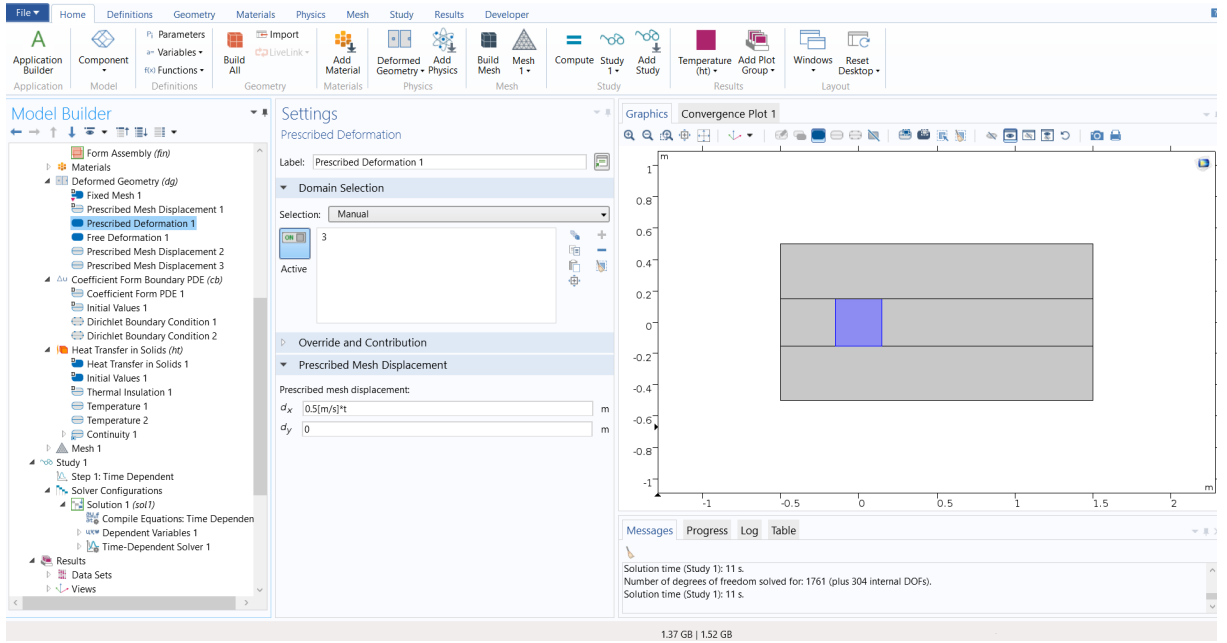
Doğrusal hareket “Deformed Mesh” modülü altında olan “Deformed Geometry” ve “PDE interfaces” modülü altındaki “Coefficient Form Boundary PDE” kullanılarak yapılmaktadır.



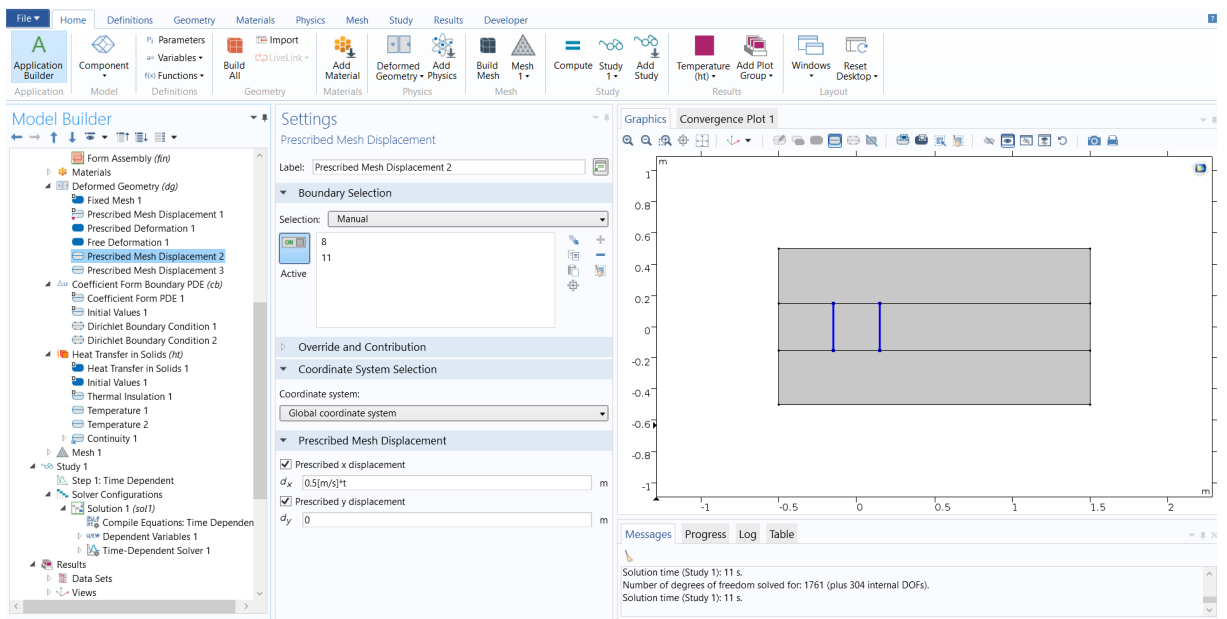
(a)



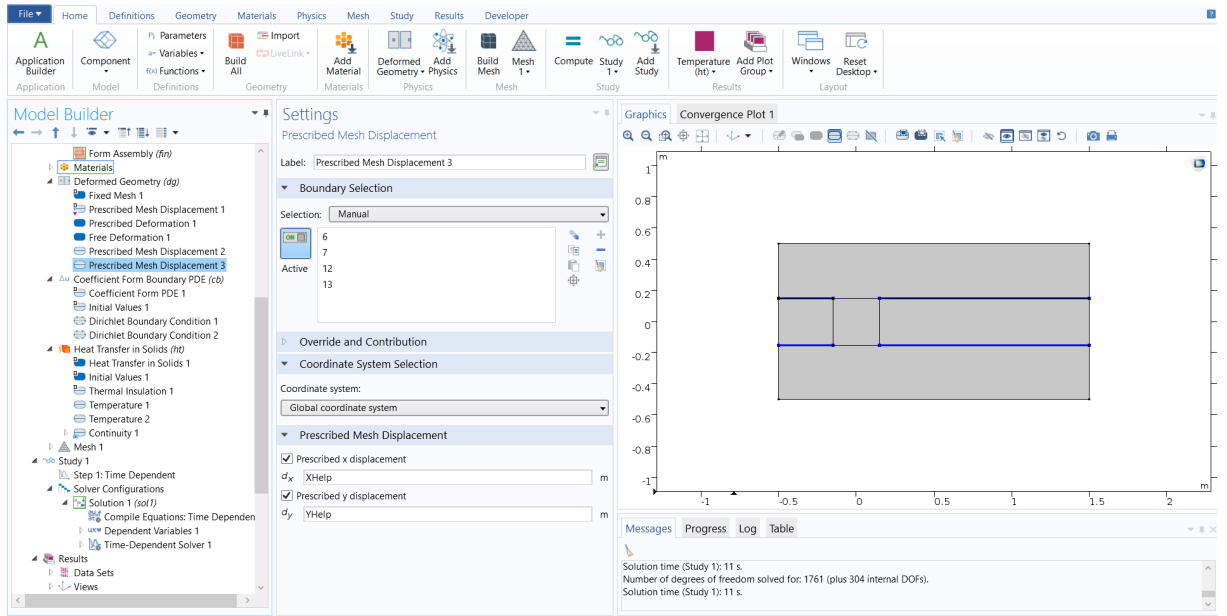
(b)



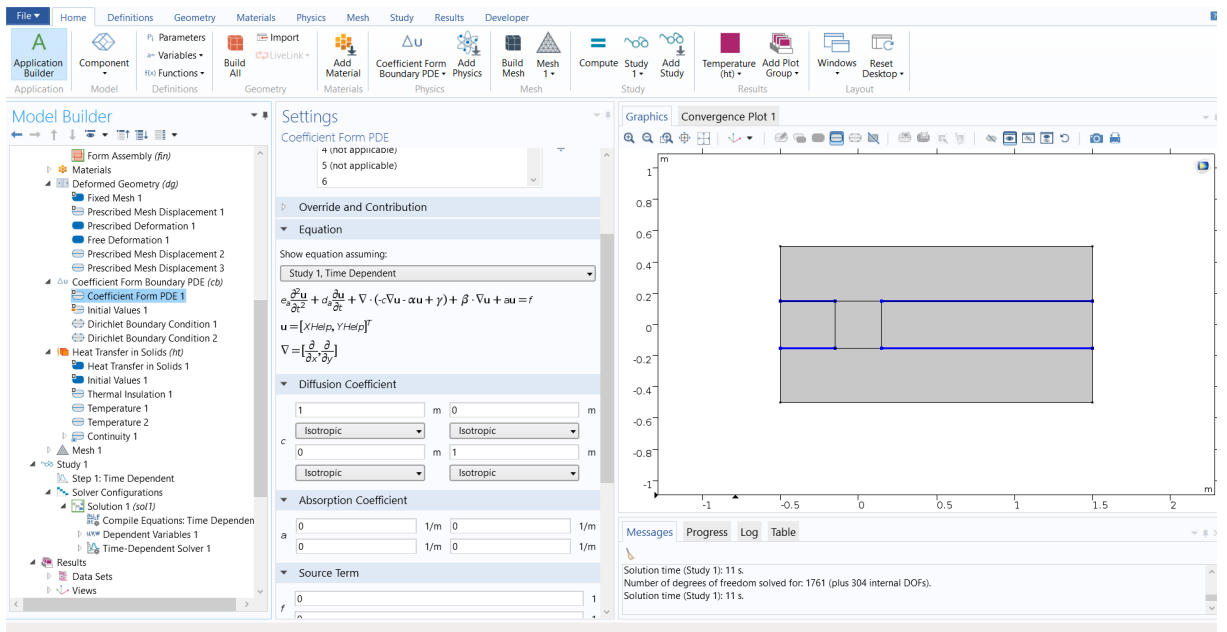
(c)



