

## Endüstriyel Mısır Kurutmada Temel Parametreler ve Kurutma Sistemleri

Emel ÇELİK<sup>1\*</sup>, Nezaket PARLAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Sakarya

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Termodinamik ve Isı Tekniği Ana Bilim Dalı, Sakarya

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-4165-8402>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-8469-2192>

\*Sorumlu yazar: eemelcelik08@gmail.com

### Derleme

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 06.01.2022

Kabul tarihi: 11.05.2022

Online Yayınlanma: 12.12.2022

#### Anahtar Kelimeler:

Kurutma karakteristiği

Nem içeriği

Kurutma teknolojileri

Mısır kurutucular

### ÖZ

Mısır, yüzyıllardır önemli bir tarımsal hammadde ve birincil gıda kaynağı olmuştur. Dünya nüfusunun artan talebi ile tahıl işleme teknolojisi önemli bir yere sahiptir. Tahıl grubu içinde önemli bir yere sahip olan mısırı güvenli depolayabilmek için düşük nem seviyelerine ihtiyaç vardır. Tarım ürünlerini kurutma ile tüm besin maddelerini koruyabilmek ve güvenilir depolama amaçlanmaktadır. Bu derlemede son yıllarda yapılan çalışmalar incelenerek mısır kuruma karakteristiğine etki eden faktörler (ürün nemi, denge nemi, difüzyon katsayısı, kütle ve enerji denklemleri, basınç düşümü ve yığın yoğunluğu) incelenmiştir. Kurutma işlemi karmaşık yapıdaki zamana bağlı ısı, kütle ve momentum aktarım mekanizmalarının eşzamanlı ve birbirleriyle bağlantılı olarak gerçekleştiği bir süreçtir. Kurutma işlemlerinin hesaplanmalarında, mısırın fiziksel özelliklerinden yuvarlaklık, eşdeğer çap, geometrik ortalama çap, gözeneklilik, özgül ısı ve ısı iletkenlik referans olarak sunulmuştur. Kurutucular için mühendislik hesaplamalarında ihtiyaç duyulan temel denge ve ısı ve kütle transferi parametrelerinin belirlenmesi için matematiksel hesaplamalar verilmiştir. Deneysel verilerle, eşzamanlı ısı ve kütle transferinin analitik veya sayısal çözümleri pratik hesaplamalar ile mümkündür. Bu tür veriler, tahıl depolama, kurutma ve havalandırma ile ilgili sorunlar üzerine çalışırken de değerlidir. Kentleşen nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için büyük miktarlarda tahılın kurutulmasına olanak sağlayan termal kurutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada endüstriyel bir ürün olan mısır ve mısır kurutma sistemleri hakkında güncel bilgilere yer verilmiştir. Son 10 yılda yapılan deneysel çalışmalar gözden geçirilmiş ve tartışılmıştır. Endüstriyel kurutma sistemlerinin tasarım esaslarına dikkat çekilerek, derlenen bilgilerin ticari ve akademik çalışmalara ışık tutması hedeflenmiştir.

## Design Principles of Industrial Corn Drying Systems

### Review Article

#### Article History:

Received: 06.01.2022

Accepted: 11.05.2022

Published online: 12.12.2022

#### Keywords:

Drying characteristics

Moisture content

Drying technologies

Corn dryers

### ABSTRACT

Corn has been an important agricultural raw material and main food source for ages. With the increasing demand of the world population, grain processing technology has taken an important place. Low moisture levels are needed to safely store corn, which has an important place in the grain group. It is aimed to protect all nutrients and reliable storage by drying agricultural products. In this review, the studies carried out in recent years were examined and the factors affecting the drying characteristics of corn (product moisture, equilibrium moisture, diffusion coefficient, mass and energy equations, pressure drop and bulk density) were examined. The drying process is a complex and incomprehensible process in which heat, mass and

momentum transfer mechanisms co-occur and in connection with each other. Calculations of drying processes are presented as a reference for the physical properties of corn such as roundness, equivalent diameter, geometric mean diameter, porosity, specific heat and thermal conductivity. Mathematical calculations are given to determine the basic equilibrium and heat and mass transfer parameters needed in engineering calculations for dryers. With experimental data, analytical and numerical solutions of simultaneous heat and mass transfer are possible with practical calculations. This type of data is also valuable when working on problems with grain storage, drying, and aeration. Mechanization of agriculture is needed to meet the needs of a rapidly growing and urbanizing population, and mechanical methods are needed to dry large quantities of grain. In this study, current information about corn, an industrial product, and corn drying systems are given. Experimental studies over the last 10 years are reviewed and discussed. Drawing attention to the design principles of industrial drying systems, it is aimed to shed light on commercial and academic studies of the compiled information.

**To Cite:** Çelik E., Parlak N. Endüstriyel Mısır Kurutmada Temel Parametreler ve Kurutma Sistemleri. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(3): 1912-1933.

## 1. Giriş

Mısır, ılıman iklim bitkisi olup uzun yıllardır tarımı yapılmaktadır. Mısırın anavatanı Amerika kıtasıdır ve tarihi 8,000 ile 10,000 yıllık geçmişe dayanmaktadır. Dünyada buğday ve çeltikten sonra en fazla ekim alanına sahip tahıl bitkisidir. Mısır tarımını dünyada yaklaşık 70 milyon çiftçinin yapmakta ve bunun %80'nide gelişmekte olan ülkelerde yapılmaktadır. Mısır bitkisi 147.145.702 hektar ekim alanına sahiptir (FAO, 2019). Üretim olarak 724.515.133 ton 'dur. Dünya'da üretimini incelediğimizde %49,9 Amerika, %32,2 Asya, %10,6 Avrupa, %7, Afrika ve %0,1 Okyanus ülkeleri olduğu görülmektedir (Web\_1). 2019 yılında 6,4 milyon da ekim alanda üretimimiz 6 milyon ton civarındadır. Mısır ülkemizin hemen hemen her bölgesinde yetiştirilebilmesine rağmen, en çok Karadeniz Bölgesi'nde yetiştirilmektedir. Bu bölgemiz mısır alanlarının yaklaşık %60-65'ine sahiptir. Toplam mısır üretimimizin ise Karadeniz bölgesinde %20'si, Akdeniz bölgesinde %45'i ve Marmara bölgesinde %20'si karşılamaktadır (TUİK, 2020).

Mısır insan gıdası, endüstri hammaddesi ve hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sap ve yaprakları hayvan yemi, kâğıt yapımı ve hasır el işleri alanlarında da değerlendirilmektedir. Son yıllarda çerezlik, yağ, tatlandırıcı ve biyoyakıt-biyoetanol üretiminde kullanımı da artmaktadır. Mısırın kullanım oranları ise %75'i yem sektöründe, %20'lik bölümü nişasta-glikoz sanayinde ve %5'i ise endüstride, yağ üretiminde ve tohumluk şeklinde değerlendirilmektedir (Yıldırım ve Öner, 2020). Mısır çeşidi olarak en yaygın at dişi ve sert mısır insan ve hayvan beslenmesinde kullanılmaktadır. Çeşit seçiminde bölge şartları göz önüne alınmalıdır. Ülkemizde 2001/02 döneminde 30,0 ton olan "tohumluk kullanımı"nın, 2015/16 sezonunda 17,2 ton, 2018/19 sezonunda ise 14,798 ton olduğu görülmüştür (TOB, 2021).

Son zamanlarda, müşteri gereksinimleri doğrultusunda araştırmacılar, kurutma teknolojilerini geliştirmeye ve daha kaliteli ürünler elde etmeye odaklanmışlardır (Mothibe ve ark., 2014). Kurutma prosesi, kurutucuların yapısı, ortam ve kurutma havasının sıcaklığı ve bağıl nemi, kurutma havasının statik basıncı, tahıl sıcaklığı ve tahılın başlangıçtaki nem içeriği gibi birçok faktörden etkilenir (Hung

