

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**NEM KONTROLLÜ MISIR KURUTMA SİSTEMİNİN DENEYSEL
VE TEORİK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Emel ÇELİK

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yusuf ÇAY
Ortak Danışman : Doç. Dr. Nezaket PARLAK

Temmuz 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NEM KONTROLLÜ MISIR KURUTMA SİSTEMİNİN DENEYSEL
VE TEORİK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Emel ÇELİK

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

**Bu tez 09/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Prof. Dr. Yusuf ÇAY	BAŞARILI
Prof. Dr. Durmuş KARAYEL	BAŞARILI
Prof. Dr. Ahmet KOLİP	BAŞARILI
Prof. Dr. Nedim SÖZBİR	BAŞARILI
Doç. Dr. Ali Etem GÜREL	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Emel ÇELİK
09/07/2021

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli hocalarım Prof. Dr. Yusuf ÇAY, Doç. Dr. Nezaket Parlak'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez sürecinde çalışmalarına yorumları ve görüşleri ile yol gösteren ve katkıda bulunan Prof. Dr. Ahmet KOLİP, Prof. Dr. Durmuş KARAYEL 'ye teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarına destek veren Çelik Kardeşler Ltd. Şti. (Ada Kurutma) yetkililerine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

İş hayatı ve tez çalışmalarımnda başarımın kaynağı olan beni yetiştiren bu günlere gelmemde büyük bir emeği olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2020-50-02-003) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	v
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Yöntem.....	1
1.2. Mısır Hakkında Genel Bilgiler.....	2
1.2.1. Mısırın tarihçesi.....	2
1.2.2. Mısır çeşitleri.....	3
1.2.3. Dünyada mısır üretimi ve tüketimi.....	3
1.3. Mısır Kurutma.....	4
1.3.1. Kurutma hızı.....	6
1.4. Mısır Kurutma Sistemleri.....	7
1.4.1. Silo tipi kurutma.....	9
1.4.2. Sürekli akışlı kurutucular	9
1.5. Kapasitans Yöntemi İle Nem Ölçüm Sensörleri	9

BÖLÜM 2.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
-----------------------------	----

BÖLÜM 3.

TEORİK ANALİZ	25
3.1. Korunum Denklemleri	25
3.1.1. Süreklilik denklemi	25
3.1.2. Momentum denklemi	25
3.1.3. Enerji denklemi	25

3.1.4. Difüzyon denklemi	26
3.2. Ürün Nem İçeriği	26
3.3. Kütle Geçişinin Modellenmesi.....	27
3.4. Enerji Analizi	29
3.4.1. Kütlelerin korunumu ilkesi	29
3.4.2. Enerjinin korunumu ilkesi	30
3.5. Ekserji Analizi.....	31
3.6. Gözenekli Ortamda Akış.....	38
3.7. Kapasitans Nem Ölçme Yöntemi.....	40
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMA	42
4.1. Materyal	42
4.2. Mısır Kurutma Deney Seti	42
4.3. Dielektrik Nem Ölçümü.....	46
4.4. Ölçüm Cihazlarında Belirsizlik Analizi	47
BÖLÜM 5.	
BULGULAR VE TARTIŞMA	49
5.1. Kurutma Davranışı	49
5.2. Kütle Geçiş Sonuçları	53
5.3. Enerji Analizi Sonuçları	56
5.4. Ekserji Analizi Sonuçları	60
5.5. Gözenekli Ortamda Akış Sonuçları	62
5.6. Kapasitans Nem Ölçme Yöntemi Sonuçları	63
BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	68

KISALTMALAR

BAP	: Bilimsel Projeler Araştırma
CD	: Sürekli Kurutma
DR	: Kuruma Hızı
EK	: Enerji Kullanımı
EKO	: Enerji Kullanım Oranı
Ex	: Ekserji
FAO	: Birleşmiş Milletler Gıda Ve Tarım Örgütü
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MSU	: Michigan State University
MPC	: Model Öngörücü Kontrol
MR	: Nem Oranı
NN	: Sınır Ağı
NNPLS	: Sınır Ağı Kısmi En Küçük Kareler
ODE	: 3 Boyutlu Diferansiyel Denklem
OTD	: Değişken Zaman Parametreleri
ÖET	: Özgül Enerji Tüketimi
PCA	: Bileşen Analiz Modeli
PLC	: Programlanabilir Mantıksal Denetleyici
RMSE	: Ortalama Hata Karelerinin Karekökü
SEC	: Özgül Enerji Tüketimi
SSE	: Artıkların Karelerinin Toplamı
TD	: Temperleme Kurutma
TOB	: Tarım ve Orman Bakanlığı
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu

SİMGELER

A	: Kanal kesiti, m^2
a	: Spesifik alan, m^2/m^3
C	: Kapasitans, pF
c_p	: Özgül ısı, $kJ/kg \text{ } ^\circ C$
d	: Plakalar arası mesafe, m
D	: Dağılım faktörü
D_{eff}	: Effektiv nem difüzyonu, m^2/s
D_0	: Arrhenius denkleminin üstel faktörü, m^2/s
E	: Emisyon gücü, kJ/s
\dot{E}	: Enerji oranı, kJ/s veya kW
F	: Şekil faktörü
f	: Açık alan oranı
g	: Yerçekimi, m/s^2
g_c	: Newton yasası sabiti,
h	: Özgül entalpi, kJ/kg
H_u	: Yakıtın alt ısıl değeri, kJ/kg
J	: Joule sabiti
K	: Ani kasılmalar için yerel kayıp
k_f	: Termal iletkenlik, W/mK
L	: Ürünün yarı kalınlığı, m
\dot{m}	: Kütleli debi, kg/s
MC	: Nem içeriği, gr su/gr kuru madde
N	: Tür sayısı
ρ	: Yoğunluk, kg / m^3
P	: Basınç, Pa
ΔP	: Basınç düşüşü
R	: Universal (evrensel) gaz sabiti, $8.314 \times 10^{-3} kJ/molK$

R^2	: Belirleme katsayısı
s	: Entropi, kJ/kg K
u	: İç enerji, kJ/kg
T	: Kurutma havası sıcaklığı, K veya °C
t	: Zaman, dak
V	: Hız, m/s
ν	: Kinematik vizkozite, m ² /s
z	: Yükseklik kordinatı, m
W	: Ürünün ağırlığı, g
w_{su}	: Yaş üründen buharlaşan suyun kütlesi, g
θ	: Faz açısı, °
ϵ'	: Dielektrik sabiti, pF/m
ϵ''	: Dielektrik kayıp faktörü, pF/m
φ	: Bağıl nem, %
ω	: Mutlak nem, g/m ³
a	: Hava
b	: Başlangıç
c	: Kimyasal
\checkmark	: Çıkış
e	: Denge
f	: Akışkan
g	: Giriş
s	: Su
k	: Kuru
kb	: Kuru baz
kh	: Kuru hava
i	: İlk
m	: Mısır
n	: Kurutma sabiti
ref	: Referans
$doy@$: Doymuş
ort	: Ortam
v	: Buhar
y	: Yakıt

yb : Yaş baz
 ∞ : Referans koşulları(ortam)
 μ : Kimyasal potansiyel, kJ/kg



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1: Yıllık kurutulan ürün miktarına bağlı olarak tavsiye edilen kurutma yöntemleri(Günerhan,2005)	8
Tablo 1.2: Mısır kurutma sistemlerinin sınıflandırılması	8
Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan ince tabaka modeller	29
Tablo 4.1: Mısırın özellikleri	42
Tablo 4.2: Tane mısırın özellikleri.....	46
Tablo 4.3: Mısır dielektrik sabitinin frekansla değişimi	47
Tablo 4.4: Kullanılan cihazların ölçümüne ait toplam belirsizlikler.....	48
Tablo 5.1: İki farklı kurutma hava hızında mısırın diffüzyon katsayısı.....	53
Tablo 5.2: Model sonuçları	54
Tablo 5.3: Farklı hava hızlarında nem içeriğinin zaman bağlı Özgül enerji tüketimi (ÖET) değerleri.....	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Kurutmada ısı ve kütle transferi	5
Şekil 3.1: Genel enerji ve ekserji gösterimi	32
Şekil 3.2: Mısır kurutma test düzeneğinin enerji ve ekserji analizi şematik görünümü .	33
Şekil 3.3: Kurutucu kabin enerji ve ekserji analiz gösterimi	34
Şekil 3.4: LPG'nin enerji ve ekserji analizi	36
Şekil 4.1: Deney setinin görüntüsü	43
Şekil 4.2: Deney düzeneğinin gösterimi	43
Şekil 4.3: Sistemin blok diyagramı	45
Şekil 4.4: Dielektrik nemölçer	45
Şekil 4.5: a.b.c. Dielektrik nem ölçer laboratuvar ölçümü.....	46
Şekil 5.1: Sıcaklık değişiminin zamana bağlı değişimi	49
Şekil 5.2: Ürün neminin ve sıcaklığın zamana bağlı değişimi.....	50
Şekil 5.3: Nem oranının zamana bağlı değişimi	52
Şekil 5.4: Nem içeriği (kb) ile kurutma hızı değişimi.....	53
Şekil 5.5: Midilli modelinin deneysel ve tahmin edilen verileri (3,5 m/s kurutma hava hızı)	55
Şekil 5.6: Midilli modelin deneysel ve tahmin edilen verileri (2,8 m/s kurutma hava hızı)	55
Şekil 5.7: Kurutma havası hızına göre mısır nem içeriğinin değişimi.....	56
Şekil 5.8: Farklı kurutma hava hızlarında mısırı kuruma eğrileri ($T_g=103^{\circ}\text{C}$)	57
Şekil 5.9: Kurutma süresinin farklı kurutma hava hızlarında enerji kullanım değerleri.	58
Şekil 5.10: Kuruma süresinin farklı hava hızlarında enerji kullanım oranı	59
Şekil 5.11: Kurutma hava hızının etkisi (a ve b 2,8 ve 3,5 m/s kurutma hava hızları sırasıyla) ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekserji kaybı.....	60
Şekil 5.12: Kuruma süresi ile ekserji verimliliği	61
Şekil 5.13: Zaman içindeki basınç farkının değişimi.....	63
Şekil 5.14: Mısır nem içeriğinin kapasitans değerleri grafiği(sürekli çizgi, uydurma eğrisidir)	64
Şekil 5.15: Deneysel verilerin model sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	65

NEM KONTROLLÜ MISIR KURUTMA SİSTEMİNİN DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ

ÖZET

Kule tipi tahıl kurutucular, mısır kurutma işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır ve yaklaşık 30m yüksekliğinde silindirik yapılar olarak üretilmektedir. Delikli duvarlar arasındaki dairesel şekildeki bölüme tahıl doldurulur ve yanma odasından gelen sıcak gazlar ile kurutma işlemi gerçekleştirilir. Bu çalışmada, kontrol sistemi kullanılarak en uygun modeli belirlemek için endüstriyel tahıl kurutucunun laboratuvar ölçekli bir test prototipi kurulmuştur. Endüstriyel kule kurutucularında olduğu gibi sıcak hava gazlarının kurutma odasına yatay olarak girmesine izin veren sabit yatak tasarımı yapılmıştır. Mısır kurutma deneyleri, mısırın kurutma davranışını ortaya çıkarmak ve modellemek, kurutma hava hızının basınç düşüşü ve kurutma üzerindeki etkisini incelemek, literatürde yaygın olarak kullanılan denklemlerin kullanılabilirliğini göstermek için deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Model, kurutma testlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılarak önerilen modelin doğruluğu test edilmiştir. Kurutucu havası sıcaklığı 103°C'de sabit tutularak ve basınç düşüşü ile kurutma davranışı üzerindeki kurutma havasının hız etkilerini bulmak için giriş kurutma havası hız değerleri değiştirilmiştir. Deneysel veriler, MATLAB yazılımı kullanılarak bir eğri uydurma yöntemi ile modellenmiştir. Literatürde ince tabaka modelleri olarak bilinen Lewis, Page, Henderson ve Pabis, Logaritmik, Midilli ve Wang ile Singh modelleri kullanılmıştır. Kurutma hava hızının en iyi ince tabaka kurutma modelinin katsayıları üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Yürütülen bu çalışma 3 ana başlıkta oluşmaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmalı şekilde verilmiş ve endüstriyel kurutucuların kontrolünde kullanılmak üzere bir model önerilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, en uygun modelin Midilli modeli olduğu görülmüştür. İkinci bölümünde, mısır kurutucusunun kurutma işleminin enerji ve ekserji analizleri ele alınmıştır. Deneyler, 2,8 m/s ve 3,5 m/s olmak üzere iki farklı kurutma hava hızında, 103 °C sıcaklığında online bir tahıl nemölçer ile kontrol edilen laboratuvar ölçekli bir kurutucuda gerçekleştirilmiştir. Enerji kullanımı (EK), enerji kullanım oranı (EKO), özgül enerji tüketimi (SEC), ekserji verimlilik değerleri hesaplanmıştır ve mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur. Sonuçlar, enerji kullanım oranlarının kurutma hava hızıyla arttığını ve maksimum ekserji verimliliğinin yüksek kurutma hava hızında gözlendiğini göstermektedir. Üçüncü bölümde, tane mısır için kapasitif sensörlü entegre bir laboratuvar ölçekli kurutucu geliştirilmiş ve modellenmiştir. Farklı nem içeriğine sahip tane mısırın dielektrik özellikleri, optimum çalışma frekansını bulmak için ölçülmüştür. Mısırın nem içeriği ile elektriksel özellikleri arasındaki ilişkiye dayalı modelleme yapılmıştır. Nem içeriğindeki değişiklikler, tahılın dielektrik sabitini etkiler ve bu da kapasitansta değişikliklere neden olur. Mısırın dielektrik özellikleri farklı frekans değerlerinde ölçülmüştür. Mısırın dielektrik özellikleri eğri uydurma tekniği kullanılarak karakterize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Modelleme, Enerji ve Ekserji Analizi, Kapasitans

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF MOISTURE CONTROLLED CORN DRYING SYSTEM

SUMMARY

Tower type grain dryers are widely used in corn drying process and are manufactured as cylindrical structures with a height of about 30 m. The grain is filled into the circular shaped section between the perforated walls and dried with the gases coming out of the combustion chamber. In the current study, a laboratory scale test prototype of this type of industrial grain dryer is installed to determine the most suitable model to be used in the control system. A fixed bed design has been made that allows hot air gases to enter the drying chamber horizontally, as in industrial tower dryers. Corn drying experiments has been carried out experimentally to reveal and model the drying behavior of corn, to examine the effect of drying air velocity on pressure drop and drying, to show the usability of equations commonly used in the literature. Model accuracy has been verified by comparison with the results of the drying tests. Drying air temperature is kept constant at 103 °C and inlet drying air velocity values are changed to find out velocity effects on pressure drop and drying behavior. Experimental data are modeled with a curve fitting method using MATLAB software. Lewis, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Midilli and Wang and Singh models, which are known as thin-layer models in the literature are used. The effect of drying air velocity on the coefficients of the best thin layer drying model is determined. This study consists of 3 main titles. In the first part of the study, the obtained results are given in comparison with the results in the literature and a model is proposed to be used in the control of industrial dryers. When the results are examined, it shows that the most suitable model is the Midilli model. In the second part, the study deals with the energy and exergy analyses of the drying process of corn dryer. Experiments are conducted in a laboratory-scale dryer controlled by a real-time grain moisture meter at a air temperature of 103°C, at two different drying air velocities 2,8 m/s and 3,5 m/s. The energy utilization (EK), energy utilization ratio (EKO), specific energy consumption (SEC), exergy efficiency values are calculated and presented in comparison with the available results. The results show that energy utilization ratios increase with drying air velocity and the maximum exergy efficiency is observed at high drying air velocity. In the third chapter, an integrated laboratory-scale dryer with capacitive sensor for grain corn is developed and modeled. The dielectric properties of grain corn with different moisture content has been measured to find the optimum operating frequency. Modeling was made based on the relationship between moisture content and electrical properties of corn. Changes in moisture content affect the dielectric constant of the grain, resulting in changes in capacitance. The dielectric properties of corn have been measured at different frequency values. The dielectric properties of corn have been characterized using the curve fitting technique.

Keywords: Drying, Modeling, Energy and Exergy Analysis, Capacitance

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Tahılları kurutma işlemleri çok eski zamanlarda başlamış olup günümüzde de önemli yere sahiptir. Kurutma işlemleri için kullanılan enerjinin azaltılması ve ürün kalitesinin artırılması için teknolojik gelişmelere ve teknolojik yeniliğe sahip olunmalıdır. Tahıl kurutma ile yeni ürün çeşitlerinin tasarlanabilmesi ve tahılların raf ömürlerinin uzatılabilmesi sağlanmaktadır. Tahılları kurutmaya başlamadan önce mutlaka amacına uygun kurutma yöntemi belirlenmelidir. Tüm tahıllar için tek tip kurutma yöntemi kullanılması ürün kalitesi ve enerji tasarrufu açısından uygun değildir. Bu yüzden hem ürünün kalite kriterlerine uygun olması hem de ekonomik olması için farklı ürünlerde farklı kurutma yöntemleri uygulanmalıdır.

Mısır Dünya’da en çok üretilen ikinci tahıl ürünüdür. Tahıl grubunda önemli yeri olan mısır; insan gıdası, endüstri hammaddesi ve hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Mısır ülkemiz açısından da büyük öneme sahiptir. Çünkü ülkemizde de tahıllar grubunda, buğday, arpa ve mısır olarak sıralanmaktadır. Mısır tarımına ayrılan alan, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü’ nün (FAO, 2019) verilerine göre 6388287 da olup, toplam üretimimiz 6,000.000 ton ve dekara verim 940 kg olarak gösterilmiştir. Türkiye’de önemli yere sahip olan mısırın yeteri kadar verimli depolanabildiğini söylemek mümkün değildir. %20-25 nem seviyesinde hasat edilen mısır %15-14 nem seviyesine kadar kurutulmalıdır (Kahraman, 2018). Mısır hasat olgunluğuna ekim-kasım aylarında gelmektedir. Bu dönemdeki iklim şartlarının değişikliği etkili kurutma yönteminin seçimini önemli kılmaktadır.

1.1. Amaç ve Yöntem

Kapasitans yöntemine dayalı nem ölçme sistemleri kurutma prosesini kontrol edebilme özelliğinden dolayı hem yurt içi hem de yurt dışında endüstri alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tarım ürünlerinin kurutulması çalışmalarında mısır içeren çalışmalar

çok sınırlı kalmıştır. Bu nedenle bu çalışmada çok önemli yere sahip olan mısır için, kapasitans nem ölçme yöntemine dayanarak tasarlanan tahıl kurutucu incelenmek istenmiştir. Dielektrik özellikler; ürün tipi, şekli, sıcaklığı, frekansı, nem içeriği ve elektriksel iletkenlik açısından farklılık gösterir ve nemölçerlerin kalibre edilmesi gerekir. Çalışmada, tane mısır için kapasitif sensörlü entegre bir laboratuvar ölçekli kurutucu geliştirilmiş ve modellenmiştir. Farklı nem içeriğine sahip tane mısırın dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Mısırın kapasitans ve dielektrik sabiti arasındaki bağlantıya göre modelleme yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmada kapasitans nem ölçme yöntemine dayalı kurutucu ile mısır için yeni bir kurutma şekli incelenmiştir. Kule tipi kurutucunun küçük ölçekli bir test prototipi oluşturulmuş, mısır tanesi ile deneyler yapılmış ve deneysel veriler eğri uydurma yöntemi ile modellenmiştir. Kontrol hacmine tek boyutlu kütle ve enerji korunum denklemleri uygulanmıştır. Ölçülen basınç düşüşü ve sıcaklık değerleri ile modellerle elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları literatür verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Endüstriyel kurutucularda kullanılmak üzere bir model önerilmiştir. Ayrıca endüstriyel kule kurutucularında olduğu gibi sıcak hava kurutma odasına yatay olarak girmesine izin veren sabit yatak tasarımı konusunda herhangi bir çalışmanın olmadığı görülmüştür.

Kurutma işleminde 2019 eylül-ekim ve kasım aylarında hasat edilen mısır taneleri kullanılmıştır. Çalışmalar kapsamında deneyleri yapmak üzere deney seti tasarlanmış ve kurulmuştur. Deney setinin ayrıntıları daha sonraki bölümlerde verilmiştir. Deneysel çalışmalar ile birlikte çalışılan konu ile ilgili matematiksel modeller incelenmiştir. Deneysel ve matematiksel model sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara bağlı olarak yeni bir kurutma şekli geliştirilmesi ve deneysel veriler ile teorik hesaplamaların uyumluluğu gösterilmeye çalışılmıştır.

1.2. Mısır Hakkında Genel Bilgiler

1.2.1. Mısırın tarihçesi

Mısır, uzun yıllar boyunca tarımı yapılan nadir bitkilerden biridir. Mısır bitkisinin anavatanı Amerika kıtasıdır. Mısır bitkisinin, 7,000 yıldır tarımı yapılmaktadır. Mısır

bitkisinin, ülkemize Kuzey Afrika'dan Mısır ve Suriye üzerinden geldiği bilinmektedir (Çakmakçı ve Dallar, 2019).

Dünyada mısır bitkisinin üretiminin en çok yapıldığı ilk on ülke olarak ABD, Çin, Brezilya, Arjantin, Ukrayna, Meksika, Endonezya, Hindistan, Romanya, Kanada sayabiliriz (USDA, 2021).

Mısır ülkemizin hemen hemen her bölgesinde yetiştirilebilmektedir. En çok Karadeniz Bölgesi'nde yetiştiriciliği yapılmaktadır. Türkiye'de mısır üretimi yoğun olarak Konya, Adana, Mardin, Şanlıurfa, Karaman, Sakarya, Osmaniye, Manisa, Diyarbakır, Kahramanmaraş illerinde yapılmaktadır (TUİK, 2020).

1.2.2. Mısır çeşitleri

Mısır tarımında önceki yıllarda, açık döllenme ve düşük verimli köy çeşitleri ekilmekteydi. Ancak, hibrit çeşitlerin gelişmesi ile köy çeşitleri yerlerini hibrit çeşitlere bırakmıştır. Hibrit çeşitler verim yönünden daha etkili oldukları için kullanımı artmıştır. Hibrit çeşitler tekli, ikili, üçlü veya dörtlü melez şeklindedir. Ancak, şu anda piyasada en yaygın kullanımı olan çeşit tekli melez mısır hibrit çeşitleridir.

Çeşit seçiminde, çeşidin bölgeye uyumu önemlidir. Olgunlaşma gün sayıları da bölge koşulları açısından önemlidir. Olgunlaşma gün sayılarına göre mısır çeşitleri, FAO sisteminde 8 ayrı gruba ayrılmışlardır. Bunlar, FAO-100 ile FAO-800 arasında yer almaktadır. Yerli ve ithal tohumlara; Apex, Bora, Karaçay, Gözdem, Kompozit Arifiye, PR31D24, Sakarya, Simon, Truva, Varenne (AG 92138), Kobras, Major, 89MAY70, ADA 334, PR32G44, Samuray 34, Kalends, Kamperos, AGM1690, 9628 HP, Aramis, M12G33, SY Castaneda, SY Tuscany tescilli mısır tohumlarına örnek verilebilir (TOB, 2021).

1.2.3. Dünyada mısır üretimi ve tüketimi

Mısır tarımını dünyada yaklaşık 70 milyon çiftçi yapmaktadır. Mısır bitkisi dünyada 147,145.702 hektar ekim alanına sahiptir. Üretim olarak 724,515.133 ton 'dur (FAO, 2019).

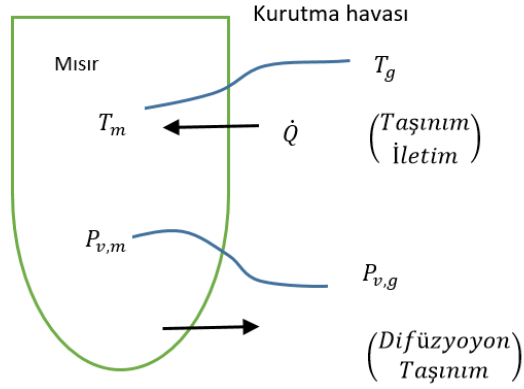
Mısır üretiminin dünya üzerinde dağılımına bakıldığında % 49,9 Amerika, % 32,2 Asya, % 10,6 Avrupa, % 7,2 Afrika, % 0,1 Okyanus ülkeleri olduğu görülmektedir (USDA, 2021).Mısırın %70'i yem sektöründe, % 20'si nişasta-glikoz sanayinde, % 5'i endüstride değerlendirilmektedir (Yıldırım ve Öner, 2020).

1.3. Mısır Kurutma

Kurutma, ürünlerin bünyesinde bulunan nemin uzaklaştırılması işlemidir. Ürünlerde meydana gelebilecek biyokimyasal reaksiyonları ve mikroorganizmaların faaliyetlerini durdurmak veya yavaşlatmak için kurutma yapılmaktadır. Kurutma işlemi ürünün bozulmadan uzun süre saklanması, tohumların çimlenme yeteneklerinin korunması, ekonomik değeri olan yeni ürünlerin elde edilmesi, ürün artıklarının yeni bir alanda değerlendirilmesi, ürünlerin erken hasat edilebilmelerine imkân vermesi, depolama ve taşımada kolaylık gibi avantajlar sağlamaktadır.

Taneli ürünler, ince veya kalın tabaka şeklinde yığın halinde kurutulmaktadır. Tahıl kurutulmada çevre havasının direk kullanılması durumunda ürün yığını kalınlıklarının dikkatli seçilmesi gerekir. Mısır kurutucularda genellikle sıcak hava kullanılmaktadır. Kurutucu havasının sıcaklığına göre; doğal sıcak havalı kurutucular, düşük sıcak havalı kurutucular, yüksek sıcak havalı kurutucular, kombine kurutucular kullanılmaktadır. (Yürekdelen, 2012).

Ürünün yüzeyine ısı uygulayarak kurutma sağlanmış olur. Bu nedenle, kurutma işlemlerinde ısı ve kütle transferleri aynı anda olmaktadır. Kurutma sürecindeki ısı ve kütle transferi Şekil 1.1. de verilmiştir.



Şekil 1.1: Kurutmada ısı ve kütle transferi

Bir ürünün kurutulmasında Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi iki fiziksel olay gerçekleşmektedir. Bunlar:

- Kurutulacak ürünün suyunu buharlaştırmak için gerekli ısının ürüne iletilmesi (ısı geçişi),
- Hava akımı ile buhar halindeki suyun kurutma bölgesinden uzaklaştırılması (kütle geçişi) şeklindedir.

Kurutma sürecindeki bu iki olay incelenirken; ürünün bünyesindeki sıvının ürünün yüzeyine gelmesi ile iç difüzyon ve kılcallık koşulları için kurutma havasının hızı, sıcaklığı vb. gibi etkenler dikkate alınmalıdır.

Kurutma işlemlerinde önemli parametreler ise;

- Isı transferi
- Kurutma koşulları
- Kurutma sisteminin genel fiziksel özelliği
- Ürünün özellikleridir.

Kurutma, ürün ile çevre havası arasındaki nem dengesinin zaman faktörünün dikkate alınmaksızın incelenmesi olarak tanımlanabilir. Ürünün çevre havasına nem vermesi (desorpsiyon) veya ürünün çevre havasından nem alması (sorpsiyon) şeklinde gerçekleşmektedir. Ürün ile çevre havası nem açısından dengeye ulaştığı zaman havada bulunan su buharının kısmi basıncı (P_v), ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncına ($P_{v,i}$) eşittir. Buhar basıncı denge durumunda iken materyalin nem miktarı (N_d),

kurutma havasının kısmi buhar basıncına ve böylece havanın bağıl nem (ϕ) değerine bağlıdır. Ürünün bünyesinde bulunan nem buharlaşarak ürünü çevreleyen atmosferle nem açısından dengeye ulaşmış olur. Farklı bağıl neme sahip ürünün belirli sıcaklıkta tutularak dengeye gelmiş bir ürünün nem içeriği ve çevre havasının bağıl nemi arasındaki bağlantı sorpsiyon izoterm eğrileri ile gösterilmektedir. Her ürünün belirli koşullarda ulaştığı denge nemi farklıdır. Bir ürünün belirli sıcaklıkta sorpsiyon izoterm eğrisini çizmek için; ürün bağıl nemi sabit kalabilen bir kavanozda denge nemine gelene kadar bekletilir. Bağıl nem sabit tutulabilmek amacıyla kavanozun içine tuz yerleştirilir. Bağıl nemi sabit olan kavanoza ürün yerleştirilir ve istenen sıcaklıkta sorpsiyon izotermi elde edilmiş olur. Üründe bulunun nemin uzaklaşması sorpsiyon, kuru ürünün nem alması adsorpsiyon olarak adlandırılır (Topuz, 2002).