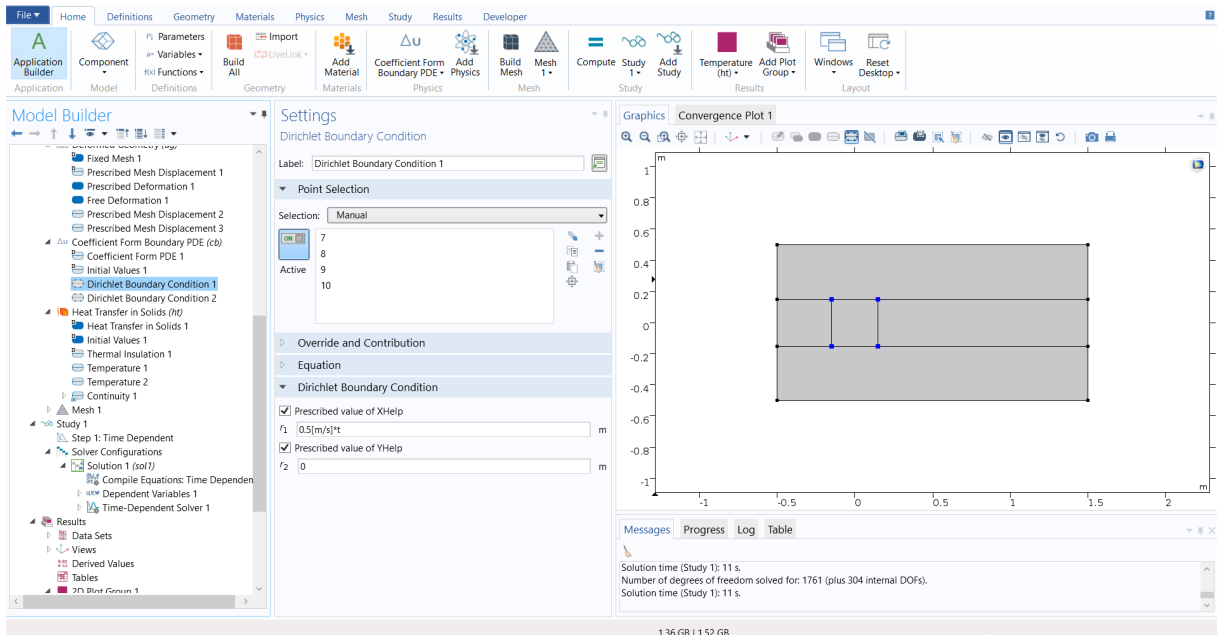
(d)



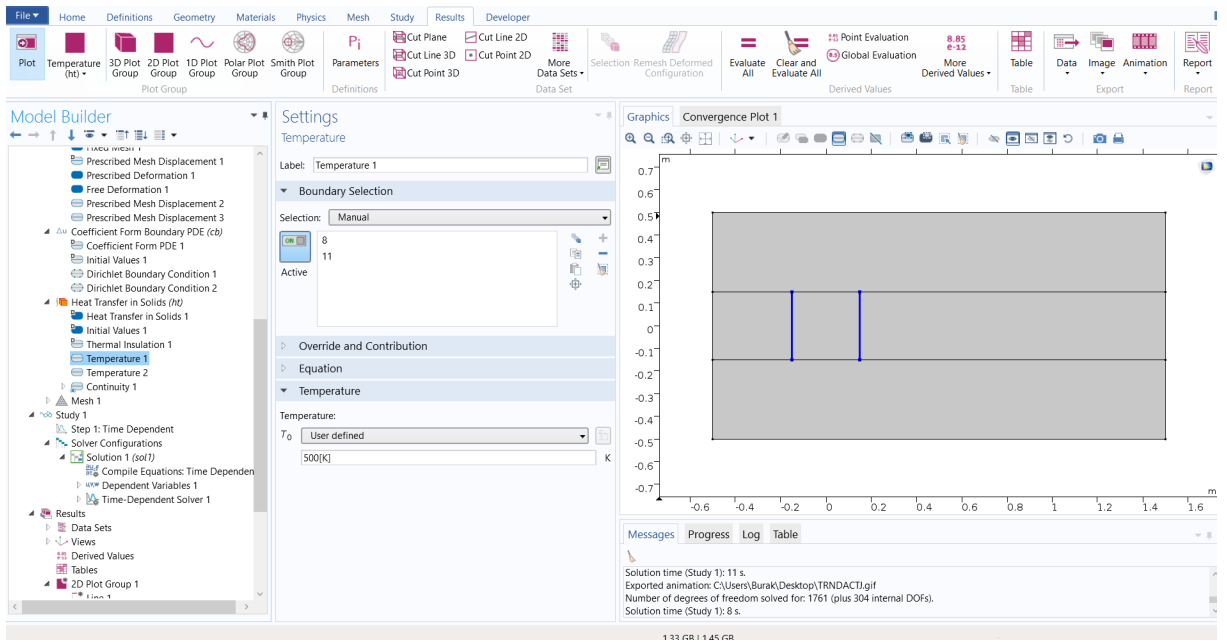
(e)



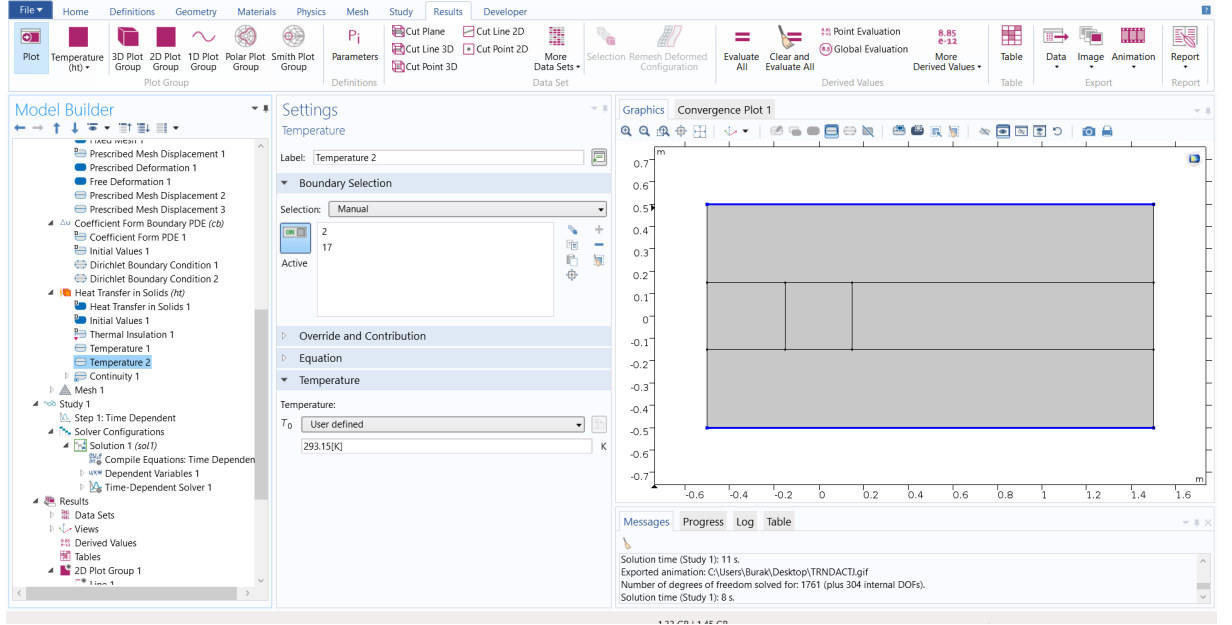
(f)



(g)

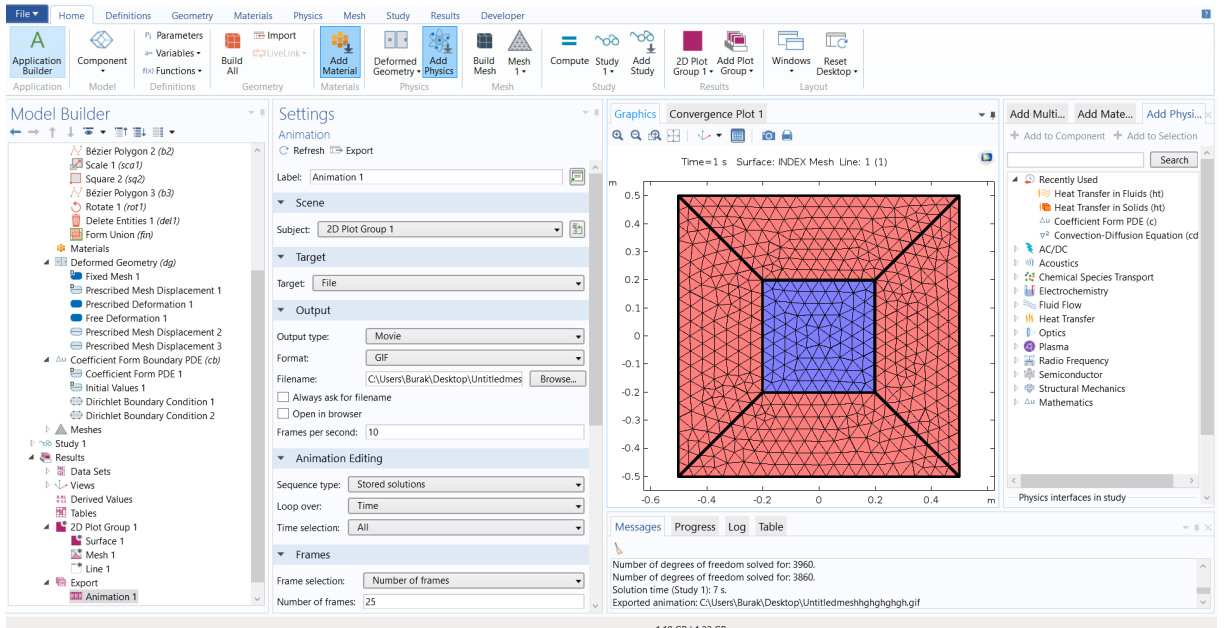


(h)