ve ark., 2019). Asemu ve ark. (2019) çalışmalarında %22-29 (y.b) nem içeriğine sahip mısır örneklerinin güneş kurutucuda üç farklı katman kalınlığında kurutma performansı testlerini yapmışlardır. Mısır kalınlığının kuruma süresini büyük ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir. İnce tabaka kurutma modellerinden Verma ve ark., difüzyon yaklaşımı modellerinin daha iyi tahminler verdiğini bulmuşlardır. Çelik ve ark. (2021a) çalışmasında, laboratuvar tip endüstriyel prototip tahıl kurutucu tasarlamışlardır. Kurutucu havasının giriş sıcaklığı 103°C'de, iki farklı kurutma havası hızında deneylerini yapmışlardır. Deneysel veriler MATLAB yazılımı kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile modellenmiştir. Sonuçlar incelendiğine en uygun modelin Midilli modeli olduğunu ifade etmişlerdir. Wang ve ark. (2021) çalışmasında yeni geliştirdikleri kurutma sisteminde mısır için kurutma sisteminin ekserji analizini yapmışlardır. Deneysel çalışmanın sonuçları incelendiğinde ekserji veriminin %34,03-%64,90 olduğunu ve yoğuşma yoğunluğunun 1,1-4,9 g/m<sup>3</sup> iken mısırın kurutma hızının %0,3-%0,4 arasında stabil olduğunu göstermişlerdir. Kurutma işleminin iyileştirme potansiyel hızını, kurutma sıcaklığı 90°C-100°C iken ve 90 °C'nin altındayken sırasıyla 109 kJ/s-115 kJ/s ve 37 kJ/s-52 kJ/s olarak bulmuşlardır. Sürdürülebilirlik endeksi 1,5- 2,8 olarak hesaplamışlardır. Artan kurutma havası sıcaklığı ile kurutma işleminin ekserji verimleri ve sürdürülebilirlik endeksi azalmış, ancak iyileştirme potansiyeli oranı arttığının sonucuna ulaşmışlardır. Li ve ark. (2021) enerji tasarruflu endüstriyel tahıl kurutmayı gerçekleştirmek için, yeni bir endüstriyel mısır kurutma sisteminde farklı sıcaklıklarda incelemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, optimize edilmiş kurutma işleminin, iki sabit kurutma işleminden daha iyi kinetik ve termal performans sergilediğini ifade etmişlerdir. Optimize edilmiş kurutma işleminin toplam ısı kaybı, toplam enerji tüketimi ve özgül enerji tüketimini sırasıyla 36.132,85 MJ, 48.803,99 MJ ve 7.290,27 kJ/kg olarak tespit etmişlerdir. Öte yandan, optimize edilmiş kurutma işlemi için kurutma odasının ısı verimini ise %6,81-41,71 aralığında bulmuşlardır. Genel olarak, optimize edilmiş kurutma işleminin kurutma sisteminin kurutma performansını önemli ölçüde iyileştirebileceğini sonucunu vurgulamışlardır. Mondal ve ark. (2021) mısır tanesinin kurutulması için bir karma akışlı kurutucunun enerji ve ekserji analizini çalışmışlardır. 3,0 ve 6,0 m/s hava hızında 40-80°C kurutma sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir. 3,0 m/s hava hızında kurutma sıcaklığının artmasıyla enerji kullanım oranı azalırken, 6,0 m/s hava hızında 70 ve 80°C için farklı sonuçlar gözlemlemişlerdir. Analiz sonuçları ile karışık akışlı mısır kurutması için ekserji verimliliği ve ekserjetik iyileştirme potansiyelinin sırasıyla %8,54 ile %20,87 arasında ve 0,81 ile 11,12 kJ/s arasında değiştiğini göstermişlerdir. Obeng-Akrof ve ark. (2021) çalışmalarında, biyokütle brülörlü bir ısı kaynağına sahip 500 kg'lık portatif kolonlu kurutucu ile mısır kurutma deneyleri yapmışlardır. Sonuçlar, mısırın nem içeriğinin ortalama %1,81 kurutma hızı ve %64,7 kurutma verimliliği ile 5 saatte %22,3'ten %13,4 ± 2,6'ya düştüğünü göstermişlerdir. Çelik ve ark. (2022) çalışmasında tasarladıkları tahıl kurutucuda mısırın nem içeriğini kapasitans nem ölçme yöntemine dayanarak ölçmüşlerdir. Çalışmalarında 1 MHz frekans yapmışlardır. Eğri uydurma ile model çalışması yapmışlardır. Ölçülen kapasitans değeri ile dielektrik katsayısı hesaplamışlardır. Sonuçlar incelendiğinde, mısırın nem içeriği azaldıkça dielektrik sabitinin de azaldığını

göstermişlerdir. Nem içeriği %20,96 (y.b) değerinde dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) 9,7 bulunurken, %8,8 nem içeriğinde dielektrik sabitini ( $\epsilon'$ ) 3,9 olarak hesaplamışlardır. Prototip tahıl kurutucu ile dijital nemölçer verilerini karşılaştırmışlar ve değerlerin paralellik gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Kurutma, tarım ürünlerinin bünyesinde bulunan nemin uzaklaştırılmasıdır. Tarım ürünlerinin içerdiği su miktarı, ürünün yaş ya da kuru ağırlığına bölünerek nem oranı belirlenebilmektedir. Ürünün içerdiği su ağırlığı, ürünün yaş ağırlığına oranlanırsa yaş baza göre nem oranı (%y.b); ürünün içerdiği su ağırlığı, ürünün kuru ağırlığına oranlanırsa kuru baza göre nem oranı (%k.b) bulunmaktadır. Tarım ürünlerinin içerdikleri su miktarının bilinmesi ile güvenilir depolama için gerekli olan ürün nem içeriğinin hesaplanmaları yapılmaktadır. Tane mısırın güvenli depolanabilmesi için yaş baza göre nem değerlerinin %15'in altında olması gerekmektedir. Eğer 5 yıl depolanması gerekiyorsa da nem içeriğinin %13'ün altında olması gerektiği bilinmektedir. Tarım ürünlerinin kurutulması aşamalarında kuruma karakteristiğini etkileyen faktörler; ürün içerisinde nişasta, yağ, şeker vb. madde içeriği, kabuk kalınlığı, giren ve çıkan kurutma havasının sıcaklığı, giren ve çıkan kurutma havasının bağıl nemi, kurutma havasının miktarı ve hızı, ürünün kurutma kabineye yerleştirilme durumu ve kurutma havasının karşılaştığı dirençler şeklinde sıralanabilir (Yağcıoğlu, 1999).

Bu derlemenin amacı, güncel mısır kurutma sistemleri hakkındaki bilgileri derlemek, kurutma sistemlerinin boyutlandırılmasında kullanılan kütle ve enerji denklemleri, ısı ve akış denklemleri ile kurutma sürecinde etkili olan parametreleri araştırmacıların yararına sunmaktır. Genel olarak, burada tartışılan ayrıntılar endüstriyel ölçekli kurutucuların geliştirilmesi için gereklidir.

## **2. Endüstriyel Mısır Kurutma Sistemleri**

Endüstride mısır genellikle silo, kule ve karışık akışlı yatay veya dikey tip sürekli kurutucular ile kurutulmaktadır. Bu kurutucuların kapasiteleri genellikle saatte 20 ton'dan başlayarak 90 ton yaş mısır kurutacak şeklindedir. Kurutma işlemi ve kurutucu seçiminde dikkate alınması gereken temel ilke; istenen niteliklere sahip ürünün elde edilmesinde minimum enerji tüketimi ve mümkün maksimum kuruma hızına ulaşmaktır (Güngör ve Özbalta, 1977). Ticari kurutucuların tasarımında ana etken kurutucuda gerekli ısının en verimli kullanılmasıdır. Kurutucularda gerçekleştirilen ısı transferi kurutucu tipine göre değişmekte olup taşınım, iletim, ışınım veya bunların kombinasyonları şeklindedir (Güngör ve Özbalta, 1977). Araştırmacılar, en uygun kurutma yöntemini belirlemek için farklı kurutma yöntemlerini kullanmışlardır. En uygun kurutma yöntemi ile ürünün kalitesel özelliklerini kaybetmeden, enerji verimliliğini arttırarak ve çevresel etkilerini azaltmak hedeflenmektedir (Kovaci ve ark., 2018). Endüstriyel kurutucular genellikle %30-70 arasında verimlilik ile çalışırlar. Tasarımsal ve teorik hesaplamalardaki bilgi eksikliğinden dolayı enerji verimliliği düşmektedir. Enerji verimliliğinin düşüklüğünün başlıca sebeplerinin egzoz kurutma ortamının boşaltılmasındaki enerji kaybı, ısı izolasyonu yetersizliği, kurutma malzemesi ve kurutma ortamı, uygun olmayan kurutma yöntemleri olarak söyleyebiliriz (Jangam ve ark.,2010). Endüstriyel kurutuculardaki enerji verimliliği, olası tüm atık ısı kaynaklarını geri kazanarak sağlanabilir (Chua ve

ark., 2010). Kurutma yöntemlerinin en eski metodu olan güneşte kurutma, basitlik, düşük sermaye ve işletim maliyetlerinin düşük olması bakımından avantajlı olmasına rağmen ürünün kalite özellikleri bakımından yetersiz kalmaktadır (Silva ve ark., 2017). Kurutma işlemlerinde kurutma süresi ve modellemelerin en iyi tahminin yapılabilmesi için ürünün kurutma karakteristik özelliklerinin bilinmesi gerekir (Krokida ve Maroulis, 2000; Szadzinska ve ark.,2017).

Endüstriyel mısır kurutucularında, genellikle silo ve yatay tip 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 sağlanır. Bunker ile makinayı dolduran elevatör sisteminin sürekli olarak devreye girip çıkması engellenir. LPG ve doğalgaz ile çalışabilen çok noktadan püskürtmeli brülörler yüksek ve düşük alevde çalışma özelliğine sahiptir. Otomatik ateşleme sistemi ile çalışırlar. Otomatik alev algılayıcısı ve emniyet selenoidi güvenlik önlemleri bakımından önemlidir. Yakıt buharlaştırıcısı (LPG için) maksimum yanma verimini arttırmaktadır. Kurutma sistemlerinde kullanılan fanlar; aksiyal (eksenel akışlı) fanlar ve aadyal (dik akışlı ) fanlardır. Kurutucularında genellikle kullanılan aksiyel 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 hareketi yıldız makaralara iletimi olur. İnvertör sistemiyle istenilen devir ayarlanarak dozajlama sağlanır. Yıldız makaralar elektriksiz olarak ters dönüş yaptırılarak biriken tortuların temizliği yapılır. Boşaltma sistemi kollar vasıtası ile kuruyan ürünü ortadaki boşaltma koniğine doğru süpürür.