1.3.1. Kurutma hızı

Birim zamanda birim alandan buharlaşan suyun kütlesi kurutma hızı olarak tanımlanmaktadır. Kurutma hızı kurutulan ürünün kalitesi ve enerji verimliliği açısından önem arz etmektedir.

Ürün kurutulmaya başlandıktan kısa bir süre sonra sabit hız periyodu oluşur. Ürün kurutulmaya devam edildiğinde kuruma hızı sabit kalmamaktadır. Kritik Nem noktası diye adlandırılan noktaya gelir. Bu noktadan sonra Azalan Hız Periyoduna geçer.

Kurutma sürecinde ürün içindeki sıvının içeriden yüzeye gösterdiği drence kritik nokta denir. Kurutma sürecinde iki kritik nokta olmaktadır. Birinci kritik noktadan sonra ürünün yüzeyinden buharlaşma olur ve kuruma miktarında azalma gerçekleşir. İkinci kritik noktada da yüzeyde tamamen buharlaşma meydana gelir.

Kurutulacak ürünün fiziksel, kimyasal özellikleri ve ilk nem içeriği kuruma hızını etkilemektedir. Kurutma havasının yaş termometre ve kuru termometre sıcaklığı arasındaki fark kuruma hızını etkileyen önemli bir diğer faktördür. Kurutmanın başlangıcında kuruma hızı ile yaş termometre sıcaklıkları arasındaki fark ters orantılıdır. Kurutmanın son aşamasında bu farkın etkisi kalmamaktadır.

Kurutma hızını etkileyen faktörler;

- Sıcaklık

- Kurutma havasının hızı
- Kurutulan maddenin yüzey alanı
- Kurutma havasının nemi
- Ortam basıncı
- Diğer değişkenler olarak sayabiliriz.

1.4. Mısır Kurutma Sistemleri

Endüstride mısır genellikle silo, kule, karışık akışlı yatay veya dikey tip sürekli kurutucular ile kurutulmaktadır. Bu kurutucuların kapasiteleri genellikle saatte 20 tondan başlayarak 80 ton yaş mısır kurutacak şekildedir (Ada Kurutma, 2015).

Kurutma yöntemi ve kurutucu seçiminde, ürünün kalite özelliklerini koruması için enerji tüketiminin minimum ve kuruma hızının maksimum olması istenir (Güngör ve Özbalta, 1997).

Ticari kurutucuların tasarımında ana etken kurutucuda gerekli ısının en verimli kullanılması olmaktadır. Kurutma işlemlerinde ısı transferi; taşınım, iletim, ışıyım veya bunların kombinasyonları şeklinde olabilmektedir (Güngör ve Özbalta, 1997). Araştırmacılar, en uygun kurutma yöntemini belirlemek için farklı kurutma yöntemlerini kullanmışlardır. En uygun kurutma yöntemi ile ürünün kalite özelliklerini kaybetmeden, enerji verimliliği artırılarak çevresel etkileri azaltılmış olmaktadır (Kovacı ve diğ, 2018).

Endüstriyel kurutucular genellikle %30-70 arasında verimlilik ile çalışırlar (Kovacı ve diğ, 2018). Tasarımsal ve bilgi eksikliği ile enerji verimliliği düşmektedir. Enerji verimliliğindeki düşüklüğünün sebepleri ise, izolasyon kaynaklı eksiklikler, kurutulan ürün ile kurutma ortamı arasındaki gözeneklilik ve yanlış kurutma olarak ifade edilebilir (Jangam ve diğ, 2010). Endüstriyel kurutucuların enerji verimliliğini artırmaya yönelik temel yaklaşımlardan biri, olası her türlü atık ısı kaynağını geri kazanmak ve bunları faydalı çıktılara dönüştürmektir (Chua ve diğ, 2010).

Endüstriyel mısır kurutucularında, genellikle silo ve yatay kurutucular kullanılmaktadır. Bir endüstriyel kurutucunun çalışma prensibine bakıldığında, kurutucunun bileşenlerinden tahıl dönüştürücüler kolonunun iç tarafındaki daha hızlı kuruyan ürün ile dış tarafındaki ürünün yerini değiştirmek için kullanılmaktadır. Böylece homojen karışım sağlanmış

olur. Dönüştürücülerin bu mekanizması ile daha dengeli rutubet çıkışı ve yakıt tasarrufu sağlanmış olur. Bunker ile makinaryı dolduran elevatör sisteminin sürekli olarak devreye girip çıkması engellenmiş olur. LPG ve doğalgaz ile çalışabilen brülörler, yüksek ve düşük alevde çalışma özelliğine sahiptir. Otomatik ateşleme sistemi ile çalışırlar. Emniyet solenoid ve otomatik alev algılayıcısı ile güvenlik önlemleri bakımından güvenlidir. LPG için yakıt buharlaştırıcısı maksimum yanma verimini sağlamaktadır. Kurutma sistemlerinde kullanılan fanlar; Aksiyal (eksenel akışlı) fanlar ve Radyal (dik akışlı) fanlardır. Aksiyal fanlar geniş statik basınç aralığında çalışarak yüksek hava akışı sağlamaktadır. Böylece oldukça düşük enerji maliyeti sağlanmış olur. Toz toplama sistemi (kapalı sistemlerde)yıldız makaralar ile redüktörlü motor, zincir dişli sistem ile hareketin yıldız makaralara iletimi şeklinde olur. İnvörtör sistemiyle istenilen devir ayarlanarak dozajlama sağlanır. Yıldız makaralar elektriksel olarak ters dönüş yaptırılarak biriken tortuların temizliği yapılır. Boşaltma sistemi kollar vasıtası ile kuruyan ürünü ortadaki boşaltma koniğine doğru süpürür. Kurutulacak ürün miktarı ve kurutma yöntemi Tablo 1.1.'de verilmiştir.

Tablo 1.1: Yıllık kurutulmuş ürün miktarına bağlı olarak tavsiye edilen kurutma yöntemleri(Günerhan,2005)

Kurutulacak ürün(ton/yıl)	Kurutma yöntemi
22-60	Isıtılmamış çevre havasıyla kurutma
60-445	Düşük sıcaklıkta kurutma+ısıtılmamış çevre havasıyla kurutma
445-1550	Sıcak havalı depo tipi kurutucularla kurutma
1550 -	Sıcak havalı sürekli akışlı kurutucularla kurutma

Kurutma sürecinde en önemli parametrelerden biri uygun kurutucu seçimidir. Doğru kurutucu seçimi ile ürün kalitesi ve enerji verimliliği büyük ölçüde sağlanmış olacaktır. Endüstriyel tip kurutucuların sınıflandırılması Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2: Mısır kurutma sistemlerinin sınıflandırılması

Endüstriyel mısır kurutma sistemleri	
Yerleşik tip	Taşınabilir tip
Silo Tipi Kurutucular	Devridaimsız Kurutucular
Yığın tipi	Devridaim Kurutucular
Devridaimli tip	
Sürekli akışlı tip	
*Dikey (kule tipi) kurutucular	
*Yatay tip kurutucular	

1.4.1. Silo tipi kurutma

Silo kurutucular birçok ebat ve kapasitede üretilmektedir. Genellikle diğer tiplere göre daha düşük hava akış hızlarıyla çalıştırılırlar. Bu nedenle diğer kurutucu türlerinin çoğundan daha yavaş olmalarına rağmen genellikle enerji verimleri yüksektir. Silo kurutucu boyut seçiminin genel felsefesi, normal bir günde hasat edilecek kadar tahılın 24 saatte kurutulabilmesidir.

1.4.2. Sürekli akışlı kurutucular

Sürekli akışlı kurutucuların birçok türü olmasına rağmen, en yaygın türlerden biri, içinden sıcak havanın geçtiği tahıl akışına dik olan kurutucular kullanır. Tahıl, üstten yüklenir ve boşaltma helezonlarına girmeden önce sıcak ve soğuk sütunların her iki tarafına da aktarılır. Tahıl akış hızı, manuel olarak veya tahıl sütununun dışına yakın bir termostatla kontrol edilir.

Sürekli akışlı kurutucular, küçük miktarlarda farklı türdeki tahılların kurutulması için pek uygun değildir çünkü bu kurutucuların çalıştırılması ve boşaltılması verimsizdir. Düzgün bir akış sağlanana kadar doğru nem kontrolünün gerçekleştirilmesi zordur. Sürekli akışlı kurutucular, bir türden diğerine sık sık değişiklik yapılmadan büyük miktarlarda tahılın kurutulması gereken durumlarda en iyisidir.

1.5. Kapasitans Yöntemi İle Nem Ölçüm Sensörleri

Kurutma sürecinde ürünün neminin anlık olarak belirlenmesi enerji tasarrufu, ürünün fazla kurummasının önlenmesi, kuruma süresinin azalması bakımından önemlidir. Ürünün elektriksel özelliklerinden faydalanarak nemi belirlenebilir. Tahılların dielektirik özellikleri bünyesinde bulundurdukları su ile orantılıdır. Örneğin, suyun dielektrik katsayısı ortalama 80, kuru tahılın dielektrik katsayısı 3 değerlerindedir. Tahılın dielektirik özelliklerinden faydalanarak tahılın içerdiği su miktarı hesaplanabilmektedir (Tomaraei, 2010).

Bu çalışmanın amacı, mısırın nemini ölçebilen kapasitans nem ölçme sistemi tasarlamaktır. Böylece mısırın elektriksel özelliklerinin belirlenerek dielektrik nem ölçme

ile anlık nem tayini yapılmasını sağlamak ve tasarlanan kurutucunun kuruma karakteristiği belirleyerek sistemin enerji ve ekserji analizini yapmaktır.



BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde; mısır nemi ve kuruma davranışı, enerji ve ekserji analizi, mısırın dielektrik özellikleri ve kapasitans ölçüm yöntemi üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Kurutma, belki de insanlık tarafından kullanılan en eski metot ve en çok tercih edilen ürün saklama şeklidir (Doymaz 2005; Nazghelichi ve diğ, 2011). Ürünlerin kurutulması ile mikrobiyal stabilitesi ve ürünün istenen raf ömrünü sağlamış olur (Koyuncu ve diğ, 2007; Abhbashlo ve diğ, 2008). Kurutma sadece gıda endüstrisi ile sınırlı değildir. Kimya, tarım, biyoteknoloji, polimer, seramik, ilaç, kâğıt hamuru ve kâğıt, maden işleme ve ağaç endüstrilerinde de önemli bir yere sahiptir (Mujumdar, 2007).

Montross ve McNeill (2005) çalışmasında, Darcy yasasını kullanarak mısır, soya fasulyesi, yumuşak beyaz kış buğdayı ve yumuşak kırmızı kış buğdayının nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak geçirgenliği ve yığın yoğunluğuna bağlı olarak incelemiştir. Hava bir tahıl kolonundan geçirilmiş ve akış hızı ve basınç düşüşünü ölçmüşlerdir. Test kolonundaki tanenin gözenekliliğini belirlemek için yığın yoğunluğu ve çekirdek yoğunluğu da ölçmüştür. Tahılın yığın yoğunluğunu yaklaşık 50 kg / m³ değiştirmek için % 7 artışla iki doldurma yöntemi kullanmışlardır. Bu, gözeneklilikte yaklaşık yüzde 4 puanlık bir azalma ile sonuçlandığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, geçirgenlik maksimum % 45 oranında azaldığını ifade etmiştir. Buğday en düşük geçirgenliğe sahip olduğunu bulmuşlardır. 0,0052 m / s hava hızına kadar deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerin Reynolds sayısı 2,5 olduğunu ifade etmişlerdir. Yine de Darcy yasası, havalandırmasız depolama sırasında doğal konveksiyon akımlarını tahmin etmek için uygun olacağını vurgulamışlardır.

Yürekdelen (2012) çalışmasında, prototip mısır kurutma makinesi imal etmiştir. Bilgisayar simülasyonu programı ile ürün hava etkileşimini modelleyerek incelemiştir. Maksimum kurutma hızını elde etmek için ürünün geometrik yapısı, akış hızı, sıcaklık, basınç vb. özellikleri simülasyon çalışması yapmıştır. Deneyler sonucunda kurutma odası

içerisindeki sıcaklık ve nemi ölçebilen kontrol sistemleri ile kuruma verimi arttırdığını ifade etmiştir.

Wei ve diğ. (2020) mısır tanelerindeki farklı bileşenlerin termo-fiziksel heterojenliği dikkate alarak, mısır tavlama yöntemi kurutma ile 3 boyutlu bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Simüle edilen sonuçlar, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve kızılötesi termal görüntüleme ile ölçülen deneysel sonuçların iyi uyum içinde olduğunu ifade etmişlerdir. Mısır tanesi daha yüksek nem ve daha düşük sıcaklık bölgesi gösterdiğini, mısır tanelerinde tavlama sırasında nem transferinin kaynağı, tohum ve sert endosperm olduğunu söylemişlerdir. Değişken zaman parametreleri (OTD) ile optimize edilmiş çok aşamalı temperleme kurutma, sürekli kurutma (CD) ve 30 dakika temperleme ve 30 dakika kurutma (TD) ile çok aşamalı temperleme kurutmaya kıyasla kurutma süresini sırasıyla % 24,5 ve % 5,63 kısaltılabileceğini göstermişlerdir.

Mittal ve Otten (2014) düşük sıcaklıkta mısır kurutma yöntemini simüle etmek için bir modelin geliştirilmesini ve doğrulanmasını çalışmışlardır. Model, farklı derinliklerdeki tahıl nem profillerini, kalan kök ortalama karesinin \pm yüzde bir noktası dahilinde tahmin ettiğini ifade etmişlerdir. Hava koşullarının, hasat tarihinin ve ilk nem içeriğinin, ek ısı olmadan sürekli hava akışı kullanıldığında düşük sıcaklıkta kurutma sisteminin performansını büyük ölçüde etkilediği vurgulamışlardır.

Abou-El-Hana ve diğ. (2008) % 20 ila % 14 (y.b.) tahıl nem içeriğinde ve 313 ila 333 K sıcaklık aralığında ki, 290,04 ila 870,13 m³ / h aralığındaki hava akış hızları için mısır tanesinin basınç düşüşünü ölçmüşlerdir. Basınç düşüşlerinin sırasıyla % 14 \pm 0.3 (y.b.) nem içeriğinde % 250 ve % 257 arttırdığını bulmuşlardır. Mısırın nem içeriğinin azaltılması hava akışına karşı direnci artırırken, hava sıcaklığını azaltmak hava akışına karşı direnci arttırdığını ifade etmişlerdir. Shedd tipi bir denklem (Model 1) ve Ergun tipi bir denklem (Model 2) olmak üzere iki model kullanmışlardır. Model 2'nin, Model 1' den daha iyi sonuçlar verdiği sonucunu bildirmişlerdir.

Yılmaz (2010) çalışmasında, farklı hava sıcaklıkları ve sabit hava hızı kullanmıştır. Çalışmasında sürekli kurutma yöntemi ve farklı dinlendirmeli metotlar kullanarak tek tabaka mısırın kurutma davranışını incelemiştir. Deneysel verilere dayanarak dinlendirmeli yöntemde enerji tasarrufu sağlandığını ifade etmiştir. Farklı model sonuçlarını karşılaştırmış sürekli kurutma yönteminde en uygun modelin Page modeli

olduğunu, dinlendirmeli yöntemde ise Midilli ve diğ. ve Difüzyon Yaklaşımı modellerinin olduğu belirtmiştir.

Korkmaz (2007) çalışmasında, 40°C, 45°C 50°C, 55°C, 60°C, 65°C, 70°C farklı sıcaklıklarda ve 2 m/s sabit kurutma hava hızında tek tabaka mısırın kuruma davranışını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Mısırın kuruma davranışını Newton, Page, Henderson&Pabis, Wang&Singh, Geometrik, Logaritmik, İki Terimli, Midilli ve diğ. sekiz farklı model sonuçlarıyla karşılaştırmış, mısırın kuruma davranışına en uygun Page modeli olduğunu ifade etmiştir. Deneysel verilerin sonuçlarına bakıldığında kurutmanın ilk zamanlarında kuruma hızının yüksek olduğunu, kuruma devam ettikçe kuruma hızının düştüğünü göstermiştir.

Baş (2010) tane mısır ve koçan şeklinde doğal kurutma ve makinalı kurutma yöntemleri kullanarak mısırın nem içeriği ile kuruma sürelerindeki etkilerini incelemiştir. Deney sonuçları ile güneşte doğal kurutma yönteminde ortalama 55 gün, gölgede 65 gün olduğunu ifade etmiştir. Koçanlı mısır kurutma da ise; güneşte 70 gün, gölgede ise 90 gün olarak belirtmiştir. Tane ve koçanlı mısırın kurutulmasında makinalı kurutmanın kuruma süresinde önemli etkiye sahip olduğunu ifade etmiştir.

Soponronarit ve diğ. (1997) çalışmalarında, akışkan yataklı kurutucuda mısırın kuruma özelliklerini incelemiştir. Giriş havası sıcaklığı 120 - 200°C, hava hızı 2,2- 4 m/s, yatak derinliği 4-12 cm koşullarında deneylerini yapmışlardır. Kuruma modelleri incelendiğinde en uygun modelin Wang ve Sing denkleminin verdiğini ifade etmiştir.

Janas ve diğ. (2010) çalışmalarında, sabit yataklı mısır kurutma sistemi ile yeni bir ısı ve kütle transferi modelini incelemişlerdir. Kurutma havasının sıcaklık ve nem içeriği 3 boyutlu diferansiyel denklem (ODE) ile tanımlamışlar ve üçüncü dereceden bir yöntemle çözmüşlerdir. Model, 50 °C, 75 °C ve 90° C sabit kurutma hava sıcaklıkları ve 0,5 m/s, 0,9 m/s ve 1,15 m/s hava hızlarında sabit yataklı kurutma tanımlanmıştır. Modelin ortalama doğruluğunun %11 olduğunu ifade etmişlerdir.

Guofeng ve diğ. (1999) matematiksel modellere dayanarak, havalandırma yoluyla tahıl kurutma için bir simülasyon programı tasarlamışlardır. Bu program ile mısır ve çeltik için farklı kurutma koşulları altında kuruma süresini tahmin etmeyi, farklı noktalardaki nem ve sıcaklık değişimlerinin hesaplanabildiğini ifade etmişlerdir. Testlerin sonucu

değerlendirildiğinde, kuruma süresi ve farklı noktalardaki nem ve sıcaklık değişimlerinin, simülasyondan hesaplananlar ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Souza ve diğ. (2018) çalışmalarında, mısır, arpa ve soya fasulyesinin kuruma davranışını incelemek için teorik diferansiyel denklemlere dayanarak hesaplamalar yapmışlardır. Modelica ve Dymola modellerini, ince tabaka modeli için kullanmışlardır. Geliştirilen model, gerçek bir tahıl kurutma işlemiyle karşılaştırmak için uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Çil ve Topuz (2009) çalışmasında, laboratuvar ölçekli akışkan yataklı kurutucuda üç farklı kurutma hava sıcaklığı ve iki farklı kurutma hava hızında gerçekleştirmiştir. Deneysel ve model sonuçların karşılaştırılmasında Henderson ve Pabis modeli uygun olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, kurutucu hava sıcaklığının tanelerin kurutma kinetiği yönünden en önemli faktör olduğu, hava hızının ise küçük bir etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca kuruma süresi boyunca (5,400 s) fasulye, mısır ve nohut taneciklerinin farklı kuruma eğrilerine sahip olduğu göstermişlerdir.

Tayeb (1986) çalışmasında, taneli ürünlerin ısı ve kütle transferini incelemiştir. Kurutucu havasının buhar basıncı ile tahıldaki suyun buhar basıncı arasındaki farka önemli olduğunu ifade etmiştir. Kurutma sürecinde nem içeriği ve tane sıcaklığının önemli bir faktör olduğunu belirtmiştir.

Trelea ve diğ. (1997) karışık akışlı endüstriyel kurutucuda modelleme yaparak kurutma süresini ayrıntılı bir analiz çalışması yapmışlardır. Basit bir PI denetleyicisi ile kontrol optimizasyonunda oldukça tatmin edici sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır.

Bruce ve Giner (1993) üç simülasyon programı ile belirli çalışma koşulları altında karşı akışlı yataklarda tahıl ve hava sıcaklıklarının dağılımını tahmin etmeye yönelik bir çalışma yapmışlardır. Birinci programın tahmini, basit bir sayısal yöntemle çözülmesine rağmen, daha titiz denklem formülasyonuna ve çözüm yöntemlerine sahip olan ikinci programla iyi bir uyum sağlandığını ifade etmişlerdir. Karşı akış yataklarını modellemek için kararlı durum denklemlerini kullanan ve bir devam parametresi kullanarak çözen üçüncü programın, daha iyi yakınsama özelliklerine sahip olduğunu göstermişlerdir. Çaprazlama etkisinin tahminlerinin, simülasyonla seçilen koşullar altında deneysel, küçük ölçekli, karşı akışlı bir kurutucuda doğrulanma sonuçlarını sunmuşlardır.

Giner ve Bruce (1998) laboratuvar ölçekli bir kurutucuyu simüle etmek için, karışık akışlı bir tahıl kurutucu model çalışması yapmışlardır. Kurutma deneylerinde tahıl yatağı boyunca nem azalmasını model ile incelemiştir. Model ile karışık akışlı kurutucuların tahılın hızla ısınmasını ve kurutma sürecini tahmin etmede olumlu sonuçlara ulaştıklarını bildirmişlerdir.

Spencer (1969) tahıl kurutma işlemini matematiksel bir simülasyon ile incelemiştir. Deneyler 0,25 ila 0,47 (k.b.) aralığında ilk nem içerikleri ile 0,5 ft ve 2 ft yatak derinliğinde yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ve model tahminleri arasında uyumun oldukça iyi olduğunu ifade etmiştir.

Farkas ve diğ. (2000) sinir ağı (NN) yöntemini kullanarak sabit yataklı kurutuculardaki nem dağılımını modellemiştir. Modelleme için on farklı NN topolojisi inceleyerek kullanılacak en uygun modeli seçmişlerdir. Giriş havası ve çıkış havası sıcaklıkları, mutlak nem ve hava hızı giriş etkenleri olarak kabul etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ile kurutma yatağındaki nem dağılımının bir sinir ağı kullanılarak iyi modellenebileceğini ifade etmişlerdir.

Courtois ve diğ. (1993) karışık akışlı kurutucuların özel tasarımı için dinamik bir model çalışması yapmışlardır. Bu modele dayanarak, doğrusal olmayan bir kontrollü simülasyonla test ederek büyük ölçekli deneysel bir kurutucuda doğrulamışlardır.

Tulasidas ve diğ. (1993) laboratuvar ölçekli sabit yataklı kurutucuda mısırın kurutma kinetiğini incelemiştir. Yatak yüksekliğinin kurutma hızı üzerindeki etkisini, nem taşınmasında difüzyon ile ısı ve kütle transfer mekanizması açısından yorumlamışlardır. Page denkleminin, yatak yüksekliği ve tahıl kütlesinin kuruma kinetiğini en uygun model olduğunu ifade etmişlerdir.

Rao ve diğ. (2007) konvektif hava ile kurutma yöntemiyle tasarlanmış ve imal edilmiş bir laboratuvar ölçekli kurutucuda çalışmalar yapmışlardır. Seçilen değişkenler 70–150 °C kurutma havası sıcaklığı, 0,5–2 m/s hava hızı ve 5–20 cm tane yatağı derinliğidir. D_{eff} değerinin, kurutma sıcaklığındaki artışla arttığını ifade etmişlerdir. Maksimum ısı verimi, minimum özgül enerji ve minimum kuruma süresi için optimum proses parametreleri, tane yatağı derinliği 7–10 cm, hava hızı 0,55–0,68 m/s ve kurutma havası sıcaklığı 112–

116 °C koşullarında olduğunu ifade etmişlerdir. % 65-68 ısı verim ve özgül enerji tüketimi 8,5-10,7 MJ / kg su olduğunu belirtmişlerdir.

Liu ve diğ. (2006) temel bileşen analizine (PCA) dayalı bir kontrol yaklaşımı metodu kullanmışlardır. PCA (istatistiksel) modeli kullanarak bir kontrolör tasarlamışlardır. Model öngörücü kontrol algoritması ile sinir ağı kısmi en küçük kareler (NNPLS) yöntemini çalışmışlardır. Proses kontrol sistemini ticari bir karışık akışlı kurutucuda NNPLS ile test etmişlerdir.

Sitompul ve Sumardiono (2003) derin yataklı bir tahıl kurutucunun modellenmesi ve simülasyonu çalışmışlardır. Derin yataklı tahıl kurutucuların iki boyutlu (2D) modellerini, ısı ve kütle transferi kullanılarak incelemişlerdir. Dinamik denklemleri, sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözmüşlerdir. Simüle edilen veriler ile deneysel verilerin uyumu yönünden iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

Sahari ve diğ. (2018) çalışmasında, kabuklu mısırın ince tabaka kurutma davranışının matematiksel modellerini incelemişlerdir. Ortalama nem içeriği %28 yaş (y.b.) olan kabuklu mısırın, 0,146 m³/s sabit hava debisi ile 60°C ve 70°C hava sıcaklıklarında konvektif kurutucuda kurutmuşlardır. Nem içeriği %13-14'e düşüne kadar kurutmuşlardır. Page modelinin, her iki hava sıcaklığı için en iyi uygun model olduğunu ifade etmişlerdir. D_{eff} değerleri 60°C ve 70°C hava sıcaklığında sırasıyla 3,58x10⁻⁹ m²/s ve 6,20x10⁻⁹ m²/s olarak bulmuşlardır. Sıcaklıktaki artışla birlikte D_{eff} değerinin de arttığını ifade etmişlerdir.

Galicce ve diğ. (2014) mısır taneleri üzerinde laboratuvar lazer ışını kurutma yöntemi ile enerji analizi inceleme çalışması yapmışlardır. Lazer ışını, 10 kW/m² ve 20 kW/m² güçlerinde, 100 mW, 655 nm ve 200 mW, 660 nm lazer ışını ile 30 saniyelik bir süre boyunca tek taraftan aydınlatma koşullarında uygulanmıştır. Klasik sıcak havayla kurutmaya göre enerji tasarrufu laboratuvar koşullarında % 23,56 ile 58,70 (100 mW lazer) ve % 10,62 (200 mW lazer) arasında azaldığını ifade etmişlerdir.

Dalpasquale ve diğ. (2012) çalışmasında, Michigan State University (MSU) modeline göre sabit yataklı mısır (*Zea mays L.*) kurutma simülasyonu ile matematiksel bir model önerisi yapmışlardır. Bu çalışmada, kurutma işleminin adyabatik davranışını daha iyi kullanmak için hava sıcaklığı ve nem oranının bir fonksiyonu olarak kurutma havası

entalpisini de bu modele dahil etmişlerdir. Geleneksel formda kurutmanın matematiksel simülasyonunu (MSU1 ve MSU2) analiz eden Thompson'un modeliyle karşılaştırmalar yapmışlardır. MSU2 simülasyonunun MSU1'e kıyasla daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Sabit yataklı mısır kurutma simülasyonunun, kurutma boyunca sabit hava entalpi korunduğunda oldukça etkili olduğunu vurgulamışlardır. Geliştirilmiş MSU tahıl kurutma simülasyon modeli, iyi bilinen Page'in ince tabaka kurutma denkleminde kaynaklanan yeni kurutma hızı tanımının, daha tutarlı bir simülasyon modeli olduğunu ifade etmişlerdir. Kurutma simülasyon sürecine sabit entalpi eklemek, yüksek kalitede nihai sonuçlara daha kısa sürede ulaşmayı mümkün kıldığının altını çizmişlerdir.