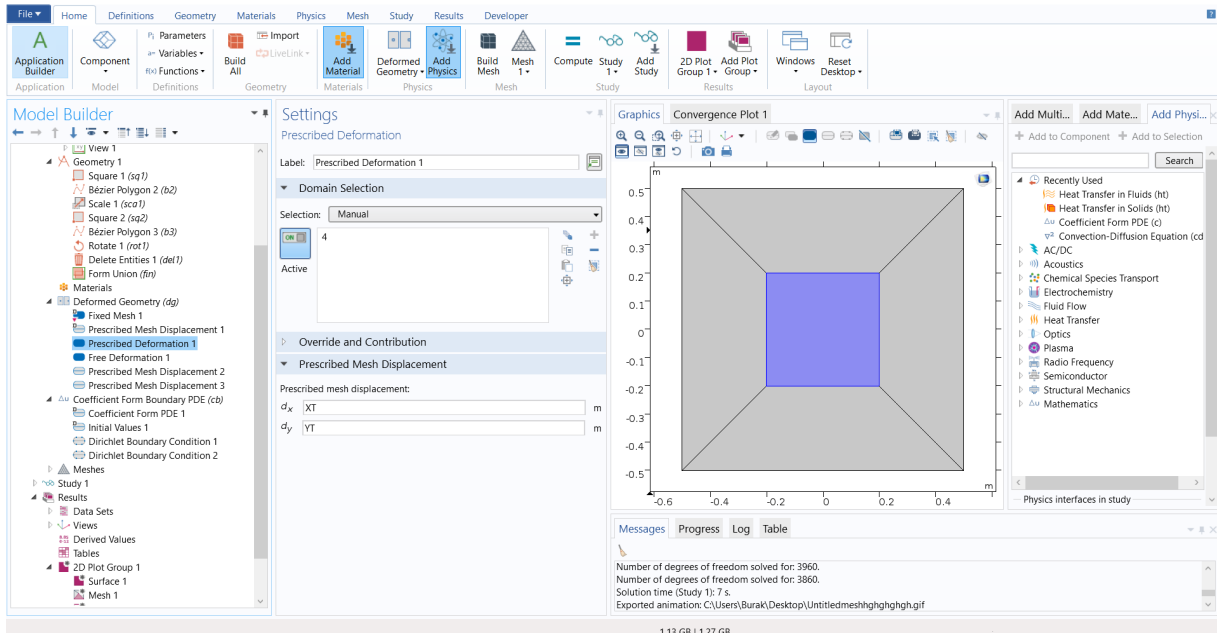


(1)

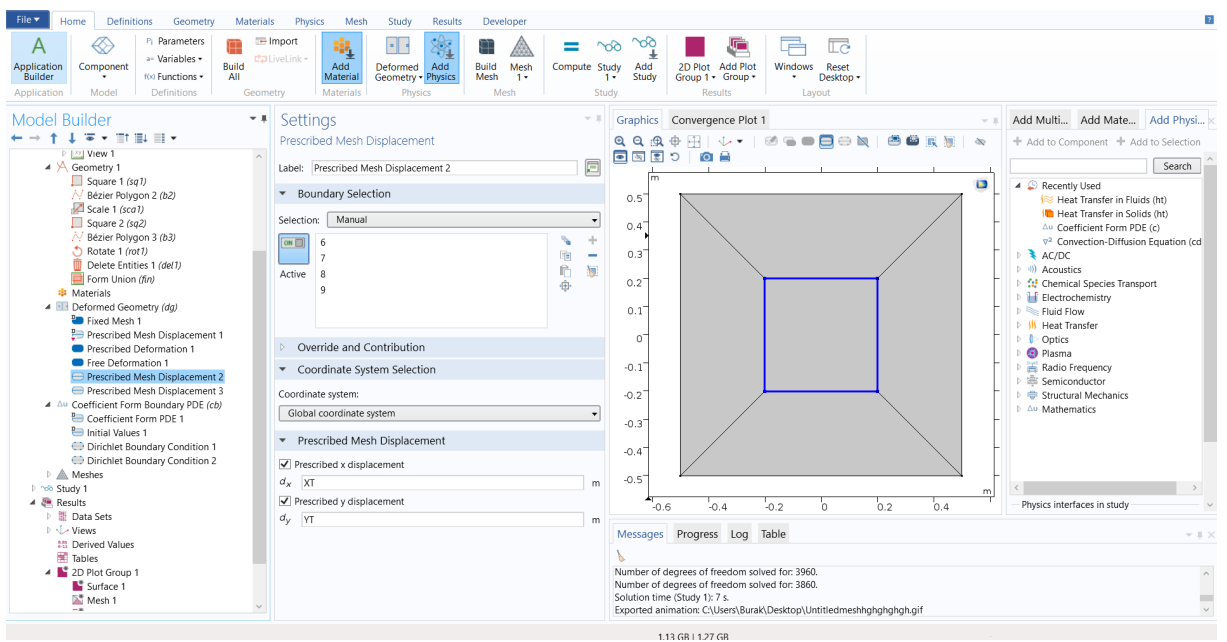
**Ek Şekil 1.1.** Doğrusal hareket için “Deformed Geometry ve Coefficient Form Boundary PDE” modüllerinin Comsol programında uygulama aşamaları



(a)

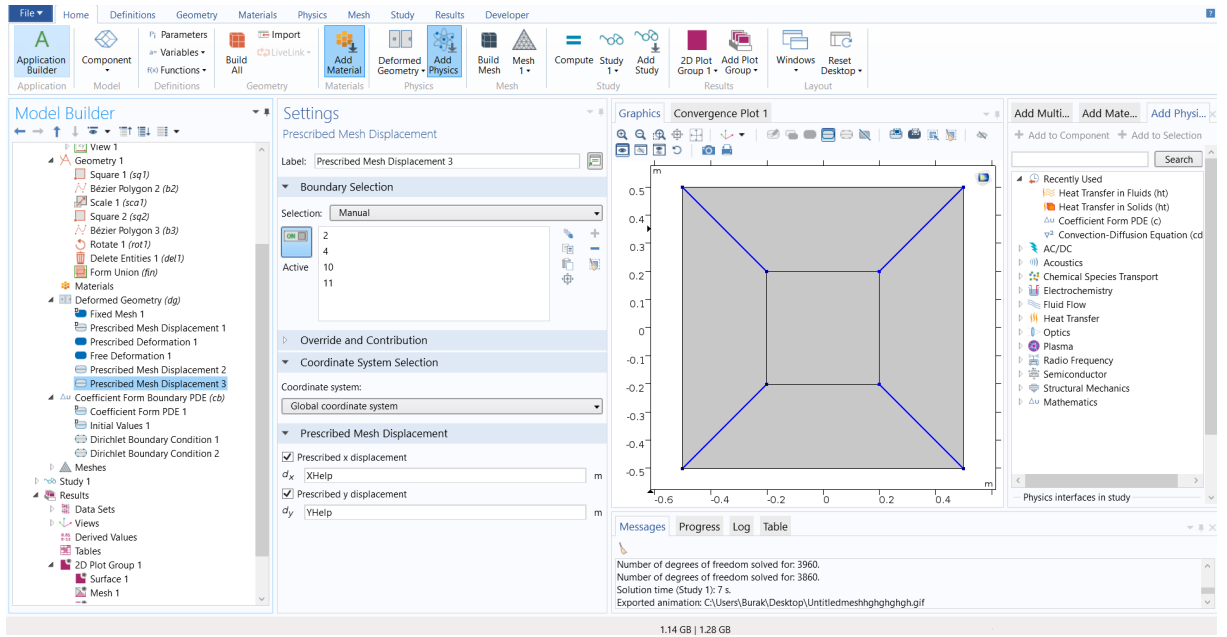


(b)