Kurutma işlemlerinde seçilen kurutma yöntemi ürün miktarına bağlı olarak değişmektedir. Kurutulan ürünün miktarına bağlı olarak tavsiye edilen kurutma yöntemi Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Yıllık kurutulan ürün miktarına bağlı olarak tavsiye edilen kurutma yöntemi (Günerhan, 2005)

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

Tablo 1’de ürün miktarı arttıkça sıcak havalı kurutma yöntemlerinin seçilmesinin uygun olacağını gösterilmiştir.

Endüstriyel mısır kurutma sistemlerinde seçilmesi gereken kurutucu tipleri Tablo 2.’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Mısır kurutucularının sınıflandırılması

Endüstriyel mısır kurutma sistemleri	
1. Yerleşik tip	2. Taşınabilir tip
1.1. Silo Tipi Kurutucular	2.1. Devridaim yapan kurutucular
a) Yığın tipi	2.2. Devridaim yapmayan kurutucular
b) Sürekli akışlı tip	
-Dikey kurutucular (Kule ve kapalı tip)	
-Yatay tip kurutucular	

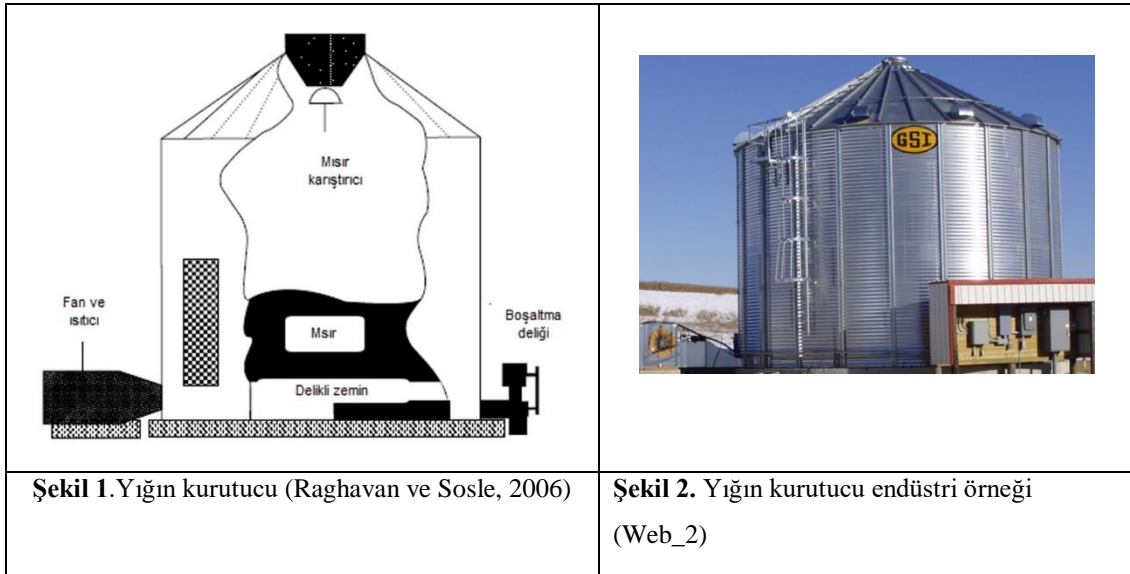
## 2.1. Yerleşik tip

### 2.1.1. 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.

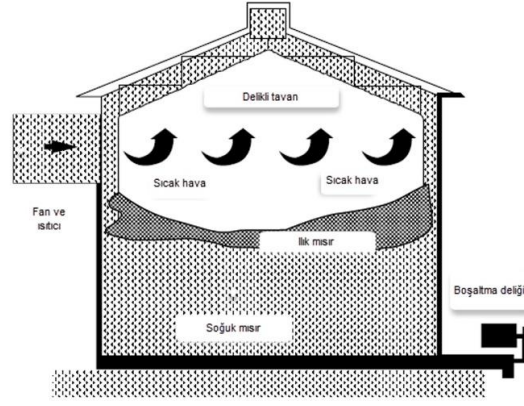
#### a) Yığın şeklinde kurutma

Kurutma için en ucuz kurulum, "kutuda yığın" işlemini kullanan kurulumdur. Bu sistemin ana bileşenleri, delikli zemine sahip bir silo, bir tahıl dağıtıcı, bir fan ve ısıtıcı ünitesi, bir süpürme burgusu ve bir alt zemin boşaltma burgusudur (Şekil 1). Isıtıcı fan, ilk tahıl yükü yerleştirildiğinde çalışmaya başlar ve ortalama tahıl nem içeriğini istenen seviyeye düşürmek için gerektiği kadar çalışmaya devam eder. Şekil 2’de endüstriyel kullanımına örnek verilmiştir.



Kurutma hızı; kuruma süresi, yığın yüksekliği, ısıtılmış havanın sıcaklığı ve hava akış hızı gibi çeşitli değişkenlere bağlıdır. Genellikle, verimli kurutma için  $m^3$  başına  $450 m^3/saat$  ( $9 cfm bu^{-1}$ ) oranına ulaşıldığında kurutmaya son verilir. Belirli bir yığın yüksekliği için, hava sıcaklığının yükseltilmesi

kurumayı hızlandırır ancak zemine yakın yerde aşırı kuruma olasılığını da artırır. Bu nedenle, ilk nem içeriği dikkate alınarak kurutulması gereken mahsul için güvenli bir hava sıcaklığı gereklidir. Depolamadan önce yeni kurutulmuş tahıllar soğutulmalıdır. Bu işlem, ısıyı kapatarak ve tahılın üzerine fan yardımıyla soğuk hava üflemek veya ılık tahıl havalandırılmış bir depoya aktararak orada soğumaya bırakarak yapılmaktadır. Yığın şeklindeki kurutma da, alternatif ısıtma ve soğutma döngüleri kullanılmaktadır. Bu, delikli zeminin yanındaki daha kuru tahıl ile tahıl sütununun tepesine yakın damper tanesi arasındaki nem farkını azaltır. Bazı hazneli kurutucular, tavanın yaklaşık 1 m altında delikli, koni şekilli kurutma zeminlerine sahiptir (Şekil 3). Delikli zeminin altına, tahılın içinden sıcak havayı üfleyen bir ısıtıcı fan ünitesi yerleştirilmiştir.



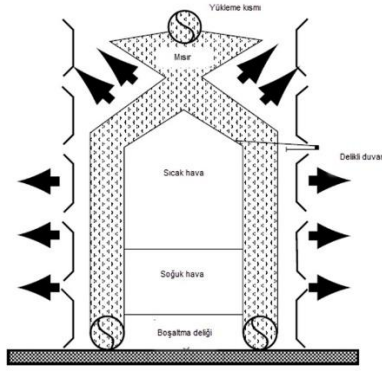
**Şekil 3.** Üstten kurutma zemine sahip bir hazneli kurutucu (Raghavan ve Sosle, 2006)

Kuru tahıl, bir havalandırma fanı ile soğutulduğu ambarın dibindeki delikli bir zemine düştüğünde, bir sonraki parti, yukarıdaki kurutucu zemine yüklenir ve kurutulur. Soğuk, kuru tahıl, zeminin altındaki bir burgu aracılığıyla başka bir depolama kabineye aktarılır. Bu sistemin avantajı, tahıl soğutulurken ve aktarılırken kurutmanın devam edebilmesidir.

Dikey karıştırma helezonları, daha düzgün kurutmayı sağlamaktadır. Aynı zamanda daha yüksek bir hava akış hızına izin vermektedir. Helezonların karıştırılması biraz daha düşük yakıt verimliliğiyle sonuçlansa da, artan kurutma hızı ile alt kısımda aşırı kurutmada azalma olmaktadır.

#### *b) Sürekli akışlı kurutucular*

Sürekli akışlı kurutucuların birçok türü olmasına rağmen, en yaygın türlerden biri, içinden sıcak havanın tahıl akışına dik olarak geldiği dikey tahıl sütunlulardır (Şekil 4 ve 5). Tahıl, üstten yüklenir ve boşaltma helezonlarına girmeden önce sıcak ve soğuk kısımların her iki tarafına da aktarılır. Tahıl akış hızı, manuel olarak veya tahıl sütununun dışına yakın bir termostatla kontrol edilir. Fan kapasitesi azaldığında veya kolon genişliği arttıkça, ısı daha verimli kullanılmış olacak ve iç ve dış katmanlar arasındaki ürün nem farkı artacaktır.