Kahraman (2018) çalışmasında, kurutma havasının ısıtılmasında yakıt olarak LNG, LPG ve kömür kullanılarak, dört farklı mısır kurutma tesisinde enerji, ekserji ve maliyet analizleri yapmıştır. Ürün nem içeriğini %15'e kadar kurutmuştur. Sabit hava debisinde farklı kurutma havası ile kurutma işlemi yapmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, giriş havası sıcaklığının artması ile ısıtıcı verimi ve enerji verimliliğinin düştüğünü, kurutma maliyeti ve yakıt sarfiyatında artış olduğunu ifade etmiştir. Isıl değeri yüksek yakıt kullanımının kurutma süresinin kısılmasında önemli bir faktör olduğunu vurgulamıştır.

Srivastava ve John (2002) tahıl yatağının yüksekliğinin değişmesi ile hava nemi, hava sıcaklığı ve tane sıcaklığını tahmin etmek için ince tabakalı yarı ampirik denklemler kullanarak model çalışması yapmışlardır. Çalışmaya hava hızı ve boşluk değişiminin etkilerini de dahil etmişlerdir. Sonuçlara dayanarak, yatak yüksekliği arttığında tahıl nemi daha hızlı azaldığı fakat yatağın boşluğunun (yatak gözenekliliği) ve tane sıcaklığının fazla etkili olmadığını ifade etmişlerdir.

Tarım ve gıda ürünlerinin kurutulmasında güneş enerjisi önceki yıllarda kullanılıyordu. Ucuz, kolay ve kullanışlı olduğu için dünyada en yaygın olarak uygulanan kurutma şeklidir. Güneşte kurutma çok az sermaye veya uzmanlık gerektirse de, bu yöntem gıda ürünlerinin kurutulmasında istenmeyen bazı problemleri oluşturur. Gıda ürünlerinin kalitesindeki değişiklikler, hava şartlarına bağlı olması, doğrudan güneş ışığından kaynaklanan aromalar ve canlılık kaybı, kurutma sırasında yeterli kontrolün olmaması, uzun kuruma süresi, ürünün toprak ve toz ile kirlenmesi, kurutulmuş ürünlerin homojen olmaması sayılabilir. Bu problemlerden dolayı kurutma işleminde yeni ve verimli teknolojilerin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Aghbashlo ve Arabhosseini, 2009).

Yapay veya endüstriyel kurutucular kullanılırsa bu problemlerin üstesinden gelinebilir. Günümüzdeki kurutucular, farklı gıda ve endüstriyel malzemelerin işlenmesi ve korunması için önemli bir faktördür. Kurutma havası sıcaklığı endüstriyel kurutma sistemlerinde büyük miktarda enerji harcar (Mujumdar, 2007). Bu nedenle kurutma teknolojisinin temel konularından biri, ürünün kalite özelliklerinin korunması için, kurutma tesislerinin verimliliğini artırarak enerji kaynaklarının maliyetini düşürmektir. Ayrıca maliyeti düşürmek ve enerji verimliliğini yükseltmek, sürdürülebilir kalkınma için temel yaklaşımlardan biridir.

Yüksek enerji fiyatları, asit yağmurları ve stratosferdeki ozon tabakasının incilmesi gibi çevresel kaygılar, küresel ısınma, artan dünya nüfusu ve azalan fosil yakıt kaynakları nedeniyle, enerjinin en iyi şekilde uygulanması ve enerji tüketimini yönetme yöntemleri hayati önem taşımaktadır (Nazghelichi, 2011).

Enerji analizi, termodinamiğin birinci yasasına dayanarak enerjinin korunumu ilkesi ile sağlanmaktadır. Enerji analizi, ısı kaynağı sıcaklığına bağlı olan ısı kalitesi gibi farklı enerji niteliklerini ayırt edemez. Enerji analizinin bu eksiklikleri nedeniyle, sistemlere ve süreçlere enerjinin kullanılabilirliğini ifade etmek için ekserji analizi yapılmaktadır (Aghbashlo ve diğ, 2013).

Mujumdar (2007) göre, endüstriyel kurutucular toplam enerjinin ortalama %12'sini üretim aşamasında tüketir. Bu nedenle, kurutma sistemleri sera gazı emisyonunda ve bunun sonucunda asit yağmuru ve stratosferdeki ozon incelmesinde büyük paya sahiptir.

Fortes ve diğ. (2009) çalışmasında, derin yataklı kutucu tasarlamıştır. Tarım ürünü olarak mısır kullanmışlardır. Tek boyutlu momentum, ısı, kütle ve entropi denklemleri kullanarak enerji ve ekserji performansını incelemişlerdir. Sıcaklık 30–37 °C, hava hızı 0,2–0,6 m/s, nem % 0,25–0,33 (k.b) koşullarında deneylerini yapmışlardır. İncelenen koşullar altında kurutma hava hızının önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Modelin tahmin kabiliyetinde uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Salahshoor ve Asheri (2014) ekserji analizini bir model öngörücü kontrol (MPC) şeması ile entegrasyonuna dayalı yeni bir yöntem çalışması yapmışlardır. Yöntemin avantajı, enerji tüketiminin büyük bölümünü tanımak için zengin bir bilgi sağladığını ifade etmişlerdir. Önerilen ekserji bazlı MPC yöntemi, MPC'nin tasarım prosedüründe ekserji

analizi tarafından dikte edilen kısıtlamalarla bağlantılı olarak istenen ayar noktası değerlerinin dahil edilebildiğini ifade etmişlerdir. Önerilen kontrol şemasının, kurutma sisteminde çok girişli ve çıkışlı (MIMO) bir konfigürasyonda enerji verimliliğinin iyileştirilmesinde ve olası kesintiler nedeniyle enerji kaybının önlenmesinde istenen ayar noktalarına doğru yönlendirdiğini vurgulamışlardır. Deneysel sonuçlara dayanarak % 22 enerji tasarrufu sağladığını, önerilen metodolojinin diğer enerji tabanlı MPC yaklaşımlarına kıyasla üstün olduğunu sonucunu çıkarmışlardır.

İzli ve Işık (2010) mısırın yığın halde ılık hava ile kurutularak en uygun kurutma parametrelerini belirleme çalışması yapmışlardır. 250 kg mısır, hava hızı sabit 1 m s^{-1} 'de, % 16,4'lük nem den % 10'a düşene kadar beş farklı sıcaklık koşullarında yapmışlardır. Kurutulmuş mısır tanelerinin durumunu, kuruma süresi, çimlenme oranı, çimlenme gücü, enerji tüketimi ve ekonomik maliyet açısından incelemişlerdir. Beş farklı sıcaklıktaki hava ile kurutmada kurutulan mısır için enerji tüketim değerleri, sırasıyla 45, 55, 65 ve $75 \text{ }^\circ\text{C}$ - 150, 204, 173, 159 ve 119 kWh olduğunu ve $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kurutmada enerji tüketiminin en az ve kurutma süresinin en kısa olduğunu ifade etmişlerdir.

Kurutma sistemlerinin tasarlanması, inşası, incelenmesi, pahalı ve zaman alıcı bir proje olabilir. Simülasyonlar, tasarım aşamasında zaten oluşturulmuş olan modeli uygulayarak tasarım aşamasını döngüden çıkarır. Ayrıca, simülasyon testi uygulaması, tasarımın çoklu testlerini yapmaktan daha ucuz ve daha hızlıdır. Simülasyonun en büyük avantajı, araştırmacının bir simülasyondan elde edebileceği ayrıntı seviyesidir. Bir simülasyon, araştırmacılara teknolojik sınırlamalar nedeniyle deneysel olarak ölçülemeyen isteğe bağlı sonuçlar sağlayabilir. Başka bir ifadeyle, araştırmacı simülasyonu istenen sayıda zaman adımı için ve isteğe bağlı herhangi bir ayrıntı düzeyinde çalışacak şekilde ayarlayabilir. Bununla birlikte, sayısal simülasyon, yönetim denklemlerinin eşzamanlı olarak çözülmesi nedeniyle deneysel analize kıyasla karmaşık bir yazılım ve yüksek hesaplama çabası gerektirir. Neyse ki, bilgisayardaki ilerlemelerin mevcut oranıyla, sayısal simülasyonlarla ilgili sorunlar önümüzdeki birkaç yıl içinde önemli ölçüde azalacağı düşünülmektedir. Kurutma sistemlerinin ekserjetik değerlendirilmesi alanında simülasyon çalışmaları eksik görünmektedir. Sonraki araştırmacılar, enerji korunumu ve entropi üretim denklemlerini kullanarak farklı kurutma işlemlerinin ekserji performansı için sayısal denklemler geliştirmeye teşvik edilmelidir (Aghbashlo ve diğ, 2013).

Corrêa ve diğ. (2011) çalışmasında, mısır tanesinin farklı hava sıcaklıklarında kurutma sürecini incelemiş ve modellemişlerdir. Mısır tanesinin kurutma işlemiyle ilgili termodinamik özelliklerini belirlemişlerdir. 0,45 kuru bazda (kg_w / kg_{dm}) ilk nem içeriğine sahip mısır tanelerini, 45, 55 ve 65 °C sıcaklıklarda 0,12 (kg_w / kg_{dm}) kısmi nem içeriğine ulaşana kadar kurutmuşlardır. Mısır tanesinin kurutma işleminin verilerinin kurutma sürecini açıklamak için modeller kullanılmıştır. Fick'in ikinci yasasının analitik çözümü ile Etkili difüzyon katsayısı (D_{eff})'nı belirlemişlerdir.

Kurutma sürecini temsil eden gözlemlenen verilere en iyi uyan logaritmik model olduğu sonucuna ulaşmışlardır. $5,490 \times 10^{-10}$ ile $1,163 \times 10^{-9} m^2/s$ arasında değişen sıcaklık artışları ile D_{eff} değerlerinin yükseldiğini ifade etmişlerdir. Logaritmik modelin kurutma sabitinin sıcaklığa bağımlılığına dayanarak, termodinamik özellikler belirleyerek kurutma kinetiği değişiminin ortam koşullarının etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Çolak (2009), kurutucunun ekserji verimliliğinin artan kurutma havası sıcaklığı, kurutma havası kütle akış hızı ve besleme kütle akış hızı ile doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Ekserji verimliliği, kurutma havası sıcaklığından, kurutma havası kütle akış hızından ve besleme kütle akış hızından büyük ölçüde etkilendiğini ifade etmişlerdir. Kurutma havasının hızı kurutma odasının ekserji verimi için önemli olduğunu vurgulamışlardır. Kurutma bölmesinde kaybedilen ekserji, kurutma çerçevesinin sınır sıcaklığının artırılmasıyla önemli ölçüde arttığını ve yığın içindeki hava hızının ve sıcaklık dağılımının homojenliğini arttığını ifade etmişlerdir. Kurutma işleminin ekserji verimliliğini arttırmak ve işletme maliyetlerini düşürmek için uygun olacağına dikkat çekmişlerdir.

Nelson (1983) toz haline getirilmiş ve tanecikli malzemeler için, $(\epsilon')^{1/2}$ ve $(\epsilon')^{1/3}$, partikül materyalin yığın yoğunluğunun ρ temelde doğrusal fonksiyonları olduğu göstermiştir. İkinci dereceden ilişki, buğday tanesi için % 4 içindeki ölçülen değerleri öngörürken, kübik ilişki için karşılık gelen doğruluklar % 2 olarak ifade etmiştir

Nelson (1979) çalışmasında, %10-35(y.b) nem içeriğindeki mısır (*Zea mays L.*) örnekleri üzerinde kapsamlı bir dizi ölçüm yapmıştır. Dielektrik özellikler, aynı kesit boyutlarına sahip koaksiyel numune tutucularda 20, 300 ve 2450 MHz'de üç farklı sistemle ölçmüştür. Nem içeriği, yığın yoğunluğu, tane boyutları, tane yoğunluğu, ham protein ve yağ

asitliğini ölçmüştür. Seçilen üç frekans için nem içeriği, yığın yoğunluğu ve sıcaklığın bir fonksiyonu şeklinde dielektrik sabiti için modeller geliştirmiştir.

Kraszewski ve Nelson (1989) 5 ila 5000 MHz frekans aralığında farklı yoğunluklarda alınan mısır, çavdar ve buğdayın dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün ve % 8 ila % 26 arasındaki nem içerikleri için deneysel olarak yaptığı çalışmasında model geliştirme üzerinde araştırma yapmıştır. Belirli sayıda değişken için belirleme katsayısının maksimum değerini sağlayan değişkenlerin kombinasyonunu bulmak amacıyla çok değişkenli bir doğrusal regresyon yöntemi ile genel bir eşitlik çıkarmışlardır.

Tahıl taneleri için modelin değerlendirilmesi, mısır, buğday, çavdar, arpa ve yulaf numunesinin birçok model denklemlerinden hesaplanan değerler ile ölçülen değerleri karşılaştırarak yaptıklarını ifade etmişlerdir. Yaklaşık 24 °C'de belirtilen frekans ve nem aralıklarında ortalama doğrulukları dielektrik sabiti için % 5, kayıp faktörü için %10 bulduklarını vurgulamışlardır.

Nelson (2010) dielektrikler malzemeler, genellikle iyi elektrik iletkenleri olan metaller gibi malzemelerin aksine, zayıf elektrik iletkenleri olan bir malzeme sınıfıdır. Gıdalar, canlı organizmalar ve çoğu tarım ürünü dahil olmak üzere birçok malzeme bir dereceye kadar elektrik akımlarını iletir, ancak yine de dielektrik olarak sınıflandırılırlar. Bu malzemelerin elektriksel yapısı, malzemelerin bulunduğu bölgedeki elektromanyetik alanların ve akımların dağılımını etkileyen ve malzemelerin elektrik alanlarındaki davranışını belirleyen dielektrik özellikleri ile tanımlanabilir.

Elektrik alanlar üzerindeki etkileri, aynı zamanda, tahribatsız elektrikle dielektrik özellikleriyle ilişkilendirilebilecektir. Böylece, tarımsal ürünlerin dielektrik özellikleri, tarım endüstrisindeki kalite algılama uygulamaları ve dielektrik ısıtma uygulamalarında önemli olmaktadır.

Sacılık ve Çolak çalışmasında, (2010) % 9,71–21,51 (y.b) nemdeki mısır tanesinin 1-10 MHz koaksiyel kapasitör kullanarak dielektrik özelliklerini incelemiştir. Nem içeriği, yığın yoğunluğu gibi parametrelerin etkilerinin frekansa bağlı etkilerini araştırmışlardır. Deneysel bulgular ile dielektrik sabiti, kayıp faktörü ve kayıp tanjantı değerlerinin nem içeriği ve yığın yoğunluğuna bağlı olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Nem içeriği yükseldikçe dielektrik sabiti, kayıp faktörü ve kayıp tanjantı nem içeriği ve yoğunluğa

bağlı olarak artmış olduğu görülmektedir. İkinci ve üçüncü derece polinom denklemler ile nem ve dielektrik özellikler arasındaki mevcut ilişkiyi tanımlamak için ikinci ve üçüncü derece eşitlikler kullanmışlardır. Dielektrik sabiti, kayıp faktörü ve kayıp tanjantındaki değişikliklerin, daha düşük frekans değerlerinde daha fazla olduğunu vurgulamışlardır. Dielektrik özellikler ve nem içeriği arasındaki ilişkiyi tanımlayan ikinci ve üçüncü derece polinom denklemlerinin, mısır tanesinin dielektrik sabitini ve kayıp faktörünü belirlemek için iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Nelson ve Trabelsi (2011) çalışmasında, buğday ve soya fasulyesinin nem içeriğine bağlı olarak dielektrik özelliklerini incelemişlerdir. Hem buğday hem de soya fasulyesi için, dielektrik özelliklerin nem ve yoğunluğa bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Tahıl ve tohum benzeri ürünlerin nem algılama sistemlerinde faydalı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Trabelsi ve Nelson (2006) buğday, mısır ve soya fasulyesinin dielektrik özelliklerini, 2 ila 13 GHz arasındaki frekanslarda yığın yoğunluğu, nem içeriği ve sıcaklık gibi fiziksel özelliklerle varyasyonları araştırmışlardır. Deney sonuçları incelendiğinde yığın yoğunluğu, nem içeriği ve sıcaklık arttığında hem dielektrik sabiti hem de kayıp faktörünün frekansla azaldığını göstermişlerdir. Tahıl tanesinin ve tohumunun fiziksel özelliklerinin dielektrik özelliklerinin ölçümlerinden tahribatsız ve anında belirlenmesi için dolaylı yöntemlerin geliştirilmesi için uygun olduğunu gösterilmişlerdir.

Sacılık ve Çolak (2005) çalışmalarında, haşhaş tohumunun dielektriksel özelliklerini %6.12-22.47 k.b. nem, 541,99-626,37 kg/m³ hacim ağırlığı ve 50 kHz-10 MHz frekans aralığında paralel plakalı kondansatör tohum kutusu yardımıyla belirlemişlerdir. Dielektrik sabiti, kayıp faktörü, kayıp tanjantı ve iletkenlik değerleri, nem, hacim ağırlığı ve frekanstan büyük ölçüde etkili olduğunu vurgulamışlardır. Tohum neminin, haşhaşın dielektriksel özelliklerini etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermişlerdir. Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü, tohumun nemi ve hacim ağırlığıyla artarken uygulanan frekansla azalma olduğunu göstermişlerdir. Dielektrik katsayısının uygulanan frekansa bağlı değişimi, kayıp faktörü ve kayıp tanjantına göre daha düzenli olduğunu ifade etmişlerdir. İletkenlik değerleri, artan frekanstan ziyade artan nem içeriğiyle daha hızlı bir artış gösterdiğinin altını çizmişlerdir. Ayrıca her iki modelin, çalışma aralığı içerisinde

haşhaş tohumunun dielektrik katsayısı ve kayıp faktörünü tahmin edebilmesinde uygun olduğunu sonucuna varmışlardır.

Zhang ve diğ. (2016) çalışmasında, mısır tanesinin neminin tahribatsız ölçümü için yüksek frekanslı bir algılama devresine dayalı halka elektrot çifti kullanılarak bir sensör tasarlamışlardır. Sensör ile sıcaklık ve iletkenlik faktörlerinin etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar ile sıcaklığın ölçüm elektrotlarının çıkış empedansı (hem gerçek hem de sanal kısımlar) ve algılama devresinin çıkış voltajıyla doğrusal olarak ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte, iletkenlik, ölçüm elektrotlarının çıkış empedansına (hem gerçek hem de sanal kısımlar) ve yüksek frekanslı algılama devresinin çıkış voltajına bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Bu nedenle, ölçüm frekansı seçimi ile iletkenliğin ölçüm sonuçları üzerindeki etkisini azalmıştır. Mısır nemi ölçüm sonuçları, mısır tanesinin nemi ile çıkış empedansının sanal kısmı arasında dörtlü bir gerileme gösterdiğini ve ayrıca mısır tanesinin nemi ile 100 MHz'de yüksek frekanslı algılama devresi çıkış voltajı arasında dörtlü bir gerileme olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmalarında, iki mısır ırkı ile kuadrik regresyon denklemi kullanılarak R^2 değerlerini 0,7853 ve 0,8496 olarak bulmuşlardır.

Zhang ve diğ. (2013) yaptığı deneysel çalışmasında, mısırın nemini ölçmek için mısırın kapasitans ve dielektrik sabiti arasındaki ilişkiye dayalı bir kapasite saptama devresi kullanan bir sensör tasarlamışlardır.

Çalışmalarında mısırın nem içeriği ile sensör kapasitansı arasındaki ilişki deney yoluyla bulmuşlar ve en küçük kareler uydurma yöntemi kullanılarak ikili kübik denklem elde etmişlerdir ($y=-0,00005414x^3-0,0089798x^2+0,63413x+11,4539$). Hatanın, kurutma yöntemindekinden daha küçük olduğunu ifade etmişlerdir. Kapasitif sensör devresi ile nem içeriğini ölçmedeki doğruluğun yüksek olduğu ve yöntemin mısırdaki nem içeriğinin belirlenmesi yönünden başarılı olduğunu vurgulamışlardır.

Liu ve diğ. (2015) çalışmasında, ölçüm frekansı ile tahıl nemi arasındaki ilişki modeline dayanan ve doğrusal olmayan sıcaklık düzeltme yöntemi ile çevrimiçi dirençli tahıl nem detektörü tasarlamışlardır. Çevrimiçi nem detektörünün performansı, tasarlanmış deneysel bir sistemde test edilmiştir; Test ve analiz sonuçları incelendiğinde, detektörün hatasının -1% ile 1% arasındaki stabilitenin $95,25\%$ içinde olduğunu ifade etmişlerdir.

Detektörün hassasiyetinin ve stabilitesinin piyasada kullanılan ürünlerin seviyesine ulaşabileceğini vurgulamışlardır.

Han ve diğ. (2012) kurutulmuş tahılın kalitesini sağlamak ve kurutma işleminde akıllı seviyeyi geliştirmek için, 5HSZ kurutucu için sanal bir cihaza dayalı bir dijital mısır kurutma makinesi sistemi simülasyonu oluşturdular. Bu simülasyonla yapay sinir ağı modeli kullanılarak hava sıcaklığını otomatik olarak kontrol edilebilmekte ve tahılın boşaltma hızını tahmin edilebilmektedir. Ayrıca, kurutma sürecinde nem, sıcaklık, nem ve çimlenme oranındaki değişiklikleri sağlamak için tahıl parametrelerine yönelik çevrimiçi bir ölçüm ve otomatik kontrol yazılımı geliştirmişlerdir. Kontrolörün gerçek çalışma etkisini doğrulamak için, seri bağlantılı iki kurutma makinesinde test etmişlerdir. Deneysel çalışmalar ve simülasyon modelinin, sistemin kontrol yönteminin kurutma işlemi kontrolü ve akıllı kontrolde kullanılabileceğini ve kurutma işleminin hassas kontrolü için önemli bir referans sağlayabileceğini vurgulamışlardır.

Tomaraei (2010) çalışmasında, tahılların elektriksel özelliklerini belirleyen dielektrik nemölçer sistemleri geliştirmiştir. Silindirik ve paralel plakalı kutuları tasarlamıştır. Radyo frekans (RF) bölgesinde çalışabilen bir kapasitör olarak düşünmüştür. Nem içeriği ve frekansı ile dielektrik katsayısı, kayıp faktörü hesaplamıştır. Silindirik ve paralel plakalı sistemlerde standart hatası sırasıyla % 0,32 ve 0,39 y.b nem bulmuştur. Silindirik ve paralel plakalı RF tabanlı nem ölçme düzenlerinin, nem içeriğini daha iyi ölçtüğünü ifade etmiştir.

Literatür çalışmaları ile kurutma teknolojilerinin üzerine mısırın kuruma karakteristiğine etki eden özellikleri, kurutma sürecinde enerji ve ekserji analizleri ve mısırın elektriksel özelliklerinden faydalanarak ürün neminin belirlenmesi çalışmaları incelenmiştir. Çalışmalardan da anlaşıldığı üzere kurutmada ürün nemi önemli bir faktördür. Ürün neminin belirlenmesi çalışmalarında laboratuvar ölçekli kurutucu üzerine deneysel çalışmalar sınırlı kaldığı görülmüştür. Çalışmalar eşliğinde mısırın elektriksel özelliklerinin faydalanarak kapasitans nem ölçme yöntemine dayanarak nem sensörünün laboratuvar şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Kurutulacak ürünün istenen özellikleriyle uyumlu bir kurutucu tasarlanması ve endüstriyel mısır kurutma sistemlerine entegre edilebilmesi amaçlanmıştır.

BÖLÜM 3. TEORİK ANALİZ

Bu bölümde; enerji ve ekserji için korunum denklemleri, kütle geçişi ve dielektrik teorisine yer verilmiştir.

3.1. Korunum Denklemleri

Korunum kısmı diferansiyel kütle, momentum ve enerjinin korunumu eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Süreklilik denklemi

Sıkıştırılmaz akış için süreklilik eşitliğinin genel hali (Kadem ve diğ, 2011);

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (3.1)$$

V hız, (m/s) şeklinde ifade edilir.

3.1.2. Momentum denklemi

Sürekli akış durumu için momentum eşitliği aşağıda verilmiştir (Kadem ve diğ, 2011);

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \nu \nabla^2 V \quad (3.2)$$

Burada, ρ_f akışkanın yoğunluğu (kg/m^3), P basınç (Pa), ν kinematik vizkozite (m^2/s^2), t zaman.

3.1.3. Enerji denklemi

Enerji üç boyutlu denklemi sabit özellikli durum için aşağıdaki gibi yazılır (Kadem ve diğ, 2011).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (V \cdot \nabla)T = \frac{k_f}{\rho_f c_{pf}} \nabla^2 T \quad (3.3)$$

Burada, T sıcaklık (K), k_f termal iletkenlik (W/mK), t zaman, c_p özgül ısı'dır.

3.1.4. Difüzyon denklemi

Difüzyonun matematiksel teorisi, Fourier 'in ısı iletimi teorisine dayanılarak, Fick tarafından geliştirilmiştir. Aşağıdaki kartezyen koordinatlar için verilmiş olan üç boyutlu denklem, Fick'in ikinci difüzyon yasası olarak bilinir (Crank, 1975).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (3.4)$$

Burada c madde derişikliğini (kg/m^3), D difüzyon katsayısı (m^2/s)'nı temsil eder. Difüzyon katsayısı; madde derişikliğine, x,y,z koordinatlarına ve zamana bağı olarak değişebilir.

3.2. Ürün Nem İeriği

Tarım ürünlerinin nem ieriği, bünyesinde bulunan su miktarı ve ortam sıcaklığına bağı olarak değişmektedir. İerdikleri su miktarına bağı olarak fizikomekanik özellikler belirlenir (Yağcıoğlu,1999). Bu yöntemde üründeki su ieriği kütle değişimi ölçülerek hesaplanır. Ürünün ierdieği nem miktarı kuru ve yaş baza göre ifade edersek (Gürel ve diğ, 2016);

$$\%MC_{KB} = \left(\frac{W_S}{W_K} \right) \times 100 = \left(\frac{W - W_K}{W_K} \right) \quad (3.5)$$

$$\%MC_{YB} = \left(\frac{W_S}{W_S + W_K} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Burada, W ürünün ilk kütlesi (g), W_S ürün bünyesinde bulunan suyun kütlesi (g) ve W_k kuru ürünün kütlesi (g) 'dır (Türkan, 2020).

Kurutulan ürünün birim zamandaki nem değişimi olan kuruma hızı (DR) şu şekildedir;

$$DR = \left(\frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) \quad (3.7)$$

Burada M_t ürünün t anındaki, $M_{t+\Delta t}$ ise $t+\Delta t$ anındaki ürünün kuru baza (g su/g kuru madde) göre nem içeriğini gösterir (Doymaz ve diğ., 2006). İstatistiki parametrelerde kurutma modelleri boyutsuz nem oranı olarak tanımlandığı için kuru baz değerleri kullanılarak boyutsuz nem oranları (MR) elde edilmiştir (Türkan, 2020).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_b - M_e} \quad (3.8)$$

Burada, M_e kurutma sonundaki denge nem içeriği (g su/g kuru madde), M_b başlangıç nem içeriğini (g su/g kuru madde) ifade eder.