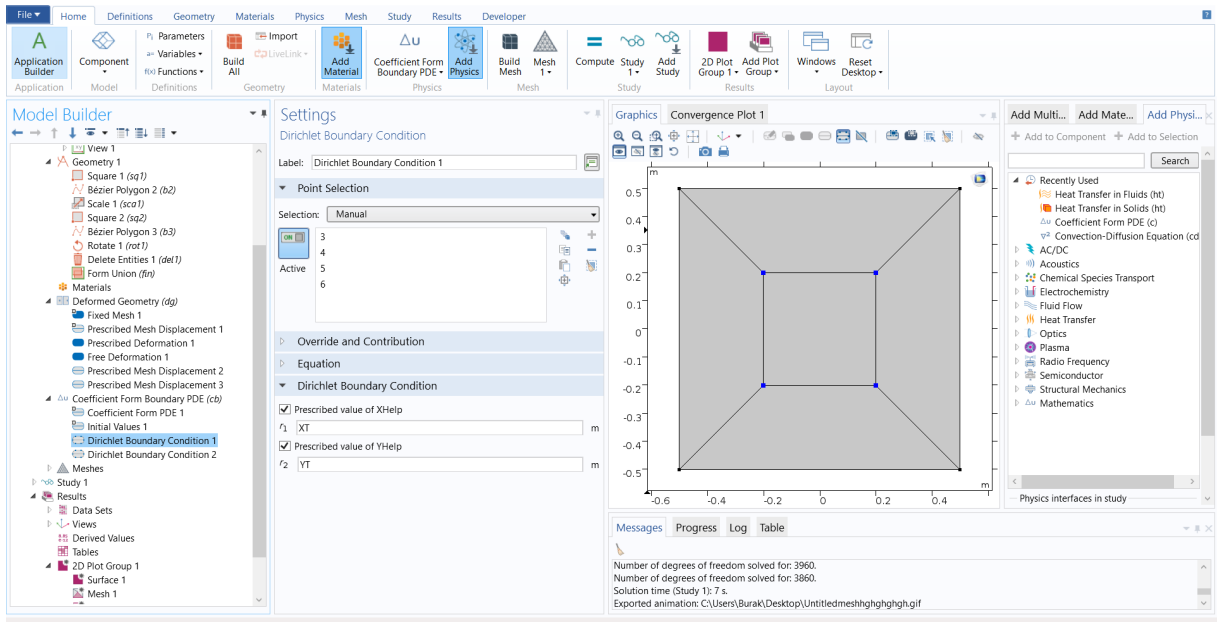


(c)

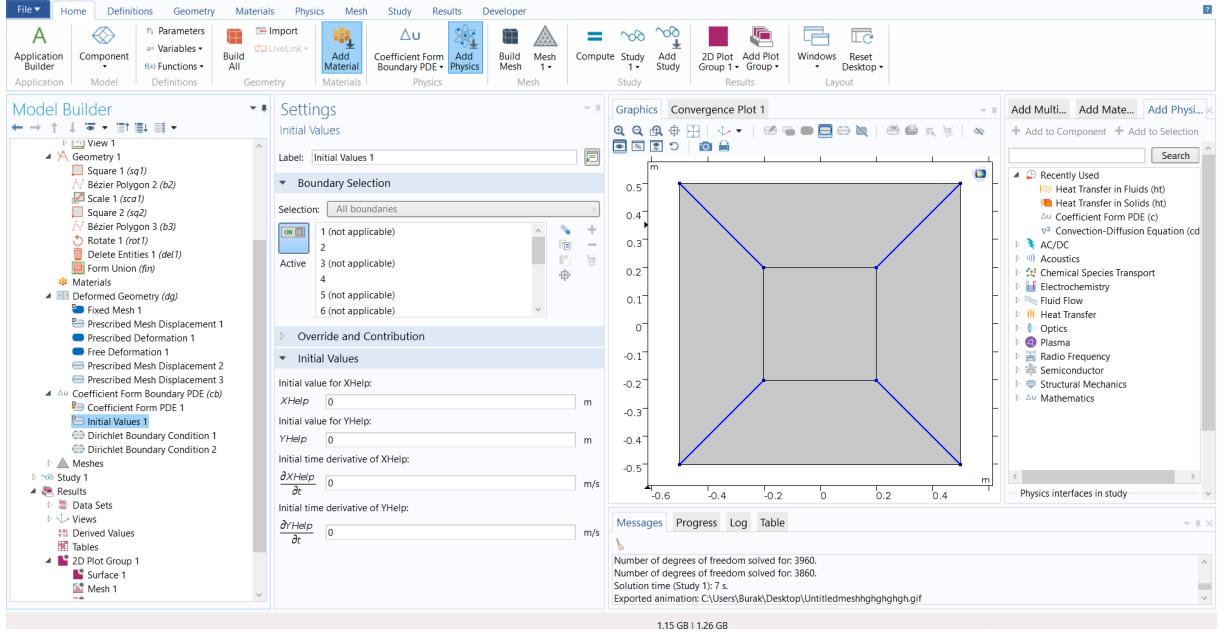




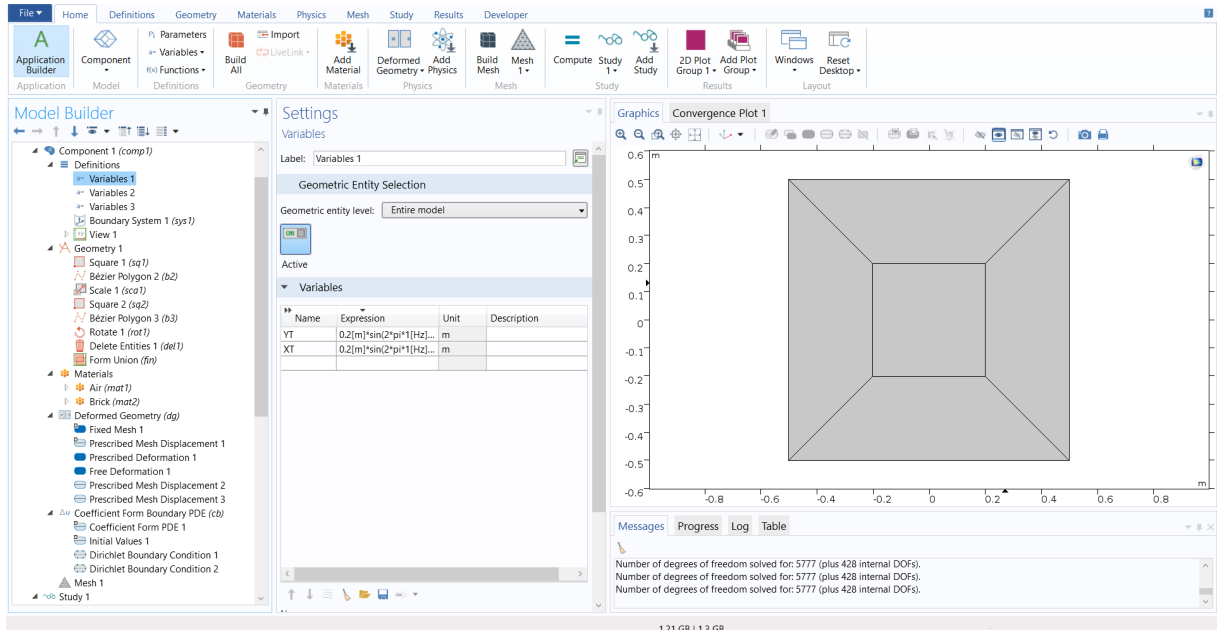
(d)



(e)



(f)



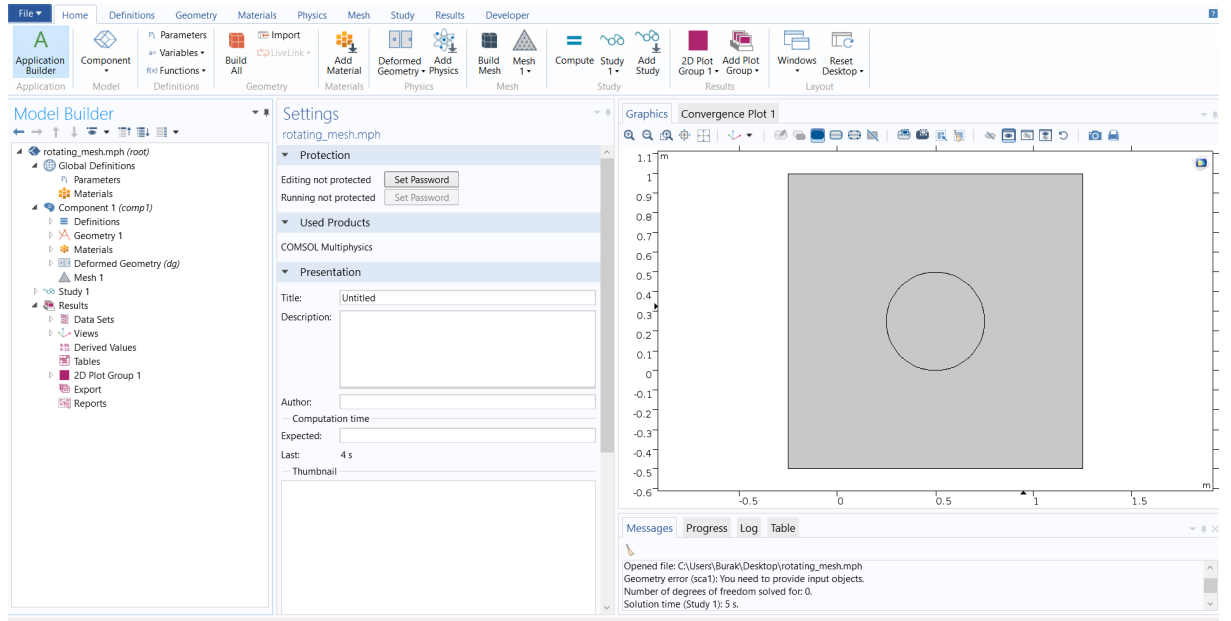
(g)

**Ek Şekil 1.2.** Eğrisel hareket için “Deformed Geometry ve Coefficient Form Boundary PDE” modülünün Comsol programında uygulama aşamaları