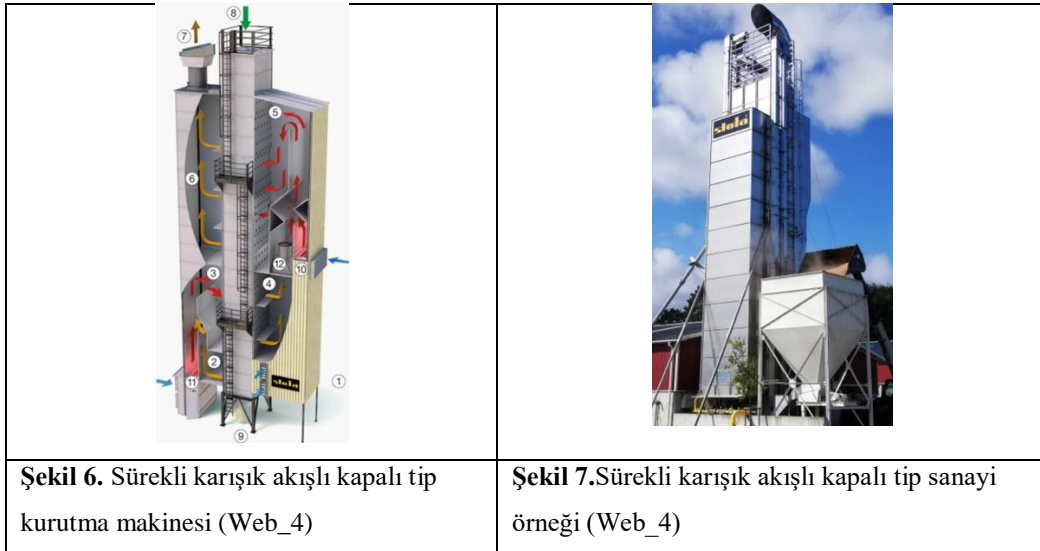


Şekil 4. Sürekli akışlı bir hazneli kurutucu  
(Raghavan ve Sosle, 2006)



Şekil 5. Kule tipi (dikey) mısır kurutma makinesi  
(Web\_3)

Çevre ve enerji kısıtlamalarından dolayı karışık akışlı sürekli tip kurutucular daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Bu tip kurutucularda yanma odasından gelen egzoz gazı kurutma haznesine üçgen kesitli kanallar içerisinde girer ve tahıl içinden karışık akışlı düzenden geçerek bacaya sevk edilirler. Tozlu egzoz gazı doğrudan çevreye atılmaz, bir toz ayırıştırma sisteminden geçerek atmosfere gönderilir. Mısır kurutucularında üstte bulunan doldurma haznesinden mısır kurutucuya doldurulur, boşaltma hızına bağlı olarak aşağıya doğru taneler ilerler, en son soğutma haznesinden geçer ve makineden boşaltılır (Şekil 6. ve Şekil 7.).



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.



## 2.2. Taşınabilir kurutucular

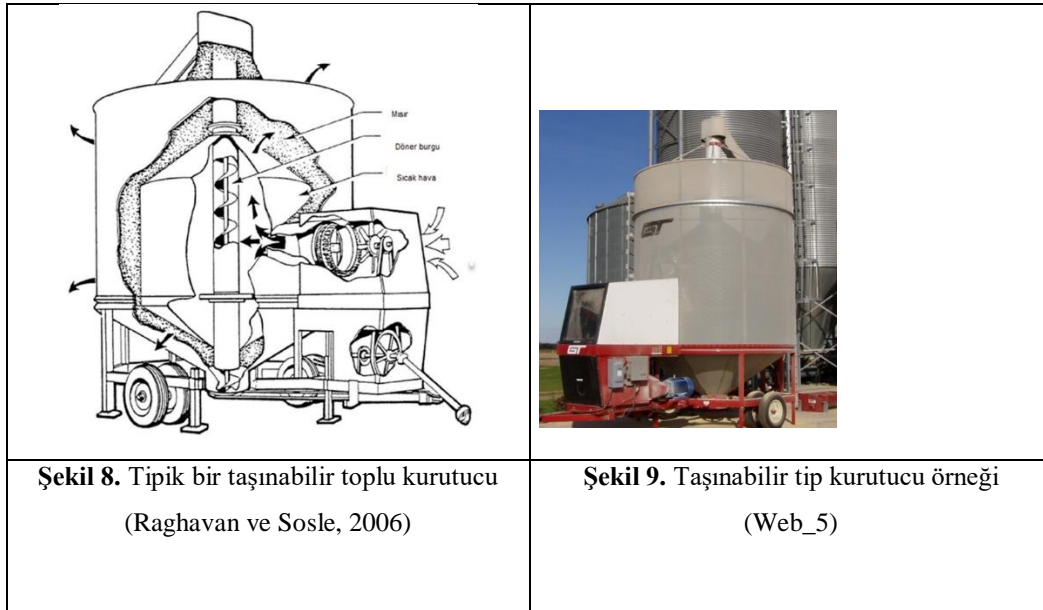
Portatif kurutucular genellikle çeşitli yerlere dağılmış tahıl kabinleri olan veya çiftlikte özel olarak kurutma yapan çiftçilere hitap eder. Acil bir durumda acil bir ihtiyacı karşılamak için portatif kurutucular kullanılabilir; ancak, kurulumunun ve sökülmesinin elverişsizliği nedeniyle tercih edilmezler. İki tip portatif kurutucu, (devridaim yapmayan ve devridaim yapan) vardır.

### 2.2.1. Devridaim yapmayan kurutucular

Sirkülasyon olamayan kurutucu türlerinin çoğu, tamamen kapalı eş merkezli silindir tipindedir. Bunlar tepeden yüklenir ve kurutma, bir tahıl kolonundan radyal olarak sıcak hava ile sağlanır. Hazne içinde yığın kurutma sistemine benzer şekilde, dış tabaka yeterince kuru kaldıkça, iç tahıl tabakası (sıcak hava bölmesinin yanındaki tabaka) aşırı kurumaya başlar. Bununla birlikte, tahıl kurutucudan çıkarılırken, nemli ve kuru tahıl karıştırılır, böylece daha sonraki kullanım için bir ürün ortaya çıkar. Bu tür otomatik kurutucular, ısıtma ve boşaltma döngülerini kontrol etmek için zamanlayıcılarla donatılmıştır.

### 2.2.2. Devridaim kurutucular

Portatif devridaim yapan kurutucular, sütunun altına yakın bir yerden tahıl alan ve üstte biriktiren merkezi bir burğu haricinde, esasen devridaim yapmayan modellerle aynıdır (Şekil 8 ve Şekil 9). Kabaca her 15 dakikada sirkülasyonu gerçekleştirir.



Bu türdeki en yaygın kurutucular, 10 ila 18,5 m<sup>3</sup> (300 ila 525 bu) hazne kapasitesi arasında değişen boyutlardadır. Kurutucular, maksimum güvenli kurutma sıcaklığının aşılması koşuluyla, hemen hemen her mahsul için kullanılabilir. Bununla birlikte, dezavantajları, özellikle kuruyken bezelye ve arpa gibi bazı tohumlara zarar verebilmesidir.

Çevre havasıyla kurutmada kullanılan enerjinin %50'si elektrik enerjisinden %50'si de havanın enerjisinden sağlanır. Düşük sıcaklıkta kurutmada kullanılan enerjinin %50'si elektrik enerjisinden (fanın çalıştırılması için) % 50'si LPG'den (ısıtıcın çalıştırılması için ) sağlanır. Yüksek sıcaklıkta kurutmada kullanılan enerjinin %2'si elektrik enerjisinden (fanın çalıştırılması) %98'i de LPG'den (ısıtıcının çalıştırılması için) sağlanır.

Bazı taneli ürünlerin ısıtılmamış havayla kurutulmaları sırasında ürünün ilk nemine bağlı olarak tavsiye edilen tane mısır %25 (y.b)'de hava akımı 0,067m/s olarak belirlendiğinde ürün yüksekliği 1,2 m'de 40,3 m<sup>3</sup> ürün hacminde olmaktadır. Tane mısır nem %16, hava akımı 0,013, ürün yüksekliği 2,4 olduğunda 281,5 m<sup>3</sup> olmaktadır.

Kurutulacak ürün iyi temizlenmiş olmalıdır. Hasat edilen nemli mısır havalandırmasız ortamda fazla bekletilmemelidir. Nemli ürünün bekletilmesi gerekirse, havalandırmalı ön siloda saklanmalıdır. Yüksek sıcaklıkta yapılan kurutma sonrası ürün sıcaklığı kademeli olarak düşürülmelidir. Yangın tehlikesini ortadan kaldırmak için kurutucu periyodik olarak temizlenmelidir. Kurutulan üründe periyodik olarak nem ve zedelenme durumu kontrol edilmelidir.