3.3. Kütle Geçişinin Modellenmesi

Kuruma sürecini incelemek için teorik, yarı teorik ve deneysel metotlarla elde edilen veriler ile matematik modellerden faydalanılmaktadır. Teorik modeller, her ürün ve şartlarda uygulanmaktadır. Ancak, çözümü gerektiren eşitliklerde birden çok parametre içerdiğinden dolayı, bu tür modellerin kullanışlılığı azalmaktadır. Deneysel yollarla elde edilen verilerin kuruma hızının belirleyebilmek için, karmaşık matematik eşitlikler kullanılmaktadır. Fakat elde edilen eşitlikler araştırma yapılan ürün ve deney şartları için geçerlidir; farklı koşullarda kullanılamazlar. Kuruma esnasında teorik ve yarı teorik kuruma modellerinin kullanılması ve kurutma davranışının incelemesini basitleştirmek için bazı kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller (Abuşka, 2010):

- Nem dağılımı ürün içinde homojendir.
- Ürün bünyesinde bulundurduğu su veya buhar fazında difüzyon sonucunda kurutma gerçekleşmektedir.
- Sıcaklık farkı, nem farkı, basınç farkı gibi etkenlere bağlı olarak difüzyon gerçekleşmektedir.
- Kurutma boyunca, kurutma havasının özellikleri değişmez.
- Ürün ince bir tabaka şeklindedir.

Difüzyon katsayısı sabit bir değer değildir, nem içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterir. D değeri nem içeriği azaldıkça düşmektedir ve kurutma yüzeyine yaklaştıkça çok küçük değeri olmaktadır. Kurutulan üründe ortalama bir D difüzyon katsayısı yassı düz levha için hesaplanırsa;

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3.9)$$

Burada D_{eff} efektif nem difüzyonunu (m^2/s), L ürünün yarı kalınlığı (m)'dir.

Ürünün yüzeyinden havaya geçen su buharının kütle transferi ihmal edilmektedir. Kurutma süresindeki kuruma hızını ürünün difüzyonu belirlemektedir. Difüzyon katsayısı sıcaklıkla arttığı için ürün sıcaklığının artması ile kuruma hızı da artmaktadır.

Farklı zaman periyodu için eşitlik (3.9) de verilen eşitliğin ilk terimi alınarak sadeleştirilir. Eşitlik şu şekilde ifade edilir. Zamana bağlı $\ln(MR)$ ile eğim (e) kullanılarak efektif difüzyon katsayısı hesaplanır.

$$e = \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right) \quad (3.10)$$

Sıcaklık etkisini değerlendirmek için Arrhenius denklemi kullanılarak E_0 , aktivasyon enerjisi (kJ/mol) ise (3.11) numaralı eşitlik ile hesaplanır (Correa ve diğ, 2011).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right) \quad (3.11)$$

Burada R universal gaz sabiti (8.314×10^{-3} kJ/molK), D_0 Arrhenius denkleminin üstel faktörü (m^2/s) ve T kurutma havası sıcaklığı (K)'dir.

Nem oranı (MR) ve karşılık gelen t süresi eşitlik (3.12)'de gösterilmiştir.

$$t = \frac{4L^2}{\pi^2 D} \ln \frac{8(M_0 - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)} \quad (3.12)$$

Teorik yaklaşımlardan daha iyi çözüm sağladığından, tanelerin kurutma davranışını temsil etmesi için sıklıkla deneysel ince tabaka denklemleri kullanılır (Özahi ve Demir, 2014). Çalışmada mısır tanesinin modellenmesi matematiksel modellemede yaygın olarak kullanılan altı ince tabaka modeli ile gerçekleştirilmiştir. Modeller Tablo 3.1'de verilmiştir ve a, b, c denklemlerin kurutma sabitleridir ve t kurutma süresini temsil eder. Modelleme için MATLAB programının eğri uydurma yöntemi kullanılmış ve denklemlerdeki sabitler deneysel olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan ince tabaka modeller

Model no	Model ismi	Eşitlik	Referans
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$ (3.13)	(Lewis,1921)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$ (3.14)	(Hassan-Beygi ve diğ, 2009)
3	Henderson ve Pabis	$MR = a \exp(-kt)$ (3.15)	(Henderson ve Pabis,1961)
4	Logaritmik	$MR = a \exp(-kt) + b$ (3.16)	(Midilli ve Küçük, 2003)
5	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$ (3.17)	(Midilli ve diğ, 2002)
6	Wang ve Singh	$MR = a + bt + ct^2$ (3.18)	(Wang ve Singh, 1978)

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

Kurutma yöntemleri için en uygun eşitliği seçmek için kriter olarak belirleme (R^2) katsayısı, artıkların karelerinin toplamı (SSE) ve ortalama hata karelerinin (RMSE) karekökü seçildi. Belirleme (R^2) katsayısı, modeller için bir uyum iyiliği ölçüsüdür ve 0 ile 1 arasında olabilir. Bir'e (1,0) yakın değer, model ile deneysel veriler arasında neredeyse mükemmel bir ilişki olduğunu gösterir. Ayrıca, 0'a yakın RMSE ve SSE değerleri, uyumun tahmin için daha kullanışlı olacağını gösterir. Belirleme (R^2) katsayısı, SSE ve RMSE aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenebilir (Hassan-Beygi ve diğ, 2009) .

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{deney,i} - MR_{tahmin,i})}{\sum_{i=1}^n (MR_{deney,i} - \overline{MR}_{deney})} \quad (3.19)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (MR_{tahmin,i} - MR_{deney,i})^2 \quad (3.20)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{tahmin,i} - MR_{deney,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.21)$$

3.4. Enerji Analizi

Tarım ürünlerinin kurutma süreçlerindeki prosesleri daha verimli gerçekleştirmek için termodinamiğin birinci yasası yardımıyla enerji analizi gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Kütlelerin korunumu ilkesi

Kontrol hacmi veya açık sistemler için kütlelerin korunumu ifadesini yazarsak (Filiz, 2012);

$$\sum m_g = \sum m_c \quad (3.22)$$

Şeklinde yazılır. Sisteme giren toplam kütle, çıkan toplam kütleyle eşittir.

Birim zamanda kütle korunumu eşitlik 3.22'deki gibi yazılırsa (Filiz, 2012);

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta = \frac{dm}{dt} \quad (3.23)$$

olarak ifade edilir (\dot{m} kütleli debi(kg/s)'dir). Sürekli akışlı sistemlerde kütle zamanla değişmediği için kütle korunumu ifadesi (Filiz, 2012);

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (3.24)$$

Bir kesitten birim zamanda akan kütle miktarı kütleli debi olarak tanımlanmaktadır. Bir boru veya kanal boyunca kütleli debiyi eşitlik 3.25'deki gibi yazabiliriz (Akan, 2018);

$$\dot{m} = \int \rho V dA \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilir. A alan (m²), V hız (m/s), ρ yoğunluk (kg/m³)'dür.

3.4.2. Enerjinin korunumu ilkesi

Sürekli akışlı sistemlerde toplam enerji sabittir. Yani sabit (denge) şartlarında bir sisteme giren enerji miktarı ile sistemden çıkan enerji miktarı eşittir. Sisteme ısı, iş ve kütle akışı olarak enerji girişi ve çıkışı olmaktadır. Termodinamiğin birinci yasası veya enerjinin korunumu ilkesine dayanarak;

Genel enerji dengesi aşağıdaki gibidir (Hepbaşlı ve Balta, 2007);

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\zeta \quad (3.26)$$

\dot{E} burada enerji (kJ/s veya kW). Daha açık ifade edecek olunursa;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta e_\zeta - \sum \dot{m}_g e_g \quad (3.27)$$

Birim zamanda ısı veya iş olarak kontrol hacmine geçen toplam enerji, birim zamanda kütle ile birlikte kontrol hacminden çıkan toplam enerjinin birim zamanda kütle ile birlikte kontrol hacmine giren toplam enerjinin farkına eşittir.

Termodinamiğin 1.kanunu ile denklem düzenlendiğinde (Abuska, 2010);

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_\zeta \dot{m} (h + 1/2 V^2 + g \cdot z) - \sum_g \dot{m} (h + 1/2 V^2 + g \cdot z) \quad (3.28)$$

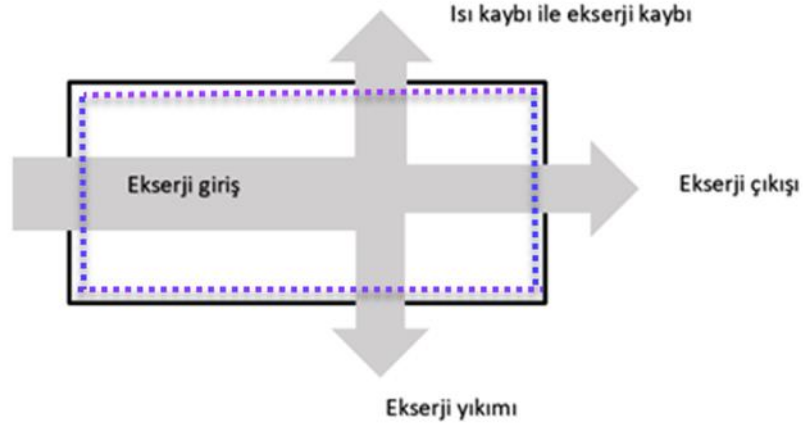
Enerji denkleminde kinetik enerji ve potansiyel enerji değişimleri çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Enerji denklemi aşağıdaki gibi olmuştur;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (3.29)$$

3.5. Ekserji Analizi

Ekserji analizi termodinamiğin ikinci yasasına dayanarak yapılan termodinamik analiz yöntemidir. Ekserji analizi ile bir sistemi ve hal değişimleri değerlendirilebilmekte ve karşılaştırma yapılabilir. Sistemin performansı maksimum performansla kıyaslanarak sistemdeki kayıpların yerleri, miktarı ve sebepleri belirlenebilmektedir. Ekserji analizinden elde edilen sonuçlar ışığında, sistemin performansının iyileştirilmesinde ve daha iyi tasarımların yapılmasına imkân sağlamaktadır (Turan, 2009).

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin niceliğini ifade ederken, ikinci yasa enerjinin niceliğinin yanında niteliğinin de olduğunu vurgulamaktadır. Enerjinin kalitesini veya iş yapabilme yeteneğinin sayısal olarak ifade edilmesi ekserji olarak tanımlanır. Bir kaynaktan elde edilen maksimum içi gösterir. Ekserji kayıplarının azalması iş üretiminin ifadesidir. Bir sistemde ekserji kayıplarını en aza indirgeyerek maksimum performans sağlanmış olur. Sistem ile çevre denge durumunda ise bu duruma “ölü hal” denilmektedir. Ölü hal, sistemin çevresi termodinamik dengede olmasıdır. Bir sistemin ölü hal durumunda olması, ısıl ve mekanik olarak dengede olduğunu ifade eder. Genel enerji ve ekserji şematığı şekil 3. 1’de verilmiştir.



şekil 3.1: Genel enerji ve ekserji gösterimi

Genel ekserji denkleminde (Yahya ve diğ, 2017; Ahern, 1980).

$$\begin{aligned}
 Ekserji = & \left(u - u_{\infty} \right) - T_0 \left(s - s_{\infty} \right) + \frac{P_{\infty 0}}{J} \left(v - v_{\infty} \right) + \frac{V^2}{2gJ} \\
 & \text{momentum} \\
 & + \left(z - z_{\infty} \right) \frac{g}{g_c J} \\
 & + \sum_c \left(\mu_c - \mu_{\infty} \right) N_c + E_i A_i F_i \left(3T^4 - T_{\infty}^4 - 4T_{\infty} T^3 \right) \\
 & \text{kimyasal} \quad \text{radyasyon emisyonu} \\
 & + \dots
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

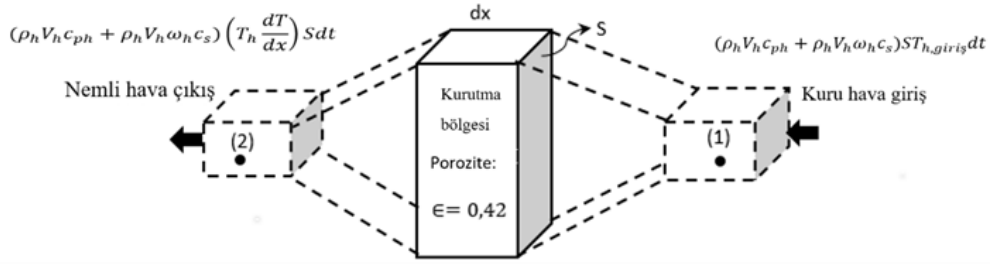
∞ referans koşulları, T_{∞} ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir. Yerçekimi ve momentum ihmal edilmiştir. Denkleminde iç enerji ve Pv terimleri yerine entalpi yazılır. $v \cong v_{\infty}$ olduğundan dolay basınç değişimleri de ihmal edilmiştir (Corzo ve diğ, 2008). Eşitlik en genel anlamıyla aşağıdaki gibi yazılırsa;

$$Ekserji = c_{pkh} \left[\left(T - T_{ref} \right) - T_{ref} \ln \frac{T}{T_{ref}} \right] \tag{3.31}$$

Tasarladığımız deney setimizin termodinamik analizi 2 ana kısımda incelenmiştir.

Deneysel çalışmada elde edilen veriler ile enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan veriler, farklı yerlerdeki hava akımlarının sıcaklığı, havanın kütle akış hızı, kurutucu sisteminin enerji giriş ve ıkışları ve üründen çıkarılan nemin kütlesidir. Kurutma sisteminin enerji girişleri brülör ve LPG enerjileridir. Kurutma sisteminin enerji ıkışları; sıcak hava ısıtıcılarından ısı kayıpları, bağlantı kanallarının

farklı bölümlerindeki ısı kayıpları, kurutma odası duvarlarından ısı kayıpları ve kurutma odası ısı kayıplarıdır. Enerji analizi sırasında, kurutma sistemindeki akışın sabit olduğu varsayılmıştır. Mısır kurutma test düzeneğinin kurutma bölgesi enerji giriş ve çıkış ölçülen konumlar Şekil 3.2 'de gösterilmiştir.



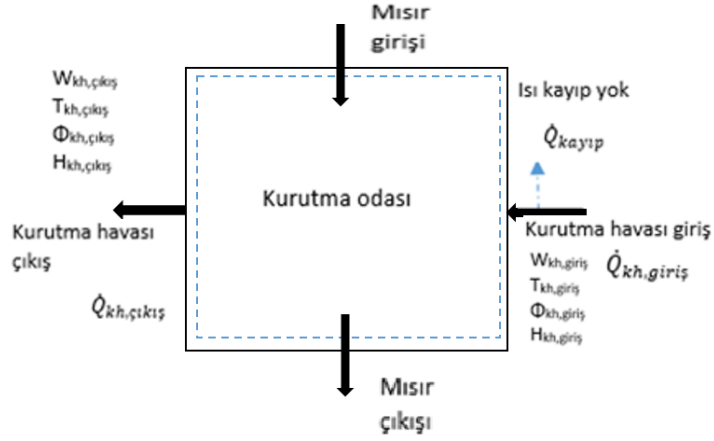
Şekil 3.2: Mısır kurutma test düzeneğinin enerji ve ekserji analizi şematik görünümü

Termodinamiğin birinci yasası kullanılarak enerji analizi yapılmıştır. Deney koşulları olarak aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Tüm deneyler, sabit durum koşullarında gerçekleştirildi.
- Potansiyel enerji, kinetik enerji, kimyasal reaksiyonlar ihmal edilmiştir.
- Kurutma havası, ideal bir gaz olarak düşünülmüştür.
- Kurutma havası sıcaklığı 103 °C'de sabit kabul edilmiştir.
- Sisteme ısı aktarımı ve sistemden iş aktarımı pozitifdir.
- Referans (ölü) durum koşulları $P_0 = 101,325$ (k.Pa), $c_{pa} = 1,005$ (kJ/kg°C), $c_{pv} = 1,872$ (kJ/kg°C), $R_a = 0,287$ (kJ/kg.K) ve $R_v = 0,4615$ (kJ/kg.K) olarak belirlenmiştir ve tüm hesaplamalarda sabit kabul edildi.

Analizde kurutma kabindeki giriş ve çıkış toplam enerji kayıpları hesaplanmıştır. Sistem üzerinde belirlenen düğüm noktalarının giriş ve çıkış koşulları için hesaplanan enerji değerleri kullanılarak enerji verimliliği belirlenmiştir.

Kurutucu kabin kütle ve enerji denklileri; Bu bölümde kurutucu kabinindeki giren ve çıkan maddeler arasındaki kütle denge, enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Kurutucu kabin enerji ve ekserji analizi Şekil 3.3'de verilmiştir



Şekil 3.3: Kurutucu kabin enerji ve ekserji analiz gösterimi

Kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılırsa;

$$\dot{m}_{m,g} + \dot{m}_{h,g} = \dot{m}_{m,\phi} + \dot{m}_{h,\phi} \quad (3.32)$$

Enerji dengesi eşitliği ise giren enerjinin çıkan enerjiye eşitlenmesi ile kurutma kabini için şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{m}_{kh}h_{kh,g} + \dot{m}_m h_{m,g} = \dot{m}_{kh}h_{kh,\phi} + \dot{m}_m h_{m,\phi} + \dot{Q}_k \quad (3.33)$$

Kurutucu havasının bağıl nemi denklem (3.34) kullanılarak hesaplanmaktadır (Midilli ve Küçük, 2003).

$$\varphi = \frac{\omega P}{(0,622 + \omega)P_{doy@T}} \quad (3.34)$$

Burada ω mutlak nemi, P atmosfer basıncını ve $P_{doy@T}$ kurutma havasının doymuş buhar basıncıdır. Havanın özgül ısı kapasiteleri hesaplanmıştır (Aghbashlo ve Arabhosseini, 2009; Azadbaght ve diğ, 2017):

$$c_{pkh} = 1,004 + 1,88\omega \quad (3.35)$$

Mutlak nem aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (kg su / kg kuru hava) (Güneş, 2009);

$$\omega = 0,622 \times \frac{\varphi \times P_{doy@T}}{P - P_{doy@T}} \quad (3.36)$$

Kurutma havasının entalpisi denklem (3.37) kullanılarak elde edildi (Helvacı ve Akkurt, 2014):

$$h = c_{pkh} T_{kh} + \omega h_{doy@T} \quad (3.37)$$

Enerji kullanımı (EK) Denklem (3.38) ile hesaplanmıştır (Sarker ve diğ, 2015):

$$EK = \dot{m}_{kh}(h_{kh,g} - h_{kh,\zeta}) \quad (3.38)$$

Burada $h_{kh,g}$ ve $h_{kh,\zeta}$ kurutucu hava giriş ve çıkış entalpisi olarak ifade edilmiştir.

Enerji kullanım oranı (EKO) aşağıdaki gibi gösterilir (Corzo ve diğ, 2008);

$$EKO = \frac{\dot{m}_{kh}(h_{kh,g} - h_{kh,\zeta})}{\dot{m}_{kh}(h_{kh,g} - h_{ort})} \times 100 \quad (3.39)$$

Özgül enerji tüketimi(ÖET) ise aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\text{ÖET} = \frac{E_g}{w_{su}} \quad (3.40)$$

Burada w_{su} yaş üründen buharlaşan suyun kütesidir. w_{su} (3.41) denklemi ile bulunur.

$$w_{su} = \frac{w_0(w_i - w_s)}{(100 - w_s)} \quad (3.41)$$

Burada w_0 , toplam ürünün ilk kütesi(kg); w_i yaşa baza göre ilk nem içeriği; w_s on, yaşa baza göre son nem içeriğidir.

Kurutma kabini için ekserji dengesini eşitlik 3.42'deki şekilde yazılırsa (Çolak Güneş, 2009);

$$\dot{E}x_{m,\zeta} - \dot{E}x_{m,g} = \dot{E}x_{kh,g} - \dot{E}x_{kh,\zeta} - \dot{E}x_{kayıp} \quad (3.42)$$

Kurutma kabini ekserji kayıpları ise aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$E x_{kayıp} = \dot{m}_{kh}(E x_g - E x_\zeta) \quad (3.43)$$

Kurutma kabini ekserji girişi 3.44 eşitliği yardımıyla hesaplandı.

$$E kserji_{giriş} = c_{p_{kh}} \left[(T_{kh,g} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{kh,g}}{T_\infty} \right] \quad (3.44)$$

Çıkış ekserjisi (3.45) Eşitlikle hesaplanırsa;

$$E kserji_{çıkış} = c_{p_{kh}} \left[(T_{kh,\zeta} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{kh,\zeta}}{T_\infty} \right] \quad (3.45)$$

Şeklinde hesaplanır. Kurutma kabinin ekserji verimi ise;

$$\eta_{E kserji} = 1 - \frac{E x_{kayıp}}{E x_g} \quad (3.46)$$

Son olarak faydalı enerji şu şekilde tanımlanır (Ahern, 1980);

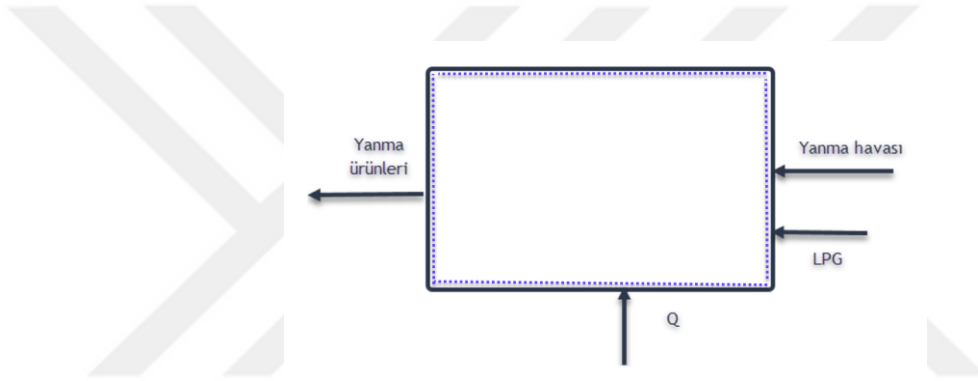
$$\dot{Q}_{verim} = \dot{m}_{kh} c_{p_{kh}} (T_{h,\zeta} - T_{h,g}) \quad (3.47)$$

LPG yakıtı için kütle, enerji ve ekserji analizi

LPG, basınç altında sıvı halde bulunan propan (C₃H₈) ve bütan (C₄H₁₀)'a verilen isimdir. LPG nin bileşiminde, %70 Bütan (C₄H₁₀) ve %30 Propan (C₃H₈) bulunur.

Atmosfer havası hacimsel olarak %78.09 azot, %20.95 oksijen, %0.93 argon, ve %0.03 karbonmonoksit'ten oluşmaktadır. Yanma havasının hacimsel olarak %79 azot ve %21 oksijenden oluştuğu kabul edilmiştir.

Yanma işleminde kütle korunumu prensibine göre giren kütle (yakıt + yanma havası) çıkan kütle (yanma ürünleri veya baca gazı) eşitliğinden yola çıkılarak LPG yakıtının enerji ve ekserji hesaplamaları Şekil 3.4 gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.4: LPG'nin enerji ve ekserji analizi

Şekil 3.4 göz önüne alındığında;

- İki giriş ve bir çıkış ile kütle akışının sabit olduğu,
- Sistemde herhangi bir değişiklik olmadığı,
- Sistemde iş alış verişinin olmadığı,
- Giriş ve çıkışta kinetik ve potansiyel enerjilerin ihmal edildiği gözlemlenebilmektedir.

Şekil 3.4 için kütle ve enerji dengesi Eşitlik (3.48)'de ifade edilmiştir (Ertesvag, 2009);

$$\dot{H}_{g,yakıt\ miktarı} + \dot{H}_{hava} - \dot{H}_{ç,yanma\ ürünleri} + \dot{Q} = 0 \quad (3.48)$$

Eğer ideal gaz olarak varsayarsak, entalpi sadece sıcaklığın fonksiyonudur, $h = h(T)$.

Enerji dengesini yazarsak;

$$\begin{aligned} \dot{m}_{yakıt} \left(h(T_{yakıt}) - h(T_{ref}) \right)_{yakıt} + \dot{m}_{hava} \left(h(T_{hava}) - h(T_{ref}) \right)_{hava} \\ - \dot{m}_{yakıt} \left(h(T_{yakıt}) - h(T_{ref}) \right)_{yakıt} + \dot{Q} = 0 \end{aligned} \quad (3.49)$$

İki giriş sıcaklığı aynı olduğu için T_i , olduğu için $T_{yakıt}=T_{hava}=T_{ilk}$ ve eşitlik (3.50) gibi düzenlenir;

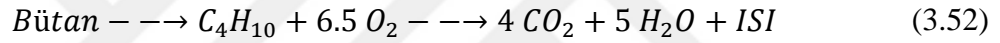
$$\begin{aligned} \dot{m}_{yakıt} \left(h(T_{ilk}) - h(T_{ref}) \right)_{yakıt} + \dot{m}_{hava} \left(h(T_{ilk}) - h(T_{ref}) \right)_{hava} \\ - \dot{m}_{yakıt} \left(h(T_{ilk}) - h(T_{ref}) \right)_{yakıt} + \dot{Q} = 0 \end{aligned} \quad (3.50)$$

Yukarıda 3.49 ve 3.50 eşitliği eşitlik 3.51 'te sadeleştirilip daha uygun hale getirilmiştir.

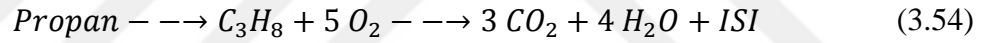
$$\Delta h = \Delta h(T) = h(T) - h(T_{ref}) \quad (3.51)$$

Δh_{hava} ; referans sıcaklığının entalpisidir.

Yanma reaksiyonu aşağıdaki şekilde gösterilirse (Singh ve diğ.2016):



Yanma ikinci bileşeni ise;



Şeklinde olursa;

$$\begin{aligned} \bar{q}_{yanma,C_3H_8} = \sum_{girenler} n_{reaktant} \left(\bar{h}_f^0 + \bar{h}_{273K} + \bar{h}_0 \right)_{reaks} \\ - \sum_{çıkanlar} n_{ürünler} \left(\bar{h}_f^0 + \bar{h}_{273K} + \bar{h}_0 \right)_{ürünler} \end{aligned} \quad (3.55)$$

LPG yakıtının yanması eşitlik (3.56) aşağıdaki gibi açıklanır;

$$\bar{q}_{yanma,LPG} = \%70 x \bar{q}_{yanma,C_4H_{10}} + \%30 x \bar{q}_{yanma,C_3H_8} \quad (3.56)$$

Toplam ekserji ise aşağıdaki gibi ifade edilirse;

$$E_x = \sum_i v_i E_x(i) + R T_0 \sum_i v_i \ln v_i \quad (3.57)$$

$E_x(C_3H_8) = 2\,091\,390,0 \left(\frac{J}{mol} \right)$ ve $E_x(C_4H_{10}) = 2\,726\,310,0 \left(\frac{J}{mol} \right)$ değerleri alınmıştır.

İdeal gazların molar kimyasal ekserjileri Eşitlik (3.58) ile hesaplanmaktadır (Filiz, 2012).

$$\bar{e}x_{kim} = \bar{R}T_0 \sum y_i \ln \left(\frac{y_i}{y} \right) = \sum y_i \bar{e}_{kim,i} + \bar{R}T_0 \sum y_i \ln y_i \quad (3.58)$$

Gaz yakıtların ekserjisi eşitlik (3.59) ile hesaplanmaktadır.

$$\varphi = \frac{ex_{kim}}{(\dot{H}_u)_{yakıt}} \quad (3.59)$$

İkinci kanun veya ekserji verimi ile kullanılabilir enerjiden işlemin ne kadar iyi ve mükemmel yakın olduğu incelenebilmektedir.

LPG yakıt için tavsiye edilen değerler ile yakıtın yanması sonucu oluşan yakıt enerji değeri;

$$Q_y = \dot{m}_y H_u \quad (3.60)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada \dot{m}_y , yakıt debisini (kg/s), H_u yakıtın alt ısıl değerini (kJ/kg) göstermektedir.