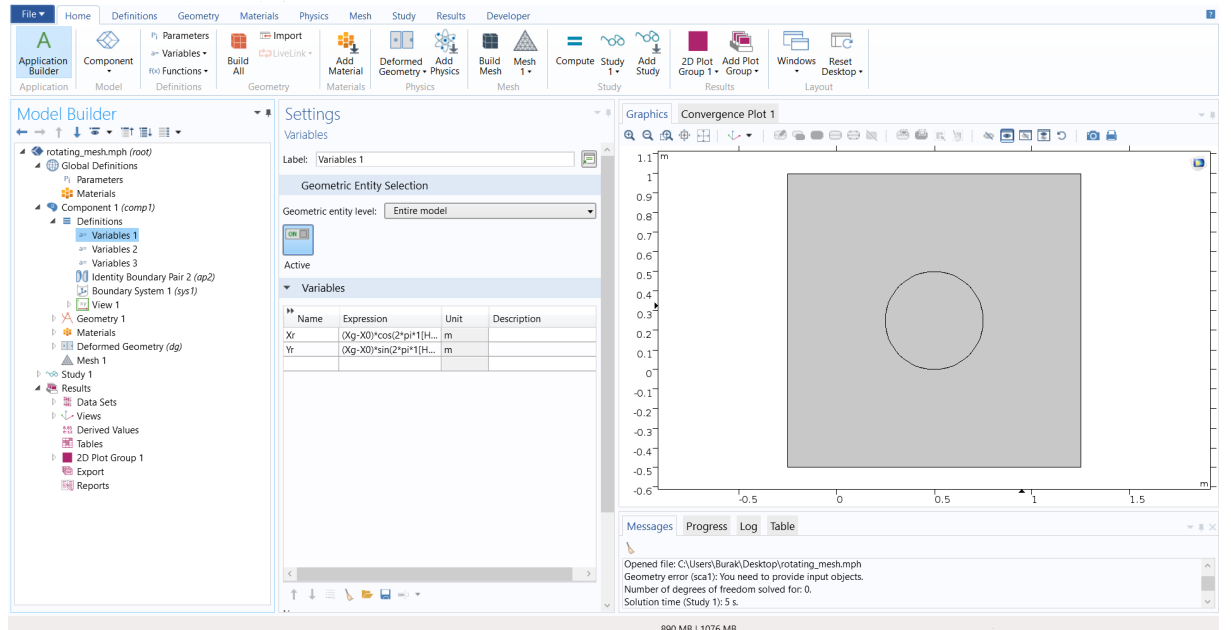
Eğer cismin hareketi sürekli tekrar eden bir davranışa sahip ise sinüs işareti kullanılır.  $x=r*\sin wt$   $y=r*\sin wt$   $w=2*\pi/t=2*\pi*f$  buradan  $XT=YT=a*\sin(2*\pi*f[HZ]*t)$  ifadesi kullanılarak belli örnekleme frekansına sahip sürekli bir sinüs işareti için frekans

spektrumu süreye bağlı olarak çizdirilebilir. Bu bölgedeki hareketi görsel olarak elde edilebilir.

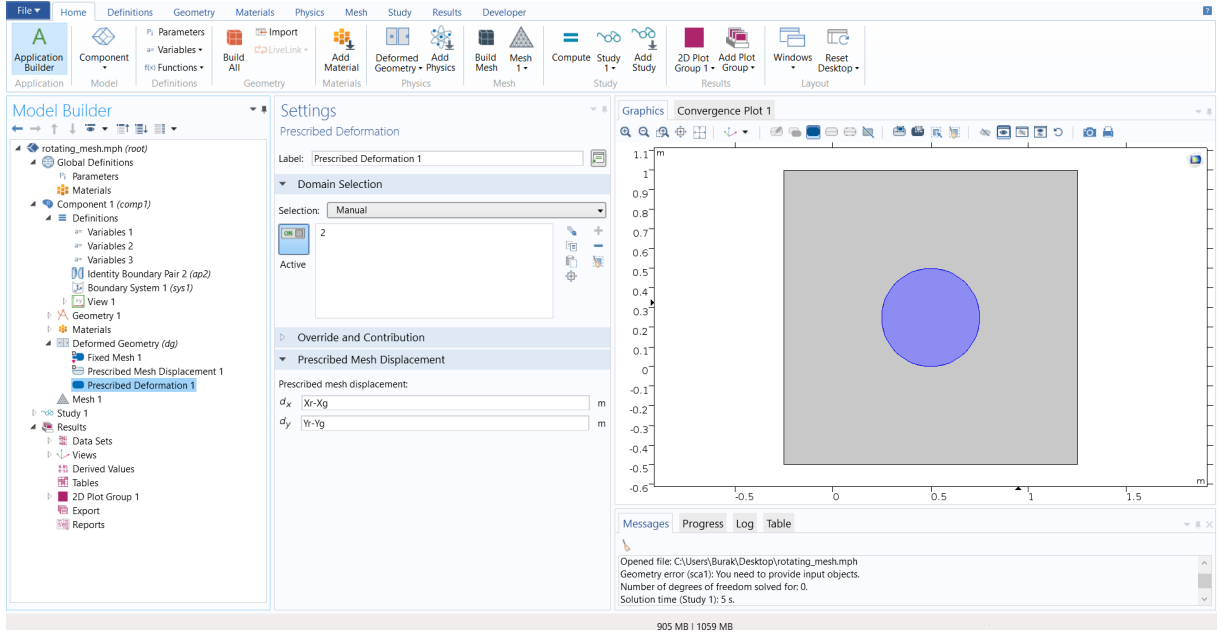
Ek Şekil 1.3’de döner cismin hareketi için “Deformed Geometry” modülü altındaki “Prescribed Deformation” ile hız ifadesi tanımlanır.



(a)



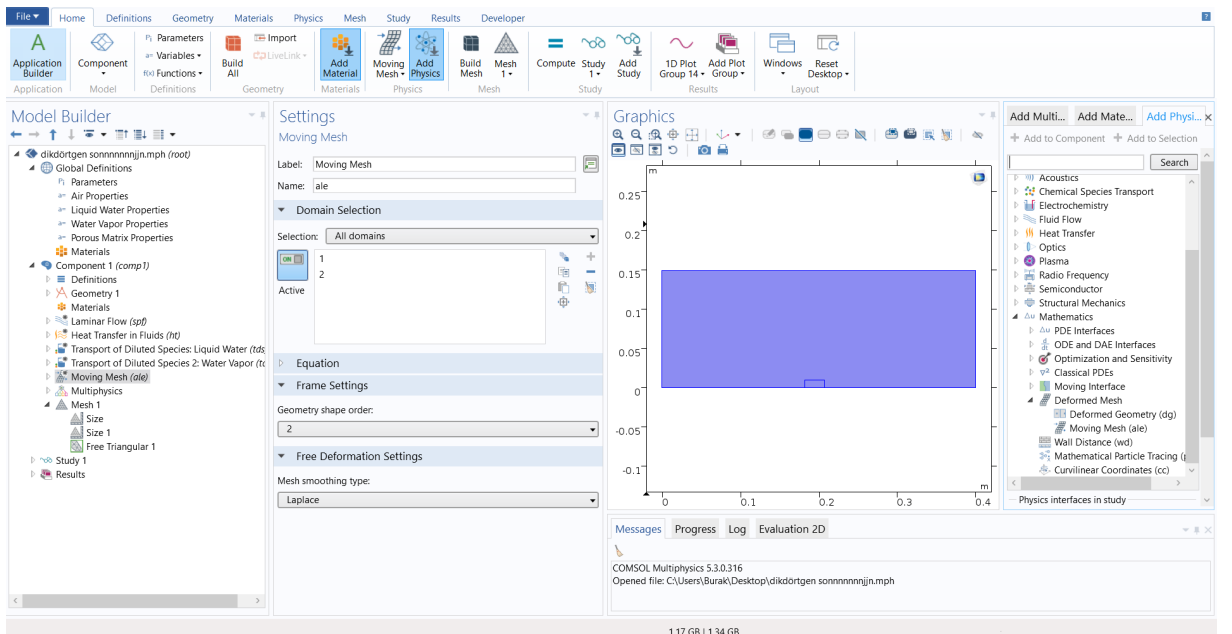
(b)



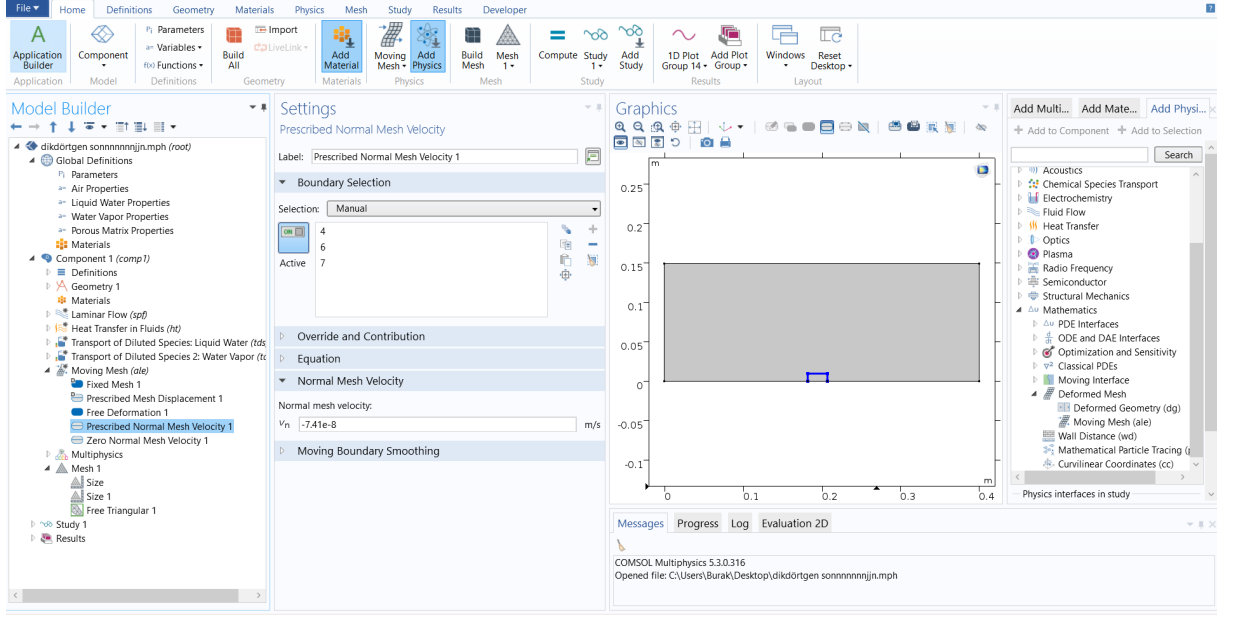
(c)