### 3. Teorik Esaslar

#### 3.1. Materyal

##### *Ürün nemi ölçüsü ve denge nemi*

Tarım ürünlerinin özellikleri, bulundurdıkları su miktarına ve buldukları ortamın sıcaklığı dikkate alınmaktadır (Yağcıoğlu, 1999). Ürün içindeki nem içeriğini kuru ve yaş baza göre ifade etmek için (Türkan, 2020).

$$\%M_{kb} = \left( \frac{W_s}{W_k} \right) = \left( \frac{W - W_k}{W_k} \right) \quad (1)$$

$$\%M_{yb} = \left( \frac{W_s}{W_s + W_k} \right) \times 100 \quad (2)$$

ifadeleri kullanılmaktadır. Burada W ürünün başlangıç ağırlığı (gr) W<sub>s</sub> ürün içerisindeki suyun kütlesi (gr) ve W<sub>k</sub> kuru ürünün kütlesi (gr) olarak ifade edilmektedir. Tarım ürünlerinin nem tutma özellikleri sorpsiyon izoterm eğrileriyle gösterilir (Mujumdar, 2007). Tarım ürünlerinin sorpsiyon özellikleri su aktivitesi ve denge neminin hesaplanması ile belirlenir. Su aktivitesi, tarım ürün tarafından tutulan suyun özelliğini gösterir. Tarım ürünün içerdiği buhar basıncının, aynı sıcaklıkta saf suyun buhar basıncına oranı su aktivitesi değerini verir. Belli nem içeriğine sahip tarım ürünü, sabit sıcaklık ve bağıl nem ortamında bekletildiğinde, havadaki su buhar basıncıyla, tarım ürünü tarafından tutulan suyun buhar basıncı arasında fark oluşur. Bu farka bağlı olarak ürün nem alır veya nem verir. Dengeye ulaştığında ürünün ağırlığındaki değişim durur. Böylece ürün tarafından tutulan suyun buhar basıncı

havadaki suyun buhar basıncına eşit olur. Bu koşullarda ürünün içerdiği neme denge nemi denir. Ürün denge nemi durumunda havanın bağıl nemine de denge bağıl nem denir. Tarım ürünlerinde  $M_d$  (denge nemi) değerinin bilinmesi, hasat sonrası kurutma ve depolama sürecinde önem arz etmektedir. Bu nedenle, çoğu tarım ürünlerinde (un, nişasta vb.)  $M_d$  değerleri belirlemek için deneysel eşitlikler geliştirilmiştir. Mısır için en yaygın kullanılan eşitlik (3)'te verilmiştir (Jayas ve Cenkowski, 2016).

$$\varphi = 1 - \exp(-0,000067(T + 42,143)M_{kb}^{1,97}) \quad (3)$$

Eşitlik 3'te verilen;  $\varphi$  ve  $M$ , sırasıyla denge durumundaki bağıl nem ile ürünün kuru bazda nem içeriğini temsil eder. Burada  $T$ ; sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ) ifade etmektedir (Henderson, 1952).

Tane sarı mısırın havanın farklı sıcaklık ve bağıl nem değerleri için denge nemi değerleri Tablo 3' de verilmiştir (Yağcıoğlu, 1999).

**Tablo 3.** Tane mısırın bağıl nem ve sıcaklığa göre denge nem değerleri

		Mısır denge nemi (%)									
Ürün	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	Bağıl nem (%)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Mısır (tane, sarı)	10	6,6	8,0	9,3	10,8	12,2	13,8	15,2	17,5	21,8	
	32	4,9	6,6	7,7	9,3	10,8	12,4	14,0	16,2	19,3	
	49				8,36	10,0	11,2	13,1	14,9		
	68				7,4	8,4	10,0	11,5	12,2		

#### Difüzyon katsayısı

Sabit sıcaklıkta (izotermal) kütle iletimi koşullarında nem, kısmi buhar basıncı, ozmotik basınç ve bazı özel durumlarda da ürün içinde gelişen basıncın etkisiyle yer değiştirir. Ürün içindeki suyun, bir bölümünden başka bir bölümüne iletimin difüzyon ile meydana geldiği kabul edilmektedir. Fick difüzyon yasası (Curcio ve ark.,2008);

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla(-D_{eff}\nabla M) = 0 \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Mısırın neminin sıcaklığa bağlı olarak etkilidir. Mısırın  $0,15 < M < 0,30$  aralığında kuru baza göre nem içeriği ve  $30 < T < 80$  sıcaklık aralığında difüzyon katsayısı  $D_{eff}$  ( $\text{cm}^2\text{h}^{-1}$ ) ise (Yağcıoğlu,1999);

$$D_{eff} = 4,89 \cdot 10^{-4} \exp(0,0519 T) \quad (5)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Yine başka bir çalışmada difüzyon katsayısı (Zhang ve ark., 2013) eşitlik 6'da verilmiştir.

$$D_{eff} = 7,817 \cdot 10^{-5} \exp(5,5 M) \exp(-4850 T) \quad (6)$$

#### *Yığın yoğunluğu*

Mısır numune kütlelerinin, dökme numunenin kapladığı hacme oranı olarak tanımlanır ve  $\text{kg m}^{-3}$  cinsinden ifade edilir. Yığın hacim, taneler arası hava ve tane hacmini içerir. Tahıl ticaretinde,  $\text{kg hL}^{-1}$  ( $\text{lb / bu}$ ) olarak ifade edilen ölçülen tahıl hacminin kütlesi olarak tanımlanan test ağırlığı terimi kullanılır (Day, 1964):

$$\rho_b = \varepsilon \rho_t \quad (7)$$

Burada  $\varepsilon$  gözenekliliği,  $\rho_b$  yığın yoğunluğu ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $\rho_t$  partikül yoğunluğu ( $\text{kg m}^{-3}$ ) ifade eder.

#### *Gözeneklilik*

Taneler arası havanın kapladığı hacmin, toplu numunenin toplam hacmine oranı olarak tanımlanır ve yüzde olarak ifade edilir. Genellikle gözeneklilik, bir numunenin yığın ve partikül yoğunluklarından hesaplanır (Jayas ve Cenkowski, 2016):

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \times 100 \quad (8)$$

#### *Yuvarlaklık*

Bir tanenin yuvarlaklığı, çekirdeğin en sabit konumunda yansıtılan alanının en küçük çevreleyen dairenin alanına oranı olarak tanımlanır (Jayas ve Cenkowski, 2016).

$$Y = \frac{A_p}{A_c} \quad (9)$$

Burada  $A_p$ : akışa veya yüzeye normal bir cismin öngörülen alanı ( $\text{m}^2$ ) ve  $A_c$ : en küçük çevreleyen dairenin alanı ( $\text{m}^2$ )'dir.

#### *Eşdeğer çap, $d_e$*

Hacmi tane çekirdeğinin hacmine eşit olan bir küre, çekirdeğin eşdeğer küresi olarak tanımlanır. Eşdeğer hacimli kürenin çapı, çekirdeğin eşdeğer çapı olarak tanımlanır. Ortalama eşdeğer çekirdek hacmi, bir parçacık yoğunluğu yöntemi kullanılarak ve çekirdeklerin sayılmasıyla belirlenebilir. Eşdeğer çap ölçülen hacimden şu şekilde hesaplanır (Jayas ve Cenkowski, 2016).

$$d_e = \left(\frac{6V_e}{\pi}\right)^{1/3} \quad (10)$$

Genel olarak, 1000 çekirdeğin (rastgele seçilen) kapladığı hacim ölçülür ve ortalama eşdeğer hacim ve çap hesaplanır.

#### *Geometrik ortalama çap, $d_g$*

Tahıl çekirdeklerinin şeklini tanımlamak için kullanılan başka bir terimdir (Jayas ve Cenkowski, 2016).

$$d_g = (a \times b \times c)^{1/3} \quad (11)$$

Fiziksel olarak, a, b ve c terimleri, çekirdeği tamamen kapatacak olan en küçük paralel sırasıyla uzunluğu, genişliği ve yüksekliğidir. Endüstriyel mısırdaki kullanılan değerler Tablo 4 'de verilmiştir.

**Tablo 4.** Mısır tanesi için değerler

Tohum	Eşdeğer çap $d_e$ (mm)	Yüzey alanı $A$ (mm <sup>2</sup> )	Hacim $V_e$ (mm <sup>3</sup> )	Yığın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ) (%25 y.b)	Gözeneklilik (%)	Partikül yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Kaynak
Mısır	7,37	170	209	721	44	1270	(ASAE,1993; Bekasov ve Denisov,1952)

Silo tasarımında olduğu gibi silo tipi kurutma sistemlerinde de dikey yüzeylere karşı sürtünme katsayısına ihtiyaç vardır. Yapısal malzemelere karşı sürtünme katsayıları; çeşitli yapısal yüzeylere karşı kayma sürtünme katsayıları bir devirme masası kullanılarak belirlenir. Mısırın çelik yüzey ile sürtünme katsayısı 0,2 olarak alınabilir. Bu değer yanal yüklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

#### Özgül ısı

Isı ve kütle geçişi hesaplamalarında ürünün özgül ısısına ihtiyaç duyulmaktadır. Nemli bir tarımsal ürünün özgül ısısı, kuru,  $c_{kb}$  veya yaş,  $c_{yb}$ , kütlesi ile ilişkilendirilebilir. Deneysel olarak, kuru kütlelerinin özgül ısısı,  $c_{kuru}$  ve ürünündeki özgül su ısısının toplamı olarak gösterilmiştir. Aşağıdaki bağıntı, ürünün 1 kg kuru kütlesi için geçerlidir (Zhang ve ark.,2013);

$$c_{kb} = c_{kuru} + c_{su}M \quad (12)$$

Burada  $c_{kuru}$ ; kuru kütlelerinin özgül ısısı,  $c_{su}$ ; ürünündeki özgül su ısısı'dır.  $M = 0,23$  (k.b.); ik sıcaklık  $T_0 = 293K$ ; kurutma sıcaklığı  $T_1 = 328K$ ,  $T_2 = 338K$  ve  $T_3 = 348K$  (Jia ve Cao, 1995) . Mısır tanesinin yoğunluğu (Neményive ark., 2000)  $\rho = 1150 \text{ kg m}^{-3}$ ; havanın yoğunluğu  $\rho_{hava} = 1,29 \text{ kg m}^{-3}$ 'tür. Özgül ısı şu şekilde ifade edilirse (Zhang ve ark.,2013);

$$cp_{mısır} = 3379M + 1433 \quad (13)$$

$$cp_{mısır} = 2565M + 1272,7 \quad (14)$$

Ortalama özgül ısı  $cp_{\text{mısır}} = 2000 \text{ J/(kg K)}$ ; buharlaşan suyun gizli ısısı (Neményi ve ark., 2000)  $h_{fg} = 2256267 \text{ J kg}^{-1}$ ; yüzey kütle transfer katsayısı  $h_m = 0,05 \text{ m s}^{-1}$ 'dir (Haghighi ve Segerlind, 1988).