Tüm sistemin ekserji verimini toplam çıkan ekserjinin toplam giren ekserjiye oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{\text{sistemden çıkan toplam ekserji}}{\text{sisteme giren toplam ekserji}} \quad \eta = \frac{\sum \dot{E}x_{\check{c}}}{\sum \dot{E}x_g} \quad (3.61)$$

3.6. Gözenekli Ortamda Akış

Sıcak kurutma havasından ürüne konveksiyonla aktarılan enerji, tanenin ısıtılması, çekirdeklerden suyun buharlaştırılması ve çekirdeklerden buharlaşan su buharının ısıtılması için gerekli entalpiler toplamına eşittir. Kontrol hacmine aşağıdaki varsayımlarla tek boyutlu enerji analizi uygulandığında; Giriş havası sıcaklığı ve nemi sabittir, başlangıçta tüm malzemeler aynı nem içeriğine sahiptir, hacim küçülmesi ihmal edilebilir, sıcaklık ihmal edilebilir, duvarlar adyabatik, ısı iletimi ihmal edilebilir. Daha sonra kurutucu havanın entalpi denklemi kullanılmıştır (Akgün ve Doymaz, 2005).

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-ha}{\rho_h V_h c_h + \rho_h V_h \omega c_s} (T - \theta) \quad (3.62)$$

Bu denklem yaklaşık olarak kurutma bölgesindeki hava sıcaklığı değişimini tahmin etmek için kullanılabilir. Burada a sembolü, spesifik alandır (m^2 / m^3) ve mısır için 784'e eşittir. Hacimsel ısı transfer katsayısı h , aşağıdaki gibi tanımlanır (Liu ve diğ, 2015).

$$h = 0,2755\rho_h V_h c_h a \left(\frac{2r_c \rho_h V_h}{\mu_a} \right)^{-0,34} \quad (3.63)$$

Şekil 3.2. 'de gösterilen 1.ve 2. noktalar arasındaki toplam basınç düşüşü gözenekli bölgedeki basınç düşüşünün toplamı olarak ifade edilir ve daralma ve genişleme olan yerel basınç kayıpları,

$$(\Delta P)_{Toplam} = \Delta P_{porozite} + \Delta P_{yerel} \quad (3.64)$$

Metre uzunluk başına gözenekli bölgedeki basınç düşüşü, ikinci dereceden Hunter'ın (1983) denklemi (3.65) ile hesaplanabilir.

$$\Delta P_{porozite} = (R\dot{V} + S\dot{V}^2)L \quad (3.65)$$

Denklemdaki S ve R katsayılarının ürün tipine göre farklılık gösterdiği ve deneysel verilere göre belirlenmektedir.

$$R = 1.12 \frac{a}{b} \quad (3.66)$$

$$S = 0.346b \quad (3.67)$$

Burada mısır taneleri için a ve b sabiti sırasıyla 2.07E + 4 ve 30.4'tür. Ani daralan ve genişleyen kanallar için yerel kayıplar;

$$\Delta P_{yerel} = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (3.68)$$

Burada K, ani kısılmalar için yerel kayıp faktörüdür;

$$K = 0.75 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right] \text{ için } \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 > 0.715 \quad (3.69)$$

Ani genişleme için;

$$K = \left[1 - \frac{D_2^2}{D_1^2} \right]^2 \quad (3.70)$$

Ayrıca yüzde 40 açık alan oranına sahip delikli plakalar için;

$$K = [0,707(1 - f)^{0,375} + 1 - f]^2 \frac{1}{f^2} \quad (3.71)$$

f açık alan oranıdır ve değeri % 40 olarak alınır.

3.7. Kapasitans Nem Ölçme Yöntemi

Kapasitans ölçüm yöntemi endirekt ölçüm yöntemidir. Bu yöntemde kurutulmuş ürünün direnç ve kapasitans ölçümü yapıldıktan sonra bunun nem içeriğine dönüştürülmesi ile hesaplanır (Gürel ve diğ., 2016).

Tahılların dielektrik özellikleri, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp faktörü (ϵ''), kayıp tanjantı ($\tan \delta$) ve iletkenlik (σ). Tarımsal ürünlerin dielektrik özelliklerini belirlemek için bu dört parametreden ikisi ölçülmelidir (Berbert ve diğ., 2001; Nathk ve Ramanathan, 2018). Dielektrik özellikler, boş alana bağlı karmaşık geçirgenlik veya karmaşık dielektrik sabiti, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, burada ϵ' dielektrik sabiti ve ϵ'' dielektrik kayıp faktörüdür (Nelson, 2010). Bir kapasitörün kapasitesi iki plaka arasında C ile ifade edilirse (Solar ve Solar, 2016) :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon' A}{d} \quad (3.72)$$

Burada, A plakanın alanı ve d plakalar arasındaki mesafedir (Rai ve diğ., 2007) .

Mısır nemini tahmin etmek için iki farklı frekansta dielektrik katsayılarının değişimi kullanılabilir. Eşitlik (3.73) kullanılarak, dielektrik sabitlerinin değişimi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir (Koekua ve Sakphrom, 2020).

$$(\epsilon'_1 - \epsilon'_2) = (C_1 - C_2) \frac{d}{(\epsilon_0 A)} \quad (3.73)$$

Burada ϵ'_1 ve ϵ'_2 malzemenin iki frekanstaki dielektrik sabitleridir. Eşitlikteki kapasite farkı ($C_1 - C_2$) , ürün nem değişiminin bir göstergesidir. İki frekansın iki parametresi vardır. Dağılım faktörü D ve faz açısı θ olarak gösterilmiştir. Alt indisler seçilen iki noktası arası farklardır. Bu parametreler dahil edildiğinde, ürün nem içeriği aşağıdaki fonksiyon yardımıyla ifade edilebilir (Korkua ve Sakphrom, 2020):

$$MC = A_0 + A_1(C_1 - C_2) + A_2(C_1 - C_2)^2 + A_3 \left[\frac{(\theta_1 - \theta_2)}{(C_1 - C_2) + 2(D_1 - D_2)} - (C_1 - C_2)(D_1 - D_2) \right] \quad (3.74)$$

burada C1, D1, θ_1 ve C2, D2, θ_2 1 MHz'de kapasitans, dağılım faktörünü ve A0 ila A3 kalibrasyon sabitleridir. Kalibrasyon sabitleri, gerekli nem aralığı içinde bilinen nem oranı değerlerinin birkaç numunesi üzerinde ölçümler yapılarak ve bir en küçük kareler

hesaplaması uygulanarak değerlendirildi. Tek bir frekans düşünöldüğünde, faz açısındaki değışiklik ihmal edilebilir. Dağılma faktörü, düşük frekans koşullarında küçük bir değere sahiptir. Dielektrik sabiti düşük frekans aralığında biraz değıştiğı için eşitlik (3.75) aşğıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$MC = A_0 + A_1C + A_2C^2 \quad (3.75)$$



BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Laboratuvar ölçekli Tahıl Kurutucu Sistemi, BAP (2020-50-02-003) projesi kapsamında 2018 - 2019 yıllarında EYLÜL – KASIM döneminde Ada kurutma fabrikasında yapılmıştır. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarına getirilmiştir. Proje tamamlanmış olup Tez kapsamında dielektrik nem ölçme sistemi kullanılarak mısır kurutma deney düzeneğinin ve bileşenlerinin enerji ve ekserji analizi, dielektrik nem ölçme sistemi ele alınmıştır.

4.1. Materyal

Kurutma deneylerinde mısır FAO 700 ve FAO 650 çeşitleri kullanılmıştır (*Zea mays indentata Sturt.*). Deneyde alınan mısır tanelerinin bazı özellikleri Tablo 4.1 'de verilmiştir. Mısır tarımı Ege, Akdeniz ve Marmara'da daha yoğun olarak yapılmaktadır. Kullanılan hibrit mısır verim potansiyeli yüksek ve adaptasyon yeteneği çok geniştir. Mısır %25-30 nem 'de hasat edilmiştir.

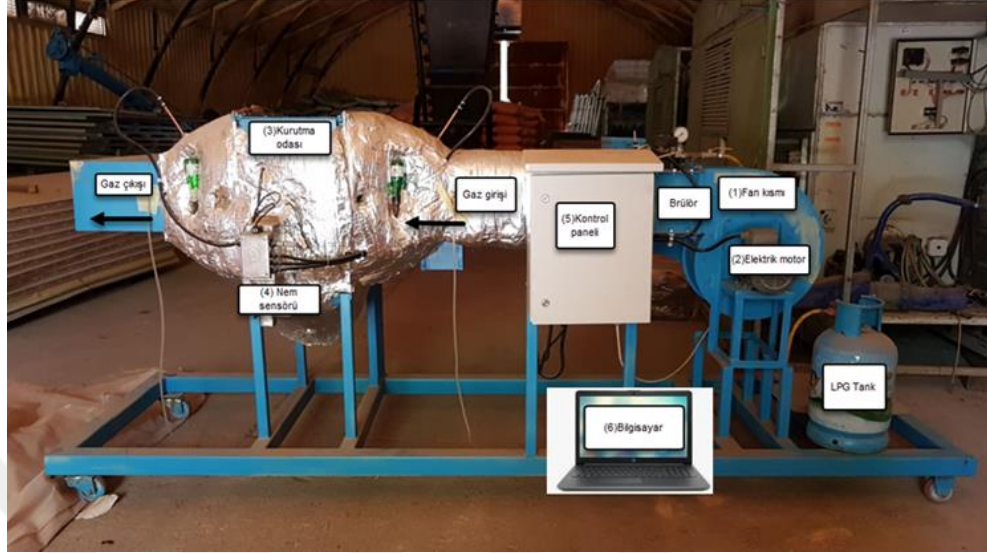
Tablo 4.1: Mısırın özellikleri

Tahıl tipi	İlk nem içeriği % (yaş baz)	Uzunluk (cm) (ortalama)	Genişlik (cm) (ortalama)	Kalınlık (cm) (ortalama)	Kütle yoğunluğu (kg/m ³) (ortalama)
Mısır (<i>Zea mays indentata Sturt.</i>)	%24	1,3	0,83	0,48	727,2

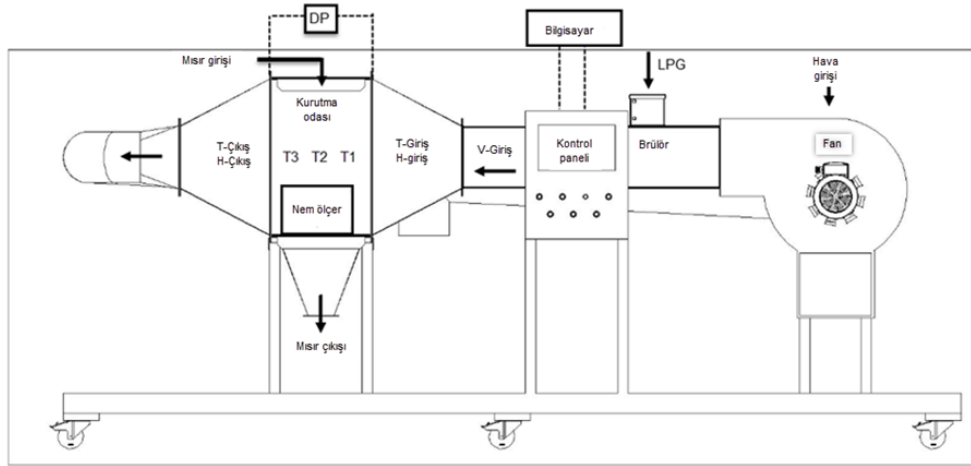
4.2. Mısır Kurutma Deney Seti

Dielektrik nem ölçme yöntemine dayalı mısır tanesinin deneysel kurutma işlemleri için Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminden sağlanan destek ile deney düzeneği tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Bu deney düzeneği ile farklı nemlerdeki mısırın dielektrik nemölçer ile kurutma süreçleri incelenmiştir. Deney düzeneğinde değiştirilebilir parametreler kurutma havası sıcaklığı, kurutma havası

hızıdır. Dielektrik nem ölçme esasına dayalı deney setlerinin görünümü Şekil 4.1. ve 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Deney setinin görüntüsü



Şekil 4.2: Deney düzeneğinin gösterimi

Deney düzeneği 6 ana bölümden oluşmuştur. Bunlar;

- Hava akımını sağlayan fan
- Isıtma Ünitesi
- Kurutucu kabin
- Dielektrik nemölçer
- Kontrol paneli
- Bilgisayar

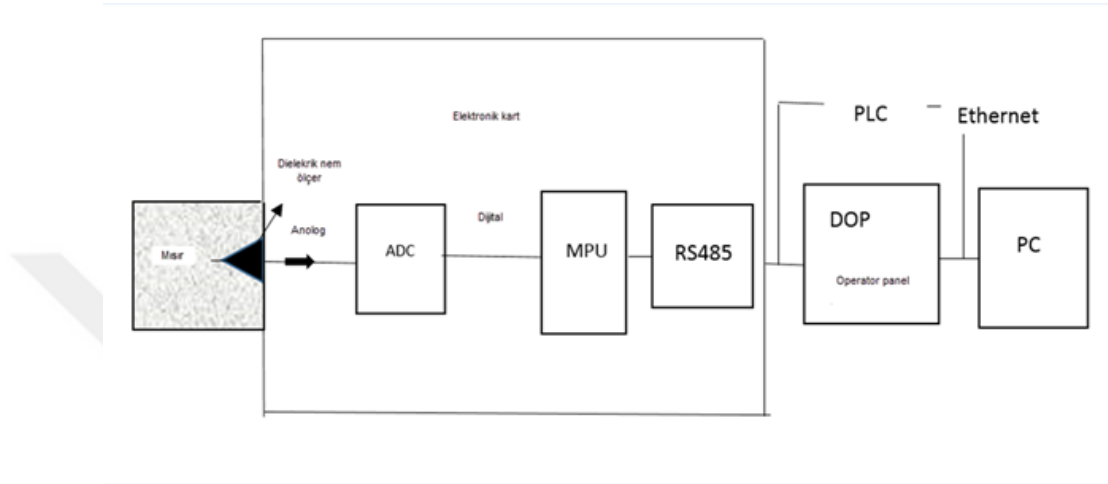
Fan: Sistemde hava akışını sağlamak için fan kullanılmıştır. Deneyleerde santrifüj fan kullanılmıştır. PLC kontrol panosundan kurutma havası için gerekli hava debisi ayarlanmıştır. Fan çalışma şartları, 300 pa basınç'ta, min:500 m³/dk max:3500m³/ dk debi aralığındadır. 1-3 m/s hava hız aralığında çalıştırılmıştır.

Isıtma bölümü: Tarım ürünlerin kurutulmasında yoğun bir şekilde enerji kullanılmaktadır. Kullanılan bu enerjinin büyük bölümü kurutma havasının sıcaklığının arttırılması için tüketilir. Fan ve diğer ileticilerin çalıştırılmasında tüketilen enerji toplam tüketilen enerjinin çok küçük bir bölümünü oluşturur. Kurutma işlemlerinde kullanılacak ısıtıcının seçiminde maliyet bakımından büyük öneme sahiptir.

Kurutucularda havanın ısıtılması amacıyla katı, sıvı, gaz yakıtları kullanılmaktadır. Günümüzde sıcak havayla kurutma yapılan endüstriyel kurutucularda sıvı veya gaz yakıtla çalışan kurutucular tercih edilmektedir. Ülkemizde ayrıca sayısı az olmakla birlikte güneş ile kurutma esasına dayanan kurutma uygulamaları da yapılmaktadır. Tasarladığımız kurutucuda LPG ile çalışabilen brülör paslanmaz çelikten üretilmiştir. Otomatik ateşlemeli çalışmaktadır. Otomatik alev algılayıcısı ve emniyet selenoidi ile güvenli çalışma sağlanmış oldu. Isıtma ünitesi 3 Adet 1000 Watt dirençli ısıtıcıdan oluşmaktadır. Brülör kontrolü ise Siemens AGD-76437 ile yapılmıştır.

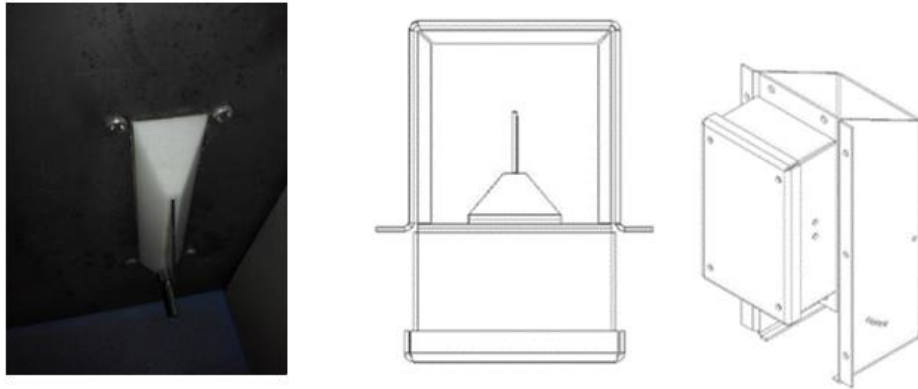
Kurutucu kabin: tasarımı, kapasitesi ve boyutu deney düzeneğinin en önemli bölümlerindendir. Kurutucu kabini 600 mm x 600× 330 mm kolon şeklinde endüstriyel kurutucu standartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Kurutucu kabinin yan profilleri delikli 2 mm metal levhadan yapılmıştır. Kurutucu kabine yan kısımlardan istenilen şartlarda hava sağlanmaktadır. Kurutucu kabinin altında ürün boşaltma kanalı bulunmaktadır. Kurutucu kabinin sıcaklığı ve nemini ölçen sıcaklık ve nem sensörleri bulunmaktadır. PLC kontrol ünitesinden kurutucu kabinin içindeki havanın sıcaklık ve nem değerleri okunabilmektedir. Kurutma kabini 90 kg mısır kapasitesine sahiptir. Ürün 33 cm genişliğindeki kurutucunun üst kısmından kurutma kabinine yerleştirilmiştir. Ürün sıcaklığı, kurutucu yüzey sıcaklığı ve dış havanın sıcaklığı sıcaklık ölçer (infrared termometre) ile yapıldı. Pt100 sıcaklık sensörleri bir kurutucu kabin girişinden 10, 15 ve 25 cm mesafelere yerleştirilmiştir. Kurutucu 90 ile 110 °C arasındaki sıcaklıklarda çalıştırılmıştır.

Kontrol paneli: Fan hızı, kurutucunun giriş ve çıkışındaki nem ve sıcaklık ölçümleri, hava hızı ölçümleri yapılarak bilgi kontrol paneline gönderilmiştir. Verileri kontrol panelinde operatör paneline kaydedildi ve ayrıca bir internet bağlantısı kullanılarak bilgisayarda saklandı. Ortam sıcaklığı ve nem değerleri de kaydedildi. Sistemin blok diyagramı şekil 4.3.'de verilmiştir.



Şekil 4.3: Sistemin blok diyagramı

Dielektrik nemölçer: Silosense marka kapasitif tahıl nemölçer kullanılmıştır. Tarımsal ürünlerin dielektrik özellikleri tahıl cinsi, nem, frekans, sıcaklık ve nemölçerler gibi değişkenlere bağlıdır. Kurutma deneyleri sırasında, voltaj seviyesi 3,3 V'a ayarlanarak ölçümler alınmıştır. Silosense marka kapasitif nem sensörü Şekil 4.4'de gösterilmektedir.

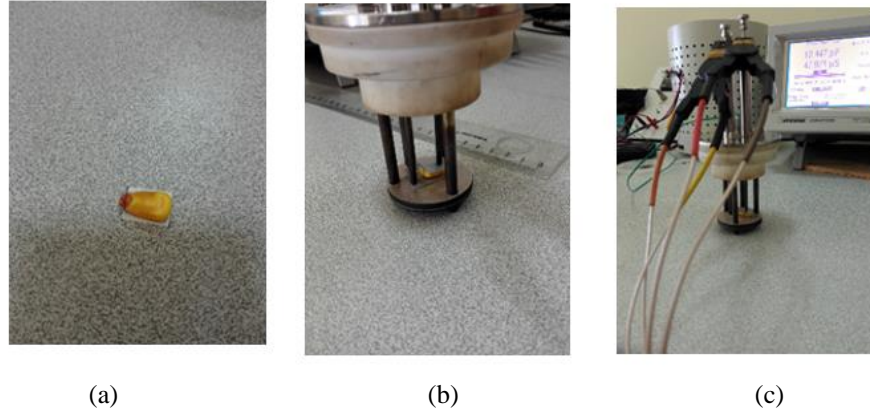


Şekil 4.4: Dielektrik nemölçer

4.3. Dielektrik Nem Ölçümü

Anlık olarak nem ölçümlerinin yapılabilmesi için dielektrik nemölçer kurutma kabine (Şekil 4.4) monte edilmiştir. Ölçümlerin doğruluğunu belirleyebilmek için Sakarya Üniversitesi Fizik Laboratuvarı'nda ölçümler yapıldı.

İlk olarak elektriksel özelliklerin belirlenmesi için mısır örnekleri hazırlandı. Farklı nem içeriğine sahip numuneler elde etmek için mısır numuneleri laboratuvar fırınında 105 °C'de farklı zamanlarda kurutulmuştur. Daha sonra Sartorius nem tayin cihazı ile nem değerleri ölçüldü. Mısır numuneleri plastik kaplarda saklandı. Daha sonra Şekil 4.5'de gösterilen mısırın dielektrik ölçümleri Instek LCR-8110G marka cihaz ile yapılmıştır. Mısır numunesi, iki plaka sensörü arasındaki orta boşluğa yerleştirildi. LCR ölçer Şekil 4.5.b ve c' de gösterilmiştir. Bu cihaz, % 0,1 temel doğruluğa sahip bir cihazdır ve 20Hz~10/5/1MHz arasında geniş test frekansında çalışabilir.



Şekil 4.5: a.b.c. Dielektrik nem ölçer laboratuvar ölçümü

Tablo 4.2.'de dielektrik ölçümlerinde kullanılan mısır tanesinin nem içeriği değerleri ve boyutları sunulmaktadır.

Tablo 4.2: Tane mısırın özellikleri

Ürün tipi	ilk nem % (y.b.)	Uzunluk (mm) (Ortalama)	Genişlik (mm) (Ortalama)	Kalınlık (mm) (Ortalama)
Mısır	20,9	3,6	9,0	5,5
	18,1	3,7	9,4	5,9
(Zea mays indentata Sturt.)	14,3	4,6	9,4	6,0
	11,0	4,7	10,0	6,3
	8,8	3,3	8,5	5,3

Ürünün elektriksel özellikleri, içerdikleri nem miktarlarıyla hesaplanabilmektedir. Elektriksel özelliklerin bir veya birkaçından yararlanarak, ürünün nem içeriği bulunabilir. Dielektrik nemölçerler kondüktans veya kapasitans esasına göre çalışmaktadır. Kondüktans esaslı nemölçerler, nemi ölçecek tanelerin, bir güç kaynağı ve galvanometreye seri olarak bağlı iki elektrotun arasına sıkıştırılır. Nem oranı değerlerinin yazılı olduğu göstergeden, tanelerin nemi doğrudan okunur. Okunan nem değerlerinin doğruluğu tane içindeki nem dağılımındaki homojenliğine bağlıdır.

Kapasitans tip nemölçerlerde nem dağılımı tekdüze olmayan, farklı nemdeki tanelerin nemini ölçmede daha başarılı sonuçlar alınmaktadır. Dielektrik nemölçer ile mısırın kapasitans değeri ölçülmüştür. Bir kapasitör; birbirine paralel, silindirik ya da küresel iki iletken plaka arasında izolatörden meydana gelmektedir. İki iletken aynı büyüklükte fakat zıt işaretli yük şeklindedir. Bu sistem kapasitör olarak adlandırılır. Plakalar arasına konan mısır kapasitör görevi yapmaktadır. Mısırın kapasitans değerinin ölçülmesiyle ürünün dielektrik özellikleri incelenmiştir.

Tane mısırın dielektrik sabitinin frekansla değişimi Tablo 4.3 'de verilmiştir.

Tablo 4.3: Mısır dielektrik sabitinin frekansla değişimi

Çalışmamız (1 MHz)		Sacılık ve Colak 2010 (1 MHz)		Nelson, 1991 (1 MHz)	
%M _{y,b}	ε'	%M _{y,b}	ε'	%M _{y,b}	ε'
20,96	9,7	21,51	9,5	20,3	7,1
18,11	5,7	18,53	5,5	16,9	5,9
14,31	4,6	15,57	4,2	14,9	5,0
11,01	4,2	12,56	3,9	13,4	4,9
8,8	3,9	9,71	3,8	11,2	4,1
				8,1	3,9

4.4. Ölçüm Cihazlarında Belirsizlik Analizi

Kurutma deneylerinde, mısırın nem içeriğini belirlemek için test düzeneğine dielektrik nemölçer ($\pm 0,5$) yerleştirilmiştir. Ayrıca mısır numunelerinde nem ölçümleri için $\pm 0,05$ hatalı Sartorius MA30 nem tayin cihazı kullanılmıştır. Sıcaklık değişimleri için $\pm 0,5$ °C ve $\pm 0,5$ °C hassasiyete sahip sıcaklık sensörleri kullanıldı. Kurutma kabini girişinde kurutucu hava hızı ölçümleri Testo 416 cihazı $\pm (0,2 \text{ m/s} + \%1,5)$ ile yapılmıştır. Kurutma odası boyunca basınç düşüşleri bir elektronik basınç hücresi (Testo 505-P1, 1 mm H₂O çözünürlüğü) ile ölçüldü. Kurutucu havasının giriş ve çıkış nemi, nem ölçüm

cihazı (Testo 605-H1,5–95% RH ve% 0.1 RH çözünürlüğü) kullanılarak ölçüldü. Olası deneysel hataları önlemek için her deney üç kez tekrarlandı. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar kadar önemli bir nokta ölçülen değerlerin doğruluğudur. Hatalar farklı şekillerde ortaya çıkabilir ve genellikle sistematik ve rastgele olarak kategorize edilir (Reichert ve diğ, 2019). Deneylerdeki hatalar ve belirsizlikler cihaz seçimi ve kalibrasyonu, ortam, gözlem, okuma ve test planlamasından kaynaklanabilir (Akpınar ve diğ, 2003). Kurutma sürecindeki belirsizlikler, ölçüm ekipmanındaki doğruluk eksikliği, ölçümdeki rastgele değişimler ve veri azaltmadaki tahminler gibi nedenlerden kaynaklanabilir (Çelik ve diğ, 2021). Bu hatalar dikkate alınarak bir ölçümdeki toplam hata hesaplanabilir. Farklı bağımsız değişkenlerden dolayı ortaya çıkan W_R belirsizliği aşağıdaki denklem (Holman, 1972) ile değerlendirilebilir;

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial_R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial_R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial_R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

Burada R , x_1, x_2, \dots, x_n 'nin bağımsız değişkenlerinin bir fonksiyonu ve W_1, W_2, \dots, W_n bağımsız değişkenlerin belirsizlikleridir. Sonuçlar Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4: Kullanılan cihazların ölçümüne ait toplam belirsizlikler

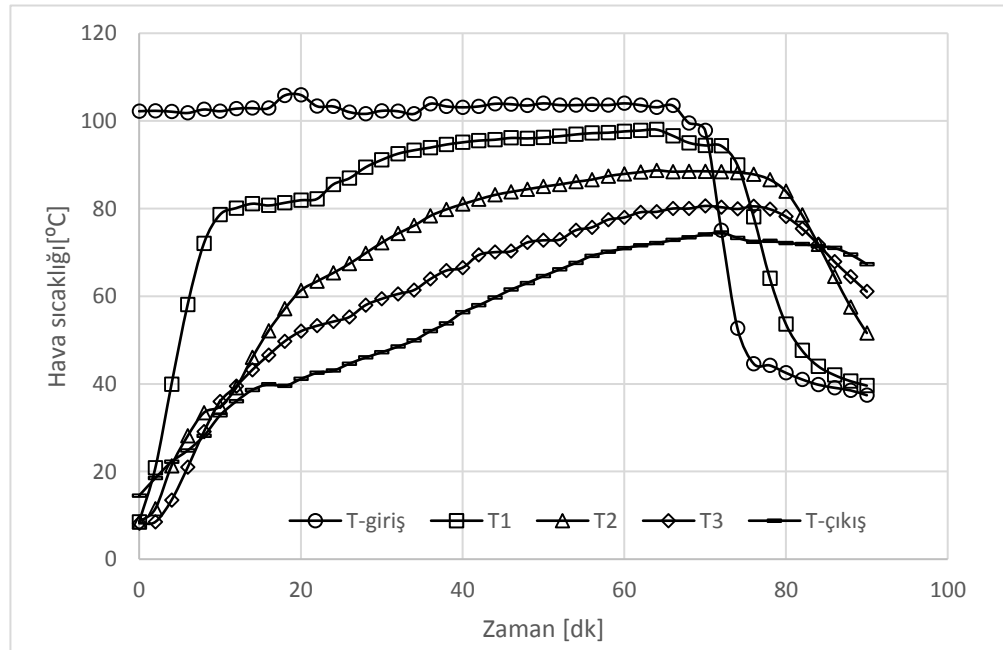
Parametreler	Birim	Toplam hata
Sıcaklık	°C	±0,560
Zaman	min	±0,1
Kütle	gr	±0,51
Hava hızı	m/s	±0,22
Basınç düşümü	Pa	±0,3
Bağıl nem	RH	±0,1
Nem içeriği	gr	±0,05
Diğer hatalar ($W_p=W_{cp}$)	%	±0,1-0,2

BÖLÜM 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Laboratuvar ölçekli dielektrik nem ölçme yöntemine dayanarak yapılan mısır kurutma deney sonuçları bu bölümde verilmiştir.