**Ek Şekil 1.3.** Döner cismin hareketi için “Deformed Geometry” modülünün Comsol programında uygulama aşamaları

Eğer cisimimiz kendi eksenini etrafında döner hareket yapıyorsa  $x=r\cos\omega t$   $y=r\sin\omega t$   
 $\omega=2\pi/t=2\pi\cdot f$  buradan  $Y=a\sin(2\pi\cdot f[\text{HZ}]\cdot t)$  ve  $X=a\cos(2\pi\cdot f[\text{HZ}]\cdot t)$  ifadesi kullanılarak belli açısal hızda dönme hareketi tanımlanabilir.



(a)



(b)

**Ek Şekil 1.4.** Yüzeyde tanımlanan ağ hızı için hareketi için “Moving Mesh” modülünün Comsol programında uygulama aşamaları

Ek Şekil 1.4’de yüzeyde meydana gelen büzülme etkisinin incelenmesi için “Moving Mesh” modülü altında bulunan “Prescribed Normal Mesh Velocity” sekmesi kullanılarak hız ifadesi tanımlanmaktadır.

**EK 2. Konvektif kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve ölçüm sonuçları**

Deney no	Parametre			Ölçüm sonuçları		
	Hava hızı (m/s)	Hava sıcaklığı (°C)	Ürün kalınlığı (cm)	Havanın giriş sıcaklığı (°C)	Havanın çıkış sıcaklığı (°C)	Ortam sıcaklığı (°C)
1	0.5	40	0.5	40	37.35	30
2	0.5	40	0.5	40	36.85	30.65
3	0.5	40	0.5	40	36.85	30.85
4	0.5	50	1.0	50	43.85	27.9
5	0.5	50	1.0	50	44.8	28.7
6	0.5	50	1.0	50	44.9	27.85
7	0.5	60	1.5	60	53.85	26.85
8	0.5	60	1.5	60	53.8	28.8
9	0.5	60	1.5	60	53.85	28.7
10	0.8	40	1.0	40	35.95	28.85
11	0.8	40	1.0	40	36.85	30.85
12	0.8	40	1.0	40	36.75	30.5
13	0.8	50	1.5	50	44.85	28.85
14	0.8	50	1.5	50	44.8	29.85
15	0.8	50	1.5	50	45.35	30.75
16	0.8	60	0.5	60	54.55	30.65
17	0.8	60	0.5	60	54.3	30.8
18	0.8	60	0.5	60	54.35	30.85
19	1.0	40	1.5	40	36.95	31.35
20	1.0	40	1.5	40	36.85	31.65
21	1.0	40	1.5	40	35.95	29.25
22	1.0	50	0.5	50	43.85	28.85
23	1.0	50	0.5	50	44.85	30.85
24	1.0	50	0.5	50	44.80	30.35
25	1.0	60	1.0	60	53.05	29.85
26	1.0	60	1.0	60	53.25	29.80
27	1.0	60	1.0	60	53.25	31.65

**EK 2. Konvektif kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve ölçüm sonuçları (Devam)**

D deney no	Parametre			Ölçüm sonuçları			
	Hava hızı (m/s)	Hava sıcaklığı (°C)	Ürün kalınlığı (cm)	Ürün ilk çapı (cm)	Ürün son çapı (cm)	Ürün ilk kalınlığı (cm)	Ürün son kalınlığı (cm)
1	0.5	40	0.5	3.6	3.4	0.5	0.4
2	0.5	40	0.5	3.5	3.3	0.5	0.4
3	0.5	40	0.5	3.4	3.1	0.5	0.4
4	0.5	50	1.0	2.9	2.7	1	0.8
5	0.5	50	1.0	3.4	3.1	1	0.9
6	0.5	50	1.0	3.3	3.1	1	0.8
7	0.5	60	1.5	3.5	3.1	1.5	1.3
8	0.5	60	1.5	3.15	2.9	1.5	1.2
9	0.5	60	1.5	3.55	3.4	1.5	1.3
10	0.8	40	1.0	3.35	3	1	0.85
11	0.8	40	1.0	3.1	2.75	1	0.7
12	0.8	40	1.0	3.2	2.9	1	0.7
13	0.8	50	1.5	3.45	3.15	1.5	1.2
14	0.8	50	1.5	3.75	3.7	1.5	1.25
15	0.8	50	1.5	3.15	2.85	1.5	1.35
16	0.8	60	0.5	3	2.4	0.5	0.25
17	0.8	60	0.5	2.9	2.3	0.5	0.25
18	0.8	60	0.5	3.3	2.7	0.5	0.25
19	1.0	40	1.5	3.75	3.65	1.5	1.4
20	1.0	40	1.5	3.1	3	1.5	1.4
21	1.0	40	1.5	3.8	3.7	1.5	1.35
22	1.0	50	0.5	3	2.6	0.5	0.25
23	1.0	50	0.5	3.4	3.1	0.5	0.25
24	1.0	50	0.5	3.4	3	0.5	0.3
25	1.0	60	1.0	3.2	2.9	1	0.8
26	1.0	60	1.0	3.1	2.7	1	0.8
27	1.0	60	1.0	3.05	2.7	1	0.7

**EK 3. Konvektif kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve hesaplanan çıktı değerleri**

Deney no	Parametre			Hesaplanan çıktı değerleri			
	Hava hızı (m/s)	Hava sıcaklığı (°C)	Ürün kalınlığı (cm)	Nem içeriği (gr su/gr kuru madde)	Ekserji verimi (%)	Hacimsel değişim (%)	Ekserjetik gelişim potansiyeli (J/kg)
1	0.5	40	0.5	7.20	49.90	28.60	0.041820
2	0.5	40	0.5	7.17	50.60	28.80	0.039520
3	0.5	40	0.5	7.28	45.80	33.40	0.042870
4	0.5	50	1.0	7.18	53.30	30.60	0.134890
5	0.5	50	1.0	7.20	59.10	25.20	0.106340
6	0.5	50	1.0	7.39	58.40	29.40	0.096920
7	0.5	60	1.5	7.20	66.37	32.00	0.169490
8	0.5	60	1.5	6.93	65.80	32.10	0.163818
9	0.5	60	1.5	7.07	65.80	27.30	0.169290
10	0.8	40	1.0	7.75	41.90	31.80	0.044200
11	0.8	40	1.0	7.84	45.00	33.11	0.048950
12	0.8	40	1.0	7.88	45.40	30.19	0.045318
13	0.8	50	1.5	7.82	56.70	33.30	0.119000
14	0.8	50	1.5	8.14	55.60	27.41	0.112776
15	0.8	50	1.5	7.86	57.40	26.20	0.110760
16	0.8	60	0.5	3.71	63.00	68.20	0.195730
17	0.8	60	0.5	3.75	63.30	68.50	0.188638
18	0.8	60	0.5	3.74	62.90	66.50	0.190323
19	1.0	40	1.5	8.43	42.60	32.50	0.053320
20	1.0	40	1.5	8.45	38.90	33.50	0.048880
21	1.0	40	1.5	8.48	40.00	34.50	0.052200
22	1.0	50	0.5	4.24	51.90	59.50	0.133718
23	1.0	50	0.5	4.32	53.10	58.40	0.139762
24	1.0	50	0.5	4.30	53.60	53.29	0.129920
25	1.0	60	1.0	5.81	60.50	34.20	0.218435
26	1.0	60	1.0	5.52	61.30	39.30	0.224460
27	1.0	60	1.0	5.68	58.40	37.30	0.227552