Yüzey ısı transfer katsayısı (Cao ve Zhu, 2001);

$$h_t = 100 G 0,49 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (15)$$

Burada  $G$ , havanın kütle akış hızıdır ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ).

Isıl iletkenlik (Zhang ve ark., 2013);

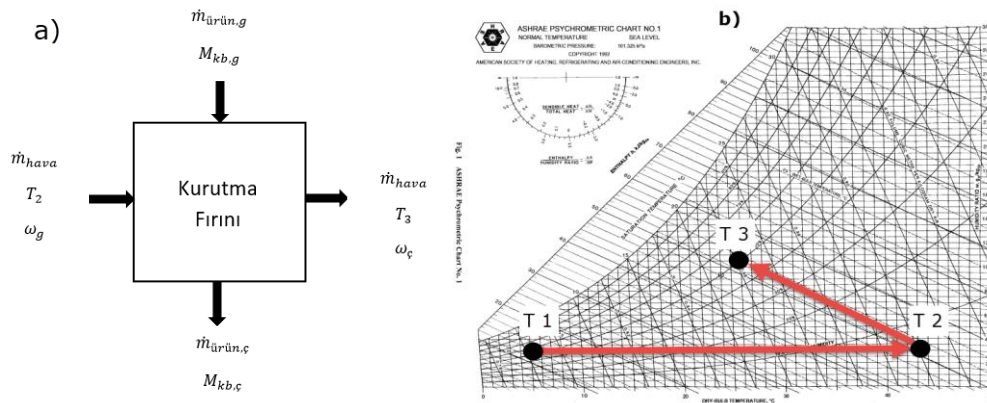
$$\lambda = \exp(-1,74 - 3,7M + 4,72 \times 10^{-3}T + 6,48M^2 - 1,5 \times 10^{-4}T^2 + 6,27 \times 10^{-2}MT) \quad (16)$$

$\lambda$  mısır ısıl iletkenlik ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $M$  nem içeriği (kuru baz);  $T$  mısır tanesinin sıcaklığı ( $\text{K}$ )'dir.

### 3.2. Metot

#### Kütle ve enerji denklileri

Endüstriyel kurutma fırınlarının boyutlandırılmasında sürekli akış kabulü yapılarak kütle ve enerji denklileri kullanılır. Tarım ürünlerinin kurutulmasında kullanılan hava, hem üründen nemin buharlaşması için gerekli ısıyı sağlayan hem de oluşan su buharını ortamdaki uzaklaştıran bir akışkan ortamı olarak görev yapmaktadır. Kurutucu akışkanın (egzoz gazı veya atm havası) özellikleri psikometrik bağıntılar yardımıyla hesaplanabilir. Şekil 10'da verilen psikometrik diyagramda atmosfer havası, dışarıdan enerji harcanarak  $T_1$  koşullarından  $T_2$  sıcaklığına getirilip kurutma fırınına girer.  $T_2$  sıcaklığındaki kurutma havası, üründeki nemin buharlaşması ile yaş termometre sıcaklığı sabit kalacak biçimde nemlenerek kurutma fırınıni terk eder.



Şekil 10. a ve b kurutma fırını enerji gösterimi ve psikometrik diyagram

Kurutucu akışkan (hava) ürün tabakaları arasında geçerken aldığı su buharından dolayı, başlangıçtaki mutlak nemi " $\omega_1$ " gibi bir değerden " $\omega_2$ " gibi bir başka değere yükselir (Yağcıoğlu, 1999; Çelik ve ark., 2021b). Kurutma işlemi sırasında, üründen buharlaştırılan su miktarı, kurutma havasının kazandığı su miktarına eşit olmalıdır. Buna göre buharlaştırılan su için kütle denkliği;

$$\dot{m}_{\text{ürün}}(M_{kb,ilk} - M_{kb,son}) = \dot{m}_{hava}(\omega_2 - \omega_1) \quad (17)$$

$$\dot{m}_{hava} = \frac{\dot{m}_{\text{ürün}}(M_{kb,ilk} - M_{kb,son})}{\Delta\omega} \quad (18)$$

Burada  $\dot{m}_{hava}$ ; havanın kütleli debisi (kg/s),  $\dot{m}_{\text{ürün}}$ ; ürünün kütleli debisidir (kg/s).

Sürekli akışlı açık sistem için enerjinin korunumu termodinamiğin birinci yasası ile ifade edilebilir (Çelik ve ark., 2021b);

$$\sum E_g = \sum E_{\zeta} \quad (19)$$

Burada  $E_g$  ve  $E_{\zeta}$ ; sisteme giren ve çıkan toplam enerjidir.

$$m_{\text{ürün}}h_{ü,g} + m_{hava}h_2 = m_{kk}h_{ü,\zeta} + m_{hava}h_3 + Q_{kayıp} \quad (20)$$

Ürünün giriş ve çıkıştaki entalpi değerleri:

$$h_{ü,g} = (c_{p,\text{ü}} + M_{kb,g}c_{su})T_{ü,g} \quad (21)$$

$$h_{ü,\zeta} = (c_{p,\text{ü}} + M_{kb,\zeta}c_{su})T_{ü,\zeta} \quad (22)$$

Burada  $c_{p,\text{ü}}$  ve  $c_{su}$ , sırasıyla ürünün kuru kütleli ısı değeri ve suyun özgül ısı değeri. Kurutma sırasında havayı ısıtmak için gerekli ısı enerjisi (Ünal ve ark., 2020);

$$\dot{Q} = \dot{m}_{hava}(h_2 - h_1) \quad (23)$$

Burada  $h_1$  ve  $h_2$  ısıtıcıya giriş ve çıkış entalpilerini temsil eder. Alman Tarım Derneği (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft) raporlarında sunulan tahıl kurutucuları için değerlendirme endekslerine göre tasarım hesaplamalarında standart koşullar; hava sıcaklığı 5°C, bağıl nem %80, hava basıncı 0,1013 MPa olarak alınmaktadır (Nowaka ve Przystupad, 2019). Hava için ısıtıcıya giriş ve çıkış entalpi değeri (Liu ve ark., 2015) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$h_{1 \text{ veya } 2} = 1,005Ta + \omega_a((1,86Ta) + 2501) \text{ kJ/kg} \quad (24)$$

Burada  $T_a$ ; atmosfer sıcaklığıdır.

Havanın özgül hacmi;

$$v = 22,4 \left( \frac{1}{29} + \frac{\omega_a}{18} \right) \frac{(Ta + 273) Ps}{273 Pa} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (25)$$

Burada  $\omega_a$ ; havanın özgül nemi (kgsu/kgkh),  $P_s$ ; standart atmosfer basıncı (MPa),  $P_a$ ; atmosfer basıncıdır (MPa).

Atmosferik havanın özgül nemi (Güneş, 2009);

$$\omega = 0,622 \frac{P_{sa}\varphi_{as}}{P - P_{sa}\varphi_{as}} \text{ kgsu/kgkh} \quad (26)$$

ile hesaplanır. Burada  $\varphi_{as}$  standart kurutma koşullarındaki bağıl nem,  $P_s$  standart kurutma koşullarındaki hava basıncıdır. Bağıl nem  $\varphi_s$ , Krischer yöntemi kullanılarak geliştirilen formül kullanılarak hesaplanır (Krischer ve Kast, 1978).

$$\varphi_s = \varphi \frac{PaPs}{Pt^2} \quad (27)$$

Burada,  $P_a$  atmosfer basıncı (0,992 MPa)  $P_s$  standart atm basıncı 1,013 MPa,  $P_t$  doymuş hava basıncı 0,1 MPa olarak alınır.