5.1. Kurutma Davranışı

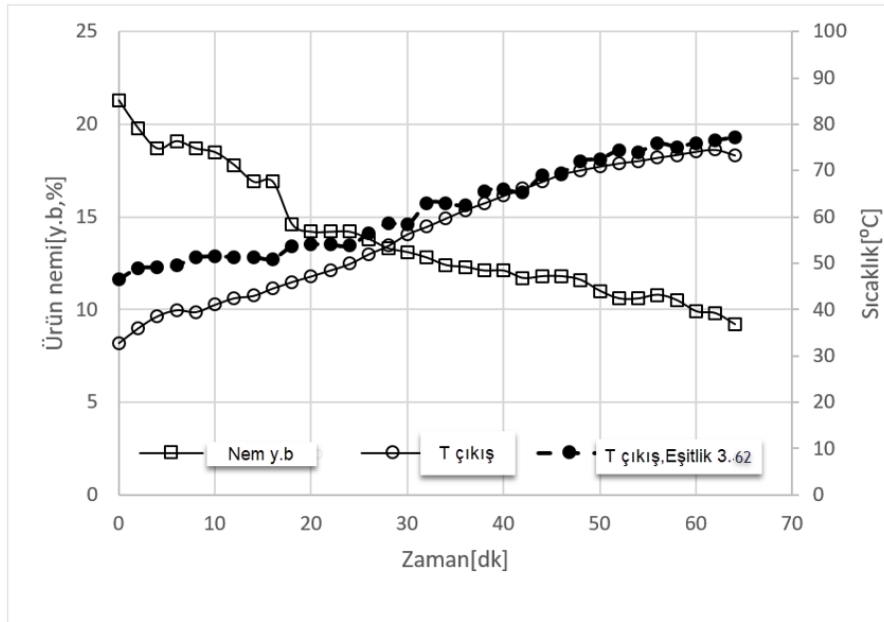
Kurutma süresi, kurutma havası sıcaklığı eğrileri, kurutucu kabini giriş sıcaklığı, kurutucu kabini çıkış sıcaklığı, kurutucu kabinin iç sıcaklığı ve uzaklaştırılan nem değişim eğrileri üzerinde deneyler yapılmıştır. Kurutma kabininin sıcaklık dağılımı 5 farklı yere yerleştirilen sıcaklık sensörleri ile ölçülmüştür. Deneyler sırasında, kurutma havası sıcaklığı kontrol panosundan 103 °C'ye ayarlanmıştır. Kurutma havası sıcaklığı ± 1 °C hassasiyetle sağlandı. 103 °C'lik set sıcaklığında üç farklı deney yapıldı. Şekil 5.1'de, kurutma haznesinin giriş - çıkış sıcaklığını ve kurutma haznesinin iç kısmındaki sıcaklığın zaman içindeki değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Sıcaklık değişiminin zamana bağlı değişimi

Şekil 5.1'te, giriş sıcaklığı 103 °C'de sabit tutuldu. Yüksek sıcaklık nedeniyle havanın nem tutma kapasitesi artmıştır. Daha düşük bağıl nem, daha hızlı kuruma ile sonuçlanmıştır. 70 dakika sonra, soğutmanın başladığı görülmüştür. Kurutucuda kuruyan ürünün buharlaşması nedeniyle sıcaklığın çıkışa doğru düştüğü de gözlemlendi. Kabindeki sıcaklık değerleri ilk 30 dakika içinde düştüğü, 30 dakika sonra zamanla artmaya başladığı görülmüştür. Guofeng ve diğ. (1999) mısır ve çeltikte farklı kurutma koşulları altında nem ve sıcaklık değişimlerini incelemiştir. Kurutucu kabini katmanlara ayrılmıştır. Kurutucu havası ürün içerisinden geçerken kurutma havasının sıcaklığının düştüğünü bildirmiştir. Çıkış sıcaklığındaki azalma ürün neminin düştüğünü göstermektedir.

Mısırın yaş baz nem içeriği ve çıkıştaki hava sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 5.2 'te gösterilmiştir.

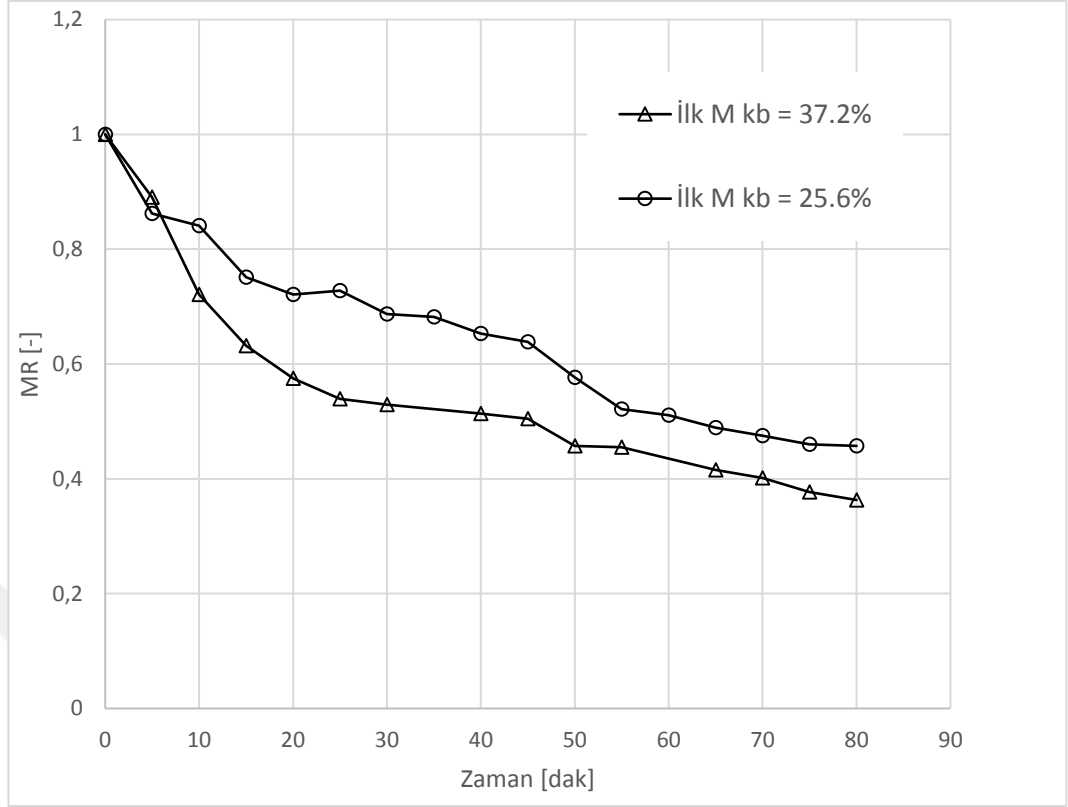


Şekil 5.2: Ürün neminin ve sıcaklığın zamana bağlı değişimi

Kurutma işlemi sırasında buharlaşma hızı değiştikçe, havanın çıkış sıcaklığı Şekil 5.2'te gösterildiği gibi zamanla artmıştır. Çıkış sıcaklığı ilk başta 14,5 °C iken kurutma sonunda 74,1 °C'ye ulaşmıştır. Diğer taraftan yüksek buharlaşma oranı ile numunelerin nem içeriğinin ilk aşamalarda %25,2'den %12,9'a düştüğü görülmüştür. Jokiniemi ve Ahokas (2014) tarafından da benzer sonuçlar bildirilmiştir. Kurutmanın ilk aşamalarda çıkış

havası sıcaklıklarının daha düşük olduğunu, daha fazla nem içerdiğini göstermektedir. Ayrıca, ürün nemi azalırken çıkış sıcaklığının kademeli olarak arttığı da gözlemlenmiştir. Ek olarak, tahmin edilen çıkış havası sıcaklıkları Eşitlik 3.62 ile hesaplanmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Kurutma işleminin başlarında, teorik veriler deneysel verilerden yaklaşık %25 daha yüksek bulunmuştur. 30 dakika sonra teorik veriler deneysel değerlere yaklaşmış ve maksimum hata %7 olarak hesaplanmıştır. Deneysel ve teorik veriler arasındaki farklar, Eşitlik 4.1'de elde edilirken yapılan varsayımlardan kaynaklanmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, kurutma işleminin ilk aşamalarında buharlaşma oranı yüksektir ve ısı transfer katsayısı sabit değildir. Ayrıca ürün sıcaklığı ve nem içeriği, hava sıcaklığını değiştirmektedir. Bu nedenle teorik ve deneysel verilerin birebir örtüşmesi beklenmemelidir. Elde edilen sonuçlar kurutma işleminin ne kadar karmaşık olduğunu bir kez daha göstermektedir.

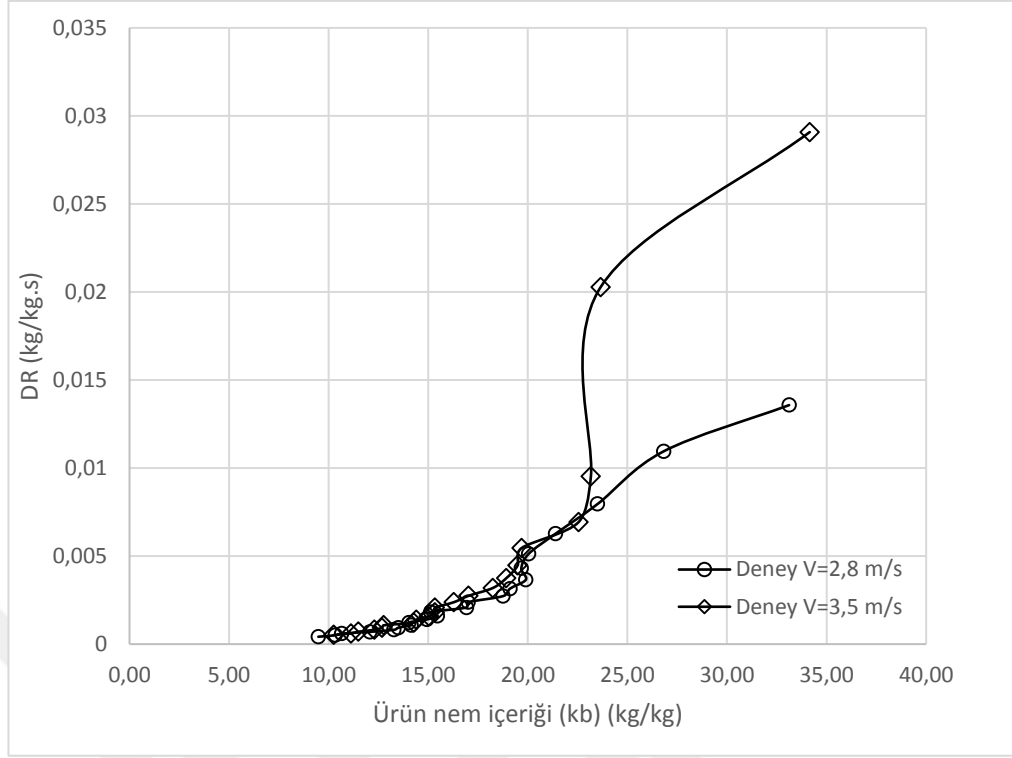
İlk nem içeriğinin mısırın kuruma davranışı üzerindeki etkisi Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Her iki deney koşulunun nem oranları da benzer bir azalma davranışı göstermiştir. Kurutma işleminin başlangıcında üründeki serbest nem nedeniyle nem oranı değerleri yakındı. Kurutmanın sonraki aşamalarında nem oranları zamanla azaldı ve farklılaştı. Nem oranı yüksek olan üründe ilk 50 dakikaya kadar buharlaşma daha hızlıydı. Kurutma işleminin 55. dakikasından sonra kurutma hızları önemli ölçüde azaldı. Ayrıca üründe kuruma oranının daha yüksek olduğu, yüksek başlangıç nemine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.3: Nem oranının zamana bağlı değişimi

Kurutma havası hızının kuru baz nem içeriği ile değişimi Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Mısır taneleri 2,8 ve 3,5 m/s iki farklı kurutma hava hızlarında kurutulmuştur. Kurutma işleminin başlarında, giriş kurutma havası hızının 3,5 m/s olduğu, düşük kurutma havası hızındaki deneylere göre yaklaşık iki kat daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Nem içeriğinin yaklaşık % 23'ünden sonra kuruma hızlarının birbiriyle örtüştüğü görülmüştür. Kurutma havası hızı, kurutmanın ilk aşamalarında etkili olmuş ve kuruma oranlarının artmasına neden olmuştur. Nem içeriği %23'ün altına düştüğünde hava hızının artık etkili olmadığı da belirlendi. Mondal ve diğ. (2020) 3 ve 6 m/s 'lik iki kurutma hava hızında mısır kurutma testleri gerçekleştirdi. Kurutma deneylerinde düşük kurutma hava hızında (3 m/s) kuruma hızının daha düşük olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlardaki bulgularımız (Mondal ve diğ. 2020) sonuçlarına benzerdir.



Şekil 5.4: Nem içeriği (kb) ile kurutma hızı değişimi

5.2. Kütle Geçişi Sonuçlar

Çeşitli kurutma hava hızlarında mısır difüzyon katsayısı değerleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1: İki farklı kurutma hava hızında mısırın difüzyon katsayısı

Hava sıcaklığı (°C)	Hava hızı (m/s)	Mısır nem içeriği (k.b)	Difüzyon katsayısı (m ² /s)	Difüzyon katsayısı (m ² /s) (Sahari ve diğ., 2018)
103	2,8	14,55	5,658E-8	6,20E-9 için 70 °C
103	3,5	14,16	1,023E-7	

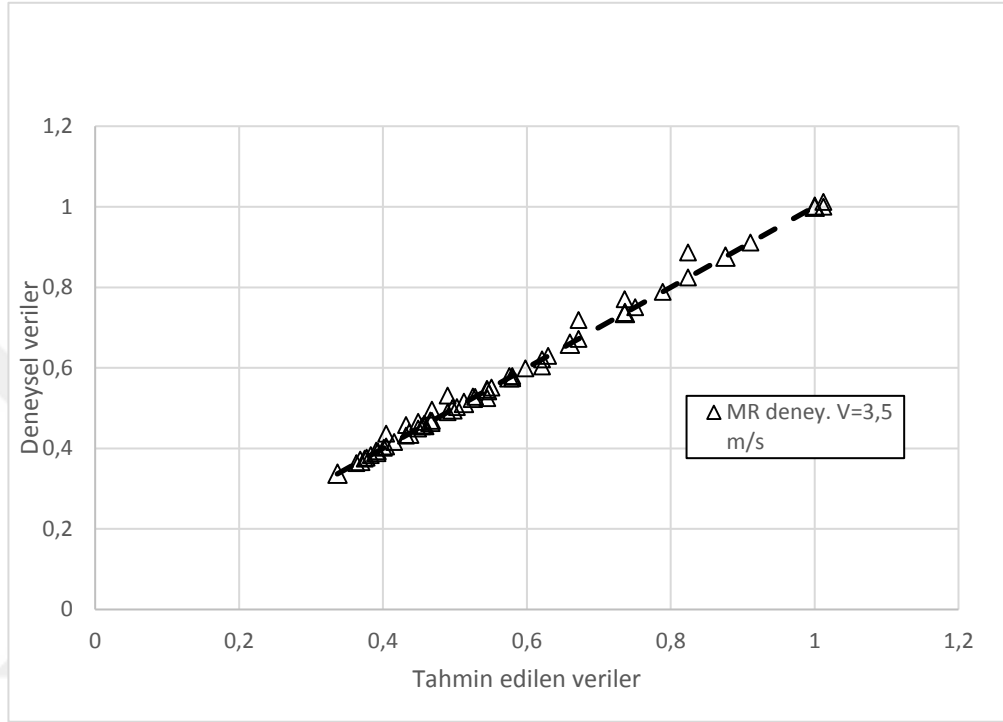
Difüzyon katsayısı, Tablo 5.1'de belirtildiği gibi 2,8 m/s ve 3,5 m/s hava hızında mısır için 5,658E-8 m²/s ila 1,023E-7 m²/s olarak belirlenmiştir. Kurutma hava hızı arttıkça difüzyon katsayıları artmıştır. Correa ve diğ., (2011) mısır başaklarının efektif difüzyon katsayılarının 45, 55, 65 °C kurutma sıcaklıklarında sırasıyla 5,490×10⁻¹⁰, 7,597×10⁻¹⁰ ve 1,163×10⁻⁹ olduğunu bildirmiştir. Sahari ve diğ., 2018; mısırın iki farklı sıcaklıkta ve sabit hava hızında kurutma kinetiğini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, mısırın etkili nem katsayılarının (m²/s) sırasıyla 60 °C'de 3,58×10⁻⁹ ve 70 °C'de 6,20×10⁻⁹ olduğunu ifade etmiştir.

Nem oranı (MR) değerleri, literatürde kullanılan matematiksel modeller yardımıyla modellenmiştir. Modelleme sonuçları ve ilgili katsayılar, R^2 , RMSE ve SSE değerleri Tablo 5.2.'te gösterilmiştir. İstatistiksel sonuçlar Midilli modelinin daha yüksek R^2 değeri ve daha küçük RMSE ve SSE değerleri verdiğini göstermiştir. İki hava hızında gerçekleştirilen tüm kurutma deneyleri için Midilli modelinin R^2 , RMSE ve SSE değerleri sırasıyla 0,9929 ile 0,9971, 0,0079 ve 0,01454, 0,00102 ve 0,00338 arasında değişmiştir. Midilli modelinde k sabiti, hava hızı azaldıkça ve n sabiti arttıkça azalmıştır. Ayrıca, modeldeki a katsayısı her iki deneysel koşul için yaklaşık olarak 1'e eşittir. Literatürü göz önünde bulundurarak, Jafari ve diğ. (2017) kuruyan çeltik tanelerini tahmin etmek için beş matematiksel model kullanmıştır. Wang ve Page modelleri, 6 mm'lik kurutma katmanı için en uygun modeller olduğunu ve Lewis, 12 mm ve 18 mm'lik katman için uygun olduğunu ifade etmiştir. Jafari ve diğ. (2017) tarafından elde edilen sonuçların bizim bulgularımızla eşleşmediğini gözlemledik.

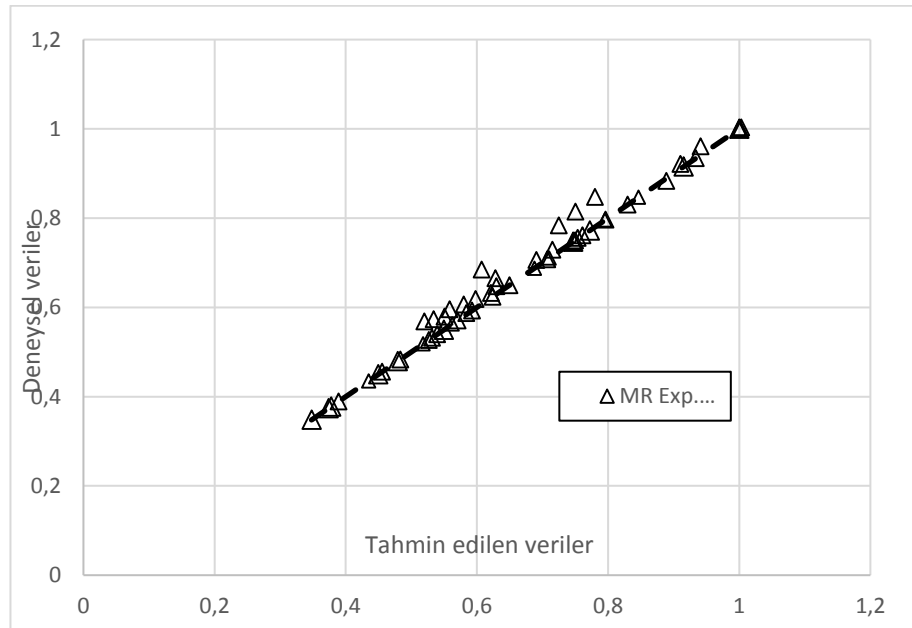
Tablo 5.2: Model sonuçları

Model	Deneysel Hava Hızı (m/s)	R^2	RMSE	SSE	Katsayılar (95% güven sınırı)
Lewis	V=2,8 m/s	0,9608	0,02679	0,01364	k = 0,006878 (0,006511, 0,007244)
	V=3,5 m/s	0,8404	0,06322	0,07593	k = 0,01125 (0,0101, 0,01241)
Page	V=2,8 m/s	0,9895	0,01423	0,00364	k = 0,0167 (0,01247, 0,02094) n = 0,7854 (0,7238, 0,847)
	V=3,5 m/s	0,9928	0,01376	0,00340	k = 0,05864 (0,04971, 0,06757) n = 0,5926 (0,5545, 0,6306)
Henderson and Pabis	V=2,8 m/s	0,9735	0,02261	0,00920	a = 0,967 (0,9437, 0,9902) k = 0,006287 (0,00577, 0,006804)
	V=3,5 m/s	0,9383	0,04037	0,02934	a = 0,8854 (0,8419, 0,9288) k = 0,008895 (0,007748, 0,01004)
Midilli	V=2,8 m/s	0,9971	0,007993	0,00102	a = 1,001 (0,9853, 1,016) b = 0,002857 (0,002101, 0,003613) k = 0,01043 (0,007261, 0,01361) n = 1,042 (0,9427, 1,141)
	V=3,5 m/s	0,9929	0,01454	0,00338	a = 1,003 (0,9723, 1,033) b = 0,0001225 (-0,001134, 0,001379) k = 0,05833 (0,03424, 0,08242) n = 0,6006 (0,4569, 0,7442)
Logaritmik	V=2,8 m/s	0,9965	0,008422	0,00120	a = 0,5327 (0,503, 0,5624) b = 0,4747 (0,4403, 0,5091) k = 0,01842 (0,01588, 0,02096)
	V=3,5 m/s	0,9817	0,02261	0,00869	a = 0,5577 (0,5151, 0,6002) b = 0,4022 (0,3585, 0,446) k = 0,02843 (0,02197, 0,0349)
Wang and Singh	V=2,8 m/s	0,9968	0,007919	0,00112	a = -0,008387 (-0,008655, -0,008119) b = 4,144e-05 (3,789e-05, 4,5e-05)
	V=3,5 m/s	0,9291	0,04329	0,03373	a = -0,0137 (-0,01517, -0,01223) b = 8,476e-05 (6,533e-05, 0,0001042)

Midilli modeli ile elde edilen nem oranının deneysel ve tahmin edilen verileri Şekil 5.5 ve 5.6.'da verilmiştir. Midilli modelinden elde edilen teorik veriler ve deneysel veriler birbiriyle örtüşmüştür. Bu sonuçlar ile modelin mısırın kurutma sürecini açıklamak için uygun olduğunu göstermiştir.



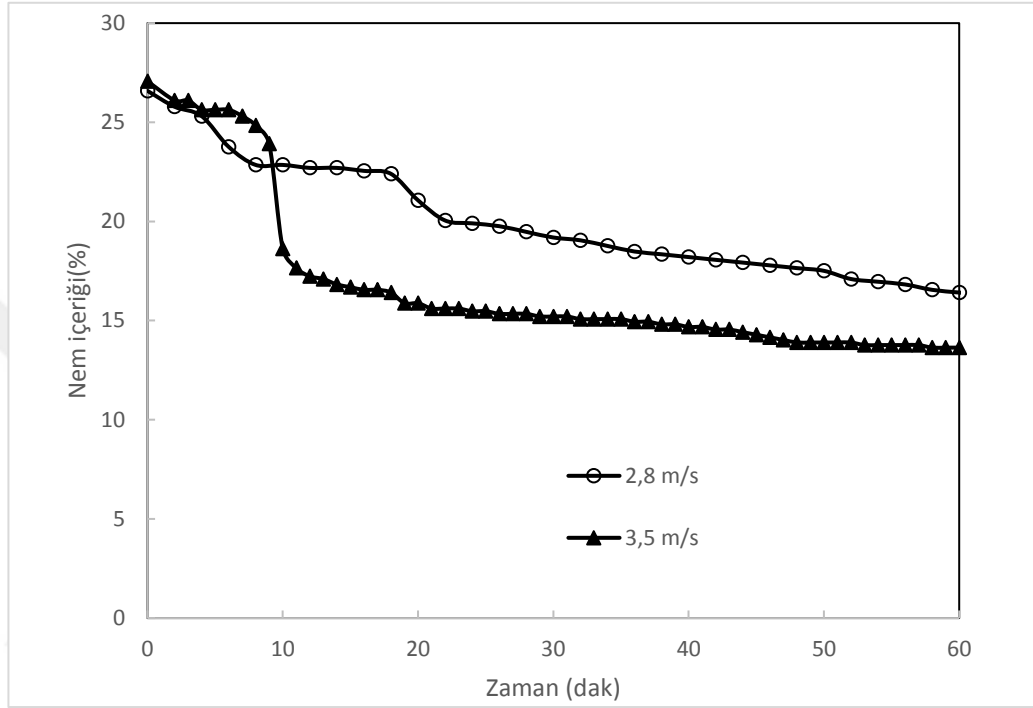
Şekil 5.5: Midilli modelinin deneysel ve tahmin edilen verileri (3,5 m/s kurutma hava hızı)



Şekil 5.6: Midilli modelin deneysel ve tahmin edilen verileri (2,8 m/s kurutma hava hızı)

5.3. Enerji Analizi Sonuçları

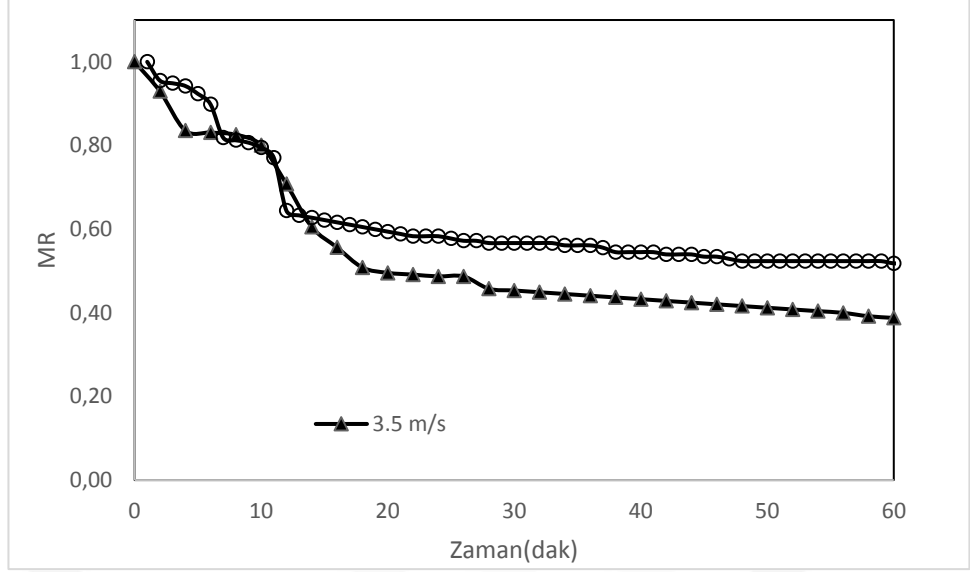
Kurutma deneyleri değişen kurutma hava hızı ile yapılmıştır. Kurutma havası sıcaklığı 103 °C'de ve kurutma hava hızları 2,8 m/s ve 3,5 m/s 'de yapılmıştır. Kuru baz nem içeriğinin kuruma süresine bağlı değişimi Şekil 5.7'te verilmiştir.