**EK 4. Işımla kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve ölçüm sonuçları**

Deney no	Parametre			Ölçüm sonuçları		
	Hava hızı (m/s)	Işınım gücü (W)	Tepsi konumu	Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Havanın özgül ısısı (kJ/kgK)	Suyun buharlaşma entalpisi (kJ/kg)
1	0.3	250	1	1.127	1.007	2257
2	0.3	250	1	1.127	1.007	2257
3	0.3	250	1	1.127	1.007	2257
4	0.3	300	2	1.109	1.007	2257
5	0.3	300	2	1.109	1.007	2257
6	0.3	300	2	1.109	1.007	2257
7	0.3	350	3	1.109	1.007	2309
8	0.3	350	3	1.109	1.007	2309
9	0.3	350	3	1.109	1.007	2309
10	0.6	250	2	1.145	1.007	2309
11	0.6	250	2	1.145	1.007	2309
12	0.6	250	2	1.145	1.007	2309
13	0.6	300	3	1.127	1.007	2309
14	0.6	300	3	1.127	1.007	2309
15	0.6	300	3	1.127	1.007	2309
16	0.6	350	1	1.145	1.007	2230
17	0.6	350	1	1.145	1.007	2230
18	0.6	350	1	1.145	1.007	2230
19	0.9	250	3	1.15	1.007	2383
20	0.9	250	3	1.15	1.007	2383
21	0.9	250	3	1.15	1.007	2383
22	0.9	300	1	1.164	1.007	2230
23	0.9	300	1	1.164	1.007	2230
24	0.9	300	1	1.164	1.007	2230
25	0.9	350	2	1.145	1.007	2230
26	0.9	350	2	1.145	1.007	2230
27	0.9	350	2	1.145	1.007	2230

**EK 4. Işınımla kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve ölçüm sonuçları (Devam)**

Deney no	Parametre			Ölçüm değerleri ve termofiziksel özellikler				
	Hava hızı (m/s)	Işınım gücü (W)	Tepsi konumu	Işınım lambası sıcaklığı (°C)	Ürün sıcaklığı (°C)	Havanın debisi (kg/s)	Havanın giriş sıcaklığı (°C)	Ortam sıcaklığı (°C)
1	0.3	250	1	475	104.9	0.0368	42.50	27.5
2	0.3	250	1	470.5	103	0.0368	41.75	27
3	0.3	250	1	476.2	105.5	0.0368	42.85	28.4
4	0.3	300	2	515	98.7	0.0362	46.40	27
5	0.3	300	2	510.5	95.2	0.0362	46.39	27.8
6	0.3	300	2	514.2	99.7	0.0362	46.85	27.5
7	0.3	350	3	530	85	0.0362	45.85	28
8	0.3	350	3	525.4	83.5	0.0362	46.85	28
9	0.3	350	3	532.3	85.7	0.0362	46.65	28.3
10	0.6	250	2	499.7	82.4	0.0362	37.8	28.2
11	0.6	250	2	501.2	81.4	0.0748	37.85	27.9
12	0.6	250	2	500.8	82.7	0.0748	38.85	28
13	0.6	300	3	505.7	84	0.0736	39	29.5
14	0.6	300	3	504.5	82.5	0.0736	37.85	28
15	0.6	300	3	504	83	0.0736	39.05	29
16	0.6	350	1	521.2	114.3	0.0748	36.85	27.5
17	0.6	350	1	520	113	0.0748	36.65	27.2
18	0.6	350	1	522.5	114.8	0.0748	37.35	27.6
19	0.9	250	3	480.5	56	0.112	32.3	23.7
20	0.9	250	3	485	54	0.112	31.35	23.9
21	0.9	250	3	486.8	55.8	0.112	31.65	24
22	0.9	300	1	517.4	110	0.114	32.7	23.5
23	0.9	300	1	518	110.5	0.114	33.15	23.8
24	0.9	300	1	516.5	109.8	0.114	32.15	23
25	0.9	350	2	534.1	110.2	0.112	35.8	25.6
26	0.9	350	2	532.5	109.7	0.112	35.95	25.8
27	0.9	350	2	530.8	112.5	0.112	35.85	25.5

**EK 5. Işınımla kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve hesaplanan çıktı değerleri**

Deney no	Parametre			Hesaplanan çıktı değerleri			
	Hava hızı (m/s)	Işınım gücü (W)	Tepsi konumu	Kuruma süresi (dakika)	Toplam renk değişimi	Enerji tüketimi (kwh)	Ekserji verimi (%)
1	0.3	250	1	112	173.37	0.465	26.19
2	0.3	250	1	110	158.41	0.458	27.00
3	0.3	250	1	108	160.74	0.450	27.50
4	0.3	300	2	122	120.46	0.609	15.04
5	0.3	300	2	120	112.27	0.600	15.35
6	0.3	300	2	121	129.68	0.605	15.23
7	0.3	350	3	144	121.40	0.840	31.85
8	0.3	350	3	146	160.49	0.850	31.25
9	0.3	350	3	143	160.69	0.830	31.50
10	0.6	250	2	154	158.09	0.640	16.52
11	0.6	250	2	155	128.57	0.645	16.44
12	0.6	250	2	158	133.16	0.658	16.13
13	0.6	300	3	173	81.69	0.864	15.72
14	0.6	300	3	175	54.60	0.875	15.54
15	0.6	300	3	172	110.81	0.860	15.81
16	0.6	350	1	76	142.24	0.441	46.16
17	0.6	350	1	78	139.32	0.455	45.20
18	0.6	350	1	80	152.97	0.466	43.90
19	0.9	250	3	220	33.53	0.916	6.70
20	0.9	250	3	225	36.47	0.937	6.50
21	0.9	250	3	224	31.82	0.933	6.60
22	0.9	300	1	138	172.65	0.690	19.17
23	0.9	300	1	140	151.13	0.700	18.90
24	0.9	300	1	135	143.30	0.675	19.60
25	0.9	350	2	120	128.83	0.703	19.16
26	0.9	350	2	121	89.71	0.700	19.33
27	0.9	350	2	123	81.01	0.717	18.86

**EK 5. Işınımla kurutmada Taguchi metodu için seçilen parametreler ve hesaplanan çıktı değerleri (Devam)**

Deney no	Parametre			Hesaplanan çıktı değerleri		
	Hava hızı (m/s)	Işınım gücü (W)	Tepsi konumu	Isıl verim (%)	Özgül enerji tüketimi (Mj/kg)	Performans oranı
1	0.3	250	1	8.52	26.40	3.07394
2	0.3	250	1	8.65	26.08	3.12139
3	0.3	250	1	8.80	25.63	3.12500
4	0.3	300	2	6.50	34.70	2.31385
5	0.3	300	2	6.59	34.10	2.32929
6	0.3	300	2	6.54	34.48	2.32875
7	0.3	350	3	4.87	47.31	6.54004
8	0.3	350	3	4.82	47.87	6.48340
9	0.3	350	3	4.91	46.97	6.41548
10	0.6	250	2	6.31	36.56	2.61807
11	0.6	250	2	6.26	36.85	2.62620
12	0.6	250	2	6.14	37.59	2.62704
13	0.6	300	3	4.77	48.32	3.29560
14	0.6	300	3	4.71	48.94	3.29936
15	0.6	300	3	4.79	48.10	3.30063
16	0.6	350	1	8.90	24.94	5.18652
17	0.6	350	1	8.65	25.75	5.22543
18	0.6	350	1	8.45	26.37	5.19527
19	0.9	250	3	4.60	51.88	1.45652
20	0.9	250	3	4.40	53.07	1.47727
21	0.9	250	3	4.50	52.84	1.46667
22	0.9	300	1	5.67	39.29	3.38095
23	0.9	300	1	5.59	39.86	3.38104
24	0.9	300	1	5.80	38.44	3.37931
25	0.9	350	2	5.61	39.69	3.41533
26	0.9	350	2	5.64	39.52	3.42730
27	0.9	350	2	5.50	40.48	3.42909

## EK 6. Işınımla kurutucu için ekserji veriminin Matlab kodu

a=;

b=;

c=;

A\_M=;

A\_IR=;

T\_IR=;

T\_M=;

e\_IR=;

e\_M=;

T\_0=;

sigma=;

a1=;

b1=;

c1=;

m\_a=;

T\_g=;

m\_w=;

lda=;

c\_p=;

X=a/b; Y=c/b; A=1/sqrt(X^2+Y^2);

F\_M\_DC=(1/(2\*pi))\*((atan(1/Y))-(A\*Y\*(atan(A))));

X1=a1/b1; Y1=c1/b1; A2=(1+Y1)^2+X1^2; B=(1-Y1)^2+X1^2;

F\_M\_IR=(1/(pi\*Y1))\*(atan(X1/sqrt(Y1^2-1)))+(X1/pi)\*((A2-  
2\*Y1)/(Y1\*sqrt(A2\*B))\*(atan(sqrt((A2\*(Y1-1)/(B\*(Y1+1)))))-(1/Y1)\*(atan(sqrt((Y1-  
1)/(Y1+1))))));

F\_IR\_M=F\_M\_IR\*(A\_M/A\_IR);

F\_IR\_DC=1-F\_IR\_M;

Qabs=sigma\*((T\_IR)^4-(T\_M)^4)/(((1-e\_IR)/(A\_IR\*e\_IR  
) + 1/(1/(A\_IR\*F\_IR\_M))) + 1/(((1/(A\_IR\*F\_IR\_DC)) + 1/(A\_M\*F\_M\_DC))) + (1-  
e\_M)/(A\_M\*e\_M));

bu=(1+1/3\*(T\_0/T\_IR)^4\*(e\_IR)^(-1))-(4/3)\*((e\_IR)^(-0.25))\*(T\_0/T\_IR);

Exabs=((bu\*Qabs)/1000);

$$Ex_a = m_a * c_p * ((T_g - T_0) - T_0 * \log(T_g / T_0));$$

$$Q = (m_w) * l_d;$$

$$Ex = (1 - (T_0 / T_M)) * Q;$$

$$\text{Ekserji verimi} = ((Ex) / (Ex_a + (Ex_{abs}))) * 100;$$

fprintf('sonuç :ekserji verimi')

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burak Türkan  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa/İnegöl-1988  
Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Çelebi Mehmet Lisesi-2005  
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği  
Bölümü-2009  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği  
Bölümü-2014

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bayburt Üniversitesi -2010-2011  
Bursa Uludağ Üniversitesi -2011-

İletişim (e-posta) : burakt@uludag.edu.tr

Yayınları :

**Bademlioglu, H., Canbolat, A.S., Turkan, B., Kaynakli, O. 2018.** Güneş Radyasyonu Hesaba Katılarak Optimum Yalıtım Kalınlığının Duvar Yönlerine Bağlı İncelenmesi, IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, 18-20 Nisan, sayfa 2184-2192, Trakya Üniversitesi, Edirne.