Kurutma fırınlarında verim genellikle ısı enerjisinden faydalanma oranı ile ifade edilmektedir. Isıdan faydalanma oranı,  $IFO$  (Mondal ve ark.,2019);

$$IFO = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_1} \quad (28)$$

Kurutucunun ısıtma ünitesinin gücü  $\dot{E}$  ( Jokiniemi ve Ahokas, 2014);

$$\dot{E} = qV 3600, kW \quad (29)$$

Burada,  $q$  yakıtın ısı değeri (kJ/kg),  $V$  harcanan yakıtın hacimsel debisidir, (m<sup>3</sup>/saat). Özgül ısı enerjisi tüketimi  $E$ , standart kurutma koşulları altında buharlaştırmak için aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır (Lingayat ve ark., 2020):

$$E_{Toplam} = SEC + E_{Tahıl} + E_{\Delta h}, kJ/kg \quad (30)$$

Standart kurutma koşulları için değişen tahıl sıcaklığından kaynaklı ilave gerekli enerji,  $E_{Tahıl}$ , değeri;

$$E_{Tahıl} = \frac{m_{mısır} c_{mısır} (T_a - T_s)}{m_s}, kJ/kg \quad (31)$$

Burada  $T_a$ ; atmosfer sıcaklığı,  $T_s$ ; standart kurutma koşullarındaki sıcaklık,  $m_s$ ; buharlaştırılan su kütlesidir ( $T_s=5^\circ C$ ). Ancak, bu denklem sadece kurutucuya temin edilen tahılın sıcaklığı kurutma sırasında ortam hava sıcaklığına eşitse uygulanmalıdır. Eğer kurutma koşulları için ayarlanan sıcaklık değeri standart kurutma koşulları için ayarlanan sıcaklıktan farklı ise,  $E_{\Delta h}$ ;

$$E_{\Delta h} = \frac{Q(h_{hava} - h_{hava-s})(1 + \omega_a)}{3600 v m_s}, kJ/kg \quad (32)$$

Termal enerji;

$$\dot{E}_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} CV_{yakıt} t \quad (33)$$

Burada  $\dot{m}_{yakıt}$ ; tüketilen yakıt kütleli debisi,

Kurutma işlemi sırasında üründen 1 kg suyu buharlaştırmak için kullanılan enerji miktarı olan özgül enerji tüketimi (SEC), denklem (31) kullanılarak hesaplanmıştır (Yağcıoğlu,1999).

$$SEC = \frac{E}{m_s} \quad (34)$$



Kurutma fırınına giren kurutucu akışkanın enerjisi, üründeki nemi buharlaştırmak için kullanılır. Bu nedenle kurutucu akışkanın sıcaklığı düşer. Kurutma havasının sıcaklık değişimi enerji denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır; (Çelik ve ark., 2021a);

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-ha}{\rho_h V_h c_h + \rho_h V_h \omega c_{su}} (T - \theta) \quad (35)$$

Burada  $a$  sembolü, spesifik alandır ( $m^2 m^{-3}$ ) ve mısır için 784'e eşittir. Hacimsel ısı transfer katsayısı  $h_V$ , aşağıdaki gibi yazılırsa (Liu ve ark., 2015);

$$h_V = 0,2755 \rho_h V_h c_h a \left( \frac{2r_c \rho_h V_h}{\mu_h} \right)^{-0,34} \quad (36)$$

Burada  $V_h$ ; havanın hızı (m/s),  $\mu_h$ ; havanın vizkozitesi (kg/mh),  $\rho_h$ ; havanın yoğunluğudur ( $kg/m^3$ ).

#### *Basınç düşümü tahmini*

Yüksek tonajlı mısır kurutma makinelerinde mısır dairesel delikli kesite yerleştirilerek, sıcak hava çapraz olarak (kule tipi mısır kurutma makinesi) gözenekli ortama fan yardımıyla sevk edilir. Gözenekli bölgedeki basınç düşüşü ile havanın sevk edildiği kanal geometrilerinde yerel kayıpların ilave edilmesi ile toplam basınç düşümü tahmin edilebilir (Giner ve Denisenia, 1996; Abou-El-Hana ve Younis, 2008).

$$(\Delta P)_{Toplam} = \Delta P_{poroz} + \Delta P_{yerel} \quad (37)$$

Gözenekli bölgedeki basınç düşüşü metre uzunluk başına, ikinci dereceden denklem ile hesaplanabilir (Giner ve Denisenia, 1996; Abou-El-Hana ve Younis, 2008).

$$\Delta P_{porozite} = (R\dot{V} + S\dot{V}^2)L \quad (38)$$

Burada  $L$ ; yatak derinliğini ifade etmektedir. Denklemden yer alan  $S$  ve  $R$  katsayılarının ürün tipine göre farklılık göstermekte ve tane mısır için;

$$R = 1,12 \frac{c_1}{c_2} \quad (39)$$

$$S = 0,346c_2 \quad (40)$$

olarak verilmektedir. Burada mısır taneleri için  $c_1$  ve  $c_2$  sabitleri sırasıyla 2,07E+4 ve 30,4'tür. Ani daralan ve genişleyen kanallar için yerel kayıplar;

$$\Delta P_{yerel} = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (41)$$

Burada  $K$ , ani daralmalar için yerel kayıp faktörüdür.

$$K = 0,75 \left[ 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right] \text{ ve } \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 > 0,715 \quad (42)$$

Burada  $D$ , hidrolik çapı temsil eder.

Benzer şekilde ani genişleme için;

$$K = \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right)^2 \quad (43)$$

Ayrıca yüzde 40 açık alan oranına sahip delikli plakalar için (Çelik ve ark., 2021a);

$$K = [(0,707(1 - f)^{0,375} + 1 - f)]^2 \frac{1}{f^2} \quad (44)$$

$f$  açık alan oranıdır ve değeri % 40 olarak alınır. Kurutma makinesindeki fan gücü aşağıdaki denkleme göre hesaplanır (Mondal ve ark., 2019);

$$P = \frac{\Delta P \dot{V}}{\eta} \quad (W) \quad (45)$$

Burada  $\eta$ , fanın statik verimini  $\dot{V}$ ; hacimsel debiyi ifade etmektedir. Fan için elektrik tüketimi (Mondal ve ark., 2019);

$$E_{fan} = \frac{\Delta P \dot{V}}{\eta} \quad (46)$$

Elektrik enerjisi tüketimi aşağıdaki denkleme hesaplanır (Abeyrathna ve Amaratunga, 2017)

$$\dot{E}_{elk} = t \sqrt{3UI \cos \phi} \quad (47)$$

Burada  $U$  şebeke voltajı,  $I$  akım,  $\cos \phi$  güç faktörü,  $t$  zaman (sn) ifade eder.

#### 4. Sonuç

Endüstri alanında mısır kurutucular önemli yer tutmaktadır. Mısır kurutucularında prensip, çalışma şekli ve ürünün özellikleri, kapasite gibi verilerin bilinmesi kurutucuların tasarımında imalatı ve kontrol sistemlerinin teknolojik olarak geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Endüstri alanında tarımsal ürünlerin kurutulması sürecinde ürünün özelliklerinin bozulmaması ve kurutma teknolojilerinin geliştirilmesi için matematiksel hesaplamalar önemli yer tutmaktadır. Ar-ge çalışmalarıyla kurutucu tiplerinin geliştirilmesi çalışmalarına ağırlık verilmelidir.

Tarımsal ürünlerin kendine has kuruma davranışı olup, farklı kurutma tekniklerinin kurumaya etkisi deneysel süreç ile belirlenir. Özellikle sürekli akışlı tahıl kurutma sistemlerinde, ürünün giriş nem değeri tahıl boşaltma hızı ile ilişkili olup, belli konumlara yerleştirilmiş sıcaklık ölçümleri ve nihai nem ölçümleri ile kontrol edilirler. Tahıl kurutma makinelerinin tasarımı için kütle ve enerji korunumu, ısı geçişi, kütle geçişi, gözenekli ortamda hava akışı, katı kütle akışı ve psikometrik bağıntılara ihtiyaç duyulur. Bu derleme makalesinde, kurutmanın temelleri, kurutma sistemleri, ürünlerinin kurutma özellikleri ve kinetiği ve kurutma özelliklerini etkileyen faktörler kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. Ürün kalitesini iyileştirmek için, tasarım parametrelerinin optimize edilmesi önemlidir. Numune içindeki nem ve sıcaklık dağılımının ayrıntıları, çeşitli çalışma koşulları altında

malzemelerin kuruma özellikleri, etkin nem yayılımı ve aktivasyon enerjisi değerleri, bir kurutucunun başarılı tasarımı ve çalışması için son derece önemlidir. Bu parametrelerin tahmini, eş zamanlı ısı ve kütle transferi modellemesi ile mümkündür ve bu tür birçok model çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Yazarlar, endüstriyel düzeydeki kurutucularda gelişmiş kurutma özellikleri ve daha az enerji tüketimi ile çeşitli gıda malzemelerinin kurutulması için umut verici sistemlerin olduğunu ortaya koymuştur. Araştırma makaleleri, kurutma teknolojilerinin çoğunun henüz laboratuvar veya deneysel aşamada olduğunu vurgulamışlardır. Geleceğin araştırmaları endüstriyel ölçekte büyümeye öncelik vermelidir. Bu teknolojileri endüstriyel düzeye yükseltmek veya yenilikçi kurutucuların tasarımı için daha fazla olasılık, gıda işleme endüstrileri için çok faydalı olacaktır. Gelecekte, kurutma ile ilgili sorunları çözmek ve kurutma işlemi optimizasyonu için YSA, bulanık mantık, yapay zekâ vb. mükemmel bir araç olarak uygulanabilir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Makalede ,“Katkı Oranına” göre yazarlar sıralamasına uyulmuş olup, katkı sağlamıştır.