Şekil 5.7: Kurutma havası hızına göre mısır nem içeriğinin değişimi

Kurutma işleminin ilk aşamasında ürünün nem içeriğinin hızla düştüğü görülmüştür. Her iki deneyde de kullanılan numunelerin ilk kuru baz nem içeriği yaklaşık %27'dir. Kuruma hızı ilk 10 dakikadan sonra yavaşlamıştır. Mısır nem içeriği, 3,5 m/s hava hızında %27,06 kuru bazdan %13,64 kuru baza kurutulmuştur. Ayrıca, 2,8 m/s hava hızında %27,0 kuru bazdan %16,41 kuru baza kurutuldu. Literatürde çeltik (Ahern, 1980), tahıl (Prommas ve diğ., 2010) ve mısırdaki (Guofeng ve diğ., 1999) benzer sonuçlar elde etmiştir.

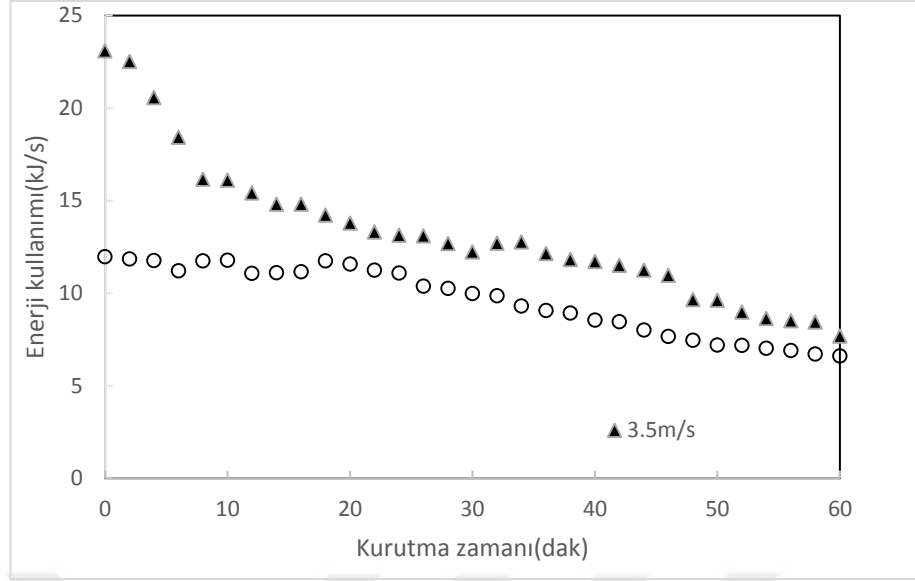
Şekil 5.8'de 103°C hava sıcaklığı için kurutma işlemi sırasında mısırın kuruma eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 5.8: Farklı kurutma hava hızlarında mısırı kuruma eğrileri ($T_g=103^\circ \text{ C}$)

Her iki deneysel koşulda kurutma hava hızında benzer bir azalma davranışı göstermiştir. Kurutma işleminin başında ürünlerdeki serbest nem nedeniyle nem oranı değerleri yakındı. Hava hızı yüksek olan üründe ilk 15 dakikaya kadar buharlaşma daha hızlıydı. Kurutma işleminin 20. dakikasından sonra kurutma hızları önemli ölçüde azaldı. Yüksek hızlı kuruma döneminde nem oranı daha hızlıydı. Deneysel veriler, kurutma hava hızının kurutma oranını etkileyen önemli bir rol oynadığı diğer araştırmacılar tarafından bildirilen bulgularla tutarlıydı. Korkmaz (2007) mısırın kuruma davranışını incelemiştir. Zamanında ilk kuruma başladığında, kuruma hızının yüksek olduğunu ve zaman ilerledikçe kuruma hızının düştüğünü gördüler. Cil ve Topuz (2009) kurutma işleminin düşen oran döneminde gerçekleştiğini bildirmiştir.

Mısır kurutucuda nemin buharlaştırılması için kullanılan enerji miktarı eşitlik 3.38 ile hesaplanmıştır. Kurutma kabini içinde kullanılan enerji miktarının farklı hava hızlarında enerji kullanımı grafiği kurutma süresince değişimi Şekil 5.9'da verilmiştir.



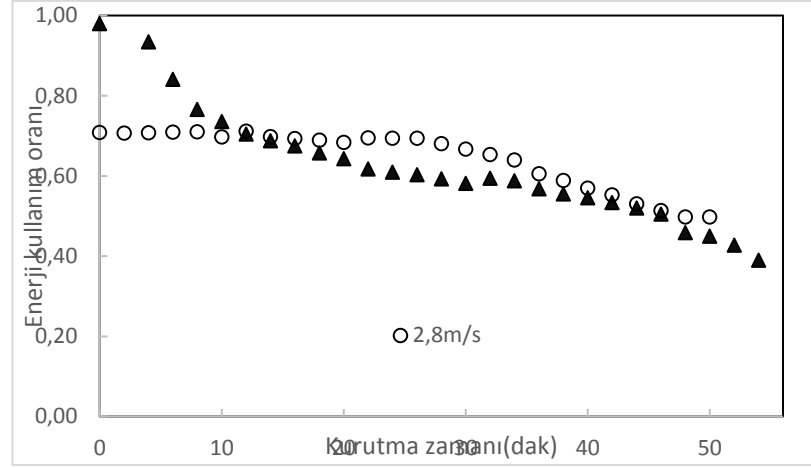
Şekil 5.9: Kurutma süresinin farklı kurutma hava hızlarında enerji kullanım değerleri

Şekil 5.9 da gösterildiği gibi numunelerin yüksek nem oranından dolayı kurutma işleminin başlangıcında EK (Enerji kullanımı) değerleri yüksekti. Daha sonra, kurutma sonuna doğru numunelerin düşük nem içeriği nedeniyle bu değerler hızla azaldı.

Yüksek su içeriği nedeniyle kurutmanın başlangıcında yüksek enerji kullanımı gerçekleşmiştir. Mısır tanesinin 3,5 m/s kurutma hava hızında EK değerleri kurutmanın ilk aşamasında daha yüksekti. 3,5 m/s kurutma hava hızında enerji kullanımı yaklaşık 23 kJ/s 'den 8 kJ/s 'e düşmüştür. Ancak 2,8 m/s kurutma hava hızında enerji kullanımı yaklaşık 11 kJ/s 'den 6 kJ/s 'e düşmüştür. 3,5 m/s kurutma hava hızındaki mısır örneklerinin 2,8 m/s hava hızından daha fazla enerji tükettiği çıkarılmıştır.

Enerji tüketimi, havanın kütle akış hızına bağlıdır. Hava hızı arttıkça, hava kütle akış hızı artmıştır. Yüksek hava hızı, enerji kullanım oranında bir azalmaya neden olacaktır. Ayrıca ürünün neminin hızla buharlaşmasına neden olmuştur. Önceki araştırmacılar tarafından da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Akpınar ve diğ, 2005; Azadbakht ve diğ, 2017; Corzo ve diğ, 2008).

Enerji kullanım oranı Eş. 3.39 ile hesaplanmıştır. Şekil 5.10 farklı kurutma hava hızlarında kurutma süresinin enerji kullanım oranını göstermektedir.



Şekil 5.10: Kuruma süresinin farklı hava hızlarında enerji kullanım oranı

3,5 m/s kurutma hava hızı için, EKO % 39 ile %98 arasında değişmektedir. Şekilde ayrıca 3,5 m/s kurutma hava hızının EKO (Enerji kullanım oranı) 'sunun 2,8 m/s kurutma hava hızından daha yüksek olduğunu da göstermektedir. Kurutmanın son aşamasında enerji verimliliğinin daha düşük olduğu da gözlemlenmiştir. Çeltik kurutulmasında da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Sarker ve diğ, 2015).

Tablo 5.3 farklı hava hızlarında mısırın nem içeriğini ve zaman içinde tüketilen spesifik enerjiyi (SEC) göstermektedir.

Tablo 5.3: Farklı hava hızlarında nem içeriğinin zaman bağlı Özgül enerji tüketimi (ÖET) değerleri

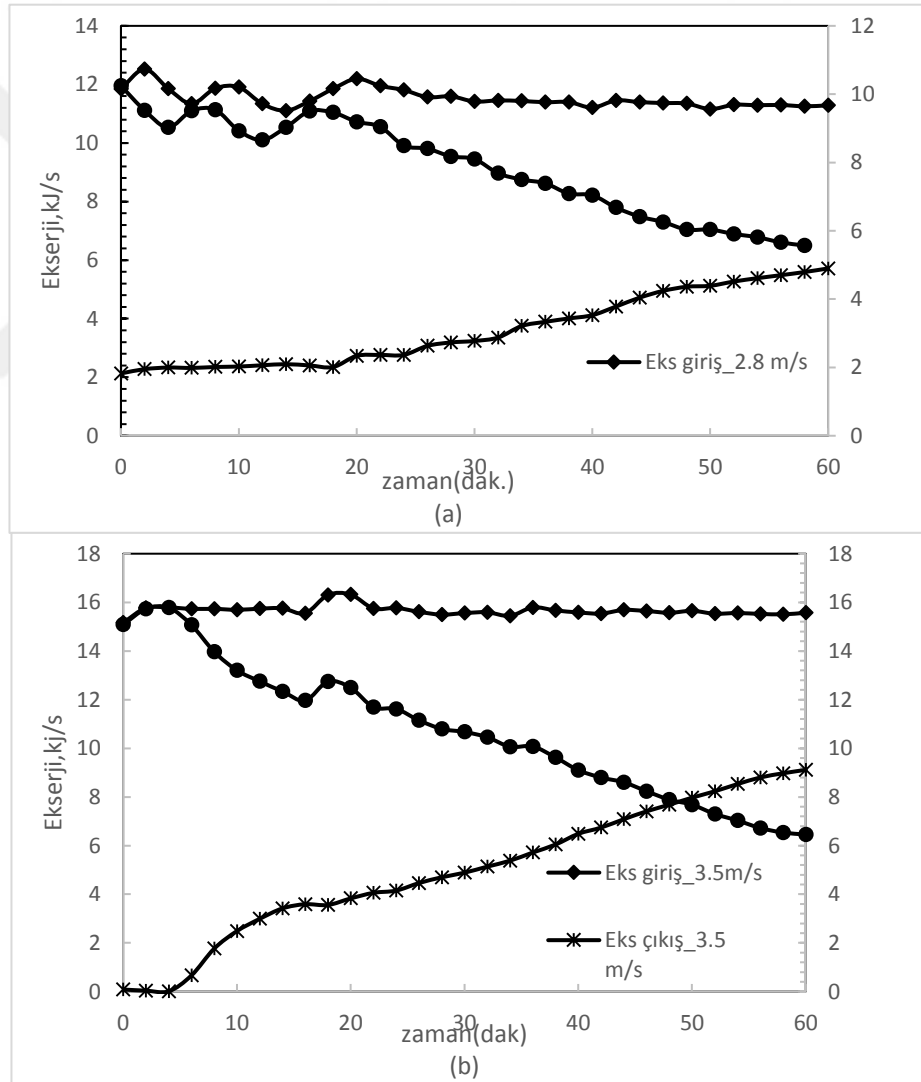
Hava hızı	Zaman (dak.)	% X_{kb}	ÖET(kWhkg ⁻¹)	Hava hızı	% X_{kb}	ÖET(kWhkg ⁻¹)
2 m/ s	10	22,85	0,60	3,5 m/ s	22,70	1,37
	20	21,07	0,35		19,62	0,33
	30	19,19	0,30		16,69	0,29
	40	18,20	0,27		15,87	0,26
	50	17,51	0,24		14,94	0,24
	60	16,41	0,22		14,29	0,22
	70	15,61	0,20		13,38	0,18
	80	13,90	0,16		13,10	0,14

İlk on dakikadaki özgül enerji tüketimi 2,8 m/s hava hızı için 0,6 kWh kg ve 3,5 m/s hava hızı için 1,37 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Tablo 5.3'den de görüldüğü gibi, ÖET değerleri ürünün nemine, zamanına ve hava hızına göre farklılık göstermektedir. Tahıldan 1 kg suyu buharlaştırmak için 2,3 MJ enerjiye ihtiyaç vardır. Ancak kurutma işleminde tüketilen enerji bu hava hızının iki katından fazla olabilir, 13,85 kWh yakıt enerjisi hesaplanmıştır. LPG kalorifik değeri 49,85 MJ/ kg'dir. 3,5 m/s kurutuma hava hızında en yüksek özgül enerjiye sahip olduğu bulunmuştur. 2,8 m/s kurutma hava hızı için özgül

enerji tüketimi 0,60–0,16 kWh/kg, 3,5 m/s hava hızı için 1,37 ila 0,14 kWh/kg aralığındadır. Bu değerlerin farklı nemlerde elde edilmiştir. Mısır neminin ve hava hızının ÖET değerlerini etkilediği görüldü. Bazı araştırmacılar tarafından da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Fudholi ve diğ, 2014; Jafari ve diğ, 2017).

5.4. Ekserji Analizi Sonuçları

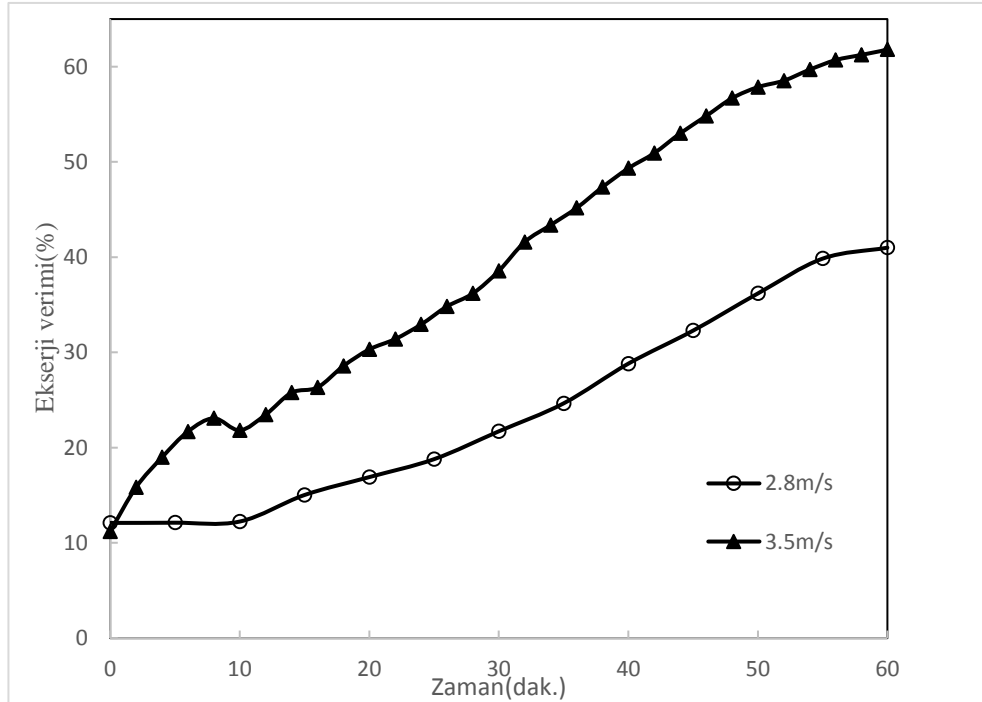
Ekserji analizi, çeşitli uygulamalarda enerji verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır. Şekil 5.11.a ve b kurutma havasının hızının (2,8 m/s ve 3,5 m/s) ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekserji kaybı üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 5.11: Kurutma hava hızının etkisi (a ve b 2,8 ve 3,5 m/s kurutma hava hızları sırasıyla) ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekserji kaybı

2,8 m/s kurutma havasının hızı için, kurutma odasından ekserji çıkışı, kuruma süresi ile birlikte yavaşça artmıştır. Sonuçlardan kurutma havasının hızı arttıkça ekserji çıktısının arttığı, ekserji girişinin sabit kaldığı ve ekserji kaybının azaldığı görülmüştür. 3,5 m/s kurutma havası hızındaki ekserji akışı değerleri 2,8 m/s kurutma hava hızına göre daha karardır. Şekil 5.11.a, b'de görülebileceği gibi, kurutma işleminin başlangıcından itibaren, her iki deney için ekserji kaybı azalma eğilimindedir. Ekserji kaybını etkileyen faktörlerden biri kurutma havası hızı, diğeri mısırdaki nem miktarıdır. Özellikle bu iki deneyin başında ekserji kaybının yüksek olduğu görülmüştür.

Ekserji kayıpları 3,5 m/s kurutma havası hızında daha düşük değerlere ulaşmıştır. 3,5 m/s kurutma hava hızında maksimum ve minimum ekserji kaybı değerleri sırasıyla 15,08 kJ/s ve 6,46 kJ /s olarak hesaplanmıştır. 2,8 m/s kurutma havası hızı için maksimum ve minimum ekserji kaybı değerleri sırasıyla 10,24 kJ/s ve 5,57 kJ/s olarak hesaplanmıştır. Maksimum ekserji kaybı değeri olan 15,08 kJ/s, 3,5 m/s kurutma havası hızında elde edilmiştir. Minimum ekserji kaybı değeri 5,57 kJ/s iken hava hızı 2,8 m /s'dir. Bu aynı zamanda enerjinin çıkışta hala mevcut olduğu anlamına gelir. Bu bulgular Yahya ve diğ, (2017) sonuçlarıyla uyumludur. Şekil 5.12.'de kurutma süresi ile ekserji verimliliğinin değişimi Eşitlik 3.47 ile hesaplanarak verilmiştir.



Şekil 5.12: Kuruma süresi ile ekserji verimliliği

Maksimum ekserji verimi 55 dakikada 3,5 m/s kurutma havası hızında (%60,0) gözlenirken, minimum ekserji verimi 60 dakikada 2,8 m/s kurutma havası hızında elde edilmiştir (% 41,0). Kurutma havası hızı ve kuruma süresindeki artış, ekserji verimliliğinde artışa neden olmuştur (Şekil 5.12). Termodinamik verimsizliğe neden olan ana faktörler, sistemi terk eden ekserji, ekserji tahribatı ve çevre havaya ekserji kaybıdır. Bu, çıkış kurutma havasının geri dönüştürülmesiyle, kurutma bölmesindeki ekserji tahribatının azaltılması ve sistem sınırı boyunca ısı transferinin azaltılmasıyla düşürülebilir. Aghbashlo ve Arabhosseini (2009) deneylerin başında ekserji verimliliğinde önemli farklılıklar bulmuş ve deneylerin sonuna doğru ekserji verimi değerleri birbirine yakın olduğu belirtilmiştir. Akpınar (2004), incelenen kurutma havası sıcaklığında kurutma odasının ekserji verimliliğinin % 67,28 ile % 97,92 arasında değiştiğini bildirmiştir. Corzo ve diğ, (2008), incelenen kurutma koşulları için kurutma odasının ekserji verimlilik değerlerinin % 80 ile % 97 arasında olduğunu göstermiştir.

1. Yakıt enerji sonuçları:

Yakıtı alt ısıl değerini;

$$C_4H_{10} \longrightarrow 58.12300 \left(\frac{kg}{kmol} \right) 45,1107823064 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$C_3H_8 \longrightarrow 44.09700 \left(\frac{kg}{kmol} \right) 45,4669025 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\bar{q}_{yanma,LPG} = 45,04 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

2. Yakıt ekserji sonuçları

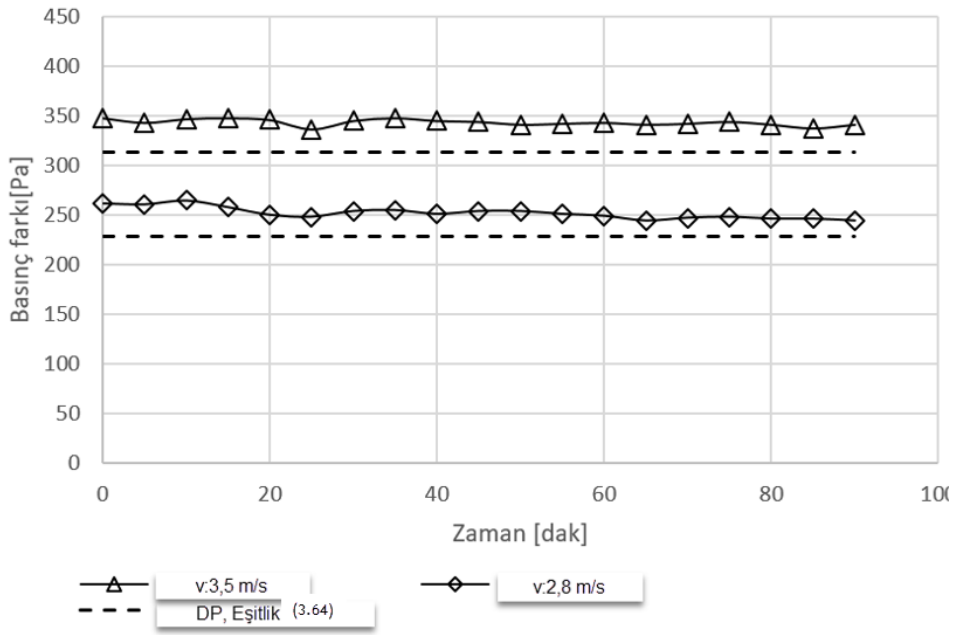
LPG nin ekserjisi,

$$E_x(LPG) = 2\,534\,320,539\,71 \left(\frac{J}{mol} \right) \cong 2,534 \left(\frac{MJ}{mol} \right)$$

5.5. Gözenekli Ortamda Akış Sonuçları

Basınç düşüşündeki zamana bağlı değişim Şekil 5.13'de verilmiştir. Kurutma havası hızı 2,8 m/s'den 3,5 m/s 'ye yükseltildiğinde, basınç düşüşünün sırasıyla 261 kPa'dan 347 kPa'ya yükseldiği gözlenmiştir. Bu beklenen bir durumdur. Basınç düşüşü, kurutma havası mısır tanelerden geçerken akış direncinden kaynaklanır. Tahıllar bir hacmi

doldurduğunda, kurutucu havası aralarındaki boşluklardan geçmeye çalışır. Bu boşluklar tane türüne göre değişir. Hava hızı arttığında akış direnci de artmıştır. Sonuç olarak, kurutma hava hızına bağlı olarak basınç düşüşü artmıştır. Kurutucu tasarımı için tane dolu hacimden geçen kurutucu havasının basınç düşüşleri son derece önemlidir. Ayrıca Şekil 5.13'de tahmin edilen basınç farkları Eşitlik (3.64) ile 2,8 m/s ve 3,5 m/s kurutma havası için hesaplanmıştır. Deneysel ve teorik veriler arasındaki hatalar %10'un altında bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar teori ile tutarlıdır, sonuçlar denklemlerin güvenilirliğini göstermiştir. Literatür ile de benzer sonuçlar bulunmuştur. Oksanen (2018) mısır için deneysel basınç düşüşünü 781,25 Pa/m olarak hesaplamıştır. Şekil 5.13'de ölçülen basınç düşüşleri metre başına hesaplandığında 790 ve 1050 Pa/m olarak bulundu. Bu değerler Oksanen (2018) tarafından yapılan çalışmalarla uyumludur.



Şekil 5.13: Zaman içindeki basınç farkının değişimi

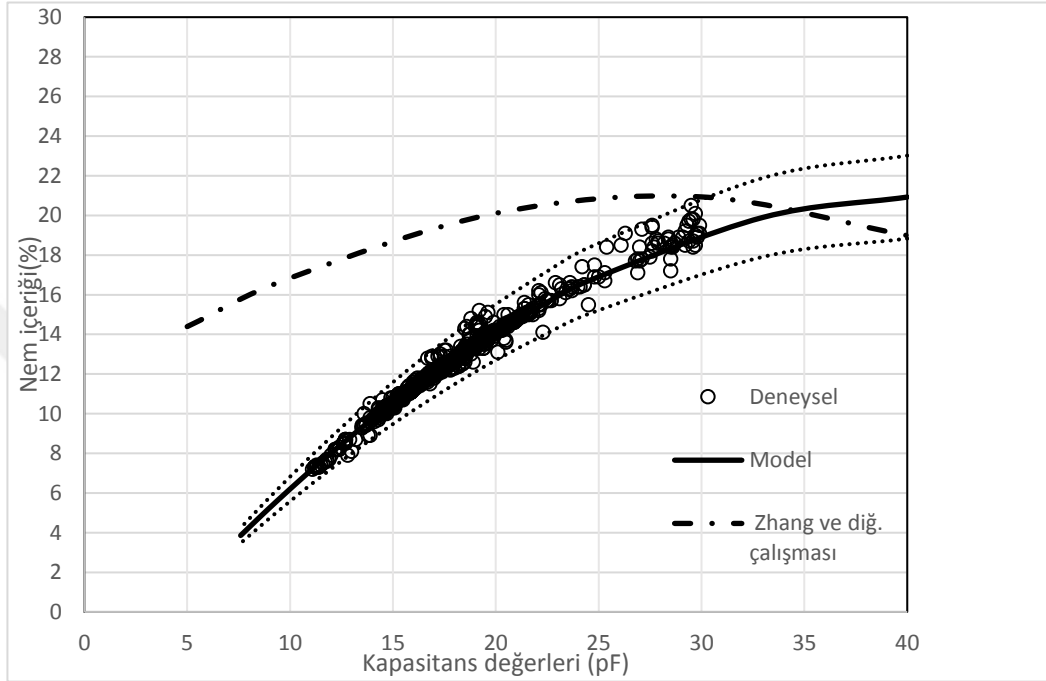
5.6. Kapasitans Nem Ölçme Yöntemi Sonuçları

Mısır, tahıl kurutucuda %21(y.b.) nem içeriğinden %14 (y.b.) 'ye kadar kurutuldu. Nem içeriklerini belirlemek için numunelerin kapasitansı ölçülmüştür. Ölçülen kapasitans değerleri ile nem içeriğinin değişimi Şekil 5.14'te verilmiştir. Nem içeriği ile kapasitans değerleri arasında üstel bir ilişki olduğu görülmüştür. Şekildeki kesikli çizgiler alt ve üst sınırları ($\pm\%10$) göstermektedir. Nem içeriği (M) ile kapasitans (C) arasındaki ilişkiyi

veren matematiksel model Eşitlik (5.1) aşağıdaki gibi ikinci dereceden bir fonksiyon olarak bulunmuştur:

$$M = -0.015C^2 + 1.2408C - 4.7063 \quad (5.1)$$

Burada A_0 , A_1 ve A_2 değerleri sırasıyla -0,015'e -4,7063 ve 1,2408 eşittir.