**Canbolat, A.S., Yamankaradeniz, R., Can, M., Avcı, A., Etemoğlu A.B., Türkan, B. 2013.** Otomobil Radyatörlerinin Dizayn Parametrelerinin Değiştirilerek Isıl Performansına Etkisinin Gözlenmesi. Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve Ar-Ge Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.

**Canbolat, A.S., Türkan, B., Yamankaradeniz, R., Can, M., Etemoğlu, A.B. 2014.** Otomobil radyatörlerinde boru sayısının ısıl performansa ve etkenliğe etkisinin incelenmesi. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 26-27 Mayıs.

**Canbolat, A.S., Tan, F., Yüce, B.E., Türkan, B. 2014.** Nano Sıvıların Otomobil Radyatörlerinde Soğutucu Sıvı Olarak Kullanılması. IV. Uludağ Üniversitesi Bilgilendirme ve AR-GE Günleri, Bursa (En iyi poster ödülü, 3.lük).

**Canbolat, A.S., Türkan, B. 2016.** Otomobil Radyatörlerinin Isıl Performansına Etki Eden Parametrelerin Nümerik İncelenmesi. *Journal of Thermal Science & Technology*, 36(2):29-40.

**Canbolat, A.S., Türkan, B., Etemoglu, A.B., Can, M. 2016.** Numerical investigation into thermal comfort conditions in a midibus. *The Journal of Macro Trends in Applied Science*, JMAS, 4(1):13-23.

**Canbolat, A.S., Türkan, B., Etemoğlu, A.B., Can, M., Avcı, A. 2016.** Technical and Economical Comparison of Plate, Shell and Tube and Miniature Pipe Type Heat Exchangers. *Uludag University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(2):107-122.

**Canbolat, A.S., Kaynakli, O., Türkan, B., Yamankaradeniz, R. 2017.** Investigation of Different Turbulance Models on Thermal and Hydraulic Behaviour of Automotive



- Cooling System. *International Journal of Mechanical and Production Engineering, IJMPE*, 5(9):77-82.
- Canbolat, A.S., Kaynakli, O., Türkan, B. 2017.** Cfd Study of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in Vehicle Radiators. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(4):66-70.
- Canbolat, A.S., Türkan, B., Kaynakli, Ö., Etemoğlu, A.B. 2018.** Investigation of Parameters Affecting The Temperature Distribution in Wood with Different Finite Element Softwares. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(1):65-79.
- Canbolat, A.S., Kaynaklı, Ö., Türkan, B., Etemoğlu, A.B., Yamankaradeniz R. 2018.** Thermal and Economic Analysis of The Insulation in The Buildings in Different Climatic Zones. *Engineering Sciences*, 13(2): 85-95.
- Canbolat, A.S., Kaynakli, Ö., Bademlioglu, A.H., Turkan, B. 2018.** İki Farklı Akış Konfigürasyonu için Otomobil Radyatörlerinde Isı ve Akış Analizinin Nümerik İncelenmesi. 9th International Automotive Technologies Congress, OTEKON, 1279-1284, Bursa.
- Canbolat, A.S., Kaynakli, Ö., Türkan, B., Yamankaradeniz N. 2019.** Klima Cihazı Üfleme Çikiş Açısının Isıl Konfor Üzerindeki Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 26(169):31-38.
- Etemoğlu, A.B., Etemoğlu, N., Türkan, B., Canbolat, A.S. 2018.** Parametric Investigation on Thermal Performance of Vehicle Brake Systems. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(2):556-565.
- Sen, Y., Turkan, B., Yamankaradeniz, R., Kaynakli, O. 2018.** Thermoeconomic Analysis of Regenerative Gas Turbine Based Heat and Power System. International Conference on Science and Technology, ICONST 2018, Proceedings, Prizren-Kosovo, 05-09,261-271.
- Tan, F., Canbolat, A.S., Türkan, B., Yüce, B.E. 2015.** Elektronik Cihazların Soğutulmasının Farklı Türbülans Modelleri ve Duvar Yaklaşımları ile Cfd Simülasyonu. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 8-11 Nisan.
- Tan, F., Canbolat, A.S., Yuce, B. E., Turkan, B. 2016.** Experimental and Numerical Investigaton of Strawberry Drying. *Uludag University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(1):203-215.
- Türkan, B., Etemoğlu, A.B., Can, M., Canbolat, A.S., Tan, F. 2013.** Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transferinin Matematik Modellenmesi ve Analizi. Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve Ar-Ge Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.
- Türkan, B., Etemoğlu, A.B., Can, M., Canbolat, A.S., Tan, F., Doğan, O. 2013.** Geçici Rejimde Malzeme İçerisindeki Sıcaklık Dağılımının Nümerik İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve Ar-Ge Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.
- Türkan, B., Canbolat, A.S., Etemoğlu A.B., Can, M. 2016.** Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Fren Disk Sistemlerinin Hafifletilmesi ve Optimizasyonu. Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Günleri.
- Türkan, B., Canbolat, A.S., Can, M., Etemoglu, A.B. 2016.** Numerical investigation into the temperature distribution on the disc brake system. *The Journal of Macro Trends in Technology and Innovation, JMTI*, 4(1):8-20.
- Türkan, B., Canbolat, A.S., Etemoglu, A.B. 2017.** Numerical analysis of thermal behaviors of column beam structures with different insulation thickness. *International Journal of Mechanical and Production Engineering, IJMPE*, 5(9):69-76.

- Türkan, B., Canbolat, A.S., Etemoğlu, A.B., Kaynaklı, Ö. 2018.** Türkiye’deki tüm iller için optimum yalıtım kalınlığının nümerik incelenmesi. *Technological Applied Science*, 13(2): 75-88.
- Turkan, B., Canbolat, A.S., Etemoglu, A.B. 2018.** 3-D simulation of simultaneous heat and mass transfer of apple. *Bulgarian Chemical Communications*, Volume 50, Special Issue G (pp. 215 - 224).
- Turkan, B; Etemoglu, N., Etemoglu, A.B. 2019.** 3-D Analysis of Thermal Bridge Effect in Buildings. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6(3):414-427.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B., Can, M. 2019.** An investigation into evaporative ink drying process on forced convective heat and mass transfer under impinging air jets. *Heat and Mass Transfer*, 55(5):1359-1369.
- Turkan, B., Canbolat, A.S., Etemoglu, A.B. 2019.** Numerical Investigation of Multiphase Transport Model for Hot-Air Drying of Food. *Journal of Agricultural Sciences*, 25(4): 518-529.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B. 2019.** Numerical investigation of wood drying. *Wood Research*, 64(1):127-136.
- Turkan, B., Etemoglu A.B. 2019.** Numerical Analysis of Heat Transfer Enhancing Parameters on Impinging Air Jets. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 37(3): 1017-1030.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B. 2019.** Experimental and theoretical investigation of drying kinetics of banana slices. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, Accepted paper: 31 July 2019.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B. 2019.** Optimization of parameters effecting food drying using Taguchi method. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, Accepted paper: 15 October 2019.
- Türkan, B., Canbolat, A.S., Etemoğlu, A.B. 2019.** Isı yalıtım uygulamalarında ısı köprüsü etkisinin nümerik olarak incelenmesi. *Soğutma Dünyası Dergisi*, 22(84):68-76.
- Türkan, B., Şen, Y., Etemoğlu, A.B. 2019.** Bütün ve Dilimlenmiş Patateslerin Konvektif Kurutucuda Kurutulmasının Deneysel İncelenmesi. 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan, İzmir.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B. 2020.** Performance Evaluation for Thermal Architectures of Flue-Gas Assisted Organic Rankine Cycle Systems. *Journal of Thermal Science & Technology*, 40(1): 65-76.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B., Can, M. 2020.** Investigation of thermal architectures for flue-gas assisted organic rankine cycle systems: an assessment for thermodynamics and environmental performance indicators. *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*, 42(4):505-520.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B., Can, M. 2020.** Analysis of Evaporative Drying of Thin Ink Films Using High-Velocity Hot-Air Impinging Jets: A Comprehensive Review. *Surface Review and Letters*, Accepted paper: 24 February 2020.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B. 2020.** Simulation of Shrinkage Effect in Drying of Food Products in Hot-Air Dryer. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(2): 527-544.
- Turkan, B., Etemoglu, A.B., Cegil, U. 2020.** Simulation of Cooling of Polyurethane Coated Vehicle Steering Wheel, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7(2): 592-602.

**Yüce, B.E., Türkan, B., Tan, F., Canbolat, A.S. 2014.** Ülkemizde Tüketim Tipli Gıda Ürünlerinde Kuruma Karakteristiklerinin Parametrik İncelenmesi. *İKSES'14*, 2.Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu, Balıkesir, 23-25 Ekim.

**Yüce, B.E., Türkan, B., Canbolat, A.S., Tan, F. 2014.** Güneş Enerjisi ile Çalışan Stirling Motorlarının İklimlendirme Sistemlerinde Kullanımının İncelenmesi. IV. Uludağ Üniversitesi Bilgilendirme ve AR-GE Günleri, Bursa.