### **Kaynaklar**

- Abeyrathna RMRD., Amaratunga KSP. Use of heat pump dehumidifiers on industrial drying of chili. International Journal of Scientific and Research Publications 2017; 7(12): 105-110.
- Abou-El-Hana NH., Younis MA. Pressure drop through shelled corn as affected by airflow rates, moisture content and air temperature. Misr J. Ag. Eng. Process Engineering 2008; 25(3): 944-956.
- ASAE. D241.4 Feb. Density, specific gravity, and mass–moisture relationships of grain for storage. 40th ed., Standards, Engineering Practices, and Data (Am. Soc. Ag. Eng.), St. Joseph, MI; 1993; 408–410.
- Asemu AM., Habtu NG., Delele MA., Subramanyam B., Alavi S. Drying characteristics of maize grain in solar bubble dryer. J Food Process Eng.2019; 43: 1-19, e13312.
- Bekasov AG., Denisov NJ. Crop handling after drying (in Russian), Zagotizdat, Moscow 1952.
- Chao C., Zhu W. Computer simulation of drying technology process of farm products. Chinese Agriculture Press, Beijing, 2001 China.
- Chua KJ., Chou SK., Yang WM. Advances in heat pump systems: a review. Applied Energy 2010; 87: 3611-3624.
- Curcio S., Aversa M., Calabro V., Iorio G. Simulation of food drying: FEM Analysis and Experimental Validation. Journal of Food Engineering 2008; 87: 541–553.

- Çelik E., Parlak N., Çay Y. Experimental and numerical study on drying behavior of corn grain. *Heat and Mass Transfer* 2021a; 57: 321-332.
- Çelik E., Parlak N., Çay Y. Exergy and energy analyses of corn drying process: an experimental study in a laboratory-scale dryer. *Heat Transfer Research* 2021b; 52(3): 1–13.
- Çelik E., Parlak N., Çay Y. Development of an integrated corn dryer with an indirect moisture measuring system. *Sâdhanâ* 2022; 47: 1-8.
- Day CL. Device for measuring voids in porous materials. *Agric. Eng.* 1964; 45(1): 36–37.
- FAO. Dünya Gıda ve Tarım Örgütü. FAOSTAT, Livestock primary. 2019, FAO Statistical Database (www.fao.org)
- Giner SA., Denisienia E. Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1996; 63(1): 73-85.
- Günerhan H. Endüstriyel kurutma sistemleri. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, Temel Bilgiler, Tasarım Ve Uygulama Eki* 2005; 36(13): 1-10.
- Güneş ÇN. Gıda kurutma sistemlerinin ekserji Analizi. Doktora Tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 2009.
- Güngör A., Özbalta N. Endüstriyel kurutma sistemleri. III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Ve Sergisi, TES 046 Bildiri 1977:737-747.
- Haghighi K., Segerlind LJ. Modeling simultaneous heat and mass transfer in anisotropic sphere-a finite element approach. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 1988; 31(2): 629-637.
- Henderson SM. A Basic concept of equilibrium moisture. *Agric. Eng.* 1952; 33(1): 29–32.
- Hung N., Martinez R., Tuan TV., Gummert M. Development and verification of a simulation model for paddy drying with different flatbed dryers. *Plant Production Science* 2019, 22(1): 119-130.
- Jangam SV., Law CL., Mujumdar AS. Drying of foods vegetables and fruits, basic concepts and definitions 2010; 1: 13-29.
- Jayas DS., Cenkowski S. Grain property values and their measurement, Editor Marcel Dekker. *Handbook of Industrial Drying: hygroscopic properties*, 24 chapter, New York 2016, Basel.
- Jia C., Cao C. Process of tow-dimensional heat and mass transfer in corn kernel. *Journal of Beijing Agriculture Engineering University* 1995; 15(1): 45–51.
- Jokiniemi HT., Ahokas JM. Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. *Biosystems Engineering* 2014; 121: 209 -220.
- Krischer O., Kast W. *Trocknungstechnik* B and 1, die wissenschaftlichen grundlagen der trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer, 1978, Berlin.
- Krokida MK., Maroulis Z. Quality changes during drying of food materials, drying technology in agricultural and food sciences. *Science Publishers* 2000; Chapter 7.

- Kovaci T., Dikmen E., Şencan Şahin A. Kurutma sistemleri, enerji tüketimleri ve ürün kalitesine etkileri ve örnek sistem tasarımı. *Teknik Bilimleri Dergisi* 2018; 8(2): 25-39.
- Li B., Zeng Z., Zhang X., Zhang Y. Study on the variable-temperature drying process of corn drying in an industrial corn-drying system equipped with a self-adaptive control heat exchanger. *Applied Sciences* 2021; 11: 2772.
- Lingayat AB., Chandramohan VP., Raju VRK., Meda V. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops–dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. *Applied Energy* 2020; 258: 114005.
- Liu Z., Wu Z., Wang X., Song J., Wu W. Numerical simulation and experimental study of deep bed corn drying based on water potential. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering* 2015; 13.
- Mondal HT., Shiplu KSP., Sen KP., Roy J., Sarker MSH. Performance evaluation of small scale energy efficient mixed flow dryer for drying of high moisture paddy. *Drying Technology* 2019; 37(12): 1541–1550.
- Mondal HT., Hossain A., Sheikh AM., Akhtaruzzaman MD., Sarker SH. Energetic and exergetic investigation of a mixed flow dryer: A case study of maize grain drying. *Drying Technology* 2021; 39(4): 466–480.
- Mothibe KJ., Wang CY., Mujumdar AS., Zhang M. Microwave-assisted pulse-spouted vacuum drying of apple cubes. *Drying Technol.* 2014; 32: 1762–1768.
- Mujumdar AS. *Handbook of industrial drying* 2007. USA: CRC Press
- Neményi M., Czaba I., Kovács A., Jáni T. Investigation of simultaneous heat and mass transfer within the maize kernels during drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 2000; 26(2): 123–135.
- Nowaka J., Przystupab W. Methods for assessing energy efficiency of grain dryers. *Agricultural Engineering* 2019; 23(2): 39-47.
- Obeng-Akrofi G., Akowuah JO., Maier DE., Addo A. Techno-economic analysis of a crossflow column dryer for maize drying in Ghana. *Agriculture* 2021; 11: 568.
- Silva V., Costa JJ., Figueiredo AR., Nunes J., Nunes C., Ribeiro TIB., Pereira B. Study of three-stage intermittent drying of pears considering shrinkage and variable diffusion coefficient. *Journal of Food Engineering* 2016; 180: 77-86.
- Szadzinska J., Lechtanska J., Kowalski SJ., Stasiak M. The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. *Ultrason Sonochem* 2017; 34: 531-539.
- Raghavan VGS., Sosle V. Grain drying, Editor Marcel Dekker, *Handbook of Industrial Drying: hygroscopic properties*, 24 chapter. New York 2006, Basel.
- TOB. Tarım ve Orman Bakanlığı Tohumluk Tescil Ve Sertifikasyon Merkez Müdürlüğü, Ankara 2021, TÜİK. Türkiye İstatistik Kurumu verileri, Ankara; 2020.

- Türkan B. Endüstriyel malzemelerde eşzamanlı ısı ve kütle transferinin deneysel ve nümerik incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi 2020.
- Ünal F., Bulut H., Kahraman A. Lpg yakıtlı endüstriyel yatay tip mısır kurutma tesisinin enerji ve maliyet analizi. DÜMF Mühendislik Dergisi 2020; 11(1) : 161-170.
- Yağcıoğlu A. Tarım ürünleri kurutma tekniği, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 536, Bornova-İzmir 1999.
- Yıldırım GH., Öner F. Mısır danesinin fiziksel ve besinsel yapısı, Harman Time 2020; 92: 1-7.
- Zhang S., Kong N., Zhu Y., Zhang Z., Xu C. 3D Model-based simulation analysis of energy consumption in hot air drying of corn kernels. Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering 2013.
- Wang G., Wu W., Xu W., Xu Y., Fu YZD. Exergy analysis of an electric grain drying system with internal circulation of the drying medium of corn. International Journal of Exergy 2021; 37(1): 102-120.
- Web\_1: <http://www.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf> (Erişim tarihi: 14.02.2021)
- Web\_2: <http://test.grainsystems.com.tr> ( Erişim tarihi: 10.03. 2021).
- Web\_3: <http://www.adakurutma.com.tr> ( Erişim tarihi: 10.03. 2021)
- Web\_4: [https://www.stela.de/en/products/mobiler\\_durchlauftrockner\\_universal/](https://www.stela.de/en/products/mobiler_durchlauftrockner_universal/) (Erişim tarihi:10.03.2021).
- Web\_5:<https://gtmfg.com/grain-dryers/> ( Erişim tarihi: 10.03. 2021)