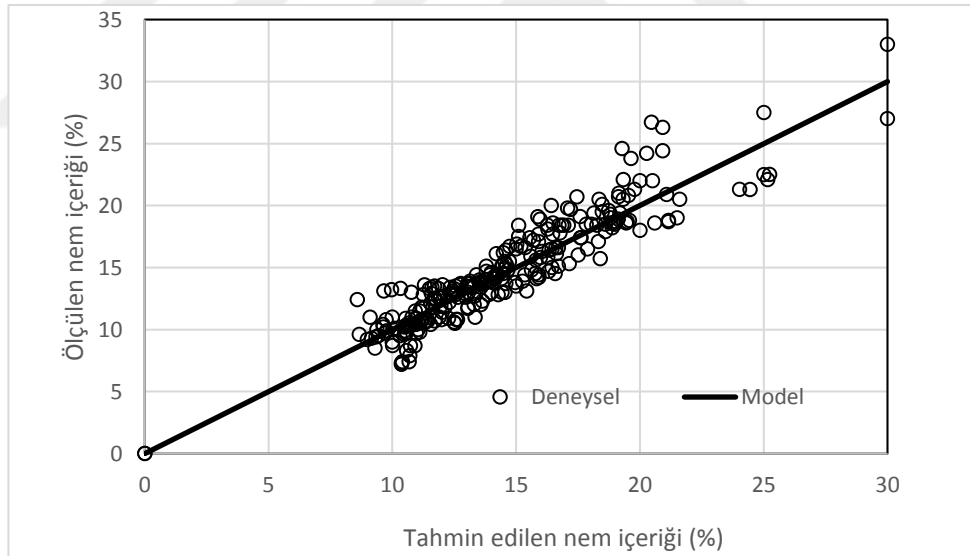


Şekil 5.14: Mısır nem içeriğinin kapasitans değerleri grafiği(sürekli çizgi, uydurma eğrisidir)

Şekil 5.14'te görüldüğü gibi mısır nem içeriği azaldıkça kapasitans değerleri azalmıştır. Mısırın nem içeriği arttıkça, dielektrik sabitleri de arttı. Bu davranışı destekleyen benzer sonuçlar açık literatürde bildirilmiştir. Zhang ve diğ. (2013) silindirik kapasitif sensör prensibine dayalı olarak mısırın nem içeriği ölçüm çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Kapasitans ve nem içeriği arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Gerilimi ölçerek sensörün kapasitans ölçümünü hesaplamışlardır.

Deneysel verilere dayanarak, kapasitans ve nem arasındaki ilişki için en küçük kareler yöntemini kullanarak ikili kübik denklemi elde etmişlerdir. Nem değerleri arttıkça kapasitans değerleri artmıştır. $Y = -0.000054149x^3 - 0.0089798x^2 + 0.63413x + 11.4539$ denklemini tavsiye etmişlerdir. Bu denklem yardımıyla, beklenen nem içeriği değerleri, kapasitans değerleri kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, veriler arasında benzerlik yoktu. Ayrıca Soltani ve diğ. (2011) silindirik kapasitif yöntemine göre sensör tasarlamışlardır. Seçilen nem içerikleri için beş frekans (1

kHz, 10 kHz, 100 kHz, 500 kHz ve 1 MHz) kullanmışlardır. Frekansa bağlı dielektrik sabiti ile nem içeriği arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Ayrıca, frekans arttıkça dielektrik sabiti ve nem içeriği grafiğinin düzenli olduğunu bildirmişlerdir. Mısırın nem içeriğine bağlı olarak dielektrik sabiti için homografik fonksiyon denklemini türetmişlerdir. Dielektrik sabitleri ile nem içeriği arasındaki ilişkiyi ikinci dereceden denklem $y = -0.005x^2 + 0.202x + 4.47$ ile ifade ettiler. Bu denklemden elde edilen verilerin bu çalışmada elde edilen verilerle uyuşmadığı görülmüştür (Tablo 4.3). Bununla birlikte, bildirilen kapasitans, ürün nem değişiklikleri ve dielektrik katsayıları verileri arasındaki ilişkiler benzerdi. Bunun nedenleri şunlardır: ürün miktarı, malzeme türü, malzeme nemi, iki kondansatör arasındaki boşluk farkı, uygulanan frekans, sıcaklık ve voltajdır. Mısır kurutucusunda ölçülen nem içeriği ile tahmin edilen nem içeriği ile karşılaştırılması Şekil 5.15'de yapılmıştır. Tahmin edilen verilerin deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel verilerde saçılma deney koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanıyordu. Sıcaklık ve bağıl nemdeki değişiklikler deneysel değerleri etkiledi.



Şekil 5.15: Deneysel verilerin model sonuçlarıyla karşılaştırılması

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında tane mısır, ortalama başlangıç nem içeriği %27 (k.b.)'den %14 (k.b.) nihai nem içeriğine ulaşana kadar kurutuldu (Yağcıoğlu, 1999). 103 °C sabit sıcaklıkta farklı kurutma hava hızlarında (2,8 m/s ve 3,5 m/s)) kurutulmuştur. Deneysel verilerin nem oranları modellenmiştir. Matlab yazılımı kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile ince tabaka kurutma modelleri mısırın deneysel verileriyle karşılaştırılmıştır. Uyguladığımız modellerin uyum kalitesi değerlendirildi. Belirleme katsayısı kullanılarak (R^2), ortalama hatası (SSE) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) tespit edilmiştir. Fick'in ikinci yasasının analitik bir çözümü aracılığıyla belirlenen etkin difüzyon katsayısı hesaplanmıştır. Laboratuvar ölçekli mısır kurutucusunun enerji analizi yapılarak EK, EKO, SEC değerleri çıkarılmıştır. Termodinamiğin ikinci yasası uygulanarak kurutma işlemi sırasında ekserji girişi, ekserji çıkışı, ekserji kayıpları ve verimliliğini belirlemek için bir ekserji analizi yapılmıştır. Tane mısır için, kapasitif nem sensörlü laboratuvar ölçekli bir kurutucu geliştirilmiştir. Farklı nem içeriğine sahip tane mısırın dielektrik özellikleri, farklı frekans değerlerinde hassas LCR metre ile ölçülmüştür. Kurutucuya entegre edilmiş kapasitif nem ölçer ve laboratuvar tipi nem tayin cihazı ile zamana bağlı mısır nem değerleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm verileri karşılaştırmalı olarak analiz yapıldı. Sonuçlar;

1. En yüksek değerler R^2 (0,9929), en düşük SSE (0,00338) ve RMSE (0,00102) değerleri ile Midilli modelinin en iyi model olduğu bulunmuştur. Mısırın kuruma davranışı sonuçları incelendiğinde, kurutma hava hızının mısırın kurutulmasında önemli bir faktör olduğu hem deneysel sonuçlarımızın verileri hem de rapor edilen bulgularla tutarlı olduğu görülmüştür.
2. Deff, hava hızı etkisiyle birlikte 5.66E-8'den 10.2E-8 m²/s'e yükseldi.
3. Enerji kullanım oranı (EKO), mısır kurutma işleminde enerji kullanımını analiz etmek için önemli bir parametre olarak kabul edildi. EKO hava hızı ile arttı.

Kurutma havasının 3,5 m/s hızı için, kurutma odasında EKO %39 ile %98 arasında değişmiştir.

4. 2,8 m/s kurutma hava hızında özgül enerji tüketimi (SEC) 0,60-0,15 kWh/kg aralığında ve 3,5 m/s kurutma hava hızında 1,37 ila 0,14 kWh/kg arasındadır.
5. Kurutma havasının hızı arttıkça ekserji çıkışı arttı, ekserji girişi sabit kaldı ve ekserji kaybı azaldı. Maksimum ve minimum ekserji kaybı değerleri sırasıyla 15,08 kJ/kg ve 5,62 kJ/kg olarak hesaplandı. Analiz sonuçlarından, maksimum ekserji veriminin 3,5 m/s kurutma hava hızında 55 dakikada (%60,0) gözlemlendiğini, minimum ekserji veriminin ise 2,8 m/s kurutma hava hızında 60 dakika (%41,0) elde edilmiştir. Sonuç olarak, kurutma hava hızının ekserji kaybını etkilediği söylenebilir. En yüksek ekserji kaybı 3,5 m/s kurutma hava hızında gerçekleşti. Termodinamik verimsizliğe neden olan ana faktörler, sistemden çıkan ekserji, ekserji yıkımı ve çevredeki havaya ekserji kaybıdır.
6. Nem içeriği ile kapasitans (C) arasındaki ilişkiyi veren matematiksel model, ikinci dereceden bir denklem olarak bulunmuştur. $MC = -0.015C^2 + 1.2408C - 4.7063$.

Bu çalışmada, ürünün kapasitif nemölçerler üzerinde çalışan araştırmacılar için faydalı olabilecek veriler elde edilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, farklı çalışma sıcaklıklarında kurutucuya entegre edilmiş nem ölçerlerdeki kapasitans ilişkisinin ortaya çıkarılması önerilmektedir. Endüstride gittikçe artan enerji tüketimi, endüstriyel işletmelerin enerjiyi ellerinden geldiğince verimli kullanmalarını gerektirmektedir. Fakat çoğu endüstri işletmesi gereğinden fazla enerji tükettiğinin ve bu tüketimi bir takım basit önlemlerle azaltabileceğinin farkında değildir. Üniversite-sanayi ortak projeleri oluşturularak, kurutucuda yapılacak geliştirmeler ile tarım ürünüde bulunan nem içeriğinin anlık nem tayini geniş kapsamlı incelenerek enerji alanında tasarruf sağlanması ile ülkemizde yaygın kullanımına ivme verilmelidir.

KAYNAKLAR

- Ada Kurutma. (2015). www.adakurutma.com.tr. 08 02, 2021 tarihinde Ada Kurutma: http://www.adakurutma.com.tr/root_urunler.html adresinden alındı.
- Abou-El-Hana, N.H. & Younis, M.A.(2008). Pressure drop through shelled corn as affected by airflow rates, moisture content and air temperature, *Misr J. Ag. Eng.* 25,3, 944-956.
- Abuşka, M.(2010). *Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucuda, çekirdeksiz üzümün kurutulması ve enerji analizinin deneysel olarak yapılması*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Makina Eğitimi Anabilim Dalı,Ankara.
- Aghbashlo, M. Kianmehr, M. H. & Arabhosseini, A.(2008). Energy and exergy analyses of thin layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer, *Drying Technology*, 26,1501-1508.
- Aghbashlo, M. & Arabhosseini, A. (2009). Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer, *Journal of Food Engineering*, 91, 99-108.
- Aghbashlo, M. Mobli, H. Rafiee, S. Madadlou, A. (2013). A review on exergy analysis of drying processes and systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 1–22.
- Ahern, J. E. (1980). Exergy method of energy systems analysis, United States.
- Akan A.E.(2018). *Endüstriyel tip kurutucuda kurutma karakteristiğinin belirlenmesi ve modellenmesi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Akpınar, E. K. Midilli, A. & Bicer, Y. (2005). Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer, *Energy Conversion and Management*, 46, 2530–2552.
- Akgun, N.A.& Doymaz, I.(2005). Modelling of olive cake thin-layer drying process, *Journal of Food Engineering*, 68, 455–461.
- Azadbakht, M. Aghili, H. Ziaratban, A. &Torshizi, M.V. (2017). Application of artificial neural network method to exergy and energy analyses of fluidized bed dryer for potato cubes, *Energy*, 120, 947-958.

- Bansal, N. Dhaliwal, A.S. Mann, K.S.(2015). Dielectric properties of corn flour from 0.2 to 10 GHz, *Journal of Food Engineering*, 166, 255-262.
- Baş, B. (2010). Mısırın çeşitli kurutma yöntemleriyle kurutulması üzerine bir araştırma, Namik Kemal Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, Tarım makinaları ana bilim dalı, Tekirdağ.
- Berbert, P. A. Queiroz, D. M. Sousa, E. F. Molina, M. B. Melo, E. C. & Faroni, L. R. D. (2001). PH—postharvest technology: dielectric properties of parchment coffee, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80 (1), 65-80.
- Bruce, D.M. & Giner, S.A. (1993). Mathematical modelling of grain drying in counter-flow beds: Investigation of crossover of air and grain temperatures, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 55,143-161.
- Chua, K.J. Chou, S.K. Yang, W.M.(2010). Advances in heat pump systems: A review, *Applied Energy*, 87, 3611-3624.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*, Oxford University, ISBN 0 19 8533446
- Çolak Güneş, N. (2009). *Gıda kurutma sistemlerinin ekserji analizi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi Enstitüsü Ana Bilim Dalı, İzmir.
- Corrêa, P.C. Botelho, F.M. Oliveira, G.H. H. Goneli, A.L.D. Resende, O. & Campos, S.C. (2011). Mathematical modeling of the drying process of corn ears, *Maringá*, 33(4), 575-581.
- Corzo, O. Bracho, N. Va'squez, A. Pereira, A.(2008). Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices, *Journal of Food Engineering*, 86, 151–161.
- Courtois, F. Lebert, A. Lasseran, J.C. & Bimbenet, J.J. (1993). Dynamic modelling and simulation of industrial corn dryers, *Computers Chemical Engineering*, 17,S209-S214.
- Çakmakçı, S & Dallar A. (2019). Farklı Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonlarının Bazı Silajlık Mısır Çeşitlerinin Çimlenme Özellikleri Üzerine Etkileri, *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 16(2), 121-132.
- Çelik, E. Parlak, N. &Çay, Y.(2021). Experimental and numerical study on drying behavior of CORN grain, *Heat and Mass Transfer*, 57, 321-332.
- Çil, B. &Topuz, A. (2009). Fluidized bed drying of corn, bean and chickpea, *Journal of Food Process Engineering*, 33(6), 1079-1096.
- Dalpasquale, V.A. Sperandio, D. & Silva L.H.M. (2012). Fixed-bed drying simulation with constant enthalpy, using the improved Michigan State University model, *Acta Scientiarum, Technology Maringá*, 34(2), 137-140.
- Doymaz I. (2005). Sun drying of figs: an experimental study, *Journal of Food Engineering*, 71, 403-407.

- Ertesvag,S.I. (2009). Combustion,fuels and energy, <http://ntnu.no/ivarse/energi>
- Farkas, I. Remenyi, P. & Biro, A. (2000). A neural network topology for modelling grain drying, *Computers and Electronics in Agriculture* ,26,147–158.
- FAO, (2019). Food and Agriculture Organization. Erişim adresi: www.faostat.org.
- Filiz, Ç. (2012). *Bir buhar kazanının enerji ve ekserji analizi yoluyla performansının değerlendirilmesi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Fudholi, A. Sopian, K. Othman, M.Y. & Ruslan, M.H. (2014). Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed, *Energy and Buildings*, 68, 121–129.
- Forters, M. Martins, J.H. Amantéa,R.P. & Ferreira, W.R. (2009). Transient and Spatial Energy and Exergy Analysis of Deep-bed Corn Drying, *ASABE Meeting Presentation*, Grand Sierra Resort and Casino Reno, Nevada June 21 – June 24, 2009, 090064.
- Han, F. Zuo, C. Wu, W. Li, J. & Liu, Z. (2012). Model Predictive Control of the Grain Drying Process, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, ID 584376.
- Hassan-Beygi, S.D. Aghbashlo, M. Kianmehr, M.H. & Massah, J. (2009). Drying characteristics of walnut (*Juglans regia L.*) during convection drying, *Int. Agrophysics*, 23, 129-135.
- Helvacı, H.U. & Akkurt, G. G. (2014). Thermodynamic performance evaluation of a geothermal drying system, *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*, 331-341.
- Hepbaşlı, A & Çolak, N. (2007). Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer, *Journal of Food Engineering*, 80, 4,1188-1193.
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory. II: Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169–174.
- Hepbasli, A Balta, M.T.A. (2007). Study on modeling and performance assessment of a heat pump system utilizing low temperature geothermal resources in buildings, *Building and Environment*, 42, 3747–3756.
- Holman, J.P. (1972). Experimental methods for engineers, *McGraw-Hill Book*. London.
- Hunter, J.D.(1983). American evangelicalism: Conservative religion and the quandary of modernity.

- Galić, A. Pliestić, S. Jović, F. Nenadić, K. & Jović, A.(2014). An energy efficient corn grains drying process, *Energetska učinkovitost procesa sušenja kukuruznog zrna*, 21(6),1395-1401.
- Giner, S. A. Bruced, D.M. (1998). Two-Dimensional Simulation Model of Steady-state Mixed-flow Grain Drying. Part 2: Experimental Validation, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71, 1, 51-66.
- Guofeng, Y. Jin, Y. & Zhongmmg, W. (1999). Mathematical simulation of grain drying through ventilation and the test findings, *Proceedings of the 7th International Working Conference on Stored-product Protection*, 2, 14-19 October 1998, Beijing, China. Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China, 1999. (ISBN 7536440987) 1040-1046.
- Günerhan, H. (2005). Endüstriyel kurutma sistemleri, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, Temel Bilgiler, Tasarım Ve Uygulama Eki*, 36 (13), 1-10.
- Güneş, Ç.N. (2009). Gıda kurutma sistemlerinin ekserji analizi. Ph.D. Graduation Thesis, Ege University, Institute of Science.
- Güngör, A. & Özbalta, N. (1997). Endüstriyel Kurutma Sistemleri, *III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Ve Sergisi*, (ss.737-747), İzmir, 20-23 Kasım.
- Güngör, A. (2010). *Gaz motoru tahrikli ısı pompalı bantlı bir kurutma sisteminin performansının ekserjetik olarak değerlendirilmesi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, Makine Mühendisliği, İzmir.
- Gürel, A.E. Ceylan, İ. & Aktaş M. (2016). Meyve ve sebzelerin kurutma parametrelerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Dergisi, Part C, Tasarım ve Teknoloji*, 4(4), 267-273.
- Grain: World Markets and Trade. (2021). United states department of agriculture foreign agricultural service, Erişim adresi: <http://www.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>
- İzli, N. & Işık, E. (2010). Determination of economic cost, vigour and rate of germination in batch drying of maize seeds, *International Agrophysics*, 24, 93-96.
- Jafari, H. Kalantari, D. & Azadbakht, M. (2017). Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and it's qualitative study, *Energy*, 138,1016-1029.
- Janas, S. Boutry, S. Malumba, P. Elst, LV.& Béra, F. (2010). Modelling dehydration and quality degradation of maize during fluidized-bed drying, *Journal of Food Engineering*, 100 (3) ,527-534.
- Jangam S.V. & Thorat, B.N. (2010). Optimization of Spray Drying of Ginger Extract, *Drying Technology*, 28, 1426–1434.

- Jokiniemi, H.T & Ahokas,J.M. (2014). Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer, *Biosystems Engineering*, 121, 209-220.
- Kadem, S. Lachemet, A. Younsi, R. &Kocafe, D. (2011). 3d-Transient modeling of heat and mass transfer during heat treatment of wood, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 717-722.
- Kahraman, A.(2018). *Endüstriyel Mısır Kurutma Tesislerinde Enerji Ve Ekserji Analizi*, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Korkmaz, C. (2007). Mısırın kuruma davranışının deneysel olarak belirlenmesi ve değişik modellerle simülasyonu. *MSc Graduation Thesis, Trakya University, Institute of Science*.
- Korkua, S.K. &Sakphrom,S.(2020). Low-cost capacitive sensor for detecting palm-wood moisture content in real-time, *Heliyon* 6: e04555
- Kovaci, T. Dikmen, E. & Şencan Şahin A. (2018). Kurutma sistemleri, enerji tüketimleri ve ürün kalitesine etkileri ve örnek sistem tasarımı, *Teknik Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 25-39.
- Koyuncu, T. Tosun, &I. Pınar, Y. (2007). Drying characteristics and heat energy requirement of cornelian cherry fruits (*Cornus mas L.*), *Journal of Food Engineering*, 78, 735–739.
- Kraszewski, A. & Nelson, S.O.(1989). Composite model of the complex permittivity of cereal grain, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 43, 211-219.
- Lewis W.K. (1921). The rate of drying of solid materials, *Indus. Eng. Chem.*, 13, 427-432.
- Liu, X. Chen, X. Wu, W.& Zhang, Y. (2006) . Process control based on principal component analysis for maize drying, *Food Control*, 17, 894-899.
- Liu, Z. Wu, Z. Wang, X. Song, J. & Wu, W. (2015). Numerical aimulation and experimental study of deep bed corn drying based on water potential, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems In Engineering*, ID 539846.
- Midilli, A. Kucuk, H. &Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technol* 20(7),1503–1513.
- Midilli, A & Küçük, H. (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, *Energy Conversion and Management*, 44, 1111-1122.
- Mittal, G.S & Otten,L. (2014). Simulation of low-temperature corn drying, *Canadian Agricultural Engineering*, 24, 2, 111-118.

- Mondal, H.T. Hossain, A. Sheikh, A.M. Akhtaruzzaman, M & Hossain Sarker, S. (2020). Energetic and exergetic investigation of a mixed flow dryer: A case study of maize grain drying, *Drying Technology*, 39(4):1-15.
- Montross, M.D. & McNeill, S.G. (2005). Permeability of corn, soybeans, and soft red and white winter wheat as affected by bulk density, *Applied Engineering in Agriculture*, 21(3), 479-484.
- Mujumdar, A.S. (2007). Handbook of industrial drying, USA: CRC Press.
- Nathk, D. & Ramanathan, P. (2018). A Simplified and portable capacitance sensor to measure moisture content of paddy, *Gazi University Journal of Science*, 31, 821-829.
- Nazghelichi, T. Kianmehr, M.H. & Aghbashlo, M. (2011). Prediction of carrot cubes drying kinetics during fluidized bed drying by artificial neural network, *J Food Sci Technol*, 48(5), 542-550.
- Nelson, S. O. (1979). RF and microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn, *Transactions of the ASAE*, 22(6), 1451-1457.
- Nelson, S. O. (1983). Observations on the density dependence of the dielectric properties of particulate materials, *Journal of Microwave Power*, 18(2), 143-152.
- Nelson, S. O. (1991). Dielectric Properties of Agricultural Products, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26,5, 845-869.
- Nelson, S.O. (2010). Fundamentals of Dielectric Properties Measurements and Agricultural Applications, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 44(2), 98-113.
- Nelson, S.O. & Trabelsi, S. (2011). Sensing grain and seed moisture and density from dielectric properties, *Int J Agric & Biol Eng*, Open Access at <http://www.ijabe.org> Vol. 4 No.1 75
- Oksanen, T. (2018). Controlling air flow in recirculating mixed flow batch dryer with double bed mode, *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 133-138.
- Özahi, E. & Hacımurat Demir, H. (2014). Drying performance analysis of a batch type fluidized bed drying process for corn and unshelled pistachio nut regarding to energetic and exergetic efficiencies, *Measurement*, 60, 85-96.
- Prommas, R. Rattanadecho, P. & Cholaseuk, D. (2010). Energy and exergy analyses in drying process of porous media of porous media using hot air, *International communications in Heat and Mass Transfer*, 37(4), 372-378.
- Rai, A. K. Kottayi, S. & Murty, S. N. (2005). Low cost field usable portable digital grain moisture meter with direct display of moisture (%), *African Journal of Science and Technology (AJST)*, 6 (1), 97 – 104.

- Rao, P.S. Bal, S. & Goswami, T.K. (2007). Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy, *Journal of Food Engineering*, 78, 480–487.
- Reichert, I. Olneya, P.& Lahmer, T. (2019). Influence of the error description on model-based design of experiments, *Engineering Structures*, 193, 100-109.
- Sacılık, K. & Çolak, A. (2005). Dielectric Properties Of Opium Poppy Seed, *Tarim Bilimleri Dergisi*, 11 (1) 104-109.
- Sacılık, K. & Colak, A. (2010). Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz, *Powder Technology*, 203, 365–370.
- Sahari, Y. Abdul Wahid, R. Mhd Adnan, A. S. Azizan, M.S. Mohd Shafie, Z. Alwi, S. & Hamzah, A. (2018). Drying kinetics and moisture diffusivity of shelled corn, *National Conference on Agricultural and Food Mechanization(NCAFM)*. 17-19 April Kuching. Sarawak.
- Salahshoor, K. Asheri, M. H. (2014). A new exergy-based model predictive control methodology for energy assessment and control, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21,489-495.
- Sarker, S.H. Ibrahim, M.N. & Aziz, N.A. (2015). Punan MS. Energy and exergy analysis of industrial fluidized bed drying of paddy, *Energy*, 84,131-138.
- Singh, M. Ohji, T. & Asthana, R.(2016). Chapter 1 - Green and Sustainable Manufacturing of Advanced Materials—Progress and Prospects, *Green and Sustainable Manufacturing of Advanced Material*, 3-10.
- Sitompul, J.P.& Sumardiono, S. (2003). Modeling and simulation of a momentum, heat, and mass transfer in a deep-bed grain dryer, *Drying Technology*, 21, 217–229.
- Solar, N. & Solar, A. (2016). Non-destructive determination of moisture content in hazelnut (*Corylus avellana* L.), *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 320–330.
- Soponronnariti, S. Pontornkulpanich, A. & Prachayawarakorn, S.(1997). Drying characteristics of corn in fluidized bed dryer, *Drying Technology*, 15(5), 1603-1615.
- Souza, A. Steward, B. Bern, C. (2018). A modelica library for thin-layer drying of agricultural products, *Proceedings Of The 1st American Modelica Conference* October 9-10, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Spencer, H.B. (1969). A mathematical simulation of grain drying, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 14, 226-235.
- Srivastava, V.K. & John, J. (2002). Deep bed grain drying modeling, *Energy Conversion and Management*, 43, 1689–1708.

- Soltani, M. Alimardani, R. & Omid, M. (2011). Use of dielectric properties in quality measurement of agricultural products, *Nature and Science*, 9(4),57-61.
- Tayeb, A.M. (1986). Modern solar grain dryer, *Solar & Wind Technology*, 3, 211-214.
- Tulasidas, T.N. Raghavan, G.S.V. & Norris, E.R. (1993). Microwave and convective drying of grapes, *ASAE*, 36(6), 1861-1865.
- Türkiye İstatistik Kurumu (2020). Türkiye İstatistik Kurumu, Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1>
- T.C. Tarım Ve Orman Bakanlığı (2021), Tohumluk Tescil Ve Sertifikasyon Merkez Müdürlüğü, Ankara, Erişim adresi: <http://www.ttsm.gov.tr>
- Tomaraei, P. (2010). *Tahilda Nem Ölçümü İçin Rf Nem Algılayıcısının Geliştirilmesi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tarım Makinaları Anabilim Dalı.
- Topuz, A. (2002). *Akışkan yatakta fındık kurutma prosesinde ısı ve kütle geçişinin incelenmesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Trabelsi, &S. Nelson, S.O. (2006). Nondestructive Sensing of Physical Properties of Granular Materials by Microwave Permittivity Measurement, *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, 55(3), 953-963.
- Trelea, I.C. Trystram, G. & Courtois, F. (1997). Optimal constrained non-linear control of batch processes: Application to corn drying, *Journal of Food Engineering*, 31 (4) 403-421.
- Turan, M.(2009). *Bir endüstriyel kurutucunun performansının enerji ve ekserji yöntemleri kullanarak belirlenmesi*, Ege Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İzmir.
- Türkan, B. (2020). *Endüstriyel malzemelerde eşzamanlı ısı ve kütle transferinin deneysel ve nümerik incelenmesi*, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Yağcıoğlu, A. (1999). *Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği*. İzmir, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 536.
- Yahya, M. Fudholi, A. & Sopian, K. (2017). Energy and exergy analyses of solar-assisted fluidized bed drying integrated with biomass furnace, *Renewable Energy*, 105, 22-29.
- Yıldırım, G. H. & Öner F. (2020). Mısır danesinin fiziksel ve besinsel yapısı, *Harman Time*, 92, 1-7.

- Yilmaz, S. (2010). *Mısırın Dinlendirmeli Kuruma Davranışının İncelenmesi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Yürekdelen, M. (2012). *Yatay tip misir kurutma makinesi tasarımı*, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Mersin.
- Zhang, H. Liu, W. Tan, B.& Lu, W. (2013). Corn moisture measurement using a capacitive sensor, *Journal of Computers*, 8 (6) 1627-1631.
- Zhang, S. Kong, N. Zhu, Y. Zhang, Z. & Xu, C. (2013). 3D model-based simulation analysis of energy consumption in hot air drying of corn kernels, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, ID 579452.
- Zhang, H. L. Ma, Q. Fan, L. F. Zhao, P. F. Wang, J. X. Zhang, X. D. Zhu, D. H. Huang, L. Zhao, D. J.& Wang, Z. H. (2016). Nondestructive in situ measurement method for kernel moisture content in corn ear, *Sensors*, 16, 2196.
- Wang, C.Y. & Singh, R.P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying, *Trans Am Soc Agric Eng*, 11,668–672.
- Wei, S. Xiao, B. Xie, W. Wang, F. Chen, P. & Yang, D. (2020). Stress simulation and cracking prediction of corn kernels during hot-air drying, *Food and Bioproducts Processing*, 121,202-212.